



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

---

Διερεύνηση της επιρροής των παλμών  
κατευθυντικότητας σεισμών κοντινού πεδίου στην  
ανελαστική συμπεριφορά καμπύλης γέφυρας από Ω.Σ.

---

ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ Φ. ΑΓΓΕΛΙΔΑΚΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Ι. Ν. Ψυχάρης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΣΥΝΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Ι. Ταφλαμπάς, Επιστημονικός Συνεργάτης Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2016





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

---

Διερεύνηση της επιρροής των παλμών  
κατευθυντικότητας σεισμών κοντινού πεδίου στην  
ανελαστική συμπεριφορά καμπύλης γέφυρας από Ω.Σ.

---

ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ Φ. ΑΓΓΕΛΙΔΑΚΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Ι. Ν. Ψυχάρης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΣΥΝΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Ι. Ταφλαμπάς, Επιστημονικός Συνεργάτης Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2016





*Στον πατέρα μου Φίλιππο,  
στη μητέρα μου Μαρία,  
στο μεγάλο μου αδελφό Δημήτρη,  
στον αδελφό μου και συνάδελφο Χρήστο.*



Copyright © Βασίλειος Φ. Αγγελιδάκης, 2016  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

**Διερεύνηση της επιρροής των παλμών κατευθυντικότητας σεισμών κοντινού πεδίου στην ανελαστική συμπεριφορά καμπύλης γέφυρας από Ω.Σ.**

Μια μεταπτυχιακή εργασία που υποβλήθηκε στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, σε μερική εκπλήρωση των υποχρεώσεων για την απόκτηση του Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης «Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση των Κατασκευών».

Copyright © Vasileios F. Angelidakis, 2016  
All Rights Reserved

**Investigation of the near-fault directivity pulses' effect on the inelastic behavior of a curved RC bridge.**

A post-graduate thesis submitted to the School of Civil Engineering of NTUA, in partial fulfilment of the requirements for the Diploma of Master of Science in "Analysis and Design of Structures".



# Ευχαριστίες

Κλείνοντας τον κύκλο των μεταπτυχιακών μου σπουδών, θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους συνέβαλαν στην ολοκλήρωση της εργασίας αυτής.

Αρχικά τον κ. Ιωάννη Ψυχάρη, Δρ. Πολιτικό Μηχανικό, Καθηγητή Ε.Μ.Π. και επιβλέποντα της μεταπτυχιακής αυτής εργασίας, για την ανάθεση του θέματος και την ουσιαστική του βοήθεια και καθοδήγηση. Ο κ. Ψυχάρης από τον καιρό της προπτυχιακής μου εργασίας μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με πεδία της Αντισεισμικής Τεχνολογίας, της Τεχνικής Σεισμολογίας και των Μη-Γραμμικών Αναλύσεων, τα οποία θεωρώ θεμελιώδη. Για την ευκαιρία αυτή, αλλά και για το εξαιρετικό κλίμα συνεργασίας που είχαμε, νιώθω την ανάγκη να τον ευχαριστήσω θερμά.

Ολόψυχες ευχαριστίες οφείλω στον κ. Ιωάννη Ταφλαμπά, Δρ. Πολιτικό Μηχανικό και Επιστημονικό Συνεργάτη Ε.Μ.Π. Ο κ. Ταφλαμπάς, με την εξαιρετική του γνώση και οπτική πάνω στους σεισμούς κοντινού πεδίου, συνέβαλε καταλυτικά στο τελικό αποτέλεσμα και γι' αυτό τον ευχαριστώ.

Θερμές ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στον κ. Ιωάννη Ν. Σιγάλα, Επιστημονικό Συνεργάτη Ε.Μ.Π, όπως και στον Υποψήφιο Διδάκτορα Ε.Μ.Π. Χρήστο Γιαννέλο, Πολιτικούς Μηχανικούς, για την παροχή των κατασκευαστικών σχεδίων της γέφυρας που μελετάται στην εργασία αυτή και για την προθυμία τους να βοηθήσουν με καίριες διευκρινίσεις και παρατηρήσεις πάνω στη σύνθετη αυτή κατασκευή.

Ένα εγκάρδιο ευχαριστώ οφείλω στη Βασιλική Καρδούτσου, το Βαγγέλη Αυγενάκη και το Γιάννη Καλυβιώτη, Υποψήφιους Διδάκτορες Ε.Μ.Π, για την ακαδημαϊκή υποστήριξη, τις εύστοχες συμβουλές και το ουσιαστικό τους ενδιαφέρον.

Τέλος, όλα αυτά δε θα ήταν δυνατά χωρίς την υλική και ηθική υποστήριξη από την οικογένειά μου, όπως και τη συνεχή και ειλικρινή αλληλεγγύη από τους καλούς μου φίλους. Θερμά τους ευχαριστώ.

Βασίλειος Φ. Αγγελιδάκης  
Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.  
Αθήνα, Ιούλιος 2016





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ  
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Διερεύνηση της επιρροής των παλμών κατευθυντικότητας σεισμών κοντινού πεδίου στην ανελαστική συμπεριφορά καμπύλης γέφυρας από Ω.Σ.**

Βασίλειος Φ. Αγγελιδάκης

Επιβλέπων: Ψυχάρης Ν. Ιωάννης, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής ΕΜΠ  
Συνεπιβλέπων: Ταφλαμπάς Ιωάννης, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Επιστημονικός Συνεργάτης ΕΜΠ

## Περίληψη

Οι σεισμοί κοντά στην περιοχή ενός ρήγματος εμφανίζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για το μηχανικό, αφού συχνά επιβάλλουν μεγάλες ανελαστικές απαιτήσεις στις κατασκευές. Εντός της ζώνης κοντινού πεδίου οι εδαφικές κινήσεις επηρεάζονται από το μηχανισμό διάρρηξης και τα φαινόμενα κατευθυντικότητας. Στην εργασία αυτή γίνεται μια διερεύνηση της επιρροής των παλμών κατευθυντικότητας σεισμών κοντινού πεδίου στην ανελαστική συμπεριφορά μιας καμπύλης γέφυρας από Ω.Σ. Επιλέγεται ένα δείγμα 90 σεισμικών καταγραφών κοντινού πεδίου, από τις οποίες 55 έχουν ταξινομηθεί ως παλμικές από τον Baker (2007), ενώ οι 35 είναι καταγραφές του Ευρωπαϊκού και ευρύτερου Ανατολικού χώρου, στις οποίες διαπιστώθηκε η ύπαρξη τουλάχιστον ενός παλμού. Από κάθε σεισμική καταγραφή εξάγονται οι πρώτοι 6 παλμοί ταχύτητας με βάση τη μεθοδολογία των Mimoglou et al (2014), όπου η μαθηματική τους παράσταση γίνεται με χρήση του κυματιδίου των Manroeidis and Papageorgiou (2003) και οι περίοδοί τους προκύπτουν από την αιχμή του φάσματος συνέλιξης  $S_d \times S_v$  ( $\xi=5\%$ ). Με υπέρθεση των  $N$  πρώτων παλμών δημιουργούνται για κάθε καταγραφή 6 τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα ως αθροίσματα των πρώτων παλμών.

Στη συνέχεια, ελέγχεται η επιρροή των παλμών στη συμπεριφορά μιας πραγματικής κατασκευής. Ως κατασκευή μελέτης επιλέγεται η Γέφυρα Γ7 (Μέτσοβο-Παναγιά) της Εγνατίας Οδού η οποία προσομοιώνεται στο λογισμικό OpenSees (McKenna et al, 2000). Μέσω μη γραμμικής στατικής ανάλυσης παράγεται η καμπύλη ικανότητας στη διαμήκη διεύθυνση της κατασκευής και μετασχηματίζεται σε φάσμα ικανότητας ADRS ενός ισοδύναμου συστήματος μιας ελευθερίας κίνησης (ΣΜΕΚ), το οποίο φέρεται σε εξιδανικευμένη ελαστική-πλήρως πλαστική μορφή. Με βάση την επιτάχυνση διαρροής ( $\alpha_y$ ) και την περίοδο του ισοδύναμου μονοβαθμίου συστήματος ( $T^*$ ) οι καταγραφές κλιμακώνονται για 3 στάθμες έντασης, ώστε για τις αρχικές καταγραφές να αναπτύσσονται τιμές συντελεστή συμπεριφοράς  $q=2$ ,  $q=3$ ,  $q=4$ . Οι κλιμακώσεις πραγματοποιούνται με χρήση του ελαστικού φάσματος επιταχύνσεων των καταγραφών για απόσβεση  $\xi=5\%$  για την περίοδο του ισοδύναμου ΣΜΕΚ. Η κατασκευή υποβάλλεται σε μη-γραμμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας φόρτισης για τις αρχικές καταγραφές και τα αθροίσματα των  $N$  πρώτων παλμών για τις 3 κλιμακώσεις. Εντοπίζονται οι συχνοτικές περιοχές στις οποίες συναντώνται τα μέγιστα μεγέθη απόκρισης της κατασκευής και έπειτα συγκρίνονται τα αποτελέσματα των αρχικών καταγραφών με εκείνα των αθροισμάτων των  $N$  πρώτων παλμών. Η σύγκριση γίνεται υπολογίζοντας τα σφάλματα διαφόρων μεγεθών γενικής και τοπικής απόκρισης για τις πραγματικές καταγραφές και τα αθροίσματα των παλμών. Δίνονται παρατηρήσεις όσον αφορά το πρόσημο και την τιμή των σφαλμάτων σε σχέση με το λόγο  $T^*/T_{p1}$ , όπου  $T_{p1}$  η περίοδος του πρώτου παλμού ταχύτητας. Υπολογίζονται οι κινητοί μέσοι των σφαλμάτων και εντοπίζεται το πλήθος των παλμών που επαρκούν για τη διατήρηση του μέσου σφάλματος εντός ενός αποδεκτού ορίου 25%.







NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS  
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING  
LABORATORY FOR EARTHQUAKE ENGINEERING

MASTER OF SCIENCE THESIS

**Investigation of the near-fault directivity pulses' effect on the inelastic behavior of  
a curved RC bridge**

Vasileios F. Angelidakis

Supervisor: Psycharis N. Ioannis, Dr. Civil Engineer, Professor NTUA

Co-supervisor: Taflampas Ioannis, Dr. Civil Engineer, Research Associate NTUA

## Abstract

Near-fault ground motions are of interest to the structural engineer, as they tend to put large inelastic demands on structures. Inside the Near-Fault zone ground motions are influenced by the rupture mechanism and the directivity phenomena. In this thesis an investigation is implemented, concerning the effect of directivity pulses on the inelastic behavior of a curved RC bridge. A sample of 90 near-fault seismic records is selected, containing 55 records that were classified as pulse-like ground motions by Baker (2007) and 35 seismic records from European and Eastern seismic events, containing at least one significant velocity pulse. The first 6 pulses are extracted from each record, using the method proposed by Mimoglou et al (2014), in which the mathematical representation of the pulses inherent in the ground motion is given using the wavelet proposed by Mavroeidis and Papageorgiou (2003) and their periods are computed from the peaks of the product spectrum  $S_d \times S_v$  ( $\xi = 5\%$ ). Superpositioning the  $N$  first pulses, 6 synthesized accelerograms are constructed per record, as the sums of the first pulses.

Subsequently, the effect of the pulses is examined on the behavior of a real, existing structure. In this Case Study, the Bridge G7 of Egnatia Highway is employed, which is simulated in OpenSees (McKenna et al, 2000). Implementing a Static Pushover Analysis to the Longitudinal axis of the structure, the capacity curve is derived, which is transformed to an ADRS capacity spectrum of an equivalent SDOF system and it is brought to an idealized elastic-perfectly plastic form. Having the yield acceleration ( $a_y$ ) and the period of the equivalent SDOF system ( $T^*$ ) computed from the Bi-Linear capacity spectrum, each record is scaled for three intensity levels, so that the developed behavior factor for the original records is equal to  $q=2$ ,  $q=3$ ,  $q=4$ . The Scaling is carried out using the elastic acceleration spectra of the original records ( $\xi=5\%$ ). The structure is then subjected to Non-Linear Time-History Analyses for the original records and the synthesized accelerograms that form from the superpositioning of the  $N$  first pulses for the 3 scalings. The frequency domain in which the maximum response is observed is then identified and the response results for the superpositioning of the pulses are compared to those for the original records. The comparison is performed calculating the errors for various general and local response quantities for the original records and the synthesized sums of the first pulses. Observations are given concerning the sign and the value of the errors over the ratio  $T^*/T_{p1}$ , where  $T_{p1}$  is the period of the first velocity pulse. The moving average is then calculated for the errors of each response quantity, scaling and sum of first pulses and the number of the pulses that suffice to keep the error under an accepting threshold of 25% is found.



# Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Σεισμοί κοντινού πεδίου</b>	<b>1</b>
1.1	Εισαγωγή . . . . .	1
1.2	Χαρακτηριστικά εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου . . . . .	1
1.2.1	Φαινόμενο Κατευθυντικότητας (Directivity effect) . . . . .	2
1.2.2	Μόνιμη Στατική Παραμόρφωση (Fling step) . . . . .	5
1.2.3	Επίδραση ανάντη τεμάχους ρήγματος (Hanging wall effect) . . . . .	6
1.2.4	Φαινόμενο κατακόρυφης συνιστώσας (Vertical effect) . . . . .	7
1.3	Ανάλυση με κυματίδια . . . . .	7
1.4	Παράμετροι των εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου . . . . .	14
1.4.1	Μέγιστη Οριζόντια Εδαφική Ταχύτητα . . . . .	16
1.4.2	Περίοδος του παλμού . . . . .	17
1.4.3	Αριθμός Σημαντικών Ημικύκλων . . . . .	22
1.5	Εντοπισμός παλμών κατευθυντικότητας σε ένα εύρος προσανατολισμών . . . . .	23
1.6	Επιρροή στα ελαστικά και ανελαστικά φάσματα απόκρισης . . . . .	27
1.7	Εξαγωγή ανώτερων παλμών ταχύτητας . . . . .	28
1.7.1	Η μέθοδος CPE (Lu and Panagiotou, 2014) . . . . .	29
<b>2</b>	<b>Προσδιορισμός των παλμών μέσω κυματικής ανάλυσης με χρήση του φάσματος συνέλιξης</b>	<b>33</b>
2.1	Εισαγωγή . . . . .	33
2.2	Προσδιορισμός των περιόδων των σημαντικών παλμών . . . . .	34
2.3	Προσδιορισμός των παραμέτρων των κυματιδίων . . . . .	39
2.4	Προτεινόμενη Μεθοδολογία σε Βήματα . . . . .	42
<b>3</b>	<b>Μεθοδολογία διερεύνησης της επιρροής των ανώτερων παλμών στην ανελαστική συμπεριφορά μιας πραγματικής κατασκευής</b>	<b>47</b>
3.1	Εισαγωγή . . . . .	47
3.2	Μεθοδολογία σε βήματα . . . . .	47
3.2.1	Κατασκευή ενός εξιδανικευμένου ισοδύναμου ΣΜΕΚ της κατασκευής . . . . .	47
3.2.2	Απομόνωση των 6 πρώτων παλμών κάθε καταγραφής . . . . .	48
3.2.3	Υπέρθωση των $N$ πρώτων παλμών . . . . .	49
3.2.4	Κλιμάκωση των καταγραφών για 3 στάθμες έντασης . . . . .	50
3.3	Σεισμικές καταγραφές . . . . .	52
3.4	Μη-γραμμική στατική ανάλυση . . . . .	55
<b>4</b>	<b>Περιγραφή της Κατασκευής Μελέτης</b>	<b>59</b>
4.1	Κατάστρωμα . . . . .	59
4.2	Μεσόβαθρα . . . . .	65
4.3	Ακρόβαθρα . . . . .	71
4.4	Θεμελιώσεις . . . . .	72

<b>5</b>	<b>Προσομοίωση της κατασκευής στο OpenSees</b>	<b>73</b>
5.1	Κύριοι άξονες προσομοιώματος . . . . .	73
5.2	Κατάστρωμα . . . . .	73
5.3	Μεσόβαθρα . . . . .	76
5.3.1	Μηχανικά χαρακτηριστικά υλικών . . . . .	79
5.4	Ακρόβαθρα . . . . .	88
5.5	Λοιπά θέματα προσομοίωσης . . . . .	89
5.5.1	Στροφικές αδράνειες . . . . .	89
5.5.2	Ελαστικές διατμητικές παραμορφώσεις . . . . .	90
5.5.3	Στρεπτική στιβαρότητα . . . . .	93
5.5.4	Άκαμπτες περιοχές . . . . .	93
5.5.5	Κατακόρυφα φορτία . . . . .	94
5.5.6	Μητρώο απόσβεσης . . . . .	94
<b>6</b>	<b>Αποτελέσματα Αναλύσεων</b>	<b>97</b>
6.1	Ιδιομορφική ανάλυση . . . . .	97
6.2	Μη-γραμμική στατική ανάλυση . . . . .	99
6.3	Μη-γραμμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας φόρτισης . . . . .	100
6.3.1	Σημεία μέγιστης σεισμικής απόκρισης . . . . .	100
6.3.2	Μεγέθη σεισμικής απόκρισης ως προς $T^*/T_{p1}$ . . . . .	102
6.4	Απόκριση της κατασκευής για τα αθροίσματα των παλμών . . . . .	114
6.5	Σφάλματα των αθροισμάτων των παλμών ως προς τις αρχικές εδαφικές κινήσεις . . . . .	126
6.5.1	Σφάλμα πλαστιμότητας . . . . .	126
6.5.2	Σφάλμα πλαστιμότητας προς συντελεστή συμπεριφοράς . . . . .	128
6.5.3	Σφάλμα $Drift_X M1$ . . . . .	130
6.5.4	Σφάλμα $Drift_X M2$ . . . . .	132
6.5.5	Σφάλμα $Drift_{3D} M1$ . . . . .	134
6.5.6	Σφάλμα $Drift_{3D} M2$ . . . . .	136
6.5.7	Σφάλμα καμπυλότητας στον Πόδα του Μεσοβάθρου M1 ( $\phi_{y-local} M1_{Foot}$ ) . . . . .	138
6.5.8	Σφάλμα καμπυλότητας στην Κεφαλή του Μεσοβάθρου M1 ( $\phi_{y-local} M1_{Head}$ ) . . . . .	141
6.5.9	Σφάλμα καμπυλότητας στον Πόδα του Μεσοβάθρου M2 ( $\phi_{y-local} M2_{Foot}$ ) . . . . .	144
6.5.10	Σφάλμα καμπυλότητας στην Κεφαλή του Μεσοβάθρου M2 ( $\phi_{y-local} M2_{Head}$ ) . . . . .	146
<b>7</b>	<b>Συμπεράσματα</b>	<b>151</b>
<b>A'</b>	<b>Χρονοϊστορίες και φάσματα εδαφικών μεγεθών</b>	<b>157</b>
A'.1	Εδαφική Επιτάχυνση . . . . .	158
A'.2	Εδαφική Ταχύτητα . . . . .	162
A'.3	Ψευδο-φασματική Επιτάχυνση . . . . .	166
A'.4	Ψευδο-φασματική Ταχύτητα . . . . .	170
<b>B'</b>	<b>Σφάλματα μεγεθών απόκρισης</b>	<b>175</b>
B'.1	Σφάλμα Πλαστιμότητας . . . . .	176
B'.2	Σφάλμα Πλαστιμότητας προς Συντελεστή Συμπεριφοράς . . . . .	180
B'.3	Σφάλμα $Drift_X M1$ . . . . .	184
B'.4	Σφάλμα $Drift_X M2$ . . . . .	188
B'.5	Σφάλμα $Drift_{3D} M1$ . . . . .	192
B'.6	Σφάλμα $Drift_X M2$ . . . . .	196
B'.7	Σφάλμα $\phi_{y-local} M1_{Foot}$ . . . . .	200
B'.8	Σφάλμα $\phi_{y-local} M1_{Head}$ . . . . .	204
B'.9	Σφάλμα $\phi_{y-local} M2_{Foot}$ . . . . .	208
B'.10	Σφάλμα $\phi_{y-local} M2_{Head}$ . . . . .	212

# Κατάλογος Σχημάτων

1.1	Σχηματικό διάγραμμα επίδρασης της κατευθυντικότητας της διάρρηξης για ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης. Η διάρρηξη αρχίζει στο υπόκεντρο και διαδίδεται με ταχύτητα περίπου ίση με το 80% της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων. Η εικόνα παρουσιάζει ένα στιγμιότυπο του μετώπου της διάρρηξης σε μία δεδομένη στιγμή (Somerville et al, 1997a).	2
1.2	Σχηματική απεικόνιση του φαινομένου της κατευθυντικότητας των εδαφικών κινήσεων σε θέσεις από και προς τη διεύθυνση της διάδοσης της διάρρηξης (Kramer, 1996 - after Singh, 1985, EERI).	3
1.3	Σχηματική απεικόνιση του φαινομένου της κατευθυντικότητας (Li and Xie, 2007).	3
1.4	Αποτελέσματα της κατευθυντικότητας της διάρρηξης στις καταγεγραμμένες ιστορίες μετακινήσεων του σεισμού στο Loma Prieta (California - 1989) για τις κάθετες (άνω) και τις παράλληλες (κάτω) στο ρήγμα συνιστώσες. (Stewart et al, 2001 - after EERI, 1995).	4
1.5	Σχηματική απεικόνιση των προσανατολισμών της παραμένουσας μετακίνησης και του παλμού κατευθυντικότητας για ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης και για ρήγμα βύθισης (Stewart et al, 2001).	5
1.6	Χρονοϊστορίες για ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης και ρήγμα βύθισης, στο οποίο φαίνονται οι επιρροές της παραμένουσας μετακίνησης και του παλμού κατευθυντικότητας μαζί και χωριστά. (Stewart et al, 2001).	6
1.7	Επίδραση του υπερκείμενου τεμάχους του ρήγματος (Li and Xie, 2007).	6
1.8	Πρότυπα μητρικά κυματίδια (a) Haar, (b) Γκαουσιανό 1 <sup>ης</sup> τάξης, (c) Daubechies 4 <sup>ης</sup> τάξης, (d) Morlet. (Baker, 2007).	8
1.9	Απλοποιημένοι παλμοί που έχουν χρησιμοποιηθεί από ερευνητές (Stewart et al, 2001).	9
1.10	Απλοποιημένες αναπαραστάσεις ημιτονικού παλμού για εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου. Η μέγιστη οριζόντια εδαφική ταχύτητα (PHV) για την παράλληλη στο ρήγμα συνιστώσα θεωρείται ίση με το 50% της PHV στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα (Rodriguez-Marek, 2000).	10
1.11	Παράμετροι που χρησιμοποιούνται τον καθορισμό εξιδανικευμένων ημιτονοειδών παλμών εδαφικής κίνησης (Rodriguez-Marek 2000).	11
1.12	Απαιτούμενες παράμετροι για τον καθορισμό εξιδανικευμένων παλμών ταχύτητας. Τα σύμβολα $N$ , $P$ αντιστοιχούν στην κάθετη και στην παράλληλη στο ρήγμα συνιστώσα αντίστοιχα (Rodriguez-Marek 2000).	12
1.13	Προσέγγιση καταγραφής από το σταθμό E06 στο σεισμό του Imperial Valley (California - 1979) με χρήση του κυματιδίου των Mavroeidis and Papageorgiou και το κυματίδιο Gabor. (a) Κωδωνόσχημες περιβάλλουσες, (b) Ημιτονικά σήματα, (c) Παραγόμενα κυματίδια. (Mavroeidis and Papageorgiou, 2003).	14
1.14	Παράμετροι που καθορίζουν την κατευθυντικότητα της διάρρηξης (Somerville et al, 1997a).	15
1.15	Προβλέψεις μεταξύ διαφορετικών παραμέτρων κατευθυντικότητας (Somerville et al, 1997a).	15

1.16	Σχέσεις εξασθένισης της Μέγιστης Οριζόντιας Εδαφικής Ταχύτητας σε σχέση με την απόσταση από το ρήγμα (Rodriguez-Marek, 2000). . . . .	16
1.17	Προσδιορισμός της περιόδου του παλμού ταχύτητας από τη χρονοϊστορία ταχυτήτων (Rodriguez-Marek, 2000). . . . .	17
1.18	Συσχέτιση της περιόδου του παλμού με το μέγεθος του σεισμού (Rodriguez-Marek, 2000). . . . .	18
1.19	Συσχέτιση της περιόδου του παλμού με το μέγεθος του σεισμού για διαφορετικές εδαφικές συνθήκες (Rodriguez-Marek, 2000). . . . .	18
1.20	Κυματίδιο Daubechies και ημιτονικό σήμα με περίοδο ίση με τη μέγιστη του φάσματος Fourier της κυματομορφής (Baker, 2007). . . . .	19
1.21	Περίοδος παλμού ( $T_p$ ) από τη μέγιστη αιχμή του φάσματος της ταχύτητας σε σχέση με την περίοδο παλμού ( $T_p$ ) από την ψευδο-περίοδο του κυματιδίου για 91 εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου (Baker, 2007). . . . .	20
1.22	Η αρχική κίνηση, ο εξαγόμενος παλμός και η εναπομένουσα εδαφική κίνηση για την εδαφική κίνηση Landers 1992, Yermo Fire Station. (a) Χρονοϊστορίες ταχύτητας (b) Φάσματα ταχύτητας στα οποία φαίνεται ο προσδιορισμός της περιόδου του παλμού με τη χρήση του φάσματος ψευδο-ταχύτητας και μέσω κυματικής ανάλυσης (Baker, 2007). . . . .	21
1.23	Συσχέτιση της $T_p$ (a) με την κοντινότερη απόσταση από το ρήγμα και (b) με τη μέση ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων για το σεισμό του Imperial Valley (1979) (Kardoutsou et al, 2015). . . . .	22
1.24	Σύγκριση αποτελεσμάτων των Kardoutsou et al (2015) με υπάρχουσες σχέσεις της βιβλιογραφίας. . . . .	22
1.25	Χρονοϊστορίες ταχύτητας και οριζόντια τροχιακά σχέδια της κάθετης (FN) και της παράλληλης (FP) στο ρήγμα συνιστώσας για δύο καταγραφές κοντινού πεδίου (Stewart et al, 2001). . . . .	24
1.26	Τιμές του παλμικού δείκτη συναρτήσεως του προσανατολισμού για την καταγραφή EC Country Center από το σεισμό στο Imperial Valley (California - 1979). Οι σκιασμένες επιφάνειες υποδεικνύουν τις διευθύνσεις στις οποίες παρατηρήθηκε ένας σημαντικός παλμός (Shahi and Baker, 2011). . . . .	25
1.27	Χρονοϊστορία ταχύτητας της καταγραφής Tsaotun (TCU075) από το σεισμό του Chi-Chi (Taiwan - 1999). (a) Χρονοϊστορίες στην κάθετη και στην παράλληλη στο ρήγμα διευθύνσεις. (b) Τροχιακό διάγραμμα της ταχύτητας στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα ως προς την παράλληλη (Baker, 2007). . . . .	26
1.28	Τιμές του Παλμικού δείκτη συναρτήσεως του προσανατολισμού για την καταγραφή Tsaotun (TCU075) από το σεισμό στο Chi-Chi (Taiwan - 1999) (Baker, 2007). . . . .	26
1.29	Φασματική επαύξηση ελαστικού φάσματος επιταχύνσεων περί την περίοδο του παλμού κατευθυντικότητας (a) Διάγραμμα καμπύλης πρόβλεψης μαζί με τα πραγματικά δεδομένα (b) Μέση επαύξηση για παλμούς με διαφορετικούς προσανατολισμούς (Shahi-Baker, 2011). . . . .	27
1.30	Λόγοι ανελαστικών προς ελαστικές μετακινήσεις παλμικών καταγραφών (Tothong and Cornell, 2006). . . . .	28
1.31	Προτεινόμενο αναλυτικό προσομοίωμα προσαρμοσμένο στις εδαφικές κινήσεις από τους καταγραφικούς σταθμούς (πάνω) YPT κατά το σεισμό του Izmit (Turkey - 1999) (δύο τεχνητοί παλμοί έχουν συνδυαστεί για να παράξουν τη συνθετική χρονοϊστορία) και (κάτω) σταθμός KOB κατά το σεισμό στο Kobe (Japan - 1995) (τρεις τεχνητοί παλμοί έχουν συνδυαστεί για να παράξουν τη συνθετική χρονοϊστορία) (Mavroeidis and Papageorgiou, 2003). . . . .	29
1.32	Εξαγωγή τριών παλμών από την καταγραφή PCP με χρήση της μεθόδου $CPE_{V-EN}$ . Ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και μετακινήσεων της καταγραφής, κάθε παλμού και των αθροισμάτων τους $S_2(t)$ και $S_3(t)$ (Lu and Panagiotou, 2014). . . . .	31

1.33	Χρονοϊστορία ταχύτητας, γραμμικό και μη γραμμικό φάσμα μετακίνησης για δύο εξαγόμενους παλμούς $P_1(t)$ και $P_2(t)$ και για το άθροισμά τους $S_2(t)$ (Lu and Panagiotou, 2014). . . . .	32
2.1	Καταγραφή G06-320 (Coyote Lake, 1979) (a) χρονοϊστορία ταχύτητας, (b) PSV 5% (Mimoglou et al, 2014). . . . .	35
2.2	Καταγραφή G06-320 (Coyote Lake - 1979): (a) σύγκριση του φάσματος ταχύτητας Fourier με το φάσμα μετακίνησης για μηδενική απόσβεση, (b) $S_d$ 5% (Mimoglou et al, 2014). . . . .	36
2.3	Καταγραφή PCD-164 από το σεισμό στο San Fernando, CA (1971): (a) φάσμα απόκρισης ψευδο-ταχύτητας για απόσβεση 5%. (b) φάσμα απόκρισης μετακίνησης για απόσβεση 5% (Mimoglou et al, 2014). . . . .	36
2.4	Φάσματα συνέλιξης και προσδιορισμός της περιόδου $T_i$ για τις καταγραφές: (a) G06-320 (Coyote Lake - 1979), (b) PCD-164 San Fernando (Mimoglou et al, 2014). . . . .	37
2.5	Σχέση μεταξύ της μέγιστης φασματικής μετακίνησης $S_{d,max}$ και $CAD$ για κυματίδιο M&P και διάφορες τιμές $\gamma$ και $\nu$ . (a) μηδενική απόσβεση (b) απόσβεση 5% (Mimoglou et al, 2014). . . . .	41
3.1	Εξαγωγή των 6 πρώτων παλμών για την καταγραφή από το σταθμό ECC County Center FF στο σεισμό του Imperial Valley (California - 1979). Φαίνεται η αρχική χρονοϊστορία (Original), οι εντοπιζόμενοι παλμοί $P_i$ και οι εναπομένουσες εδαφικές κινήσεις $R_i$ μετά την αφαίρεση των παλμών. . . . .	48
3.2	Ελαστικά φάσματα ψευδοταχύτητας ( $\xi=5\%$ ) για την καταγραφή από το σταθμό ECC County Center FF στο σεισμό του Imperial Valley (California - 1979). Φαίνεται το φάσμα της αρχικής καταγραφής (Original) και τα φάσματα των επιμέρους παλμών $P_i$ . . . . .	49
3.3	Υπέρθωση των 6 πρώτων παλμών για την καταγραφή από το σταθμό ECC County Center FF στο σεισμό του Imperial Valley (California - 1979). Φαίνεται η αρχική χρονοϊστορία (Original) και τα αθροίσματα των πρώτων παλμών $S_i$ . . . . .	49
3.4	Ελαστικά φάσματα ψευδοταχύτητας ( $\xi=5\%$ ) για την καταγραφή από το σταθμό ECC County Center FF στο σεισμό του Imperial Valley (California - 1979). Φαίνεται το φάσμα της αρχικής καταγραφής (Original) και τα φάσματα για τα αθροίσματα των επιμέρους παλμών $S_i$ . . . . .	50
3.5	Κλιμάκωση καταγραφής για τρεις στάθμες έντασης. Φάσμα Ικανότητας και φάσμα ADRS της καταγραφής από το σταθμό VAS2 για το σεισμό της Λευκάδας (2015) Οι κουκκίδες δείχνουν τα σημεία του φάσματος για την περίοδο του ισοδύναμου ΣΜΕΚ με βάση τα οποία πραγματοποιούνται οι κλιμακώσεις. . . . .	51
3.6	Ελαστικό φάσμα Ψευδο-επιταχύνσεων για την καταγραφή από το σταθμό VAS2 για το σεισμό της Λευκάδας (2015) για τρεις κλιμακώσεις. Οι κουκκίδες δείχνουν τα σημεία του φάσματος για την περίοδο του ισοδύναμου ΣΜΕΚ, με βάση τα οποία πραγματοποιούνται οι κλιμακώσεις. . . . .	51
4.1	Τυπική διατομή καταστρώματος. . . . .	60
4.2	Ημιτομή καταστρώματος στο άνοιγμα και στις στηρίξεις. . . . .	60
4.3	Παραβολική μείωση των διαστάσεων της διατομής του καταστρώματος. . . . .	61
4.4	Οριζοντιογραφία της χάραξης. . . . .	62
4.5	Τομή κατά μήκος της χάραξης. . . . .	63
4.6	Μεταβολές των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της διατομής του καταστρώματος στα άκρα των σπονδύλων κατασκευής. . . . .	64
4.7	Προσανατολισμός Μεσοβάθρων ως προς τους καθολικούς άξονες του προσομοιώματος. . . . .	65
4.8	Πλήρης όπλιση Διατομής 1. . . . .	66
4.9	Πλήρης όπλιση Διατομής 2. . . . .	67
4.10	Πλήρης όπλιση Διατομής 3. . . . .	68

4.11	Καθ' ύψος τομή των μεσοβάθρων M1-M2. Αριστερά αναγράφονται συγκεντρωτικά οι εγκάρσιοι οπλισμοί σε κάθε σπόνδυλο. . . . .	70
4.12	Τυπική διατομή ακροβάθρων. Φαίνονται: Τα εφέδρανα εγκιβωτισμένου ελαστικού (Pot Bearings-PB), ο εγκάρσιος περιοριστικός σύνδεσμος (Shear Key-SK), καθώς και οι προσχρυστήρες (Elastometallic Bearings-EB). . . . .	71
4.13	Συνθήκες στήριξης στα ακροβάθρα. Φαίνεται η ελευθερία μετακίνησης σε όλους τους β.ε. λόγω των εφεδράνων εγκιβωτισμένου ελαστικού (PB), καθώς και η δέσμευση της εγκάρσιας μετακίνησης λόγω της ύπαρξης των περιοριστικών συνδέσμων (SK). .	72
5.1	Ισοδύναμες πρισματικές διατομές καταστρώματος που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση. . . . .	75
5.2	Προσομοίωση των διατομών καταστρώματος στο λογισμικό ανάλυσης διατομών <i>Section Designer (CSI, Inc)</i> . . . . .	76
5.3	Στοιχείο κατανεμημένης πλαστικότητας (Distributed Plasticity Element). . . . .	77
5.4	Διατομή Ινών (Fiber Section). Διακρίνονται οι ίνες σκυροδέματος της επικάλυψης και του περισφιγμένου πυρήνα, καθώς και οι σημειακές ίνες χάλυβα. . . . .	77
5.5	Εφαρμογή τεσσάρων σημείων ολοκλήρωσης Gauss-Lobatto σε στοιχείο δυνάμεων (Scott and Fenves, 2006). . . . .	78
5.6	Διατομές ινών μεσοβάθρων M1-M2. (a) Διάταξη ινών στις Διατομές 1 και 2. (b) Διάταξη ινών στις Διατομές 3. . . . .	79
5.7	Μοτονοική συμπεριφορά του προσομοιώματος Steel02 (OpenSeeWiki). . . . .	80
5.8	Ανακυκλική συμπεριφορά του χάλυβα S500s με χρήση του προσομοιώματος Steel02. . . . .	81
5.9	Προσομοίωμα Concrete01 – Μονοτονική Συμπεριφορά (OpenSeesWiki). . . . .	82
5.10	Προσομοίωμα Concrete01 – Ανακυκλική Συμπεριφορά (OpenSeesWiki). . . . .	82
5.11	Προσομοίωμα μη-περισφιγμένου σκυροδέματος EC2-1 και προσομοίωση με χρήση του Concrete01. . . . .	83
5.12	Ανακυκλική συμπεριφορά του προσομοιώματος Concrete04 και μονοτονική περιβάλλουσα (OpenSeesWiki). . . . .	84
5.13	Θλιβόμενα πέλαμα για δύο διευθύνσεις μονοαξονικής κάμψης των βάρων. . . . .	85
5.14	Συμπεριφορά περισφιγμένου σκυροδέματος Διατομής 1 για θλίψη του επιμήκους πέλατος (long flange) ή του κοντού πέλατος (short flange) της διατομής. . . . .	86
5.15	Συμπεριφορά περισφιγμένου σκυροδέματος Διατομής 2 για θλίψη του επιμήκους πέλατος (long flange) ή του κοντού πέλατος (short flange) της διατομής. . . . .	86
5.16	Συμπεριφορά περισφιγμένου σκυροδέματος Διατομής 3 για θλίψη του επιμήκους πέλατος (long flange) ή του κοντού πέλατος (short flange) της διατομής. . . . .	87
5.17	Μονοαξονικοί νόμοι τάσεων-παραμορφώσεων σκυροδέματος επικάλυψης και περισφιγμένου σκυροδέματος για τις τρεις διαφορετικές διατομές κάθε μεσοβάθρου, με ενιαίο περισφιγμένο υλικό ανά διατομή. . . . .	87
5.18	Αντιστοίχιση διατομών στα στοιχεία των μεσοβάθρων. Η χρωματική κλίμακα βρίσκεται σε αντιστοιχία με το συγκεντρωτικό διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων των περισφιγμένων υλικών (σχήμα 5.17) για τις τρεις διαφορετικές διατομές. . . . .	88
5.19	Πλήρες τρισδιάστατο γεωμετρικό προσομοίωμα της κατασκευής στο AutoCAD 3D. . . . .	90
5.20	Τρισδιάστατο προσομοίωμα με διαφάνεια στα μέλη, όπου διακρίνεται το εσωτερικό των μελών. . . . .	90
5.21	Ακριβής γεωμετρία σπονδύλου από την οποία υπολογίζονται οι στροφικές αδράνειες. . . . .	90
5.22	Προσομοίωση της διατμητικής συμπεριφοράς με νόμο δύναμης-παραμόρφωσης σε διατομή ινών με χρήση του Section Aggregator (OpenSeesWiki). . . . .	92
6.1	Πρώτη ιδιομορφή ( $T = 1.748 \text{ sec}$ ): Καμπτική ταλάντωση των μεσοβάθρων με μετατόπιση του καταστρώματος κατά το διαμήκη άξονα. . . . .	97
6.2	Δεύτερη ιδιομορφή ( $T = 1.539 \text{ sec}$ ): Καμπτική ταλάντωση των μεσοβάθρων με μετατόπιση του καταστρώματος κατά τον εγκάρσιο άξονα. . . . .	97



6.3	Τρίτη ιδιομορφή ( $T = 0.920$ sec): Συμμετρική καμπτική ταλάντωση του καταστρώματος στο κατακόρυφο επίπεδο. . . . .	98
6.4	Τέταρτη ιδιομορφή ( $T = 0.818$ sec): Αντισυμμετρική καμπτική ταλάντωση του καταστρώματος στο οριζόντιο επίπεδο. . . . .	98
6.5	Καμπύλη ικανότητας . . . . .	99
6.6	Φάσμα ικανότητας (ADRS) . . . . .	100
6.7	Σημεία μέγιστης σεισμικής απόκρισης για τρεις κλιμακώσεις ( $q = 2, q = 3, q = 4$ ). Με μπλε σημαίνονται τα σημεία μέγιστης μετακίνησης ( $D_{max}$ ), ενώ με κόκκινο τα σημεία μέγιστης τέμνουσας βάσης ( $V_{max}$ ) από κάθε μη-γραμμική ανάλυση χρονοϊστορίας φόρτισης. Ακόμα, φαίνεται το φάσμα ικανότητας στην πραγματική και την εξιδανικευμένη του μορφή. . . . .	101
6.8	Αναπτυσσόμενη πλαστιμότητα μετακινήσεων για $q = 2$ . . . . .	103
6.9	Αναπτυσσόμενη πλαστιμότητα μετακινήσεων για $q = 3$ . . . . .	103
6.10	Αναπτυσσόμενη πλαστιμότητα μετακινήσεων για $q = 4$ . . . . .	103
6.11	Αναπτυσσόμενη πλαστιμότητα μετακινήσεων για $q = 2, q = 3, q = 4$ . . . . .	103
6.12	Λόγος αναπτυσσόμενης πλαστιμότητας μετακινήσεων προς το συντελεστή συμπεριφοράς για $q = 2$ . . . . .	104
6.13	Λόγος αναπτυσσόμενης πλαστιμότητας μετακινήσεων προς το συντελεστή συμπεριφοράς για $q = 3$ . . . . .	104
6.14	Λόγος αναπτυσσόμενης πλαστιμότητας μετακινήσεων προς το συντελεστή συμπεριφοράς για $q = 4$ . . . . .	104
6.15	Λόγος αναπτυσσόμενης πλαστιμότητας μετακινήσεων προς το συντελεστή συμπεριφοράς για $q = 2, q = 3, q = 4$ . . . . .	105
6.16	$Drift_{XM1}$ για $q = 2$ . . . . .	106
6.17	$Drift_{XM1}$ για $q = 3$ . . . . .	106
6.18	$Drift_{XM1}$ για $q = 4$ . . . . .	106
6.19	$Drift_{XM1}$ για $q = 2, q = 3, q = 4$ . . . . .	106
6.20	$Drift_{XM2}$ για $q = 2$ . . . . .	107
6.21	$Drift_{XM2}$ για $q = 3$ . . . . .	107
6.22	$Drift_{XM2}$ για $q = 4$ . . . . .	107
6.23	$Drift_{XM2}$ για $q = 2, q = 3, q = 4$ . . . . .	107
6.24	$Drift_{3DM1}$ για $q = 2$ . . . . .	108
6.25	$Drift_{3DM1}$ για $q = 3$ . . . . .	108
6.26	$Drift_{3DM1}$ για $q = 4$ . . . . .	108
6.27	$Drift_{3DM1}$ για $q = 2, q = 3, q = 4$ . . . . .	108
6.28	$Drift_{3DM2}$ για $q = 2$ . . . . .	109
6.29	$Drift_{3DM2}$ για $q = 3$ . . . . .	109
6.30	$Drift_{3DM2}$ για $q = 4$ . . . . .	109
6.31	$Drift_{3DM2}$ για $q = 2, q = 3, q = 4$ . . . . .	109
6.32	Καμπυλότητα $\phi_{y-localM1Foot}$ για $q = 2$ . . . . .	110
6.33	Καμπυλότητα $\phi_{y-localM1Foot}$ για $q = 3$ . . . . .	110
6.34	Καμπυλότητα $\phi_{y-localM1Foot}$ για $q = 4$ . . . . .	110
6.35	Καμπυλότητα $\phi_{y-localM1Foot}$ για $q = 2, q = 3, q = 4$ . . . . .	110
6.36	Καμπυλότητα $\phi_{y-localM1Head}$ για $q = 2$ . . . . .	111
6.37	Καμπυλότητα $\phi_{y-localM1Head}$ για $q = 3$ . . . . .	111
6.38	Καμπυλότητα $\phi_{y-localM1Head}$ για $q = 4$ . . . . .	111
6.39	Καμπυλότητα $\phi_{y-localM1Head}$ για $q = 2, q = 3, q = 4$ . . . . .	111
6.40	Καμπυλότητα $\phi_{y-localM2Foot}$ για $q = 2$ . . . . .	112
6.41	Καμπυλότητα $\phi_{y-localM2Foot}$ για $q = 3$ . . . . .	112
6.42	Καμπυλότητα $\phi_{y-localM2Foot}$ για $q = 4$ . . . . .	112
6.43	Καμπυλότητα $\phi_{y-localM2Foot}$ για $q = 2, q = 3, q = 4$ . . . . .	112

6.44	Καμπυλότητα $\phi_{y-local}M2_{Head}$ για $q = 2$ . . . . .	113
6.45	Καμπυλότητα $\phi_{y-local}M2_{Head}$ για $q = 3$ . . . . .	113
6.46	Καμπυλότητα $\phi_{y-local}M2_{Head}$ για $q = 4$ . . . . .	113
6.47	Καμπυλότητα $\phi_{y-local}M2_{Head}$ για $q = 2, q = 3, q = 4$ . . . . .	113
6.48	Μετακίνηση του κόμβου ελέγχου κατά το διαμήκη άξονα για $q = 4$ . . . . .	114
6.49	Βρόχος υστέρησης σε επίπεδο Τέμνουσας Βάσης-Μετακίνησης Κόμβου (Ελέγχου) για $q = 4$ . . . . .	115
6.50	Βρόχος υστέρησης σε επίπεδο Τέμνουσας Βάσης Μεσοβάθρου M1-Μετακίνησης Κεφαλής για $q = 4$ . . . . .	115
6.51	Βρόχος υστέρησης σε επίπεδο Τέμνουσας Βάσης Μεσοβάθρου M2-Μετακίνησης Κεφαλής για $q = 4$ . . . . .	116
6.52	Βρόχος υστέρησης σε επίπεδο Ροπής-Καμπυλότητας στον Πόδα του Μεσοβάθρου M1 για $q = 4$ . . . . .	116
6.53	Βρόχος υστέρησης σε επίπεδο Ροπής-Καμπυλότητας στην Κεφαλή του Μεσοβάθρου M1 για $q = 4$ . . . . .	117
6.54	Βρόχος υστέρησης σε επίπεδο Ροπής-Καμπυλότητας στον Πόδα του Μεσοβάθρου M2 για $q = 4$ . . . . .	117
6.55	Βρόχος υστέρησης σε επίπεδο Ροπής-Καμπυλότητας στην Κεφαλή του Μεσοβάθρου M2 για $q = 4$ . . . . .	118
6.56	Μετακίνηση του κόμβου ελέγχου κατά το διαμήκη άξονα για $q = 4$ . . . . .	118
6.57	Βρόχος υστέρησης σε επίπεδο Τέμνουσας Βάσης-Μετακίνησης Κόμβου (Ελέγχου) για $q = 4$ . . . . .	119
6.58	Βρόχος υστέρησης σε επίπεδο Τέμνουσας Βάσης Μεσοβάθρου M1-Μετακίνησης Κεφαλής για $q = 4$ . . . . .	119
6.59	Βρόχος υστέρησης σε επίπεδο Τέμνουσας Βάσης Μεσοβάθρου M2-Μετακίνησης Κεφαλής για $q = 4$ . . . . .	120
6.60	Βρόχος υστέρησης σε επίπεδο Ροπής-Καμπυλότητας στον Πόδα του Μεσοβάθρου M1 για $q = 4$ . . . . .	120
6.61	Βρόχος υστέρησης σε επίπεδο Ροπής-Καμπυλότητας στην Κεφαλή του Μεσοβάθρου M1 για $q = 4$ . . . . .	121
6.62	Βρόχος υστέρησης σε επίπεδο Ροπής-Καμπυλότητας στον Πόδα του Μεσοβάθρου M2 για $q = 4$ . . . . .	121
6.63	Βρόχος υστέρησης σε επίπεδο Ροπής-Καμπυλότητας στην Κεφαλή του Μεσοβάθρου M2 για $q = 4$ . . . . .	122
6.64	Μετακίνηση του κόμβου ελέγχου κατά το διαμήκη άξονα για $q = 4$ . . . . .	122
6.65	Βρόχος υστέρησης σε επίπεδο Τέμνουσας Βάσης-Μετακίνησης Κόμβου (Ελέγχου) για $q = 4$ . . . . .	123
6.66	Βρόχος υστέρησης σε επίπεδο Τέμνουσας Βάσης Μεσοβάθρου M1-Μετακίνησης Κεφαλής για $q = 4$ . . . . .	123
6.67	Βρόχος υστέρησης σε επίπεδο Τέμνουσας Βάσης Μεσοβάθρου M2-Μετακίνησης Κεφαλής για $q = 4$ . . . . .	124
6.68	Βρόχος υστέρησης σε επίπεδο Ροπής-Καμπυλότητας στον Πόδα του Μεσοβάθρου M1 για $q = 4$ . . . . .	124
6.69	Βρόχος υστέρησης σε επίπεδο Ροπής-Καμπυλότητας στην Κεφαλή του Μεσοβάθρου M1 για $q = 4$ . . . . .	125
6.70	Βρόχος υστέρησης σε επίπεδο Ροπής-Καμπυλότητας στον Πόδα του Μεσοβάθρου M2 για $q = 4$ . . . . .	125
6.71	Βρόχος υστέρησης σε επίπεδο Ροπής-Καμπυλότητας στην Κεφαλή του Μεσοβάθρου M2 για $q = 4$ . . . . .	126
6.72	Σφάλμα πλαστιμότητας μετακινήσεων για το σύνολο των καταγραφών. . . . .	127









# Κατάλογος Πινάκων

3.1	Σεισμικές καταγραφές . . . . .	53
3.2	Περίοδοι παλμών . . . . .	54
5.1	Υπολογισμός του όρου $\Phi$ για τους δύο κύριους άξονες της διατομής του μεσοβάθρου M1 . . . . .	91
6.1	Ιδιοπερίοδοι και δρώσες ιδιομορφικές μάζες. . . . .	99
6.2	Χαρακτηριστικά ισοδύναμων ΣΜΕΚ για δύο φορές φόρτισης κατά το διαμήκη άξονα της κατασκευής. . . . .	100





# Κεφάλαιο 1

## Σεισμοί κοντινού πεδίου

### 1.1 Εισαγωγή

Οι σεισμικές κινήσεις κοντά στην περιοχή ενός ρήγματος μπορεί να έχουν πολύ διαφορετικά χαρακτηριστικά από εκείνες σε μεγαλύτερες αποστάσεις από το ρήγμα. Οι πρώτες ενδείξεις ύπαρξης του φαινομένου παρατηρήθηκαν μετά το σεισμό στο Port Hueneme (1957), όταν μηχανικοί και σεισμολόγοι ήρθαν αντιμέτωποι με μη αναμενόμενες βλάβες που δε μπορούσαν να αιτιολογηθούν με όσα ήταν τότε γνωστά για τους σεισμούς μακρινού πεδίου (Li and Xie, 2007). Έπειτα από μακροχρόνιες έρευνες, οι σεισμοί στο Northridge (California - 1994), το Kobe (Japan - 1995), το Izmit (Turkey - 1999) και το Chi-Chi (Taiwan - 1999) εδραίωσαν την ύπαρξη μιας ειδικής περίπτωσης εδαφικών κινήσεων που αναγνωρίστηκε από την επιστημονική κοινότητα ως Σεισμοί Κοντινού Πεδίου και εντοπίστηκαν οι ιδιαιτερότητες των σεισμικών κινήσεων κοντά σε ένα τεκτονικό ρήγμα.

Οι σεισμικές διεγέρσεις κοντινού πεδίου έχουν ενδιαφέρον για το μηχανικό, αφού συχνά επιβάλλουν στις κατασκευές μεγάλες καταπονήσεις σε σχέση με τα μεγέθη σχεδιασμού. Έτσι, γίνεται φανερό ότι η εκτίμηση των αναμενόμενων σεισμικών κινήσεων κοντά σε ένα ενεργό ρήγμα θα πρέπει να γίνεται με εδαφικά προσομοιώματα που λαμβάνουν υπόψη τα χαρακτηριστικά των σύνθετων αυτών εδαφικών κινήσεων.

Λόγω της πολυπλοκότητας του φαινομένου, της αβεβαιότητας των εδαφικών συνθηκών, αλλά και της σύνθετης γεωμετρίας των διαφόρων ρηγμάτων, το φαινόμενο δεν έχει πάρει μορφή μέσα στον ισχύων Αντισεισμικό Κανονισμό (EC8), αφού οι συσχετίσεις των χαρακτηριστικών που αναμένεται να έχει μια εδαφική κίνηση κοντινού πεδίου σε σχέση με τις εδαφικές συνθήκες, τον τύπο του ρήγματος ή τη θέση της κατασκευής ως προς το ρήγμα, αποτελούν ακόμα αντικείμενο της σύγχρονης έρευνας.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι βασικές έννοιες και παράμετροι που διέπουν τις σεισμικές κινήσεις κοντινού πεδίου. Αρχικά περιγράφεται ο μηχανισμός γένεσης του φαινομένου και διασαφηνίζονται τα βασικότερα χαρακτηριστικά των εδαφικών κινήσεων κοντά σε ένα ρήγμα. Έπειτα, γίνεται μια εισαγωγή στη μαθηματική αναπαράσταση των παλμών κατευθυντικότητας μέσω κυματικής ανάλυσης και δίνονται οι βασικές παράμετροι των σεισμικών καταγραφών κοντινού πεδίου. Στη συνέχεια αναφέρονται παρατηρήσεις που έχουν δοθεί στη βιβλιογραφία σχετικά με τις διευθύνσεις στις οποίες αναμένεται η εμφάνιση των παλμών κατευθυντικότητας και περιγράφεται η επιρροή τους στα ελαστικά και ανελαστικά φάσματα απόκρισης. Τέλος, γίνεται αναφορά στην ύπαρξη ανώτερων σημαντικών παλμών ταχύτητας εντός μιας εδαφικής κίνησης και περιγράφεται μια μέθοδος για την εξαγωγή τους.

### 1.2 Χαρακτηριστικά εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου

Η περιοχή κοντά στη σεισμική πηγή καλείται Ζώνη Κοντινού Πεδίου και θεωρείται ότι βρίσκεται τυπικά σε απόσταση μικρότερη από 20-60 km μακριά από τη σειсмоγενή διάρρηξη (Stewart et al, 2001), χωρίς να είναι σαφώς καθορισμένη. Εντός της περιοχής κοντινού πεδίου οι σεισμικές κινήσεις

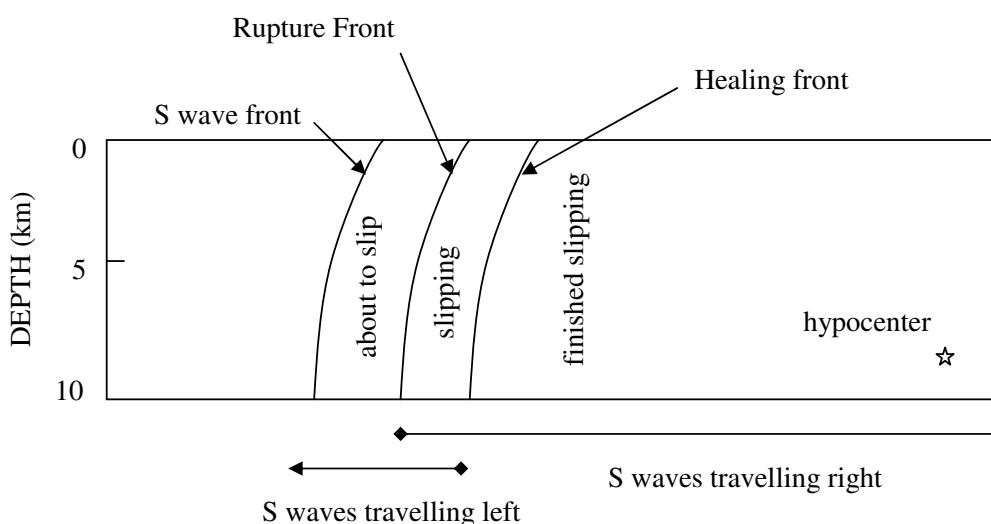
επηρεάζονται σημαντικά από το μηχανισμό διάρρηξης, τη σχετική διεύθυνση μετάδοσης της διάρρηξης ως προς μια θέση και τις μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις που οφείλονται στην ολίσθηση του ρήγματος.

Οι σεισμικές καταγραφές κοντινού πεδίου εμφανίζουν διακριτές παλμικές μορφές στις χρονοϊστορίες των εδαφικών επιταχύνσεων, ταχυτήτων και μετακινήσεων, υψηλούς λόγους PGV/PGA και μεγάλες παραμένουσες εδαφικές μετακινήσεις.

### 1.2.1 Φαινόμενο Κατευθυντικότητας (Directivity effect)

Προκειμένου να κατανοήσουμε το φαινόμενο της κατευθυντικότητας, θα πρέπει να αναχθούμε στο μηχανισμό γένεσης του σεισμικού γεγονότος. Η επικρατούσα προσέγγιση είναι να θεωρήσουμε το σεισμικό γεγονός ως μια σειρά επιμέρους γεγονότων που σχετίζονται με τη θραύση των κλείθρων του ρήγματος. Τα κλείθρα αποτελούν κάμψεις ή φυσικές διογκώσεις της ρηξιγενούς επιφάνειας και είναι περιοχές που εμφανίζουν μεγάλη τραχύτητα. Κατά τη θραύση ενός κλείθρου εμφανίζεται ένας παλμός ταχύτητας με διάρκεια ίση με το χρόνο ανόδου του κλείθρου και εύρος την ταχύτητα ολίσθησης.

Ανάλογα με τη σχετική διεύθυνση διάδοσης της διάρρηξης ως προς μια υπό μελέτη θέση, το φαινόμενο της κατευθυντικότητας παίρνει διαφορετική μορφή. Η Έμπροσθεν Κατευθυντικότητα (Forward Directivity) εμφανίζεται όταν η διάρρηξη διαδίδεται προς μια θέση και η ολίσθηση του ρήγματος εκδηλώνεται προς την ίδια κατεύθυνση. Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.1 για ένα μηχανισμό οριζόντιας ολίσθησης, κατά τη διάδοση της διάρρηξης από την εστία προς μια θέση, συσσωρεύεται ενέργεια κοντά στο μέτωπο της διάρρηξης από κάθε διαδοχική ζώνη ολίσθησης κατά μήκος του ρήγματος. Το μέτωπο των κυμάτων φτάνει ως ένας μεγάλος παλμός κίνησης που χαρακτηρίζεται από μεγάλο εύρος σε ενδιάμεσες και μεγάλες περιόδους και μικρή διάρκεια. Αυτό συμβαίνει, καθώς η ταχύτητα διάδοσης της διάρρηξης του ρήγματος έχει κοντινή τιμή, συνήθως ελαφρώς μικρότερη, από την ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων του βράχου κοντά στην πηγή. Ο εμφανιζόμενος παλμός πολώνεται συνήθως την κάθετη στο ίχνος του ρήγματος διεύθυνση (Strike Normal Direction).

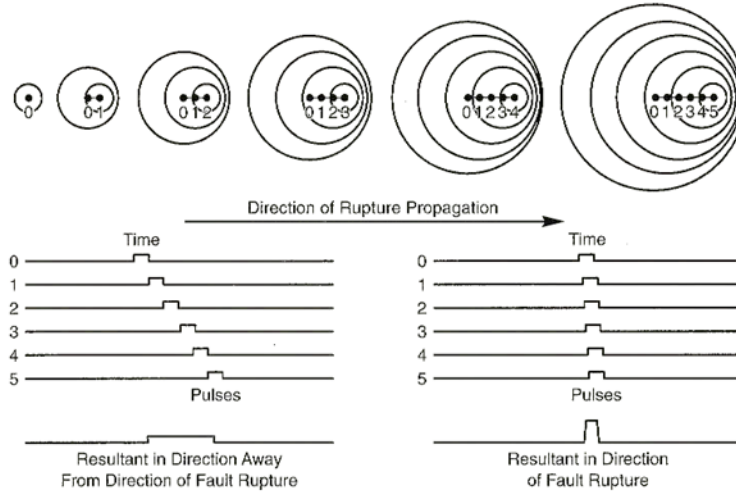


Σχήμα 1.1: Σχηματικό διάγραμμα επίδρασης της κατευθυντικότητας της διάρρηξης για ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης. Η διάρρηξη αρχίζει στο υπόκεντρο και διαδίδεται με ταχύτητα περίπου ίση με το 80% της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων. Η εικόνα παρουσιάζει ένα στιγμιότυπο του μετώπου της διάρρηξης σε μία δεδομένη στιγμή (Somerville et al, 1997a).

Στην αντίθετη περίπτωση, για μια θέση που βρίσκεται κοντά στο επίκεντρο η διάρρηξη διαδίδεται μακριά από τη θέση και η ενέργεια που εκλύεται από τις επιμέρους ολισθήσεις δεν ανθροίζεται στο μέτωπο του κύματος, αλλά παρατίθεται χρονικά, με αποτέλεσμα η άφιξη των σεισμικών κυμάτων

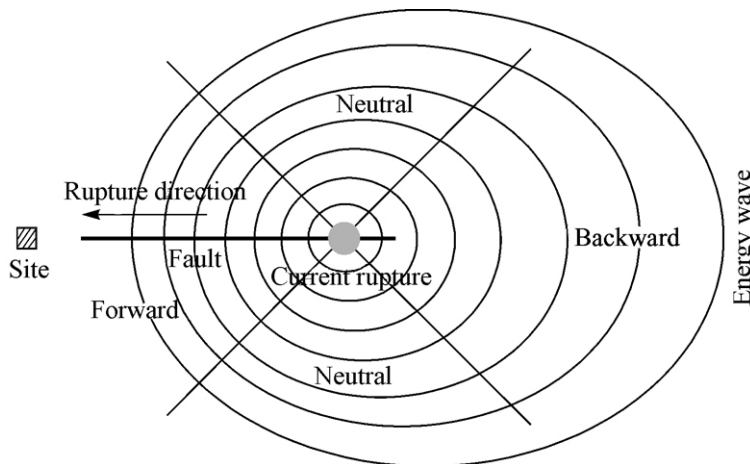
να κατανέμεται στο χρόνο. Αυτή η κατάσταση ονομάζεται Όπισθεν Κατευθυντικότητα (Backward Directivity) και χαρακτηρίζεται από κινήσεις με σχετικά μεγάλη διάρκεια και μικρό εύρος.

Στα σχήματα 1.2 και 1.3 παρουσιάζεται η σχέδαση και η πόλωση των παλμών που προκαλούνται από τις θραύσεις των κλείθρων για τις περιπτώσεις της Όπισθεν και της Έμπροσθεν κατευθυντικότητας αντίστοιχα. Στη δεύτερη περίπτωση του σχήματος 1.2 φαίνεται ότι η αλληλοεπικάλυψη των επιμέρους παλμών προκαλεί τη δημιουργία ενός μεγάλου παλμού στις θέσεις όπου κατευθύνεται η διάρρηξη του ρήγματος.



Σχήμα 1.2: Σχηματική απεικόνιση του φαινομένου της κατευθυντικότητας των εδαφικών κινήσεων σε θέσεις από και προς τη διεύθυνση της διάδοσης της διάρρηξης (Kramer, 1996 - after Singh, 1985, EERI).

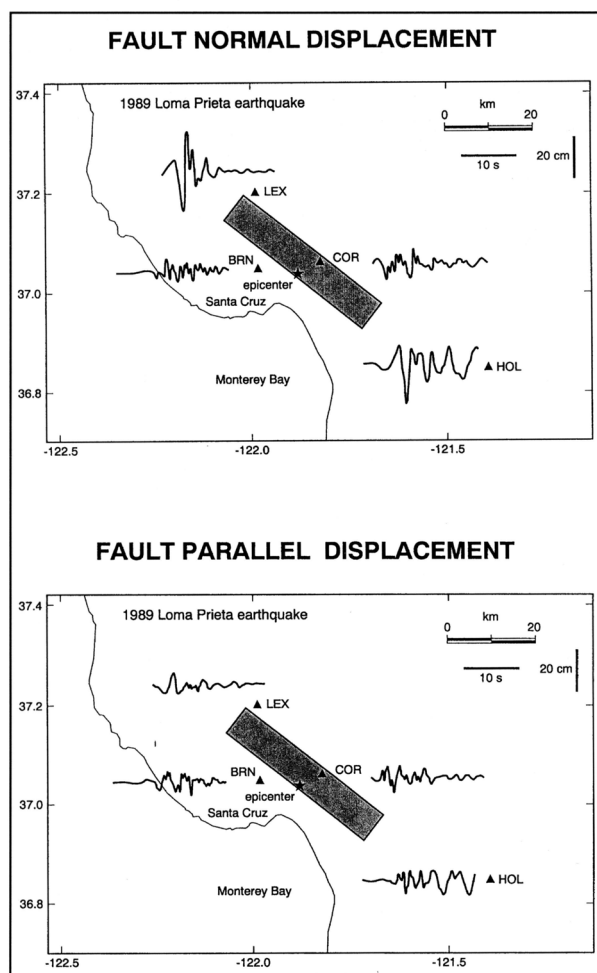
Η Ουδέτερη Κατευθυντικότητα (Neutral Directivity) συμβαίνει σε θέσεις που βρίσκονται στο πλάι της επιφάνειας διάρρηξης του ρήγματος και συνεπώς η διάρρηξη δε διαδίδεται ούτε προς, ούτε μακριά από τη θέση.



Σχήμα 1.3: Σχηματική απεικόνιση του φαινομένου της κατευθυντικότητας (Li and Xie, 2007).

Οι επιπτώσεις του φαινομένου της κατευθυντικότητας στις εδαφικές μετακινήσεις φαίνονται στο σχήμα 1.4 που αφορά το σεισμό του 1989 στο Loma Prieta. Στο επίκεντρο του σεισμού οι οριζόντιες εδαφικές μετακινήσεις είναι μέτριες τόσο στην κάθετη (fault normal) όσο και στην παράλληλη (fault parallel) συνιστώσα του ρήγματος. Αυτό αποδίδεται στην όπισθεν κατευθυντικότητα. Στα

άκρα όμως του ρήγματος, η έμπροσθεν κατευθυντικότητα προκαλεί έντονες οριζόντιες εδαφικές μετακινήσεις στη διεύθυνση της κάθετης στο ρήγμα συνιστώσας, αλλά όχι τόσο μεγάλες κατά την παράλληλη διεύθυνση, όπου οι εδαφικές μετακινήσεις έχουν κοντινές τιμές με αυτές που βρίσκονται κοντά στο επίκεντρο. Οι μεγάλες και έντονες κινήσεις παρατηρούνται στη διεύθυνση της κάθετης συνιστώσας και μακριά από το επίκεντρο.



Σχήμα 1.4: Αποτελέσματα της κατευθυντικότητας της διάρρηξης στις καταγεγραμμένες ιστορίες μετακινήσεων του σεισμού στο Loma Prieta (California - 1989) για τις κάθετες (άνω) και τις παράλληλες (κάτω) στο ρήγμα συνιστώσες. (Stewart et al, 2001 - after EERI, 1995).

Τα φαινόμενα κατευθυντικότητας μπορούν να εμφανιστούν για κάθε τύπο ρήγματος, είτε αυτό είναι ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης (Strike slip fault), είτε ρήγμα βύθισης (Dip slip fault). Ανάλογα όμως με τον τύπο του ρήγματος, τα χαρακτηριστικά της εδαφικής κίνησης διαφέρουν, αφού πέραν των παλμών κατευθυντικότητας εμπλέκεται η επιρροή των φαινομένων που περιγράφονται στις ακόλουθες ενότητες.

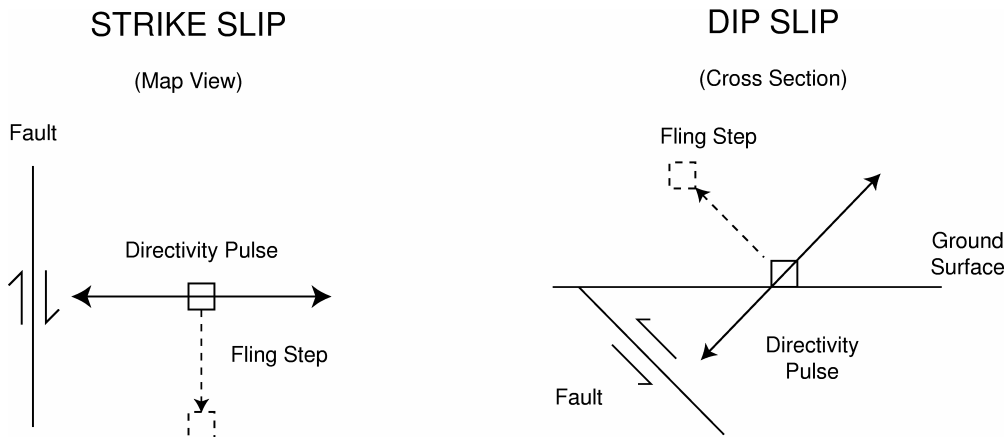
Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ακόμα και αν πληρούνται οι γεωμετρικές συνθήκες για την εμφάνιση των φαινομένων της έμπροσθεν κατευθυντικότητας, οι επιπτώσεις της μπορεί να μη συμβούν. Από την άλλη, υπάρχουν περιπτώσεις σεισμικών καταγραφών στις οποίες εμφανίζονται διακριτοί παλμοί ταχύτητας, αλλά δε σχετίζονται με το φαινόμενο της κατευθυντικότητας. Για παράδειγμα, η ανάκλαση των σεισμικών κυμάτων σε μια εκτεταμένη οριζόντια επιφάνεια εντός μιας γεωλογικής λεκάνης (Basin Effects) μπορεί να δημιουργήσει παλμούς ταχύτητας μικρού εύρους, οι οποίοι δε σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά και την καταστροφικότητα των σεισμών κοντινού πεδίου.

### 1.2.2 Μόνιμη Στατική Παραμόρφωση (Fling step)

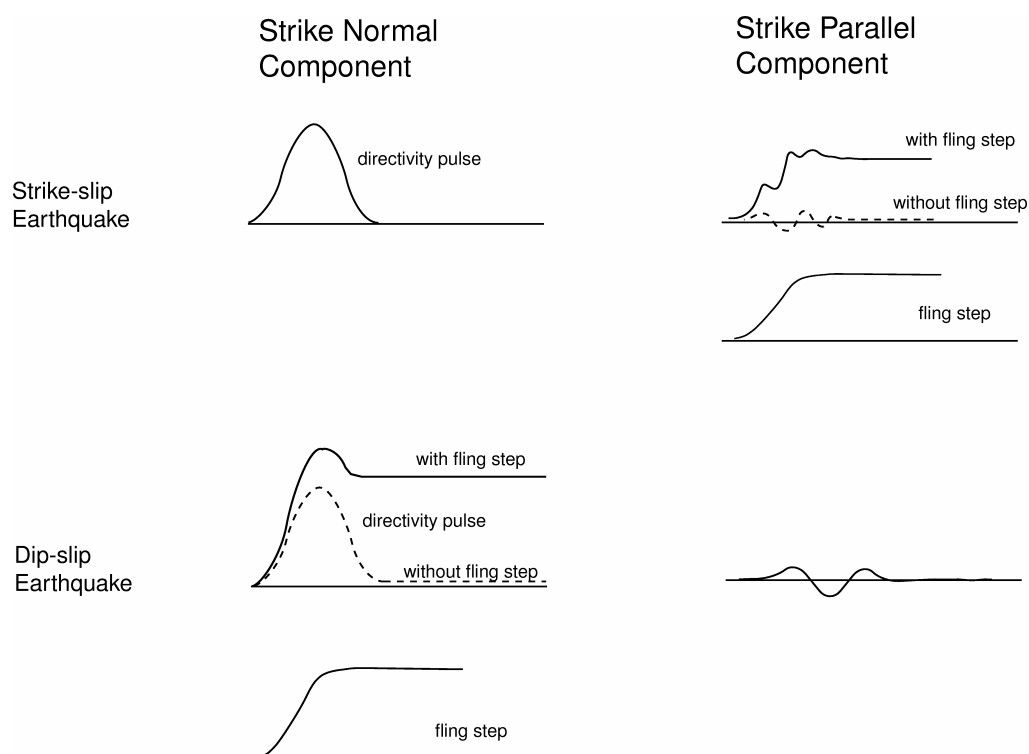
Οι σύγχρονες ψηφιακές καταγραφές από κινήσεις κοντινού πεδίου περιέχουν μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις λόγω του στατικού πεδίου παραμόρφωσης του σεισμού. Αυτές οι στατικές μετακινήσεις που αναφέρονται στη βιβλιογραφία ως *Fling Step* συμβαίνουν σε ένα διακριτό χρονικό διάστημα αρκετών δευτερολέπτων, καθώς εκτυλίσσεται η ολίσθηση του ρήγματος. Οι μετακινήσεις που οφείλονται στη στατική αυτή μόνιμη παραμόρφωση συμβαίνουν κατά τη διεύθυνση της ολίσθησης του ρήγματος και δε συνδέονται ιδιαίτερα με τις προαναφερθείσες δυναμικές μετατοπίσεις που οφείλονται στους παλμούς κατευθυντικότητας. Η παρουσία του φαινομένου ήταν έντονη στους σεισμούς του Izmit (Turkey - 1999) και του Chi-Chi (Taiwan - 1999), με τον τελευταίο να εμφανίζει μόνιμες στατικές παραμορφώσεις της τάξης των 9.0 m, οι οποίες είναι καταστροφικές για κάθε τύπο κατασκευής.

Στην περίπτωση ρηγμάτων οριζόντιας ολίσθησης η εμφάνιση των παλμών κατευθυντικότητας αναμένεται κυρίως στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα, ενώ η μόνιμη στατική παραμόρφωση που οφείλεται στην ολίσθηση του ρήγματος εξελίσσεται κατά την παράλληλη στο ρήγμα συνιστώσα. Στα ρήγματα βύθισης (κανονικά και ανάστροφα) η εμφάνιση του παλμού συμβαίνει κυρίως στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα και η ολίσθηση του ρήγματος συμβαίνει στην ίδια διεύθυνση. Έτσι, στη δεύτερη περίπτωση στην κάθετη στο ρήγμα διεύθυνση καταγράφεται μια εδαφική κίνηση που αποτελεί σύνθεση του παλμού κατευθυντικότητας και της ολίσθησης του ρήγματος.

Στο σχήμα 1.5 παρουσιάζονται οι διευθύνσεις στις οποίες εκδηλώνεται η μόνιμη στατική παραμόρφωση και η διάδοση των παλμών κατευθυντικότητας για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και για ρήγματα βύθισης, ενώ στο σχήμα 1.6 παρουσιάζονται κάποιες χρονοϊστορίες μετακινήσεων στις οποίες φαίνονται οι συμβολές των παραπάνω για κάθε περίπτωση.



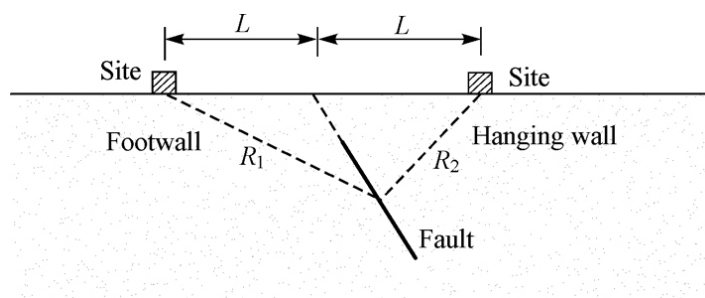
Σχήμα 1.5: Σχηματική απεικόνιση των προσανατολισμών της παραμένουσας μετακίνησης και του παλμού κατευθυντικότητας για ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης και για ρήγμα βύθισης (Stewart et al, 2001).



Σχήμα 1.6: Χρονοϊστορίες για ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης και ρήγμα βύθισης, στο οποίο φαίνονται οι επιρροές της παραμένουσας μετακίνησης και του παλμού κατευθυντικότητας μαζί και χωριστά. (Stewart et al, 2001).

### 1.2.3 Επίδραση ανάντη τεμάχου ρήγματος (Hanging wall effect)

Σε ρήγματα βύθισης (κανονικά ή ανάστροφα) παρατηρούνται συστηματικές διαφορές ανάμεσα στις παραμέτρους των εδαφικών κινήσεων μεταξύ περιοχών που βρίσκονται στο υπερκείμενο (ανάντη) και το υποκείμενο (κατάντη) τμήμα του ρήγματος. Στο υπερκείμενο τέμαχος συναντώνται μεγαλύτερες φασματικές επαυξήσεις και μικρότερη εξασθένιση των εδαφικών κινήσεων απ' ό,τι στο υποκείμενο τέμαχος, για την ίδια οριζόντια απόσταση από το ίχνος του ρήγματος (Abrahamson and Somerville, 1996). Αυτό θεωρείται ότι συμβαίνει, αφού για την ίδια οριζόντια απόσταση, οι περιοχές ανάντη στο ρήγμα βρίσκονται πλησιέστερα στο επίπεδο του ρήγματος. Το φαινόμενο σύμφωνα με το Somerville (2000) έχει μεγαλύτερη επιρροή στο υψίσυχο μέρος των φασματικών επιταχύνσεων. Η έντονη εκδήλωση του φαινομένου στο σεισμό του Chi-Chi (1999) προσέλκυσε το ενδιαφέρον πλήθους επιστημόνων πάνω στο συγκεκριμένο θέμα. (Yu and Gao, 2001; Shabestari and Yamazaki, 2003).



Σχήμα 1.7: Επίδραση του υπερκείμενου τεμάχου του ρήγματος (Li and Xie, 2007).

### 1.2.4 Φαινόμενο κατακόρυφης συνιστώσας (Vertical effect)

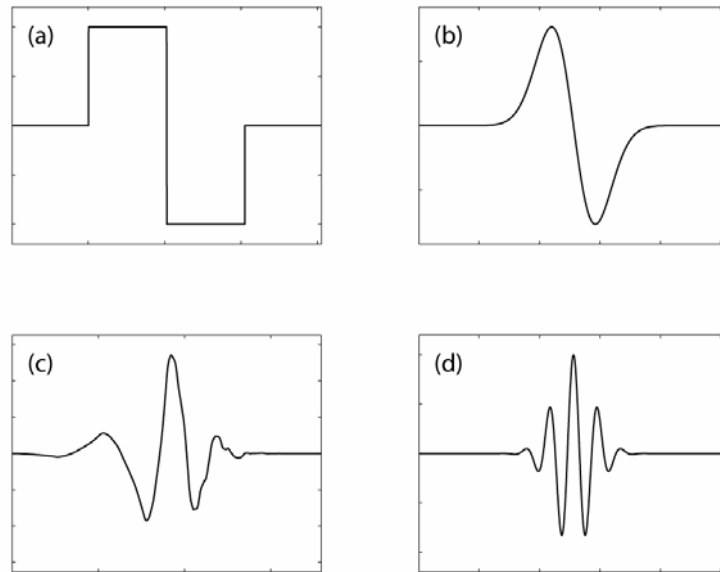
Οι σεισμικές καταγραφές κοντινού πεδίου εμφανίζουν ιδιαιτερότητες σε σχέση με σεισμούς μακρινού πεδίου όσον αφορά την κατακόρυφη συνιστώσα της εδαφικής κίνησης. Σε πολλές περιπτώσεις ο λόγος της μέγιστης κατακόρυφης επιτάχυνσης προς τη μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση ( $PGA_V/PGA_H$ ) σειμών κοντινού πεδίου εμφανίζει τιμές πολύ μεγαλύτερες του 2/3 που χρησιμοποιείται συχνά στους αντισεισμικούς κανονισμούς, με το φαινόμενο να παρατηρείται ακόμα πιο έντονα σε μαλακές εδαφικές στρώσεις (Wang et al, 2002; Li and Zhu, 2004; Ni and Zhu, 2004). Όσον αφορά τις φασματικές τιμές, ο λόγος των κατακορύφων προς τις οριζόντιες φασματικές επιταχύνσεις ( $PSA_V/PSA_H$ ) εξαρτάται από την περίοδο της κατασκευής και την απόστασή της από το ρήγμα. Για μικρές περιόδους ο λόγος αυτός υπερβαίνει σημαντικά την τιμή 2/3 που αναμένεται για θέσεις κοντά στο ρήγμα, ενώ για μεγάλες περιόδους η τιμή 2/3 δείχνει να είναι πολύ συντηρητική για περιοχές κοντά στο ρήγμα (Bozorgnia et al, 1995). Έρευνες των Kikuchi et al (2000) έδειξαν ότι η επιρροή της κατακόρυφης συνιστώσας της σεισμικής δράσης εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου σε πλαίσιακές κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι μικρή, όμως οι έρευνες πάνω στο φαινόμενο είναι ακόμα περιορισμένες.

## 1.3 Ανάλυση με κυματίδια

Η κυματική ανάλυση (wavelet analysis) έχει γνωρίσει ραγδαία ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια, τόσο σε θεωρητικό, όσο και σε πρακτικό επίπεδο, αφού έχει διερευνηθεί η χρηστικότητά της σε ένα ευρύ φάσμα προβλημάτων. Είναι πλέον διαθέσιμη μια ευρεία βιβλιογραφία που αφορά θεωρητικά στοιχεία της μεθόδου, καθώς και προγραμματιστικές λεπτομέρειες (Mallat, 1999). Η παρουσία διακριτών παλμών στις χρονοϊστορίες των ταχυτήτων σε σεισμούς κοντινού πεδίου έχει οδηγήσει πλήθος ερευνητών στην απομόνωση του παλμού μέσω κυματικής ανάλυσης, όπου γίνεται μαθηματική περιγραφή του παλμού μέσω μιας κυματομορφής.

Μια βασική κατανόηση της μεθόδου μπορεί να επιτευχθεί μέσω της σύγκρισής της με την ανάλυση Fourier. Η ανάλυση Fourier αναπαριστά ένα σήμα κάνοντας χρήση ενός γραμμικού συνδυασμού από ημιτονικά κύματα, καθένα από τα οποία αντιπροσωπεύει ένα σήμα απείρου μήκους και μιας μόνο συχνότητας. Αντίθετα, η ανάλυση με κυματίδια αποσυνθέτει ένα σήμα σε κυματίδια, τα οποία είναι διακριτά τοποθετημένα στο χρόνο και αντιστοιχούν σε ένα συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων. Για τα μη στάσιμα κύματα, όπως είναι οι σεισμικές εδαφικές κινήσεις, η απεικόνιση του σήματος ως ένα άθροισμα κυματιδίων είναι προτιμότερη απ' ό,τι ένα άθροισμα στάσιμων ημιτονικών σημάτων.

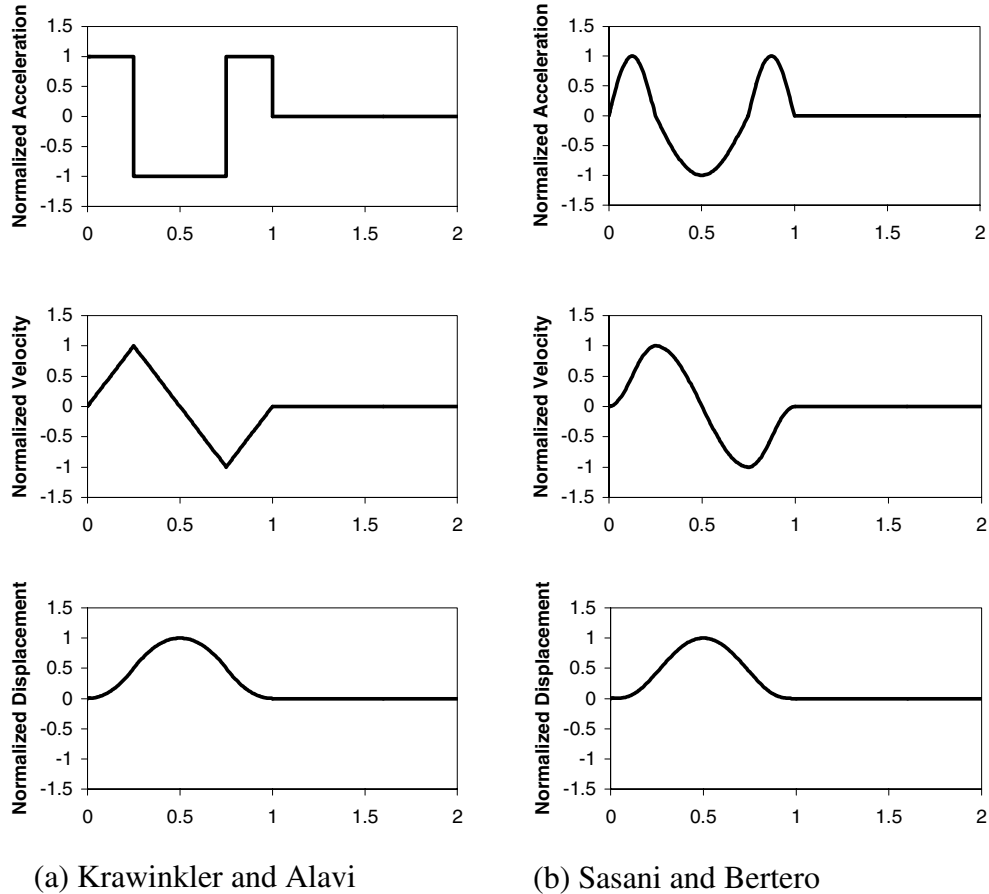
Τα κυματίδια είναι βασικές συναρτήσεις που ικανοποιούν συγκεκριμένες μαθηματικές απαιτήσεις και για την ανάλυση ενός σήματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν αρκετά πρότυπα κυματίδια (σχήμα 1.8). Η πρότυπη συνάρτηση που καλείται μητρικό κυματίδιο (mother wavelet), κλιμακώνεται και μεταφέρεται στο χρόνο για το σχηματισμό μιας σειράς βασικών συναρτήσεων. Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός θεωρητικών παραγόντων για την επιλογή ενός χρηστικού μητρικού κυματιδίου, όπως είναι η ορθογωνικότητα, η συμβατότητα, ο διαθέσιμος αριθμός παραγώγων, η συμμετρία κ.α. (Mallat 1999). Τα κυματίδια που απεικονίζονται στο σχήμα 1.8 χρησιμοποιούνται ευρέως και θεωρούνται κατάλληλα για το συγκεκριμένο πεδίο εφαρμογών.



Σχήμα 1.8: Πρότυπα μητρικά κυματίδια (a) Haar, (b) Γκαουσιανό 1<sup>ης</sup> τάξης, (c) Daubechies 4<sup>ης</sup> τάξης, (d) Morlet. (Baker, 2007).

Μελέτες των Krawinkler and Alavi (1998) και Sasani and Bertero (2000) έδειξαν ότι κάποιες απλοποιημένες μορφές παλμών που βρίσκονται στη χρονοϊστορία ταχυτήτων μπορούν να απεικονίσουν τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά της απόκρισης κατασκευών που υποβάλλονται σε εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου. Στο σχήμα 1.9 παρουσιάζονται κάποιοι εξιδανικευμένοι παλμοί που έχουν προταθεί από ερευνητές και θεωρούνται αντιπροσωπευτικοί των παλμών ταχύτητας σε ένα σεισμό κοντινού πεδίου.





(a) Krawinkler and Alavi

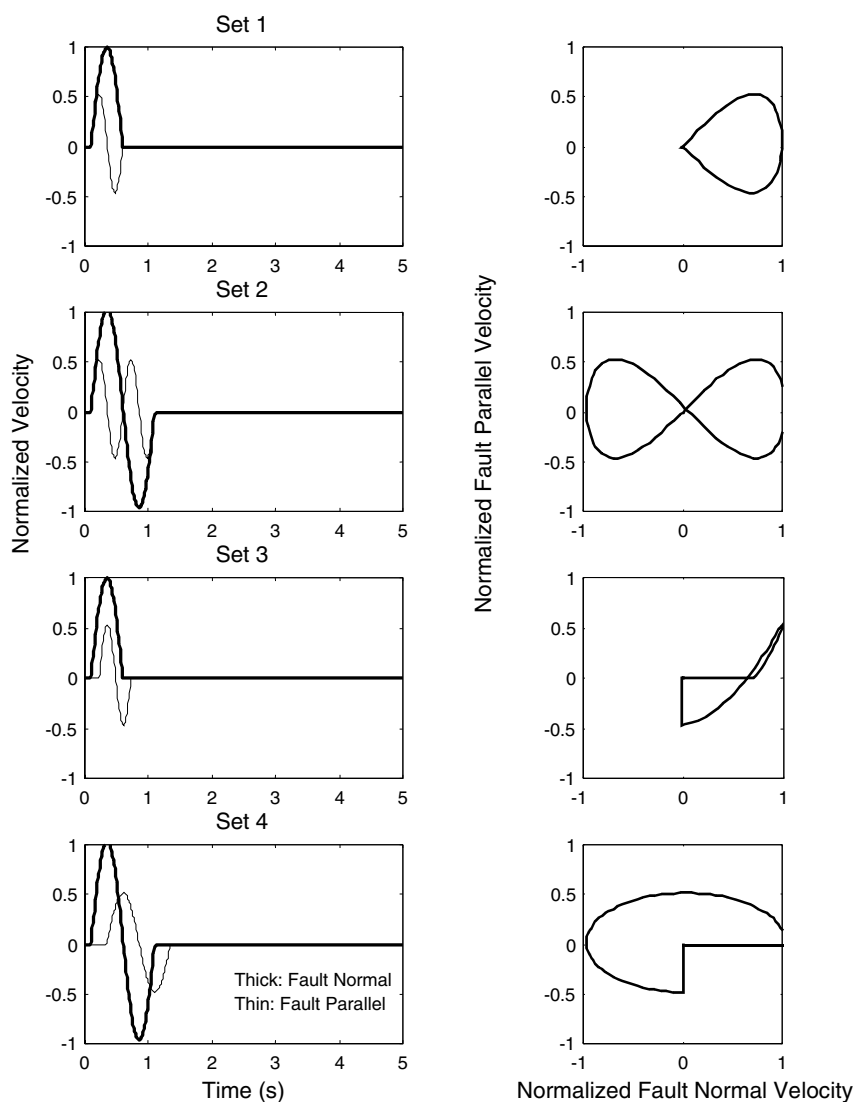
(b) Sasani and Bertero

Σχήμα 1.9: Απλοποιημένοι παλμοί που έχουν χρησιμοποιηθεί από ερευνητές (Stewart et al, 2001).

Οι συγκεκριμένες απλοποιημένες ημιτονοειδείς απεικονίσεις των παλμών στη χρονοϊστορία των ταχυτήτων καθορίζονται από τον αριθμό των ισοδύναμων ημικύκλων, την περίοδο κάθε ημικύκλου και τα αντίστοιχα πλάτη τους.

Για ταυτόχρονη προσομοίωση της σεισμικής δράσης στο χώρο είναι απαραίτητη μια ημιτονοειδής απεικόνιση της χρονοϊστορίας της κίνησης κατά τη διεύθυνση της παράλληλης στο ρήγμα συνιστώσας (fault-parallel component), όπως απαραίτητη είναι και η χρονική διαφορά μεταξύ της εκκίνησής της σε σχέση με την εκκίνηση της χρονοϊστορίας στην κάθετη στο ρήγμα διεύθυνση (fault-normal component).

Ο Rodriguez-Marek (2000), σε μια έρευνα που έγινε σε σεισμικές καταγραφές στις οποίες εκδηλώνεται το φαινόμενο της έμπροσθεν κατευθυντικότητας, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι οι απλοποιημένες απεικονίσεις των εδαφικών κινήσεων που φαίνονται στο σχήμα 1.10 θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τη διερεύνηση της σημασίας της διαξονικής καταπόνησης σε μελλοντικές μελέτες.

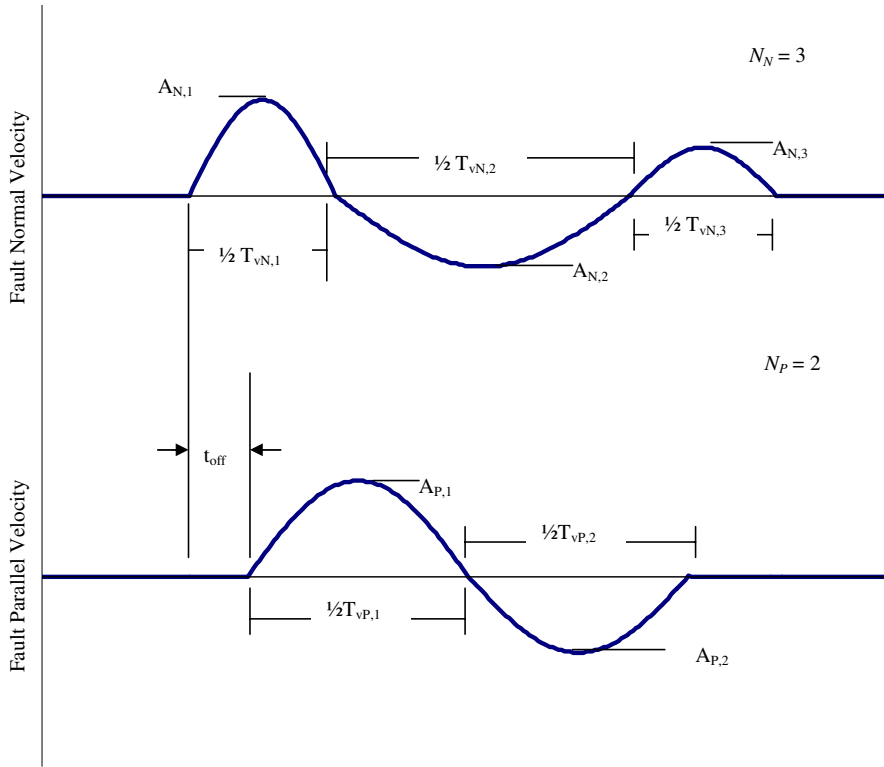


Σχήμα 1.10: Απλοποιημένες αναπαραστάσεις ημιτονικού παλμού για εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου. Η μέγιστη οριζόντια εδαφική ταχύτητα (PHV) για την παράλληλη στο ρήγμα συνιστώσα θεωρείται ίση με το 50% της PHV στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα (Rodriguez-Marek, 2000).

Στο σχήμα 1.11 δίνονται οι ορισμοί των βασικών παραμέτρων που χαρακτηρίζουν τις εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου κατά τον Rodriguez-Marek (2000), ενώ απεικονίζονται και γραφικά στο σχήμα 1.12. Σε συμφωνία με τους Krawinkler and Alavi (1998), ο Rodriguez-Marek (2000) προτείνει ένα απλό χαρακτηρισμό του παλμού κατευθυντικότητας με τη χρήση της Μέγιστης Οριζόντιας Ταχύτητας (Peak Horizontal Velocity - PHV), της κατά προσέγγιση Δεσπόζουσας Περιόδου του παλμού ( $T_v$ ) και τον αριθμό των σημαντικών ημικύκλων ( $N$ ) της κίνησης στην κάθετη στο ρήγμα διεύθυνση.

Parameter	Abbreviation	Methodology to obtain parameter
Number of significant pulses.	$N$	Number of half-cycle pulses in the velocity-time history with amplitudes at least 50% of the peak ground velocity of the record.
Pulse period.	$T_{v,i}$	For each half sine pulse, $T_{v,i} = 2(t_2 - t_1)$ , where $t_1$ and $t_2$ are either the zero-crossing time, or the time at which velocity is equal to 10% of the peak velocity for the pulse if this time is significantly different than the zero crossing time. $T_v$ corresponding to the pulse with maximum amplitude is the overall representative velocity pulse period.
Predominant period from pseudo-velocity response spectra.	$T_{p-v}$	Period corresponding to a clear and global peak in the pseudo-velocity response spectra at 5% damping.
Pulse amplitude.	$A_i$	For each half sine pulse, the peak ground velocity in the time interval $[t_1, t_2]$ .
Peak ground velocity	PHV	Maximum velocity, defined by the maximum value of $A_i$ . Note, however, that in very few exceptions, the maximum value of $A_i$ in the fault parallel direction does not occur concurrently with the fault normal pulse.
Ratio of fault parallel to fault normal amplitude	$PHV_{P/N}$	Defined by the ratio of maximum $A_P$ divided by maximum $A_N$ , where the subscripts $P$ and $N$ denote fault-parallel and fault-normal motions respectively.
Time delay between fault normal and fault parallel pulse	$t_{off}$	Time of initiation of fault parallel pulse minus the time of initiation of fault normal pulse.

Σχήμα 1.11: Παράμετροι που χρησιμοποιούνται τον καθορισμό εξιδανικευμένων ημιτονοειδών παλμών εδαφικής κίνησης (Rodriguez-Marek 2000).



Σχήμα 1.12: Απαιτούμενες παράμετροι για τον καθορισμό εξιδανικευμένων παλμών ταχύτητας. Τα σύμβολα  $N$ ,  $P$  αντιστοιχούν στην κάθετη και στην παράλληλη στο ρήγμα συνιστώσα αντίστοιχα (Rodriguez-Marek 2000).

Μια αποτελεσματική μαθηματική περιγραφή των παλμών κατευθυντικότητας μέσω κυματομορφών έχει δοθεί από τους Mavroeidis and Papageorgiou (2003), οι οποίοι πρότειναν ένα νέο κυματίδιο που αποτελεί μια παραλλαγή του κυματιδίου Gabor. Το κυματίδιο Gabor αποτελείται από ένα αρμονικό σήμα πολλαπλασιασμένο με μια κωδωνόσχημη εκθετική συνάρτηση (περιβάλλουσα Gauss). Λόγω της εκθετικής συνάρτησης που περιέχεται στη μαθηματική του έκφραση, το εν λόγω κυματίδιο δε μπορεί να παρέχει κλειστές λύσεις όσον αφορά την απόκριση μονοβαθμίων συστημάτων και κατά συνέπεια τον υπολογισμό των φασμάτων απόκρισης μέσω του μετασχηματισμού Fourier.

Η τελευταία αδυναμία του κυματιδίου Gabor αντιμετωπίζεται από τους Mavroeidis and Papageorgiou με αντικατάσταση της κωδωνόσχημης περιβάλλουσας Gauss από ένα μετατεθειμένο κύκλο συνημιτόνου, ενώ το ημιτονικό σήμα παραμένει ως έχει. Με την αντικατάσταση αυτή, το παραγόμενο κυματίδιο αποκτά κλειστές λύσεις υπολογισμού των φασματικών τιμών μέσω του μετασχηματισμού Fourier, χαρακτηριστικό πολύ σημαντικό για τη διενέργεια παραμετρικών αναλύσεων, οι οποίες ενδείκνυνται για αναλύσεις με εξιδανικευμένες κυματομορφές. Η μαθηματική σχέση του προτεινόμενου κυματιδίου έχει τη μορφή:

$$f(t) = A \cdot \frac{1}{2} \left[ 1 + \cos \left( \frac{2\pi f_p}{\gamma} t \right) \right] \cos(2\pi f_p + \nu) \quad (1.1)$$

Οι παράμετροι του κυματιδίου είναι το εύρος ( $A$ ), η δεσπόζουσα συχνότητα ( $f_p$ ), η διαφορά φάσης ( $\nu$ ) και ο αριθμός των ταλαντώσεων ( $\gamma$ ). Οι Mavroeidis and Papageorgiou (2003) δίνουν τις ακόλουθες παρατηρήσεις σε σχέση με το προτεινόμενο κυματίδιο:

- Ο μετατοπισμένος κύκλος συνημιτόνου είναι μία περιοδική συνάρτηση και δεν παρουσιάζει μόνο μία κορυφή, όπως η περιβάλλουσα Gauss του κυματιδίου Gabor. Επομένως, λαμβάνεται σαν πεδίο ορισμού του σήματος το παρακάτω χρονικό διάστημα:

$$-\frac{\gamma}{2f_p} \leq t \leq \frac{\gamma}{2f_p} \quad (1.2)$$

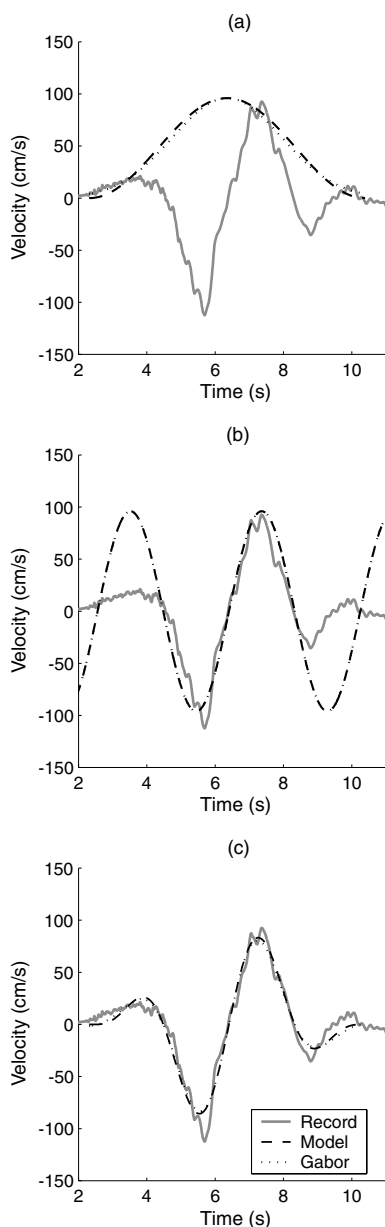
- Η περίοδος του ημιτονικού σήματος πρέπει να είναι μικρότερη από αυτή της κωδωνόσχημης περιβάλλουσας, προκειμένου η προκύπτουσα εδαφική κίνηση να έχει φυσική σημασία. Έτσι ισχύει:

$$-\frac{\gamma}{f_p} < \frac{\gamma}{f_p} \rightarrow \gamma > 1 \quad (1.3)$$

- Για τη βαθμονόμηση του προσομοιώματος είναι απαραίτητη η εισαγωγή στην εξίσωση 1.1 μιας χρονικής στιγμής  $t_0$  για τον προσδιορισμό της περιοχής του μέγιστου της περιβάλλουσας, η οποία επιτρέπει τη μετάθεση του σήματος κατά μήκος του χρονικού άξονα. Έτσι, γίνεται η αλλαγή μεταβλητής  $t \rightarrow t - t_0$ .

Με συνδυασμό των άνω προκύπτουν οι εκφράσεις του αναλυτικού προσομοιώματος για την εδαφική επιτάχυνση και ταχύτητα, οι οποίες παρατίθενται στο κεφάλαιο όπου περιγράφεται η μεθοδολογία των Mimoglou et al (2014) και γίνεται χρήση του κυματιδίου των Mavroeidis and Papageorgiou.

Στο σχήμα 1.13 παρουσιάζεται η ιστορία ταχυτήτων για μια καταγραφή του σεισμού στο Imperial Valley (1979) από τον καταγραφικό σταθμό E06, η οποία προσεγγίζεται από το προτεινόμενο κυματίδιο και το κυματίδιο Gabor. Η σύμπτωσή των δύο εξιδανικευμένων κυματομορφών παρά την αλλαγή της κωδωνόσχημης περιβάλλουσας φαίνεται εξαιρετική.



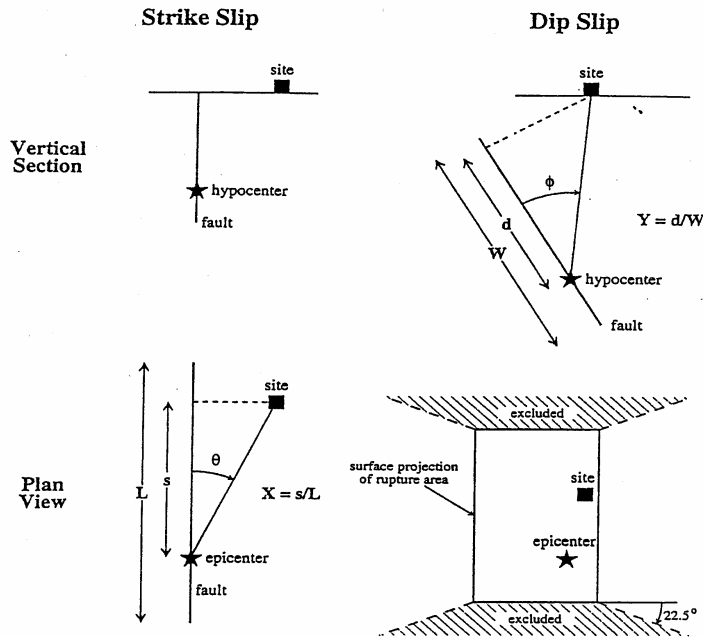
Σχήμα 1.13: Προσέγγιση καταγραφής από το σταθμό E06 στο σεισμό του Imperial Valley (California - 1979) με χρήση του κυματιδίου των Mavroeidis and Papageorgiou και το κυματίδιο Gabor. (a) Κωδωνόσχημες περιβάλλουσες, (b) Ημιτονικά σήματα, (c) Παραγόμενα κυματίδια. (Mavroeidis and Papageorgiou, 2003).

#### 1.4 Παράμετροι των εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου

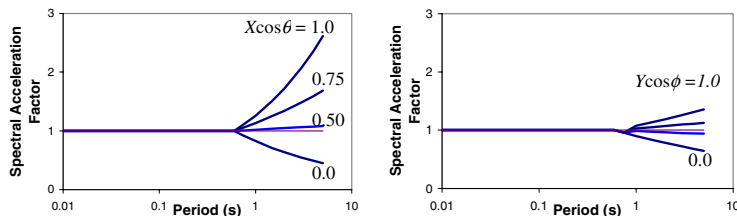
Οι Somerville et al (1997a) ανέλυσαν τις συνθήκες υπό τις οποίες εμφανίζονται τα φαινόμενα της έμπροσθεν και της όπισθεν κατευθυντικότητας. Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.14, η χωρική απόκλιση της επιρροής των φαινομένων κατευθυντικότητας από θέση σε θέση εξαρτάται αφενός από τη γωνία μεταξύ της διεύθυνσης στην οποία διαδίδεται η διάρρηξη και της διεύθυνσης στην οποία μεταφέρονται τα σεισμικά κύματα από το ρήγμα προς την εκάστοτε θέση ( $\theta$  για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και  $\varphi$  για ρήγματα βύθισης) και αφετέρου από το μέγεθος του τεμάχους της επιφάνειας διάρρηξης που βρίσκεται μεταξύ του υποκέντρου και της εκάστοτε θέσης ( $X$  για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και  $Y$  για ρήγματα βύθισης). Οι πιο σημαντικές επιπτώσεις της έμπροσθεν κατευθυντικότητας προκύπτουν για μικρές γωνίες μεταξύ της εξεταζόμενης θέσης και του ρήγματος και για μεγαλύτερα

τιμήματα της επιφάνειας διάρρηξης του ρήγματος μεταξύ της θέσης και του υποκέντρου.

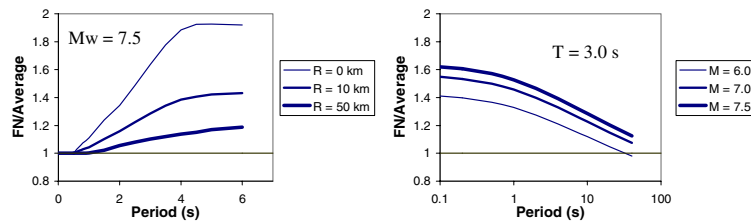
Για την ποσοτική περιγραφή των φαινομένων κατευθυντικότητας, οι Somerville et al (1997a) συσχέτισαν τις συνιστώσες των φασμάτων απόκρισης για απόσβεση 5% με τις γεωμετρικές παραμέτρους που φαίνονται στο σχήμα 1.14, εξάγοντας τα αποτελέσματα που φαίνονται στο σχήμα 1.15.



Σχήμα 1.14: Παράμετροι που καθορίζουν την κατευθυντικότητα της διάρρηξης (Somerville et al, 1997a).



(a) Average response spectra ratio, showing dependence on period and on directivity parameters



(b) Strike-normal to average horizontal response spectral ratio for maximum forward-directivity conditions ( $X\cos\theta = 1$ )

Σχήμα 1.15: Προβλέψεις μεταξύ διαφορετικών παραμέτρων κατευθυντικότητας (Somerville et al, 1997a).

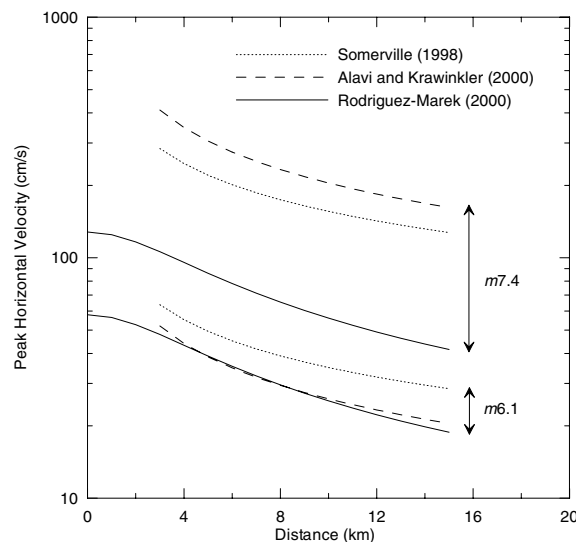
Έρευνες σχετικά με την απόκριση των κατασκευών σε σεισμούς κοντινού πεδίου έδειξαν ότι η απεικόνιση των εδαφικών κινήσεων με τη μορφή χρονοϊστορίας είναι προτιμότερη από μια απεικόνιση με τη μορφή φάσματος απόκρισης (Somerville, 1998; Alavi and Krawinkler, 2000; Sasani and Bertero, 2000; Rodriguez-Marek, 2000). Η απεικόνιση με τη μορφή χρονοϊστορίας είναι προτιμότερη, αφού η μελέτη μιας εδαφικής κίνησης στο χώρο των συχνοτήτων, όπως είναι ένα φάσμα απόκρισης, υπαινίσσεται μια στοχαστική διαδικασία κατά την οποία υπάρχει μια σχετικά ομοιόμορφη κατανομή της ενέργειας σε όλη τη διάρκεια της εδαφικής κίνησης. Συνεπώς στις εδαφικές κινήσεις που επηρεάζονται από φαινόμενα κατευθυντικότητας, όπου η ενέργεια συγκεντρώνεται σε λίγους μόνο κύκλους της εδαφικής κίνησης, η απεικόνιση με ένα φάσμα απόκρισης δε μπορεί να αποδώσει το φαινόμενο αντιπροσωπευτικά (Somerville, 1998).

#### 1.4.1 Μέγιστη Οριζόντια Εδαφική Ταχύτητα

Η μέγιστη οριζόντια εδαφική ταχύτητα ( $PGV_H$ ) επηρεάζεται από το μέγεθος του σεισμού, την απόσταση και τις εδαφικές και τοπογραφικές συνθήκες. Ο Somerville (1998) συσχέτισε το λογάριθμο της μέγιστης οριζόντιας εδαφικής ταχύτητας με το μέγεθος του σεισμού και το λογάριθμο της απόστασης μέσω μιας διγραμμικής σχέσης, η οποία προέκυψε από ανάλυση παλινδρόμησης μεταξύ 15 σεισμικών καταγραφών με μεγέθη  $m = 6.2 - 7.5$  και αποστάσεις από το ρήγμα  $r = 0 - 10\text{km}$ . Για την αποφυγή μη ρεαλιστικών προβλέψεων σε μικρές αποστάσεις, η σχέση προτείνεται για αποστάσεις μεγαλύτερες από 3km από το ρήγμα. Μια αντίστοιχη μελέτη για το ίδιο δείγμα καταγραφών έγινε από τους Alavi and Krawinkler (2000).

Ο Rodriguez-Marek (2000) μέσω ανάλυσης παλινδρόμησης επεξεργάστηκε 48 σεισμικές καταγραφές από 11 διαφορετικά σεισμικά γεγονότα για μεγέθη σεισμού  $m = 6.1 - 7.4$  και μέγιστες αποστάσεις από το ρήγμα  $r < 20\text{km}$ . Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν χωριστά για θέσεις σε βραχώδη και εδαφικά υπόβαθρα, και χωριστά για το σύνολο των καταγραφών.

Στο σχήμα 1.16 συγκρίνονται οι σχέσεις απομείωσης της εδαφικής ταχύτητας που αναφέρθηκαν, όπου φαίνεται ότι οι προτάσεις των Somerville (1998) και Alavi and Krawinkler (2000) δείχνουν πιο έντονη μεταβολή της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας για αύξηση του μεγέθους του σεισμού. Η διαφορά αυτή αποδίδεται στο ότι οι μελέτες του Rodriguez-Marek (2000) αφορούν ένα πιο μεγάλο δείγμα σεισμικών καταγραφών.



Σχήμα 1.16: Σχέσεις εξασθένισης της Μέγιστης Οριζόντιας Εδαφικής Ταχύτητας σε σχέση με την απόσταση από το ρήγμα (Rodriguez-Marek, 2000).



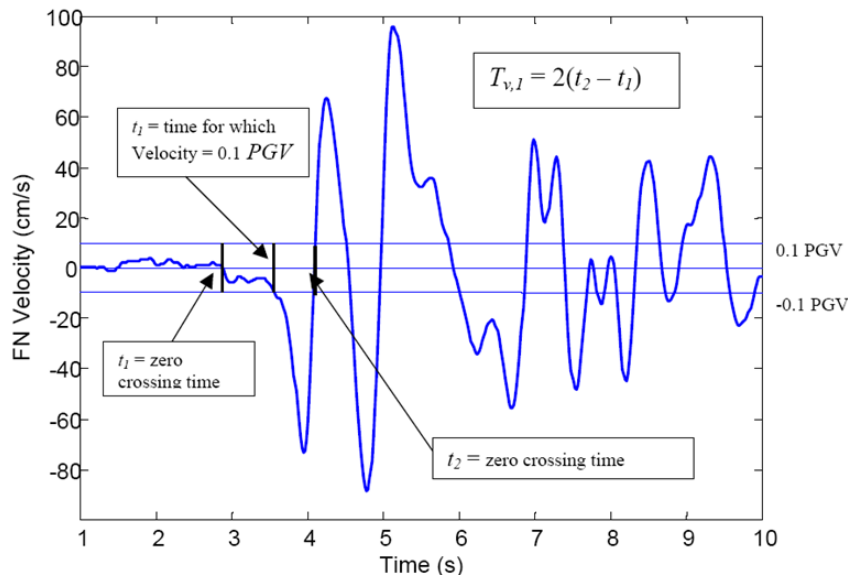
### 1.4.2 Περίοδος του παλμού

Η περίοδος ενός παλμού ταχύτητας είναι μια κρίσιμη και σημαντική παράμετρος για το δομοστατικό μηχανικό, αφού ο λόγος της περιόδου του παλμού προς τη θεμελιώδη περίοδο μιας κατασκευής μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την απόκριση της κατασκευής (Alavi and Krawinkler 2001; Anderson and Bertero 1987; Mavroudis et al, 2004). Ύστερα από είκοσι χρόνια συστηματικής μελέτης των σεισμών κοντινού πεδίου, ο τρόπος υπολογισμού της περιόδου του παλμού κατευθυντικότητας αλλά και ο ξεκάθαρος ορισμός της εν λόγω παραμέτρου αποτελεί αντικείμενο που αντιμετωπίζεται διαφορετικά από κάθε ερευνητή.

Ο Somerville (1998) συσχέτισε την περίοδο του παλμού  $T_v$  με το μέγεθος του σεισμικού γεγονότος, όπου  $T_v$  ορίζει την περίοδο του μεγαλύτερου κύκλου της εδαφικής κίνησης. Η περίοδος αυτή σχετίζεται από το Somerville (1998) και με το χρόνο ανόδου (rise time) της ολίσθησης πάνω στο ρήγμα. Η σχέση μεταξύ της χρονικής διάρκειας του παλμού και του χρόνου ανόδου εξηγείται από το φαινόμενο της διάρρηξης του ρήγματος. Εάν ένα ρήγμα θεωρηθεί ως ένα σημείο και αγνοηθεί η επιρροή της διάδοσης των σεισμικών κυμάτων, η διάρκεια της εδαφικής κίνησης είναι ίση με το χρόνο ανόδου (Somerville, 1998). Η επιρροή της διάδοσης των σεισμικών κυμάτων, αλλά και η πεπερασμένη γεωμετρία της ρηξιγενούς επιφάνειας συμβάλλουν στην αύξηση της χρονικής διάρκειας του παλμού. Έτσι, ο χρόνος ανόδου αποτελεί στην πραγματικότητα ένα κάτω όριο της περιόδου του παλμού.

Οι Krawinkler and Alavi (1998) προσδιορίζουν την παρουσία παλμού ταχύτητας όταν υπάρχει μια καθαρή και σφαιρική αιχμή στο φάσμα απόκρισης ταχυτήτων μιας εδαφικής κίνησης και εκτιμούν την ισοδύναμη περίοδο του παλμού  $T_{v-p}$  ως τη δεσπόζουσα περίοδο του φάσματος ταχυτήτων για απόσβεση 5%, την περίοδο δηλαδή στην οποία το φάσμα εμφανίζει την αιχμή του, την οποία έπειτα συσχετίζουν με το μέγεθος του σεισμού. Ο ορισμός αυτός έχει αμφισβητηθεί από πολλούς ερευνητές (Rodriguez-Marek, 2000; Baker, 2007; Mimoglou et al, 2014).

Ο προσδιορισμός της περιόδου του παλμού  $T_v$  σύμφωνα με τον Rodriguez Marek (2000) μπορεί να γίνει είτε χρησιμοποιώντας το χρονικό διάστημα στο οποίο πραγματοποιούνται δύο διαδοχικοί μηδενισμοί της ταχύτητας (zero crossing time), είτε το διάστημα στο οποίο η ταχύτητα είναι ίση με το 10% της μέγιστης ταχύτητας του παλμού, αν το δεύτερο διαφέρει σημαντικά από το πρώτο (σχήμα 1.17). Ο ορισμός αυτός ενέχει ένα μεγάλο βαθμό υποκειμενικότητας.

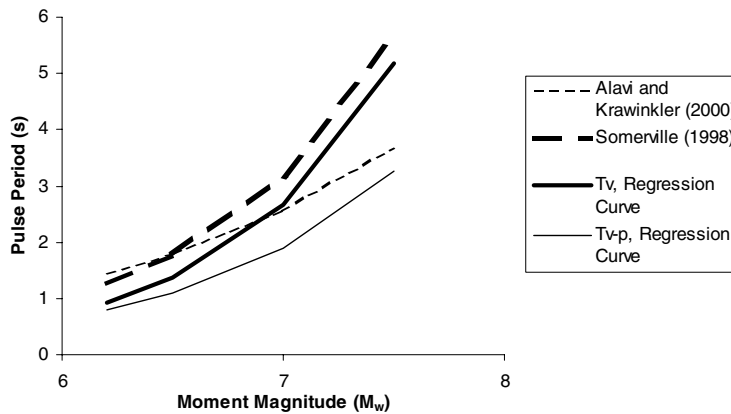


Σχήμα 1.17: Προσδιορισμός της περιόδου του παλμού ταχύτητας από τη χρονοϊστορία ταχυτήτων (Rodriguez-Marek, 2000).

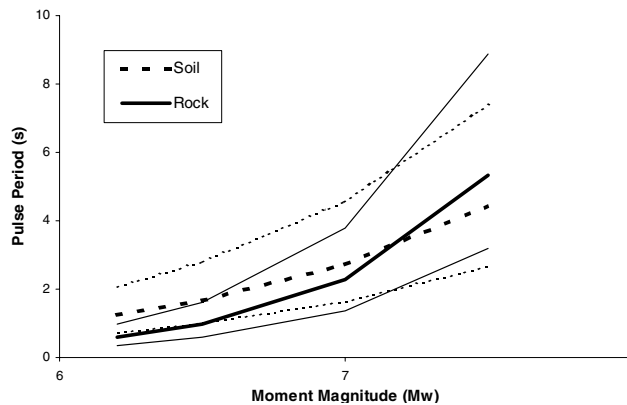
Οι προσεγγίσεις της περιόδου του παλμού από τους Krawinkler and Alavi (1998) και

Rodriguez-Marek (2000) δίνουν περίπου ισοδύναμα αποτελέσματα για σεισμικές κινήσεις που εμπεριέχουν ένα μόνο σημαντικό παλμό (single-pulse motions), όμως για πιο πολύπλοκες καταγραφές τα αποτελέσματα μπορεί να αποκλίνουν σημαντικά. Συγκεντρωτικά, ο λόγος της  $T_v$  προς την  $T_{v-p}$  έχει μέσο όρο 0.84 και τυπική απόκλιση 0.28 (Rodriguez-Marek, 2000). Η σύμπτωση των δύο αυτών προσεγγίσεων της περιόδου υποδεικνύει ότι ο παλμός ταχύτητας εμπεριέχει ενέργεια σε μια μικρή συχνοτική περιοχή.

Ο Rodriguez-Marek (2000) συσχετίζει την περίοδο του παλμού ταχύτητας με το μέγεθος του σεισμικού γεγονότος διατυπώνοντας μια σειρά από ανάλογες σχέσεις με αυτές των Somerville (1998) και Alavi and Krawinkler (2000) μέσω ανάλυσης παλινδρόμησης για ένα πλήθος σεισμικών γεγονότων. Στο σχήμα 1.18 φαίνεται μια σύγκριση μεταξύ των μελετών που αναφέρθηκαν, ενώ στο σχήμα 1.19 παρουσιάζεται η πρόβλεψη του Rodriguez-Marek για την περίοδο του παλμού κατευθυντικότητας ως προς τις εδαφικές συνθήκες.



Σχήμα 1.18: Συσχέτιση της περιόδου του παλμού με το μέγεθος του σεισμού (Rodriguez-Marek, 2000).



Σχήμα 1.19: Συσχέτιση της περιόδου του παλμού με το μέγεθος του σεισμού για διαφορετικές εδαφικές συνθήκες (Rodriguez-Marek, 2000).

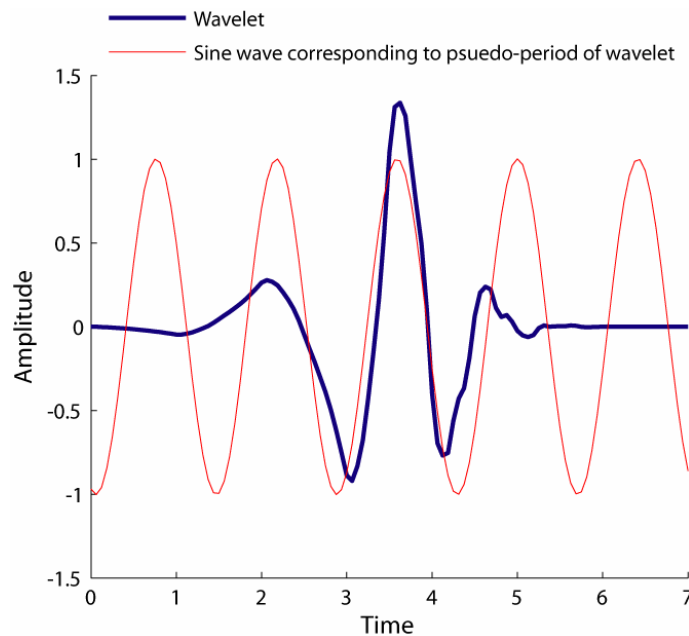
Οι Zhai et al (2013) πρότειναν τη Μέθοδο του Σημείου Αιχμής (*The Peak Point Method*), σύμφωνα με την οποία η περίοδος του παλμού είναι ίση με το χρονικό διάστημα στο οποίο ολοκληρώνεται εκείνος ο κύκλος της καταγραφής που περιέχει τη μέγιστη εδαφική ταχύτητα PGV, ανεξαρτήτως του αν αυτή έχει θετική ή αρνητική τιμή, δηλαδή αν ο κύκλος έχει τη μορφή όρους ή κοιλάδας.

Η περίοδος του παλμού κατά τους Mavroudis and Papageorgiou (2003) προκύπτει ώστε η αιχμή της συνθετικής κυματομορφής να συμβαίνει στην ίδια περίοδο με την αιχμή του φάσματος απόκρισης της ψευδο-ταχύτητας. Ακόμα, οι ερευνητές θεωρούν την περίοδο του παλμού άμεσα εξαρτημένη

από τη διαδικασία της διάρρηξης και το χρόνο ανόδου. Έτσι, κάνοντας χρήση ενός συνοριακού προσομοιώματος (specific barrier model) που εισήχθη από τους Papageorgiou and Aki (1983), συσχέτισαν την περίοδο του παλμού με το μέγεθος του σεισμικού γεγονότος και το μέγεθος των κλείθρων που συμμετέχουν στη διάρρηξη, για τα οποία θεωρήθηκε εξιδανικευμένη μορφή.

Εξετάζοντας τη δεσπόζουσα συχνότητα του κυματιδίου που χρησιμοποιείται για την περιγραφή του παλμού ταχύτητας μιας εδαφικής κίνησης, ο Baker στα πλαίσια των μελετών του προσδιορίζει την περίοδο του παλμού.

Η έννοια της περιόδου ενός κυματιδίου δεν είναι ξεκάθαρα ορισμένη όπως συμβαίνει στα ημιτονικά σήματα που προκύπτουν από ανάλυση Fourier. Παρ' όλα αυτά η περίοδος που σχετίζεται με το μέγιστο πλάτος Fourier ενός κυματιδίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό μιας ψευδο-περιόδου. Στο σχήμα 1.20 παρουσιάζεται ένα κυματίδιο συγκριτικά με την αρμονική, ένα ημιτονικό δηλαδή σήμα, που έχει περίοδο ίση με εκείνη στην οποία παρατηρείται το μεγαλύτερο πλάτος Fourier του κυματιδίου. Η ψευδο-περίοδος της μεγαλύτερης συνιστώσας του κυματιδίου χρησιμοποιείται από τον Baker ως η περίοδος παλμού της εδαφικής κίνησης.

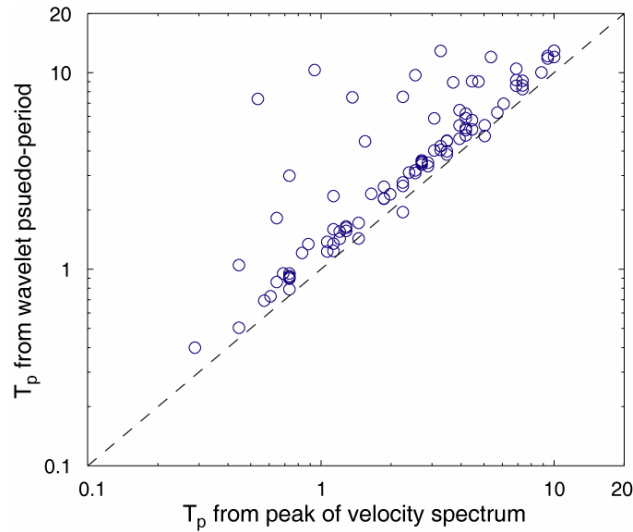


Σχήμα 1.20: Κυματίδιο Daubechies και ημιτονικό σήμα με περίοδο ίση με τη μέγιστη του φάσματος Fourier της κυματομορφής (Baker, 2007).

Πολλοί ερευνητές έχουν προτείνει διαφορετικές μεθόδους για τον προσδιορισμό της περιόδου του παλμού ταχύτητας. Κάποιες από αυτές λαμβάνουν υπόψη το χρονικό διάστημα μεταξύ διαδοχικών μηδενισμών των τιμών του κυματιδίου, ώστε να γίνει παρεμβολή ενός περιχομένου ημιτόνου μέσα στον παλμό (Akkar et al, 2005; Bray and Rodriguez-Marek, 2004; Mavroeidis and Papageorgiou, 2003; Menun and Fu, 2002). Οι μέθοδοι αυτές εμπεριέχουν ένα βαθμό υποκειμενικότητας όσον αφορά τα σημεία μηδενισμού σε περιπτώσεις που η καταγραφή εμπεριέχει θόρυβο και η γραμμή βάσης έχει επηρεαστεί από ανεπιθύμητες συχνότητες που δε σχετίζονται με το σεισμικό γεγονός, γι' αυτό και δεν εφαρμόζονται στις αναλύσεις του Baker.

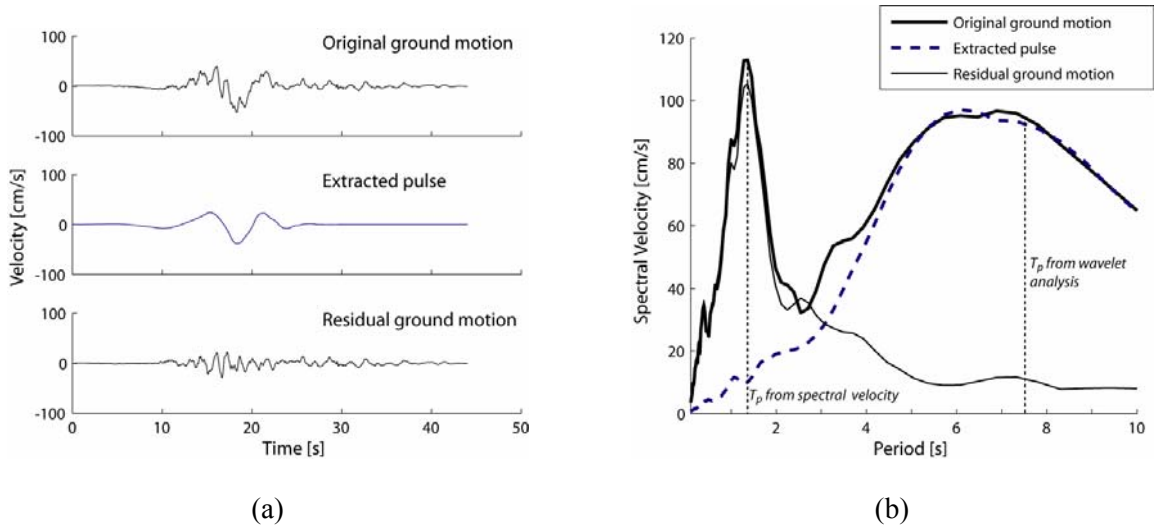
Στο σχήμα 1.21 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα των περιόδων των παλμών που εξήχθησαν μέσω κυματικής ανάλυσης ως προς τις περιόδους που προκύπτουν από τη μέγιστη αιχμή του φάσματος ταχύτητας, για τις 91 καταγραφές που έχουν χαρακτηριστεί ως παλμικές από το Baker (2007). Οι περίοδοι που εξάγονται από τις δύο αυτές προσεγγίσεις είναι κατά βάση παρόμοιες, με τις περιόδους  $T_p$  που προκύπτουν από την κυματική ανάλυση να είναι ελαφρώς μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες  $T_p$  που υπολογίζονται από τη μέγιστη αιχμή του φάσματος της ταχύτητας, μια παρατήρηση που έχει

γίνει και από τους Bray and Rodriguez-Marek (2004).



Σχήμα 1.21: Περίοδος παλμού ( $T_p$ ) από τη μέγιστη αιχμή του φάσματος της ταχύτητας σε σχέση με την περίοδο παλμού ( $T_p$ ) από την ψευδο-περίοδο του κυματιδίου για 91 εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου (Baker, 2007).

Στις περιπτώσεις όπου οι περίοδοι που λαμβάνονται από την κυματική ανάλυση και από το φάσμα ταχύτητας διαφέρουν σημαντικά, η περίοδος που προκύπτει από την κυματική ανάλυση δείχνει να είναι πιο αξιόπιστο μέτρο ένδειξης της περιόδου του παλμού. Στις περιπτώσεις αυτές η περίοδος που αντιστοιχεί στη μέγιστη φασματική ταχύτητα σχετίζεται γενικά με υψίσυχνες συνιστώσες της εδαφικής κίνησης, ενώ η περίοδος του κυματιδίου σχετίζεται με τον ορατό παλμό ταχύτητας. Ένα παράδειγμα μιας τέτοιας περίπτωσης παρουσιάζεται στο σχήμα 1.22, όπου οι κύριοι διαδοχικοί μηδενισμοί που σχετίζονται με τον παλμό της εδαφικής κίνησης απέχουν κατά 7.3 sec και η αιχμή της φασματικής ταχύτητας εμφανίζεται σε περίοδο 1.4 sec, ενώ η ψευδο-περίοδος του κυματιδίου είναι 7.5 sec και είναι εμφανές ότι ταιριάζει με την περίοδο του παλμού που αναγνωρίζεται οπτικά.



Σχήμα 1.22: Η αρχική κίνηση, ο εξαγόμενος παλμός και η εναπομένουσα εδαφική κίνηση για την εδαφική κίνηση Landers 1992, Yermo Fire Station. (a) Χρονοϊστορίες ταχύτητας (b) Φάσματα ταχύτητας στα οποία φαίνεται ο προσδιορισμός της περιόδου του παλμού με τη χρήση του φάσματος ψευδο-ταχύτητας και μέσω κυματικής ανάλυσης (Baker, 2007).

Η προσέγγιση της περιόδου από τον Baker με χρήση της ψευδο-περιόδου του κυματιδίου αποτελεί μια ενδιαφέρουσα πρόταση. Όμως, προκειμένου να υπολογιστεί η περίοδος του παλμού κατευθυντικότητας κατά τον Baker, το επιλεγμένο κυματίδιο αναλύεται κατά Fourier για να εκτιμηθεί η δεσπόζουσα περιόδός του και κατ' αυτό τον τρόπο ακυρώνεται η αρχική παραδοχή για την καλύτερη αξιοπιστία των κυματιδίων έναντι των αρμονικών Fourier, αφού ότι η μέθοδος καταλήγει στην επιλογή της αρμονικής που προσεγγίζει με την μεγαλύτερη ακρίβεια το κυματίδιο που προέκυψε από την προτεινόμενη διαδικασία.

Μια σύγχρονη και αποτελεσματική μέθοδος έχει προταθεί από τους Mimoglou et al (2014), σύμφωνα με την οποία η περίοδος του δεσπόζοντος παλμού προσδιορίζεται από τη μέγιστη κορυφή του φάσματος συνέλιξης (convolution spectrum or product spectrum)  $S_d \times S_v$  για απόσβεση 5%. Η μέθοδος των Mimoglou et al είναι αυτή που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία και περιγράφεται αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο.

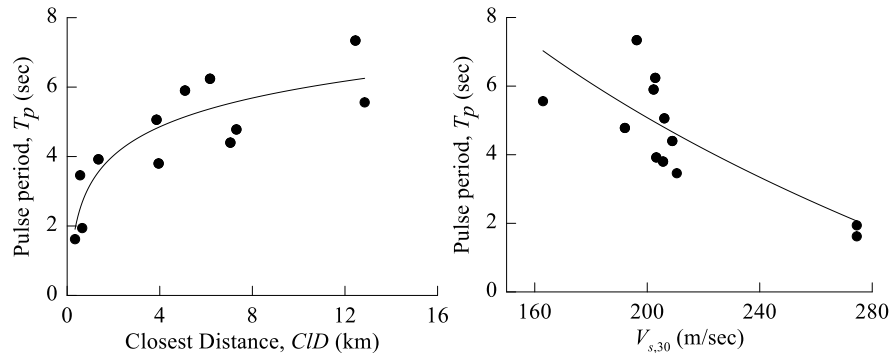
Μια ενδιαφέρουσα πρόταση έχει γίνει από τους Kardoutsou et al (2015), όπου η περίοδος του παλμού υπολογίζεται από την αιχμή του φάσματος συνέλιξης  $S_d \times S_v$  για απόσβεση 5% (Mimoglou et al, 2014) και έπειτα συσχετίζεται μέσω ανάλυσης παλινδρόμησης με το μέγεθος του σεισμικού γεγονότος  $M_w$ , την απόσταση του καταγραφικού σταθμού από το ρήγμα  $CID$  και τη μέση ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων  $\nu_{s,30}$ . Οι δύο τελευταίες παράμετροι εισάγονται μετά την παρατήρηση των ερευνητών ότι η συσχέτιση της περιόδου του παλμού μόνο με το μέγεθος του σεισμικού γεγονότος δεν είναι ισχυρή. Η εν λόγω μελέτη έγινε σε ένα δείγμα 60 σεισμικών καταγραφών, οι οποίες ταξινομήθηκαν ως παλμικές εδαφικές κινήσεις με βάση τη μεθοδολογία των Kardoutsou et al (2014). Σύμφωνα με την εν λόγω μέθοδο, μια εδαφική κίνηση κατατάσσεται ως παλμική εάν ικανοποιείται το κριτήριο  $S_{d,0}(T_p)/CAD > 0.65$ , όπου  $S_{d,0}(T_p)$  είναι η τιμή του φάσματος μετακινήσεων για την περίοδο του παλμού και απόσβεση 0% και  $CAD$  ο νεοεισαχθείς εδαφικός δείκτης της Αθροιστικής Απόλυτης Μετακίνησης (Cumulative Absolute Displacement, Taflampas et al, 2009). Το  $CAD$  υπολογίζεται ως:

$$CAD = \int_{t_{min}}^{t_{max}} |v_g| dt \quad (1.4)$$

όπου  $t_{min}, t_{max}$  η πρώτη και η τελευταία χρονική στιγμή μηδενισμού της εδαφικής ταχύτητας,

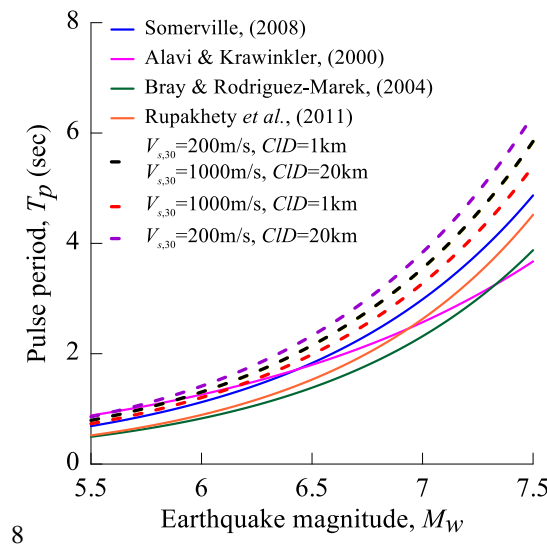
πριν και μετά την υπέρβαση της τιμής  $v_g = 0.4 \times PGV$  αντίστοιχα.

Στο σχήμα 1.23 παρουσιάζεται η συσχέτιση της περιόδου του παλμού κατευθυντικότητας με την απόσταση του καταγραφικού σταθμού από το ρήγμα και τη μέση ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων στη θέση καταγραφής μέσω ανάλυσης παλινδρόμησης, για 12 καταγραφές από το σεισμό στο Imperial Valley (California - 1979).



Σχήμα 1.23: Συσχέτιση της  $T_p$  (a) με την κοντινότερη απόσταση από το ρήγμα και (b) με τη μέση ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων για το σεισμό του Imperial Valley (1979) (Kardoutsou et al, 2015).

Στο σχήμα 1.24 παρουσιάζονται οι προτεινόμενες καμπύλες για τις ακραίες τιμές  $CID = 1km$  και  $CID = 20km$  και  $v_{s,30} = 200m/s$  και  $v_{s,30} = 1000m/s$  (διακεκομμένες γραμμές) και συγκρίνονται με υπάρχουσες σχέσεις που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία.



Σχήμα 1.24: Σύγκριση αποτελεσμάτων των Kardoutsou et al (2015) με υπάρχουσες σχέσεις της βιβλιογραφίας.

### 1.4.3 Αριθμός Σημαντικών Ημικύκλων

Ο αριθμός των σημαντικών παλμών μιας εδαφικής κίνησης ορίζεται από τον Rodriguez-Marek (2000) ως ο αριθμός των ημικύκλων της εδαφικής ταχύτητας που έχουν πλάτος μεγαλύτερο από το 50% της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας για την κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα της εδαφικής κίνησης. Ο Rodriguez-Marek (2000) σημειώνει ότι το όριο του 50% είναι αυθαίρετο και το πλήθος των σημαντικών παλμών είναι ευαίσθητο στην τιμή αυτή. Κάνοντας όμως χρήση της σε ένα δείγμα

48 καταγραφών, καταλήγει στο συμπέρασμα ότι στις περισσότερες καταγραφές εμφανίζονται δύο σημαντικοί παλμοί, οι οποίοι συνιστούν ένα πλήρη κύκλο μιας παλμικής κίνησης. Ο Somerville (1998) παρατήρησε ότι ο αριθμός των σημαντικών ημικύκλων σχετίζεται με τον αριθμό των κλείθρων του ρήγματος που διαρρηγνύονται κατά την ολίσθηση του ρήγματος, αυτή όμως είναι μια παράμετρος για την οποία δε μπορεί να γίνει κάποια πρόβλεψη *a priori*, πριν δηλαδή τη διάρρηξη ενός ρήγματος. Για τις περισσότερες όμως περιπτώσεις, ο αριθμός των σημαντικών ημικύκλων έχει τιμές από 1 μέχρι 3, με την τιμή 2 να φαίνεται μια καλή μέση εκτίμηση.

Σημειώνεται ότι οι αριθμοί των σημαντικών ημικύκλων κατά τους Rodriguez-Marek και Somerville αφορούν αποκλειστικά τη μορφή του παλμού κατευθυντικότητας, ενώ στα επόμενα κεφάλαια της εργασίας αυτής πέραν του παλμού κατευθυντικότητας, εξάγονται περισσότεροι κύκλοι από κάθε εδαφική κίνηση και αναζητείται το πλήθος των συνολικών κύκλων που δίνει μια ικανοποιητική περιγραφή της.

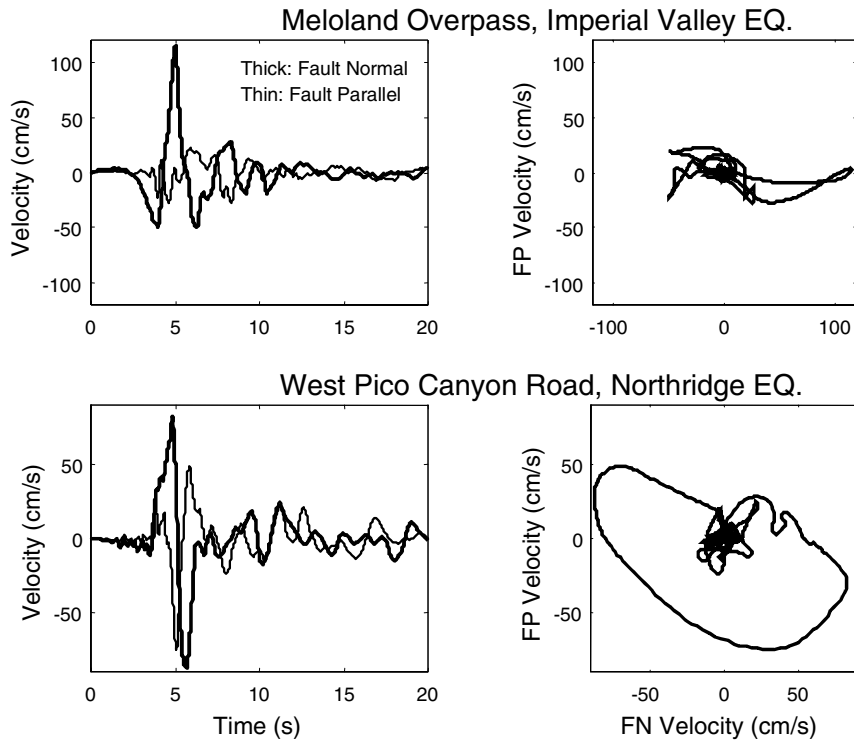
## 1.5 Εντοπισμός παλμών κατευθυντικότητας σε ένα εύρος προσανατολισμών

Η εμφάνιση παλμών ταχύτητας που οφείλονται στα φαινόμενα κατευθυντικότητας αναμένεται τυπικά στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα της εδαφικής κίνησης (Somerville et al, 1997). Όμως, συχνά οι επιφάνειες διάρρηξης έχουν μη κανονική γεωμετρία, γεγονός που καθιστά τον καθορισμό της ακριβούς κάθετης στο ρήγμα διεύθυνσης δύσκολο. Όπως αναφέρεται και στις μελέτες των Howard et al (2005), παλμικές εδαφικές κινήσεις παρατηρούνται σε ένα εύρος διευθύνσεων.

Οι μελέτες που αφορούν την απόκριση κατασκευών σε σεισμικές διεγέρσεις κοντινού πεδίου έχουν επικεντρωθεί στις συνέπειες της κάθετης στο ρήγμα συνιστώσας (Alavi and Krawinkler, 2000). Υπάρχουν όμως εφαρμογές στις οποίες η παράλληλη στο ρήγμα συνιστώσα μπορεί να είναι επίσης σημαντική. Για παράδειγμα, η μείωση της δυσκαμψίας του εδάφους λόγω της απόκρισής του στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα μπορεί να επιτρέψει την εκδήλωση μεγαλύτερων παραμορφώσεων κατά τη διεύθυνση της παράλληλης στο ρήγμα συνιστώσας, όπως το έδαφος αντιδρά και στην παράλληλη στο ρήγμα συνιστώσα του σεισμού. Μη γραμμικές διαξονικές αναλύσεις της απόκρισης του εδάφους από τον Rodriguez-Marek (2000) δείχνουν ότι οι τοπικές εδαφικές συνθήκες μπορούν να επηρεάσουν τις τιμές της μέγιστης οριζόντιας ταχύτητας  $PGV_H$  και της περιόδου του παλμού  $T_v$  και στις δύο προαναφερθείσες διευθύνσεις.

Στο σχήμα 1.25 παρουσιάζονται δύο σεισμικές κινήσεις κοντινού πεδίου με σημαντικά διαφορετικές κινήσεις στην παράλληλη στο ρήγμα διεύθυνση. Οι διαφορές αυτές απεικονίζονται με τη μορφή τροχιακών διαγραμμάτων των ταχυτήτων στις δύο διευθύνσεις, που φαίνεται στο δεξί μισό του σχήματος 1.25. Επιπρόσθετη έρευνα επιτρέπει τη διάκριση των επιπτώσεων της διαξονικής καταπόνησης στην απόκριση του εδάφους και των κατασκευών εντός της ζώνης κοντινού πεδίου, όπου οι δύο οριζόντιες συνιστώσες της εδαφικής κίνησης μπορούν να διαφέρουν σημαντικά. Εάν είναι σημαντική για τη συμπεριφορά των κατασκευών, ίσως χρειάζεται να εκτιμηθεί και η κατακόρυφη συνιστώσα της εδαφικής δράσης.

1.5. ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΠΑΛΜΩΝ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΕΝΑ ΕΥΡΟΣ  
ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΩΝ



Σχήμα 1.25: Χρονοϊστορίες ταχύτητας και οριζόντια τροχιακά σχέδια της κάθετης (FN) και της παράλληλης (FP) στο ρήγμα συνιστώσας για δύο καταγραφές κοντινού πεδίου (Stewart et al, 2001).

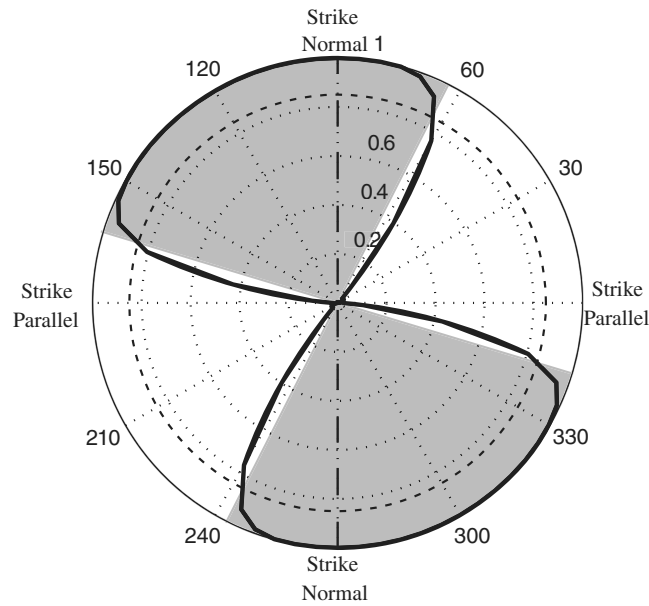
Ο Baker (2007) εισήγαγε ένα δείκτη ύπαρξης παλμού κατευθυντικότητας σε μια εδαφική κίνηση, συνδυάζοντας μέσω ανάλυσης γραμμικής παλινδρόμησης τη μέγιστη εδαφική ταχύτητα της εναπομένουσας καταγραφής μετά την αφαίρεση του παλμού, προς τη μέγιστη εδαφική ταχύτητα της αρχικής καταγραφής και την ενέργεια της εναπομένουσας καταγραφής προς την ενέργεια της αρχικής καταγραφής. Αυτές οι παράμετροι αναφέρονται στις μελέτες του Baker ως  $PGV_{ratio}$  και  $Energy_{ratio}$  αντίστοιχα και συνδέονται μέσω της σχέσης 1.5.

$$PulseIndicator = \frac{1}{1 + e^{-23.3 + 14.6(PGV_{ratio}) + 20.5(Energy_{ratio})}} \quad (1.5)$$

Για τιμές του παλμικού δείκτη μεγαλύτερες από 0.85, μια εδαφική κίνηση κατατάσσεται ως παλμική, εμπεριέχει δηλαδή τουλάχιστον ένα σημαντικό παλμό κατευθυντικότητας.

Στο σχήμα 1.26 παρουσιάζονται οι τιμές του παλμικού δείκτη όπως έχει υπολογιστεί με τον αλγόριθμο του Baker (2007) για ένα καταγραφικό σταθμό στο σεισμό του Imperial Valley (California - 1979), σε διάφορες διευθύνσεις. Οι τιμές του παλμικού δείκτη δείχνουν ότι παλμικές εδαφικές κινήσεις εντοπίζονται σε ένα εύρος διευθύνσεων περί την κάθετη στο ρήγμα διεύθυνση. Για τη μελέτη των διευθύνσεων στις οποίες παρατηρούνται παλμικές κινήσεις, οι καταγραφές περιστρέφονται από τους Shahi and Baker (2011) σε όλες τις δυνατές διευθύνσεις και η εδαφική κίνηση που προκύπτει σε κάθε διεύθυνση ταξινομείται ως παλμική ή μη. Έτσι, μια περιοχή θεωρείται ότι έχει υποβληθεί σε μια παλμική κίνηση όταν η εδαφική κίνηση κατατάσσεται ως παλμική τουλάχιστον σε μια διεύθυνση.



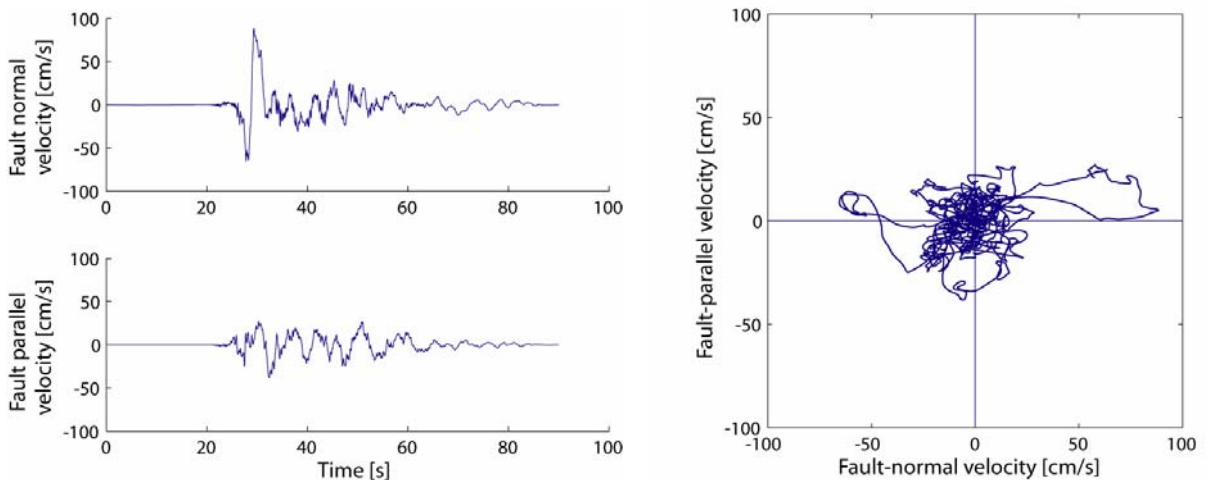


Σχήμα 1.26: Τιμές του παλμικού δείκτη συναρτήσεως του προσανατολισμού για την καταγραφή EC Country Center από το σεισμό στο Imperial Valley (California - 1979). Οι σκιασμένες επιφάνειες υποδεικνύουν τις διευθύνσεις στις οποίες παρατηρήθηκε ένας σημαντικός παλμός (Shahi and Baker, 2011).

Σημειώνεται ότι η διαδικασία περιστροφής, όπως και η διαδικασία ταξινόμησης των καταγραφών αφορά μόνο τις οριζόντιες συνιστώσες μιας εδαφικής κίνησης και είναι πιθανό να μην είναι αποτελεσματική σε περιπτώσεις που ο παλμός εκδηλώνεται εκτός του οριζόντιου επιπέδου, αφού για ρήγματα βύθισης η κάθετη στο ρήγμα διεύθυνση δε βρίσκεται εντός του οριζόντιου επιπέδου. Ωστόσο στις περιπτώσεις αυτές, η μέθοδος μπορεί να είναι αποτελεσματική όταν οι παλμοί εκτός του οριζόντιου επιπέδου δεν είναι σημαντικοί.

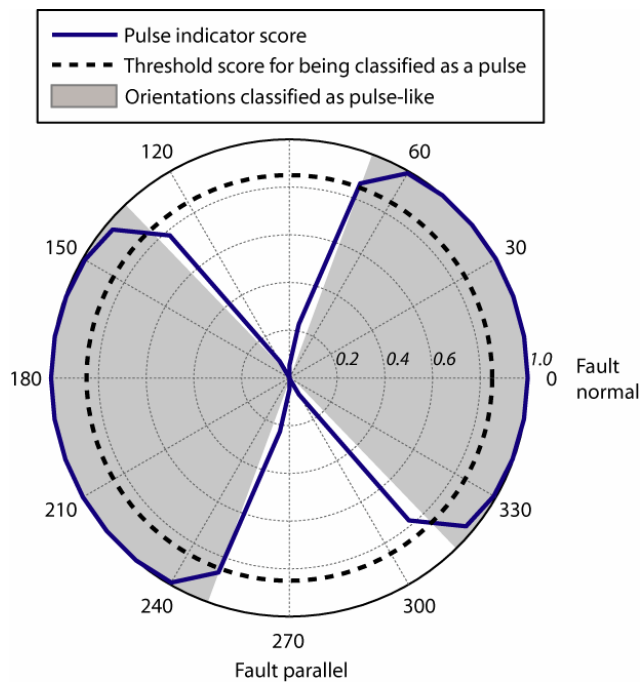
Η παρατήρηση αυτή είχε γίνει και σε παλαιότερες μελέτες του Baker (2007), όπου γίνεται αναφορά στην εφαρμογή της διαδικασίας ταξινόμησης σε εδαφικές κινήσεις δύο συνιστωσών. Χαρακτηριστικά, αναφέρεται από τον Baker (2007) το παράδειγμα της καταγραφής TCU075 στο Tsao-tun από το σεισμικό γεγονός στο Chi-Chi (Taiwan - 1999), η χρονοϊστορία ταχύτητας της οποίας φαίνεται στο σχήμα 1.27.

1.5. ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΠΑΛΜΩΝ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΕΝΑ ΕΥΡΟΣ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΩΝ



Σχήμα 1.27: Χρονοϊστορία ταχύτητας της καταγραφής Tsaotun (TCU075) από το σεισμό του Chi-Chi (Taiwan - 1999). (a) Χρονοϊστορίες στην κάθετη και στην παράλληλη στο ρήγμα διευθύνσεις. (b) Τροχιακό διάγραμμα της ταχύτητας στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα ως προς την παράλληλη (Baker, 2007).

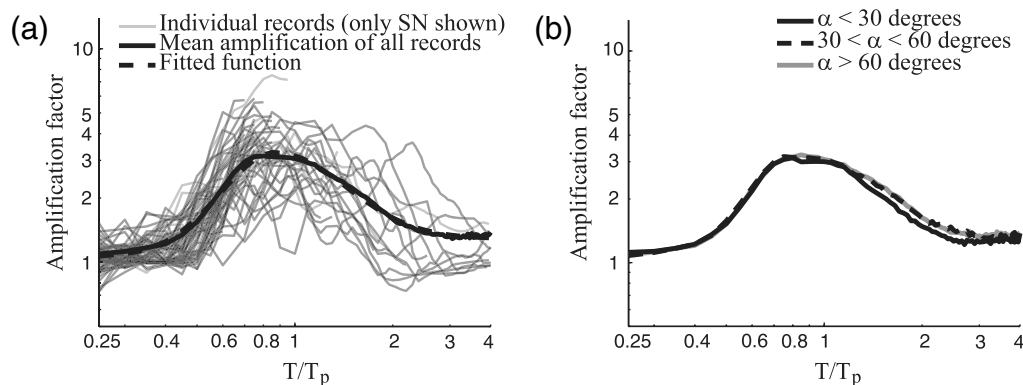
Η παρουσία παλμού είναι εμφανής στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα, ενώ δεν εμφανίζεται κάποιος παλμός στην παράλληλη στο ρήγμα συνιστώσα, όπως υποδεικνύεται από τους παλμικούς δείκτες 0.999 και 0.001 αντίστοιχα. Περιστρέφοντας τις δύο συνιστώσες της εδαφικής κίνησης, είναι δυνατός ο υπολογισμός του παλμικού δείκτη για διάφορες διευθύνσεις. Αυτές οι τιμές του παλμικού δείκτη παρουσιάζονται για την καταγραφή TCU075 στο σχήμα 1.28, στο οποίο εντοπίζεται η παρουσία παλμού σε περισσότερες από τις μισές γωνίες, υποδεικνύοντας ότι οι παλμοί κατευθυντικότητα μπορούν να επηρεάσουν κατασκευές σε ένα μεγάλο εύρος διευθύνσεων.



Σχήμα 1.28: Τιμές του Παλμικού δείκτη συναρτήσει του προσανατολισμού για την καταγραφή Tsaotun (TCU075) από το σεισμό στο Chi-Chi (Taiwan - 1999) (Baker, 2007).

## 1.6 Επιρροή στα ελαστικά και ανελαστικά φάσματα απόκρισης

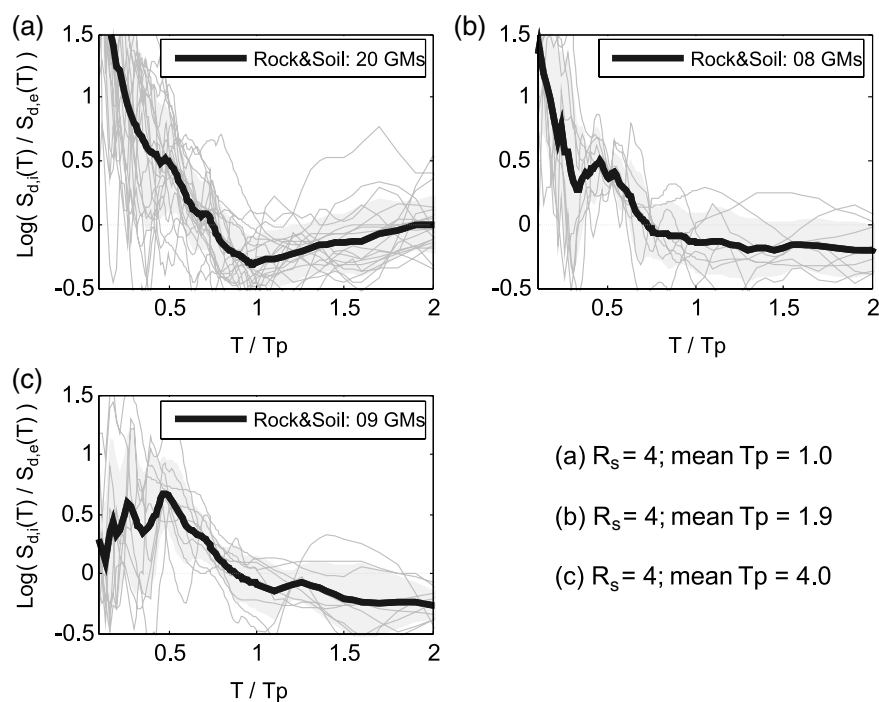
Οι παλμοί κατευθυντικότητας επιδρούν διαφορετικά στα ελαστικά και τα ανελαστικά φάσματα απόκρισης των εδαφικών κινήσεων. Όσον αφορά τα ελαστικά φάσματα απόκρισης, οι παλμοί κατευθυντικότητας προκαλούν μια κωδωνοειδή επαύξηση σε όλες τις φασματικές τιμές στην περιοχή περιόδων περί τη δεσπόζουσα περίοδο του παλμού  $T_p$  (Krawinkler and Alavi, 1998, Shahi and Baker, 2001). Η επαύξηση αυτή ειδικά στα φάσματα των μετακινήσεων έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον σε ότι αφορά τον αντισεισμικό σχεδιασμό με στάθμες επιτελεστικότητας. Στο σχήμα 1.29 παρουσιάζεται η επαύξηση της ελαστικής φασματικής ταχύτητας σε σχέση με την περίοδο του παλμού (Shahi-Baker, 2011)



Σχήμα 1.29: Φασματική επαύξηση ελαστικού φάσματος επιταχύνσεων περί την περίοδο του παλμού κατευθυντικότητας (a) Διάγραμμα καμπύλης πρόβλεψης μαζί με τα πραγματικά δεδομένα (b) Μέση επαύξηση για παλμούς με διαφορετικούς προσανατολισμούς (Shahi-Baker, 2011).

Σε ότι αφορά τα ανελαστικά φάσματα απόκρισης, για περιόδους μικρότερες από την περίοδο του παλμού ο λόγος της πλαστιμότητας προς το συντελεστή συμπεριφοράς  $\mu/q_y$  παίρνει μεγάλες τιμές (Iervolino and Cornell, 2008). Όσο η περίοδος μειώνεται, ο λόγος πλαστιμότητας - συντελεστή συμπεριφοράς αυξάνεται. Για περιόδους ίσες ή μεγαλύτερες από τη δεσπόζουσα περίοδο του παλμού, ο λόγος αυτός παίρνει τιμές κοντά στη μονάδα και επικρατεί η παραδοχή των ίσων μετακινήσεων  $\mu = q_y$ .

Η τελευταία παρατήρηση έγινε στις μελέτες των Tothong and Cornell (2006), οι οποίοι δημιούργησαν για ένα μονοβάθμιο σύστημα με σταθερό συντελεστή συμπεριφοράς  $q_y = 4.0$ , μετελαστική δυσκαμψία με κράτυνση ίση με το 5% της ελαστικής και λόγο ιξώδους απόσβεσης 5%, το λογάριθμο του λόγου της ανελαστικής προς την ελαστική μετακίνηση  $\text{Log}(S_{d,i[T]}/S_{d,e[T]})$  και τον παρέστησαν γραφικά ως προς την περίοδο ταλάντωσης ανηγμένη ως προς τη δεσπόζουσα περίοδο του παλμού  $T/T_p$ , για τρεις τιμές της περιόδου του παλμού.

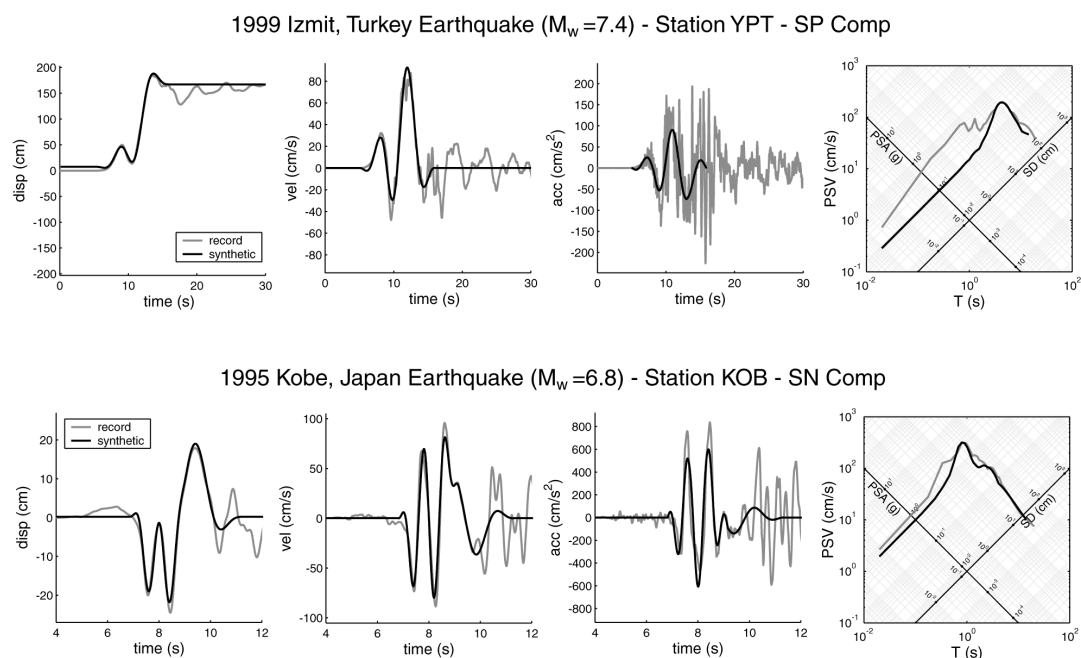


Σχήμα 1.30: Λόγοι ανελαστικών προς ελαστικές μετακινήσεις παλμικών καταγραφών (Tothong and Cornell, 2006).

Στα διαγράμματα αυτά παρατηρείται μια τοπική επαύξηση του λόγου  $S_{d,i}/S_{d,e}$  κοντά στην περιοχή περιόδων  $T \approx 0.5 \cdot T_p$ , γεγονός που υποδηλώνει την ύπαρξη μιας σημαντικά αυξημένης απαίτησης ανελαστικών μετακινήσεων στην περιοχή αυτή. Δηλαδή, στις ανελαστικές αναλύσεις αναμένεται η απαίτηση αυξημένης πλαστιμότητας για τις κατασκευές που έχουν ιδιοπερίόδους κοντά στη μισή ιδιοπερίοδο του δεσπόζοντος παλμού, όπου η περίοδος του παλμού έχει προκύψει από τα ελαστικά φάσματα απόκρισης. Στην περίπτωση (a) του σχήματος 1.30 όπου η περίοδος του παλμού είναι μικρή, η επαύξηση αυτή υπερκαλύπτεται από τις συνιστώσες υψηλού συχνοτικού περιεχομένου της διέγερσης.

## 1.7 Εξαγωγή ανώτερων παλμών ταχύτητας

Οι περισσότερες έρευνες που έχουν διεξαχθεί σχετικά με τις εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου επικεντρώνονται στην αναγνώριση ενός παλμού ταχύτητας με δεσπόζουσα περίοδο  $T_p$ . Τα τελευταία χρόνια, πολλοί ερευνητές έχουν διαπιστώσει την ύπαρξη περισσότερων σημαντικών διακριτών παλμών που εμπεριέχονται σε σεισμικές καταγραφές κοντινού πεδίου. Οι Mavroeidis and Papageorgiou (2003) χρησιμοποίησαν την επαλληλία δύο ή τριών παλμών ταχύτητας για την αναπαράσταση των αρχικών καταγραφών.



Σχήμα 1.31: Προτεινόμενο αναλυτικό προσομοίωμα προσαρμοσμένο στις εδαφικές κινήσεις από τους καταγραφικούς σταθμούς (πάνω) YPT κατά το σεισμό του Izmit (Turkey - 1999) (δύο τεχνητοί παλμοί έχουν συνδυαστεί για να παράξουν τη συνθετική χρονοϊστορία) και (κάτω) σταθμός KOB κατά το σεισμό στο Kobe (Japan - 1995) (τρεις τεχνητοί παλμοί έχουν συνδυαστεί για να παράξουν τη συνθετική χρονοϊστορία) (Mavroeidis and Papageorgiou, 2003).

### 1.7.1 Η μέθοδος CPE (Lu and Panagiotou, 2014)

Οι Lu and Panagiotou (2014) διερεύνησαν την παρουσία και τα χαρακτηριστικά πολλαπλών παλμών (με δεσπόζουσα περίοδο μεταξύ 0.5 και 12 sec) σε καταγραφές κοντινού πεδίου. Στη μέθοδο που πρότειναν, γνωστή ως CPE (Cumulative Pulse Extraction), για την αναπαράσταση της καταγραφής χρησιμοποιείται το άθροισμα των εξαγόμενων παλμών (ένας, δύο ή τρεις), ενώ για τον προσδιορισμό του καθενός βασίστηκαν στην ανάλυση με κυματίδια. Η μέθοδος CPE εφαρμόστηκε σε 40 καταγραφές κοντινού πεδίου, που λήφθηκαν σε ακτίνα εντός 10 km γύρω από το ρήγμα, για σεισμούς με μέγεθος  $M_w \geq 6.3$  και μέγιστη εδαφική ταχύτητα PGV τουλάχιστον 0.6 m/sec. Έγινε σύγκριση των φασμάτων απόκρισης ενός μονοβάθμιου συστήματος για την καταγραφή και τους παλμούς, για περιόδους μεταξύ 0.5 και 10 sec. Οι Lu and Panagiotou (2014) εφάρμοσαν τη μέθοδο τόσο σε χρονοϊστορίες ταχυτήτων (V) και επιταχύνσεων (A), χρησιμοποιώντας διαφορετικά κυματίδια που προκύπτουν από παραδοχή ίσου πλάτους (AM), ίσων ενεργειών (EN) ή ίσου εμβαδού (AR). Έτσι μελετήθηκαν συνολικά έξι μέθοδοι:  $CPE_{V-AR}$ ,  $CPE_{V-EN}$ ,  $CPE_{V-AM}$ ,  $CPE_{A-AR}$ ,  $CPE_{A-EN}$  και  $CPE_{A-AM}$ , όπου ο πρώτος δείκτης περιγράφει τον τύπο της χρονοϊστορίας και ο δεύτερος το κυματίδιο. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των παραπάνω μεθόδων έδειξε ότι είναι προτιμότερη η χρήση της  $CPE_{V-EN}$ .

Η μέθοδος CPE ακολουθεί μία επαναληπτική διαδικασία που εξάγει πολλαπλούς παλμούς από μία καταγραφή και την προσεγγίζει με το άθροισμά τους. Σε κάθε επανάληψη εξάγεται ένας παλμός, οπότε για μια καταγραφή με χρονοϊστορία  $S(t)$ , η έκφραση της μεθόδου είναι:

$$S(t) \approx S_N(t) = \sum P_i(t) \quad (1.6)$$

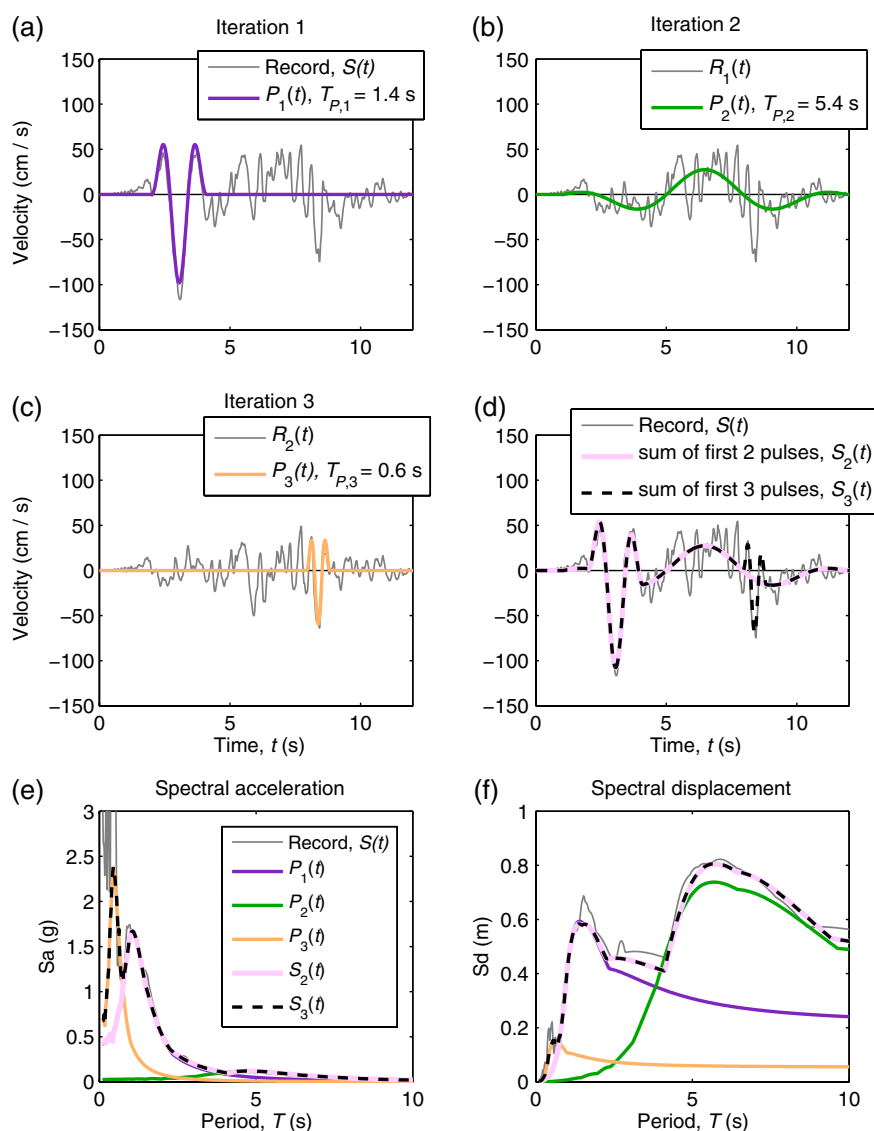
όπου  $S_N(t)$  είναι το άθροισμα  $N$  παλμών με χρονοϊστορία  $P_i(t)$  για  $i = 1 \div N$ .

Για την αναγνώριση του κάθε μεμονωμένου παλμού οι Lu and Panagiotou στηρίχθηκαν στη χρήση κυματομορφών, με μητρικό κυματίδιο αυτό των Mavroeidis and Papageorgiou (2003). Στο

σχήμα 1.31 παρουσιάζεται η εφαρμογή της μεθόδου  $CPE_{V-EN}$  στην καταγραφή Pacoima Dam (PCD) με  $M_w = 6.6$  (San Fernando, California - 1971). Η μέθοδος CPE περιγράφεται από τα παρακάτω βήματα:

- Επανάληψη 1<sup>η</sup>: Για την αναγνώριση του πρώτου παλμού,  $P_1(t)$ , εφαρμόστηκε κυματική ανάλυση στην καταγραφή PCD. Ο παλμός έχει δεσπόζουσα περίοδο 1.4 sec. Μετά την εξαγωγή του πρώτου παλμού, η εναπομένουσα εδαφική κίνηση υπολογίζεται ως  $R_1(t) = S(t) - P_1(t)$ .
- Επανάληψη 2<sup>η</sup>: Ο δεύτερος παλμός,  $P_2(t)$ , εξάγεται με την ίδια διαδικασία από την εναπομένουσα χρονοϊστορία  $R_1(t)$ . Η περίοδος του είναι 5.4 sec. Υπολογίζεται η νέα εναπομένουσα εδαφική κίνηση  $R_2(t) = R_1(t) - P_2(t) = S(t) - [P_1(t) + P_2(t)]$ .
- Επανάληψη N-οστή: Ο N-οστός παλμός  $P_N(t)$  εξάγεται από την εναπομένουσα χρονοϊστορία  $R_{N-1}(t) = R_{N-2}(t) - P_{N-1}(t) = S(t) - [P_1(t) + \dots + P_{N-1}(t)]$ . Για την καταγραφή παρουσιάζεται μέχρι και ο τρίτος παλμός  $P_3(t)$ .

Στην παρούσα εργασία, για την εξαγωγή ανώτερων παλμών, ακολουθήθηκε μια επαναληπτική διαδικασία παρόμοια με αυτήν που προτείνεται από τους Lu and Panagiotou (2014).



Σχήμα 1.32: Εξαγωγή τριών παλμών από την καταγραφή PCP με χρήση της μεθόδου  $CPEV-EN$ . Ελαστικά φάσματα επιταχύνσεων και μετακινήσεων της καταγραφής, κάθε παλμού και των αθροισμάτων τους  $S_2(t)$  και  $S_3(t)$  (Lu and Panagiotou, 2014).

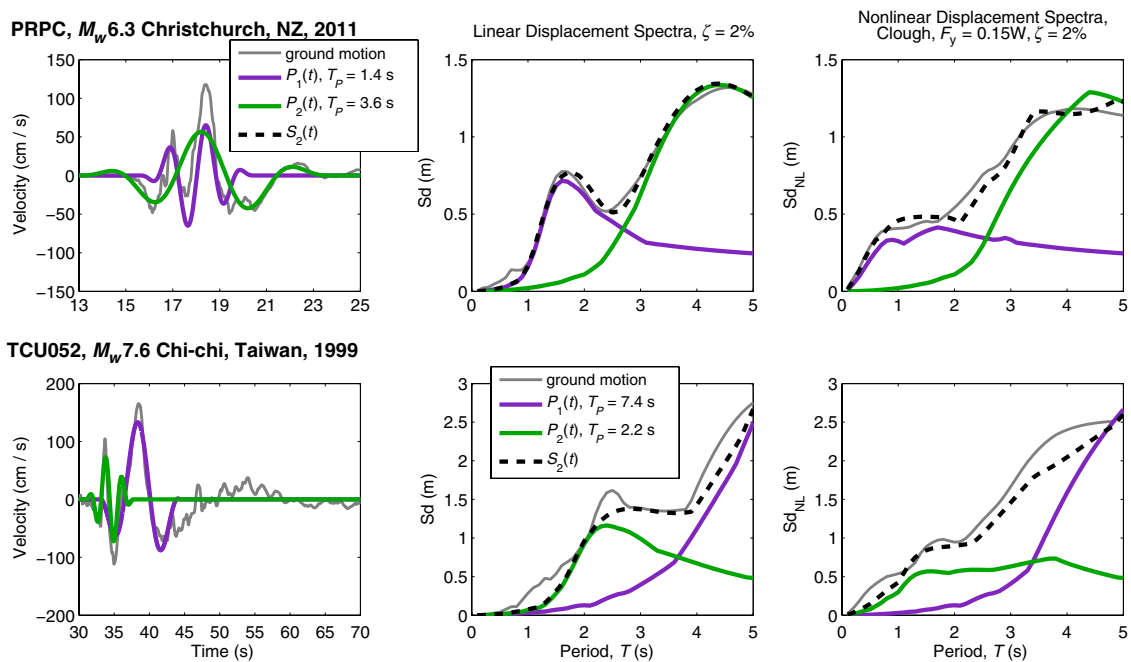
Οι Lu and Panagiotou ασχολήθηκαν επίσης με τη μη γραμμική απόκριση των κατασκευών. Στο σχήμα 1.32 παρουσιάζονται οι χρονιοίστεριες ταχύτητας των τριών εξαγόμενων παλμών για τις καταγραφές PRPC (Christchurch, New Zealand (2011) και TCU052 (Chi-Chi, Taiwan (1999), μέσω των μεθόδων  $CPEA-EN$  και  $CPEV-EN$  αντίστοιχα. Για την καταγραφή PRPC, οι δύο κυρίαρχοι παλμοί έχουν  $T_P = 1.4$  και  $3.6$  sec, ενώ για την καταγραφή TCU052 οι περίοδοι των παλμών είναι  $T_P = 7.4$  και  $2.2$  sec αντίστοιχα. Το σχήμα 1.33 δείχνει ακόμη το γραμμικό και μη γραμμικό φάσμα μετακίνησης (υστερητικό μοντέλο συμπεριφοράς του Clough με δύναμη διαρροής ίση με το 15% του συνολικού βάρους και μετελαστική συμπεριφορά με κράτυνση 5%), για κάθε έναν από τους δύο παλμούς  $P_1(t)$  και  $P_2(t)$ , καθώς και για το άθροισμά τους  $S_2(t)$ .

Όσον αφορά την καταγραφή PRPC, ο πρώτος παλμός  $P_1(t)$  δίνει μια πολύ καλή εκτίμηση της γραμμικής φασματικής απαίτησης  $S_d$  για  $T = 1 \div 2.5$  sec, ο δεύτερος  $P_2(t)$  για  $T \geq 3$  sec, ενώ το άθροισμά τους  $S_2(t)$  για  $T = 1 \div 5$  sec με σφάλμα μικρότερο του 0.11. Σχετικά με το μη-γραμμικό φάσμα μετακίνησης  $S_{d_{NL}}$ , ο πρώτος παλμός αντιπροσωπεύει ικανοποιητικά την καταγραφή για  $T < 1.8$  sec, ο δεύτερος για  $T > 4$  sec και το άθροισμά τους για κάθε  $T \leq 5$  sec.

Όσον αφορά την καταγραφή TCU052, ο πρώτος παλμός  $P_1(t)$  δίνει μια πολύ καλή εκτίμηση της

$S_d$  μόνο για  $T = 1.8 \div 2.2$  sec, ενώ ο δεύτερος  $P_2(t)$  δεν την εκτιμά επαρκώς για  $T < 5$  sec. Ωστόσο το άθροισμά  $S_2(t)$  είναι ικανοποιητικό για  $T > 1.8$  sec. Σχετικά με τη  $S_{d_{NL}}$ , οι δύο μεμονωμένοι παλμοί παρουσιάζουν σφάλμα μεγαλύτερο από 0.4 στην εκτίμησή της για κάθε  $T = 1.5 \div 3.8$  sec, ενώ αντίθετα το άθροισμά του δίνει καλή προσέγγιση για περιόδους μεταξύ 1 και 5 sec με σφάλμα μικρότερο του 0.2.

Είναι επομένως φανερό ότι η χρήση μεμονωμένων παλμών για την αναπαράσταση εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου μπορεί να υποεκτιμήσει τόσο τα γραμμικά όσο και τα μη-γραμμικά φάσματα μετακίνησης. Έτσι, οι μεμονωμένοι παλμοί δεν είναι κατάλληλοι για να περιγράψουν την αρχική εδαφική κίνηση.



Σχήμα 1.33: Χρονοϊστορία ταχύτητας, γραμμικό και μη γραμμικό φάσμα μετακίνησης για δύο εξαγόμενους παλμούς  $P_1(t)$  και  $P_2(t)$  και για το άθροισμά τους  $S_2(t)$  (Lu and Panagiotou, 2014).



## Κεφάλαιο 2

# Προσδιορισμός των παλμών μέσω κυματικής ανάλυσης με χρήση του φάσματος συνέλιξης

### 2.1 Εισαγωγή

Τα φαινόμενα κατευθυντικότητας έχουν αποτελέσει τις τελευταίες δεκαετίες αντικείμενο συστηματικών ερευνών, οι οποίες επικεντρώνονται στην εύρεση των κυριότερων χαρακτηριστικών του παλμού που εμπεριέχεται στη χρονοϊστορία της ταχύτητας μιας σεισμικής καταγραφής κοντινού πεδίου. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μια μέθοδος εντοπισμού των κύριων παλμών που εμπεριέχονται στη χρονοϊστορία της ταχύτητας μιας εδαφικής κίνησης, όπως εισήχθη από τους P. Mimoglou, I.N. Psycharis, I. Taflampas (2014). Στη μέθοδο αυτή, η οποία αποτελεί μια κλειστή μαθηματική διαδικασία, οι παλμοί ταχύτητας εντοπίζονται μέσω κυματικής ανάλυσης και για τη μαθηματική τους περιγραφή γίνεται χρήση του κυματιδίου που χρησιμοποιούν στις μελέτες τους οι Manroeidis and Parageorgiou (2003). Για τον προσδιορισμό της περιόδου κάθε παλμού γίνεται χρήση του φάσματος συνέλιξης και για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών του χρησιμοποιείται ο νεοεισαχθείς εδαφικός δείκτης *CAD* (Taflampas et al, 2009).

Η αυξημένη πυκνότητα καταγραφικών σταθμών σε περιοχές που βρίσκονται κοντά σε ενεργά ρήγματα έχει καταστήσει δυνατή τη συλλογή πλήθους καταγραφών κοντινού πεδίου, τα χαρακτηριστικά των οποίων παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές από τις τυπικές καταγραφές μακριά από τη ζώνη κοντινού πεδίου. Ειδικά μετά το σεισμό του Northridge το 1994, σύγχρονες έρευνες (Somerville et al, 1997; Abrahamson and Silva, 1997; Somerville, 1998; Abrahamson, 2000; Rodriguez-Marek, 2000; Somerville, 2003) έχουν απομονώσει τα κύρια χαρακτηριστικά των εδαφικών κινήσεων που σχετίζονται με φαινόμενα κατευθυντικότητας και οι επιπτώσεις τους στις κατασκευές (Hall et al, 1995; Alavi and Krawinkler, 2000; Sasani and Bertero, 2000; Alavi and Krawinkler, 2001). Σημαντικοί παλμοί έχουν παρατηρηθεί στη χρονοϊστορία ταχύτητας των εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου, οι οποίοι σχετίζονται κυρίως με την κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα της σεισμικής δράσης και ενισχύουν τις φασματικές τιμές των ταχυτήτων και των μετακινήσεων στις μεσαίες και τις μεγάλες περιόδους.

Η αναγνώριση της ύπαρξης παλμών στη χρονοϊστορία ταχύτητας των σεισμικών διεγέρσεων κοντινού πεδίου έχει σταθεί η αφορμή για περαιτέρω έρευνα, ώστε να καθοριστούν οι χαρακτηριστικές παράμετροι του δεσπόζοντος παλμού και κυρίως η περίοδος και το πλάτος του. Διάφοροι ερευνητές έχουν παρουσιάσει σχέσεις που συνδέουν γραμμικά το λογάριθμο της δεσπόζουσας περιόδου του παλμού με το μέγεθος της ροπής του σεισμικού γεγονότος (Somerville, 1998; Alavi and Krawinkler, 2000; Rodriguez-Marek, 2000; Rupakhety et al, 2011). Παρά το γεγονός ότι η περίοδος του παλμού μπορεί να συνδεθεί με το μέγεθος του σεισμού, δεν έχει αποδειχτεί κάτι αντίστοιχο για το πλάτος του δεσπόζοντος παλμού.

Δεδομένης της σημασίας των παλμών κατευθυντικότητας στη γραμμική και μη γραμμική

απόκριση των κατασκευών, έχουν προταθεί αρκετές μαθηματικές παραστάσεις για την προσομοίωση των σεισμικών κινήσεων κοντινού πεδίου. Αυτά τα προσομοιώματα ποικίλουν από απλές συναρτήσεις (Sasani and Bertero, 2000; Krawinkler and Alavi, 1998; Makris and Black, 2004), μέχρι πιο πολύπλοκα κυματίδια (Daubechies, 1992; Mallat, 1999) όπως στις αναλύσεις του Baker (2007).

Ένα αποτελεσματικό προσομοίωμα έχει προταθεί από τους Mavroeidis and Papageorgiou (2003, 2004), το οποίο εισήγαγε περαιτέρω παραμέτρους, που αφορούν τη συνολική διάρκεια και την αλλαγή φάσης των προσομοιούμενων παλμών. Το συγκεκριμένο προσομοίωμα εμφανίζει καλή συσχέτιση με τις αρχικές παλμικές εδαφικές κινήσεις, όπως πιστοποιήθηκε από τους Vassiliou and Makris (2011).

Η μεθοδολογία που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο αυτό συνδυάζει την αποδεδειγμένη αποτελεσματικότητα της μαθηματικής παράστασης των παλμών κατευθυντικότητας που αναπτύχθηκε από τους Mavroeidis and Papageorgiou (2003) μαζί με μια καλώς ορισμένη διαδικασία για τον προσδιορισμό των παραμέτρων των χρησιμοποιούμενων κυματιδίων.

Μέχρι τώρα το προσομοίωμα των Mavroeidis and Papageorgiou έχει χρησιμοποιηθεί είτε σε διαδικασίες που ακολουθούν τη λογική «δοκιμή και σφάλμα», όπως στην αρχική δημοσίευση με την οποία εισήχθη, είτε μέσω κυματικής ανάλυσης, όπως προτάθηκε από τους Vassiliou and Makris (2011). Η προτεινόμενη διαδικασία που περιγράφεται στο κεφάλαιο αυτό βασίζεται σε νεοεισαχθείσες έννοιες και επιτρέπει την αναγνώριση και την εξαγωγή όλων των σημαντικών παλμών που εντοπίζονται στο εύρος των μέτρων και μεγάλων περιόδων. Αν γίνει υπέρθεση όλων των εξαγόμενων παλμών, μπορεί να παραχθεί μια προσομοίωση ολόκληρης της εδαφικής κίνησης.

Τα χαρακτηριστικά των κυματιδίων καθορίζονται από τη βέλτιστη προσαρμογή τους (best fitting) στο φάσμα απόκρισης της ταχύτητας κάθε σεισμικής καταγραφής. Σημειώνεται ότι και άλλοι ερευνητές έχουν χρησιμοποιήσει συσχέτιση των φασμάτων παλμού και καταγραφής (spectral matching) ώστε να εκφράσουν ένα γνωστό σήμα μέσω κυματιδίων. Για παράδειγμα, οι Hancock et al (2006) θεώρησαν ένα αλγόριθμο βασισμένο σε κυματίδια στο πεδίο της χρονοϊστορίας, ενώ οι Giaralis and Spanos (2009) θεώρησαν μια διαδικασία βασισμένη σε κυματίδια στο πεδίο των συχνοτήτων. Η διαφορά της συγκεκριμένης διαδικασίας που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο αυτό είναι ότι επικεντρώνεται στην αναγνώριση μόνο των πιο σημαντικών παλμών που εμπεριέχονται στις εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου, οι οποίοι είναι επαρκείς για την ολοκληρωμένη προσομοίωση της αρχικής καταγραφής.

Η σημαντικότητα της μεθόδου αυτής είναι διττή. Αφενός παρέχει ένα νέο εργαλείο για την απομόνωση των σημαντικών παλμών που εμπεριέχονται στις καταγραφές εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου, αφετέρου οδηγεί σε απλουστευμένες τεχνητές χρονοϊστορίες (synthesized time-histories) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν αντί των αυθεντικών καταγραφών για τον αντισεισμικό σχεδιασμό κατασκευών μέσω αναλύσεων χρονοϊστορίας φόρτισης. Όσον αφορά το τελευταίο, έχει δείχτει ότι ενώ οι σημαντικοί παλμοί ανιχνεύονται από προσαρμογή τους στα ελαστικά φάσματα απόκρισης, οι τεχνητά κατασκευασμένες χρονοϊστορίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν με επαρκή ακρίβεια και για μη γραμμικές αναλύσεις.

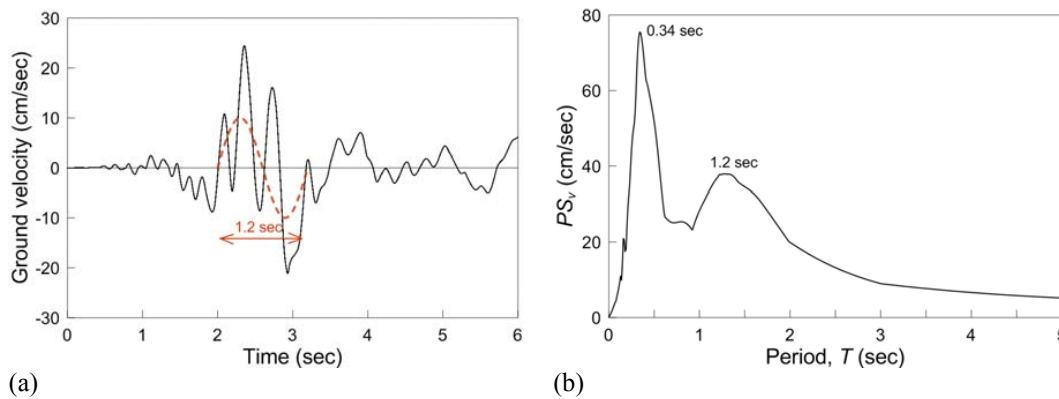
Οι μη γραμμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας φόρτισης χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο για το σχεδιασμό των κατασκευών. Ωστόσο, τα αποτελέσματά τους είναι ευαίσθητα ως προς τα χαρακτηριστικά των επιλεγμένων εδαφικών κινήσεων που χρησιμοποιούνται ως διέγερση βάσης. Για το λόγο αυτό είναι σημαντική η επιλογή διεγέρσεων βάσης με σαφώς ξεκάθαρα ορισμένα χαρακτηριστικά. Για την ικανοποίηση αυτής της απαίτησης, η συγκεκριμένη μεθοδολογία επιτρέπει τον προσδιορισμό των σημαντικών χαρακτηριστικών μιας επιλεγμένης σεισμικής καταγραφής και την προσομοίωσή της με μια υπέρθεση λίγων, αυστηρά μαθηματικά καθορισμένων παλμών.

## 2.2 Προσδιορισμός των περιόδων των σημαντικών παλμών

Μια κοινή πρακτική για την εκτίμηση της περιόδου  $T_p$  του δεσπόζοντος παλμού που περιέχεται στις εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου είναι η τιμή της περιόδου για την οποία το ελαστικό φάσμα απόκρισης της ψευδο-ταχύτητας για απόσβεση 5% εμφανίζει τη μέγιστη αιχμή του. Για παράδειγμα, η τάξη του μεγέθους της περιόδου του παλμού κατευθυντικότητας δίνεται από σχέσεις

παλινδρόμησης που συχνά βασίζονται σε αυτό τον ορισμό (Somerville, 1998; Alavi and Krawinkler, 2000; Rupakhety et al, 2011). Ωστόσο, η ακρίβεια της διαδικασίας αυτής έχει αμφισβητηθεί από πολλούς ερευνητές (Rodriguez-Marek, 2000; Baker, 2007).

Ένα παράδειγμα στο οποίο αυτός ο ορισμός της περιόδου του δεσπόζοντος παλμού οδηγεί σε εσφαλμένα αποτελέσματα παρουσιάζεται στο σχήμα 2.1 για την καταγραφή G06-320 (Gilroy Array #6) από το σεισμό του Coyote Lake (1979), ο οποίος είχε μέγεθος  $M_w = 5.7$ . Στο σχήμα 2.1a παρουσιάζεται η χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας, στην οποία είναι εμφανές ότι η κίνηση χαρακτηρίζεται από ένα παλμό με περίοδο κοντά στο 1.2 sec. Η τιμή αυτή προτείνεται και από τον Baker (2007). Ωστόσο, η περίοδος στην οποία εμφανίζεται η μέγιστη αιχμή του φάσματος απόκρισης της ψευδο-ταχύτητας για λόγο ιξώδους απόσβεσης 5% είναι ίση με 0.34 sec (σχήμα 2.1b), ενώ η κορυφή στην περίοδο  $T = 1.2$  sec έχει σημαντικά μικρότερο πλάτος.



Σχήμα 2.1: Καταγραφή G06-320 (Coyote Lake, 1979) (a) χρονοϊστορία ταχύτητας, (b) PSV 5% (Mimoglou et al, 2014).

Είναι γνωστό ότι οι φασματικές τιμές Fourier της εδαφικής επιτάχυνσης μπορούν να είναι ίσες με τις αντίστοιχες φασματικές τιμές της εδαφικής ταχύτητας (Hudson, 1979). Έτσι, το φάσμα απόκρισης της ταχύτητας για μηδενική απόσβεση θεωρείται ότι είναι μια επαρκής περιβάλλουσα του φάσματος Fourier της εδαφικής επιτάχυνσης, δηλαδή:

$$\tilde{\alpha}_g(\omega) \leq S_{v,0}(\omega) \quad (2.1)$$

όπου

$\tilde{\alpha}_g(\omega) = \mathcal{F}(\tilde{a}_g)$  είναι τα πλάτη του φάσματος Fourier της εδαφικής επιτάχυνσης  $a_g(t)$  και  $S_{v,0}(\omega)$  είναι το φάσμα απόκρισης της ταχύτητας για μηδενική απόσβεση.

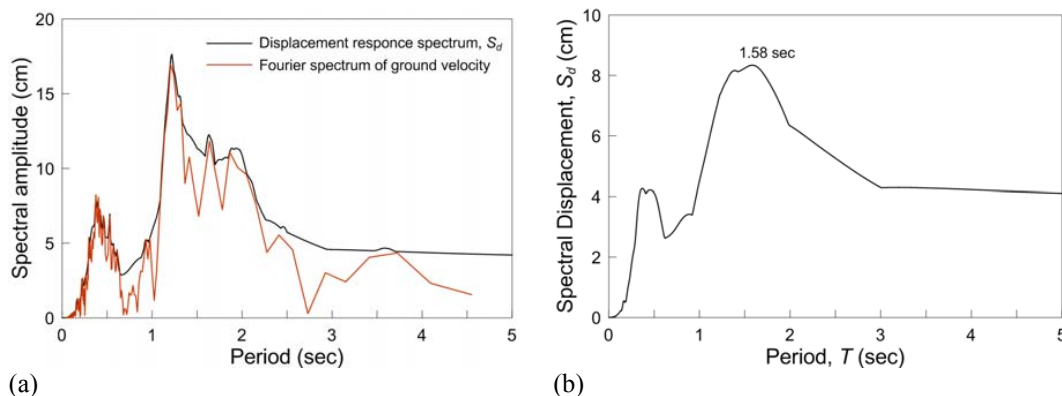
Όμοια, μπορεί να αποδειχτεί ότι το φάσμα απόκρισης της μετακίνησης για μηδενική απόσβεση αποτελεί μια επαρκή περιβάλλουσα του φάσματος Fourier της εδαφικής ταχύτητας. Όντως, για ταλαντωτές με μηδενική απόσβεση ( $\xi = 0$ ) μπορεί να γίνει η υπόθεση ότι το φάσμα απόκρισης της ταχύτητας  $S_{v,0}(\omega)$  συμπίπτει με το φάσμα απόκρισης της ψευδο-ταχύτητας  $P_{S_{v,0}}(\omega)$ , εκτός από τις περιοχές μεγάλων περιόδων. Έτσι, σε ένα μεγάλο εύρος περιόδων, μπορεί να γίνει η υπόθεση ότι  $S_{v,0}(\omega) = \omega \cdot S_{d,0}(\omega)$ , όπου  $S_{d,0}(\omega)$  είναι το φάσμα απόκρισης της μετατόπισης για μηδενική απόσβεση. Τότε, διαιρώντας και τα δύο μέλη της σχέσης (2.1) με  $\omega$  και λαμβάνοντας υπόψη ότι  $\tilde{\alpha}_g/\omega = \tilde{v}_g(\omega)$ , όπου  $\tilde{v}_g(\omega) = \mathcal{F}(\tilde{v}_g)$  το φάσμα Fourier της εδαφικής ταχύτητας  $v_g(t)$ , προκύπτει:

$$\tilde{v}_g(\omega) \leq S_{d,0}(\omega) \quad (2.2)$$

το οποίο δείχνει ότι το φάσμα απόκρισης της μετακίνησης είναι μια επαρκής περιβάλλουσα καμπύλη του φάσματος Fourier της εδαφικής ταχύτητας. Ένα παράδειγμα παρουσιάζεται στο σχήμα 2.2 για την καταγραφή G06-320 από το σεισμό στο Coyote Lake (1979).

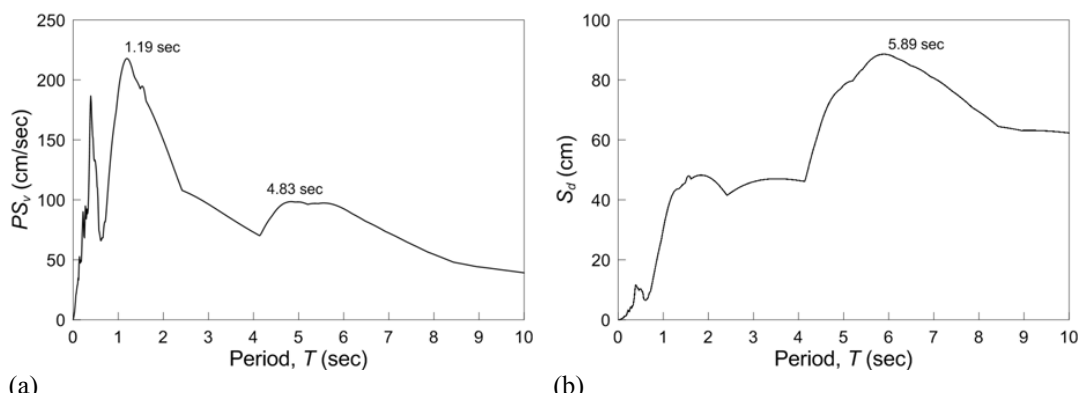
## 2.2. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΕΡΙΟΔΩΝ ΤΩΝ ΣΗΜΑΝΤΙΚΩΝ ΠΑΛΜΩΝ

Με βάση την παραπάνω παρατήρηση, και λαμβάνοντας υπόψη ότι ο παλμός κατευθυντικότητας είναι δεσπόζων στη χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας, θα ήταν λογικό η περίοδος του παλμού  $T_p$  να καθορίζεται από τη δεσπόζουσα περίοδο στο φάσμα απόκρισης της μετακίνησης. Για την καταγραφή G06-320, αυτός ο ορισμός οδηγεί σε περίοδο  $T_p = 1.58\text{sec}$  (σχήμα 2.2b) η οποία βρίσκεται κοντά στην περίοδο του παλμού (1.2 sec) που μπορεί να προσδιοριστεί από την καταγραφή της εδαφικής ταχύτητας (σχήμα 2.2a).



Σχήμα 2.2: Καταγραφή G06-320 (Coyote Lake - 1979): (a) σύγκριση του φάσματος ταχύτητας Fourier με το φάσμα μετακίνησης για μηδενική απόσβεση, (b)  $S_d$  5% (Mimoglou et al, 2014).

Ωστόσο, αυτός ο εναλλακτικός ορισμός της  $T_p$  μέσω της δεσπόζουσας περιόδου του φάσματος απόκρισης της μετακίνησης δε μπορεί να γενικευτεί, αφού υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες δεν επαληθεύεται. Ένα τέτοιο παράδειγμα δίνεται στο σχήμα 2.3 για τη συνιστώσα PCD-164 της καταγραφής Pacoima Dam από το σεισμό του San Fernando (1971). Στην περίπτωση αυτή, η περίοδος του παλμού κατευθυντικότητας είναι ίση με 1.47 sec σύμφωνα με τους Mavroeidis and Parageorgiou (2003) και 1.60 sec σύμφωνα με τον Baker (2007). Αυτές οι τιμές είναι κοντινές στη δεσπόζουσα περίοδο του φάσματος απόκρισης της ψευδο-ταχύτητας (σχήμα 2.3a), ενώ η δεσπόζουσα περίοδος του φάσματος απόκρισης της μετακίνησης είναι αρκετά μεγαλύτερη, ίση με: 5.89 sec (σχήμα 2.3b). Ακόμα, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η αιχμή του φάσματος απόκρισης της μετακίνησης συχνά επηρεάζεται από την παρουσία σφαλμάτων στις καταγραφές του επιταχύνσεων στην περιοχή των μεγάλων περιόδων, με συνέπεια ο ορισμός της περιόδου  $T_p$  από το φάσμα απόκρισης της μετακίνησης να μην είναι αξιόπιστος σε πολλές περιπτώσεις.



Σχήμα 2.3: Καταγραφή PCD-164 από το σεισμό στο San Fernando, CA (1971): (a) φάσμα απόκρισης ψευδο-ταχύτητας για απόσβεση 5%. (b) φάσμα απόκρισης μετακίνησης για απόσβεση 5% (Mimoglou et al, 2014).

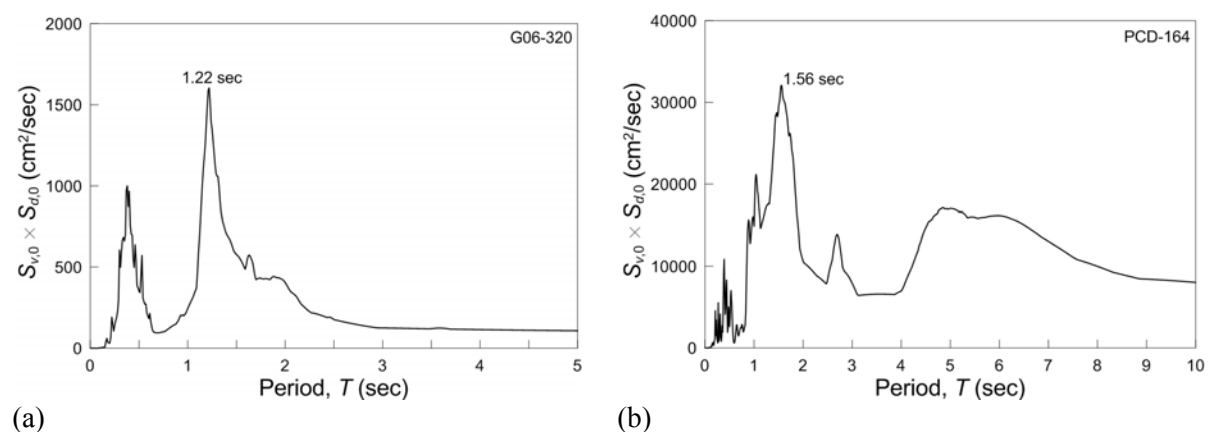
Σύμφωνα με τα παραπάνω, είναι εμφανές ότι η δεσπόζουσα περίοδος του παλμού δε μπορεί

να προκύψει από τις αιχμές των φασμάτων απόκρισης της ψευδοταχύτητας ή της μετακίνησης, αφού υπάρχουν περιπτώσεις που οι δύο αυτές προσεγγίσεις δίνουν αποτελέσματα που απέχουν σημαντικά από τα πραγματικά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι πολλές εδαφικές διεγέρσεις κοντινού πεδίου επηρεάζονται από περισσότερους από ένα παλμούς διαφορετικών περιόδων. Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζεται η προτεινόμενη μεθοδολογία, σύμφωνα με την οποία η εύρεση όλων των σημαντικών παλμών που σχετίζονται με φαινόμενα κατευθυντικότητας προκύπτει μέσω ενός συνδυασμού των φασμάτων της ταχύτητας και της μετακίνησης.

Συγκεκριμένα, αφού οι παλμικές συνιστώσες των εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου επηρεάζουν και την εδαφική επιτάχυνση και την εδαφική ταχύτητα, αν και σε διαφορετικό βαθμό, οι σημαντικές περίοδοι  $T_i$  είναι λογικό να ξεχωρίζουν στο ολοκλήρωμα συνέλιξης (convolution integral) των δύο αυτών χρονοϊστοριών. Ακόμα, με τη χρήση του ολοκληρώματος συνέλιξης απομειώνεται η επιρροή συνιστωσών με εξαιρετικά υψηλή ή χαμηλή συχνότητα που μπορεί να εμπεριέχονται στην επιτάχυνση και την ταχύτητα της εδαφικής κίνησης. Κατά συνέπεια, οι κορυφές του φάσματος συνέλιξης επιτάχυνσης και ταχύτητας αντιστοιχούν στις περιόδους των σημαντικών παλμών που εμπεριέχονται σε μια εδαφική κίνηση.

Είναι γνωστό ότι το φάσμα Fourier του ολοκληρώματος συνέλιξης δύο σημάτων είναι ίσο με το γινόμενο των φασμάτων Fourier των σημάτων για τα οποία γίνεται η συνέλιξη. Ακόμα, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το φάσμα απόκρισης της ταχύτητας για μηδενική απόσβεση  $S_{v,0}$  είναι μια επαρκής περιβάλλουσα του φάσματος Fourier της εδαφικής επιτάχυνσης και το φάσμα απόκρισης της μετακίνησης για μηδενική απόσβεση  $S_{d,0}$  είναι μια επαρκής περιβάλλουσα του φάσματος Fourier της εδαφικής ταχύτητας. Χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες αυτές, το φάσμα Fourier του ολοκληρώματος συνέλιξης μπορεί να προσεγγιστεί από το γινόμενο  $S_{v,0} \times S_{d,0}$ , το οποίο στη συνέχεια θα αναφέρεται ως *Φάσμα Συνέλιξης* (Convolution spectrum). Συνεπώς, οι περίοδοι των σημαντικών παλμών μπορούν να καθοριστούν από τις κορυφές του φάσματος συνέλιξης.

Ένα παράδειγμα δίνεται στο σχήμα 2.4, όπου παρουσιάζονται τα φάσματα συνέλιξης για τις καταγραφές που αναφέρθηκαν παραπάνω, όπου η καταγραφή G06-320 αντιστοιχεί στο σεισμό του Coyote Lake, ενώ η καταγραφή PCD-164 αντιστοιχεί στο σεισμό του San Fernando. Όπως αναφέρθηκε ήδη, στην πρώτη περίπτωση η περίοδος του παλμού σχετίζεται με τη δεσπόζουσα περίοδο του φάσματος απόκρισης της μετακίνησης, ενώ στη δεύτερη σχετίζεται με τη δεσπόζουσα περίοδο του φάσματος απόκρισης της ψευδο-ταχύτητας. Η χρήση του φάσματος συνέλιξης επιτρέπει το σωστό υπολογισμό της περιόδου του παλμού και στις δύο περιπτώσεις.



Σχήμα 2.4: Φάσματα συνέλιξης και προσδιορισμός της περιόδου  $T_i$  για τις καταγραφές: (a) G06-320 (Coyote Lake - 1979), (b) PCD-164 San Fernando (Mimoglou et al, 2014).

Η χρήση του φάσματος συνέλιξης επιτρέπει τον εντοπισμό πρόσθετων σημαντικών παλμών που ενδέχεται να εμπεριέχονται μέσα στην εδαφική κίνηση και εμφανίζονται στο πεδίο των μεσαίων και χαμηλών συχνοτήτων. Το γεγονός ότι ίσως απαιτούνται περισσότεροι από ένα παλμό για την αξιόπιστη παράσταση της εδαφικής κίνησης και την ικανοποιητική προσέγγιση των φασμάτων

απόκρισης των καταγραφών, έχει τονιστεί και από τους Mavroeidis and Papageorgiou (2003). Στις περιπτώσεις αυτές είναι απαραίτητος ο συνδυασμός περισσότερων από ένα κυματιδίων για την επαρκή αναπαράσταση της αρχικής καταγραφής.

Αυτοί οι επιπλέον παλμοί εμφανίζονται ως δευτερεύουσες κορυφές στο φάσμα συνέλιξης και μπορεί να αντιστοιχούν σε μικρότερες ή μεγαλύτερες περιόδους σε σύγκριση με τον πρώτο παλμό που προκύπτει από τη μεγαλύτερη αιχμή του φάσματος συνέλιξης. Ωστόσο, σε κάποιες περιπτώσεις αυτό δεν είναι ξεκάθαρο. Για το λόγο αυτό προτείνεται η εύρεση κάθε επιπρόσθετου παλμού επαναλαμβάνοντας την προαναφερθείσα διαδικασία στην εναπομένουσα εδαφική κίνηση (residual ground motion), μετά την αφαίρεση όλων των προηγούμενων παλμών από την αρχική καταγραφή. Αυτή η διαδικασία θα πρέπει να επαναλαμβάνεται όσες φορές είναι απαραίτητο, μέχρι να εξαχθούν διαδοχικά όλοι οι σημαντικοί παλμοί.

Παρατηρείται ότι όλοι οι παλμοί που εξάγονται από τη διαδικασία αυτή δεν είναι εξίσου σημαντικοί. Είναι έτσι απαραίτητος ο καθορισμός κριτηρίων, ώστε να ελέγχεται εάν ένας παλμός είναι αποδεκτός ή θα πρέπει να απορρίπτεται.

Ένα κριτήριο αφορά το χρόνο στον οποίο φτάνει ο παλμός, αφού οι παλμοί που φτάνουν αργά στη χρονοϊστορία της καταγραφής δε σχετίζονται με την επιρροή των φαινομένων κατευθυντικότητας (Baker, 2007). Υιοθετείται το κριτήριο που προτείνεται από τον Baker (2007) για τους παλμούς που φτάνουν αργά στη χρονοϊστορία μιας καταγραφής και σχετίζεται με το ολοκλήρωμα του τετραγώνου της ταχύτητας, με μια μικρή τροποποίηση. Η συνάρτηση του ολοκληρώματος του τετραγώνου της ταχύτητας *CSV* (Cumulative Squared Velocity) μπορεί να υπολογιστεί σε κάθε χρονική στιγμή από το ολοκλήρωμα:

$$CSV = \int_0^t v_g^2(t) dt . \quad (2.3)$$

Η συνάρτηση *CSV(t)* υπολογίζεται για την αρχική καταγραφή και για κάθε κυματίδιο που αντιστοιχεί σε περίοδο  $T_i$  και καθορίζονται οι χρόνοι στους οποίους καθένα φτάνει  $x\%$  του συνολικού του *CSV*. Αυτοί οι χρόνοι συμβολίζονται ως  $t_{x\%,orig}$  και  $t_{x\%,pulse,i}$  για την αρχική καταγραφή και τον εκάστοτε παλμό  $i$  αντίστοιχα. Σύμφωνα με τον Baker, για να θεωρείται ένας παλμός ότι βρίσκεται στην αρχή της εδαφικής κίνησης, θα πρέπει να φτάνει το 10% του συνολικού του *CSV* πριν η αρχική καταγραφή φτάσει το 20% του δικού της *CSV*, δηλαδή  $t_{10\%,pulse,i} < t_{20\%,orig}$ . Αυτό το κριτήριο υιοθετείται στην παρούσα μεθοδολογία για το χαρακτηρισμό ενός παλμού ως σημαντικού, με την ακόλουθη τροποποίηση: Όλοι οι επόμενοι παλμοί που ξεκινούν πριν το τέλος του πρώτου παλμού θεωρούνται σημαντικοί ακόμα και εάν προκύπτει  $t_{10\%,pulse,i} > t_{20\%,orig}$ . Με τον τρόπο αυτό, παλμοί που τροποποιούν το δεσπόζον παλμό λαμβάνονται πάντα υπόψη.

Για τους παλμούς που ικανοποιούν το παραπάνω κριτήριο, θεωρείται ένα δεύτερο κριτήριο για τη διατήρηση μόνο των σημαντικών. Αυτό το κριτήριο βασίζεται στην επιρροή του κάθε διαδοχικού παλμού στο φάσμα απόκρισης της ταχύτητας. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται το ολοκλήρωμα του φάσματος απόκρισης της ψευδο-ταχύτητας *CS<sub>v</sub>* (Cumulative Response Velocity Spectrum), το οποίο ορίζεται ως:

$$CS_v = \int_0^{T_{max}} PS_{v,\xi}(T) dT . \quad (2.4)$$

όπου

$PS_{v,\xi}(T)$  είναι η φασματική ψευδο-ταχύτητα για την επιθυμητή τιμή λόγου ιξώδους απόσβεσης  $\xi$  σε περίοδο  $T$  και

$T_{max}$  είναι η μέγιστη περίοδος του φάσματος.

Θα πρέπει να χρησιμοποιείται μια αρκετά μεγάλη τιμή για την  $T_{max}$ , π.χ  $T_{max} = 20sec$ . Πρώτα υπολογίζεται το  $CS_{v,sim,i}$  για την προσομοιωμένη εδαφική κίνηση που αποτελείται από όλους τους ορισμένους παλμούς μέχρι το βήμα αυτό  $i$  παλμοί και έπειτα υπολογίζεται το  $CS_{v,sim,(i-1)}$ , μετά

την αφαίρεση του παλμού  $i$  ( $i - 1$  παλμοί). Στη συνέχεια, ο παλμός  $i$  θεωρείται σημαντικός εάν συνεισφέρει στο  $CS_{v,sim}$  περισσότερο από 5%, δηλαδή εάν:

$$\frac{CS_{v,sim,i} - CS_{v,sim,(i-1)}}{CS_{v,sim,(i-1)}} \geq 5\% . \quad (2.5)$$

Εάν ο παλμός  $i$  δεν ικανοποιεί το παραπάνω κριτήριο, απορρίπτεται.

Θεωρείται ένα ακόμα κριτήριο για τον καθορισμό του βήματος στο οποίο πρέπει να διακοπεί η διαδικασία, το οποίο βασίζεται στο ποσοστό ταύτισης του τεχνητού φάσματος της ψευδο-ταχύτητας που προκύπτει με υπέρθεση όλων των σημαντικών παλμών που εξάγονται από τη διαδικασία, με αυτό της αρχικής καταγραφής. Έτσι, η διαδικασία σταματά όταν ένα σημαντικό ποσοστό, γύρω στο 90%, του ολοκληρώματος του φάσματος της ψευδο-ταχύτητας της αρχικής καταγραφής  $CS_{v,orig}$ , έχει επιτευχθεί με την προσομοίωση της εδαφικής κίνησης μέχρι αυτό το βήμα. Δηλαδή όταν:

$$\frac{CS_{v,sim,i}}{CS_{v,orig}} \geq 90\% . \quad (2.6)$$

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι κάποιος θα μπορούσε να θεωρήσει άλλα κριτήρια για τον προσδιορισμό των σημαντικών παλμών. Για παράδειγμα, ένα κριτήριο θα μπορούσε να βασίζεται στη σύγκριση της ενέργειας της εναπομένουσας κίνησης μετά την αφαίρεση ενός παλμού, με την ενέργεια της αρχικής καταγραφής. Αυτό το κριτήριο θα μπορούσε αποτελέσει ένα δείκτη του εάν η εναπομένουσα κίνηση μετά την αφαίρεση του  $i$  παλμού, περιέχει και άλλους παλμούς που περιέχουν σημαντικό ποσοστό ενέργειας.

Αφού η ενέργεια κάθε καταγραφής υπολογίζεται από το ολοκλήρωμα του τετραγώνου της εδαφικής ταχύτητας  $CSV$  (Cumulative Squared Velocity) στο τέλος της εδαφικής κίνησης, ένα τέτοιο κριτήριο θα μπορούσε να βασίζεται στο λόγο:  $CSV_{res,i}/CSV_{orig}$ , όπου τα  $CSV_{res,i}$  και  $CSV_{orig}$  συμβολίζουν το αθροιστικό τετράγωνο της ταχύτητας για την εναπομένουσα εδαφική κίνηση μετά την αφαίρεση του παλμού  $i$  και την αρχική εδαφική κίνηση, αντίστοιχα. Χαμηλές τιμές του λόγου  $CSV_{res,i}/CSV_{orig}$  υποδηλώνουν ότι οι παλμοί που εμπεριέχονται στην εναπομένουσα κίνηση είναι μικρότερης σημασίας. Ωστόσο, ο καθορισμός ενός σταθερού ορίου στο λόγο αυτό δεν είναι εύκολος, αφού ποικίλει σημαντικά από καταγραφή σε καταγραφή, λόγω της επιρροής των συνιστωσών υψηλών συχνοτήτων της εδαφικής κίνησης στον υπολογισμό του  $CSV$ . Για το λόγο αυτό προτείνεται το κριτήριο αυτό να χρησιμοποιείται μόνο ενδεικτικά.

### 2.3 Προσδιορισμός των παραμέτρων των κυματιδίων

Η μεθοδολογία που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο αυτό αναπαριστά κάθε σημαντικό παλμό που εντοπίζεται με την προαναφερθείσα διαδικασία με ένα κυματίδιο και η εδαφική κίνηση προσομοιώνεται μέσω της υπέρθεσης των κυματιδίων αυτών. Υιοθετείται το κυματίδιο που έχει προταθεί από τους Manroeidis and Parageorgiou (2003) και εφεξής θα αναφέρεται ως κυματίδιο M&P.

Το κυματίδιο των Manroeidis and Parageorgiou (2003) προκύπτει από τη σύζευξη ενός σήματος αρμονικής ταλάντωσης με μια περιβάλλουσα κωδωνοειδούς μορφής.

Για τον ορισμό του παλμού χρησιμοποιούνται τέσσερις παράμετροι:

- Η περίοδος  $T_p$  της αρμονικής ταλάντωσης του κυματιδίου.
- Το πλάτος  $A$  της περιβάλλουσας, το οποίο σχετίζεται με το πλάτος της χρονοϊστορίας ταχύτητας.
- Η διάρκεια  $\gamma$  του κυματιδίου, η οποία μετρά τον αριθμό των ταλαντώσεων και ορίζεται ως  $\gamma = t_{tot}/T_p$  με  $\gamma > 1$ , όπου  $t_{tot}$  η χρονική διάρκεια του κυματιδίου.
- Η διαφορά φάσης  $\nu$ .

Με χρήση των παραμέτρων αυτών, η επιτάχυνση  $a_p(t)$  και η ταχύτητα  $v_p(t)$  του κυματιδίου μπορεί να οριστεί από τις εξισώσεις που ακολουθούν (Mavroeidis and Papageorgiou, 2003):

$$a_p(t) = \begin{cases} -\frac{A\pi}{\gamma T_p} \left[ \sin\left(\frac{2\pi}{\gamma T_p}(t-t_0)\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T_p}(t-t_0) + \nu\right) + \right. \\ \left. \gamma \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T_p}(t-t_0) + \nu\right) \cdot \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\gamma T_p}(t-t_0)\right)\right] \right], & t_0 - \frac{\gamma}{2}T_p \leq t \leq t_0 + \frac{\gamma}{2}T_p \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (2.7)$$

$$v_p(t) = \begin{cases} \frac{A}{2} \left[ 1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\gamma T_p}(t-t_0)\right) \text{Bigg} \right] \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T_p}(t-t_0) + \nu\right), & t_0 - \frac{\gamma}{2}T_p \leq t \leq t_0 + \frac{\gamma}{2}T_p \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (2.8)$$

όπου  $t_0$  είναι η χρονική στιγμή που καθορίζει την περιοχή της αιχμής της περιβάλλουσας.

Προκειμένου να αντιστοιχηθεί ένα κυματίδιο σε κάθε σημαντικό παλμό  $i$ , η περίοδος του παλμού  $T_p$  τίθεται ίση με την αντίστοιχη  $T_i$ . Ο καθορισμός των υπολοίπων παραμέτρων του κυματιδίου,  $A$ ,  $\gamma$  και  $\nu$ , πραγματοποιείται με τη χρήση της νεοεισαχθείσας παραμέτρου  $CAD$  (Cumulative Absolute Displacement – Αθροιστική Απόλυτη Μετατόπιση), η οποία εισήχθη από τους Taflampas et al (2009) σε αναλογία με το δείκτη  $CAV$  (Cumulative Absolute Velocity – Αθροιστική Απόλυτη Ταχύτητα – EPRI, 1991). Το  $CAD$  ορίζεται ως το χρονικό ολοκλήρωμα της απόλυτης εδαφικής ταχύτητας, δηλαδή:

$$CAD = \int_0^{t_{tot}} |v_g| dt \quad (2.9)$$

Σημειώνεται ότι ο Baker (2007) όπως και οι Zamora and Riddell (2011) έχουν επίσης χρησιμοποιήσει παρόμοιους δείκτες και συγκεκριμένα το χρονικό ολοκλήρωμα του τετραγώνου της επιτάχυνσης (Arias, 1970) και το χρονικό ολοκλήρωμα του τετραγώνου της ταχύτητας (Riddell, 2007), ως δείκτες μέτρησης του παλμικού περιεχομένου μιας εδαφικής κίνησης.

Ας θεωρήσουμε μια αρμονική εδαφική κίνηση πλάτους  $d_{g,max}$ , η οποία επιβάλλεται ως διέγερση στη βάση ενός μονοβάθμιου ταλαντωτή χωρίς απόσβεση. Στο συντονισμό, το πλάτος της απόκρισης του ταλαντωτή συσχετίζεται σχεδόν γραμμικά με τον αριθμό των κύκλων και για μια διέγερση  $\gamma$  κύκλων, η μέγιστη απόκριση είναι (Clough and Penzien, 1975):

$$S_{d,0}(T_{res}) = \pi \cdot \gamma \cdot d_{g,max} \quad (2.10)$$

Από την άλλη, η τιμή του  $CAD$  στο τέλος του  $\gamma$  κύκλου μιας αρμονικής διέγερσης, είναι ίσο με:

$$CAD = 4 \cdot \gamma \cdot d_{g,max} \quad (2.11)$$

Συνεπώς, για μια αρμονική διέγερση  $\gamma$  κύκλων υπάρχει μια σταθερή σχέση μεταξύ του  $CAD$  και της φασματικής μετατόπισης για μηδενική απόσβεση στο συντονισμό, η οποία μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\frac{S_{d,0}(T_{res})}{CAD} = \frac{\pi}{4} \quad (2.12)$$

Εάν αντί μιας καθαρά αρμονικής διέγερσης χρησιμοποιείται ένα κυματίδιο M&P, η παραπάνω σχέση συνεχίζει να διατηρείται με ικανοποιητική ακρίβεια, παρά το γεγονός ότι η περιβάλλουσα κωδωνοειδούς μορφής έχει επιβληθεί στο πλάτος της διέγερσης. Η θέση αυτή επιβεβαιώνεται στο σχήμα 2.5, στο οποίο παρουσιάζεται ο λόγος της μέγιστης φασματικής μετακίνησης για μηδενική



απόσβεση προς το  $CAD$  ( $S_{d,0,max}/CAD$ ) για διαφορά φάσης  $\nu$  και για  $\gamma = 1, 5; 2, 0; 3, 0; 5, 0$ . Τα αποτελέσματα είναι ανεξάρτητα από την περίοδο  $T_p$  και το πλάτος  $A$ . Είναι εμφανές ότι ο λόγος  $S_{d,0,max}/CAD$  έχει τιμή κοντά στο  $\pi/4$ , ειδικά για παλμούς μεγάλης διάρκειας (μεγάλες τιμές του  $\gamma$ ). Η μεγαλύτερη απόκλιση παρατηρείται για  $\gamma = 1.5$  και  $\nu = 30^\circ$ , αλλά ακόμα και τότε το σφάλμα είναι μικρότερο από 6%.

Μια παρόμοια σχέση μεταξύ της μέγιστης φασματικής μετακίνησης και του  $CAD$  μπορεί να οριστεί για τιμές απόσβεσης διαφορετικές από τη μηδενική. Για ένα μονοβάθμιο ταλαντωτή με λόγο ιξώδους απόσβεσης  $\xi$  και για καθαρά αρμονική διέγερση, η μετακίνηση στο συντονισμό είναι (Clough and Penzien, 1975):

$$S_{d,\xi}(T_{res}) = \frac{1 - e^{-2\pi\xi}}{2\xi} \cdot d_{g,max} \cdot \quad (2.13)$$

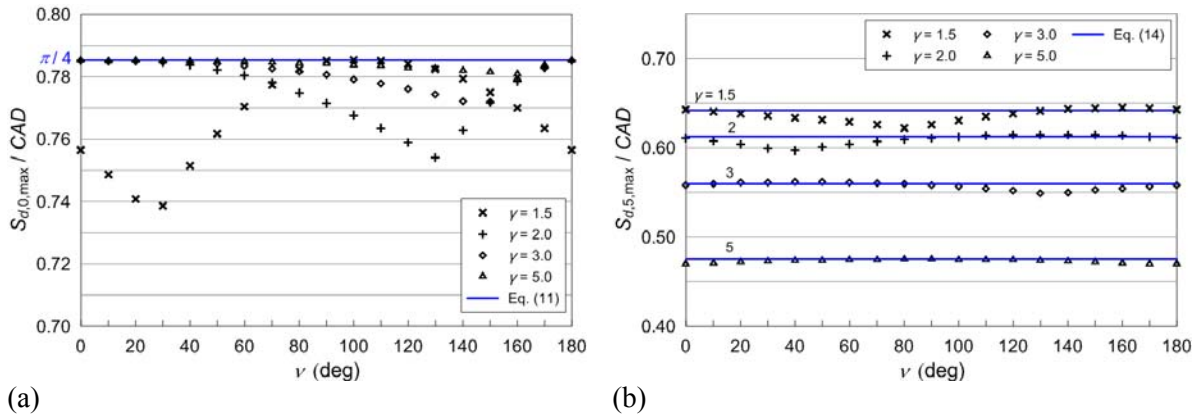
και με χρήση της σχέσης (2.11), προκύπτει:

$$\frac{S_{d,\xi}(T_{res})}{CAD} = \frac{1 - e^{-2\pi\xi}}{8\gamma\xi} \quad (2.14)$$

Εάν η διέγερση δεν είναι καθαρά αρμονική, αλλά ένα κυματίδιο M&P, η παραπάνω εξίσωση παρουσιάζει σφάλματα για μεγάλες τιμές του  $\gamma$ . Μια παραμετρική διερεύνηση έδειξε ότι στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να θεωρηθεί ένας διορθωτικός συντελεστής ίσος με  $1 + (\gamma - 1)\xi$ . Συνεπώς, για κυματίδια M&P, προκύπτει η σχέση:

$$\frac{S_{d,\xi,max}}{CAD} = \frac{1 - e^{-2\pi\xi}}{8\gamma\xi} [1 + (\gamma - 1)\xi] \cdot \quad (2.15)$$

Μια σύγκριση των τιμών που παράγονται από τη σχέση (2.14) με τις πραγματικές τιμές του λόγου  $S_{d,\xi,max}/CAD$ , οι οποίες υπολογίστηκαν για διάφορες τιμές  $\nu$  και  $\gamma$ , παρουσιάζονται στο σχήμα 2.5 για  $\xi = 5\%$ . Είναι εμφανές ότι η ακρίβεια που επιτυγχάνεται με την εξίσωση (2.14) είναι ικανοποιητική σε όλες τις περιπτώσεις.



Σχήμα 2.5: Σχέση μεταξύ της μέγιστης φασματικής μετακίνησης  $S_{d,max}$  και  $CAD$  για κυματίδιο M&P και διάφορες τιμές  $\gamma$  και  $\nu$ . (a) μηδενική απόσβεση (b) απόσβεση 5% (Mimoolou et al, 2014).

Κάνοντας χρήση των εξισώσεων (2.12) και (2.14) και τη γνωστή σχέση μεταξύ του φάσματος μετακίνησης και του φάσματος ψευδο-ταχύτητας  $PS_v = (2\pi/T) \cdot S_d$ , μπορούν να διατυπωθούν οι εξής σχέσεις μεταξύ του  $CAD$  της  $PS_v$ , για κυματίδια M&P:

$$\frac{PS_{v,0,max}}{CAD} = \frac{\pi^2}{2T_p}, \xi = 0. \quad (2.16)$$

$$\frac{PS_{v,\xi,max}}{CAD} = \frac{\pi(1 - e^{-2\pi\gamma\xi})[1 + (\gamma - 1)\xi]}{4\gamma\xi T_p}, \xi \neq 0. \quad (2.17)$$

Για κυματίδια M&P η τιμή του  $CAD$  σχετίζεται άμεσα με το πλάτος  $A$  και το δείκτη διάρκειας  $\gamma$ , αφού ισχύει η σχέση:

$$CAD = \gamma AT_p / \pi \quad (2.18)$$

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η προτεινόμενη μεθοδολογία είναι προσανατολισμένη γύρω από τις φασματικές τιμές των διαφορών μεγεθών, αφού τα κυματίδια ορίζονται έτσι ώστε να γίνεται η καλύτερη δυνατή προσαρμογή (best fitting) των φασμάτων τους, στα φάσματα της αρχικής καταγραφής. Συνεπώς στη βάση αυτής της λογικής, αντικαθιστώντας το  $CAD$  στις εξισώσεις (2.16) και (2.17) και με χρήση της εξίσωσης (2.18), προκύπτουν:

$$A_i = \frac{2PS_{v,0}(T'_i)}{\pi\gamma_i}, \xi = 0. \quad (2.19)$$

$$A_i = \frac{4\xi PS_{v,\xi}(T'_i)}{(1 - e^{-2\pi\gamma_i\xi})[1 + (\gamma - 1)\xi]}, \xi \neq 0. \quad (2.20)$$

Στις παραπάνω σχέσεις ο δείκτης  $i$  αναφέρεται στο κυματίδιο που αντιστοιχεί στη δεσπόζουσα περίοδο  $T_i$  του παλμού  $i$  και  $PS_{v,0}(T'_i)$  και  $PS_{v,\xi}(T'_i)$  είναι οι αντίστοιχες κορυφές του φάσματος της ψευδο-ταχύτητας της εδαφικής κίνησης για μηδενική απόσβεση και για λόγο ιξώδους απόσβεσης ίσο με  $x$ , αντίστοιχα.

Σημειώνεται ότι ο όρος *εδαφική κίνηση* αναφέρεται στην αρχική καταγραφή μόνο για τον πρώτο παλμό  $i = 1$ , ενώ για τους πρόσθετους παλμούς ( $i \leq 2$ ) αναφέρεται στην *εναπομένουσα κίνηση*, η οποία προκύπτει με αφαίρεση όλων των προηγούμενων εντοπισμένων παλμών [ $i = 1$  μέχρι  $i - 1$ ] από την αρχική καταγραφή.

Μεταξύ των εξισώσεων (2.19) και (2.20), για τον καθορισμό του πλάτους  $A_i$  προτιμάται η εξίσωση (2.20), αφού το παραγόμενο κυματίδιο συσχετίζεται καλύτερα με τα αρχικά φάσματα για την επιθυμητή τιμή απόσβεσης. Ωστόσο, η εξίσωση (2.19) θα πρέπει να χρησιμοποιείται στην περίπτωση που κάποιος θέλει να κανονικοποιήσει τα κυματίδια με τη φασματική τιμή απόκρισης για μηδενική απόσβεση.

Για τον καθορισμό του πλάτους  $A_i$  του κυματιδίου από τις εξισώσεις (2.19) ή (2.20), η τιμή της διάρκειας  $\gamma_i$  θα πρέπει να είναι γνωστή. Αφού η παράμετρος αυτή είναι κατά βάσει άγνωστη, ελέγχονται όλες οι τιμές  $\gamma_{ij}$  εντός ενός επιλεγμένου εύρους. Από αυτά τα ζεύγη ( $A_{ij}$   $\gamma_{ij}$ ), εκείνα που οδηγούν σε πλάτη επιταχύνσεων, ταχυτήτων ή μετακινήσεων των κυματιδίων, τα οποία είναι μεγαλύτερα από τις αντίστοιχες αιχμές της εδαφικής κίνησης, PGA, PGV και PGD αντίστοιχα, απορρίπτονται.

Για τα ζεύγη ( $A_{ij}$   $\gamma_{ij}$ ) που είναι αποδεκτά, υπολογίζονται τα κυματίδια για όλες τις τιμές της διαφοράς φάσης  $\mu_{i,j}$ , η οποία παίρνει τιμές εντός του εύρους ( $0^\circ - 360^\circ$ ) και επιλέγεται το κυματίδιο που έχει το μεγαλύτερο συντελεστή συσχέτισης με την εδαφική κίνηση. Η διαδικασία επεξηγείται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στην επόμενη ενότητα.

## 2.4 Προτεινόμενη Μεθοδολογία σε Βήματα

Με βάση το θεωρητικό υπόβαθρο που αναφέρθηκε παραπάνω, μπορεί να εδραιωθεί μια καλώς ορισμένη διαδικασία για τον καθορισμό των πιο σημαντικών παλμών και των παραμέτρων των αντίστοιχων κυματιδίων M&P που μπορούν να αναπαραστήσουν βέλτιστα την αρχική εδαφική κίνηση. Αυτή η μέθοδος, η οποία μπορεί εύκολα να προγραμματιστεί σε μορφή κώδικα, αποτελείται από τα βήματα που ακολουθούν:

1. Για την υπό εξέταση εδαφική κίνηση παράγεται το φάσμα συνέλιξης με πολλαπλασιασμό των φασμάτων ταχύτητας και μετακίνησης για λόγο ιξώδους απόσβεσης 5%. Στη θεωρητική τεκμηρίωση της μεθόδου, αναφέρεται ότι τα φάσματα ταχύτητας και μετακίνησης για μηδενική απόσβεση αποτελούν επαρκείς περιβάλλουσες των φασμάτων Fourier επιτάχυνσης και

ταχύτητας αντίστοιχα. Παρ' όλα αυτά, γίνεται χρήση των φασμάτων ταχύτητας και μετακίνησης για απόσβεση 5%, με στόχο την εξομάλυνση των κορυφών τους που αντιστοιχούν σε υψηλό συχνοτικό περιεχόμενο (υψίσυχνες συνιστώσες της εδαφικής κίνησης).

2. Προσδιορίζεται η περίοδος που αντιστοιχεί στη μεγαλύτερη αιχμή του φάσματος συνέλιξης και τίθεται ίση με  $T_1$ .
3. Υπολογίζεται το φάσμα απόκρισης της ψευδο-ταχύτητας για την επιθυμητή τιμή του λόγου ιξώδους απόσβεσης  $\xi$  (τυπικά χρησιμοποιείται η τιμή  $\xi = 5\%$ ) και προσδιορίζεται η περίοδος  $T'_1$  που έχει κοντινή τιμή με την  $T_1$  και αντιστοιχεί σε μια τοπική αιχμή του φάσματος, με τιμή  $PS_{v,x,max}(T'_1)$ . Αν δεν υπάρχει κάποια αιχμή γύρω από την  $T_1$ , τίθεται  $T'_1 = T_1$ . Σε αυτό το βήμα προτείνεται η χρήση του φάσματος απόκρισης της ταχύτητας και όχι της μετακίνησης, αφού οι αιχμές του είναι πιο διακριτές, ειδικά για μικρές περιόδους.
4. Τίθεται μια μέγιστη τιμή  $\gamma_{max}$  για την διάρκεια του κυματιδίου M&P. Αφού η διάρκεια του κυματιδίου δεν είναι γνωστή εκ των προτέρων, για τον καθορισμό του κυματιδίου που προσαρμόζεται καλύτερα στη συγκεκριμένη εδαφική κίνηση απαιτείται η σάρωση όλων των πιθανών τιμών του  $\gamma$ , από 1 μέχρι και  $\gamma_{max}$ . Για παλμούς κατευθυντικότητας σε σεισμικές διεγέρσεις κοντινού πεδίου, η τιμή  $\gamma_{max} = 5$  θεωρείται επαρκής. Ωστόσο, σε κάποιες περιπτώσεις ίσως απαιτούνται μεγαλύτερες τιμές της τάξης του  $\gamma_{max} = 10$  ή και μεγαλύτερες. Για τη σάρωση των τιμών της διάρκειας  $\gamma$  εντός του εύρους που περιγράφηκε παραπάνω, προτείνεται ένα βήμα  $\Delta\gamma = 0.1$ .  
Για κάθε τιμή  $\gamma_j$  εντός του εύρους  $1 \leq \gamma_j \leq \gamma_{max}$  με βήμα  $\Delta\gamma$  και για την τιμή  $PS_{v,x,max}(T_1)$  που καθορίστηκε στο βήμα 3, υπολογίζεται η αντίστοιχη τιμή του πλάτους  $A_j$  με χρήση της εξίσωσης (2.19) ή (2.20) για  $\xi = 0\%$ .
5. Για κάθε ζεύγος ( $A_{ij}$   $\gamma_{ij}$ ) που προσδιορίστηκε στο βήμα 4 και για τιμές διαφοράς φάσης  $\nu$  εντός του εύρους ( $0^\circ - 360^\circ$ ), παράγεται το κυματίδιο M&P με χρήση των εξισώσεων (4.7) και (4.8) θέτοντας  $T_p = T_1$  και αφήνοντας το  $t_0$  ως παράμετρο. Για τη σάρωση όλων των τιμών διαφοράς φάσης εντός του εύρους που αναφέρθηκε παραπάνω, προτείνεται ένα βήμα ίσο με  $\Delta\theta = 5^\circ$ . Τα κυματίδια στα οποία η μέγιστη επιτάχυνση, ταχύτητα ή μετακίνηση είναι μεγαλύτερη από την PGA, PGV ή PGD της εδαφικής κίνησης αντίστοιχα, απορρίπτονται.
6. Για κάθε αποδεκτό κυματίδιο που υπολογίστηκε στο βήμα 5 και για τιμές  $t_0$  από  $t_0 = \gamma_j \cdot T_1/2$  (αντιστοιχεί σε κυματίδια που ξεκινούν τη χρονική στιγμή  $t = 0$ ) έως  $t_0 = t_{max} - \gamma_j \cdot T_1/2$  (αντιστοιχεί σε κυματίδια που τελειώνουν τη χρονική στιγμή  $t = t_{max}$ ), με το  $t_{max}$  να αντιστοιχεί στο τέλος της εδαφικής κίνησης, υπολογίζεται η συσχέτιση μεταξύ της ιστορίας ταχύτητας του κυματιδίου  $\nu P(t)$ , όπως ορίστηκε στην εξίσωση (2.7) και της ιστορίας της εδαφικής ταχύτητας της καταγραφής  $\nu g(t)$ . Επιλέγεται το κυματίδιο με το μεγαλύτερο συντελεστή συσχέτισης και για αυτό καθορίζονται οι παράμετροι  $A1, \gamma1, \nu1$  και  $t_{0,1}$ . Υπολογίζεται ο χρόνος έναρξης του παλμού:  $t_{p,1} = t_{0,1} - \gamma_j \cdot T_1/2$ .  
Θα πρέπει να τονιστεί ότι εάν οι συντελεστές συσχέτισης για τα επιλεγμένα κυματίδια είναι μικροί, είναι αμφισβητήσιμο το εάν η συγκεκριμένη εδαφική κίνηση επηρεάζεται από παλμούς κατευθυντικότητας.
7. Υπολογίζεται το ολοκλήρωμα του τετραγώνου της εδαφικής ταχύτητας  $CSV_{orig}(t)$  για την αρχική καταγραφή με χρήση της εξίσωσης (2.3) και προσδιορίζεται η χρονική στιγμή  $t_{20\%,orig}$ , στην οποία η αρχική κίνηση φτάνει το 20% του συνολικού της CSV. Στη συνέχεια υπολογίζεται το ολοκλήρωμα του φάσματος απόκρισης της ψευδο-ταχύτητας  $CSV_{v,orig}$ , με χρήση της εξίσωσης (2.4), για την επιθυμητή τιμή μέγιστης περιόδου  $T_{max}$ .
8. Ελέγχεται εάν το κυματίδιο που επιλέχθηκε στο βήμα 6 αντιστοιχεί σε παλμό που φτάνει αργά στη ιστορία ταχύτητας και αν αυτό συμβαίνει, το κυματίδιο απορρίπτεται. Για την

υλοποίηση αυτού του ελέγχου, υπολογίζεται η συνάρτηση του ολοκληρώματος του τετραγώνου της εδαφικής ταχύτητας  $CSV_{pulse1}(t)$  για αυτό τον πρώτο παλμό και προσδιορίζεται η χρονική στιγμή  $t_{10\%,pulse1}$ , ως η χρονική στιγμή στην οποία ο παλμός φτάνει το 10% του συνολικού του  $CSV$ . Εάν  $t_{10\%,pulse1} > t_{20\%,orig}$ , ο παλμός απορρίπτεται και η διαδικασία συνεχίζεται στο βήμα 10. Εάν ο παλμός ικανοποιεί το παραπάνω κριτήριο, είναι δηλαδή αποδεκτός, εκτελείται το βήμα 9.

9. Για το επιλεγμένο κυματίδιο υπολογίζεται το ολοκλήρωμα του φάσματος απόκρισης της ψευδο-ταχύτητας  $CS_{v,sim}$  και ο λόγος  $CS_{v,sim}/CS_{v,orig}$ , όπου  $CS_{v,orig}$  είναι η αντίστοιχη τιμή για την αρχική καταγραφή, όπως ορίστηκε στο βήμα 7. Εάν ο λόγος είναι μεγαλύτερος από 90% δεν απαιτούνται επιπλέον παλμοί για την περιγραφή της εδαφικής κίνησης και η διαδικασία ολοκληρώνεται. Εάν όχι, εκτελείται το βήμα 10.

Τα παρακάτω βήματα επαναλαμβάνονται για όλους τους επιπλέον σημαντικούς παλμούς  $i$ , με  $i \leq 2 \leq k$ , όπου  $k$  ο συνολικός αριθμός των σημαντικών παλμών που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την ικανοποίηση του κριτηρίου που δίνεται στο βήμα 14.

10. Υπολογίζεται η εναπομένουσα εδαφική κίνηση(residual ground motion) με αφαίρεση του κυματιδίου που υπολογίστηκε στο βήμα 6 από την αρχική καταγραφή. Αυτή η εναπομένουσα εδαφική κίνηση θεωρείται ως η αρχική εδαφική κίνηση για τους πρόσθετους παλμούς πέραν του πρώτου στα επόμενα βήματα, εκτός από εκείνα όπου επισημαίνεται ότι ορίζεται διαφορετικά.
11. Επαναλαμβάνονται τα βήματα 1 έως 6 για τη νέα εδαφική κίνηση και προσδιορίζεται ο επόμενος παλμός  $i$ . Στα βήματα αυτά, ο δείκτης 1 αντικαθίσταται με το δείκτη του εκάστοτε παλμού  $i$ .
12. Ελέγχεται εάν το νέο κυματίδιο  $i$  αντιστοιχεί σε παλμό που φτάνει αργά στη χρονοϊστορία της ταχύτητας και συνεπώς εάν θεωρείται αποδεκτός ή θα πρέπει να απορριφθεί:
  - (1) Ελέγχεται εάν η έναρξη του παλμού πραγματοποιείται πριν τη λήξη του πρώτου παλμού, δηλαδή εάν  $t_{p,i} = t_{0,i} - \gamma_i \cdot T_i/2$  είναι μικρότερο από  $t_{0,1} + \gamma_1 \cdot T_1/2$ , όπου οι δείκτες 1 και  $i$  αναφέρονται στον πρώτο παλμό και τον παλμό  $i$  αντίστοιχα. Εάν ο παλμός ξεκινάει πριν το τέλος του πρώτου παλμού, θεωρείται αποδεκτός ανεξαρτήτως του εάν ικανοποιεί το κριτήριο του Baker (2007). Στην περίπτωση αυτή η διαδικασία συνεχίζεται στο βήμα 13. Εάν όμως ο παλμός ξεκινάει μετά το τέλος του πρώτου παλμού, δηλαδή  $t_{p,i} > t_{0,1} + \gamma_1 \cdot T_1'/2$ , η διαδικασία συνεχίζεται στο βήμα 12.(2).
  - (2) Υπολογίζεται η συνάρτηση του ολοκληρώματος του τετραγώνου της εδαφικής ταχύτητας  $CSV_{pulse,i}(t)$  για το κυματίδιο  $i$  και υπολογίζεται η χρονική στιγμή  $t_{10\%,pulse,i}$ . Εάν ικανοποιείται το κριτήριο  $t_{10\%,pulse,i} > t_{20\%,orig}$ , όπου η χρονική στιγμή  $t_{20\%,orig}$  υπολογίστηκε στο βήμα 8 για την αρχική καταγραφή (και όχι την εναπομένουσα), ο παλμός απορρίπτεται ως παλμός που φτάνει αργά στη χρονοϊστορία της ταχύτητας και η διαδικασία επαναλαμβάνεται από το βήμα 10, χωρίς αλλαγή του δείκτη  $i$ . Εάν ο παλμός θεωρείται αποδεκτός με βάση το παραπάνω κριτήριο, η διαδικασία συνεχίζεται στο επόμενο βήμα.
13. Γίνεται υπέρθεση του παλμού  $i$  με όλους τους προηγούμενους παλμούς 1 έως και  $i - 1$  που κρίθηκαν αποδεκτοί, ώστε να διαταχθεί η σειρά των κυματιδίων για την προσομοίωση της εδαφικής κίνησης.
14. Υπολογίζεται το ολοκλήρωμα του φάσματος της ψευδο-ταχύτητας  $CS_{v,sim,i}$  για την τεχνητή κίνηση, όπως καθορίστηκε στο βήμα 13 και εκτελούνται οι παρακάτω έλεγχοι:
  - (1) Υπολογίζεται η διαφορά:  $\Delta CS_v = CS_{v,sim,i} - CS_{v,sim,(i-1)}$ , όπου  $CS_{v,sim,(i-1)}$  είναι το ολοκλήρωμα του φάσματος απόκρισης της ψευδο-ταχύτητας για τη σειρά των  $(i - 1)$

σημαντικών παλμών που έχουν εντοπιστεί πριν την επιλογή του παλμού  $i$ . Ελέγχεται εάν ο λόγος  $\Delta CS_v / CS_{v,sim,(i-1)} < 5\%$ . Εάν ναι, ο παλμός θεωρείται ασήμαντος και απορρίπτεται, ενώ η διαδικασία επιστρέφει στο βήμα 10 για την εύρεση του επόμενου παλμού. Εάν ο λόγος  $\Delta CS_v / CS_{v,sim,(i-1)} > 5\%$ , τότε ο παλμός θεωρείται σημαντικός και η διαδικασία συνεχίζεται στο βήμα 14.2.

- (2) Υπολογίζεται ο λόγος  $CS_{v,sim,i} / CS_{v,orig}$ , όπου η τιμή  $CS_{v,orig}$  είναι η τιμή του αθροιστικού φάσματος απόκρισης της ταχύτητας  $CS_v$  της αρχικής καταγραφής, όπως ορίστηκε στο βήμα 9. Εάν  $CS_{v,sim,i} / CS_{v,orig} > 90\%$ , δεν απαιτείται η εύρεση επιπλέον παλμών. Εάν όχι, η διαδικασία επιστρέφει στο βήμα 10 για την εύρεση του επόμενου παλμού.

Μετά το τέλος της παραπάνω επαναληπτικής διαδικασίας οι  $k$  παλμοί που θεωρούνται αποδεκτοί επαναριθμούνται, αφού διαταχθούν σε φθίνουσα σειρά με βάση τις περιόδους τους, δηλαδή  $T_1 > T_2 > \dots > T_k$ .

Η διαδικασία μπορεί να προγραμματιστεί εύκολα στο σύνολό της και συνεπώς μπορεί να αυτοματοποιηθεί πλήρως, για την εύρεση των χαρακτηριστικών των σημαντικών παλμών σε ένα πλήθος σεισμικών καταγραφών.



## Κεφάλαιο 3

# Μεθοδολογία διερεύνησης της επιρροής των ανώτερων παλμών στην ανελαστική συμπεριφορά μιας πραγματικής κατασκευής

### 3.1 Εισαγωγή

Σε σεισμικές καταγραφές κοντινού πεδίου που έχουν επηρεαστεί από την κατευθυντικότητα της διάρρηξης, διαγράφεται έντονα η παρουσία ενός τουλάχιστον διακριτού παλμού στη χρονοϊστορία των εδαφικών ταχυτήτων. Έρευνες σε μονοβάθμια συστήματα έχουν διαπιστώσει την ύπαρξη ανώτερων σημαντικών παλμών πέραν του πρώτου (Lu and Panagiotou, 2014, Mimoglou et al, 2014), ενώ έχει γίνει η παρατήρηση ότι μεμονωμένοι παλμοί δεν αρκούν για να περιγράψουν επαρκώς τα ελαστικά και τα ανελαστικά φάσματα απόκρισης των καταγραφών (Lu and Panagiotou, 2014).

Έτσι, πραγματοποιείται μια διερεύνηση της επιρροής ανώτερων παλμών πέρα από τον πρώτο στην ανελαστική απόκριση μιας πραγματικής κατασκευής. Η διερεύνηση γίνεται μέσω μη-γραμμικών αναλύσεων χρονοϊστορίας φόρτισης για ένα δείγμα 90 σεισμικών καταγραφών. Από κάθε καταγραφή εξάγονται οι 6 πρώτοι παλμοί με εφαρμογή της μεθοδολογίας των Mimoglou et al (2014) και με υπέρθεση των παλμών δημιουργούνται για κάθε καταγραφή 6 συνθετικά επιταχυνσιογραφήματα ως αθροίσματα πρώτων παλμών. Η υπέρθεση αυτή γίνεται αφού οι μεμονωμένοι παλμοί δεν μπορούν να περιγράψουν ικανοποιητικά την αρχική καταγραφή. Έπειτα, γίνονται συγκρίσεις όσον αφορά την απόκριση της κατασκευής για την πραγματική καταγραφή και τα αθροίσματα των πρώτων παλμών και εντοπίζονται οι περιπτώσεις στις οποίες μια εδαφική κίνηση μπορεί να αναπαρασταθεί ικανοποιητικά με χρήση δύο ή τριών παλμών. Τα μεγέθη απόκρισης συσχετίζονται με την περίοδο του πρώτου παλμού. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για τρεις στάθμες έντασης, με κλιμακώσεις κάθε καταγραφής.

### 3.2 Μεθοδολογία σε βήματα

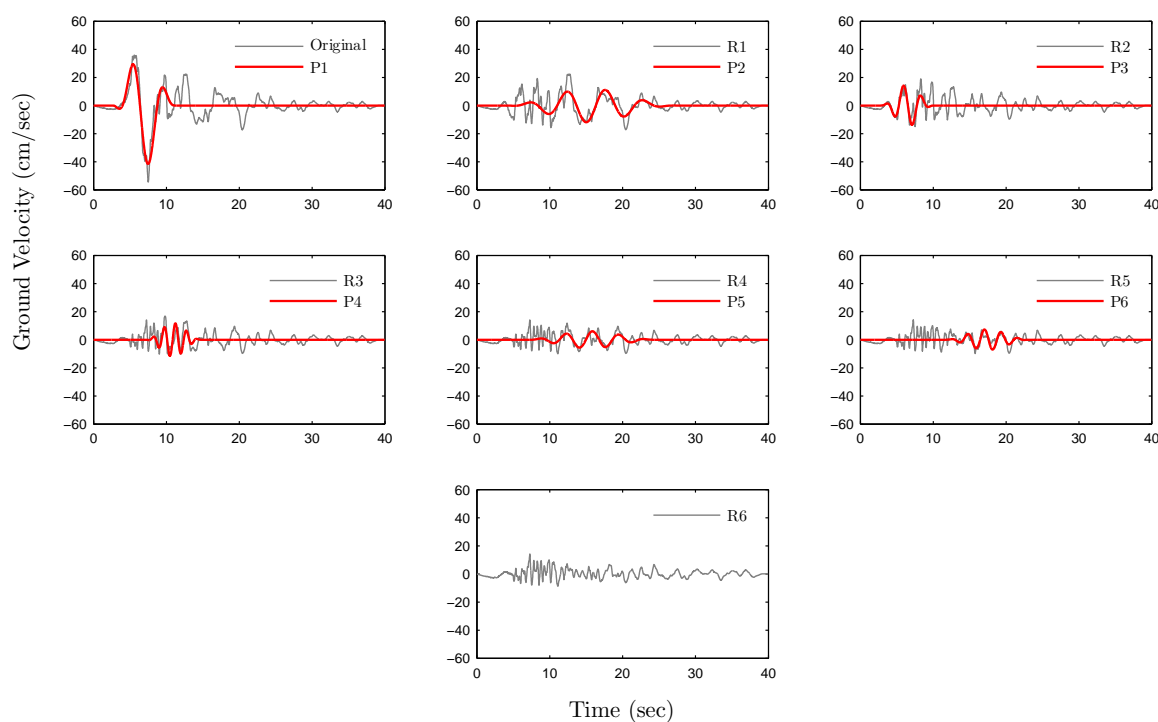
#### 3.2.1 Κατασκευή ενός εξιδανικευμένου ισοδύναμου ΣΜΕΚ της κατασκευής

Αρχικά διενεργείται μη-γραμμική στατική ανάλυση κατά τη διαμήκη διεύθυνση της κατασκευής από την οποία κατασκευάζεται η καμπύλη ικανότητας. Η καμπύλη ικανότητας μετασχηματίζεται σε φάσμα ικανότητας ADRS το οποίο φέρεται σε εξιδανικευμένη ιδεατή μορφή με συμπεριφορά ελαστική-πλήρως πλαστική. Κατασκευάζεται έτσι ένα ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα, τα χαρακτηριστικά του οποίου προκύπτουν από το εξιδανικευμένο φάσμα ικανότητας. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι η επιτάχυνση και η μετακίνηση διαρροής ( $\alpha_y, \delta_y$  αντίστοιχα), όπως και η περίοδος ( $T^*$ ) του ισοδύναμου μονοβαθμίου συστήματος.

### 3.2.2 Απομόνωση των 6 πρώτων παλμών κάθε καταγραφής

Για κάθε σεισμική καταγραφή απομονώνονται οι πρώτοι έξι παλμοί. Αρχικά ο πρώτος παλμός εντοπίζεται βάσει της μεθοδολογίας των Mimoglou et al (2014), αφαιρείται από την εδαφική κίνηση και υπολογίζεται ο δεύτερος για την εναπομένουσα κίνηση. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι την εξαγωγή των έξι πρώτων παλμών. Έτσι, η περίοδος κάθε παλμού υπολογίζεται ως η αιχμή του εκάστοτε φάσματος συνέλιξης  $S_d \times S_v$  ( $\xi=5\%$ ) και η σειρά των παλμών προκύπτει από τον υπολογισμό αυτό, αφού κάθε παλμός κατασκευάζεται με περίοδο στην οποία το φάσμα συνέλιξης εμφανίζει την αιχμή του, μετά την αφαίρεση του προηγούμενου παλμού. Με τον τρόπο που έχει βαθμονομηθεί μέθοδος των Mimoglou et al (2014), ο πρώτος παλμός που εντοπίζεται είναι ο δεσπόζων παλμός κατευθυντικότητας της καταγραφής. Έτσι, οι πρώτοι παλμοί φέρουν ένα μεγάλο ποσοστό της συνολικής ενέργειας της καταγραφής (π.χ. σε όρους Energy Flux), χωρίς όμως αυτό να σημαίνει ότι ο πρώτος παλμός έχει απαραίτητα και τη μεγαλύτερη ενέργεια.

Στο σχήμα 3.1 παρουσιάζεται η εξαγωγή των 6 πρώτων παλμών από τη χρονοϊστορία ταχυτήτων της καταγραφής από το σταθμό ECC County Center FF στο σεισμό του Imperial Valley (California - 1979).



Σχήμα 3.1: Εξαγωγή των 6 πρώτων παλμών για την καταγραφή από το σταθμό ECC County Center FF στο σεισμό του Imperial Valley (California - 1979). Φαίνεται η αρχική χρονοϊστορία (Original), οι εντοπιζόμενοι παλμοί  $P_i$  και οι εναπομένουσες εδαφικές κινήσεις  $R_i$  μετά την αφαίρεση των παλμών.

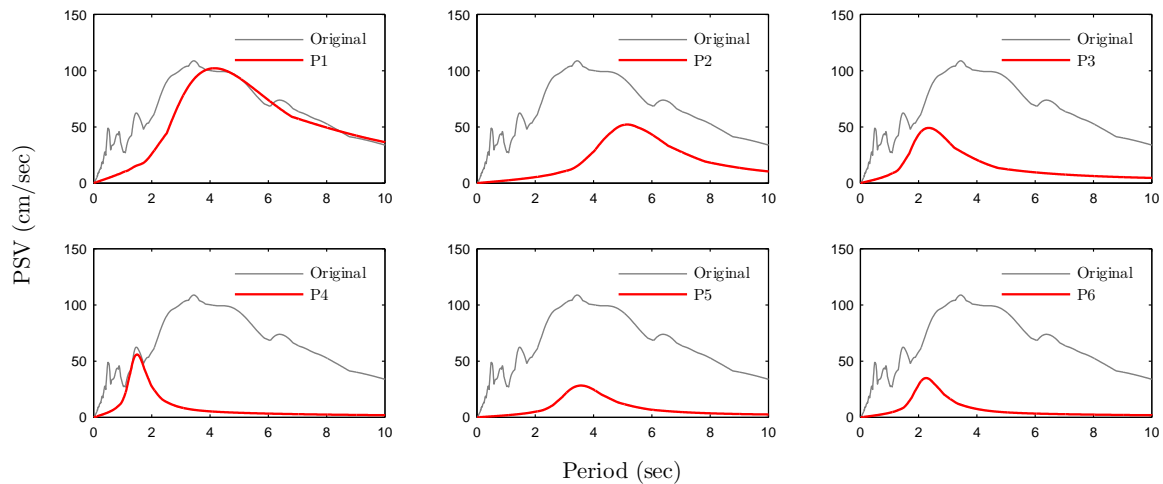
- 1<sup>η</sup> επανάληψη: Φαίνεται η αρχική καταγραφή (Original) και ο πρώτος παλμός ( $P_1$ ).
- 2<sup>η</sup> επανάληψη: Φαίνεται η εναπομένουσα εδαφική κίνηση ( $R_2$ ) με το δεύτερο παλμό ( $P_2$ ) μετά την αφαίρεση του πρώτου παλμού.

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι και την εξαγωγή του έκτου παλμού, όπου γίνεται φανερό από την τελικώς εναπομένουσα εδαφική κίνηση ( $R_6$ ) ότι έχουν αφαιρεθεί όλοι οι σημαντικοί κύκλοι της συγκεκριμένης εδαφικής κίνησης.

Στο σχήμα 3.2 παρουσιάζονται τα ελαστικά φάσματα απόκρισης της ψευδοταχύτητας για απόσβεση 5% για την αρχική καταγραφή και τους επιμέρους παλμούς, όπου φαίνεται η μη επάρκειά



τους να περιγράψουν ικανοποιητικά το ελαστικό φάσμα ψευδοταχύτητας της αρχικής καταγραφής.

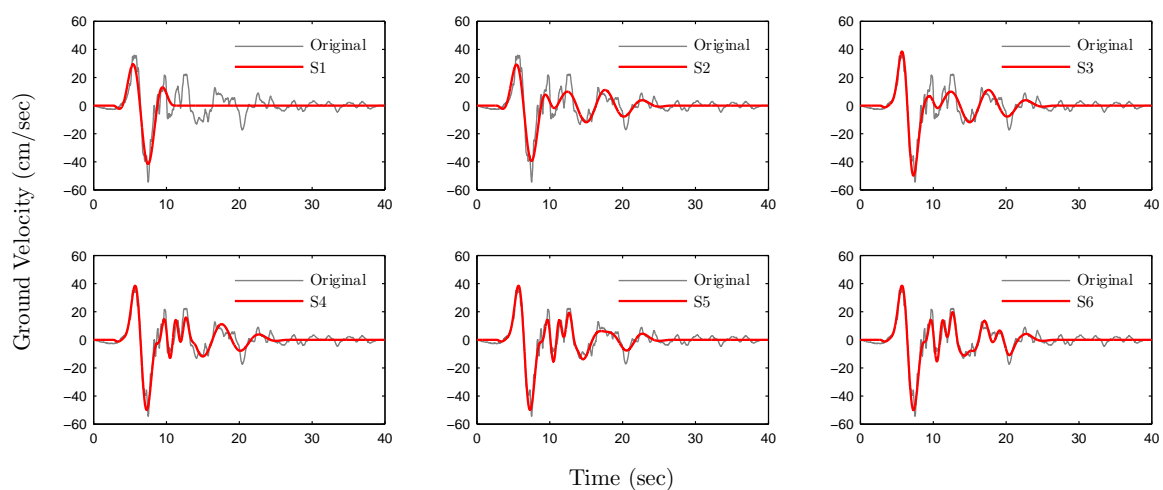


Σχήμα 3.2: Ελαστικά φάσματα ψευδοταχύτητας ( $\xi=5\%$ ) για την καταγραφή από το σταθμό ECC County Center FF στο σεισμό του Imperial Valley (California - 1979). Φαίνεται το φάσμα της αρχικής καταγραφής (Original) και τα φάσματα των επιμέρους παλμών  $P_i$ .

### 3.2.3 Υπέρθυση των $N$ πρώτων παλμών

Ακολούθως, υπολογίζονται τα άθροισμα των  $N$  πρώτων παλμών, κατασκευάζονται δηλαδή έξι συνθετικά επιταχυνσιογραφήματα, τα οποία αποτελούνται αντίστοιχα, από: τον πρώτο παλμό, το άθροισμα των πρώτων δύο, το άθροισμα των πρώτων τριών κ.ο.κ. μέχρι το άθροισμα των έξι παλμών. Καθένα από τα τεχνητά αυτά επιταχυνσιογραφήματα χρησιμοποιούνται ως διέγερση βάσης σε μη-γραμμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας φόρτισης, ώστε να εντοπιστεί το πλήθος των παλμών που μπορούν να δώσουν μια ικανοποιητική απόκριση, σε σχέση με την αρχική εδαφική κίνηση.

Στο σχήμα 3.3 παρουσιάζονται τα άθροισμα των 6 πρώτων παλμών για τη χρονοϊστορία ταχυτήτων της καταγραφής από το σταθμό ECC County Center FF στο σεισμό του Imperial Valley (California - 1979) που παρουσιάστηκε παραπάνω.

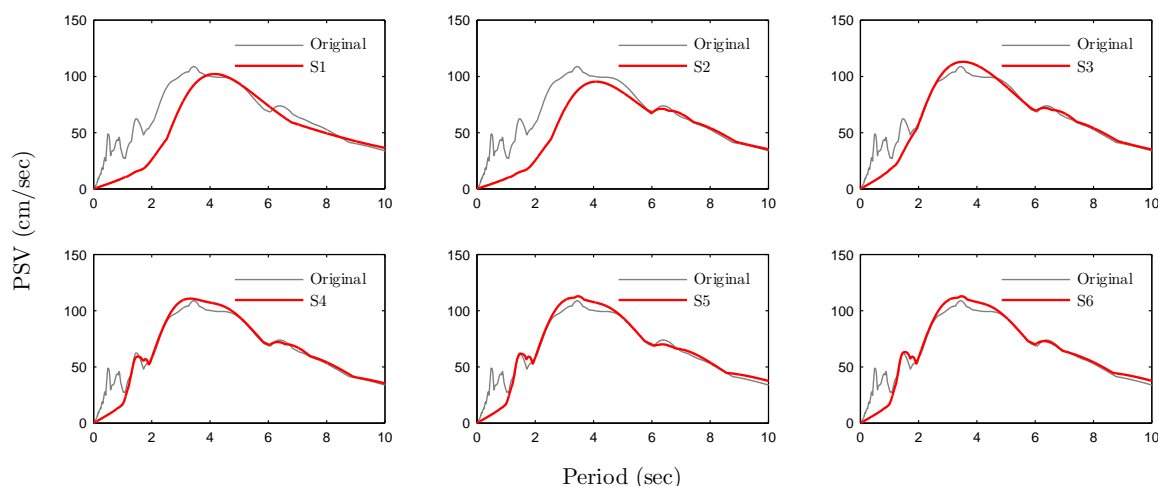


Σχήμα 3.3: Υπέρθυση των 6 πρώτων παλμών για την καταγραφή από το σταθμό ECC County Center FF στο σεισμό του Imperial Valley (California - 1979). Φαίνεται η αρχική χρονοϊστορία (Original) και τα άθροισμα των πρώτων παλμών  $S_i$ .

- 1<sup>η</sup> επανάληψη: Φαίνεται η αρχική καταγραφή (*Original*) και ο πρώτος παλμός ( $S_1$ ).
- 2<sup>η</sup> επανάληψη: Φαίνεται η αρχική καταγραφή (*Original*) και η υπέρθεση των δύο πρώτων παλμών ( $S_2$ ).

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι και την υπέρθεση του έκτου παλμού, όπου βλέπουμε ότι η εδαφική ταχύτητα της αρχικής καταγραφής προσεγγίζεται εξαιρετικά από το άθροισμα των έξι παλμών ( $S_6$ ). Αξίζει να παρατηρήσουμε ότι μια καλή προσέγγιση της αρχικής εδαφικής κίνησης γίνεται και μόνο με δύο παλμούς ( $S_2$ ).

Στο σχήμα 3.4 παρουσιάζονται τα ελαστικά φάσματα απόκρισης της ψευδοταχύτητας για απόσβεση 5% για την αρχική καταγραφή και τα αθροίσματα των παλμών.



Σχήμα 3.4: Ελαστικά φάσματα ψευδοταχύτητας ( $\xi=5\%$ ) για την καταγραφή από το σταθμό ECC County Center FF στο σεισμό του Imperial Valley (California - 1979). Φαίνεται το φάσμα της αρχικής καταγραφής (*Original*) και τα φάσματα για τα αθροίσματα των επιμέρους παλμών  $S_i$ .

### 3.2.4 Κλιμάκωση των καταγραφών για 3 στάθμες έντασης

Η διαδικασία πραγματοποιείται για τρεις στάθμες έντασης κάθε εδαφικής κίνησης. Κάθε καταγραφή κλιμακώνεται ώστε να αναπτύσσονται για την εξεταζόμενη κατασκευή τιμές συντελεστή συμπεριφοράς:  $q=2$ ,  $q=3$ ,  $q=4$ . Για τον υπολογισμό των συντελεστών κλιμάκωσης κάθε σεισμικής καταγραφής γίνεται χρήση του ελαστικού φάσματος απόκρισης της αρχικής καταγραφής για απόσβεση 5% και χρήση του φάσματος ικανότητας της κατασκευής.

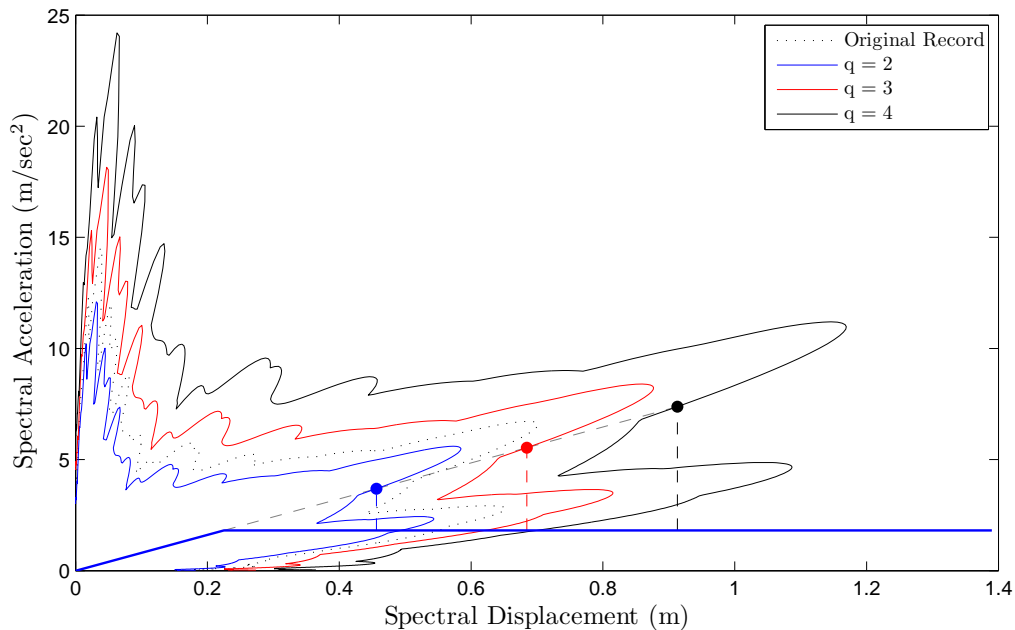
Σε ένα ελαστοπλαστικό σύστημα μιας ελευθερίας ο συντελεστής συμπεριφοράς ορίζεται ως η μέγιστη σεισμική δύναμη του συστήματος, αν αυτό ήταν απεριόριστα ελαστικό, προς τη δύναμη διαρροής του. Συνεπώς, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός μιας δύναμης διαρροής του συστήματος σε οριζόντια φορτία. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της μη-γραμμικής στατικής ανάλυσης και με τη μετάβαση σε ένα ισοδύναμο σύστημα μιας ελευθερίας κίνησης (ΣΜΕΚ), όπως ήδη περιγράφηκε.

Ο συντελεστής συμπεριφοράς του ισοδύναμου μονοβαθμίου συστήματος προκύπτει ως το πηλίκο της ελαστικής επιτάχυνσης του φάσματος της αρχικής καταγραφής για την περίοδο του μονοβαθμίου συστήματος, προς την επιτάχυνση διαρροής. Έτσι, για κάθε σεισμική καταγραφή κατασκευάζονται τρεις συντελεστές κλιμάκωσης, για τους οποίους προκύπτουν οι επιθυμητοί συντελεστές συμπεριφοράς.

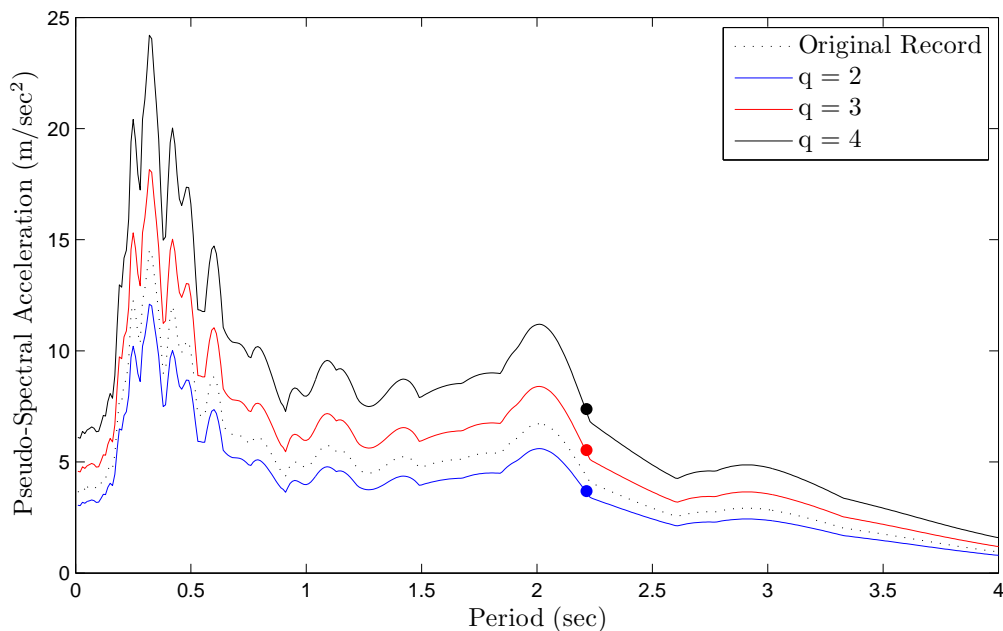
$$ScaleFactor = q(2, 3, 4) \frac{\alpha_y}{a_{el}(T^*, 5\%)} \quad (3.1)$$

Στη συνέχεια, τα επιμέρους αθροίσματα των παλμών πολλαπλασιάζονται με τους ίδιους συντελεστές κλιμάκωσης που προέκυψαν από τα ελαστικά φάσματα των αρχικών καταγραφών ώστε

να υπάρχει αντιστοιχία.



Σχήμα 3.5: Κλιμακώση καταγραφής για τρεις στάθμες έντασης. Φάσμα Ικανότητας και φάσμα ADRS της καταγραφής από το σταθμό VAS2 για το σεισμό της Λευκάδας (2015) Οι κουκκίδες δείχνουν τα σημεία του φάσματος για την περίοδο του ισοδύναμου ΣΜΕΚ με βάση τα οποία πραγματοποιούνται οι κλιμακώσεις.



Σχήμα 3.6: Ελαστικό φάσμα Ψευδο-επιταχύνσεων για την καταγραφή από το σταθμό VAS2 για το σεισμό της Λευκάδας (2015) για τρεις κλιμακώσεις. Οι κουκκίδες δείχνουν τα σημεία του φάσματος για την περίοδο του ισοδύναμου ΣΜΕΚ, με βάση τα οποία πραγματοποιούνται οι κλιμακώσεις.

Αξίζει να γίνει ένα σχόλιο όσον αφορά τον προσδιορισμό της διαρροής του συστήματος. Η μεθοδολογία της μη-γραμμικής στατικής ανάλυσης έχει γνωρίσει τις τελευταίες δεκαετίες την αποδοχή της επιστημονικής κοινότητας και κυρίως της κοινής πρακτικής, αλλά φέρει κάποια

σημαντικά μειονεκτήματα. Σε συστήματα που δε μπορούν να περιγραφούν επαρκώς από ένα ισοδύναμο ΣΜΕΚ λόγω συμμετοχής ανώτερων ιδιομορφών στη σεισμική απόκριση, η αξιοπιστία της καμπύλης ικανότητας ως μιας αντιπροσωπευτικής καμπύλης συμπεριφοράς του συστήματος είναι αμφισβητήσιμη.

Εναλλακτικά, η διαρροή του συστήματος θα μπορούσε να εντοπιστεί διαφορετικά για κάθε αρχική καταγραφή, μέσω εκτέλεσης Αναλύσεων Δυναμικής Αντίστασης (Incremental Dynamic Analysis – Vamvatsikos and Cornell, 2002). Δηλαδή, η κατασκευή θα μπορούσε να υποβληθεί για κάθε αρχική καταγραφή σε μη-γραμμικές δυναμικές αναλύσεις για ένα πλήθος κλιμακώσεων και το σημείο διαρροής θα μπορούσε έτσι να εκτιμηθεί ανά καταγραφή. Όμως, θα έπρεπε και πάλι να γίνει μια παραδοχή για το τι θεωρούμε ως διαρροή του συστήματος, αν δηλαδή θεωρούμε τη διαρροή του πρώτου οπλισμού ή μια μεταγενέστερη κατάσταση στην οποία έχει διαρρεύσει ένα ποσοστό των συνολικών οπλισμών. Η διαδικασία αυτή δε διενεργείται στα πλαίσια της εργασίας αυτής, αφού το υπολογιστικό κόστος διενέργειας αναλύσεων IDA για 90 σεισμικές καταγραφές είναι μεγάλο. Ακόμα, όπως θα δούμε παρακάτω η καμπύλη ικανότητας δίνει μια ικανοποιητική εικόνα της καμπύλης σκελετού της υπό μελέτη κατασκευής.

### 3.3 Σεισμικές καταγραφές

Η μεθοδολογία εφαρμόζεται σε 90 σεισμικές καταγραφές κοντινού πεδίου. Οι 55 από αυτές έχουν χαρακτηριστεί ως παλμικές από τον Baker (2007). Οι καταγραφές αυτές υπάρχουν στη βάση σεισμικών καταγραφών του Pacific Earthquake Engineering Center (PEER – NGA: *Next Generation Attenuation Program Database*) και έχουν στραφεί στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα της εδαφικής κίνησης (Baker, 2007). Το δείγμα συμπληρώνεται με 35 καταγραφές του Ευρωπαϊκού και Ευρύτερου Ανατολικού Χώρου, στις οποίες έχει διαπιστωθεί η ύπαρξη ενός τουλάχιστον παλμού ταχύτητας με εφαρμογή της μεθοδολογίας των Mimoglou et al (2014). Οι καταγραφές που αντιστοιχούν σε σεισμικά γεγονότα του Ελλαδικού χώρου υπάρχουν στη βάση δεδομένων του ΙΤΣΑΚ (Ινστιτούτο Τεχνικής Σεισμολογίας και Αντισεισμικών Ερευνών), ενώ για σεισμικά γεγονότα του Ευρωπαϊκού ή Ανατολικού χώρου οι σεισμικές καταγραφές υπάρχουν στη βάση δεδομένων ESM (*Engineering Strong-Motion Database*) και στο μη-κερδοσκοπικό οργανισμό Orfeus (*Observatories and Research Facilities for European Seismology*).

Στον πίνακα 3.1 παρουσιάζονται στοιχεία των καταγραφών που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία αυτή. Οι καταγραφές 1-50 & 86-90 αφορούν τις καταγραφές που έχουν χαρακτηριστεί ως παλμικές από τον Baker (2007), ενώ οι καταγραφές 51-85 αφορούν τις λοιπές καταγραφές του Ευρωπαϊκού και Ανατολικού χώρου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΩΝ ΑΝΩΤΕΡΩΝ ΠΑΛΜΩΝ ΣΤΗΝ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΜΙΑΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Πίνακας 3.1: Σεισμικές καταγραφές

#	Event	Year	Station	PGV (cm/sec)	$M_w$
1	SanFernando	1971	PacoimaDam(upperleftabut)	116.5	6.6
2	CoyoteLake	1979	GilroyArray#6	51.5	5.7
3	ImperialValley - 06	1979	AeropuertoMexicali	44.3	6.5
4	ImperialValley - 06	1979	Agrarias	54.4	6.5
5	ImperialValley - 06	1979	BrawleyAirport	36.1	6.5
6	ImperialValley - 06	1979	ECCountyCenterFF	54.5	6.5
7	ImperialValley - 06	1979	ECMelolandOverpassFF	115	6.5
8	ImperialValley - 06	1979	ElCentroArray#10	46.9	6.5
9	ImperialValley - 06	1979	ElCentroArray#11	41.1	6.5
10	ImperialValley - 06	1979	ElCentroArray#4	77.9	6.5
11	ImperialValley - 06	1979	ElCentroArray#5	91.5	6.5
12	ImperialValley - 06	1979	ElCentroArray#6	111.9	6.5
13	ImperialValley - 06	1979	ElCentroArray#7	108.8	6.5
14	ImperialValley - 06	1979	ElCentroDifferentialArray	59.6	6.5
15	MammothLakes - 06	1980	LongValleyDam(UprLAbut)	33.1	
16	Irpinia, Italy - 01	1980	Sturno	41.5	6.9
17	Westmorland	1981	ParachuteTestSite	35.8	5.9
18	Coalinga - 05	1983	OilCity	41.2	
19	Coalinga - 05	1983	TransmitterHill	46.1	
20	Coalinga - 07	1983	Coalinga - 14th&Elm(OldCHP)	36.1	
21	MorganHill	1984	CoyoteLakeDam(SW Abut)	62.3	6.2
22	MorganHill	1984	GilroyArray#6	35.4	6.2
23	TaiwanSMART1(40)	1986	SMART1C00	31.2	6.1
24	TaiwanSMART1(40)	1986	SMART1M07	36.1	6.1
25	N.PalmSprings	1986	NorthPalmSprings	73.6	6.1
26	SanSalvador	1986	GeotechInvestigCenter	62.3	5.8
27	WhittierNarrows - 01	1987	Downey - CoMaintBldg	30.4	6
28	WhittierNarrows - 01	1987	LB - OrangeAve	32.9	6
29	SuperstitionHills - 02	1987	ParachuteTestSite	106.8	6.5
30	LomaPrieta	1989	AlamedaNavalAirStnHanger	32.2	6.9
31	LomaPrieta	1989	GilroyArray#2	45.7	6.9
32	LomaPrieta	1989	Oakland - OuterHarborWharf	49.2	6.9
33	LomaPrieta	1989	Saratoga - AlohaAve	55.6	6.9
34	Erzincan, Turkey	1992	Erzincan	95.4	6.7
35	CapeMendocino	1992	Petrolia	82.1	7
36	Landers	1992	Barstow	30.4	7.3
37	Northridge - 01	1994	JensenFilterPlant	67.4	6.7
38	Northridge - 01	1994	JensenFilterPlantGenerator	67.4	6.7
39	Northridge - 01	1994	LA - WadsworthVAHospitalNorth	32.4	6.7
40	Northridge - 01	1994	LADam	77.1	6.7
41	Northridge - 01	1994	Newhall - WPicoCanyonRd.	87.8	6.7
42	Northridge - 01	1994	PacoimaDam(upperleft)	107.1	6.7
43	Northridge - 01	1994	RinaldiReceivingSta	167.2	6.7
44	Northridge - 01	1994	Sylmar - ConverterSta	130.3	6.7
45	Northridge - 01	1994	Sylmar - ConverterStaEast	116.6	6.7
46	Northridge - 01	1994	Sylmar - OliveViewMedFF	122.7	6.7
47	Kobe, Japan	1995	Takarazuka	72.6	6.9
48	Kobe, Japan	1995	Takatori	169.6	6.9
49	NorthwestChina - 03	1997	Jiashi	37	6.1
50	Yountville	2000	NapaFireStation#3	43	5
51	Friuli, Italy(IT - 1976 - 0027)	1976	GemonaE	68.3	5.9
52	Friuli, Italy(IT - 1976 - 0027)	1976	GemonaN	33.7	5.9
53	L'Aquila, CentralItaly(IT - 2009 - 0009)	2009	L'AQUILA - V.ATERNO - AQUILPARKING.E	32.1	6.3
54	L'Aquila, CentralItaly(IT - 2009 - 0009)	2009	L'AQUILA - V.ATERNO - AQUILPARKING.N	35.7	6.3
55	L'Aquila, CentralItaly(IT - 2009 - 0009)	2009	L'AQUILA - V.ATERNO - F.ATERNOE	31.8	6.3
56	NW Balk.Penin., Montenegro(ME - 1979 - 0003)	1979	Bar - SkupstinaOpstineE	50.4	6.9
57	Kerman, SouthernIran(IR - 2003 - 0041)	2003	Bam	120.4	6.6
58	Kerman, SouthernIran(IR - 2003 - 0041)	2003	Bam	63.6	6.6
59	Kerman, SouthernIran(IR - 2003 - 0041)	2003	Bam	39.7	6.6
60	Erzincan, Turkey(TK - 1992 - 0002)	1992	AI - 178 - ERC - METE	76.6	6.6
61	Erzincan, Turkey(TK - 1992 - 0002)	1992	AI - 178 - ERC - METN	108.4	6.6
62	Izmit, Turkey(TK - 1999 - 0294)	1999	AI - 199 - TPTE	62.7	7.4
63	Duzce, Turkey(TK - 1999 - 0415)	1999	AI - 011 - DZCE	82.6	7
64	Duzce, Turkey(TK - 1999 - 0415)	1999	AI - 011 - DZCN	68.0	7
65	Bingol, Turkey(TK - 1999 - 0431)	1999	AI - 049 - BNGN	34.1	6.4
66	Emil.Romagna, Italy(IT - 2012 - 0011)	2012	MIREE	27.4	6
67	Emil.Romagna, Italy(IT - 2012 - 0011)	2012	MIREN	58.5	6
68	Emil.Romagna, Italy(IT - 2012 - 0011)	2012	MIRHE	24.7	6
69	Emil.Romagna, Italy(IT - 2012 - 0011)	2012	MIRHN	55.0	6
70	Emil.Romagna, Italy(IT - 2012 - 0011)	2012	MIRANDOLA(NAPOLI)E	28.5	6
71	Emil.Romagna, Italy(IT - 2012 - 0011)	2012	MIRANDOLA(NAPOLI)N	57.5	6
72	Emil.Romagna, Italy(IT - 2012 - 0011)	2012	SANFELICESULPARANOE	19.6	6
73	Emil.Romagna, Italy(IT - 2012 - 0011)	2012	SANFELICESULPARANON	35.2	6
74	Emil.Romagna, Italy(IT - 2012 - 0011)	2012	T0802E	16.9	6
75	Emil.Romagna, Italy(IT - 2012 - 0011)	2012	T0802N	24.4	6
76	Emil.Romagna, Italy(IT - 2012 - 0011)	2012	T0818N	39.2	6
77	Emil.Romagna, Italy(IT - 2012 - 0011)	2012	MEDOLLAE	31.3	6
78	Emil.Romagna, Italy(IT - 2012 - 0011)	2012	MEDOLLAN	52.3	6
79	Emil.Romagna, Italy(IT - 2012 - 0011)	2012	MIRANDOLAMRNN	53.4	6
80	Emil.Romagna, Italy(IT - 2012 - 0011)	2012	QUARANTOLI2N	32.4	6
81	Izmit, Turkey(TK - 1999 - 0077)	1999	AI - 004 - IZTE	38.4	7.4
82	Emil.Romagna, Italy(IT - 2012 - 0011)	2012	MIRANDOLAMRNE	36.3	6
83	Kefalonia, Greece(LXR1 - 20140203)	2014	Lixouri, O.T.E.E	115.3	6
84	Kefalonia, Greece(LXR1 - 20140203)	2014	Lixouri, O.T.E.E.N	80.5	6
85	Lefkada, Greece(VAS2 - 201511170710)	2015	VassilikiN	58.6	6.4
86	ImperialValley - 06	1979	ElCentroArray#3	41.1	6.5
87	ImperialValley - 06	1979	ElCentroArray#8	48.6	6.5
88	ImperialValley - 06	1979	HoltvillePostOffice	55.1	6.5
89	Landers	1992	YermoFireStation	53.2	7.3
90	Northridge - 01	1994	PacoimaDam(downstr)	50.4	6.7

### 3.3. ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΣ

Στον πίνακα 3.2 παρατίθενται οι περίοδοι των 6 κυματιδίων για κάθε καταγραφή, όπως υπολογίζονται από τη διαδικασία.

Πίνακας 3.2: Περίοδοι παλμών (*sec*)

#	$T_{p1}$	$T_{p2}$	$T_{p3}$	$T_{p4}$	$T_{p5}$	$T_{p6}$
1	1.4	5.87	0.51	1.75	0.81	0.55
2	0.92	0.41	0.65	1.08	3.25	1.79
3	1.63	2.91	1.24	1.53	0.93	0.91
4	1.9	1.46	0.89	0.83	0.72	4.47
5	4.76	2.72	9.24	3.16	6.21	1.61
6	4.78	5.3	2.48	1.52	3.63	2.3
7	3	1.65	1.49	5.5	0.75	1.4
8	6.23	3.9	2.79	3.19	3.92	1.63
9	7.34	4.74	5.18	1.23	0.91	9.32
10	4.3	1.67	3.58	3.05	10.94	16.62
11	3.76	4.65	2.57	1.04	3.99	1.62
12	3.89	2.53	1.8	8.44	1.11	4.55
13	3.49	0.81	1.54	8.51	3.97	1.07
14	5.9	2.52	5.44	1.32	15.83	19.1
15	1.13	0.59	0.8	0.8	0.74	0.51
16	2.63	4.94	1.79	2.47	2.63	1.93
17	3	8.46	4.07	0.89	1.71	6.74
18	0.55	0.33	1.86	5.5	2.72	0.19
19	0.74	0.46	2.53	0.57	1.06	0.95
20	0.38	1.63	0.23	1.45	0.43	0.78
21	0.76	1.44	3.7	0.38	13.59	0.35
22	1.16	1.74	0.97	0.55	1.45	1.11
23	1.49	2.87	2.26	1.07	1.46	1.1
24	1.39	2.88	1.89	1.83	1.1	1.5
25	1.42	1.14	0.71	0.77	0.3	7.51
26	0.69	1.97	0.78	2.74	0.32	1.42
27	0.81	3.27	0.46	0.78	0.73	0.39
28	0.77	0.8	3.91	2.3	0.58	0.8
29	2.4	6.1	0.96	3.87	1.83	1.85
30	2.3	3.59	1.09	0.61	6.57	1.78
31	1.53	4.21	0.72	1.84	0.39	0.92
32	1.51	0.67	3.43	0.74	1.25	2.33
33	5.93	1.78	2.81	17.21	20	1.1
34	2.42	1.04	2.8	5.03	9.09	1.25
35	2.68	0.8	1.39	0.74	4.19	16.53
36	7.58	3.74	1.06	12.67	2.8	3.03
37	2.93	5.82	0.76	1.55	3.01	3.99
38	2.93	5.81	0.76	1.55	3.01	4.79
39	2.34	2.98	1.08	1.88	3.36	1.92
40	2.16	1.31	0.94	7.32	18.64	1.87
41	2.38	2.45	1	3.03	3.31	6.21
42	0.91	0.69	3.38	0.34	1.23	0.58
43	1.11	1.43	4.34	3.1	1.72	0.49
44	2.95	1.16	1.06	5.21	1.97	0.74
45	3.06	2.35	0.83	0.89	3.92	2.37
46	2.62	1.51	1.94	1	9.39	7.45
47	1.23	1.85	0.68	4.22	0.51	2.85
48	2.08	1.2	1.43	1.41	3.23	1.91
49	0.98	2.13	0.71	0.49	0.37	1.14
50	2.41	1.97	3.66	1.87	1.2	4.21
51	0.86	0.96	1.8	0.69	0.91	1.12

Πίνακας 3.2 (συνέχεια)

#	$T_{p1}$	$T_{p2}$	$T_{p3}$	$T_{p4}$	$T_{p5}$	$T_{p6}$
52	0.9	1.68	0.63	0.84	0.57	1.29
53	1.65	1.82	1.95	1.02	0.87	1.16
54	1.68	1.83	0.84	1.76	1.38	1.58
55	1.14	0.76	1.54	2.49	0.6	17.49
56	1.59	0.74	1.25	0.58	2.1	0.59
57	1.71	1.22	1.93	0.8	0.72	3.71
58	1.44	1.09	2.6	0.88	0.54	1.32
59	1.2	1.19	3.25	0.81	0.77	0.9
60	3.46	2.51	1.71	0.84	1.26	3.36
61	2.34	1.02	3.26	2.76	1.24	8.35
62	1.28	2.09	0.63	1.14	2.19	1.32
63	5.03	1.99	1.64	10.33	1.4	0.85
64	5.52	3.68	3.89	8.33	5.38	3.43
65	2.3	0.61	0.94	0.4	0.4	2.32
66	2.02	4.17	1.33	0.69	0.46	0.41
67	2.06	0.68	0.81	5.37	0.63	1.01
68	2.37	1.46	0.69	4.26	0.44	1.13
69	2.45	0.64	1.13	1.31	4.8	1.73
70	2.05	4.18	1.32	0.69	0.47	0.38
71	2.11	0.68	0.81	5.21	0.63	1.07
72	2.63	1.6	2.25	0.91	1.16	0.45
73	2.63	1.72	0.56	0.89	3.89	1.7
74	2.33	0.66	5.88	0.99	2.9	0.33
75	3.18	1.71	0.87	0.57	0.36	0.63
76	1	2.34	4.45	0.77	0.7	1.37
77	2.2	0.69	0.32	1.43	0.84	0.5
78	2.23	0.69	1.14	5.42	2.22	0.37
79	2.8	1.78	0.63	1.26	2.87	0.59
80	2.17	4.27	0.85	0.59	1.07	2.49
81	4.84	1.8	2.87	1	0.61	16.01
82	2.86	1.62	0.65	1.45	1.77	15.23
83	1.46	1.1	2.52	0.72	0.89	4.24
84	1.9	0.97	0.86	4	1.08	0.46
85	2.04	2.43	2.02	1.14	1.93	1.72
86	5.55	2.76	7.24	3.01	19.12	2.48
87	5.07	2.58	4.77	1.27	0.62	10.19
88	4.24	7.33	1.14	3.43	5.29	4.07
89	7.33	1.38	4.21	13.54	0.93	6.59
90	3.35	0.5	1.06	6.14	1.74	0.91

### 3.4 Μη-γραμμική στατική ανάλυση

Ο προσδιορισμός ενός σημείου διαρροής της κατασκευής γίνεται μέσω μη-γραμμικής στατικής ανάλυσης. Η ανάλυση διενεργείται για φορτία μόνο κατά τη διαμήκη διεύθυνση της κατασκευής, ώστε να υπάρχει αντιστοιχία με τις μη-γραμμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας φόρτισης. Όπως ορίζεται στο Παράρτημα Η του EC8-2, τα βήματα αύξησης φορτίου  $DF_{i,j}$  που θεωρείται ότι δρουν στην συγκεντρωμένη μάζα  $M_i$  κάθε κόμβου, στην εξεταζόμενη διεύθυνση, για κάθε βήμα φόρτισης  $j$ , πρέπει να λαμβάνονται ίσα με:

$$\Delta F_{i,j} = \Delta \alpha_j g M_i \phi_i \quad (3.2)$$

όπου:

$\Delta\alpha_j$  είναι το βήμα αύξησης οριζόντιας δύναμης, ανηγμένης στο βάρος  $gM_i$ , που εφαρμόζεται στο βήμα  $j$ , και

$\phi_i$  είναι συντελεστής σχήματος που ορίζει την κατανομή των φορτίων στους κόμβους του συστήματος.

Υιοθετείται ιδιομορφική κατανομή των φορτίων με βάση τη δεσπόζουσα ιδιομορφή στην εξεταζόμενη διεύθυνση (1<sup>η</sup> ιδιομορφή του συστήματος), αφού όπως ορίζεται στο παράρτημα Η του EC8-2: «η κατανομή των φορτίων  $\phi_i$  είναι ανάλογη προς την συνιστώσα, στην εξεταζόμενη οριζόντιο διεύθυνση, της ιδιομορφικής μετακίνησης στο σημείο  $i$ , της πρώτης ιδιομορφής, στην ίδια διεύθυνση. Ως πρώτη ιδιομορφή θα πρέπει να λαμβάνεται η ιδιομορφή με τον μεγαλύτερο συντελεστή συμμετοχής στην εξεταζόμενη διεύθυνση».

Ως κόμβος ελέγχου για τον οποίο κατασκευάζεται η καμπύλη ικανότητας επιλέγεται το γεωμετρικό κέντρο του καταστρώματος σε κάτοψη, στο μέσο δηλαδή της κλείδας του κεντρικού ανοίγματος. Η ανάλυση διενεργείται για θετικές και αρνητικές μετατοπίσεις, από τις οποίες προκύπτουν δύο καμπύλες ικανότητας. Σε μη συμμετρικές κατασκευές είναι απαραίτητη η ανάλυση για δύο φορές φόρτισης, αφού η συμπεριφορά μπορεί να εμφανίζει σημαντικές διαφορές.

Στη συνέχεια, οι καμπύλες ικανότητας μετασχηματίζονται σε φάσματα ικανότητας, με το μετασχηματισμό που προτείνεται στο παράρτημα Β του EC8-1. Σε αυτό το σημείο, γίνεται δηλαδή η μετάβαση από το πολυβάθμιο σύστημα, σε ένα ισοδύναμο σύστημα μιας ελευθερίας κίνησης και η καμπύλη ικανότητας μετασχηματίζεται σε φάσμα ικανότητας, της μορφής ADRS (Acceleration - Displacement Spectrum).

Η μάζα του ισοδύναμου ΣΜΕΚ υπολογίζεται ως:

$$m^* = \sum m_i \phi_i \quad (3.3)$$

και ο συντελεστής συμμετοχής της κατανομής φόρτισης:

$$\Gamma = \frac{\sum m_i \phi_i}{\sum m_i \phi_i^2} \quad (3.4)$$

Οι επιταχύνσεις του φάσματος ικανότητας προκύπτουν ως:

$$S_a = \frac{V}{\alpha \cdot m_{tot}} \quad (3.5)$$

και οι μετακινήσεις του ως:

$$S_d = \frac{\Delta}{\Gamma \cdot \phi_{top}} \quad (3.6)$$

Στην περίπτωση που η κατανομή  $\phi_i$  έχει κανονικοποιηθεί ως προς τη μέγιστη τιμή της, η σχέση απλοποιείται στην:

$$S_d = \frac{\Delta}{\Gamma} \quad (3.7)$$

Το ποσοστό της συνολικής μάζας που συμμετέχει στη δυναμική απόκριση της κατασκευής για την αναμενόμενη μορφή παραμόρφωσης, δίνεται από τη σχέση:

$$\alpha = \frac{\left[ \sum m_i \phi_i \right]^2}{m_{tot} \cdot \sum m_i \phi_i^2} = \frac{\Gamma \cdot \sum m_i \phi_i}{m_{tot}} = \Gamma \frac{m^*}{m_{tot}} \quad (3.8)$$

όπου

$\phi_{top}$  είναι η μέγιστη τιμή του σχήματος φόρτισης

$m_{tot}$  είναι η μάζα του πραγματικού (πολυβαθμίου – ΣΠΕΚ) συστήματος

$V$  είναι η τέμνουσα βάσης στην εξεταζόμενη διεύθυνση και



Δ είναι η μετακίνηση του κόμβου ελέγχου στη διεύθυνση ελέγχου.

Τα φάσματα ικανότητας διγραμμικοποιούνται για τις δύο φορές της φόρτισης και υπολογίζονται οι αντίστοιχες μετακινήσεις και επιταχύνσεις διαρροής, όπως και οι περίοδοι των ισοδύναμων μονοβαθμίων συστημάτων. Στη συνέχεια, υπολογίζεται μια μέση μετακίνηση και μια μέση επιτάχυνση διαρροής, οι οποίες προκύπτουν ως οι μέσοι όροι των αντιστοίχων μεγεθών για τις δύο φορές ανάλυσης, για τις οποίες υπολογίζεται μια μέση περίοδος. Αυτά τα μέσα χαρακτηριστικά του ισοδύναμου ΣΜΕΚ χρησιμοποιούνται για την κλιμάκωση των καταγραφών.

Η διγραμμικοποίηση του φάσματος ικανότητας πραγματοποιείται σύμφωνα με τη μέθοδο που περιγράφεται στη FEMA 356 και υιοθετείται από τη μέθοδο N2 (Fajfar, 2000), με βάση την οποία το ελαστικό τμήμα της διγραμμικής καμπύλης τέμνει την πραγματική καμπύλη στο 60% της διαρροής και η ιδεατή καμπύλη έχει το ίδιο εμβαδό με την πραγματική, ενώ για τον ανελαστικό κλάδο θεωρείται μηδενική κράτυνση (ελαστικό-πλήρως πλαστικό σύστημα).

Η εν λόγω διαδικασία διγραμμικοποίησης προτιμάται έναντι της προτεινόμενης στο παράρτημα Β του EC8-1. Ενώ η διαδικασία διγραμμικοποίησης του EC8-1 αποτελεί μια πιο πρόσφατη και πιο απλή πρόταση, παρατηρείται ότι για την εν λόγω κατασκευή δεν περιγράφει ικανοποιητικά την ελαστική δυσκαμψία της πραγματικής καμπύλης, και συνεπώς το σημείο διαρροής του συστήματος. Όπως έχει παρατηρηθεί και από τους De Luca et al (2011), σημαντικό απαιτούμενο της διγραμμικής καμπύλης δεν είναι μόνο η επίτευξη ίσων εμβαδών με την πραγματική, αλλά και η ικανοποιητική περιγραφή της ελαστικής δυσκαμψίας της κατασκευής.



## Κεφάλαιο 4

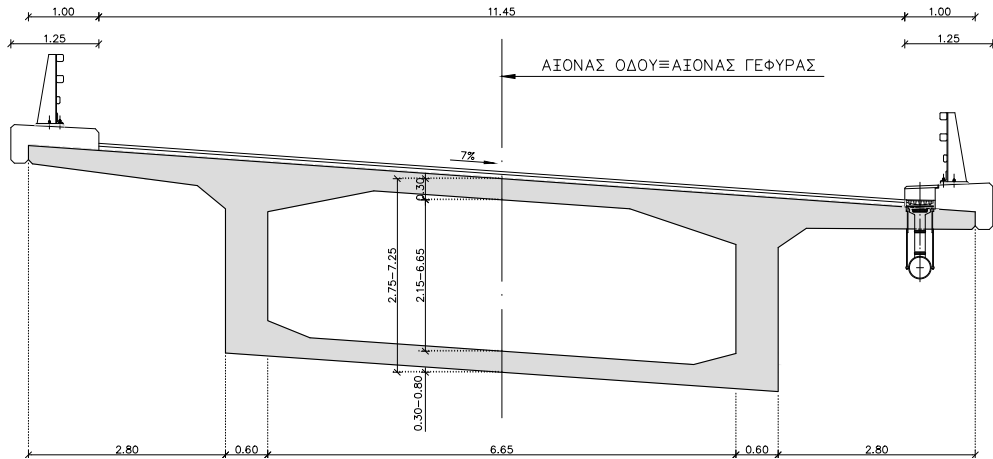
# Περιγραφή της Κατασκευής Μελέτης

Στην εργασία αυτή μελετάται ο αριστερός κλάδος της Γέφυρα Γ7 του τμήματος 3.5.1 της Εγνατίας Οδού (Μέτσοβο - Παναγιά). Το συνολικό γεφυρούμενο μήκος είναι ίσο με 270m και αποτελείται από τρία ανοίγματα (75m-120m-75m), τα οποία φέρονται από δύο ανισοϋψή μεσόβαθρα Μ1 - Μ2. Η Γέφυρα Γ7 είναι μια χαραδρογέφυρα, εξυπηρετεί δηλαδή τη διάβαση της αρτηρίας πάνω από μια φυσική χαράδρα. Ο άξονας χαράξεως της κατασκευής οριζοντιογραφικά ακολουθεί τόξο ακτίνας  $R = 320m$ , ενώ στο κατακόρυφο επίπεδο η χάραξη ακολουθεί τόξο κύκλου ακτίνας  $R = -1000m$ , με αποτέλεσμα οι δύο ακραίες διατομές του φορέα να έχουν υψομετρική διαφορά 6.5m. Η μελέτη της γέφυρας ολοκληρώθηκε το 2005 από τον Όμιλο Τεχνικών Μελετών (ΟΤΜ ΤΕΠΕ).

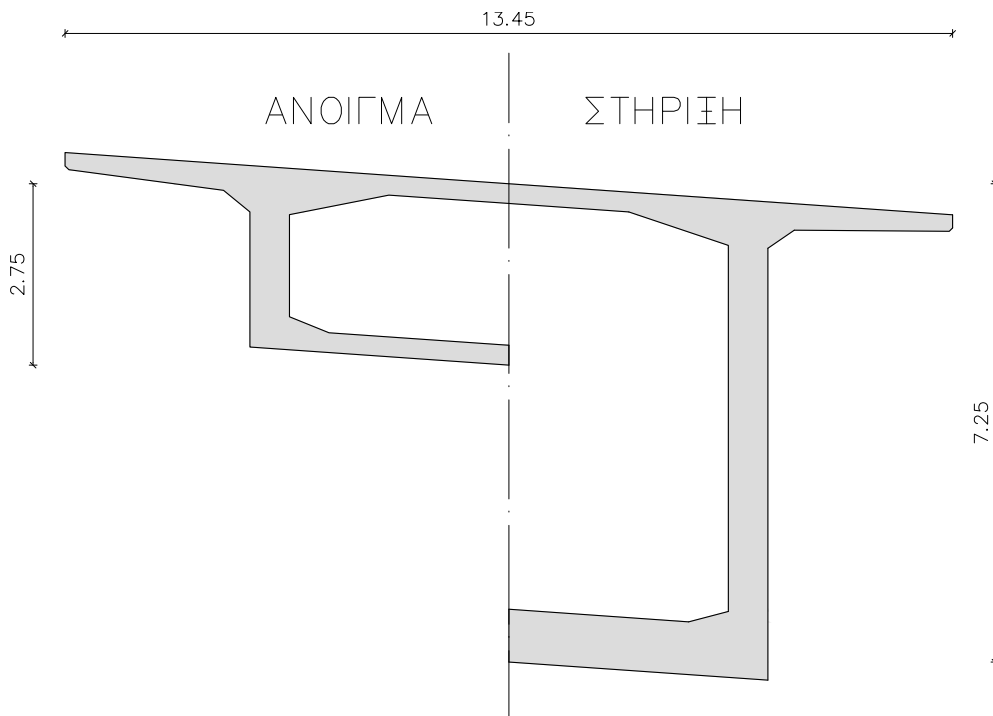
### 4.1 Κατάστρωμα

Ο φορέας του καταστρώματος είναι προεντεταμένος και κατασκευάστηκε με τη μέθοδο της προβολοδομήσεως με επιτόπου σκυροδετήσεις. Το κατάστρωμα μορφώνεται ως μια κιβωτιοειδής διατομή μονής κυψέλης κατηγορίας σκυροδέματος Β45 και είναι μονολιθικά συνδεδεμένο με τα μεσόβαθρα Μ1 και Μ2. Το κιβώτιο έχει σταθερό πλάτος κατά μήκος της χάραξης ίσο με 7.85m και τα φτερά της διατομής έχουν άνοιγμα 2.80m. Έτσι, το συνολικό πλάτος του καταστρώματος φτάνει τα 13.45m. Στις περιοχές σύνδεσης με τα μεσόβαθρα η διατομή έχει ύψος 7.25m το οποίο μειώνεται παραβολικά στα 2.75m σε απόσταση 58m εκατέρωθεν των εξωτερικών παρειών των μεσοβάθρων προς στην κλείδα του κεντρικού ανοίγματος και τις κλείδες των πλευρικών ανοιγμάτων. Στο υπόλοιπο των πλευρικών ανοιγμάτων μετά την επικαμπύλια μετρούμενη απόσταση των 58m οι διαστάσεις παραμένουν σταθερές. Το κατάστρωμα έχει επίκλιση 7%, η οποία υπάρχει ως μια απαίτηση οδοποιίας, δεδομένης της γεωμετρίας της χάραξης (η γέφυρα αποτελεί τμήμα αριστερής στροφής). Το πλάτος των κατακορύφων κορμών του κιβωτίου είναι σταθερό και ίσο με 0.60m.

#### 4.1. ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑ



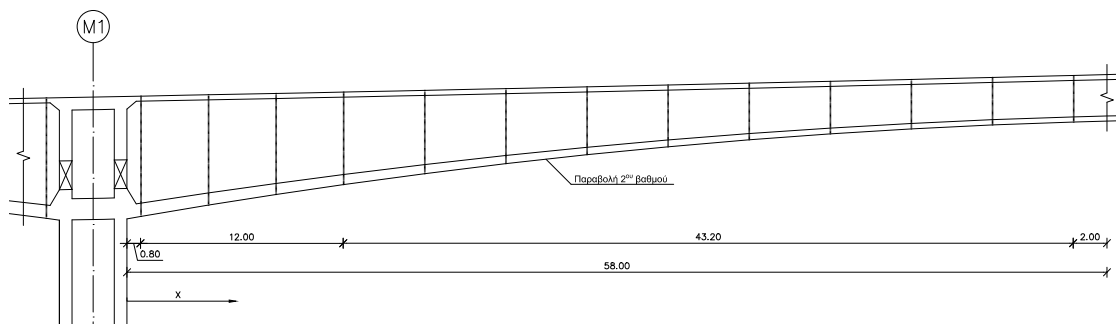
Σχήμα 4.1: Τυπική διατομή καταστρώματος.



Σχήμα 4.2: Ημιτομή καταστρώματος στο άνοιγμα και στις στηρίξεις.

Το πάχος της πλάκας καταστρώματος (άνω πέλμα κιβωτίου) είναι σταθερό και ίσο με 0.30m, ενώ το πάχος της πλάκας πυθμένα (κάτω πέλμα κιβωτίου) μειώνεται παραβολικά από τις περιοχές των μεσοβάθρων προς τα ανοίγματα με τιμές 0.80m και 0.30m αντίστοιχα. Η παραβολική μεταβολή των διαστάσεων κατά μήκος της χάραξης προσεγγίζεται με γραμμική μεταβολή τους σε κάθε σπόνδυλο κατασκευής.

Στο σχήμα 4.3 παρουσιάζεται η μεταβολή του ύψους της διατομής και του πάχους της πλάκας πυθμένα του κιβωτίου για μια περιοχή του καταστρώματος, ενώ στις σχέσεις 4.1 και 4.2 παρουσιάζονται οι παραβολικές σχέσεις προσδιορισμού των διαστάσεων.



Σχήμα 4.3: Παραβολική μείωση των διαστάσεων της διατομής του καταστρώματος.

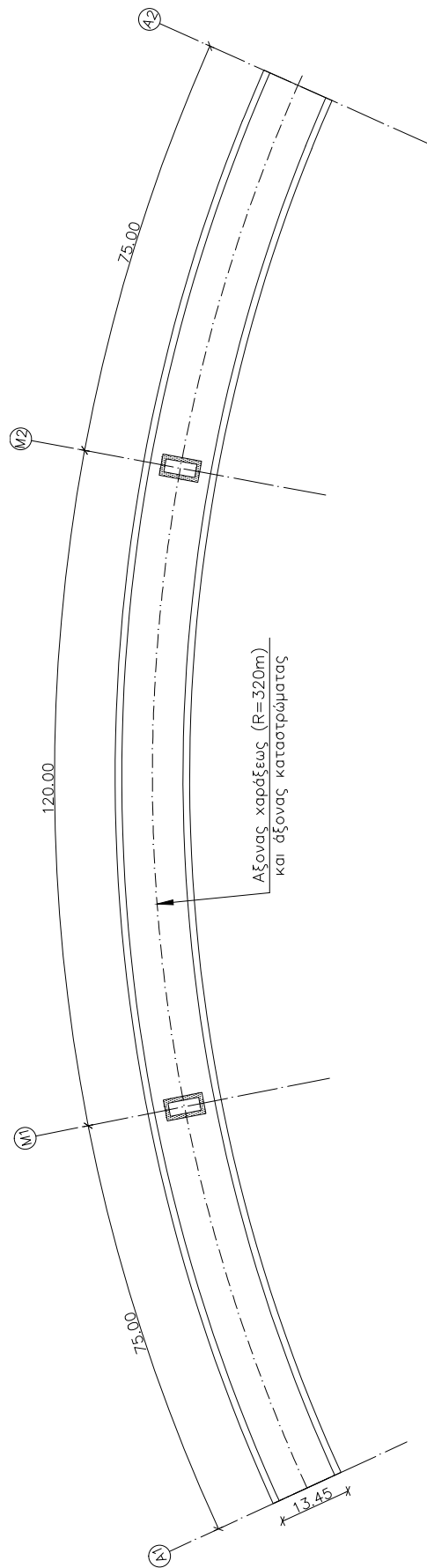
$$H = 2.75 + 4.5 \left(1 - \frac{x}{58}\right)^2 \quad (4.1)$$

$$h_{slab} = 0.30 + 0.50 \left(1 - \frac{x}{58}\right)^2 \quad (4.2)$$

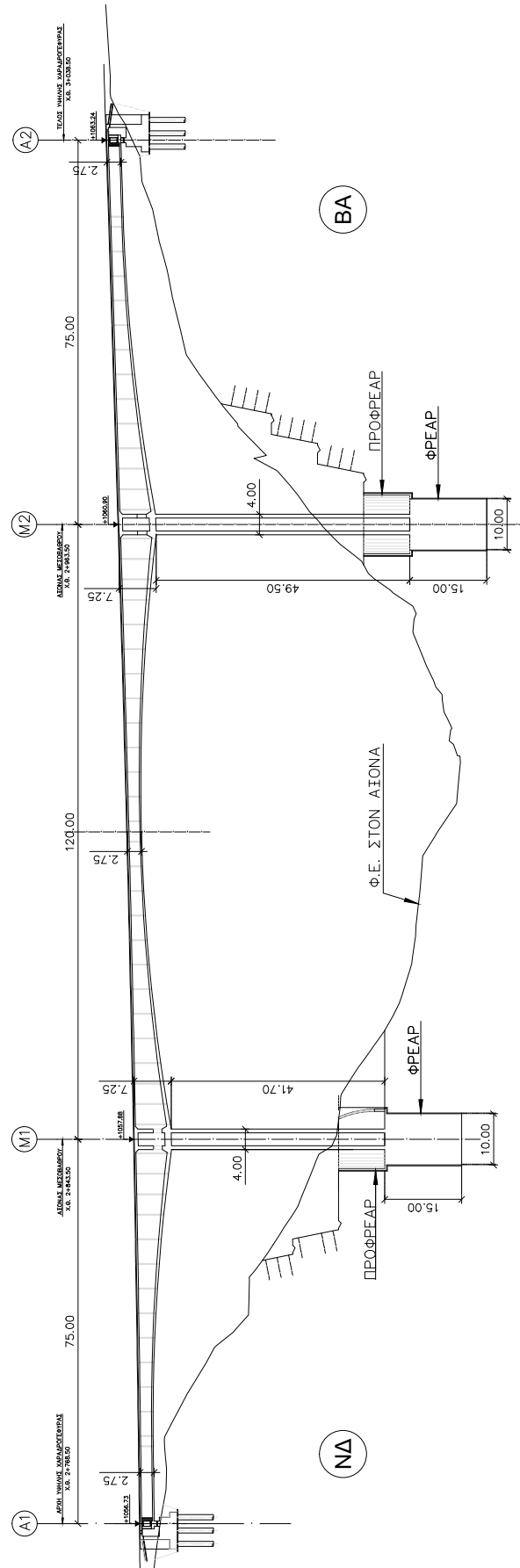
Στα άκρα των πλευρικών ανοιγμάτων, στις περιοχές δηλαδή που ο φορέας του καταστρώματος συνδέεται με τα ακρόβαθρα, διαμορφώνονται συμπαγείς διαδοκίδες ορθογωνικής διατομής από σκυρόδεμα κατηγορίας B45.

Στα σχήματα 4.4 και 4.5 παρουσιάζονται μια οριζοντιογραφία και μια μηκτομή κατά μήκος της καμπύλης χάραξης, αντίστοιχα, ενώ στο σχήμα 4.6 παρουσιάζονται οι διατομές στα άκρα των σπονδύλων του καταστρώματος, όπου φαίνεται η μεταβολή του ύψους και της πλάκας πυθμένα κατά μήκος της χάραξης. Οι αναγραφόμενες θέσεις  $X$  μετρώνται από την παρειά του μεσοβάθρου κατά μήκος της καμπύλης χάραξης, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3.

#### 4.1. ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑ

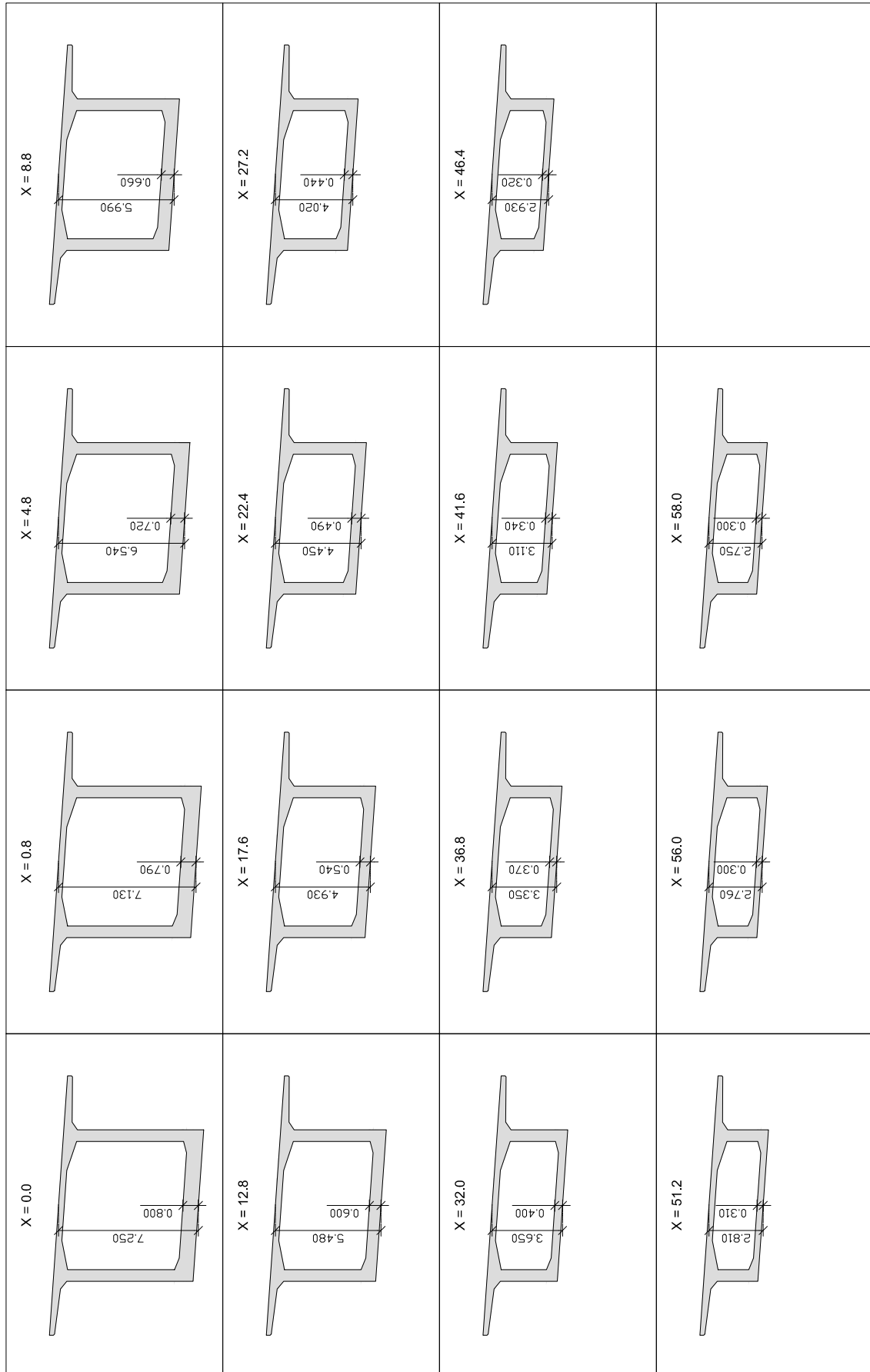


Σχήμα 4.4: Οριζοντιογραφία της χάραξης.



Σχήμα 4.5: Τομή κατά μήκος της χάραξης.

### 4.1. ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑ



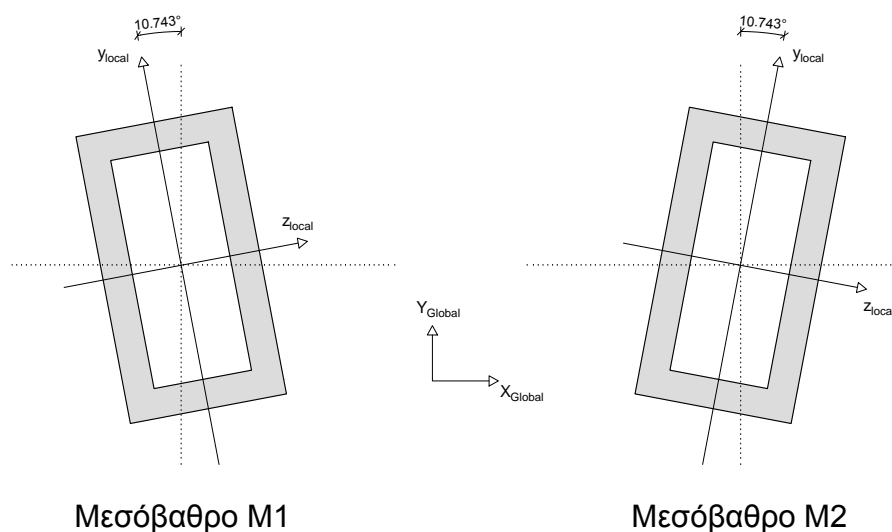
Σχήμα 4.6: Μεταβολές των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της διατομής του καταστρώματος στα άκρα των σπονδύλων κατασκευής.



## 4.2 Μεσόβαθρα

Τα μεσόβαθρα M1 - M2 έχουν ύψη 41.7m και 49.5m αντίστοιχα, κοίλη ορθογωνική διατομή εξωτερικών διαστάσεων 4.0m x 7.35m με πάχος κορμών 0.75m από σκυρόδεμα κατηγορίας B45 και κατασκευάστηκαν με τη χρήση αναρριχώμενου ξυλοτύπου.

Τα μεσόβαθρα είναι στραμμένα ως προς τους οριζόντιους καθολικούς άξονες της κατασκευής, αφού η επιμήκης παρειά της διατομής τους διατάσσεται κάθετα στον καμπύλο άξονα της χάραξης. Ο ασθενής άξονας του μεσοβάθρου M1 είναι στραμμένος 10.743° αντιωρολογιακά του καθολικού άξονα Y (εγκάρσια διεύθυνση), ενώ ο ασθενής άξονας του μεσοβάθρου M2 είναι στραμμένος 10.743° ωρολογιακά του καθολικού άξονα Y, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.7.

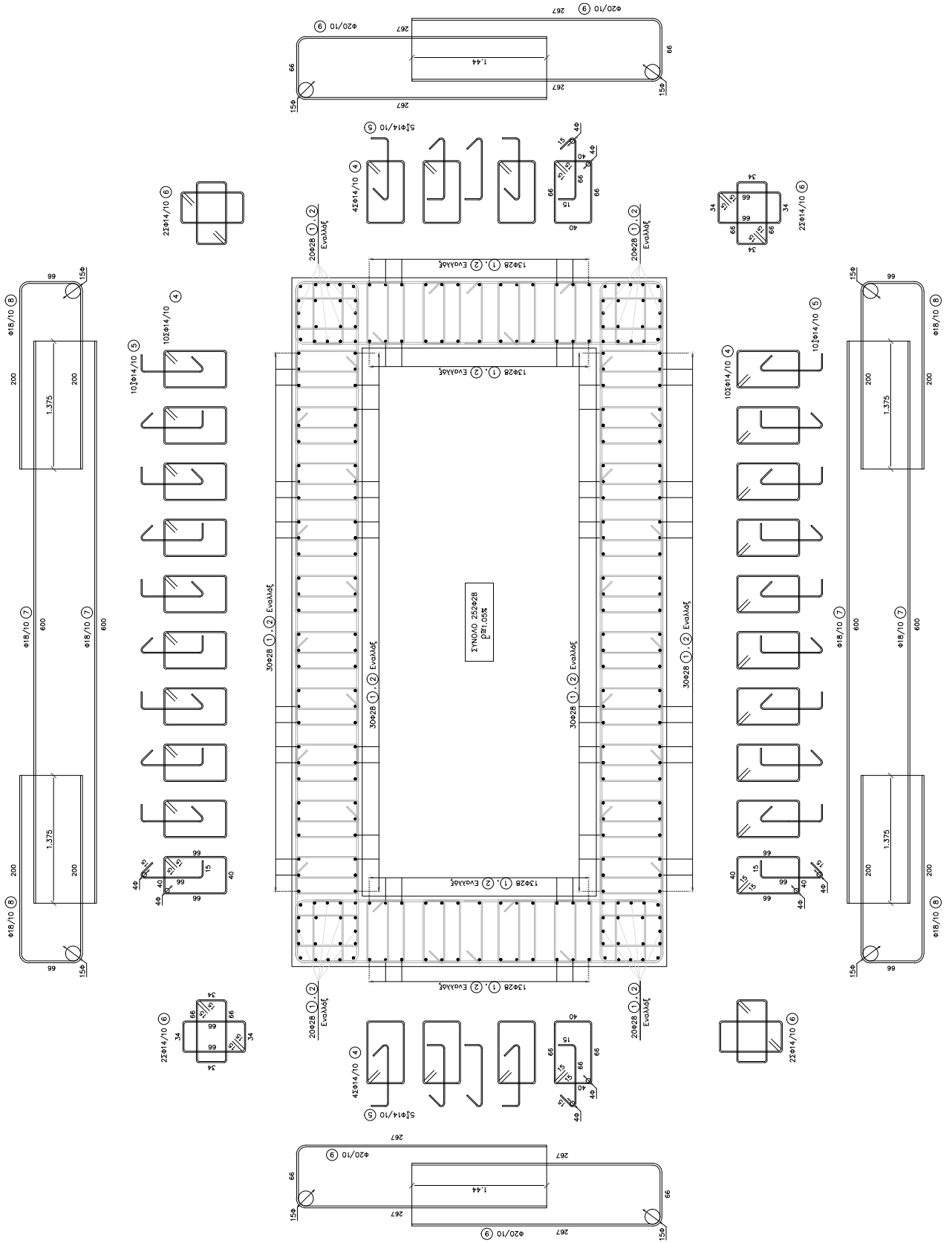


Σχήμα 4.7: Προσανατολισμός Μεσοβάθρων ως προς τους καθολικούς άξονες του προσομοιώματος.

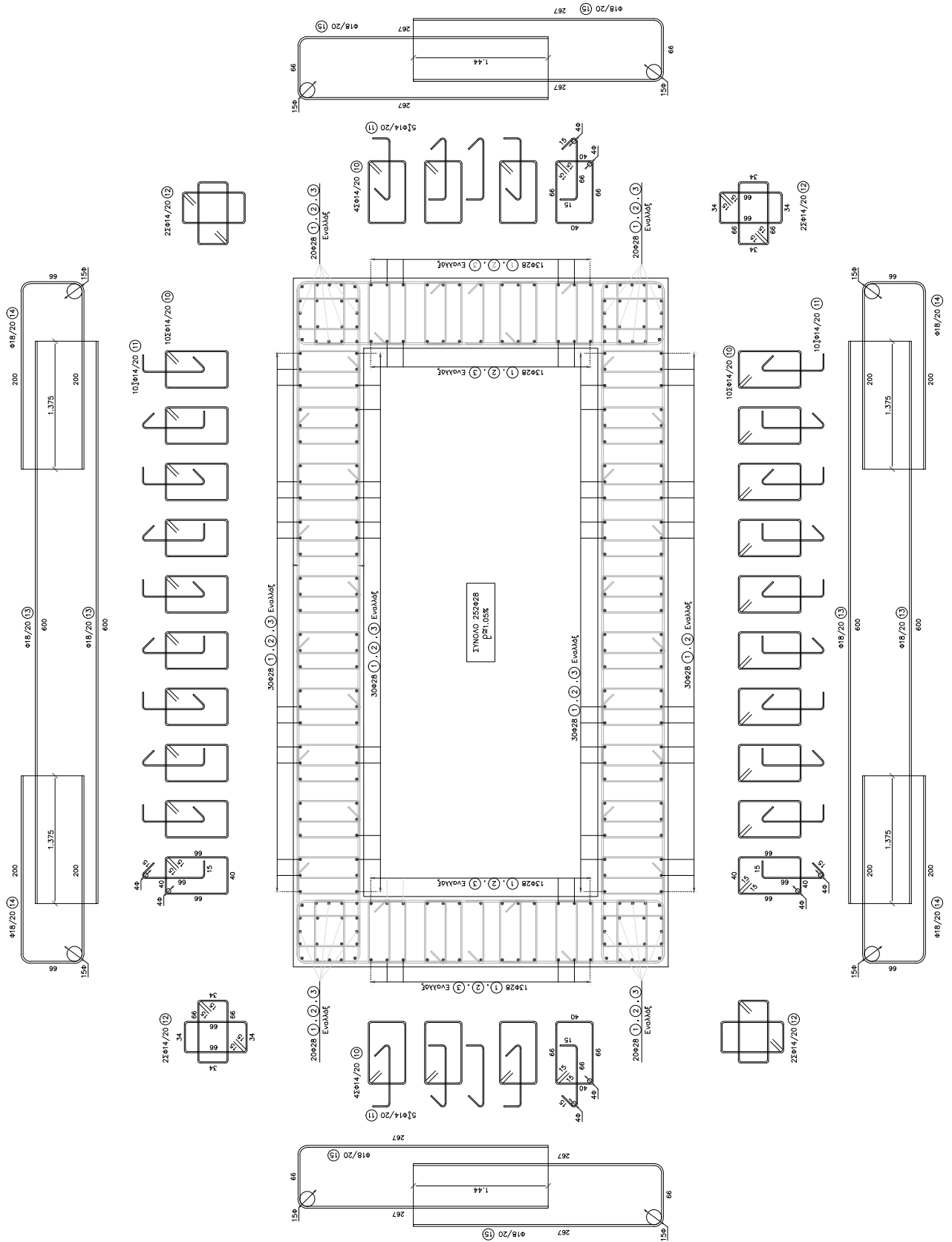
Οι διαμήκεις οπλισμοί παραμένουν σταθεροί καθ' όλο το ύψος των μεσοβάθρων και το ογκομετρικό ποσοστό οπλισμού είναι ίσο με  $\rho \approx 1.05\%$

(252 x Ø28), κοντά στο κατασκευαστικώς ελάχιστο. Η διάταξη των εγκαρσίων οπλισμών μεταβάλλεται καθ' ύψος των μεσοβάθρων με πύκνωση προς τα άκρα, όπου υπάρχει η μεγαλύτερη απαίτηση για περίσφιγξη του σκυροδέματος, αφού στις ακραίες διατομές προδιαγράφεται ο σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων για τα φορτία σχεδιασμού. Ανάλογα με τη διάταξη των εγκαρσίων οπλισμών μορφώνονται τρεις διαφορετικές διατομές καθ' ύψος κάθε μεσοβάθρου. Στα σχήματα 4.8, 4.9 και 4.10 παρουσιάζεται η πλήρης όπλιση των διατομών των μεσοβάθρων.

## 4.2. ΜΕΣΟΒΑΘΡΑ

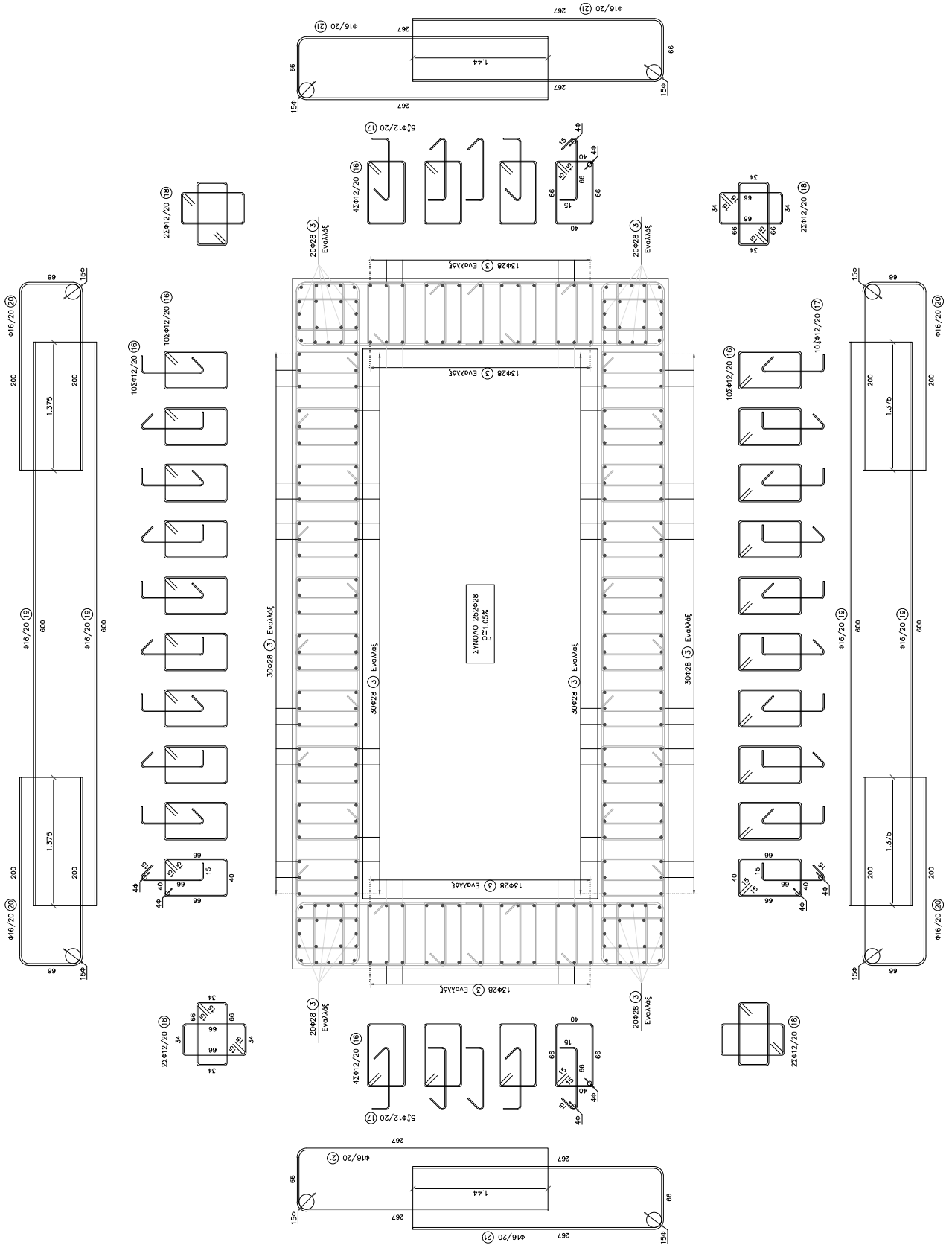


Σχήμα 4.8: Πλήρης όπλιση Διατομής 1.



Σχήμα 4.9: Πλήρης όπλιση Διατομής 2.

## 4.2. ΜΕΣΟΒΑΘΡΑ

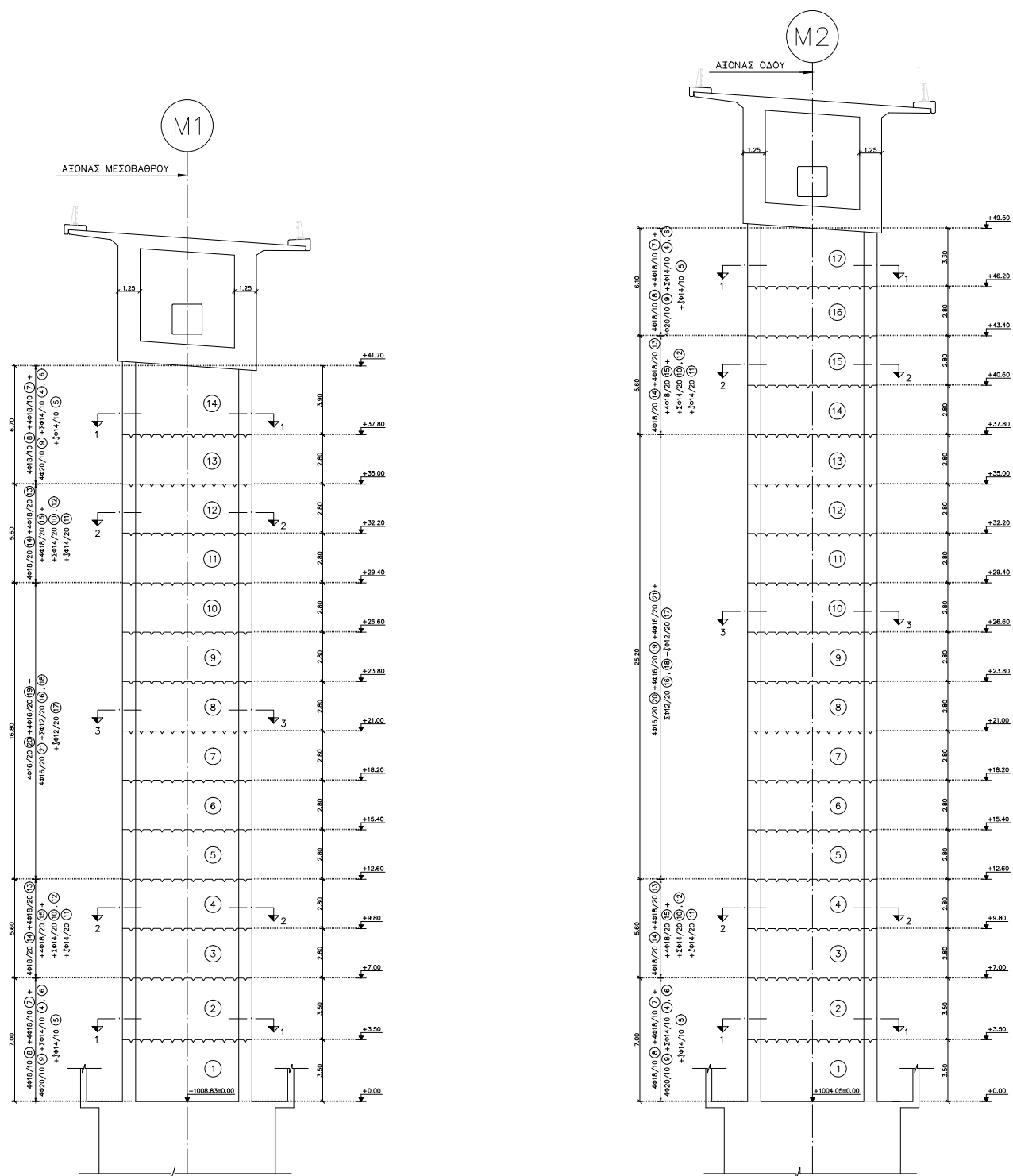


Σχήμα 4.10: Πλήρης όπλιση Διατομής 3.

- Η διατομή 1 εφαρμόζεται στους 4 ακραίους σπονδύλους (1,2,13,14) του Μεσοβάθρου M1 (ύψη 0.00m μέχρι 7.00m & 35.00m μέχρι 41.70m) και στους 4 ακραίους σπονδύλους (1,2,16,17) του Μεσοβάθρου M2 (ύψη 0.00m μέχρι 7.00m & 43.40m μέχρι 49.50m).
- Η διατομή 2 εφαρμόζεται στους 4 επόμενους εσωτερικούς σπονδύλους (3,4,11,12) του Μεσοβάθρου M1 (ύψη 7.00m μέχρι 12.60m & 29.40m μέχρι 35.00m) και στους 4 εσωτερικούς σπονδύλους (3,4,14,15) του Μεσοβάθρου M2 (ύψη 7.00m μέχρι 12.60m & 37.80m μέχρι 43.40m).
- Η διατομή 3 εφαρμόζεται στους 7 εσωτερικούς σπονδύλους (5-10) του Μεσοβάθρου M1 (ύψη 12.60m μέχρι 29.40m) και στους 9 εσωτερικούς σπονδύλους (5-13) του Μεσοβάθρου M2 (ύψη 12.60m μέχρι 37.80m).

Στο σχήμα 4.11 παρουσιάζονται καθ' ύψος τομές των μεσοβάθρων M1 και M2 όπου διακρίνονται οι σπόνδυλοι κατασκευής και αναγράφονται συγκεντρωτικά οι διαθέσιμοι εγκάρσιοι οπλισμοί σε κάθε θέση. Οι τομές 1-1, 2-2 και 3-3 αναφέρονται στις διατομές 1,2 και 3 αντίστοιχα.

## 4.2. ΜΕΣΟΒΑΘΡΑ

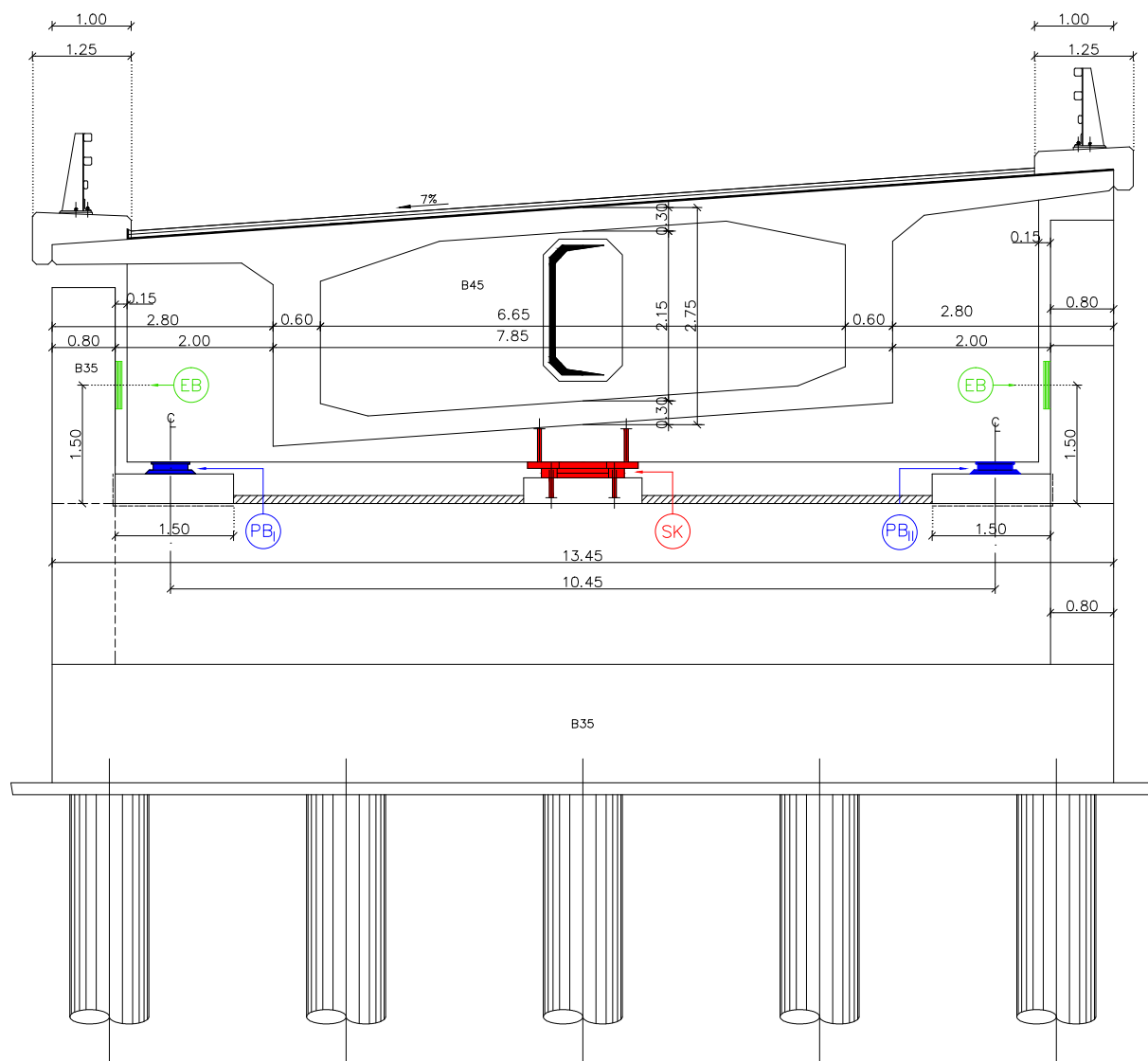


Σχήμα 4.11: Καθ' ύψος τομή των μεσοβάθρων M1-M2. Αριστερά αναγράφονται συγκεντρωτικά οι εγχάρσινοι οπλισμοί σε κάθε σπόνδυλο.

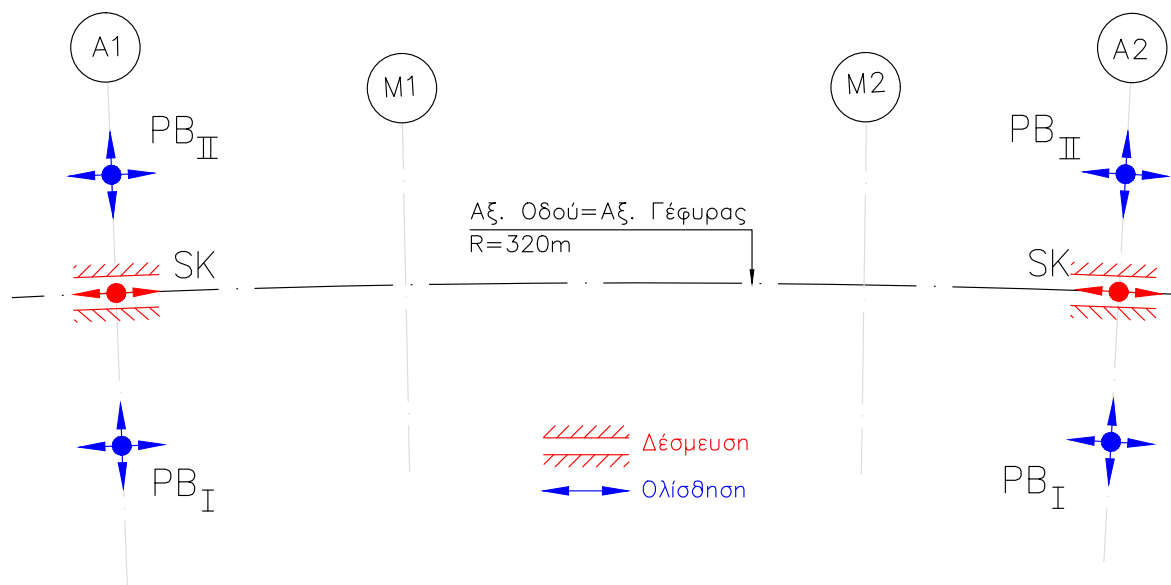
Στις συναρμογές του καταστρώματος με τα μεσόβαθρα M1 - M2 διαμορφώνονται ζεύγη συμπαγών διαδοχίδων από σχυρόδεμα B45 για τη μεταφορά των ανακυκλικών και στρεπτικών εντάσεων από το φορέα στο υπόλοιπο σύστημα.

### 4.3 Ακρόβαθρα

Στα ακρόβαθρα A1 και A2 η στήριξη του καταστρώματος γίνεται επί δύο εφεδράνων εγκιβωτισμένου ελαστικού σημειακού τύπου, ελευθέρως κινητών προς όλες τις διευθύνσεις (Free Sliding Pot-Bearings - PB). Στις θέσεις των ακροβάθρων η κινητότητα του καταστρώματος είναι δεσμευμένη κατά την εγκάρσια διεύθυνση με την παρεμβολή ειδικών μεταλλικών διατμητικών συνδέσμων (Shear Keys -SK), οι οποίοι έχουν σχεδιαστεί ώστε να παραλαμβάνουν και να μεταφέρουν τη δημιουργούμενη ένταση μέχρι τη στάθμη του σεισμού σχεδιασμού ( $q = 3$ ), πέραν από την οποία καθίστανται ανενεργοί. Η εγκάρσια δέσμευση για την περίπτωση μεγάλων σεισμικών διεγέρσεων εξασφαλίζεται από τις ωτίδες των ακροβάθρων. Για την εξομάλυνση τυχόν χροστικών φαινομένων τοποθετούνται εσωτερικά των ωτίδων κατακόρυφα ελαστομεταλλικά εφέδρανα τα οποία λειτουργούν ως προσκροστήρες (Elastometallic Bearings - EB). Μεταξύ ωτίδας και διαδοκίδας στηρίξεως προβλέπεται διάκενο ώστε η ενεργοποίηση των ως άνω σεισμικών συνδέσμων να γίνεται μετά την ανάπτυξη εγκάρσιας μετατόπισης μεγαλύτερης από 10mm (η οποία προϋποθέτει υπέρβαση των ορίων σχεδιασμού του χαλύβδινου διατμητικού συνδέσμου). Ως εγκάρσια ορίζεται η ακτινική διεύθυνση, η κάθετη δηλαδή στην εφραπτομενική, στην περιοχή των ακροβάθρων.



Σχήμα 4.12: Τυπική διατομή ακροβάθρων. Φαίνονται: Τα εφέδρανα εγκιβωτισμένου ελαστικού (Pot Bearings-PB), ο εγκάρσιος περιοριστικός σύνδεσμος (Shear Key-SK), καθώς και οι προσκροστήρες (Elastometallic Bearings-EB).



Σχήμα 4.13: Συνθήκες στήριξης στα ακρόβαθρα. Φαίνεται η ελευθερία μετακίνησης σε όλους τους β.ε. λόγω των εφεδράνων εγκιβωτισμένου ελαστικού (PB), καθώς και η δέσμευση της εγκάρσιας μετακίνησης λόγω της ύπαρξης των περιοριστικών συνδέσμων (SK).

#### 4.4 Θεμελιώσεις

Η θεμελίωση όλων των βάθρων είναι βαθιά. Τα ακρόβαθρα A1 και A2 θεμελιώνονται σε 14 έγχυτους πασσάλους διαμέτρου  $\varnothing 100\text{cm}$  και ελάχιστου μήκους 10m από σκυρόδεμα κατηγορίας B25, ενώ τα μεσόβαθρα θεμελιώνονται σε φρέατα κυκλικής διατομής  $\varnothing 10\text{m}$  και μήκους 15m από σκυρόδεμα κατηγοριών B25 και B35. Το γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής είναι βραχώδες και αποτελείται από σερπεντινωμένους γάββρους με υψηλό βαθμό ετερογένειας.



## Κεφάλαιο 5

# Προσομοίωση της κατασκευής στο OpenSees

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια περιγραφή των βασικών στοιχείων που αφορούν την προσομοίωση της κατασκευής και δίνονται πληροφορίες και χαρακτηριστικά του προσομοιώματος που αφορούν τη στατική δυναμική του συμπεριφορά. Η προσομοίωση πραγματοποιείται στο λογισμικό ανοικτού κώδικα OpenSees (Open System for Earthquake Engineering Simulation), το οποίο διατίθεται από το Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER).

### 5.1 Κύριοι άξονες προσομοιώματος

Δεδομένης της ιδιαίτερης γεωμετρίας της κατασκευής σε κάτοψη (κατάστρωμα καμπύλης χάραξης), οι διευθύνσεις των κυρίων αξόνων του προσομοιώματος δεν είναι προφανείς. Σύμφωνα με την §H.1(1) στο παράρτημα Η του EC8-2, ως διαμήκης θεωρείται η διεύθυνση που ενώνει τα κέντρα βάρους των δύο ακραίων διατομών του φορέα σε κάτοψη, ενώ ως εγκάρσια η κάθετη στην πρώτη.

### 5.2 Κατάστρωμα

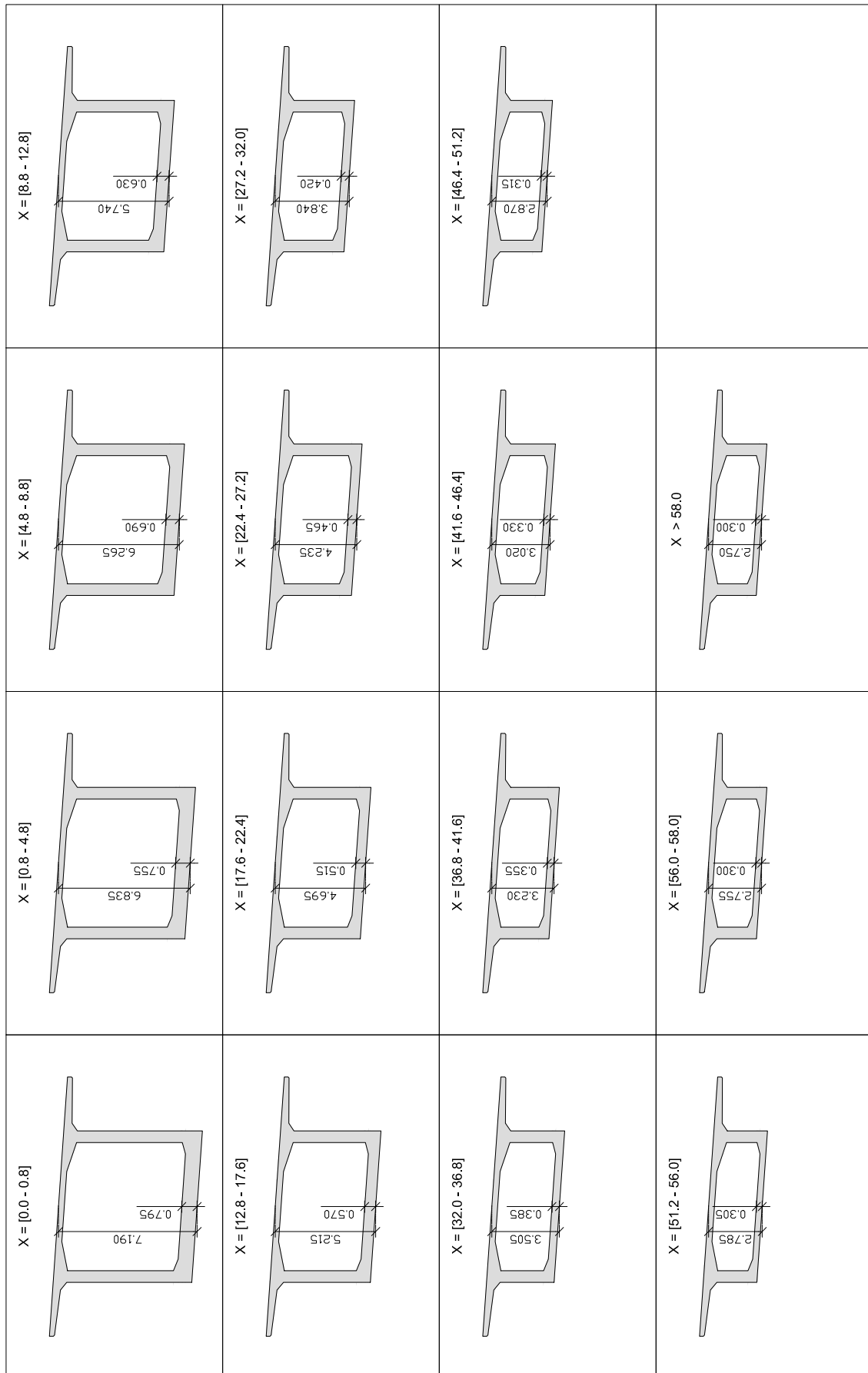
Ο φορέας του καταστρώματος προσομοιώνεται με χρήση ελαστικών πεπερασμένων στοιχείων δοκού-στύλου (Elastic Beam-Column Elements) που διέρχονται από τα κέντρα βάρους των διατομών, αφού από το σχεδιασμό προβλέπεται σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων μόνο στα μεσόβαθρα και η συμπεριφορά του αναμένεται ελαστική.

Η λογική του αντισεισμικού σχεδιασμού των γεφυρών λειτουργεί αντίστροφα από εκείνη που ακολουθείται στα κτίρια, όπου μέσω του ικανοτικού ελέγχου κόμβου επιδιώκεται η δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων στα οριζόντια και όχι στα κατακόρυφα κύρια σεισμικά μέλη. Αυτό συμβαίνει, καθώς ο φορέας του καταστρώματος μιας γέφυρας αποτελεί το φυσικό χώρο διέλευσης των οχημάτων και η γέφυρα θα πρέπει να είναι λειτουργική αμέσως μετά την εξέλιξη του σεισμικού γεγονότος, εντός φυσικά των ορίων της επιτελεστικότητας, ώστε να μη διακόπτεται η επικοινωνία που αποκαθιστάται μεταξύ των περιοχών από την ύπαρξή της.

Η δράση της προεντάσεως στο φορέα του καταστρώματος δεν προσομοιώνεται, αφού αφενός η προένταση επιβάλλεται σε φάσεις και μια ρεαλιστική προσομοίωσή της είναι δυσχερής σε λογισμικά που δεν ειδικεύονται σε προεντεταμένους φορείς, ενώ αφετέρου η δράση προεντάσεως δε συνεισφέρει σημαντικά στη στιβαρότητα της κατασκευής για οριζόντια φορτία, όπως είναι τα σεισμικά.

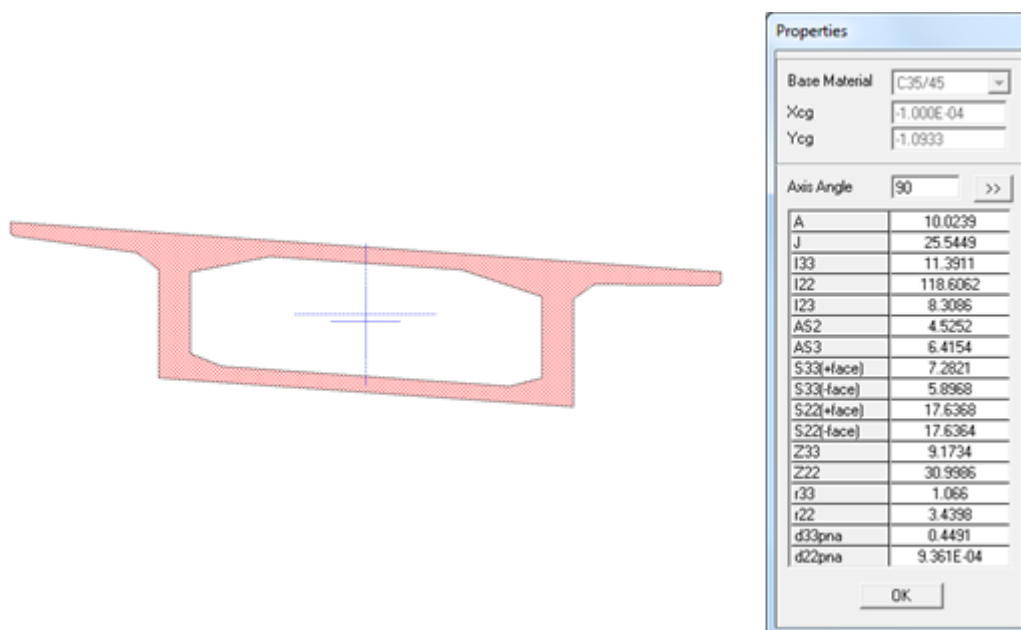
Οι θέσεις των κόμβων του προσομοιώματος επιλέγονται στις θέσεις των φυσικών αρμών διακοπής της σκυροδετήσεως, δηλαδή κάθε στοιχείο έχει τις διαστάσεις ενός σπονδύλου του καταστρώματος. Ειδικά τοποθετούνται πρόσθετοι κόμβοι στις κλείδες του μεσαίου και των πλευρικών ανοιγμάτων. Η μεταβλητή διατομή του καταστρώματος προσεγγίζεται με πρισματικές διατομές σταθερών διαστάσεων ανά στοιχείο. Στα στοιχεία αυτά δίνεται η πλήρη γεωμετρική

καμπτική και διατμητική στιβαρότητα των μη ρηγματωμένων διατομών. Ο αριθμός των στοιχείων ( $N=70$  στοιχεία συνολικά) θεωρείται επαρκής για τη ρεαλιστική περιγραφή της μεταβολής των διαστάσεων του καταστρώματος κατά μήκος της χάραξης και της καλής κατανομής των μαζών για τον ορθό υπολογισμό των ιδιομορφικών μεγεθών. Στο σχήμα 5.1 παρουσιάζονται οι ισοδύναμες πρισματικές διατομές που δημιουργούνται για να προσεγγίσουν τη μεταβολή των διαστάσεων του καταστρώματος.



Σχήμα 5.1: Ισοδύναμες πρισματικές διατομές καταστρώματος που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση.

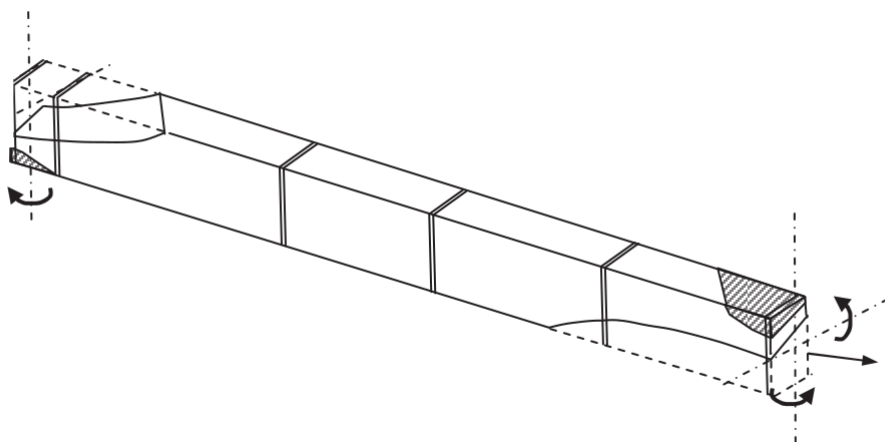
Δεδομένης της περίπλοκης γεωμετρίας των διατομών του καταστρώματος, ο αναλυτικός υπολογισμός των γεωμετρικών χαρακτηριστικών τους που θα πρέπει να εισαχθούν στο προσομοίωμα δε μπορεί να γίνει αναλυτικά. Μεγέθη όπως είναι το εμβαδό ή οι ροπές αδράνειας των διατομών μπορούν να υπολογιστούν εύκολα με χρήση ενός σχεδιαστικού προγράμματος (CAD), όμως το ίδιο δε μπορεί να γίνει και για τη σταθερά στρέψης. Έτσι, για τον υπολογισμό των γεωμετρικών χαρακτηριστικών κάθε διατομής επιλέγεται η χρήση ενός λογισμικού ανάλυσης διατομών. Ένα εύχρηστο τέτοιο λογισμικό αποτελεί η υπορουτίνα *Section Designer* του λογισμικού SAP2000v.15.2.1 (Computers and Structures Inc. 1976), η οποία τελικά και χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του καταστρώματος.



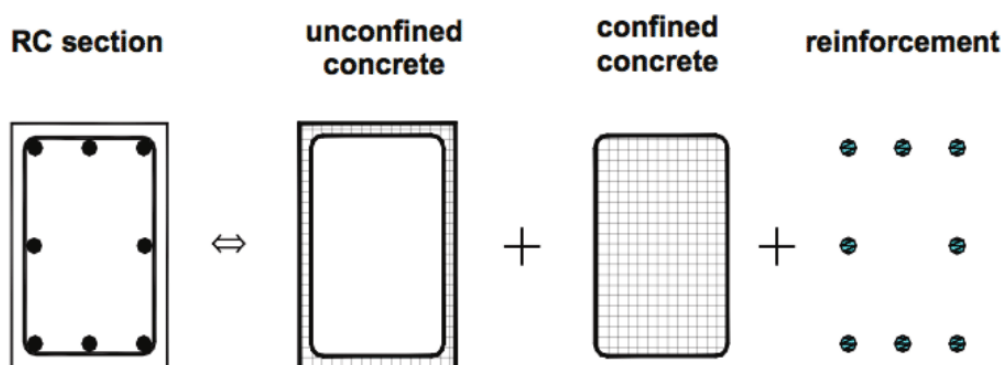
Σχήμα 5.2: Προσομοίωση των διατομών καταστρώματος στο λογισμικό ανάλυσης διατομών *Section Designer* (CSI, Inc).

### 5.3 Μεσόβαθρα

Τα μεσόβαθρα προσομοιώνονται με ραβδωτά πεπερασμένα στοιχεία κατανομημένης βλάβης βασισμένα στην ευκαμψία (Στοιχεία Δυνάμεων – Force-Based Beam-Column Elements). Οι διατομές των μεσοβάθρων διακριτοποιούνται σε ίνες, κάθε μια από τις οποίες συμπεριφέρεται με το μονοαξονικό νόμο τάσεων-παραμορφώσεων του εκάστοτε υλικού και οι διατομές ινών (Fiber Sections) αντιστοιχίζονται στα στοιχεία του μεσοβάθρου.



Σχήμα 5.3: Στοιχείο κατανεμημένης πλαστικότητας (Distributed Plasticity Element).



Σχήμα 5.4: Διατομή Ινών (Fiber Section). Διακρίνονται οι ίνες σκυροδέματος της επικάλυψης και του περισιγμένου πυρήνα, καθώς και οι σημειακές ίνες χάλυβα.

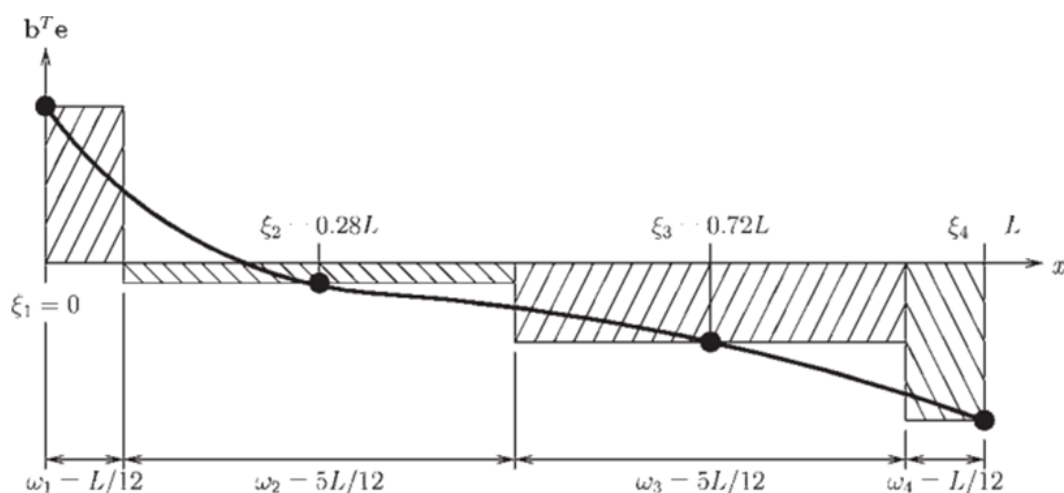
Η προσομοίωση της ανελαστικής συμπεριφοράς των μεσοβάθρων με τη θεώρηση κατανεμημένης πλαστικότητας θεωρείται εν γένει πιο κοντά στο φυσικό πρόβλημα, αφού η πλαστικοποίηση επέρχεται σταδιακά καθ' ύψος των διατομών και κατά μήκος των στοιχείων, ενώ λαμβάνεται υπόψη η αλληλεπίδραση αξονικής δύναμης και διαξονικής κάμψης σε κάθε βήμα της ανάλυσης. Ακόμα, το μητρώο στιβαρότητας σε επίπεδο αρχικά διατομής, έπειτα μέλους και τελικά κατασκευής, ενημερώνεται σε κάθε βήμα της ανάλυσης από τις επιμέρους επαπτομενικές στιβαρότητες των υλικών και δεν γίνονται παραδοχές που αφορούν τις ενεργές δυσκαμψίες σε κάποιο θεωρητικό σημείο διαρροής, όπως στα προσομοιώματα συγκεντρωμένης πλαστικότητας.

Τα στοιχεία δυνάμεων αποτελούν τον πλέον σύγχρονο τύπο στοιχείων κατανεμημένης βλάβης, αφού μπορούν να περιγράψουν τη μη γραμμική κατανομή της καμπυλότητας κατά μήκος του στοιχείου και ο υπολογισμός των εντατικών μεγεθών προκύπτει από την ακριβή ισορροπία με τις εξωτερικές δράσεις και όχι από αντίστροφο υπολογισμό τους από τα παραμορφωσιακά μεγέθη, όπως γίνεται στα στοιχεία που βασίζονται στη στιβαρότητα (Στοιχεία Μετατοπίσεων - Displacement-Based Beam-Column Elements). Ακόμα, η προσομοίωση με στοιχεία δυνάμεων δεν περιέχει σφάλμα λόγω διακριτοποίησης, αφού καλύτερη ακρίβεια μπορεί να επιτευχθεί με πύκνωση των σημείων ολοκλήρωσης και όχι με πύκνωση των μελών, κάτι που δεν ισχύει για τα στοιχεία μετατοπίσεων.

Παρ' όλα αυτά, όπως όλα τα στοιχεία κατανεμημένης βλάβης, τα στοιχεία δυνάμεων δεν ενσωματώνουν τη διάτμηση ή φαινομενολογικές σχέσεις που περιγράφουν την εξόλκευση των οπλισμών και τις ανελαστικές διατμητικές παραμορφώσεις κατά το σχηματισμό της πλαστικής άρθρωσης, όπως έχουν υιοθετηθεί στους σύγχρονους κανονισμούς (EC8-3, ΚΑΝ.ΕΠΕ.). Με τα υπάρχοντα υπολογιστικά μέσα, τα φαινόμενα αυτά για προσομοιώσεις με ραβδωτά πεπερασμένα

στοιχεία μπορούν να περιγραφούν μόνο με τη θεώρηση συγκεντρωμένης πλαστικότητας.

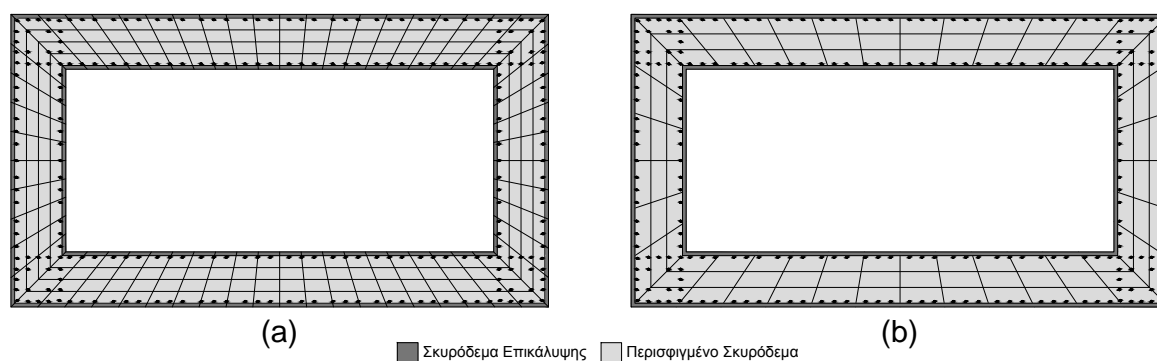
Κατά μήκος των στοιχείων επιλέγεται ο τύπος μαθηματικής ολοκλήρωσης Gauss-Lobatto. Για  $N_p$  σημεία μαθηματικής ολοκλήρωσης κατά μήκος του στοιχείου, η Gauss-Lobatto έχει ακρίβεια  $2N_p - 3$ , δηλαδή δύο τάξεις κάτω από τη μαθηματική ολοκλήρωση Gauss-Legendre, με χρήση της οποίας επιτυγχάνεται ακρίβεια  $2N_p - 1$ . Το μεγάλο προτέρημα της μαθηματικής ολοκλήρωσης Gauss-Lobatto είναι η θεώρηση σημείων ολοκλήρωσης στα άκρα του στοιχείου, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα ύπαρξης σημείων μαθηματικής ολοκλήρωσης στις ακραίες διατομές, όπου τα εντατικά μεγέθη εμφανίζουν τις μέγιστες τιμές τους. Όπως αναφέρουν και οι Scott and Fenves (2006), απαιτούνται τουλάχιστον τρία σημεία ολοκλήρωσης Gauss-Lobatto για την ακριβή περιγραφή μιας γραμμικής κατανομής καμπυλοτήτων κατά μήκος ενός μέλους με ένα στοιχείο δυνάμεων ανά μέλος, ενώ για την περιγραφή της μη-γραμμικής συμπεριφοράς των υλικών σε ένα στοιχείο δυνάμεων οι Neunhofer and Filippou (1997) χρησιμοποιούν τυπικά τέσσερα με έξι σημεία ολοκλήρωσης Gauss-Lobatto και ένα στοιχείο ανά μέλος.



Σχήμα 5.5: Εφαρμογή τεσσάρων σημείων ολοκλήρωσης Gauss-Lobatto σε στοιχείο δυνάμεων (Scott and Fenves, 2006).

Τα μεσόβαθρα της γέφυρας M1 - M2 έχουν κοίλη ορθογωνική διατομή με σταθερά γεωμετρικά χαρακτηριστικά καθ' ύψος και σε κάθε μεσόβαθρο διαμορφώνονται τρεις διαφορετικές διατάξεις των εγκάρσιων οπλισμών με πύκνωση προς τα άκρα, ενώ οι διαμήκεις οπλισμοί παραμένουν σταθεροί. Το πλήθος των στοιχείων που επιλέγονται για την προσομοίωση των μεσοβάθρων θα πρέπει να είναι επαρκές για να περιγράψει τις μεταβολές των χαρακτηριστικών καθ' ύψος κάθε μεσοβάθρου. Έτσι, κάθε μεσόβαθρο θα μπορούσε να προσομοιωθεί με χρήση 5 στοιχείων. Όμως, για την καλύτερη κατανομή μαζών καθ' ύψος των βάθρων και με στόχο τη διερεύνηση συμμετοχής ανωτέρων ιδιομορφών, επιλέγονται 14 στοιχεία στο M1 και 17 στοιχεία στο M2, θεωρώντας τους κόμβους του προσομοιώματος στις φυσικές θέσεις των αρμών διακοπής της σκυροδετήσεως. Δηλαδή, κάθε στοιχείο έχει τις διαστάσεις ενός σπονδύλου κατασκευής.

Στα οκτώ ακραία στοιχεία κάθε μεσοβάθρου (τέσσερα στον πόδα και τέσσερα στην κεφαλή) η προσομοίωση γίνεται με  $N_p = 5$  σημεία ολοκλήρωσης και τη διατομή ινών (a) που φαίνεται στο σχήμα 5.6, ενώ στα εσωτερικά στοιχεία προς το μέσο κάθε μεσοβάθρου η προσομοίωση γίνεται με  $N_p = 3$  σημεία ολοκλήρωσης και τη διατομή ινών (b). Οι διαμήκεις οπλισμοί προσομοιώνονται με σημειακές ίνες στις ακριβείς τους θέσεις.



Σχήμα 5.6: Διατομές ιών μεσοβάθρων M1-M2. (a) Διάταξη ιών στις Διατομές 1 και 2. (b) Διάταξη ιών στις Διατομές 3.

Δηλαδή, προς τα άκρα των μεσοβάθρων όπου αναμένεται η εκδήλωση των ανελαστικών παραμορφώσεων γίνεται πύκνωση τόσο των σημείων μαθηματικής ολοκλήρωσης, όσο και του αριθμού των ιών στις διατομές. Όσον αφορά τα στοιχεία που φέρουν τη διατομή (a), αυτά χωρίζονται σε δύο ομάδες όπου οι διατομές έχουν τον ίδιο αριθμό ιών, αλλά το περισφιγμένο σκυρόδεμα έχει άλλα μηχανικά χαρακτηριστικά, όπως περιγράφεται στην επόμενη ενότητα.

Στις αναλύσεις λαμβάνονται υπόψη τα φαινόμενα δευτέρας τάξης (P-Delta effects). Ακόμα, δεδομένου του τύπου της θεμελίωσης και των γεωλογικών συνθηκών τα μεσόβαθρα θεωρούνται πακτωμένα στη βάση τους, δεν υπάρχει δηλαδή αλληλεπίδραση εδάφους κατασκευής.

### 5.3.1 Μηχανικά χαρακτηριστικά υλικών

Για την αποτίμηση της ανελαστικής συμπεριφοράς της κατασκευής γίνεται χρήση των μέσων τιμών αντοχής των υλικών ως μια εκτίμηση των πραγματικών αντοχών, δεδομένου ότι οι ονομαστικές τιμές διαρροής και αστοχίας για τα διάφορα υλικά δίνονται για ποσοστημόρια αστοχίας 95% και 90% αντίστοιχα.

Η συμπεριφορά του χάλυβα και του σκυροδέματος δίνεται στο λογισμικό μέσω μονοαξονικών νόμων τάσης-παραμόρφωσης (uniaxialMaterials), που περιγράφουν τη μονοτονική και την ανακυκλική συμπεριφορά κάθε υλικού.

#### Χάλυβας

Το σύνολο των μη προεντεταμένων οπλισμών της κατασκευής αποτελείται από χάλυβα κατηγορίας S500s, ο οποίος είναι νευροχάλυβα υψηλής συνάφειας και ολκιμότητας με ονομαστική αντοχή  $f_{y,k} = 500MPa$ . Τα ελάχιστα μηχανικά χαρακτηριστικά του S500s ορίζονται στο καταργηθέν πρότυπο ΕΛΟΤ 971 που αφορά τη συμπεριφορά των συγκολλησίμων χαλύβων S400s και S500s, όπου η ελάχιστη ονομαστική εφελκυστική αντοχή του S500s δίνεται ίση με  $f_{t,k} = 550MPa$ , ενώ η μέγιστη μήκυνση μετά τη θραύση θα πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με:  $\epsilon_5 = 120\%$ . Σημειώνεται ότι η παραμόρφωση  $\epsilon_5$  είναι η μέγιστη πλαστική παραμόρφωση του υλικού μετά τη θραύση και όχι η παραμόρφωση στη μέγιστη τάση  $\epsilon_u$ , όπως ορίζεται στα ισχύοντα πρότυπα EC2-1, ΕΛΟΤ 1421-2, ΕΛΟΤ 1421-3, ΕΛΟΤ EN 10080 και ΚΤΧ 2008, όπου για το χάλυβα υψηλής αντοχής και ολκιμότητας B500C ορίζεται η ελάχιστη τιμή  $\epsilon_u = 75\%$ .

Όπως ορίζεται στο Παράρτημα Ε του EC8-2, όταν δεν υπάρχουν συγκεκριμένες πληροφορίες για τον ειδικό χάλυβα που θα χρησιμοποιηθεί στο έργο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ακόλουθες εκτιμήσεις για τις μέσες μηχανικές ιδιότητες του υλικού:

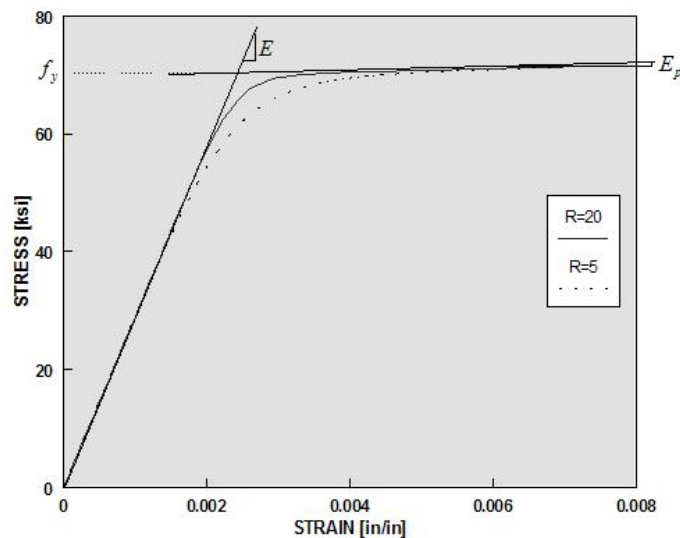
$$\frac{f_{ym}}{f_{yk}} = 1.15 \quad (5.1)$$

$$\frac{f_{tm}}{f_{tk}} = 1.20 \quad (5.2)$$

Κατά συνέπεια, προκύπτουν:  $f_{ym} = 575MPa$  και  $f_{tm} = 660MPa$ .

Αξίζει να σημειωθεί ότι το πρότυπο ΕΛΟΤ 971, όπως και το σύγχρονό του ΕΛΟΤ 956 που αφορά τους μη συγκολλησίμους χάλυβες S200, S400 και S500 αντικαταστάθηκαν από τα πρότυπα ΕΛΟΤ 1421-2, ΕΛΟΤ 1421-3 και ΕΛΟΤ EN10080, όπου καταργήθηκε η χρήση μη συγκολλησίμων χάλυβων και εισήχθησαν οι κατηγορίες νευροχάλυβα υψηλής συνάφειας B500A και B500C. Η εφαρμογή των τελευταίων στην Ελληνική αγορά θεσμοθετήθηκε μετά τη μελέτη της συγκεκριμένης γέφυρας. Πλέον, ο B500C αποτελεί το μοναδικό νευροχάλυβα υψηλής συνάφειας, αντοχής και παραμορφωσιμότητας που ικανοποιεί τις αυξημένες απαιτήσεις του ισχύοντος αντισεισμικού κανονισμού.

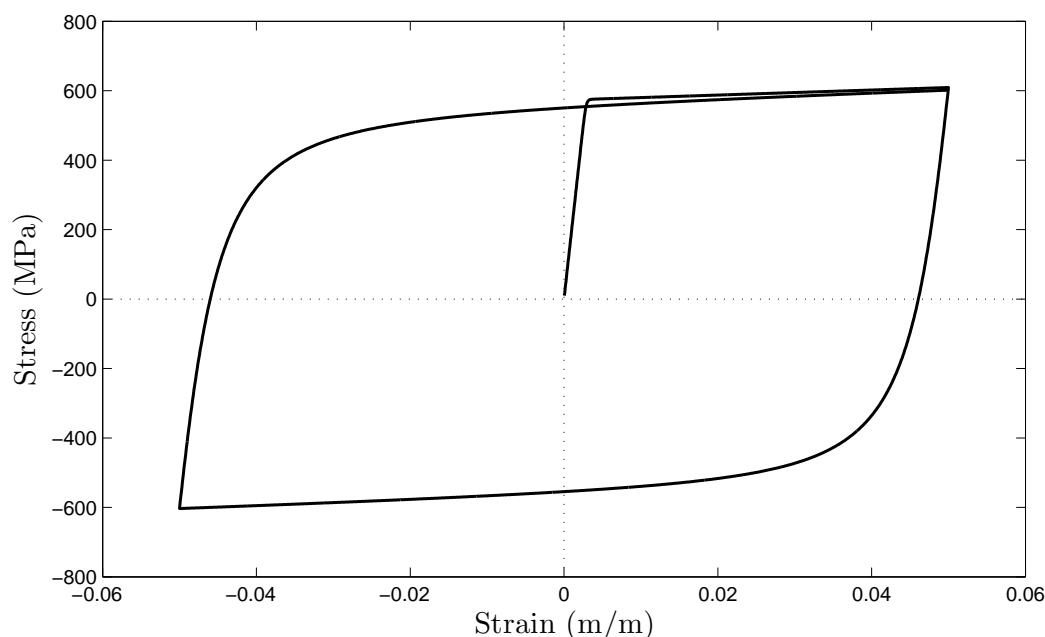
Η συμπεριφορά του χάλυβα οπλισμού προσομοιώνεται στο λογισμικό με χρήση του προσομοιώματος Steel02, το οποίο αφορά το προσομοίωμα που έχει προταθεί από τους Giuffrè-Menegotto-Pinto (1970). Το εν λόγω προσομοίωμα θεωρεί εξομαλυμένη συμπεριφορά κοντά στην περιοχή της διαρροής η οποία υπολογίζεται μέσω τριών παραμέτρων R0, cR1, cR2. Λαμβάνονται οι τιμές R0=20, cR1=0.925 και cR2=0.15. Η κράτυνση του χάλυβα δίνεται ως η κλίση μεταξύ των σημείων διαρροής και αστοχίας, ενώ δε θεωρείται ισοτροπική κράτυνση.



Σχήμα 5.7: Μοτονομική συμπεριφορά του προσομοιώματος Steel02 (OpenSeeWiki).

Στο σχήμα 5.8 φαίνεται η συμπεριφορά του νόμου τάσεων-παραμορφώσεων που δημιουργείται για το χάλυβα S500s με χρήση του προσομοιώματος Steel02 για ένα πλήρη κύκλο φόρτισης – αποφόρτισης – επαναφόρτισης.





Σχήμα 5.8: Ανακυκλική συμπεριφορά του χάλυβα S500s με χρήση του προσομοιώματος Steel02.

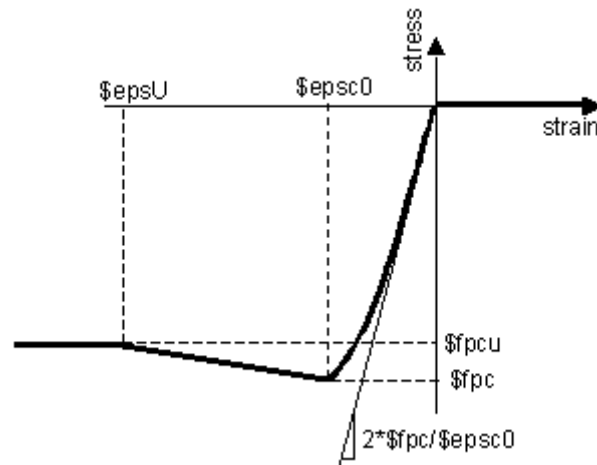
### Σκυρόδεμα

**Μη-περισφιγμένο σκυρόδεμα** Το μη περισφιγμένο σκυρόδεμα αφορά το σκυρόδεμα της επικάλυψης εσωτερικά και εξωτερικά του περισφιγμένου πυρήνα κάθε διατομής. Τα μεσόβρατρα έχουν κατασκευαστεί από σκυρόδεμα κατηγορίας B45. Η συγκεκριμένη κατηγορία σκυροδέματος είναι συμβατή με τις διατάξεις του DIN1045 με τον οποίο έγινε ο σχεδιασμός των διατομών οπλισμένου σκυροδέματος της κατασκευής και αφορά την αντοχή κυβικού δοκιμίου διαστάσεων 200mm x 200mm x 200mm με ονομαστική θλιπτική αντοχή 45 MPa. Το B45 δεν αντιστοιχίζεται ακριβώς σε κάποια από τις κατηγορίες αντοχής που προβλέπονται από τον EC2, αφού στον τελευταίο προβλέπεται αντοχή κυβικού δοκιμίου διαστάσεων 150mm x 150 mm x 150 mm. Παρ' όλα αυτά, δεδομένης της αβεβαιότητας γύρω από την πραγματική θλιπτική αντοχή, υιοθετείται η κατηγορία σκυροδέματος C35/45 με βάση τα ισχύοντα Ευρωπαϊκά πρότυπα, αγνοώντας τα φαινόμενα κλίμακας. Ως μια εκτίμηση της πραγματικής αντοχής του υλικού γίνεται χρήση της μέσης θλιπτικής αντοχής:

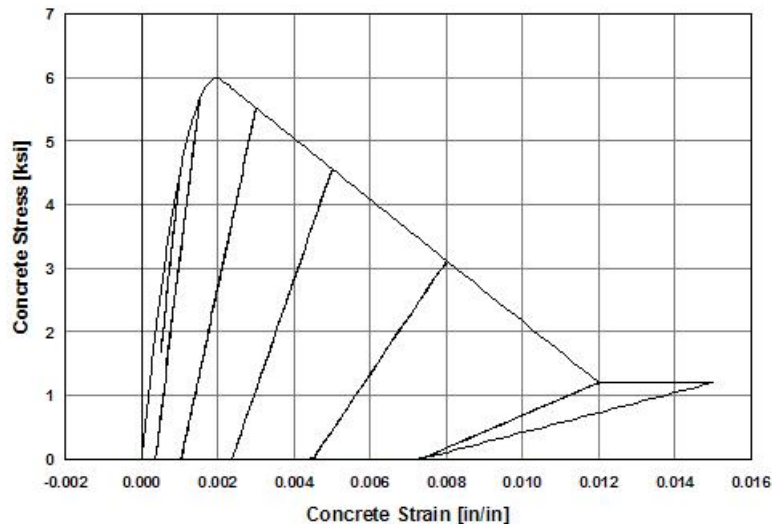
$$f_{cm} = f_{ck} + 8MPa = 35MPa + 8MPa = 43MPa \quad (5.3)$$

Στην §3.1.5 του EC2-1 προτείνεται ένα προσομοίωμα για τη σχέση τάσεων-παραμορφώσεων του σκυροδέματος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μη-γραμμικές αναλύσεις. Το προσομοίωμα αυτό προβλέπει τιμές τάσεων μέχρι και την παραμόρφωση αστοχίας  $\epsilon_{cu,1} = -3.5\%$  όπως δίνεται στον πίνακα 3.1 του αντίστοιχου κεφαλαίου του κανονισμού, χωρίς να προδιαγράφει τη συμπεριφορά μετά την υπέρβαση της τάσης αυτής.

Το μη περισφιγμένο σκυρόδεμα προσομοιώνεται στο λογισμικό με χρήση του προσομοιώματος Concrete01. Η μονοτονική συμπεριφορά σε θλίψη του σκυροδέματος με βάση το Concrete01 αφορά το προσομοίωμα που έχει προταθεί από τους Kent-Park (1971), ενσωματώνοντας τις τροποποιήσεις που προτάθηκαν από τους Scott et al. (1980). Για την αποφόρτιση και επαναφόρτιση γίνεται χρήση της σχέσης που έχει προταθεί από τους Karsan and Jirsa (1969) και συσχετίζει τις παραμορφώσεις κατά μήκος της περιβάλλουσας καμπύλης με τις παραμορφώσεις κατά την ολοκλήρωση της αποφόρτισης. Κάνοντας χρήση του προσομοιώματος Concrete01 η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος αγνοείται.



Σχήμα 5.9: Προσομοίωμα Concrete01 – Μονοτονική Συμπεριφορά (OpenSeesWiki).



Σχήμα 5.10: Προσομοίωμα Concrete01 – Ανακυκλική Συμπεριφορά (OpenSeesWiki).

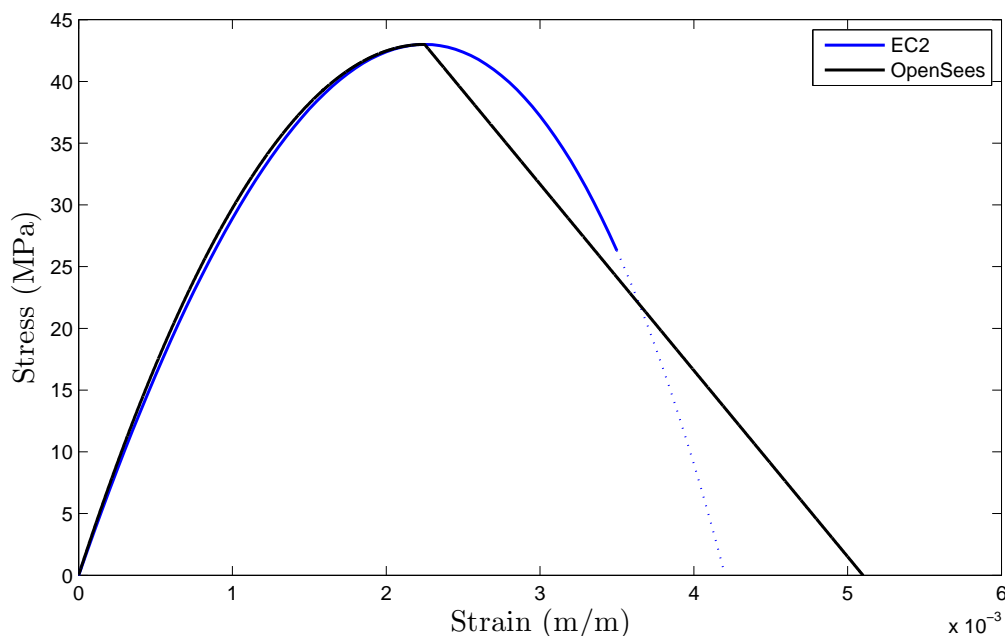
Στο προσομοίωμα δίνονται η μέση μέγιστη θλιπτική αντοχή και η αντίστοιχη παραμόρφωση, όπως προτείνονται στον πίνακα 3.1 του EC2-1. Για το σημείο όμως της αστοχίας δίνεται μηδενική αντοχή σε παραμόρφωση  $\epsilon'_{cu,1} = -5.1\%$  ώστε να προσομοιωθεί η αποφλοίωση του σκυροδέματος της επικάλυψης.

Η τιμή αυτή για την παραμόρφωση αστοχίας αν και φαίνεται μακρινή από το κανονιστικό όριο του 3.5% υπολογίζεται παρεμβάλλοντας μια ευθεία ελαχίστων τετραγώνων στον πτωτικό κλάδο του διαγράμματος τάσεων παραμορφώσεων του EC2 και λαμβάνεται ως μια μέση ενδεικτική τιμή, ενώ δεν επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα, αφού

- οι ίνες του μη περισφιγμένου σκυροδέματος αφορούν ένα πολύ μικρό ποσοστό του συνολικού αριθμού ινών κάθε διατομής,
- στις μεγάλες παραμορφώσεις μετά το 3.5% οι τιμές της τάσης του μη περισφιγμένου σκυροδέματος είναι πολύ μικρές και
- η αποφλοίωσή του σκυροδέματος επικάλυψης παρατηρείται πολύ πριν την εκδήλωση σημαντικών ανελαστικών παραμορφώσεων στο σκυρόδεμα του πυρήνα ή στους οπλισμούς. Έτσι, δε γίνεται

υπερεκτίμηση της δυνατότητας παραμόρφωσης των διατομών και δεν εισάγεται σφάλμα στα αποτελέσματα.

Στο σχήμα 5.11 φαίνεται το προσομοίωμα του μη περισφιγμένου σκυροδέματος που προτείνεται από τον EC2-1 για μη-γραμμικές αναλύσεις και το προσομοίωμα που δημιουργείται με χρήση του Concrete01.



Σχήμα 5.11: Προσομοίωμα μη-περισφιγμένου σκυροδέματος EC2-1 και προσομοίωση με χρήση του Concrete01.

**Περισφιγμένο σκυρόδεμα** Τα μεσόβαθρα της γέφυρας διαθέτουν σημαντικά ποσοστά εγκάρσιων οπλισμών. Συνεπώς, δε θα μπορούσε να αμεληθεί η παροχή περισφιγξης στο σκυρόδεμα που περιέχεται εντός των κλειστών, καλά αγκυρωμένων συνδετήρων.

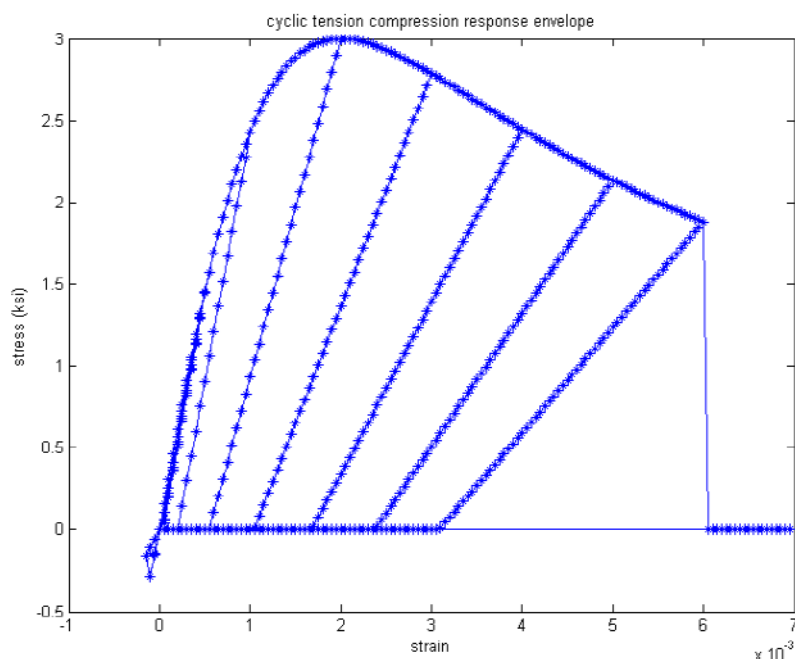
Για τον υπολογισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών του περισφιγμένου σκυροδέματος υιοθετείται το προσομοίωμα των Mander et al (1998), όπως αυτό προτείνεται από τον EC8-2. Το προσομοίωμα που προτείνεται στον EC8-2 εμπεριέχει κάποιες απλοποιήσεις σε σχέση με το αρχικό προσομοίωμα των Mander et al (1988) όσον αφορά τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας του περισφιγμένου υλικού, του συντελεστή αποδοτικότητας και των απωλειών της περισφιγξέως, οι οποίες όμως δημιουργούν μικρές διαφορές που εμπεριέχονται εντός του στατιστικού σφάλματος του προσομοιώματος. Ακόμα, για τον υπολογισμό της παραμόρφωσης αστοχίας του περισφιγμένου σκυροδέματος στον EC8-2 προτείνεται η εφαρμογή της απλοποιημένης σχέσης των Pauley and Priestley (1992):

$$\epsilon_{cu} = 0.004 + \frac{1.4\rho_s f_{ym} \epsilon_{su}}{f_{cm,c}} \quad (5.4)$$

αντί της περίπλοκης διαδικασίας που προτάθηκε από τους Mander et al (1984) και εφαρμόστηκε στο προσομοίωμα των Mander et al (1988), όπου η παραμόρφωση αστοχίας υπολογίζεται από εξίσωση της μέγιστης ενέργειας παραμόρφωσης του οπλισμού περισφιγξέως κατ' όγκο του περισφιγμένου σκυροδέματος με το εμβαδό που περιέχεται ανάμεσα στις καμπύλες περισφιγμένου και μη περισφιγμένου σκυροδέματος, μέχρι την αστοχία του πρώτου οπλισμού περισφιγξέως. Τα όρια του περισφιγμένου πυρήνα θεωρούνται στα κέντρα βάρους των περιμετρικών συνδετήρων.

Η συμπεριφορά του περισφιγμένου σκυροδέματος προσομοιώνεται στο λογισμικό με χρήση του προσομοιώματος Concrete04. Το προσομοίωμα Concrete04 αφορά το μονοτονικό νόμο τάσεων

παραμορφώσεων που προτάθηκε από τον Popovics (1973) και υιοθετήθηκε από τους Mander et al (1988). Για την αποφόρτιση και επαναφόρτιση γίνεται χρήση της σχέσης που έχει προταθεί από τους Karsan and Jirsa (1969). Ενώ το συγκεκριμένο προσομοίωμα δίνει τη δυνατότητα ορισμού της εφελκυστικής αντοχής του υλικού, αυτή αγνοείται, αφού εντοπίστηκαν αδυναμίες σύγκλισης κατά τις στατικές και δυναμικές μη-γραμμικές αναλύσεις.



Σχήμα 5.12: Ανακυκλική συμπεριφορά του προσομοιώματος Concrete04 και μονοτονική περιβάλλουσα (OpenSeesWiki).

Το προσομοίωμα Concrete04 μετά την υπέρβαση της μέγιστης θλιπτικής παραμόρφωσης μηδενίζει την αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος ακαριαία. Οι Mander et al (1988) υπολόγισαν τη μέγιστη θλιπτική παραμόρφωση του περισφιγμένου σκυροδέματος για την αστοχία του πρώτου οπλισμού περίσφιγξης. Έτσι, η θεώρηση της ακαριαίας πτώσης αντοχής φαίνεται ρεαλιστική. Παρ' όλα αυτά, για την ευστάθεια σύγκλισης των μη-γραμμικών αλγορίθμων επίλυσης κατά τις στατικές και δυναμικές αναλύσεις δίνεται ένα περιθώριο παραμορφωσιμότητας, ώστε οι τάσεις να μειώνονται με πιο ομαλό τρόπο.

Το περισφιγμένο σκυρόδεμα αντιμετωπίζεται στις αναλύσεις με ραβδωτά πεπερασμένα στοιχεία κάνοντας χρήση φαινομενολογικών προσομοιωμάτων. Γίνεται δηλαδή η θεώρηση ότι ο περισφιγμένος πυρήνας αποτελείται από ένα υλικό άλλο από αυτό της επικάλυψης, το οποίο έχει βελτιωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά σε σχέση με το μη περισφιγμένο σκυρόδεμα και τα νέα αυτά χαρακτηριστικά υπολογίζονται με χρήση κάποιας ημιεμπειρικής φόρμουλας που βασίζεται σε πειραματικά δεδομένα.

Τα πιο διαδεδομένα προσομοιώματα περίσφιγξης, όπως είναι αυτά των Tassios et al (1991) ή των Mander et al (1988) αναφέρονται σε συμπαγείς διατομές, ορθογωνικού ή κυκλικού σχήματος. Η περίσφιγξη κοίλων διατομών από οπλισμένο σκυρόδεμα έχει αποτελέσει αντικείμενο εκτεταμένης έρευνας (Mander, 1983 – Papanikolaou and Kappos, 2005 & 2009 - Liang et al, 2015), χωρίς όμως να έχει δοθεί μέχρι τώρα κάποιος καταστατικός νόμος που να έχει γνωρίσει την αποδοχή της επιστημονικής κοινότητας ή της κοινής πρακτικής.

Έτσι, η συμπεριφορά του περισφιγμένου σκυροδέματος προσεγγίζεται με παραδοχές που βασίζονται στο μηχανισμό που ενεργοποιείται η παθητική περίσφιγξη λόγω της ύπαρξης κλειστών, καλά αγκυρωμένων συνδετήρων.

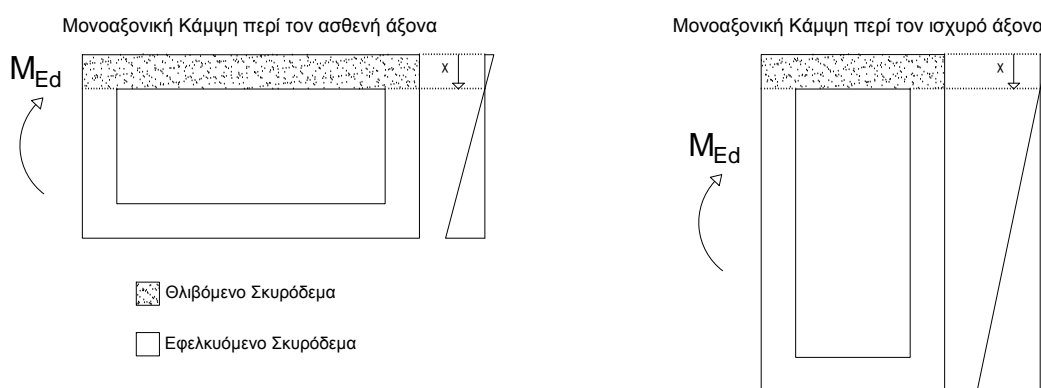
**Μηχανισμός ενεργοποίησης της παθητικής περισφιγξης** Όταν ένα τμήμα της διατομής θλίβεται, λόγω φαινομένου Poisson τείνει να διογκωθεί. Η διογκωση αυτή παρεμποδίζεται από τους εγκάρσιους οπλισμούς και το εφελκυσμένο τμήμα της διατομής, αν η διατομή δε βρίσκεται στο σύνολό της σε θλίψη.

Μέσω των καταναγκασμών αυτών η πλευρική διογκωση του σκυροδέματος παρεμποδίζεται παρέχοντας στο θλιβόμενο αυτό τμήμα της διατομής πλευρικές τάσεις, παρουσία των οποίων το σκυρόδεμα του πυρήνα βρίσκεται σε τριαξονική θλίψη. Λόγω της τριαξονικής καταπόνησης το σκυρόδεμα εμφανίζει μεγαλύτερη αντοχή και παραμορφωσιμότητα, δίνοντας στα μέλη αυξημένες δυνατότητες τοπικής πλαστιμότητας και στις κατασκευές αυξημένες δυνατότητες γενικής πλαστιμότητας.

Σύμφωνα με τον αντισεισμικό κανονισμό (EC8-1, EC8-2 και EC8-3) τα χαρακτηριστικά του περισφιγμένου σκυροδέματος υπολογίζονται βάσει της παραδοχής ότι θλίβεται ολόκληρη η διατομή. Αυτό φαίνεται από τις φόρμουλες υπολογισμού της παρεχόμενης περισφιγξης, όπου λαμβάνεται ως περισφιγμένο το σύνολο της γεωμετρικής διατομής που περιέχεται εντός των κλειστών συνδετήρων, από το οποίο αφαιρούνται οι παραβολικές απώλειες της περισφιγξεως ανάμεσα στους διαμήκεις οπλισμούς.

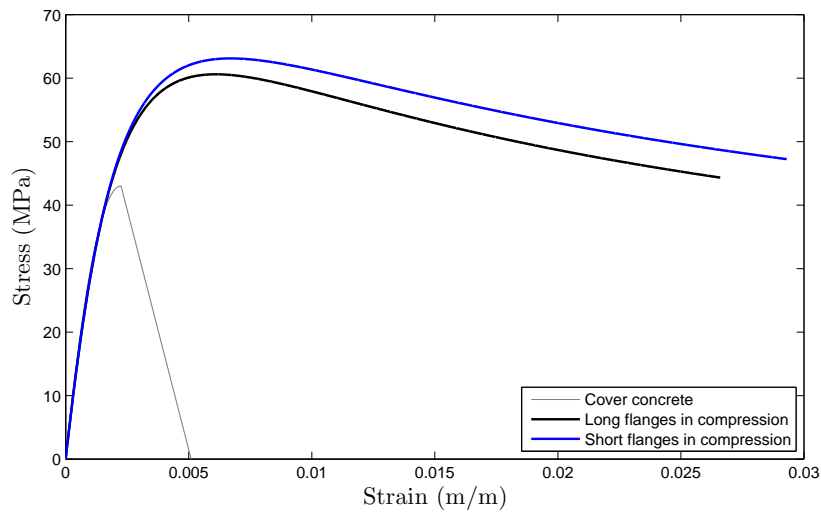
Γενικώς αυτή η παραδοχή είναι προς τη μεριά της ασφαλείας, αφού για θλίψη ολόκληρης της διατομής ο συντελεστής αποδοτικότητας της περισφιγξης προκύπτει τυπικά μικρότερος από το αν είχε υποτεθεί ένα κομμάτι της διατομής σε θλίψη. Η παραδοχή αυτή γίνεται και δεδομένου ότι η θέση του θλιβόμενου άξονα αλλάζει συνεχώς κατά τη σεισμική απόκριση, κάνοντας την εκτίμηση ενός μέσου θλιβόμενου τμήματος της διατομής αδύνατο, ή τουλάχιστον εξαρτώμενο από τα χαρακτηριστικά της διέγερσης, τα οποία δεν είναι γνωστά a priori.

Κάθε κοίλη ορθογωνική διατομή των μεσοβάθρων συντίθεται από 4 ορθογωνικά πέλματα, τα οποία παρουσία σεισμού βρίσκονται σε διαφορετική χρονική στιγμή σε θλίψη. Έτσι, για τον υπολογισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών του περισφιγμένου σκυροδέματος κάθε διατομής γίνεται η παραδοχή ότι θλίβεται ένα ολόκληρο πέλμα της. Αν θεωρήσουμε ότι ένα μεσοβάθρο της γέφυρας βρίσκεται σε μονοαξονική κάμψη περί ένα από τους κύριους άξονές του, μπορούμε να διακρίνουμε δύο σενάρια, όπου θλίβεται μια από τις ασύμμετρες παρειές της διατομής.

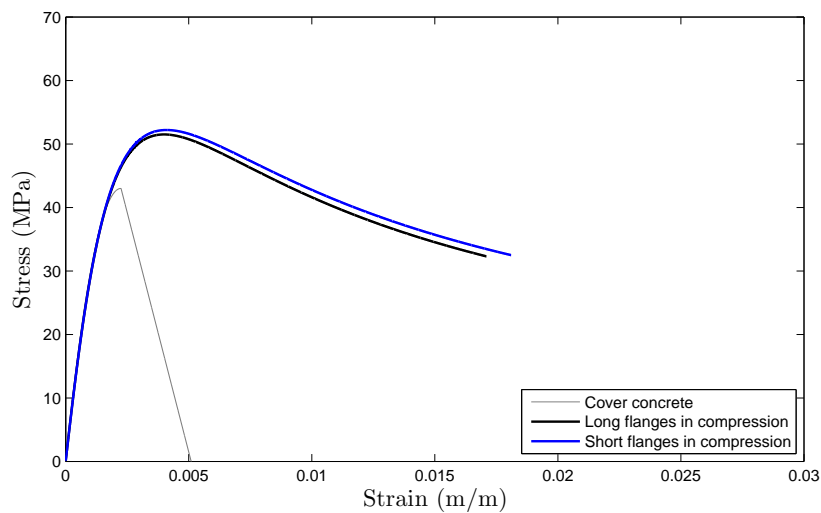


Σχήμα 5.13: Θλιβόμενα πέλματα για δύο διευθύνσεις μονοαξονικής κάμψης των βάθρων.

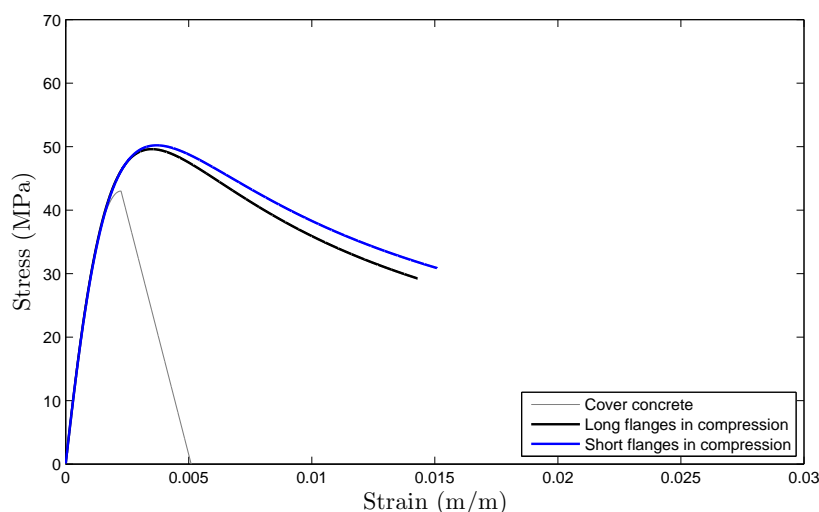
Για καθένα από τα σενάρια αυτά υπολογίζονται τα χαρακτηριστικά του περισφιγμένου σκυροδέματος για τις 3 διαφορετικές διατομές που συναντώνται καθ' ύψος των δύο μεσοβάθρων. Στα σχήματα 5.14, 5.15 και 5.16 παρουσιάζονται τα διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων των διατομών 1,2 και 3 αντίστοιχα για θλίψη των διαφορετικών πελμάτων τους.



Σχήμα 5.14: Συμπεριφορά περισφιγμένου σκυροδέματος Διατομής 1 για θλίψη του επιμήκους πέλματος (long flange) ή του κοντού πέλματος (short flange) της διατομής.



Σχήμα 5.15: Συμπεριφορά περισφιγμένου σκυροδέματος Διατομής 2 για θλίψη του επιμήκους πέλματος (long flange) ή του κοντού πέλματος (short flange) της διατομής.

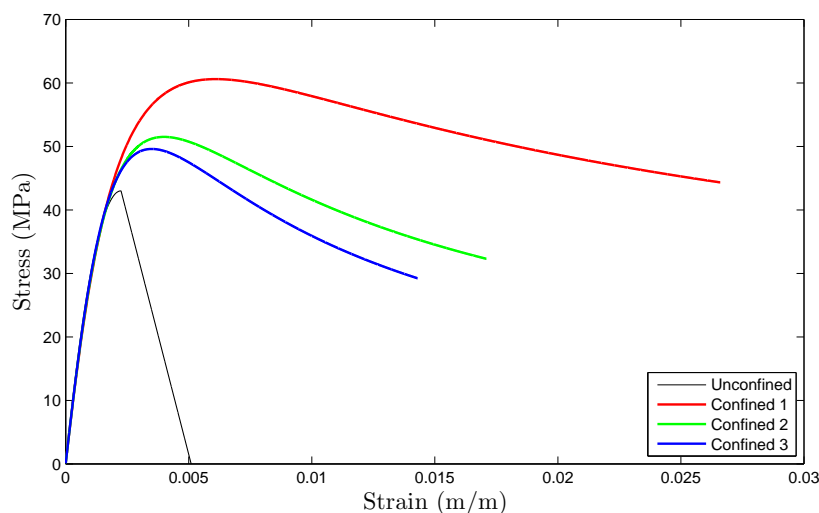


Σχήμα 5.16: Συμπεριφορά περισφιγμένου σκυροδέματος Διατομής 3 για θλίψη του επιμήκους πέλματος (long flange) ή του κοντού πέλματος (short flange) της διατομής.

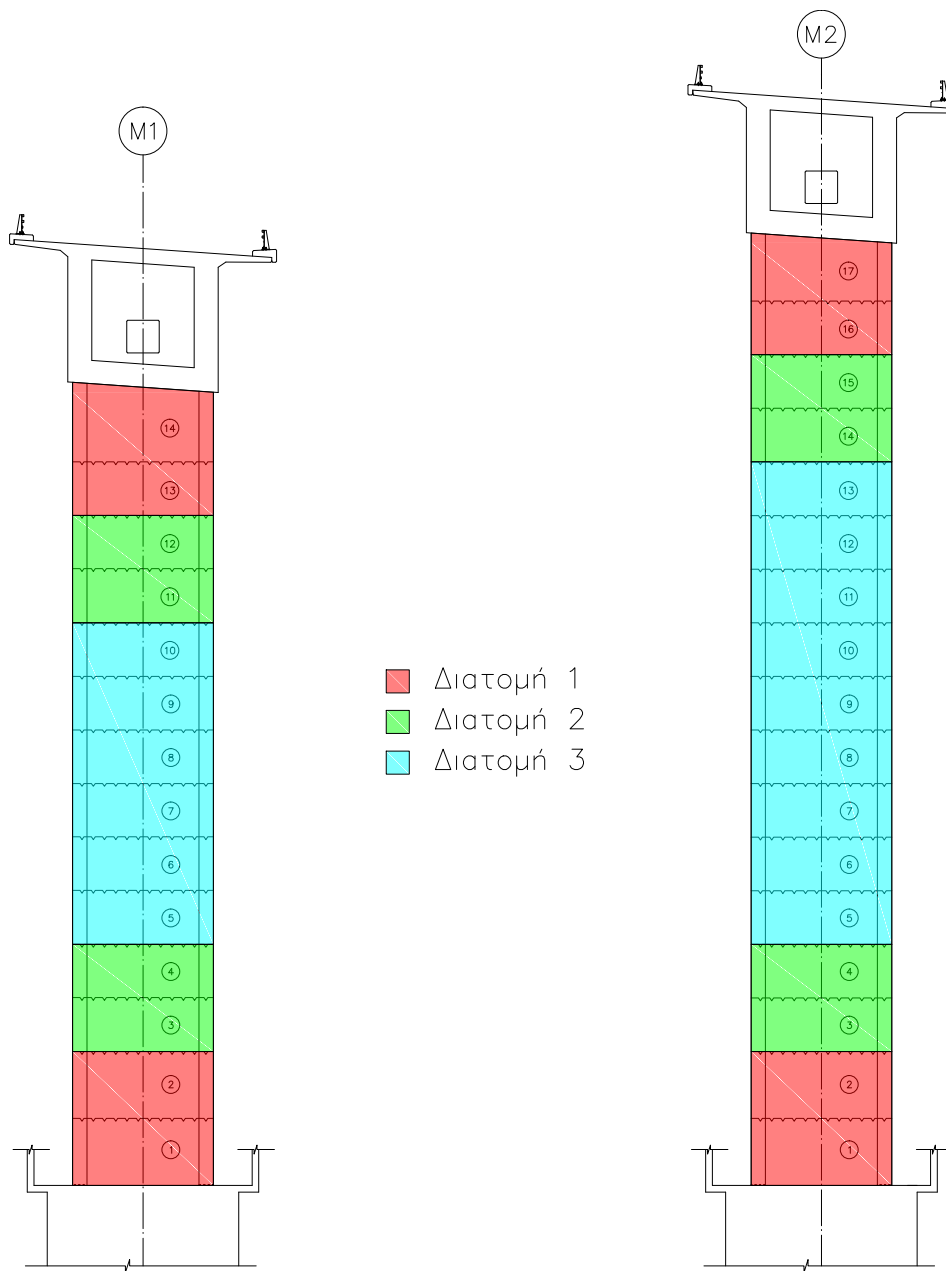
Σημειώνεται ότι η παραδοχή αυτή δίνει συντηρητικά αποτελέσματα, αφού με τη θεώρηση ότι η θλιβόμενη ζώνη εκτείνεται μέχρι τις εσωτερικές παρειές ενός πέλματος υπολογίζονται απώλειες στην αποδοτικότητα της περίσφιγξης και για τα εσωτερικά τμήματα της διατομής. Συνεπώς, στην περίπτωση που η θλιβόμενη ζώνη περιορίζεται εντός των πελμάτων και δεν προχωρά μέχρι την εσωτερική παρειά του θλιβόμενου πέλματος, η πραγματική αποδοτικότητα της περίσφιγξης θα είναι μεγαλύτερη, αφού οι απώλειες αυτές δε θα υπάρχουν.

Μετά τη διερεύνηση που γίνεται, είναι φανερό ότι η διαφορά στα διαγράμματα τάσεων παραμορφώσεων για θλίψη των διαφορετικών πελμάτων κάθε διατομής είναι μικρή. Δεδομένου ότι στην πραγματικότητα η κάμψη των μεσοβάθρων λόγω της διάταξής τους είναι διαξονική ακόμα και για σεισμική διέγερση μόνο κατά τον ένα κύριο άξονα της κατασκευής, γίνεται η επιλογή θεώρησης ενιαίου υλικού στον πυρήνα κάθε διατομής, επιλέγοντας αυτό με τη μικρότερη αντοχή και παραμορφωσιμότητα από τις θλίψεις των δύο πελμάτων.

Συνεπώς, για την περιγραφή της συμπεριφοράς του περισφιγμένου σκυροδέματος σε κάθε διατομή υιοθετούνται οι τιμές που παρουσιάζονται στο σχήμα 5.17.



Σχήμα 5.17: Μονοαξονικοί νόμοι τάσεων-παραμορφώσεων σκυροδέματος επικάλυψης και περισφιγμένου σκυροδέματος για τις τρεις διαφορετικές διατομές κάθε μεσοβάθρου, με ενιαίο περισφιγμένο υλικό ανά διατομή.



Σχήμα 5.18: Αντιστοίχιση διατομών στα στοιχεία των μεσοβάθρων. Η χρωματική κλίμακα βρίσκεται σε αντιστοιχία με το συγκεντρωτικό διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων των περισφιγμένων υλικών (σχήμα 5.17) για τις τρεις διαφορετικές διατομές.

## 5.4 Ακρόβαθρα

Τα ακρόβαθρα λόγω της δύσκαμπτης γεωμετρίας τους και του υποβάθρου θεμελίωσης λειτουργούν ως απαραμόρφωτα κατά τη σεισμική διέγερση της κατασκευής. Έτσι, τα μόνα χαρακτηριστικά των ακροβάθρων που προσομοιώνονται είναι οι συνοριακές τους συνθήκες.

Στην περιοχή κάθε ακροβάθρου διατάσσονται δύο εφάδρανα εγκλιβωτισμένου ελαστικού σημειακού τύπου, ελευθέρως ολισθαίνοντα, τα οποία διαμορφώνουν συνθήκες πλήρους κύλισης. Η παρεμβολή του μεταλλικού διατμητικού συνδέσμου για την παρεμπόδιση της εγκάρσιας (ακτινικής) μετακίνησης σε κάθε ακρόβαθρο προσομοιώνεται με χρήση στοιχείων μηδενικού μήκους



(zero-Length Elements), στα οποία δίνεται υλικό με ελαστική συμπεριφορά, πρακτικά άπειρης στιβαρότητας, ώστε να συμπεριφέρονται ως στηρίξεις (μηδενική ενδοσιμότητα). Τα στοιχεία αυτά προσανατολίζονται με χρήση διανυσμάτων κατεύθυνσης, ώστε να λειτουργούν στις επιθυμητές διευθύνσεις. Ορίζοντας ελαστική τη συμπεριφορά των διατμητικών συνδέσμων γίνεται η παραδοχή ότι δεν αστοχούν και συνεπώς η γέφυρα δεν ελευθερώνεται στην εγκάρσια διεύθυνση και δεν προσκρούει στα ελαστομεταλλικά εφέδρανα των ωτίδων κατά τις αναλύσεις.

## 5.5 Λοιπά θέματα προσομοίωσης

### 5.5.1 Στροφικές αδράνειες

Όπως ορίζεται στην §4.1.1 (1)P του EC8-2, το προσομοίωμα της γέφυρας και η επιλογή των δυναμικών ελευθεριών κίνησης θα πρέπει να απεικονίζουν ικανοποιητικά την κατανομή δυσκαμψίας και μάζας, ώστε όλες οι σημαντικές μορφές παραμόρφωσης και αδρανειακές δυνάμεις να ενεργοποιούνται κατάλληλα κατά την σεισμική διέγερση σχεδιασμού.

Μια κοινή πρακτική προσομοίωσης θεωρεί ικανοποιητική την περιγραφή των μαζών μιας κατασκευής με την εισαγωγή στο προσομοίωμα μόνο των μεταφορικών μαζών, αφού πολλά λογισμικά (OpenSees, SAP2000 κ.α.) δεν υπολογίζουν αυτόματα τις στροφικές αδράνειες στους κόμβους. Για αναλύσεις σε κτιριακά έργα, συχνά προσομοιώνεται μόνο η στροφική αδράνεια των διαφραγμάτων, αφού εμπεριέχει το μεγαλύτερο ποσοστό της στροφικής αδράνειας της κατασκευής.

Στην προσομοίωση της γέφυρας αυτής θεωρείται καλό να συνυπολογιστούν οι στροφικές αδράνειες, ώστε να φανεί η επιρροή τους στα αποτελέσματα των αναλύσεων και κυρίως στις ιδιομορφικές τιμές.

Η ροπή αδράνειας (Moment of Inertia) ορίζεται για ένα στερεό σώμα ως:

$$I_M = \sum m_i r_i^2 \quad (5.5)$$

όπου

$m_i$  η μάζα ενός τμήματος του στερεού σώματος και

$r_i$  η απόστασή του τμήματος από κάποιο άξονα περιστροφής.

Η στροφική αδράνεια ενός ραβδωτού μέλους μπορεί να υπολογιστεί στους τοπικούς του άξονες μέσα από συσχέτισμό της με τη ροπή αδράνειας σε επίπεδο διατομής του μέλους (Second Moment of Area). Για παράδειγμα, αν θεωρηθεί ως άξονας περιστροφής ο διαμήκης άξονας  $x$  του μέλους, ισχύει:

$$I_M = I_x \cdot \rho \cdot L \quad (5.6)$$

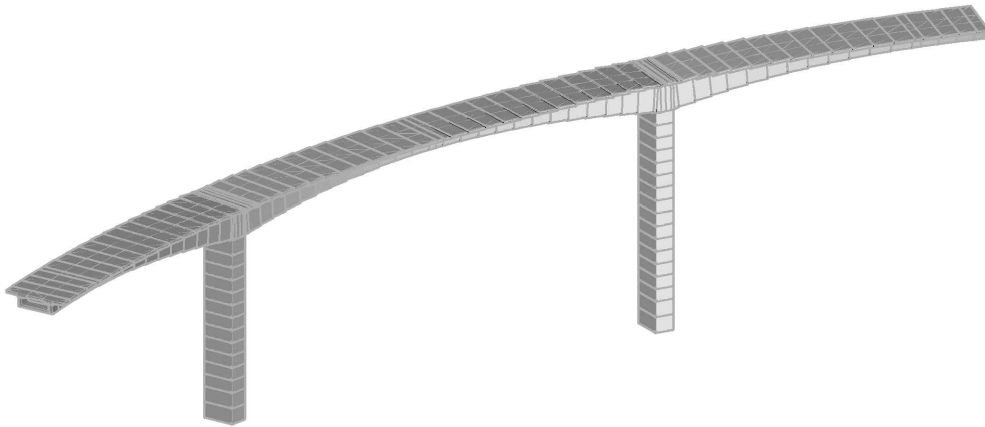
όπου

$I_x$  η πολική ροπή αδράνειας του μέλους σε επίπεδο διατομής ( $I_x = I_y + I_z$ ),

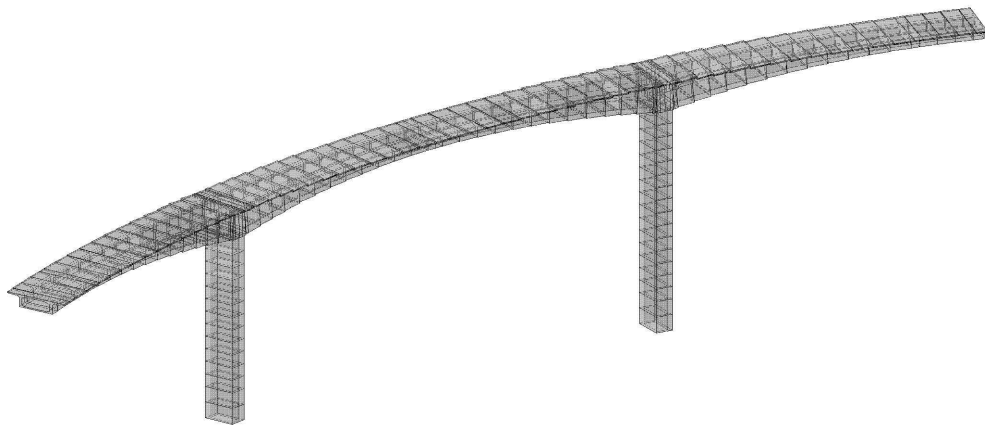
$\rho$  η πυκνότητα του υλικού (μάζα κατ' όγκο) και

$L$  το μήκος του μέλους.

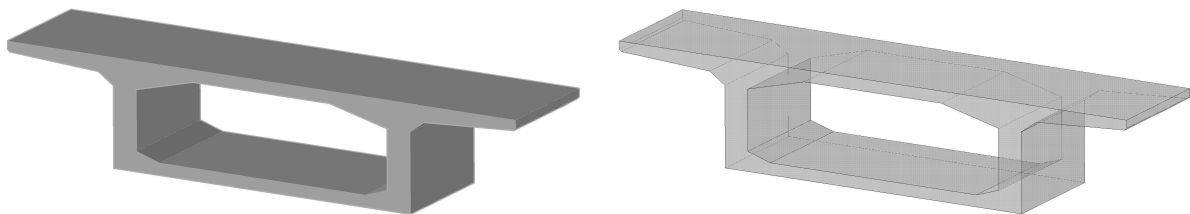
Για τον προσδιορισμό των στροφικών αδρανειών στους κόμβους της κατασκευής μελέτης, όπου κανένα από τα μέλη δεν είναι προσανατολισμένο στους καθολικούς άξονες (στους οποίους θα πρέπει να δοθεί η στροφική αδράνεια κατά την προσομοίωση), ο αναλυτικός υπολογισμός της στροφικής αδράνειας μπορεί να γίνει μόνο με προσεγγίσεις. Αντ' αυτού, κατασκευάζεται ένα πλήρες τρισδιάστατο γεωμετρικό προσομοίωμα της κατασκευής στο AutoCAD 3D, όπου προσομοιώνεται η ακριβής γεωμετρία (CAD geometry), απ' όπου εξαγονται οι στροφικές αδράνειες σε κάθε κόμβο, από τα μέλη που συντρέχουν σ' αυτόν.



Σχήμα 5.19: Πλήρες τρισδιάστατο γεωμετρικό προσομοίωμα της κατασκευής στο AutoCAD 3D.



Σχήμα 5.20: Τρισδιάστατο προσομοίωμα με διαφάνεια στα μέλη, όπου διακρίνεται το εσωτερικό των μελών.



Σχήμα 5.21: Ακριβής γεωμετρία σπονδύλου από την οποία υπολογίζονται οι στρωφικές αδράνειες.

### 5.5.2 Ελαστικές διατμητικές παραμορφώσεις

Τα ραβδωτά στοιχεία που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση του καταστρώματος και των μεσοβάθρων (Elastic Beam-Column Element και Force-Based Beam-Column Element) αντίστοιχα

λειτουργούν βάσει της θεωρίας δοκού Euler-Bernoulli. Δηλαδή οι επίπεδες διατομές μετά την παραμόρφωση του μέλους λόγω επιβολής κάποιας φόρτισης παραμένουν επίπεδες και κάθετες στον άξονα του μέλους, ενώ οι παραμορφώσεις προκύπτουν μόνο από έργα λόγω κάμψης και αξονικής δύναμης.

Η θεωρία δοκού Timoshenko (1969) αποτελεί μια γενίκευση της θεωρίας Euler-Bernoulli και λαμβάνει υπόψη τις παραμορφώσεις λόγω διάτμησης. Η εν λόγω θεωρία λειτουργεί βάσει της παραδοχής ότι οι διατομές που δεν υπόκεινται σε καθαρή κάμψη, όταν υπάρχει δηλαδή τέμνουσα δύναμη, παραμένουν μεν επίπεδες, αλλά όχι και κάθετες στον άξονα του μέλους.

Οι διατμητικές παραμορφώσεις είναι σημαντικές για χθαμαλά μέλη, για μέλη δηλαδή όπου οι διαστάσεις της διατομής είναι σχετικώς μεγάλες προς το μήκος του μέλους, ενώ στις περιπτώσεις που οι διαστάσεις του μέλους είναι πολύ μικρότερες του μήκους του, η θεωρία Timoshenko συγκλίνει στο ίδιο αποτέλεσμα με τη θεωρία Euler-Bernoulli. Για παράδειγμα, σε κοντά βάρθρα τοιχοειδούς μορφής, όπως είναι τα βάρθρα μιας τυπικής γέφυρας άνω διάβασης εντός αστικής περιοχής, οι διατμητικές παραμορφώσεις δε θα μπορούσαν να αγνοηθούν.

Στις δοκούς και τα υποστυλώματα των συνήθων οικοδομικών έργων, η επιρροή των διατμητικών παραμορφώσεων στη συνολική απόκριση είναι μικρή αν αναλογιστούμε τις τυπικές διαστάσεις των μελών και τα τυπικά ανοίγματα των φατνωμάτων. Για τα μεσοβάθρα της συγκεκριμένης κατασκευής, όπου οι διαστάσεις των διατομών φαίνονται μεγάλες σε απόλυτες τιμές, αξίζει να γίνει μια αναζήτηση του πόσο σημαντικές είναι οι ελαστικές διατμητικές παραμορφώσεις.

Ο συνήθης έλεγχος με βάση τον οποίο η παραδοχή Euler-Bernoulli μπορεί να εφαρμόζεται με ικανοποιητική ακρίβεια, επιτάσσει ο λόγος του μήκους του μέλους προς τη μεγαλύτερη διάσταση της διατομής να μην ξεπερνά την τιμή 5. Αν θεωρήσουμε επί το δυσμενέστερο τη μέγιστη εξωτερική διάσταση του κιβωτίου της διατομής των μεσοβάθρων (7.35m) και το μήκος του κοντού μεσοβάθρου M1 της γέφυρας (41.7m), ο έλεγχος πράγματι ικανοποιείται, αφού  $41.7/7.35 = 5.673 > 5$ .

Δεδομένης της κιβωτιοειδούς γεωμετρίας της διατομής των μεσοβάθρων θεωρείται καλό να γίνει ένας πιο σύνθετος έλεγχος. Αν ανατρέξουμε στη μόρφωση του μητρώου στιβαρότητας και των συναρτήσεων σχήματος μιας δοκού Timoshenko, μπορούμε να απομονώσουμε τον όρο της σχετικής σημασίας των διατμητικών παραμορφώσεων προς τις καμπτικές:

$$\Phi = \frac{12E_{cm}I}{G_{cm}(A/\alpha)L^2} \quad (5.7)$$

Για τιμές του όρου  $\Phi$  κοντά στο μηδέν, οι ελαστικές διατμητικές παραμορφώσεις είναι ασήμαντες και η παραδοχή Euler-Bernoulli ισχύει με ικανοποιητική ακρίβεια, ενώ για τιμές που προσεγγίζουν τη μονάδα οι διατμητικές παραμορφώσεις είναι εξίσου σημαντικές με τις καμπτικές. Υπολογίζοντας τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής για τους δύο κύριους άξονες της διατομής των μεσοβάθρων, προκύπτουν:

Πίνακας 5.1: Υπολογισμός του όρου  $\Phi$  για τους δύο κύριους άξονες της διατομής του μεσοβάθρου M1

	Ισχυρός άξονας $z$	Ασθενής άξονας $y$
Μήκος Μεσοβάθρου M1 $L_{M1}$ (m)	41.7	
Μέτρο Ελαστικότητας $E_{cm}$ (kPa)	34,000,000	
Λόγος <i>Poisson</i>	0.20	
Μέτρο Διάτμησης $G_{cm}$ (kPa)	1416666.667	
Εμβαδό Διατομής $A$ (m <sup>2</sup> )	14.775	
Ροπή Αδρανείας	90.6455	31.5828
Επιφάνεια Διάτμησης	10.1803	6.0977
$\Phi$	0.1474	0.0858

Από τις τιμές του όρου  $\Phi$  βλέπουμε ότι οι διατμητικές παραμορφώσεις δεν είναι και τόσο

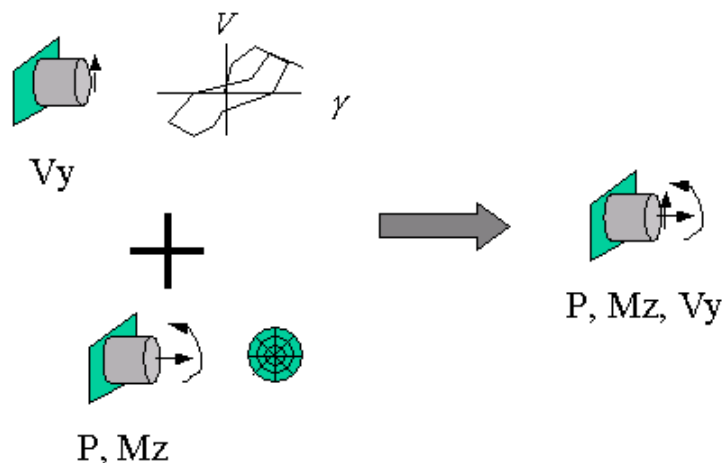
σημαντικές για τα μεσόβαθρα της κατασκευής. Έτσι, η επιρροή τους δε λαμβάνεται υπόψη στο υπολογιστικό προσομοίωμα.

Λαμβάνοντας υπόψη στο προσομοίωμα τις διατμητικές παραμορφώσεις τα μέλη γίνονται πιο εύκαμπτα, αφού για το ίδιο φορτία αναπτύσσουν μεγαλύτερες παραμορφώσεις, συνυπολογιζόμενων και των διατμητικών έργων. Έτσι, δεν διερευνάται ο συνυπολογισμός τους στα στοιχεία του φορέα καταστρώματος, αφού η στιβαρότητα του καταστρώματος σε εγκάρσια φορτία έχει ήδη υποτιμηθεί σημαντικά λόγω μη προσομοίωσης της δράσης προεντάσεως (και της συνυπάρχουσας αντιθέτουσας δύναμης). Αξίζει να σημειωθεί ότι το λογισμικό διαθέτει ελαστικό στοιχείο στο οποίο ενσωματώνονται οι διατμητικές παραμορφώσεις (Elastic Timoshenko Beam-Column Element).

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή της ενότητας αυτής, η θεωρία Timoshenko αποτελεί μια γενίκευση της θεωρίας Euler-Bernoulli. Αν και αποδείχθηκε ότι οι ελαστικές διατμητικές παραμορφώσεις δεν είναι σημαντικές σε σχέση με τις καμπτικές για τα μεσόβαθρα της υπό μελέτη κατασκευής, θα φαινόταν λογική η σκέψη να ενσωματωθούν ούτως ή άλλως. Ο λόγος που αυτό δεν πραγματοποιείται στην προσομοίωση των μεσοβάθρων έχει να κάνει με τον τρόπο που προσομοιώνεται η μη-γραμμικότητα του υλικού. Οι διατομές ινών (Fiber Sections) λειτουργούν εγγενώς με βάση την παραδοχή Euler-Bernoulli και ένα από τα μεγάλα τους μειονεκτήματα είναι ότι αγνοούν την επιρροή των διατμητικών τάσεων και παραμορφώσεων σε ελαστικό και ανελαστικό επίπεδο.

Το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα συνδυασμού εν παραλλήλω μιας διατομής ινών με μια διατομή στην οποία μπορεί να δοθεί η συμπεριφορά τέμνουσας δύναμης-διατμητικής παραμόρφωσης V-γ (Section Aggregator).

Έτσι, θα μπορούσε να οριστεί για τη δεύτερη μια διατομή με ελαστικό υλικό στιβαρότητας  $G_{cm} \cdot A/\alpha = G_{cm} \cdot A_v$ , πολλαπλασιασμένο ίσως με κάποιο συντελεστή ώστε να ληφθεί υπόψη η ρηγμάτωση (κατά το σχεδιασμό η ενεργός διατμητική στιβαρότητα λαμβάνεται ίση με το μισό της γεωμετρικής όπως προδιαγράφεται και για την καμπτική στιβαρότητα – §4.3.1(7) EC8-1) η οποία θα έδινε σε κάθε διατομή των μεσοβάθρων το συνυπολογισμό των ελαστικών διατμητικών παραμορφώσεων.



Σχήμα 5.22: Προσομοίωση της διατμητικής συμπεριφοράς με νόμο δύναμης-παραμόρφωσης σε διατομή ινών με χρήση του Section Aggregator (OpenSeesWiki).

Όμως, με χρήση ενός τέτοιου προσομοιώματος η καμπτική και η διατμητική συμπεριφορά είναι ασύζευκτες, γίνεται δηλαδή απλή υπέρθεση μεταξύ των μεν και των δε στο πέρας κάθε βήματος της ανάλυσης. Έτσι, δε θεωρείται μια καλή εναλλακτική, αφού για μεγάλες ανελαστικές καμπτικές παραμορφώσεις, τόσο το μέτρο διάτμησης του υλικού, όσο και η ενεργός επιφάνεια διάτμησης ( $A/\alpha$ ) της διατομής δε θα είχαν τις αρχικές τους τιμές και συνεπώς στο ίδιο προσομοίωμα θα διαχειριζόμασταν με εντελώς διαφορετικό τρόπο την καμπτική και τη διατμητική απόκριση.

Μια τέτοια προσομοίωση θα ήταν πιο κοντά στη λογική της προσομοίωσης της ανελαστικής

συμπεριφοράς με τη θεώρηση συγκεντρωμένης πλαστικότητας, όπου οι ανελαστικές παραμορφώσεις θεωρούνται συγκεντρωμένες στα άκρα κάθε μέλους, ενώ το υπόλοιπο μέλος προσομοιώνεται ελαστικά.

### 5.5.3 Στρεπτική στιβαρότητα

Για αναλύσεις κατασκευών στον τρισδιάστατο χώρο είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός της στρεπτικής τους στιβαρότητας. Η στρεπτική στιβαρότητα των μελών λαμβάνεται υπόψη στο υπολογιστικό προσομοίωμα μέσω της στρεπτικής στιβαρότητας σε επίπεδο διατομής  $G_{cm} \cdot J$ , όπου  $J$  η στρεπτική σταθερά της διατομής. Η δυστρεψία μιας διατομής αντιστοιχεί σε προσομοίωση της καθαρής στρέψης (Saint Venant) και θεωρείται επαρκής για τα μέλη της υπό μελέτη κατασκευής, τα οποία έχουν κλειστές κιβωτιοειδείς διατομές και οι στρεπτικές εντάσεις παραλαμβάνονται κυρίως από κλειστές διατμητικές ροές και όχι μέσω στρέβλωσης.

Όπως ορίζεται στην §2.3.6 του EC8-2, σε πλάστιμες και περιορισμένα πλάστιμες γέφυρες πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η σημαντική μείωση της στρεπτικής δυσκαμψίας των φορέων από σκυρόδεμα σε σχέση με την στρεπτική δυσκαμψία των μη ρηγματωμένων φορέων. Εκτός εάν γίνεται ακριβέστερος υπολογισμός, επιτρέπεται να χρησιμοποιηθούν τα ακόλουθα ποσοστά της στρεπτικής δυσκαμψίας της μη ρηγματωμένης διατομής:

- Σε προεντεταμένες κιβωτιοειδείς διατομές (φορέας καταστρώματος), το 50% της δυσκαμψίας μη ρηγματωμένης διατομής.
- Σε κιβωτιοειδείς διατομές από οπλισμένο σκυρόδεμα (μεσόβαθρα), το 30% της δυσκαμψίας μη ρηγματωμένης διατομής.

Η στρεπτική στιβαρότητα ορίζεται απευθείας στα ελαστικά μέλη του φορέα μέσω των παραμέτρων  $G_{cm}$  (Μέτρο διάτμησης) και  $J$  (Σταθερά στρέψης), ενώ στα μέλη των μεσοβάθρων όπου γίνεται προσομοίωση με διατομές ινών, η στρεπτική στιβαρότητα των στοιχείων δίνεται ως δυστρεψία διατομής, δηλαδή ως το γινόμενο  $G_{cm} \cdot J$ . Και στις δύο περιπτώσεις γίνεται η απομείωση που αναφέρθηκε για την εκτίμηση της ρηγμάτωσης του σκυροδέματος με το μειωτικό συντελεστή που προδιαγράφεται από τον κανονισμό.

Με την εν λόγω προσομοίωση, η στρεπτική συμπεριφορά των μελών ορίζεται γραμμικώς ελαστική και ασύζευκτη από το καμπτικό πρόβλημα, αφού γίνεται η ίδια προσομοίωση που περιγράφηκε στις διατμητικές παραμορφώσεις. Όμως εδώ η προσομοίωση αυτή θεωρείται αποδεκτή, αφού αφενός δεν προσομοιώνεται η αστοχία των μεσοβάθρων λόγω στρέψης και αφετέρου οι καμπτικές και οι στρεπτικές εντάσεις δρουν σε διαφορετικούς άξονες (κάτι που δε συμβαίνει για τις καμπτικές και τις διατμητικές).

### 5.5.4 Άκαμπτες περιοχές

Στις περιοχές της μονολιθικής σύνδεσης του φορέα του καταστρώματος με τις διαδοκίδες που μορφώνονται στα μεσόβαθρα και τα ακρόβαθρα θεωρούνται άκαμπτα στοιχεία για τη ρεαλιστική περιγραφή της δυσκαμψίας των περιοχών αυτών. Γενικώς οι περιοχές περί των συμπαγών διαδοκίδων στις συναρμογές του καταστρώματος με τα μεσόβαθρα και τα ακρόβαθρα αντιμετωπίζονται στο σχεδιασμό των γεφυρών ως κόμβοι σκυροδέματος.

Η προσομοίωση των εν λόγω μελών γίνεται με χρήση ελαστικών μελών με την πραγματική διατομή των διαδοκίδων και αυξημένο μέτρο ελαστικότητας επί 10000 του πραγματικού, ώστε να είναι πρακτικώς απαραμόρφωτα. Η τιμή 10000 του πολλαπλασιαστικού συντελεστή επιλέχθηκε μετά από δοκιμές, ώστε αφενός η ενδοσιμότητα των κόμβων να προκύπτει πρακτικώς μηδενική, αφετέρου όμως να μη δημιουργούνται προβλήματα στη σύγκλιση του αλγορίθμου επίλυσης των μη-γραμμικών εξισώσεων κατά την αντιστροφή του μητρώου στιβαρότητας στις μη-γραμμικές αναλύσεις.

### 5.5.5 Κατακόρυφα φορτία

Πριν την επιβολή των σεισμικών φορτίων η γέφυρα φορτίζεται με τα κατακόρυφα φορτία βαρύτητας του σεισμικού συνδυασμού. Τα φορτία αυτά είναι τα φορτία του οιονεί μόνιμου συνδυασμού φόρτισης, δηλαδή:  $G + \psi_{2,1} \cdot Q$ . Η κατασκευή πέρα από τα ίδια βάρη της φέρει πρόσθετα μόνιμα φορτία καθώς και τα φορτία κυκλοφορίας.

Τα πρόσθετα μόνιμα φορτία της γέφυρας αποτελούνται από τα κάτωθι:

Βάρος Οδοστρώματος:  $g_{asphalt} = 23kN/m^3 \times 0.10m = 2.3kN/m^2$ , σε επίπεδο διατομής.

Βάρος πεζοδρομίων:  $g_{pavement} = 13.75kN/m^2$ , σε επίπεδο διατομής.

Βάρος στηθαίων:  $g_{parapet} = 2.0kN/m$  κατά μήκος της χάραξης.

Τα κινητά φορτία κυκλοφορίας υπολογίζονται σύμφωνα με το DIN 1072 που χρησιμοποιήθηκε για το σχεδιασμό της κατασκευής. Το κατάστρωμα έχει σταθερό πλάτος κατά μήκος της χάραξης, ίσο με 13.45m. Αφαιρώντας τα πλάτη των πεζοδρομίων, το καθαρό πλάτος του οδοστρώματος στο οποίο εφαρμόζονται τα φορτία κυκλοφορίας προκύπτει ίσο με 11.45m. Ο συντελεστής συνδυασμού των μεταβλητών δράσεων για οδικές γέφυρες λαμβάνεται ίσος με  $\psi_{2,1} = 0.20$ .

Σύμφωνα με το DIN 1072, η γέφυρα εντάσσεται στην κλάση 60/30, η οποία αποτελεί την κατηγορία φορτίων που χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά για το σχεδιασμό οδογεφυρών στην Ελλάδα. Σύμφωνα με αυτή, το κατάστρωμα χωρίζεται στα εξής μέρη:

- Μια κύρια λωρίδα πλάτους 3.0m με κατανεμημένο φορτίο  $5.0kN/m^2$  και ένα όχημα βάρους  $q_1 = 600kN$  (κύριο όχημα 60t).
- Μια δευτερεύουσα λωρίδα πλάτους 3.0m με κατανεμημένο φορτίο  $3.0kN/m^2$  και ένα όχημα βάρους  $q_2 = 300kN$  (δευτερεύων όχημα 30t).
- Στο υπόλοιπο πλάτος του οδοστρώματος κυκλοφορίας 5.45m, καθώς και στα πεζοδρόμια, λαμβάνεται ομοιόμορφο φορτίο  $q_r = 3kN/m^2$ .

Τα φορτία των δύο βαρέων οχημάτων ανάγονται σε γραμμικά κατανεμημένα φορτία κατά μήκος του καταστρώματος, ως ένα φορτίο  $q' = (600kN + 300kN)/270m = 3.333kN/m$ .

Τα κατακόρυφα φορτία ανάγονται σε γραμμικά κατανεμημένα φορτία κατά μήκος των μελών και ασκούνται στους τοπικούς άξονές τους. Στην κεφαλή κάθε μεσοβάθρου ασκείται πρόσθετα ένα μόνιμο κατακόρυφο συγκεντρωμένο φορτίο 945 kN που συμπεριλαμβάνει το βάρος του ζεύγους διαδοχίδων που μορφώνονται στις συναρμογές μεσοβάθρων-καταστρώματος.

Συγκεντρωτικά, η γέφυρα φέρει πρόσθετα μόνιμα φορτία ίσα με:  $g' = 42.085 \approx 42kN/m$  και κινητά φορτία  $q = 43.683 \approx 44kN/m$  κατανεμημένα στο μήκος του καταστρώματος.

### 5.5.6 Μητρώο απόσβεσης

Για τη διενέργεια των μη γραμμικών δυναμικών αναλύσεων, είναι απαραίτητος ο ορισμός του μητρώου απόσβεσης της κατασκευής. Το μητρώο απόσβεσης υπολογίζεται κατά Rayleigh, ως ένα ποσοστό του μητρώου μάζας συν ένα ποσοστό του ελαστικού μητρώου δυσκαμψίας (ιξώδης αναλογική απόσβεση), δηλαδή ως:

$$C = \alpha_0 \cdot M + \alpha_1 \cdot K_0 \quad (5.8)$$

όπου

$\alpha_0$  και  $\alpha_1$  οι συντελεστές αναλογίας του μητρώου μάζας και δυσκαμψίας

$M$  το μητρώο μάζας

$K_0$  το ελαστικό μητρώο δυσκαμψίας

Οι συντελεστές  $a_0$  και  $a_1$  υπολογίζονται για δύο ιδιοσυχνότητες της κατασκευής, στις οποίες δίνεται ο επιθυμητός λόγος ιξώδους απόσβεσης  $\xi=5\%$ . Στην περίπτωση που δίνεται ο ίδιος λόγος απόσβεσης στις δύο αυτές ιδιοσυχνότητες, οι συντελεστές  $a_0, a_1$  υπολογίζονται ως:

$$\alpha_0 = \xi \frac{2\omega_i\omega_j}{\omega_i + \omega_j} \quad (5.9)$$

και

$$\alpha_1 = \xi \frac{2}{\omega_i + \omega_j} \quad (5.10)$$

Εφαρμόζοντας αυτή τη διαδικασία, οι ιδιομορφές που αντιστοιχούν στις  $\omega_i, \omega_j$  έχουν απόσβεση 5%, εκείνες με συχνότητα ενδιάμεσως των δύο έχουν μικρότερη απόσβεση, ενώ οι ιδιομορφές με μικρότερη ή μεγαλύτερη κυκλική συχνότητα από τις  $\omega_i, \omega_j$  έχουν μεγαλύτερο λόγο απόσβεσης. Η απόσβεση μιας τυχαίας συχνότητας αφού υιοθετηθεί απόσβεση κατά Rayleigh, υπολογίζεται ως:

$$\xi_n = \frac{\alpha_0}{2} \frac{1}{\omega_n} + \frac{\alpha_1}{2} \omega_n \quad (5.11)$$



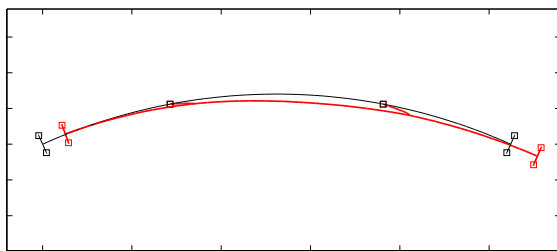


## Κεφάλαιο 6

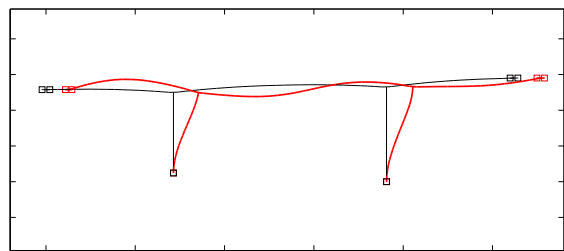
# Αποτελέσματα Αναλύσεων

### 6.1 Ιδιομορφική ανάλυση

Στα σχήματα 6.1 έως 6.4 παρουσιάζονται γραφικά οι πρώτες 4 ιδιοπερίοδοι του συστήματος, σε κάτοψη και σε κατακόρυφη όψη αντίστοιχα. Με μαύρο σημαίνεται η απαραμόρφωτη κατάσταση, ενώ τα τετράγωνα υποδεικνύουν τις θέσεις των στηρίξεων.

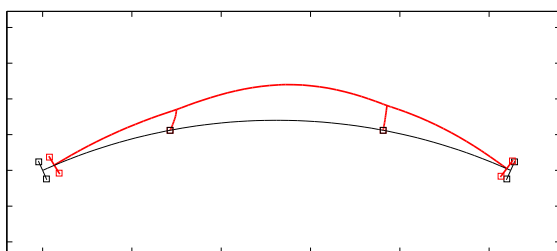


(α') Κάτοψη

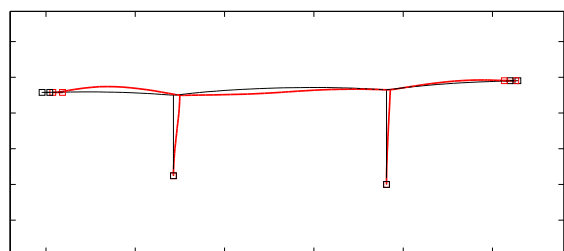


(β') Κατά μήκος τομή

Σχήμα 6.1: Πρώτη ιδιομορφή ( $T = 1.748$  sec): Καμπτική ταλάντωση των μεσοβάθρων με μετατόπιση του καταστρώματος κατά το διαμήκη άξονα.

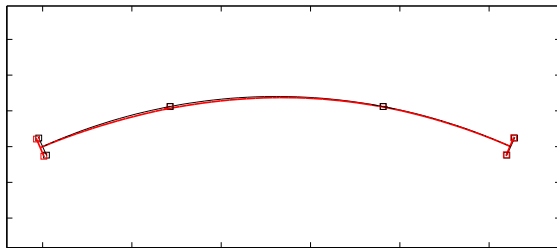


(α') Κάτοψη

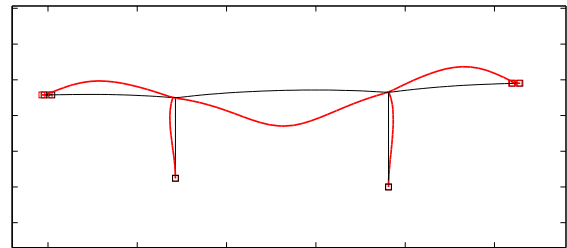


(β') Κατά μήκος τομή

Σχήμα 6.2: Δεύτερη ιδιομορφή ( $T = 1.539$  sec): Καμπτική ταλάντωση των μεσοβάθρων με μετατόπιση του καταστρώματος κατά τον εγκάρσιο άξονα.

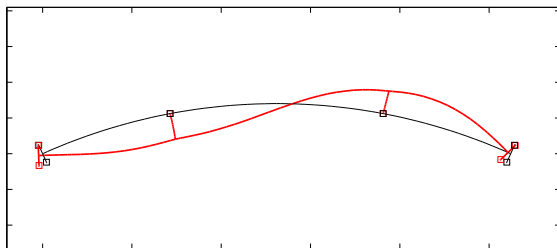


(α') Κάτοψη

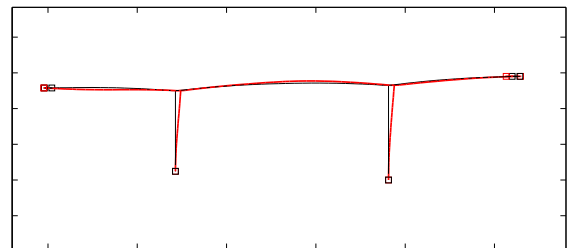


(β') Κατά μήκος τομή

Σχήμα 6.3: Τρίτη ιδιομορφή ( $T = 0.920 \text{ sec}$ ): Συμμετρική καμπτική ταλάντωση του καταστρώματος στο κατακόρυφο επίπεδο.



(α') Κάτοψη



(β') Κατά μήκος τομή

Σχήμα 6.4: Τέταρτη ιδιομορφή ( $T = 0.818 \text{ sec}$ ): Αντισυμμετρική καμπτική ταλάντωση του καταστρώματος στο οριζόντιο επίπεδο.

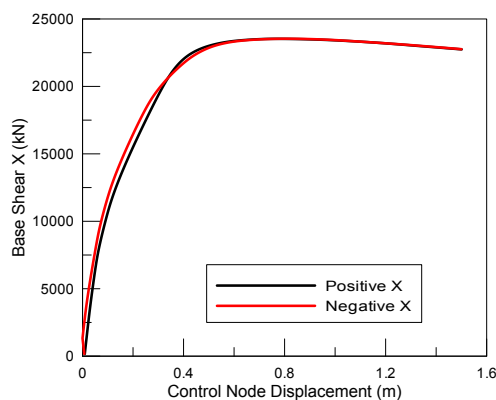
Στον πίνακα 6.1 παρουσιάζονται οι πρώτες 20 ιδιοπερίοδοι της κατασκευής και οι αντίστοιχες δρώσες ιδιομορφικές μάζες για τους τρεις μεταφορικούς βαθμούς ελευθερίας.

Πίνακας 6.1: Ιδιοπερίοδοι και δρώσες ιδιομορφικές μάζες.

Mode	Period(sec)	$U_X$	$U_Y$	$U_Z$
1	1.7483	0.7813	0.0297	0.0001
2	1.5391	0.0374	0.6847	0
3	0.9201	0.0048	0.0058	0.0175
4	0.8178	0.037	0.0045	0
5	0.571	0.0298	0.0003	0.0013
6	0.4603	0.0001	0.0803	0.0124
7	0.4513	0.0001	0.006	0.3895
8	0.2951	0.0039	0	0
9	0.2665	0.0014	0.0082	0
10	0.2651	0.0034	0.0032	0
11	0.2047	0.0004	0.0029	0.0001
12	0.2009	0	0.0014	0.0034
13	0.1969	0.0003	0.0055	0.0033
14	0.1759	0.0002	0.0021	0.0014
15	0.1702	0.0026	0	0.0013
16	0.1665	0.0003	0.0003	0
17	0.1647	0.001	0.0006	0
18	0.15	0.0034	0.0006	0.1509
19	0.1412	0.0154	0.0027	0.0229
20	0.1378	0.0011	0.0106	0.0003

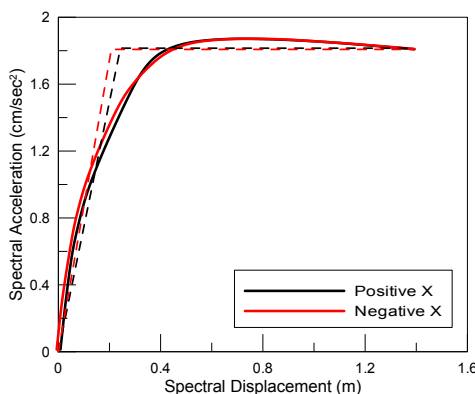
## 6.2 Μη-γραμμική στατική ανάλυση

Στο σχήμα 6.5 παρουσιάζονται οι καμπύλες ικανότητας για θετικές και αρνητικές μετατοπίσεις σε απόλυτα μεγέθη, όπου φαίνεται ότι η συμπεριφορά για τις δύο φορές φόρτισης δεν εμφανίζει σημαντικές διαφορές.



Σχήμα 6.5: Καμπύλη ικανότητας

Στο σχήμα 6.6 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα φάσματα ικανότητας μαζί με τις εξιδανικευμένες τους μορφές, όπου φαίνεται ότι οι διαφορές για θετικές και αρνητικές μετατοπίσεις κατά το διαμήκη άξονα της κατασκευής είναι μικρές και εντοπίζονται μόνο στις μετατοπίσεις. Δηλαδή, η επιτάχυνση διαρροής για τις δύο φορές φόρτισης είναι πρακτικά η ίδια.



Σχήμα 6.6: Φάσμα ικανότητας (ADRS)

Στον πίνακα 6.2 παρουσιάζονται τα μεγέθη διαρροής του ισοδύναμου ΣΜΕΚ για θετικές και αρνητικές μετατοπίσεις, τα μέσα μεγέθη διαρροής με βάση τα οποία έγιναν οι κλιμακώσεις, καθώς και οι ποσοστιαίες διαφορές για τις δύο φορές φόρτισης ως προς στα μέσα μεγέθη.

Πίνακας 6.2: Χαρακτηριστικά ισοδύναμων ΣΜΕΚ για δύο φορές φόρτισης κατά το διαμήκη άξονα της κατασκευής.

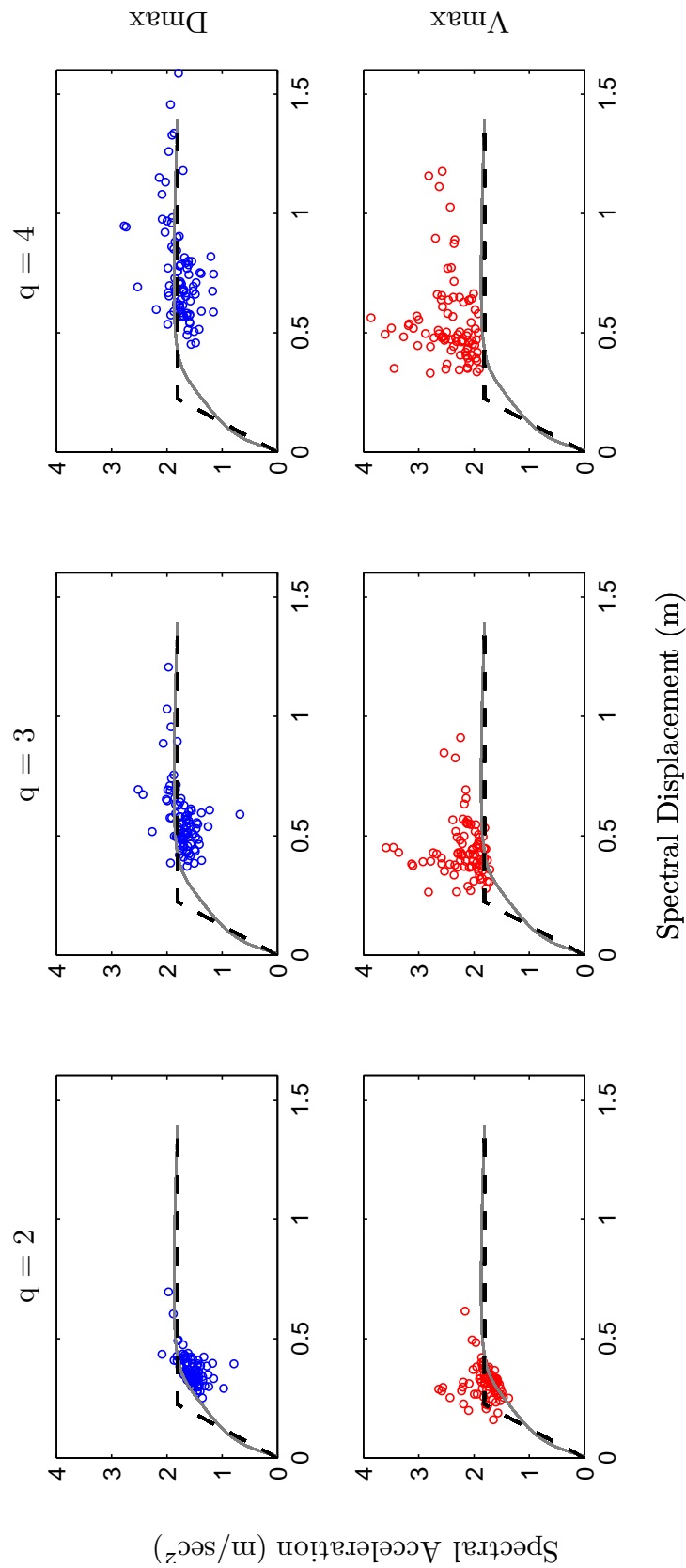
	Positive X	Negative X	Mean	Difference (%)
$d_y (m)$	0.243	0.207	0.225	15.77%
$a_y (m/s^2)$	1.815	1.808	1.811	0.4%
$T^* (sec)$	2.298	2.128	2.215	7.69%

Σημειώνεται ότι ενώ οι κλιμακώσεις των καταγραφών πραγματοποιήθηκαν για τη μέση επιτάχυνση και μετακίνηση διαρροής των ισοδύναμων μονοβαθμίων συστημάτων για θετικές και αρνητικές μετακινήσεις, ο υπολογισμός της αναπτυσσόμενης πλαστιμότητας και του αναπτυσσόμενου συντελεστή συμπεριφοράς προκύπτει από το αντίστοιχο ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα, ανάλογα με το πρόσημο της μέγιστης αναπτυσσόμενης μετακίνησης.

## 6.3 Μη-γραμμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας φόρτισης

### 6.3.1 Σημεία μέγιστης σεισμικής απόκρισης

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται τα σημεία μέγιστης απόκρισης της κατασκευής για τις αρχικές καταγραφές και τις τρεις κλιμακώσεις. Από κάθε ανάλυση απομονώνονται η μέγιστη μετακίνηση του γεωμετρικού κέντρου του καταστρώματος (κόμβος ελέγχου) και η αντίστοιχη τέμνουσα βάσης (σημεία  $D_{max}$ ), όπως και η μέγιστη τέμνουσα βάσης με την αντίστοιχη μετακίνηση του γεωμετρικού κέντρου του καταστρώματος (σημεία  $V_{max}$ ). Οι μετακινήσεις και οι τέμνουσες βάσης μετασχηματίζονται στο ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα και παρουσιάζονται μαζί με την χαμπύλη ικανότητας. Τα σημεία μέγιστης σεισμικής απόκρισης παρέχουν μια εποπτεία της συνολικής απόκρισης της κατασκευής υπό τις σεισμικές διεγέρσεις, αφού αποτελούν ακραία σημεία των βρόχων υστέρησης σε επίπεδο κατασκευής, ανηγμένα στο ισοδύναμο ΣΜΕΚ.



Σχήμα 6.7: Σημεία μέγιστης σεισμικής απόκρισης για τρεις κλιμακώσεις ( $q = 2$ ,  $q = 3$ ,  $q = 4$ ). Με μπλε σημαίνονται τα σημεία μέγιστης μετακίνησης ( $D_{max}$ ), ενώ με κόκκινο τα σημεία μέγιστης τέμνουσας βάσης ( $V_{max}$ ) από κάθε μη-γραμμική ανάλυση χρονιοϊστορίας φόρτισης. Ακόμα, φαίνεται το φάσμα ικανότητας στην πραγματική και την εξιδανικευμένη του μορφή.

Από τα σημεία μέγιστης σεισμικής απόκρισης ( $D_{max}$ ,  $V_{max}$ ) παρατηρούμε ότι αυξανόμενης της έντασης ( $q = 2, q = 3, q = 4$ ) οι μεγιστες φασματικές μετατοπίσεις και επιταχύνσεις αυξάνουν, όπως είναι λογικό. Αξίζει να παρατηρηθεί ότι τα σημεία μέγιστης μετακίνησης βρίσκονται γενικώς κάτω από το φάσμα ικανότητας, ενώ τα σημεία μέγιστης τέμνουσας βάσης πάνω από αυτό. Εξάγεται έτσι το συμπέρασμα ότι η καμπύλη ικανότητας δίνει μια ικανοποιητική μέση εικόνα της καμπύλης σκελετού της κατασκευής, αφού βρίσκεται ενδιάμεσα των ακραίων αυτών σημείων.

### 6.3.2 Μεγέθη σεισμικής απόκρισης ως προς $T^*/T_{p1}$

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές για δέκα μεγέθη γενικής και τοπικής απόκρισης της κατασκευής ως προς το λόγο της περιόδου του ισοδύναμου μονοβαθμίου συστήματος προς την περίοδο του πρώτου παλμού ( $T^*/T_{p1}$ ) για τις αρχικές καταγραφές και τις τρεις κλιμακώσεις. Οι συμπαγείς γραμμές δείχνουν την τάση των επιμέρους σημείων και προκύπτουν μέσω Τοπικής Ανάλυσης Παλινδρόμησης (Local Regression Analysis) των αποτελεσμάτων. Τα μεγέθη απόκρισης παρουσιάζονται ως προς το λόγο  $T^*/T_{p1}$ , ώστε να διερευνηθεί η συσχέτισή τους ως προς το συχνοτικό περιεχόμενο κάθε καταγραφής και συγκεκριμένα ως προς το συχνοτικό περιεχόμενο του πρώτου παλμού.

Τα μεγέθη απόκρισης που μελετώνται, είναι:

- Η γενική πλαστιμότητα μετακινήσεων του συστήματος ( $\mu$ ), όπως προκύπτει από τη μετασχηματισμένη στο ισοδύναμο ΣΜΕΚ μέγιστη μετακίνηση του γεωμετρικού κέντρου του καταστρώματος (κόμβος ελέγχου στη μη-γραμμική στατική ανάλυση) προς τη μετακίνηση διαρροής από το φάσμα ικανότητας.
- Ο λόγος της πλαστιμότητας προς το συντελεστή συμπεριφοράς ( $\mu/q_y$ ). Η ποσότητα αυτή έχει ενδιαφέρον, αφού όσο μεγαλύτερες τιμές έχει, τόσο η ανελαστική μετακίνηση είναι μεγαλύτερη από τη μετακίνηση που θα είχε το σύστημα αν συμπεριφερόταν ελαστικά.
- Οι γωνιακές παραμορφώσεις των μεσοβάθρων M1-M2 στη διαμήκη διεύθυνση, οι οποίες υπολογίζονται ως η μετακίνηση στην κεφαλή του μεσοβάθρου προς το ύψος του.

$$Drift_X = \frac{\delta_{Head}}{PierHeight} \quad (6.1)$$

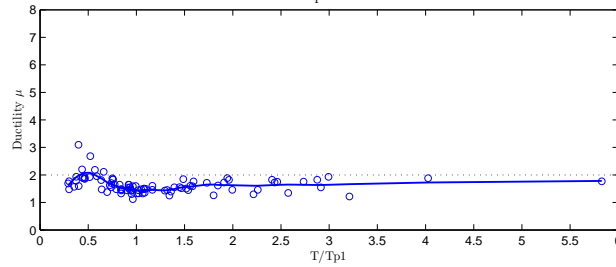
- Οι γωνιακές παραμορφώσεις των μεσοβάθρων M1-M2 στο χώρο, οι οποίες υπολογίζονται ως το διανυσματικό άθροισμα των γωνιακών παραμορφώσεων κατά τους καθολικούς άξονες  $X$  και  $Y$ .

$$Drift_{3D} = \sqrt{Drift_X^2 + Drift_Y^2} \quad (6.2)$$

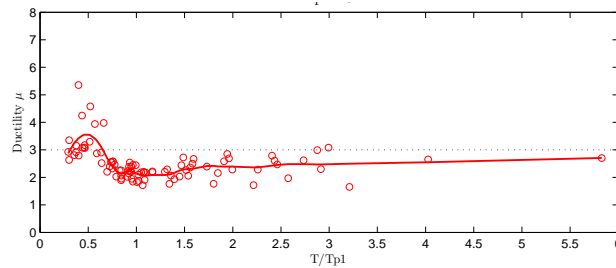
- Οι καμπυλότητες στις κεφαλές και τους πόδες των μεσοβάθρων M1-M2 στον τοπικό τους άξονα που διεγείρεται πιο έντονα από τη διαμήκη κίνηση της κατασκευής. Ο άξονας αυτός είναι ο ασθενής άξονας  $y - local$  της κιβωτιοειδούς διατομής των μεσοβάθρων.

Πλαστιμότητα μετακινήσεων ( $\mu$ )

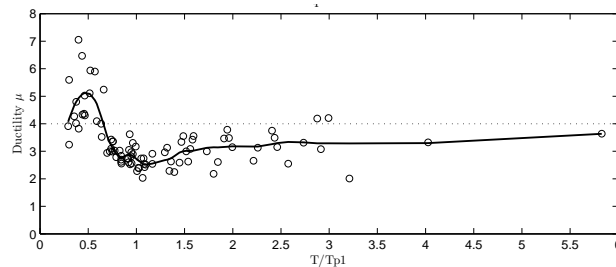
Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται ο δείκτης γενικής πλαστιμότητας του συστήματος για τις τρεις κλιμακώσεις χωριστά και μαζί.



Σχήμα 6.8: Αναπτυσσόμενη πλαστιμότητα μετακινήσεων για  $q = 2$

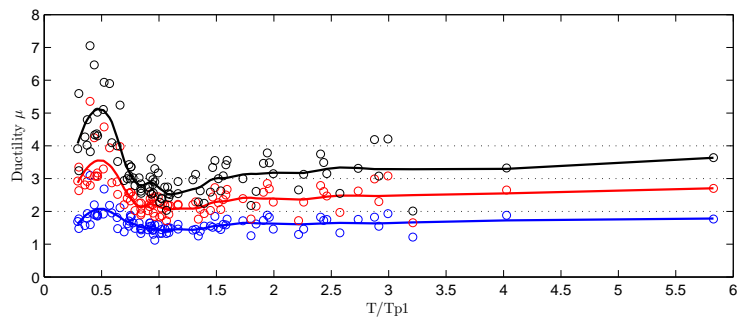


Σχήμα 6.9: Αναπτυσσόμενη πλαστιμότητα μετακινήσεων για  $q = 3$



Σχήμα 6.10: Αναπτυσσόμενη πλαστιμότητα μετακινήσεων για  $q = 4$

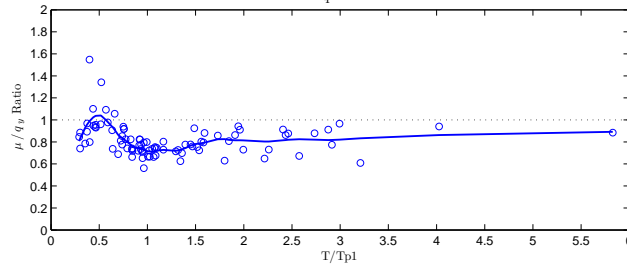
Συγκεντρωτικά,



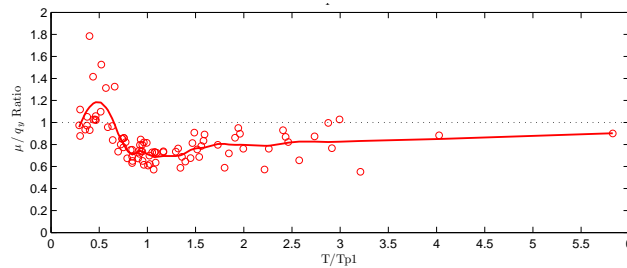
Σχήμα 6.11: Αναπτυσσόμενη πλαστιμότητα μετακινήσεων για  $q = 2$ ,  $q = 3$ ,  $q = 4$

### Λόγος πλαστιμότητας προς συντελεστή συμπεριφοράς ( $\mu/q_y$ )

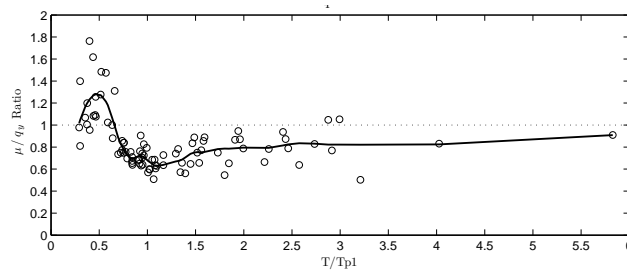
Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται ο λόγος της πλαστιμότητας προς το συντελεστή συμπεριφοράς για τις τρεις κλιμακώσεις χωριστά και μαζί.



Σχήμα 6.12: Λόγος αναπτυσσόμενης πλαστιμότητας μετακινήσεων προς το συντελεστή συμπεριφοράς για  $q = 2$



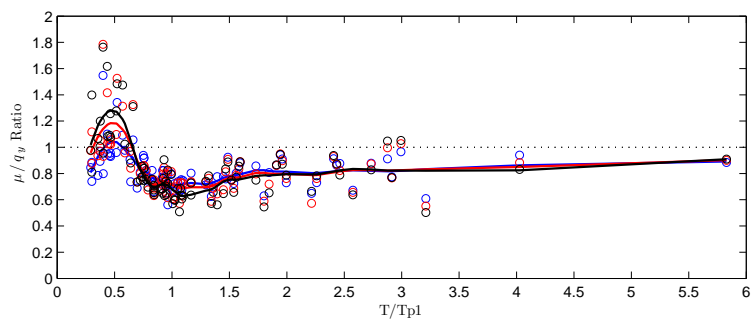
Σχήμα 6.13: Λόγος αναπτυσσόμενης πλαστιμότητας μετακινήσεων προς το συντελεστή συμπεριφοράς για  $q = 3$



Σχήμα 6.14: Λόγος αναπτυσσόμενης πλαστιμότητας μετακινήσεων προς το συντελεστή συμπεριφοράς για  $q = 4$

Συγκεντρωτικά,

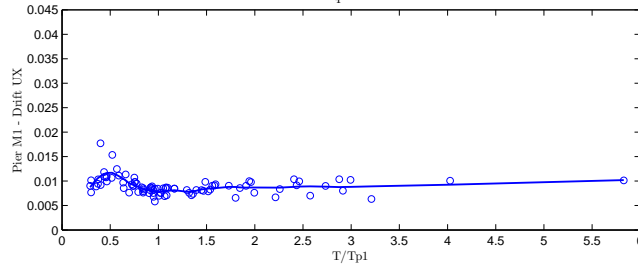




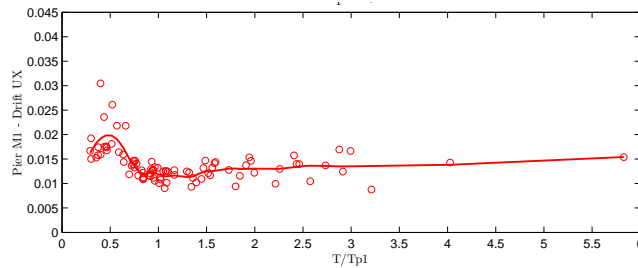
Σχήμα 6.15: Λόγος αναπτυσσόμενης πλαστιμότητας μετακινήσεων προς το συντελεστή συμπεριφοράς για  $q = 2$ ,  $q = 3$ ,  $q = 4$

Γωνιακή Παραμόρφωση Μεσοβάθρου M1 στο διαμήκη άξονα ( $Drift_X M1$ )

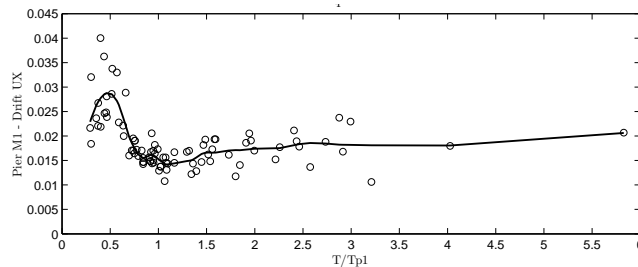
Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται η γωνιακή παραμόρφωση του Μεσοβάθρου M1 στο διαμήκη άξονα, για τις τρεις κλιμακώσεις χωριστά και μαζί.



Σχήμα 6.16:  $Drift_X M1$  για  $q = 2$

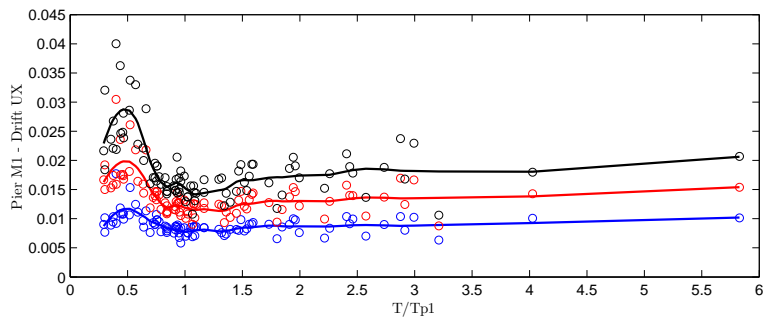


Σχήμα 6.17:  $Drift_X M1$  για  $q = 3$



Σχήμα 6.18:  $Drift_X M1$  για  $q = 4$

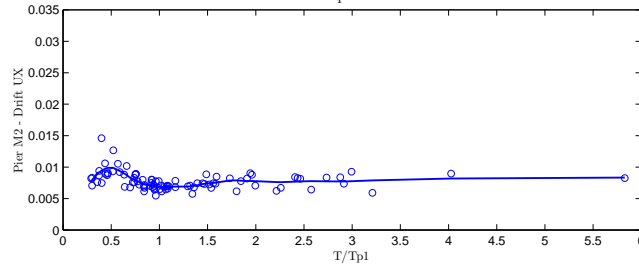
Συγκεντρωτικά,



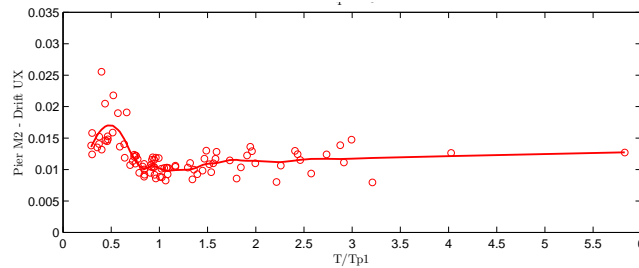
Σχήμα 6.19:  $Drift_X M1$  για  $q = 2, q = 3, q = 4$

Γωνιακή Παραμόρφωση Μεσοβάθρου M2 στο διαμήκη άξονα ( $Drift_X M2$ )

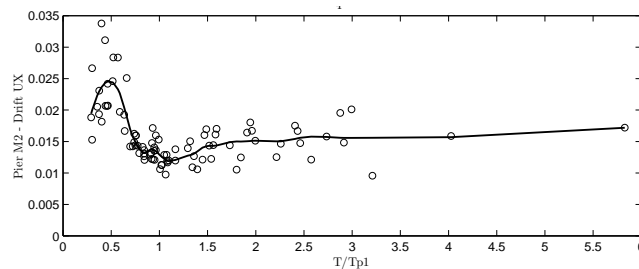
Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται η γωνιακή παραμόρφωση του Μεσοβάθρου M2 στο διαμήκη άξονα, για τις τρεις κλιμακώσεις χωριστά και μαζί.



Σχήμα 6.20:  $Drift_X M2$  για  $q = 2$

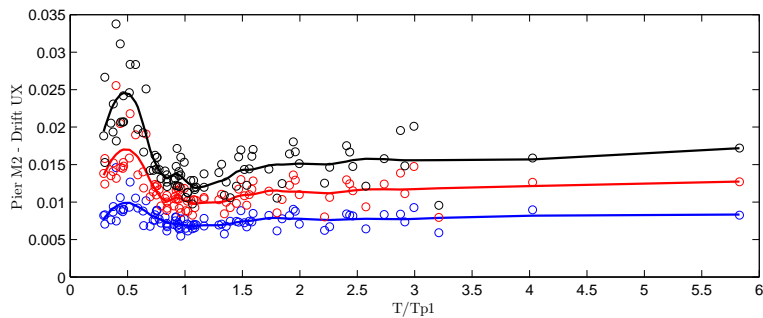


Σχήμα 6.21:  $Drift_X M2$  για  $q = 3$



Σχήμα 6.22:  $Drift_X M2$  για  $q = 4$

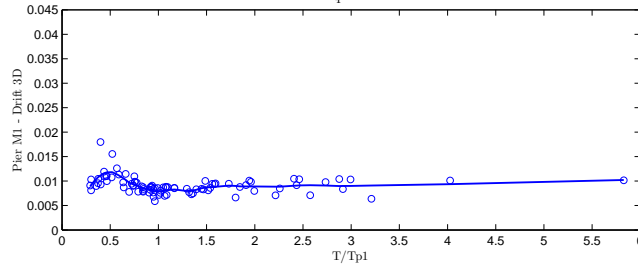
Συγκεντρωτικά,



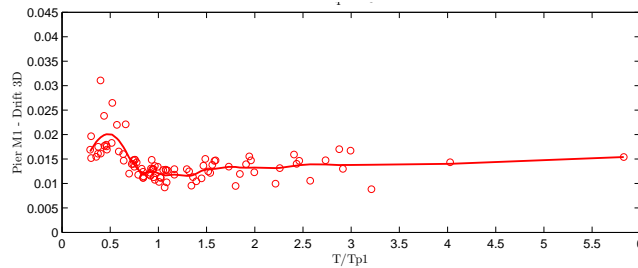
Σχήμα 6.23:  $Drift_X M2$  για  $q = 2, q = 3, q = 4$

Γωνιακή Παραμόρφωση Μεσοβάθρου M1 στο χώρο ( $Drift_{3D}M1$ )

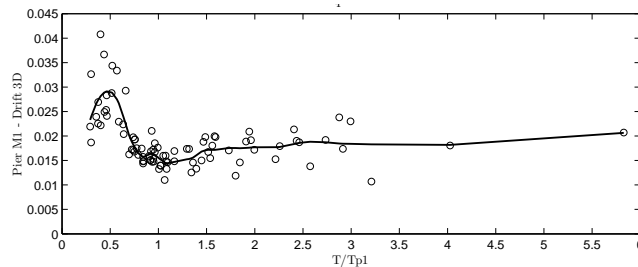
Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται η γωνιακή παραμόρφωση του Μεσοβάθρου M1 στο χώρο, για τις τρεις κλιμακώσεις χωριστά και μαζί.



Σχήμα 6.24:  $Drift_{3D}M1$  για  $q = 2$

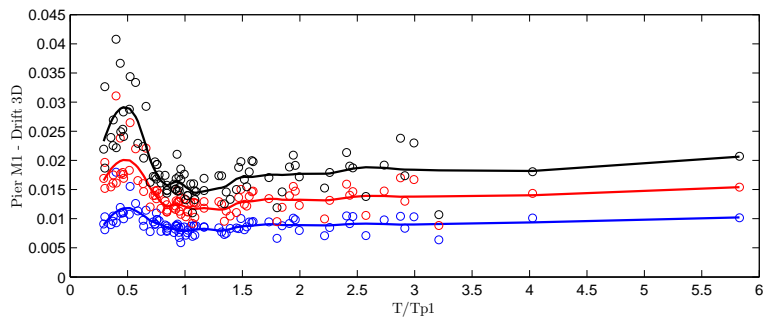


Σχήμα 6.25:  $Drift_{3D}M1$  για  $q = 3$



Σχήμα 6.26:  $Drift_{3D}M1$  για  $q = 4$

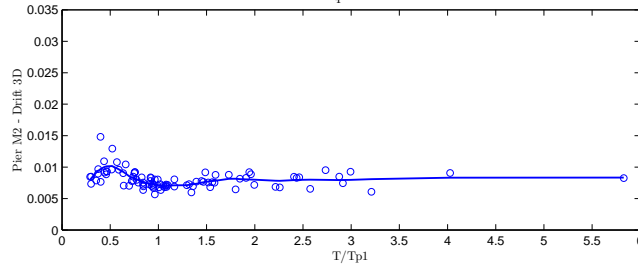
Συγκεντρωτικά,



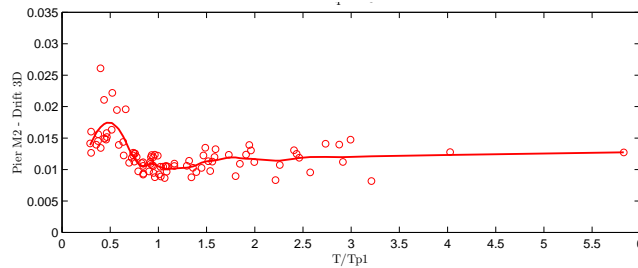
Σχήμα 6.27:  $Drift_{3D}M1$  για  $q = 2, q = 3, q = 4$

Γωνιακή Παραμόρφωση Μεσοβάθρου M2 στο χώρο ( $Drift_{3D}M2$ )

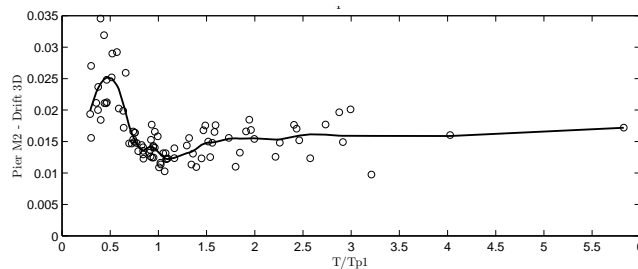
Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται η γωνιακή παραμόρφωση του Μεσοβάθρου M2 στο χώρο, για τις τρεις κλιμακώσεις χωριστά και μαζί.



Σχήμα 6.28:  $Drift_{3D}M2$  για  $q = 2$

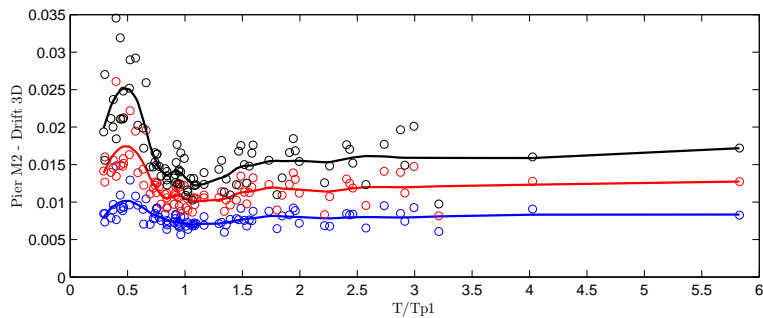


Σχήμα 6.29:  $Drift_{3D}M2$  για  $q = 3$



Σχήμα 6.30:  $Drift_{3D}M2$  για  $q = 4$

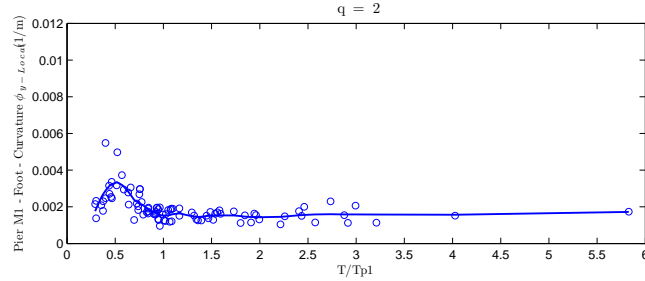
Συγκεντρωτικά,



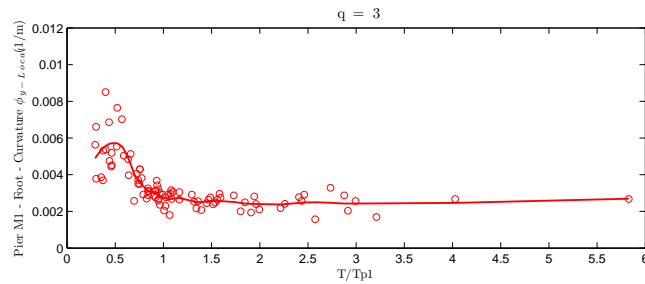
Σχήμα 6.31:  $Drift_{3D}M2$  για  $q = 2, q = 3, q = 4$

**Καμπυλότητα στον Πόδα του Μεσοβάθρου M1 ( $\phi_{y-local}M1_{Foot}$ )**

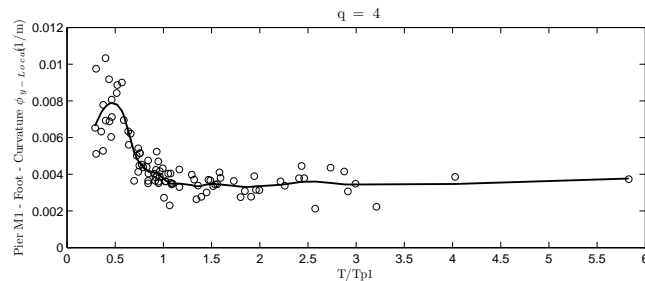
Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται η καμπυλότητα στον πόδα του Μεσοβάθρου M1 για τον τοπικό άξονα που διεγείρεται πιο έντονα από τη διαμήκη κίνηση της γέφυρας, για τις τρεις κλιμακώσεις χωριστά και μαζί.



Σχήμα 6.32: Καμπυλότητα  $\phi_{y-local}M1_{Foot}$  για  $q = 2$

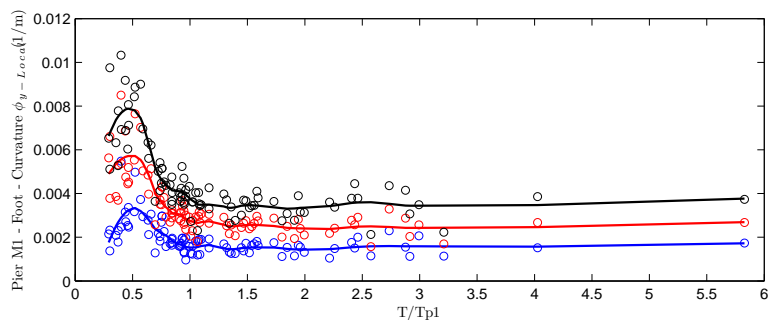


Σχήμα 6.33: Καμπυλότητα  $\phi_{y-local}M1_{Foot}$  για  $q = 3$



Σχήμα 6.34: Καμπυλότητα  $\phi_{y-local}M1_{Foot}$  για  $q = 4$

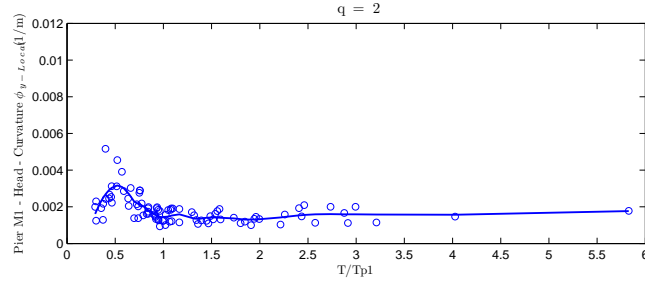
Συγκεντρωτικά,



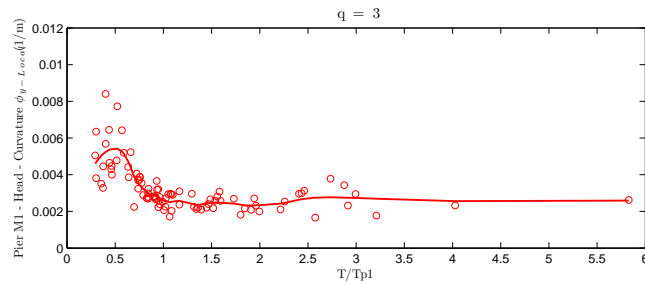
Σχήμα 6.35: Καμπυλότητα  $\phi_{y-local}M1_{Foot}$  για  $q = 2, q = 3, q = 4$

**Καμπυλότητα στην Κεφαλή του Μεσοβάθρου M1 ( $\phi_{y-local}M1_{Head}$ )**

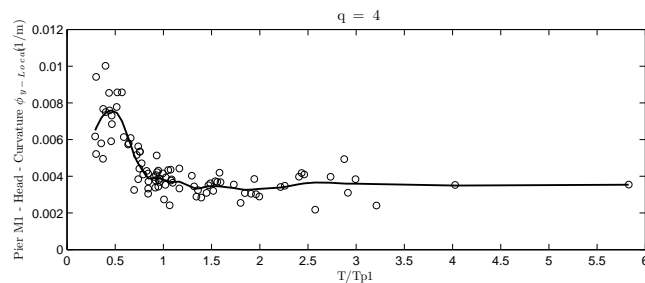
Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται η καμπυλότητα στην κεφαλή του Μεσοβάθρου M1 για τον τοπικό άξονα που διεγείρεται πιο έντονα από τη διαμήκη κίνηση της γέφυρας, για τις τρεις κλιμακώσεις χωριστά και μαζί.



Σχήμα 6.36: Καμπυλότητα  $\phi_{y-local}M1_{Head}$  για  $q = 2$

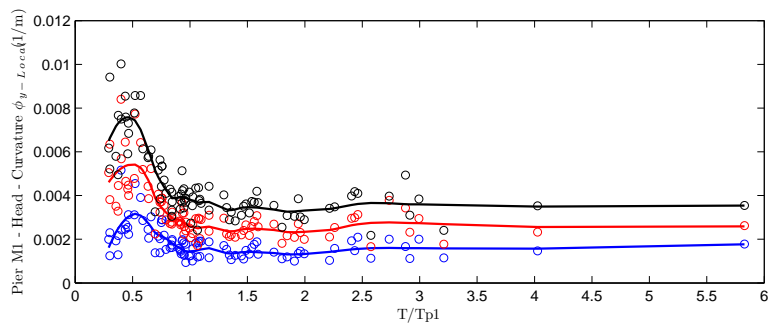


Σχήμα 6.37: Καμπυλότητα  $\phi_{y-local}M1_{Head}$  για  $q = 3$



Σχήμα 6.38: Καμπυλότητα  $\phi_{y-local}M1_{Head}$  για  $q = 4$

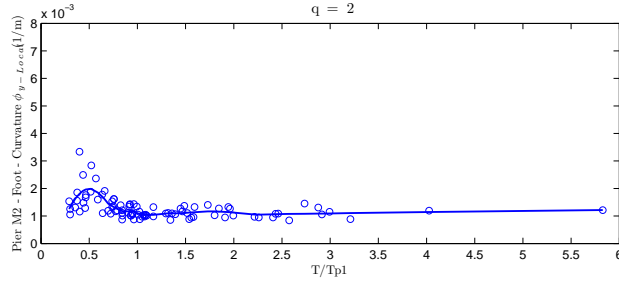
Συγκεντρωτικά,



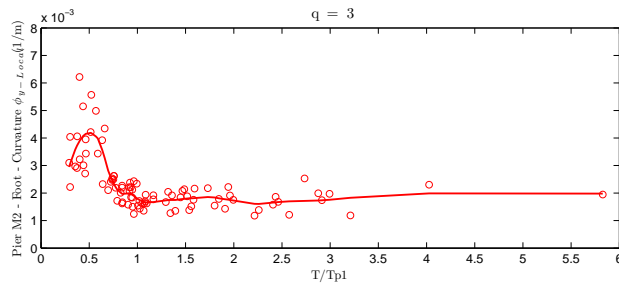
Σχήμα 6.39: Καμπυλότητα  $\phi_{y-local}M1_{Head}$  για  $q = 2, q = 3, q = 4$

**Καμπυλότητα στον Πόδα του Μεσοβάθρου M2 ( $\phi_{y-local}M2_{Foot}$ )**

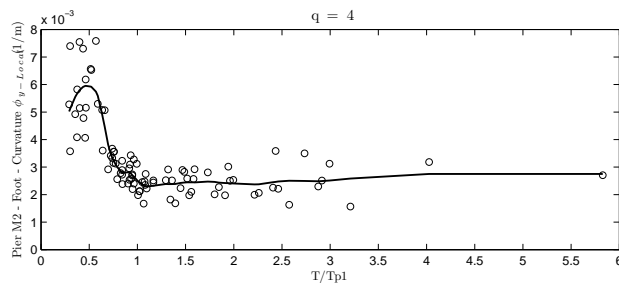
Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται η καμπυλότητα στον πόδα του Μεσοβάθρου M2 για τον τοπικό άξονα που διεγείρεται πιο έντονα από τη διαμήκη κίνηση της γέφυρας, για τις τρεις κλιμακώσεις χωριστά και μαζί.



Σχήμα 6.40: Καμπυλότητα  $\phi_{y-local}M2_{Foot}$  για  $q = 2$

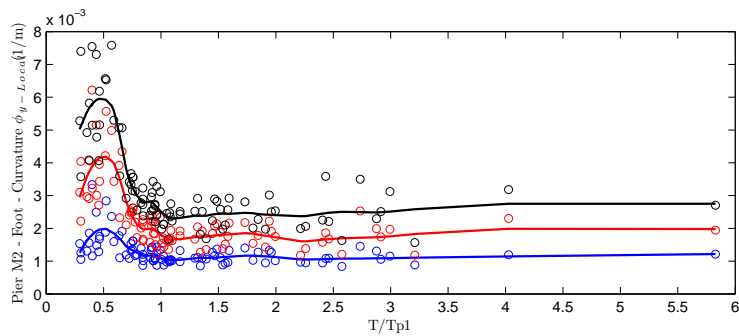


Σχήμα 6.41: Καμπυλότητα  $\phi_{y-local}M2_{Foot}$  για  $q = 3$



Σχήμα 6.42: Καμπυλότητα  $\phi_{y-local}M2_{Foot}$  για  $q = 4$

Συγκεντρωτικά,

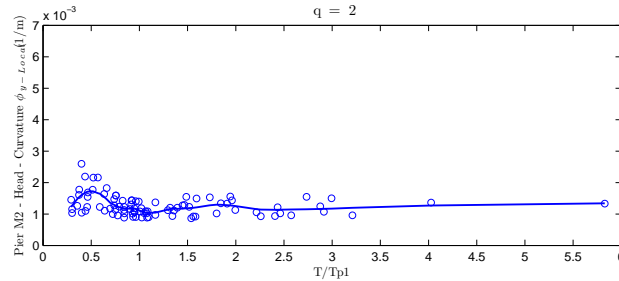


Σχήμα 6.43: Καμπυλότητα  $\phi_{y-local}M2_{Foot}$  για  $q = 2, q = 3, q = 4$

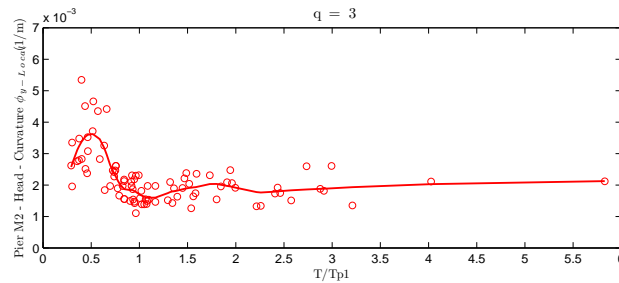


Καμπυλότητα στην Κεφαλή του Μεσοβάθρου M2 ( $\phi_{y-local}M2_{Head}$ )

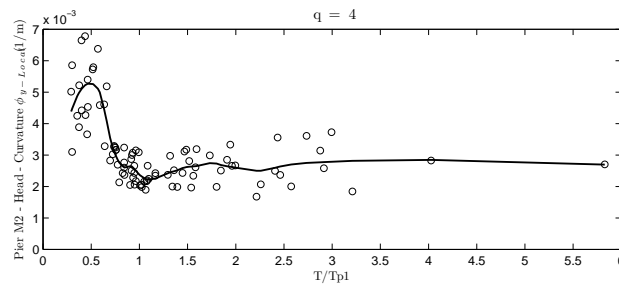
Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται η καμπυλότητα στην κεφαλή του Μεσοβάθρου M1 για τον τοπικό άξονα που διεγείρεται πιο έντονα από τη διαμήκη κίνηση της γέφυρας, για τις τρεις κλιμακώσεις χωριστά και μαζί.



Σχήμα 6.44: Καμπυλότητα  $\phi_{y-local}M2_{Head}$  για  $q = 2$

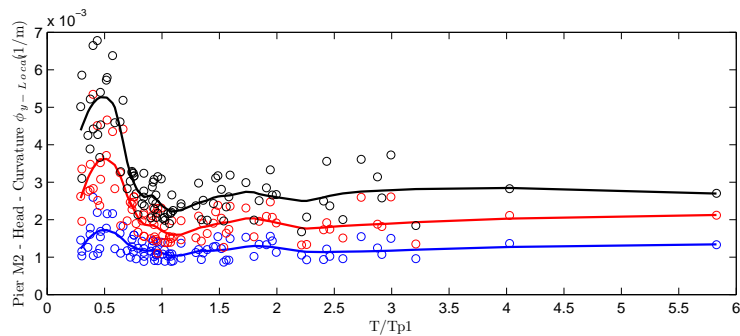


Σχήμα 6.45: Καμπυλότητα  $\phi_{y-local}M2_{Head}$  για  $q = 3$



Σχήμα 6.46: Καμπυλότητα  $\phi_{y-local}M2_{Head}$  για  $q = 4$

Συγκεντρωτικά,



Σχήμα 6.47: Καμπυλότητα  $\phi_{y-local}M2_{Head}$  για  $q = 2, q = 3, q = 4$

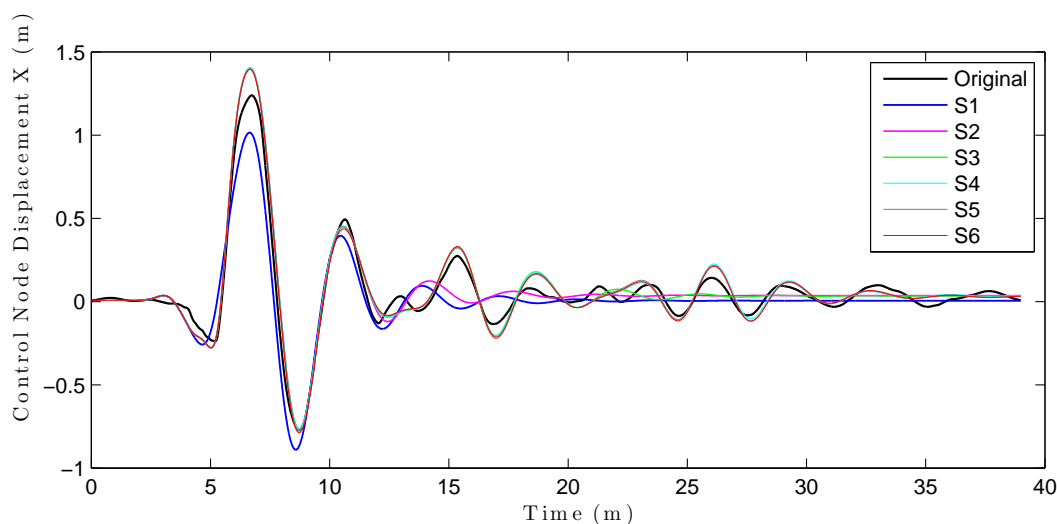
Είναι φανερό ότι όλα τα μεγέθη απόκρισης εμφανίζουν αυξημένες τιμές περί την περιοχή  $T^*/T_{p1} = 0.5$ . Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν τις μελέτες των Tothong and Cornell (2006), οι οποίοι παρατήρησαν ότι για περιόδους κοντά στη μισή περίοδο του παλμού παρατηρούνται αυξημένες τιμές του λόγου της πλαστιμότητας προς το συντελεστή συμπεριφοράς ( $\mu/q_y$ ). Δηλαδή στη συχνοτική αυτή περιοχή αναμένονται μεγάλες ανελαστικές απαιτήσεις. Βλέπουμε ότι αυτό επιβεβαιώνεται από τις αναλύσεις, τόσο για γενικούς δείκτες απόκρισης, όπως είναι η γενική πλαστιμότητα μετακινήσεων του συστήματος, όσο και για τοπικούς, όπως είναι οι καμπυλότητες στις ακραίες διατομές των μεσοβάθρων.

Παρατηρείται ακόμα ότι οι μικρότερες τιμές όλων των μεγεθών απόκρισης εμφανίζονται στις συχνοτικές περιοχές κοντά στην περίοδο του πρώτου παλμού, ενώ για μεγαλύτερους λόγους  $T^*/T_{p1}$ , τα αποτελέσματα δεν εμφανίζουν έντονες αυξήσεις ή μειώσεις.

## 6.4 Απόκριση της κατασκευής για τα αθροίσματα των παλμών

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται κάποια μεγέθη απόκρισης της κατασκευής για τα συνθετικά επιταχυνσιογραφήματα που κατασκευάστηκαν ως αθροίσματα πρώτων παλμών και συγκρίνονται ποιοτικά με την απόκριση της κατασκευής για την αντίστοιχη αρχική καταγραφή. Η σύγκριση αυτή γίνεται για τρεις σεισμικές καταγραφές και για τιμή του συντελεστή συμπεριφοράς  $q = 4$ .

**Καταγραφή από το σταθμό El Centro Array #4 για το σεισμό του Imperial Valley (California - 1979)** Στο σχήμα 6.48 παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες μετακίνησης του κόμβου της κλειδας του κεντρικού ανοίγματος του καταστρώματος (κόμβος ελέγχου) κατά το διαμήκη άξονα της κατασκευής, για την αρχική καταγραφή και τα επιμέρους αθροίσματα των παλμών.

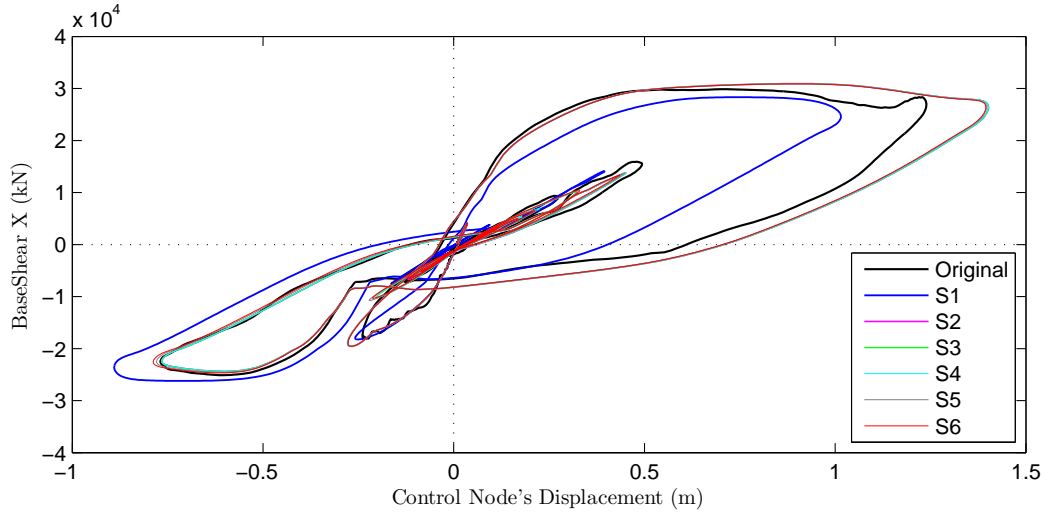


Σχήμα 6.48: Μετακίνηση του κόμβου ελέγχου κατά το διαμήκη άξονα για  $q = 4$ .

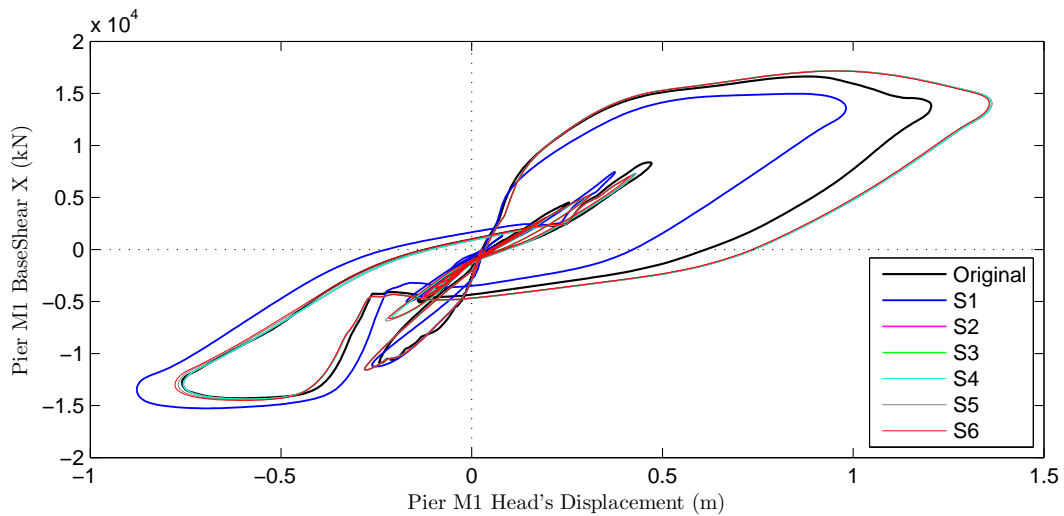
Ο πρώτος παλμός (μπλε καμπύλη) δίνει μια πρώτη καλή εικόνα του πιο σημαντικού κύκλου της απόκρισης. Βλέπουμε ότι με τη θεώρηση των δύο πρώτων παλμών (μοβ καμπύλη) η εικόνα βελτιώνεται σημαντικά, ενώ για τους ανώτερους παλμούς η συμπεριφορά συγκλίνει σε αυτή για τους δύο πρώτους παλμούς. Δηλαδή, η θεώρηση των ανώτερων παλμών πέραν του δεύτερου δεν προσφέρει ουσιαστικά όσον αφορά τη μέγιστη απόκριση της κατασκευής για την εν λόγω καταγραφή.

Η εικόνα αυτή διατηρείται αν παρατηρήσουμε βρόχους υστέρησης της απόκρισης σε επίπεδο: Τέμνουσας Βάσης-Μετακίνησης Κόμβου Ελέγχου της κατασκευής (σχήμα 6.49), Τέμνουσας Βάσης-Μετακίνησης Κεφαλής των Μεσοβάθρων (σχήματα 6.50 και 6.51 για τα μεσόβαθρα M1

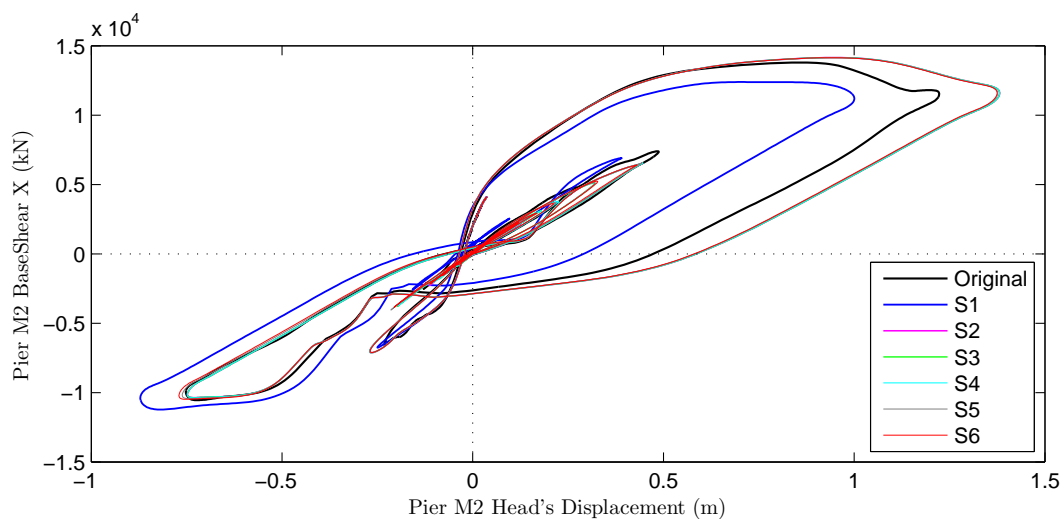
και M2 αντίστοιχα) ή Ροπής-Καμπυλότητας στις Κεφαλές και τους Πόδες των Μεσοβάθρων για τον ασθενή τοπικό άξονα της διατομής τους, που διεγείρεται πιο έντονα από τη διαμήκη κίνηση της γέφυρας (σχήματα 6.52, 6.53, 6.54 και 6.55).



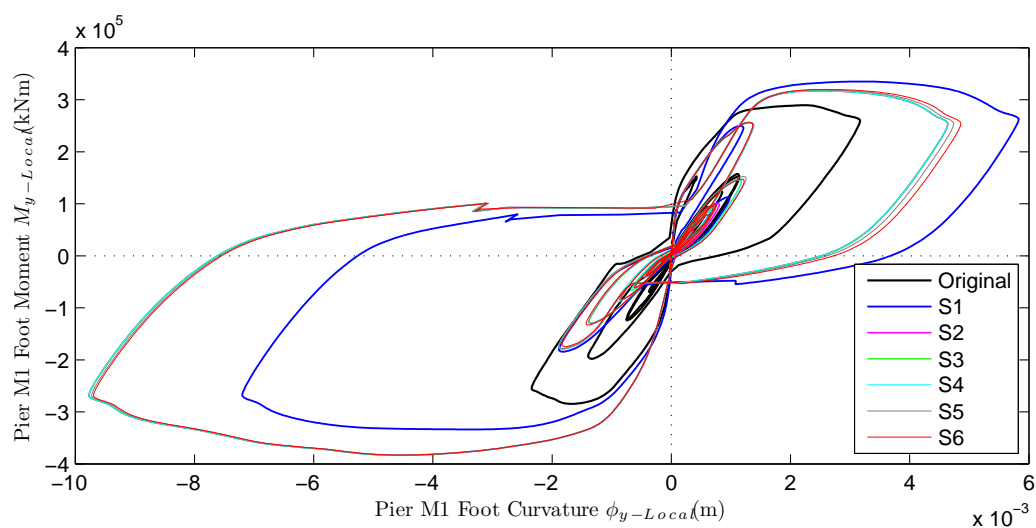
Σχήμα 6.49: Βρόχος υστέρησης σε επίπεδο Τέμνουσας Βάσης-Μετακίνησης Κόμβου Ελέγχου) για  $q = 4$ .



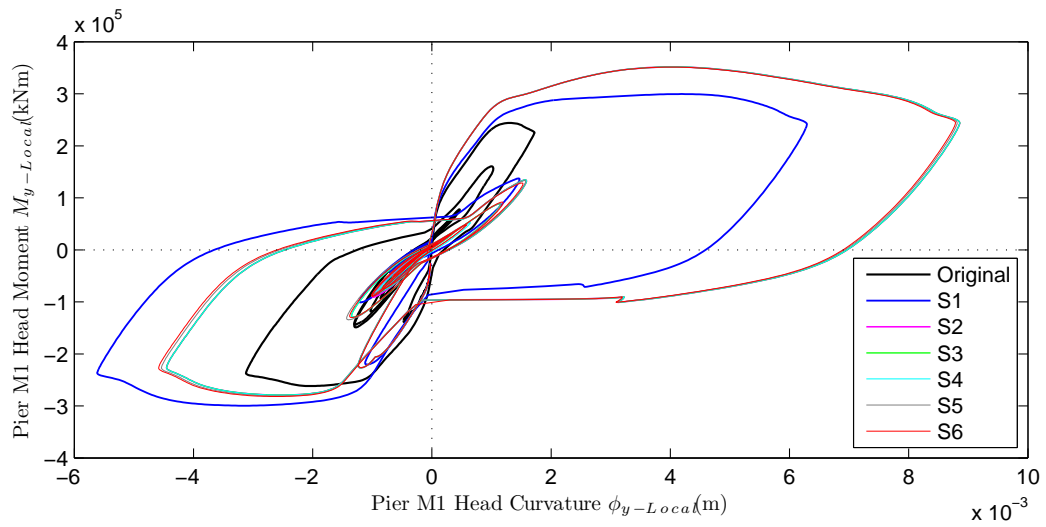
Σχήμα 6.50: Βρόχος υστέρησης σε επίπεδο Τέμνουσας Βάσης Μεσοβάθρου M1-Μετακίνησης Κεφαλής για  $q = 4$ .



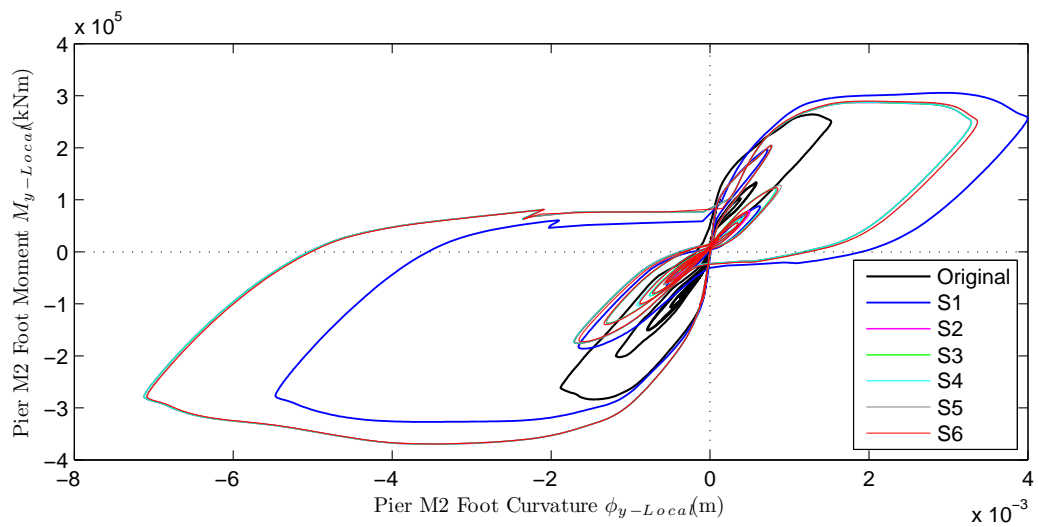
Σχήμα 6.51: Βρόχος υστέρησης σε επίπεδο Τέμνουσας Βάσης Μεσοβάθρου Μ2-Μετακίνησης Κεφαλής για  $q = 4$ .



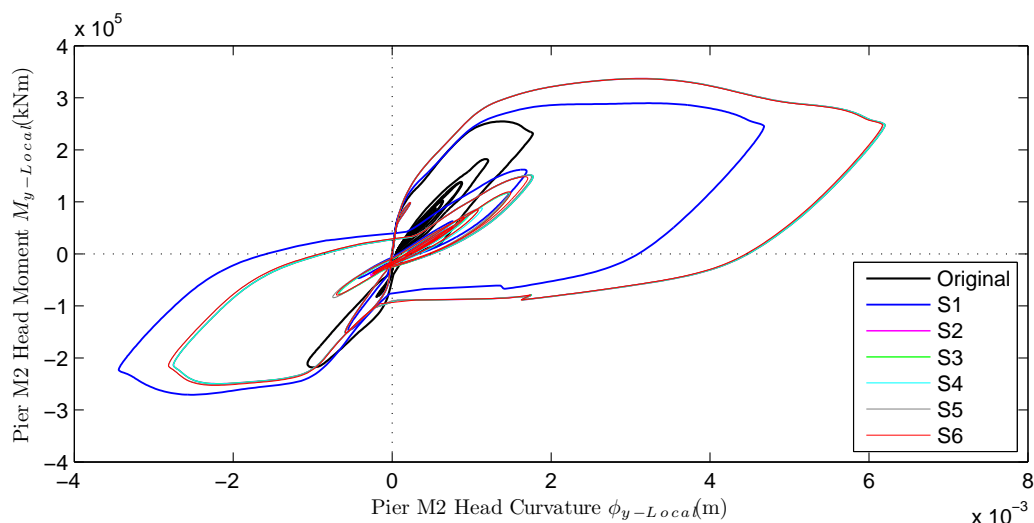
Σχήμα 6.52: Βρόχος υστέρησης σε επίπεδο Ροπής-Καμπυλότητας στον Πόδα του Μεσοβάθρου Μ1 για  $q = 4$ .



Σχήμα 6.53: Βρόχος υστέρησης σε επίπεδο Ροπής-Καμπυλότητας στην Κεφαλή του Μεσοβάθρου M1 για  $q = 4$ .

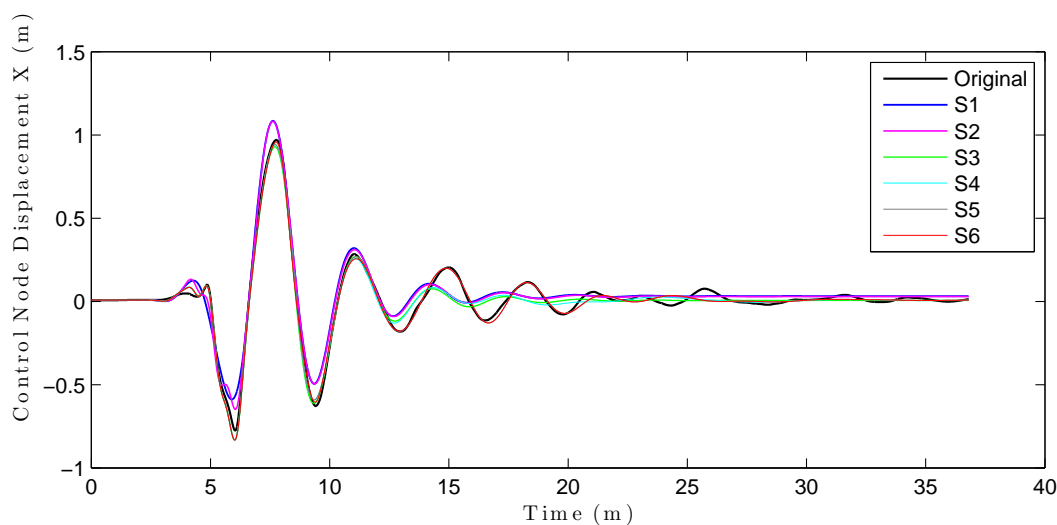


Σχήμα 6.54: Βρόχος υστέρησης σε επίπεδο Ροπής-Καμπυλότητας στον Πόδα του Μεσοβάθρου M2 για  $q = 4$ .



Σχήμα 6.55: Βρόχος υστέρησης σε επίπεδο Ροπής-Καμπυλότητας στην Κεφαλή του Μεσοβάθρου M2 για  $q = 4$ .

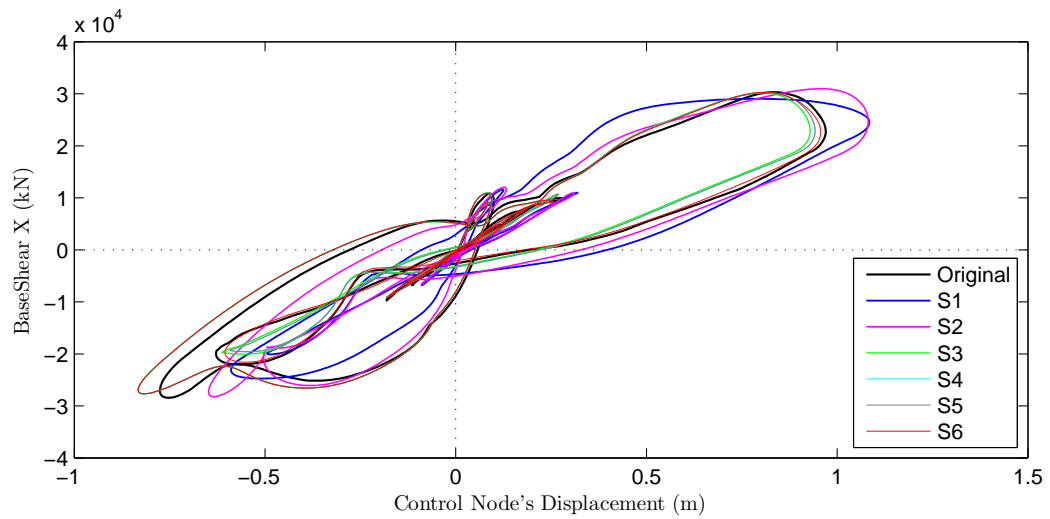
**Καταγραφή από το σταθμό El Centro Array #7 για το σεισμό του Imperial Valley (California - 1979)** Στο σχήμα 6.56 παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες μετακίνησης του κόμβου της κλείδας του κεντρικού ανοίγματος του καταστρώματος (κόμβος ελέγχου) κατά το διαμήκη άξονα της κατασκευής, για την αρχική καταγραφή και τα επιμέρους αθροίσματα των παλμών.



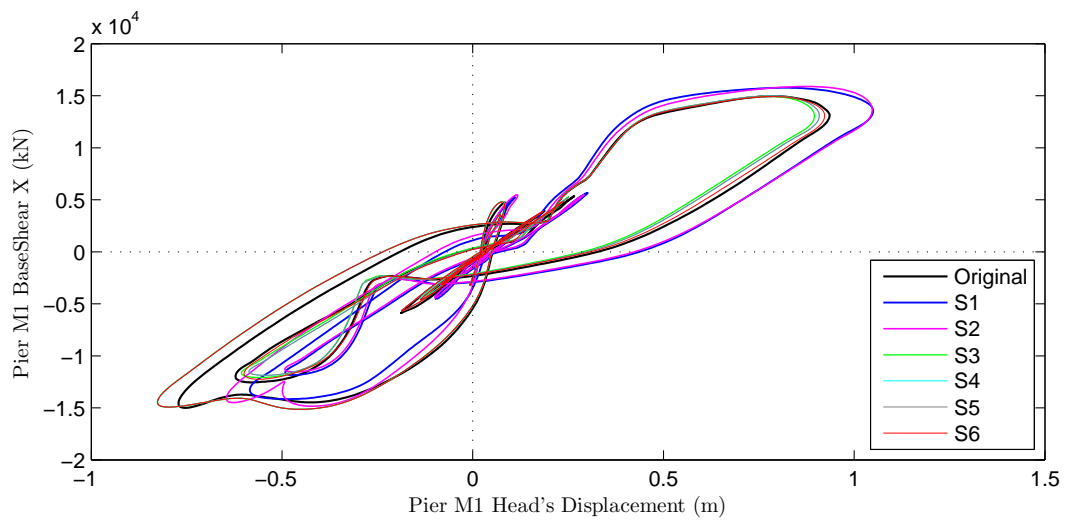
Σχήμα 6.56: Μετακίνηση του κόμβου ελέγχου κατά το διαμήκη άξονα για  $q = 4$ .

Ο πρώτος παλμός (μπλε καμπύλη) περιγράφει ικανοποιητικά τον πιο σημαντικό κύκλο της απόκρισης. Βλέπουμε ότι με τη θεώρηση των δύο πρώτων παλμών (μοβ καμπύλη) η εικόνα δε βελτιώνεται σημαντικά, ενώ με τη θεώρηση των ανώτερων παλμών βλέπουμε σταδιακή σύγκλιση των αποτελεσμάτων στα αποτελέσματα για την αρχική καταγραφή.

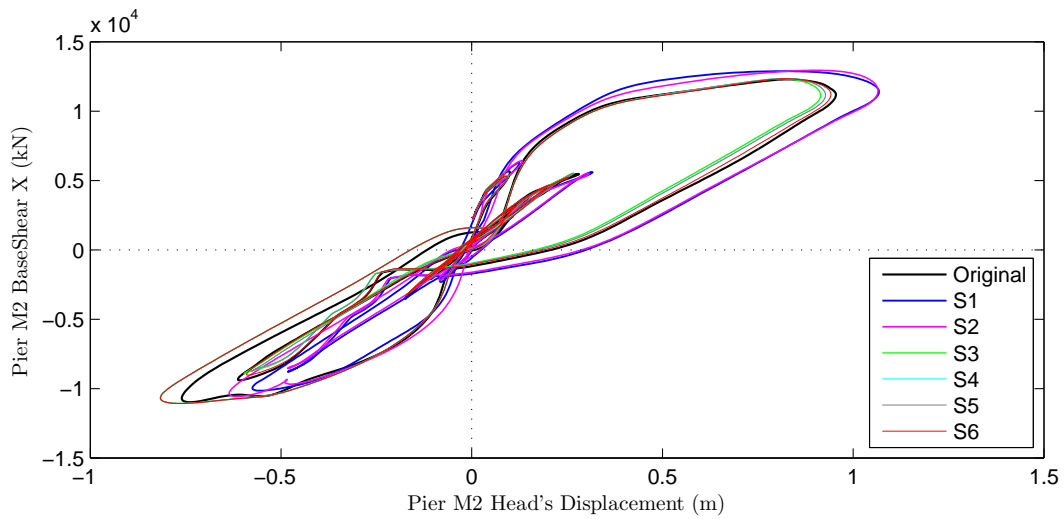
Η εικόνα αυτή γίνεται πιο εμφανής αν παρατηρήσουμε βρόχους υστέρησης της απόκρισης σε επίπεδο: Τέμνουσας Βάσης-Μετακίνησης Κόμβου Ελέγχου (σχήμα 6.57), Τέμνουσας Βάσης-Μετακίνησης Κεφαλής των Μεσοβάθρων (σχήματα 6.58 και 6.59 για τα μεσόβαθρα M1 και M2 αντίστοιχα) ή Ροπής-Καμπυλότητας στις Κεφαλές και τους Πόδες των Μεσοβάθρων για τον ασθενή τοπικό άξονα της διατομής τους που διεγείρεται πιο έντονα από τη διαμήκη κίνηση της γέφυρας (σχήματα 6.60, 6.61, 6.62 και 6.63).



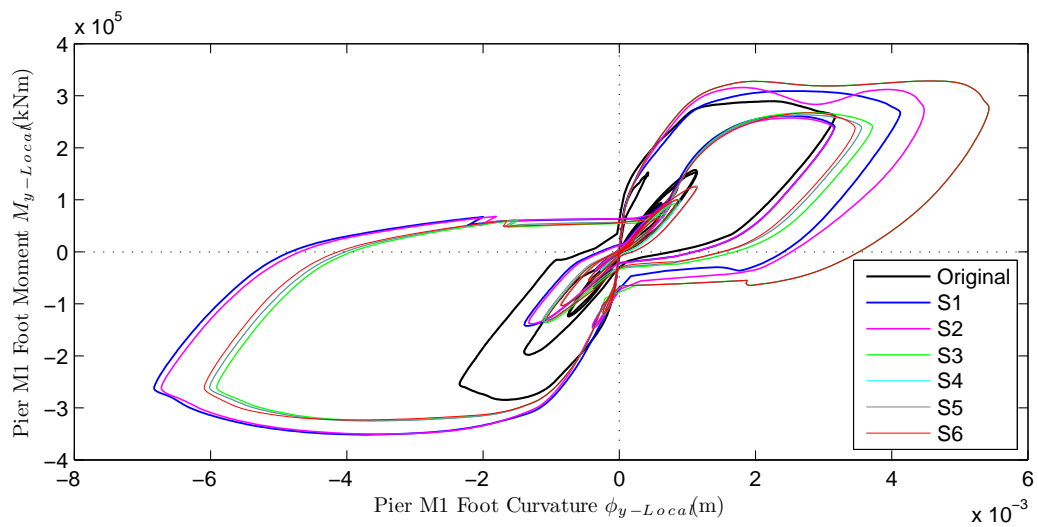
Σχήμα 6.57: Βρόχος υστέρησης σε επίπεδο Τέμνουσας Βάσης-Μετακίνησης Κόμβου Ελέγχου) για  $q = 4$ .



Σχήμα 6.58: Βρόχος υστέρησης σε επίπεδο Τέμνουσας Βάσης Μεσοβάθρου M1-Μετακίνησης Κεφαλής για  $q = 4$ .

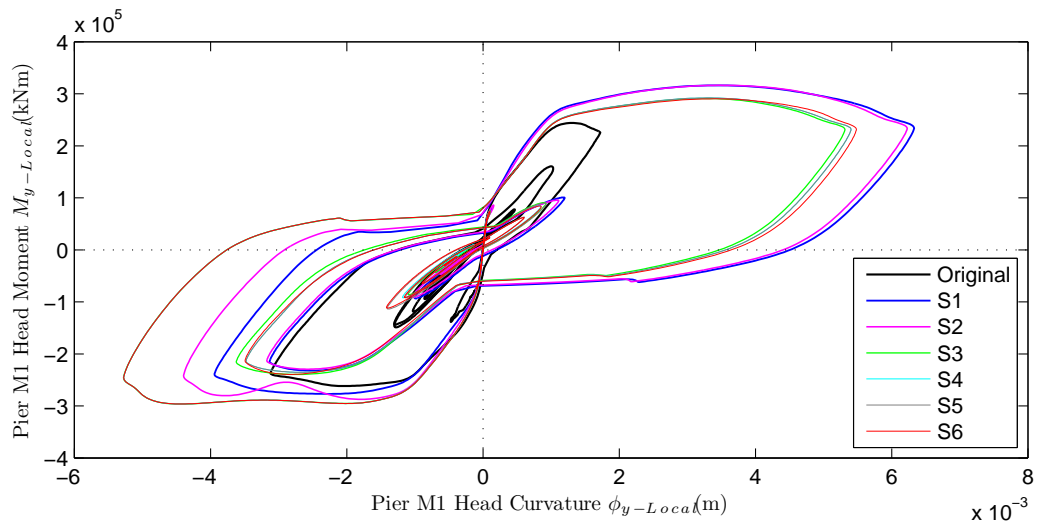


Σχήμα 6.59: Βρόχος υστέρησης σε επίπεδο Τέμνουσας Βάσης Μεσοβάθρου M2-Μετακίνησης Κεφαλής για  $q = 4$ .

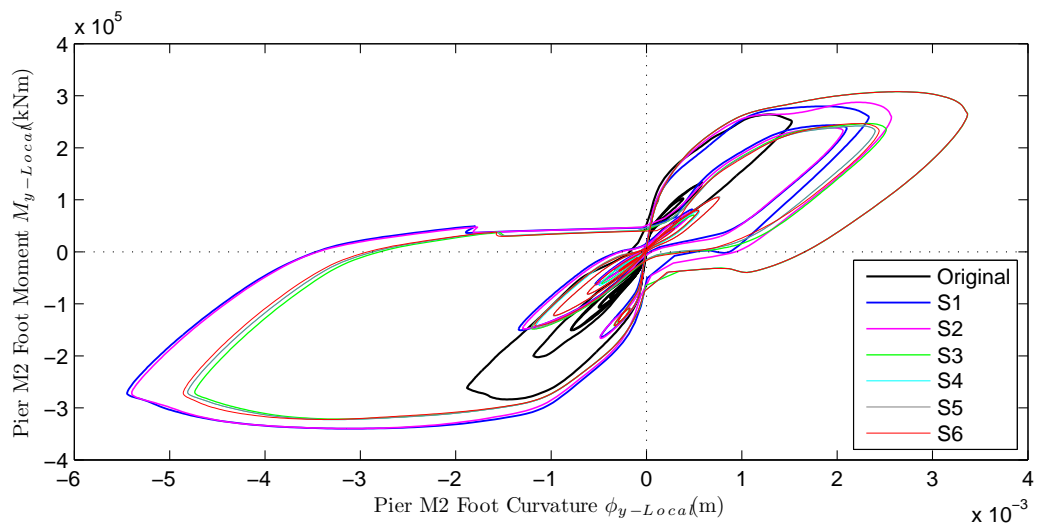


Σχήμα 6.60: Βρόχος υστέρησης σε επίπεδο Ροπής-Καμπυλότητας στον Πόδα του Μεσοβάθρου M1 για  $q = 4$ .

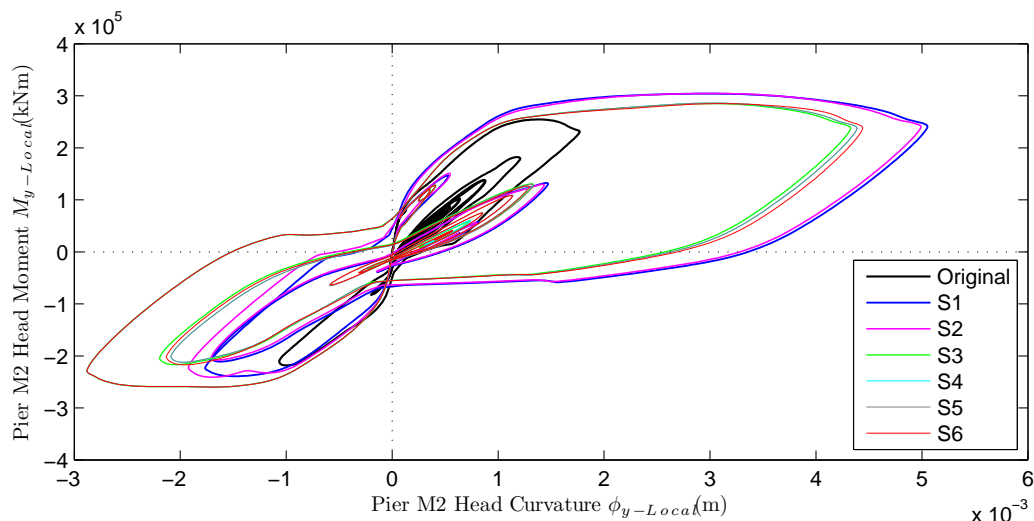




Σχήμα 6.61: Βρόχος υστέρησης σε επίπεδο Ροπής-Καμπυλότητας στην Κεφαλή του Μεσοβάθρου M1 για  $q = 4$ .

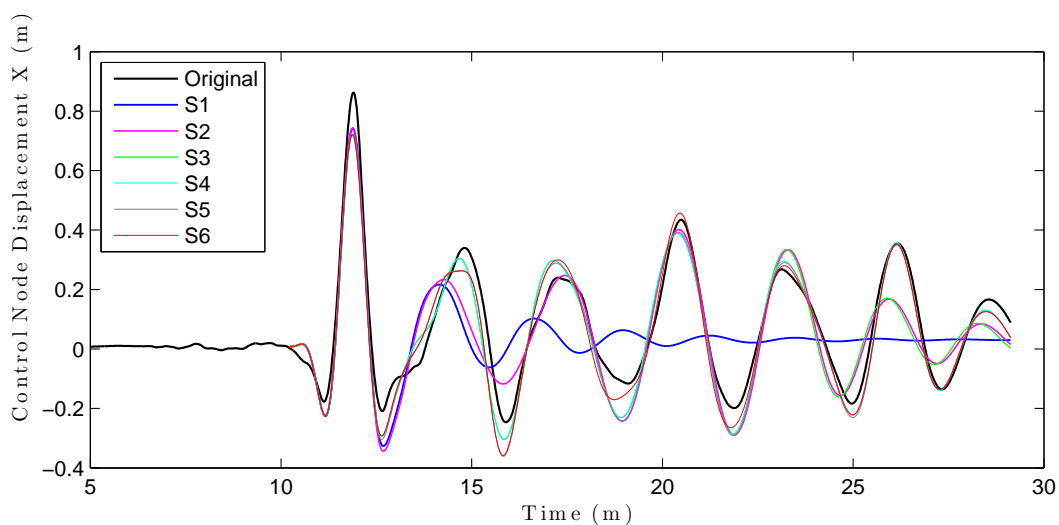


Σχήμα 6.62: Βρόχος υστέρησης σε επίπεδο Ροπής-Καμπυλότητας στον Πόδα του Μεσοβάθρου M2 για  $q = 4$ .



Σχήμα 6.63: Βρόχος υστέρησης σε επίπεδο Ροπής-Καμπυλότητας στην Κεφαλή του Μεσοβάθρου M2 για  $q = 4$ .

**Καταγραφή από το σταθμό SMART1 M07 για το σεισμικό γεγονός Taiwan SMART1(40) (1986)** Στο σχήμα 6.64 παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες μετακίνησης του κόμβου της κλείδας του κεντρικού ανοίγματος του καταστρώματος (κόμβος ελέγχου) κατά το διαμήκη άξονα της κατασκευής, για την αρχική καταγραφή και τα επιμέρους αθροίσματα των παλμών.

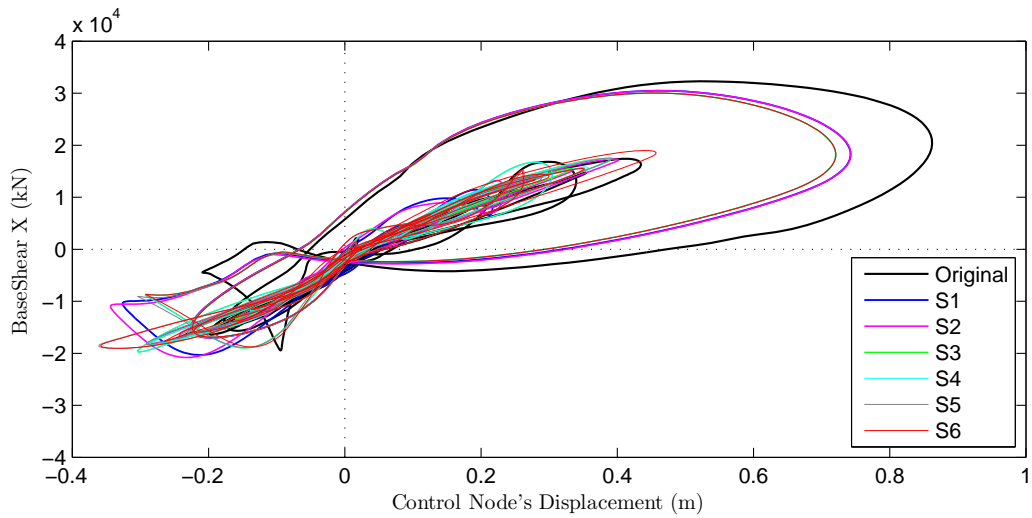


Σχήμα 6.64: Μετακίνηση του κόμβου ελέγχου κατά το διαμήκη άξονα για  $q = 4$ .

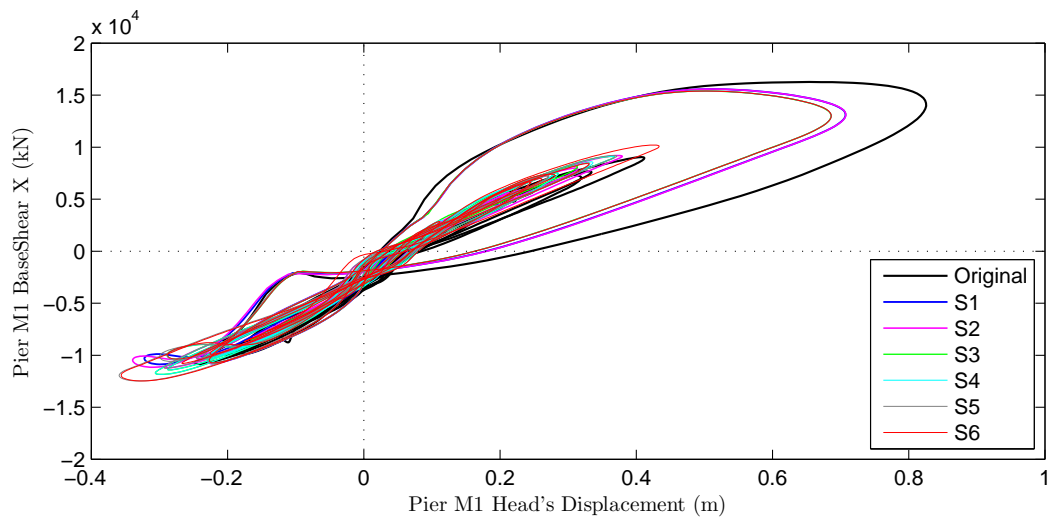
Ο πρώτος παλμός (μπλε καμπύλη) περιγράφει ικανοποιητικά τον πιο σημαντικό κύκλο της απόκρισης. Με τη θεώρηση των δύο πρώτων παλμών (μοβ καμπύλη) η εικόνα δε βελτιώνεται σημαντικά, ενώ η απόκλιση της απόκρισης της κατασκευής για τα αθροίσματα των παλμών σε σχέση με την απόκριση για την αρχική εδαφική κίνηση παραμένει μη αποδεκτή ακόμα και για τη θεώρηση των έξι παλμών.

Η εικόνα αυτή γίνεται πιο εμφανής αν παρατηρήσουμε βρόχους υστέρησης της κατασκευής σε επίπεδο: Τέμνουσας Βάσης-Μετακίνησης Κόμβου Ελέγχου (σχήμα 6.65), Τέμνουσας Βάσης-Μετακίνησης Κεφαλής των Μεσοβάθρων (σχήματα 6.66 και 6.67 για τα μεσόβαθρα M1 και M2 αντίστοιχα) ή Ροπής-Καμπυλότητας στις Κεφαλές και τους Πόδες των Μεσοβάθρων για τον ασθενή τοπικό άξονα της διατομής τους που διεγείρεται πιο έντονα από τη διαμήκη κίνηση της

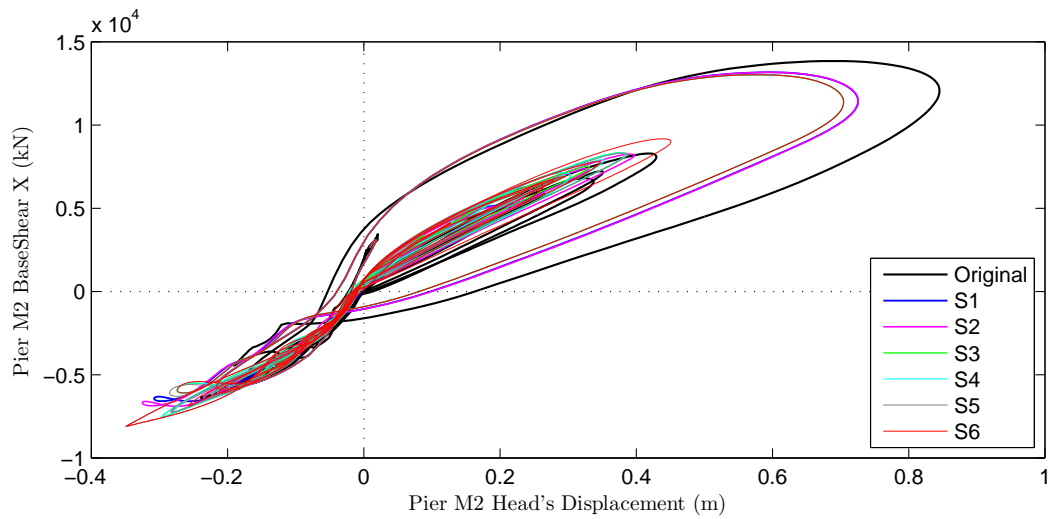
γέφυρας (σχήματα 6.68, 6.69, 6.70 και 6.71).



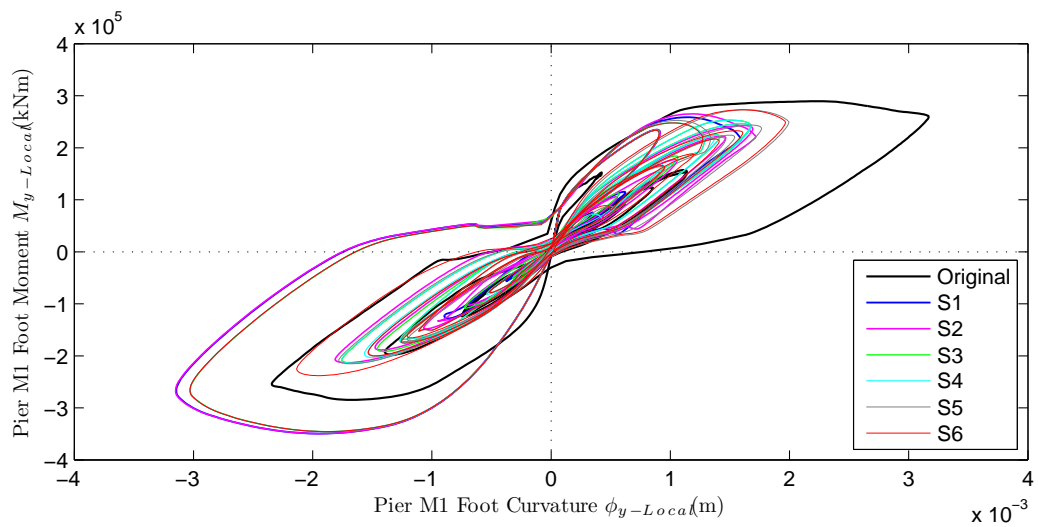
Σχήμα 6.65: Βρόχος υστέρησης σε επίπεδο Τέμνουσας Βάσης-Μετακίνησης Κόμβου Ελέγχου) για  $q = 4$ .



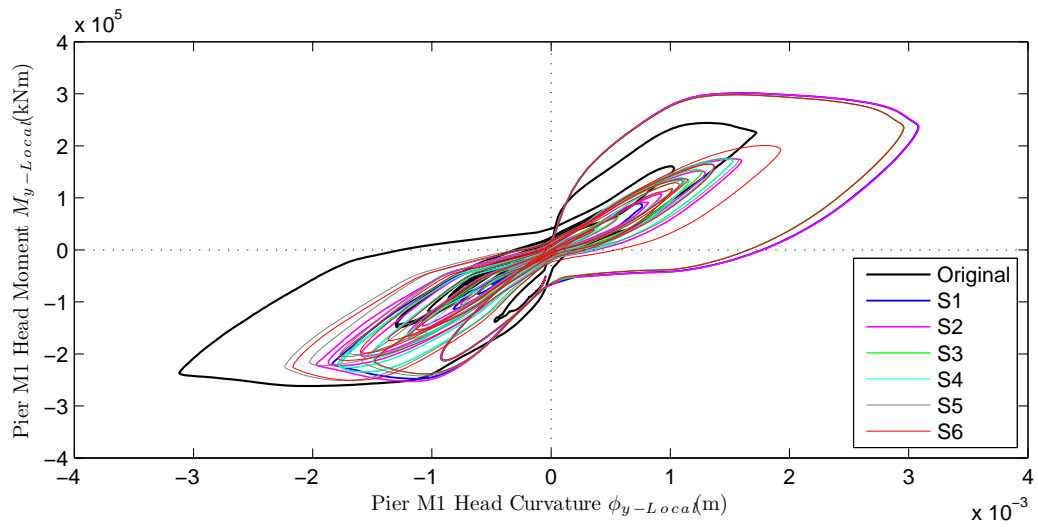
Σχήμα 6.66: Βρόχος υστέρησης σε επίπεδο Τέμνουσας Βάσης Μεσοβάθρου M1-Μετακίνησης Κεφαλής για  $q = 4$ .



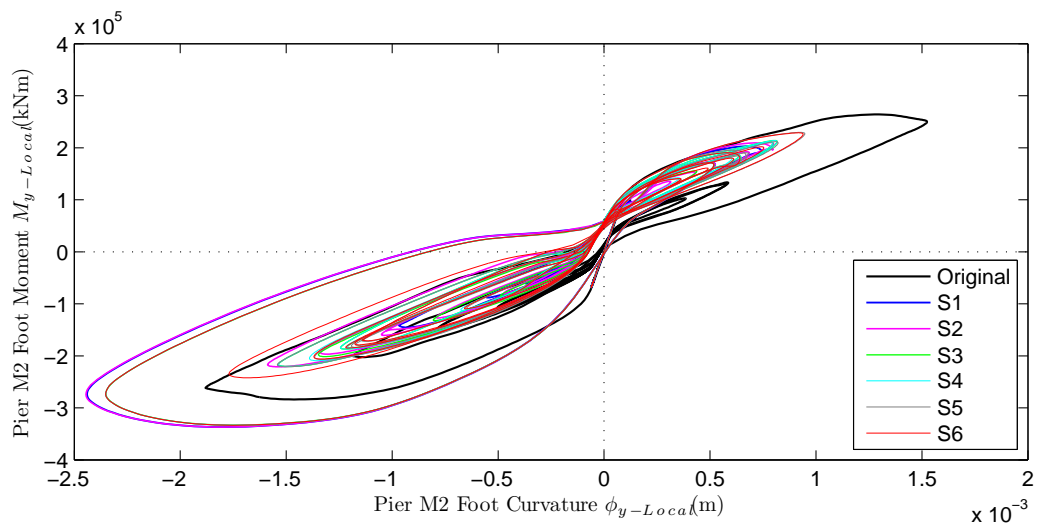
Σχήμα 6.67: Βρόχος υστέρησης σε επίπεδο Τέμνουσας Βάσης Μεσοβάθρου M2-Μετακίνησης Κεφαλής για  $q = 4$ .



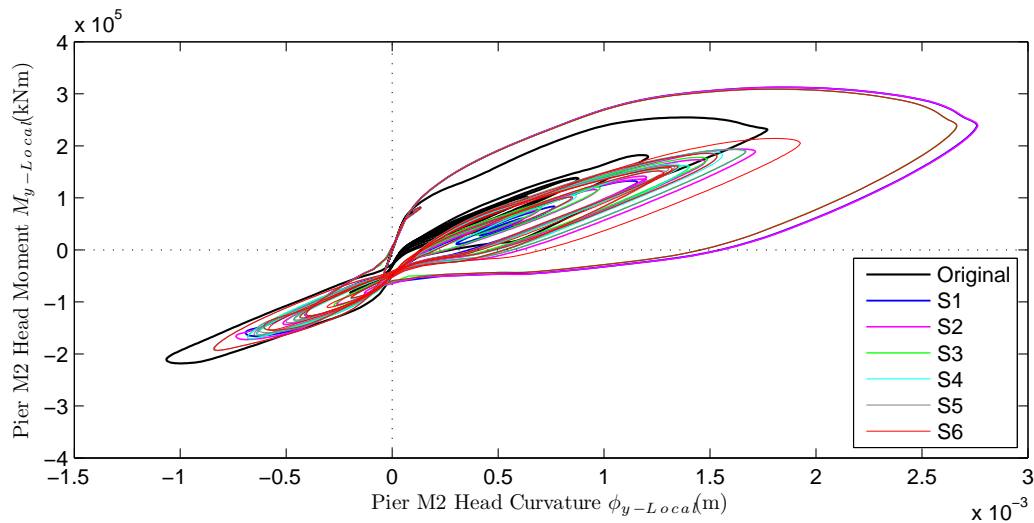
Σχήμα 6.68: Βρόχος υστέρησης σε επίπεδο Ροπής-Καμπυλότητας στον Πόδα του Μεσοβάθρου M1 για  $q = 4$ .



Σχήμα 6.69: Βρόχος υστέρησης σε επίπεδο Ροπής-Καμπυλότητας στην Κεφαλή του Μεσοβάθρου M1 για  $q = 4$ .



Σχήμα 6.70: Βρόχος υστέρησης σε επίπεδο Ροπής-Καμπυλότητας στον Πόδα του Μεσοβάθρου M2 για  $q = 4$ .



Σχήμα 6.71: Βρόχος υστέρησης σε επίπεδο Ροπής-Καμπυλότητας στην Κεφαλή του Μεσοβάθρου M2 για  $q = 4$ .

Είναι φανερό ότι ανά σεισμική καταγραφή το πλήθος των παλμών που αρκούν για να περιγράψουν ικανοποιητικά την απόκριση της κατασκευής για την αρχική καταγραφή δε μπορεί να προκύψει από μια ποιοτική διαδικασία. Έτσι, απομονώνονται οι μέγιστες αναπτυσσόμενες τιμές για καθένα από τα μεγέθη απόκρισης που μελετώνται, για την αρχική καταγραφή και για τα αθροίσματα των πρώτων παλμών. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων γίνεται στη μορφή που περιγράφεται στην ενότητα 6.5 που ακολουθεί.

## 6.5 Σφάλματα των αθροισμάτων των παλμών ως προς τις αρχικές εδαφικές κινήσεις

Για καθένα από τα μεγέθη απόκρισης που αναφέρθηκαν στην ενότητα 6.3.2 υπολογίζεται το σφάλμα της απόκρισης της κατασκευής από τις αναλύσεις για τους  $N$  πρώτους παλμούς, σε σχέση με την απόκρισή της για την αρχική καταγραφή. Η διαδικασία πραγματοποιείται για τις τρεις κλιμακώσεις κάθε καταγραφής. Για ένα μέγεθος  $D$ , το σφάλμα ορίζεται ως:

$$Error = \frac{D_{S_i} - D_{Original}}{D_{Original}} \quad (6.3)$$

όπου,

$D_{S_i}$  ένα μέγεθος απόκρισης για κάποιο από τα αθροίσματα των παλμών ( $i = 1 - 6$ ) και

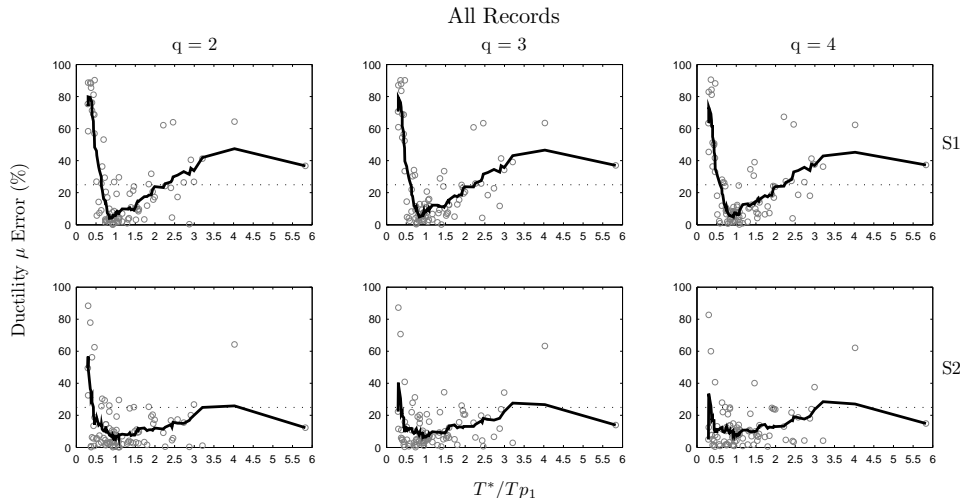
$D_{Original}$  το αντίστοιχο μέγεθος απόκρισης για την αρχική καταγραφή.

Αρχικά, τα σφάλματα των αθροισμάτων των παλμών ως προς τις αρχικές καταγραφές υπολογίστηκαν με το πρόσημό τους, ώστε να διερευνηθεί εάν υπάρχει κάποια συχνοτική περιοχή στην οποία σταθερά υπερεκτιμάται ή υποεκτιμάται κάποιο μέγεθος απόκρισης. Δεν εντοπίστηκε κάποια περιοχή  $T^*/T_{p1}$  όπου το σφάλμα να διατηρεί σταθερό πρόσημο. Έτσι, η επεξεργασία των σφαλμάτων γίνεται με τις απόλυτες τιμές τους.

Στα διαγράμματα που ακολουθούν, οι συμπαγείς γραμμές δείχνουν τον κινητό μέσο του σφάλματος (Moving Average). Το αποδεκτό σφάλμα τίθεται ίσο με 25%.

### 6.5.1 Σφάλμα πλαστιμότητας

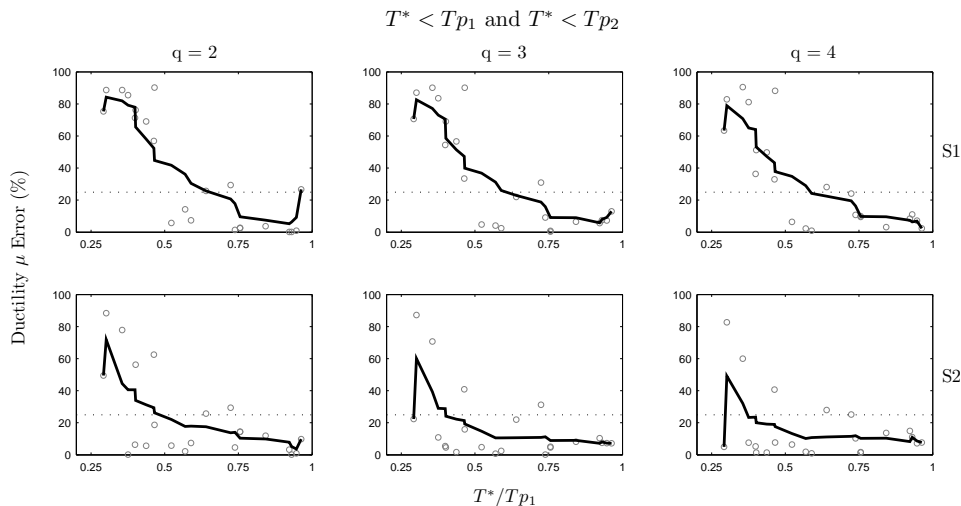
Στο σχήμα 6.72 παρουσιάζονται τα σφάλματα των αθροισμάτων για τον πρώτο (S1) και για τους πρώτους δύο παλμούς (S2), για τις τρεις στάθμες έντασης ( $q = 2, q = 3, q = 4$ ).



Σχήμα 6.72: Σφάλμα πλαστιμότητας μετακινήσεων για το σύνολο των καταγραφών.

Για τον πρώτο παλμό, το μέσο σφάλμα είναι αποδεκτό εντός της περιοχής  $T^*/T_{p1} = [0.5 - 2]$ , ενώ για τους δύο πρώτους παλμούς το σφάλμα είναι εντός του αποδεκτού ορίου για περιόδους  $T^* > 0.5T_{p1}$ . Παρατηρώντας την επάρκεια των δύο παλμών, το δείγμα των καταγραφών διαχωρίζεται σε τρεις ομάδες, οι οποίες μελετώνται χωριστά. Οι ομάδες αυτές επιλέγονται ως εξής:

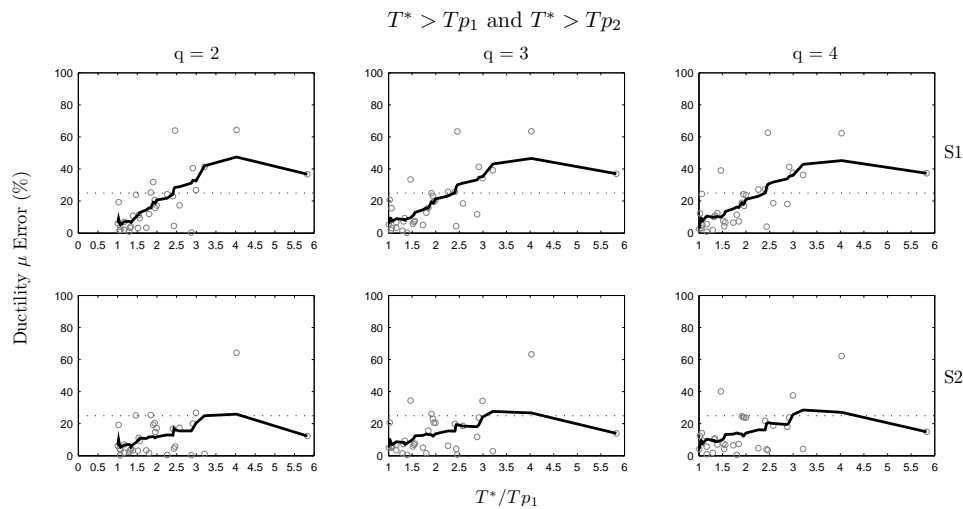
- Η περίοδος του ισοδύναμου μονοβαθμίου συστήματος είναι μικρότερη από τις περιόδους και των δύο παλμών ( $T^* < T_{p1}$  and  $T^* < T_{p2}$ ).
- Η περίοδος του ισοδύναμου μονοβαθμίου συστήματος είναι μεγαλύτερη από τις περιόδους και των δύο παλμών ( $T^* > T_{p1}$  and  $T^* > T_{p2}$ ).
- Η περίοδος του ισοδύναμου μονοβαθμίου συστήματος βρίσκεται ανάμεσα στις περιόδους του πρώτου και του δεύτερου παλμού ( $T_{p1} < T^* < T_{p2}$  or  $T_{p2} < T^* < T_{p1}$ ).



Σχήμα 6.73: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του ισοδύναμου ΣΜΕΚ είναι μικρότερη από τις περιόδους και των δύο πρώτων παλμών.

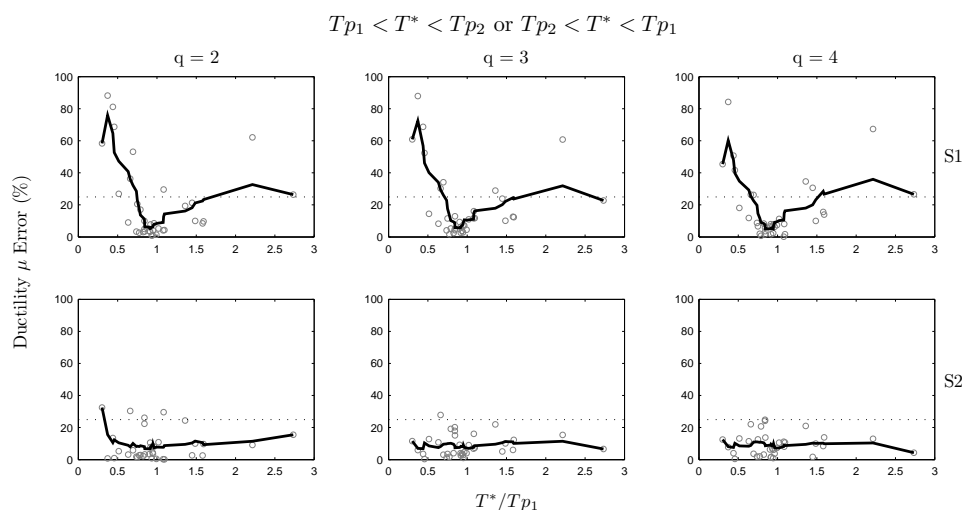
Στην περιοχή αυτή παρατηρούμε ότι για τους δύο πρώτους παλμούς το σφάλμα είναι μη αποδεκτό για περιόδους  $T^* < T_{p1}$  και αποδεκτό για τις μεγαλύτερες, όπως παρατηρήθηκε και για το σύνολο του δείγματος.

6.5. ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΤΩΝ ΑΘΡΟΙΣΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΠΑΛΜΩΝ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΙΣ ΑΡΧΙΚΕΣ ΕΔΑΦΙΚΕΣ ΚΙΝΗΣΕΙΣ



Σχήμα 6.74: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του ισοδύναμου ΣΜΕΚ είναι μεγαλύτερη από τις περιόδους και των δύο πρώτων παλμών.

Στη περιοχή αυτή τα αποτελέσματα είναι καλύτερα, αφού το μέσο σφάλμα είναι οριακά αποδεκτό για όλες τις περιόδους.



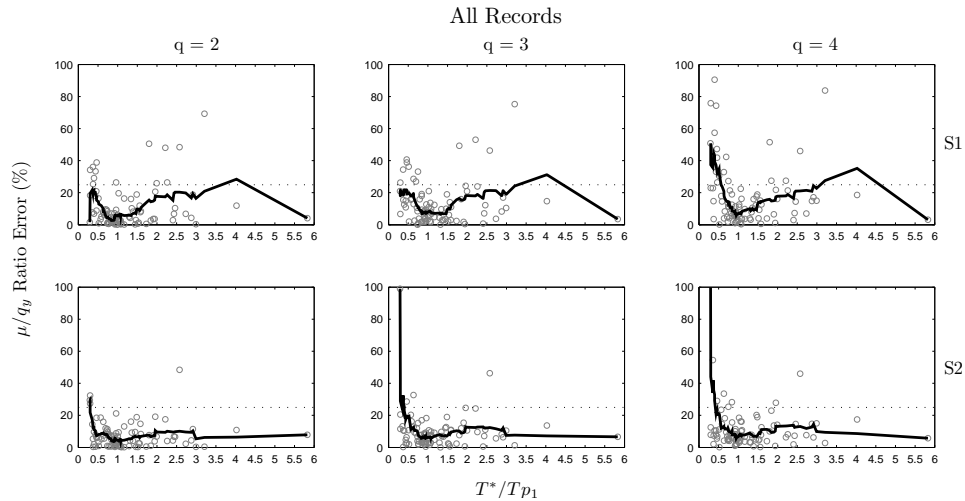
Σχήμα 6.75: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του ισοδύναμου ΣΜΕΚ βρίσκεται ανάμεσα στις περιόδους των δύο πρώτων παλμών.

Στην περιοχή αυτή τα αποτελέσματα για τους δύο παλμούς είναι πολύ ικανοποιητικά. Βλέπουμε ότι το σφάλμα είναι γενικώς αποδεκτό, εκτός από την περίπτωση  $q = 2$ , όπου είναι αποδεκτό για περιόδους μεγαλύτερες από τη μισή περίοδο του πρώτου παλμού. Πολύ σημαντικό είναι να παρατηρήσουμε όχι απλά ότι το σφάλμα είναι αποδεκτό, αλλά και ότι εμφανίζει μικρότερη διασπορά από τις προηγούμενες περιπτώσεις. Δηλαδή, φαίνεται να βρίσκεται εντός των αποδεκτών ορίων η μέση τιμή του σφάλματος συν μια τυπική απόκλιση.

### 6.5.2 Σφάλμα πλαστιμότητας προς συντελεστή συμπεριφοράς

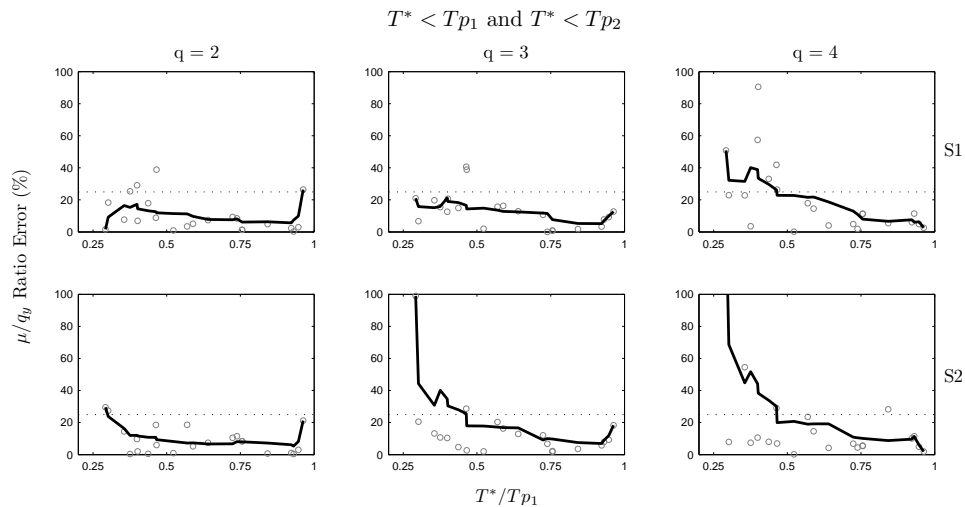
Στο σχήμα 6.76 παρουσιάζονται τα σφάλματα των αθροισμάτων για τον πρώτο (S1) και για τους πρώτους δύο παλμούς (S2), για τις τρεις στάθμες έντασης ( $q = 2, q = 3, q = 4$ ).





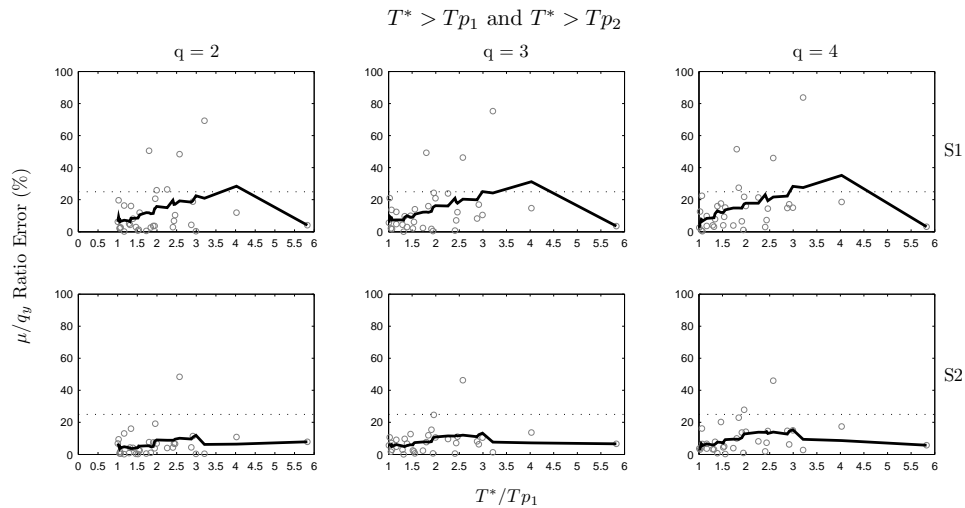
Σχήμα 6.76: Σφάλμα για το σύνολο των καταγραφών.

Η εικόνα για το λόγο της πλαστιμότητας προς το συντελεστή συμπεριφοράς είναι αντίστοιχη με αυτή της πλαστιμότητας. Έτσι, γίνεται η ίδια διερεύνηση με πριν, χωρίζοντας τις καταγραφές σε ομάδες. Σημειώνεται ότι ο λόγος  $\mu/q_y$  μελετάται χωριστά, αφού για μια κλιμάκωση η κατασκευή αναπτύσσει τον προδιαγεγραμμένο συντελεστή συμπεριφοράς για την αρχική καταγραφή, όμως για τα αθροίσματα των παλμών δεν αναπτύσσει τον ίδιο.

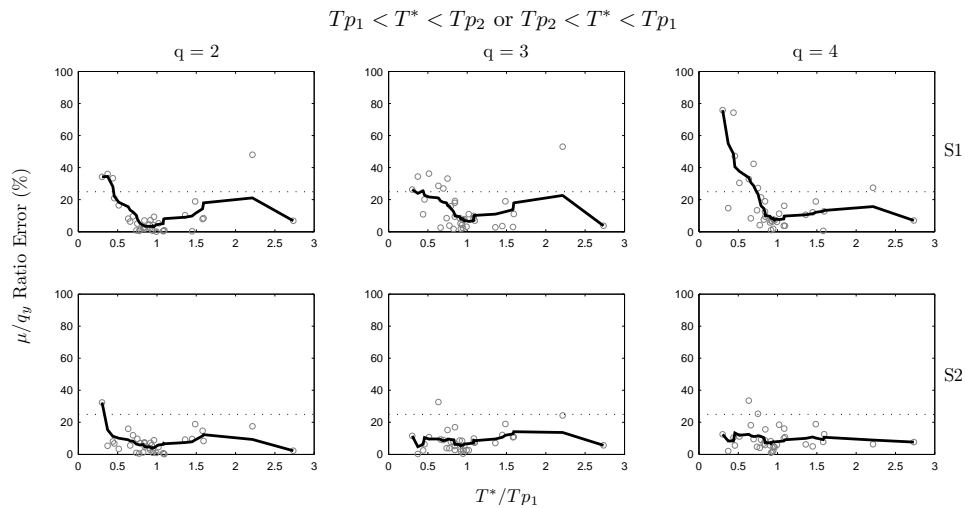


Σχήμα 6.77: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του ισοδύναμου ΣΜΕΚ είναι μικρότερη από τις περιόδους και των δύο πρώτων παλμών.

6.5. ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΤΩΝ ΑΘΡΟΙΣΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΠΑΛΜΩΝ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΙΣ ΑΡΧΙΚΕΣ ΕΔΑΦΙΚΕΣ ΚΙΝΗΣΕΙΣ



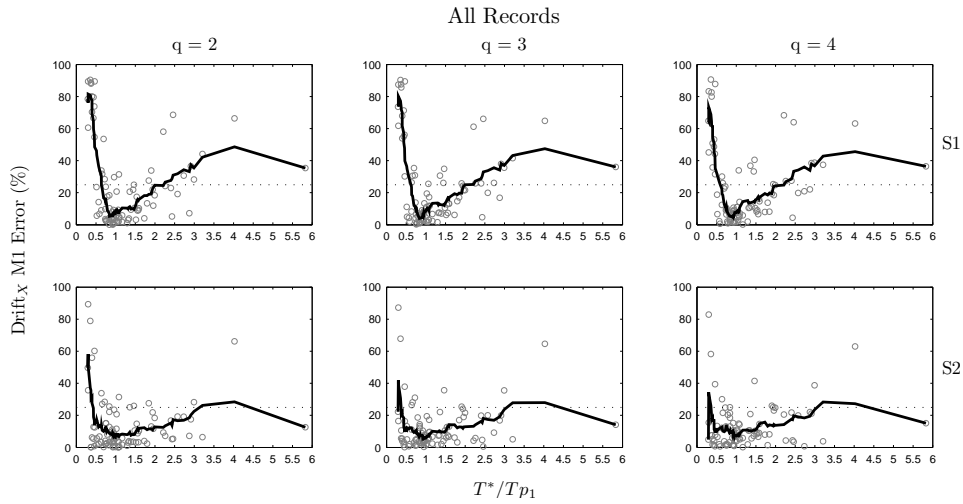
Σχήμα 6.78: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του ισοδύναμου ΣΜΕΚ είναι μεγαλύτερη από τις περιόδους και των δύο πρώτων παλμών.



Σχήμα 6.79: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του ισοδύναμου ΣΜΕΚ βρίσκεται ανάμεσα στις περιόδους των δύο πρώτων παλμών.

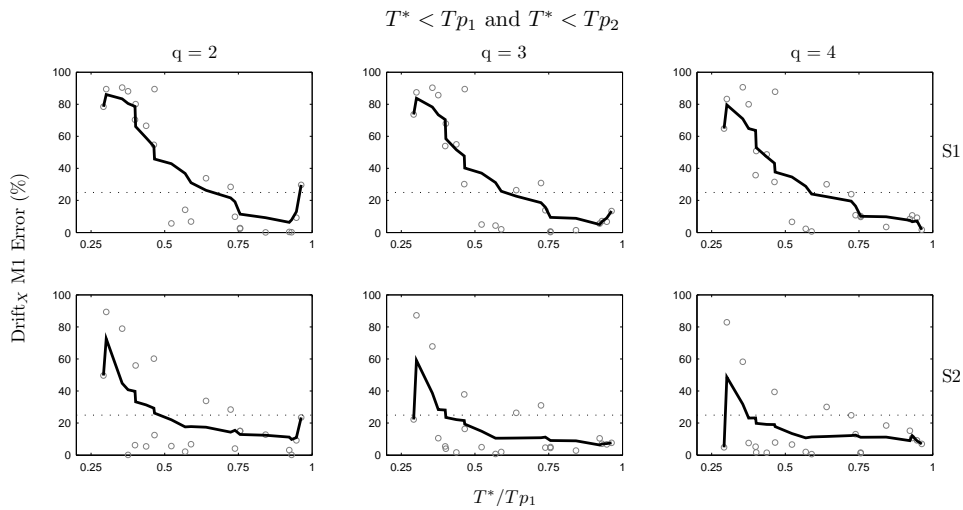
### 6.5.3 Σφάλμα $Drift_{XM1}$

Στο σχήμα 6.80 παρουσιάζονται τα σφάλματα των αθροισμάτων για τον πρώτο (S1) και για τους πρώτους δύο παλμούς (S2), για τις τρεις στάθμες έντασης ( $q = 2, q = 3, q = 4$ ).



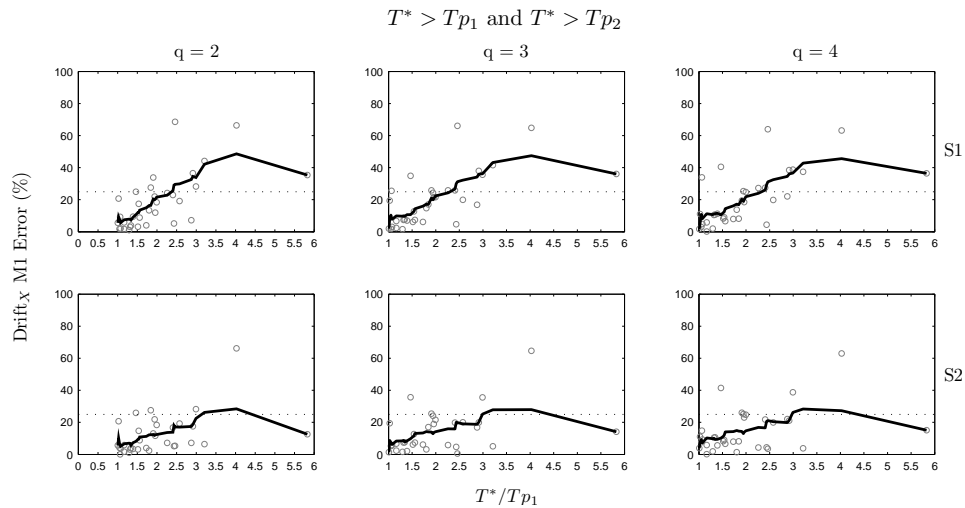
Σχήμα 6.80: Σφάλμα για το σύνολο των καταγραφών.

Η εικόνα για για τη γωνιακή παραμόρφωση του μεσοβάθρου M1 κατά τον καθολικό άξονα  $X$  είναι αντίστοιχη με τις προηγούμενες. Οι καταγραφές διακριτοποιούνται ομοίως.

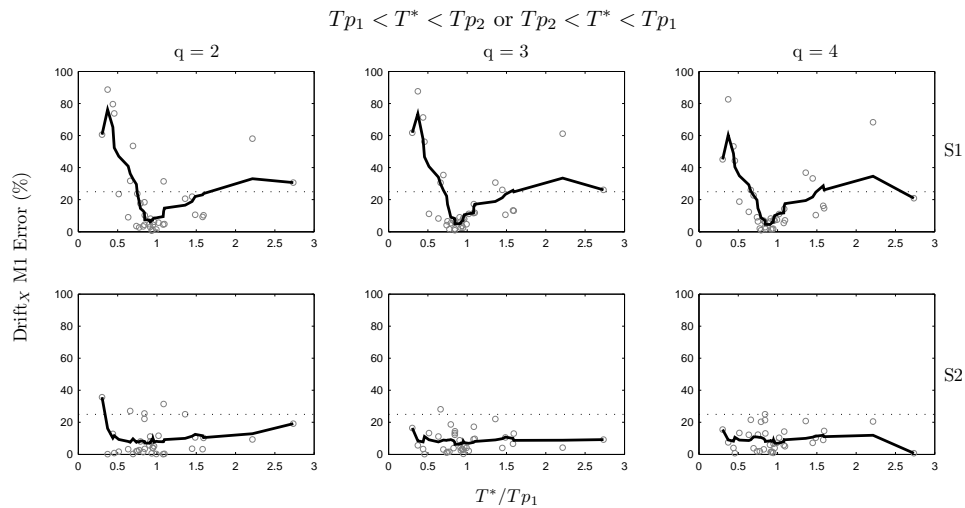


Σχήμα 6.81: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του ισοδύναμου ΣΜΕΚ είναι μικρότερη από τις περιόδους και των δύο πρώτων παλμών.

6.5. ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΤΩΝ ΑΘΡΟΙΣΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΠΑΛΜΩΝ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΙΣ ΑΡΧΙΚΕΣ ΕΔΑΦΙΚΕΣ ΚΙΝΗΣΕΙΣ



Σχήμα 6.82: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του ισοδύναμου ΣΜΕΚ είναι μεγαλύτερη από τις περιόδους και των δύο πρώτων παλμών.

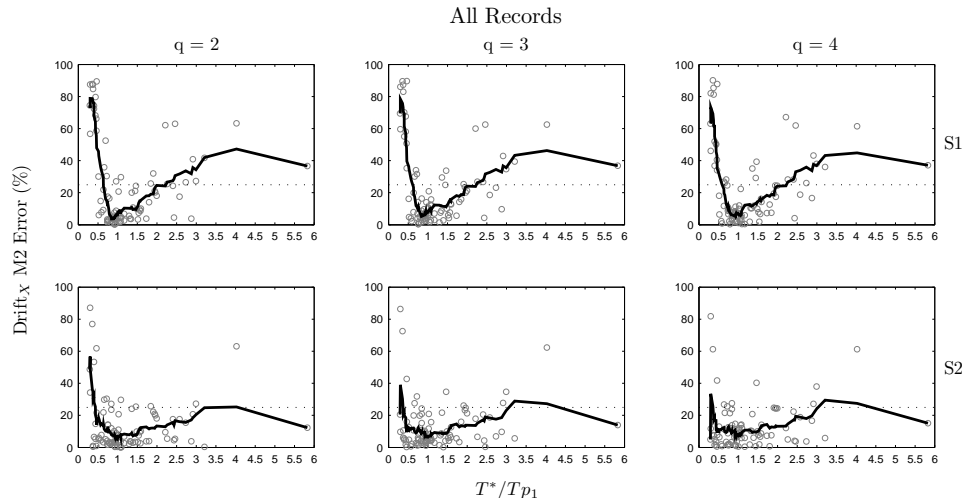


Σχήμα 6.83: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του ισοδύναμου ΣΜΕΚ βρίσκεται ανάμεσα στις περιόδους των δύο πρώτων παλμών.

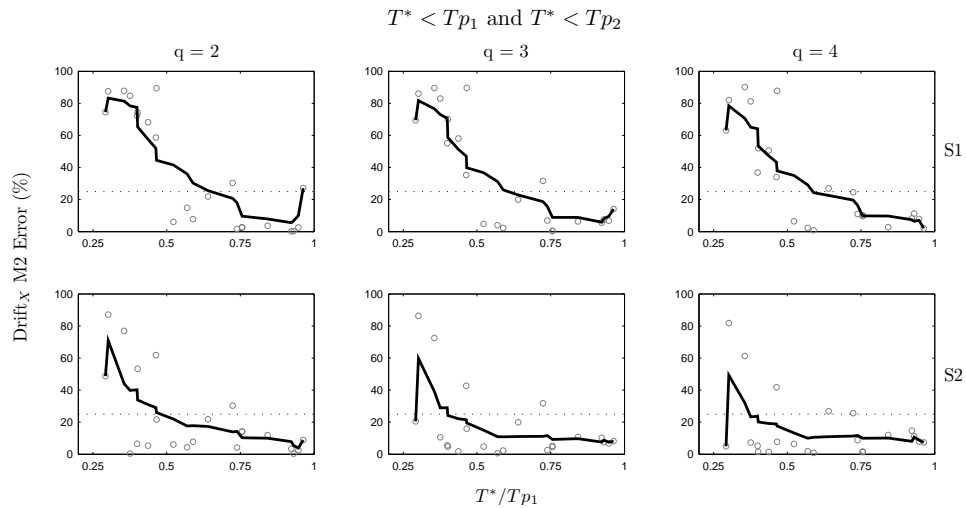
Ακολουθούν η γωνιακή παραμόρφωση του μεσοβάθρου M2 και οι γωνιακές παραμορφώσεις των μεσοβάθρων στο χώρο, όπου τα αποτελέσματα ακολουθούν την ίδια κατανομή.

#### 6.5.4 Σφάλμα $Drift_X M2$

Στο σχήμα 6.84 παρουσιάζονται τα σφάλματα των αθροισμάτων για τον πρώτο (S1) και για τους πρώτους δύο παλμούς (S2), για τις τρεις στάθμες έντασης ( $q = 2, q = 3, q = 4$ ).

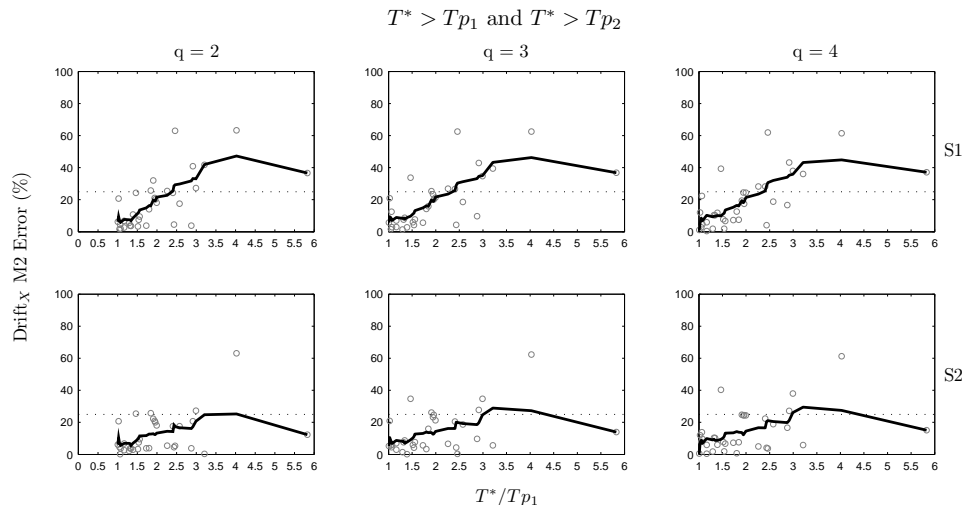


Σχήμα 6.84: Σφάλμα για το σύνολο των καταγραφών.

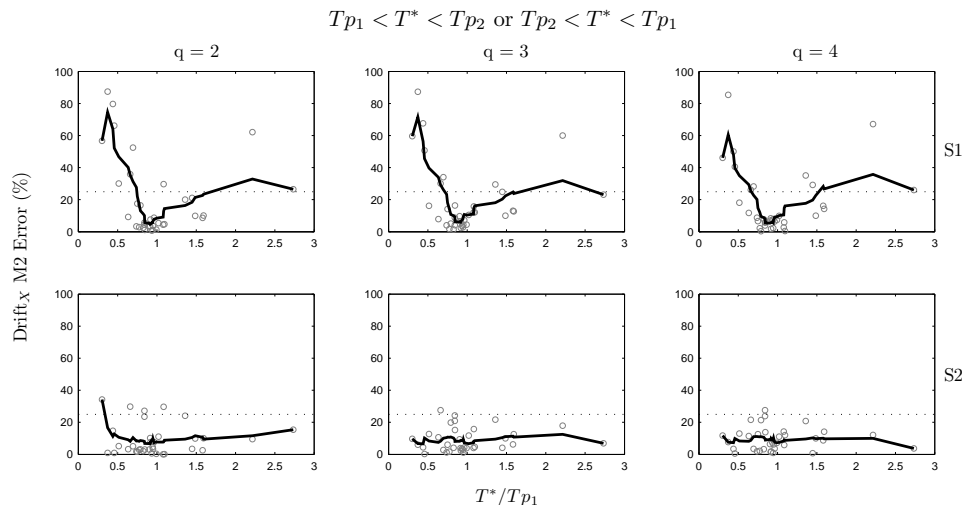


Σχήμα 6.85: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του ισοδύναμου ΣΜΕΚ είναι μικρότερη από τις περιόδους και των δύο πρώτων παλμών.

6.5. ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΤΩΝ ΑΘΡΟΙΣΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΠΑΛΜΩΝ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΙΣ ΑΡΧΙΚΕΣ ΕΔΑΦΙΚΕΣ ΚΙΝΗΣΕΙΣ



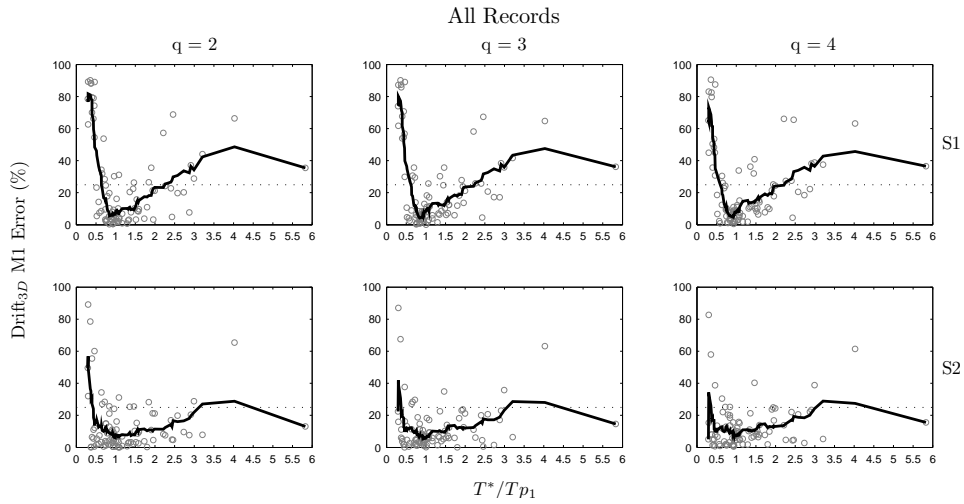
Σχήμα 6.86: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του ισοδύναμου ΣΜΕΚ είναι μεγαλύτερη από τις περιόδους και των δύο πρώτων παλμών.



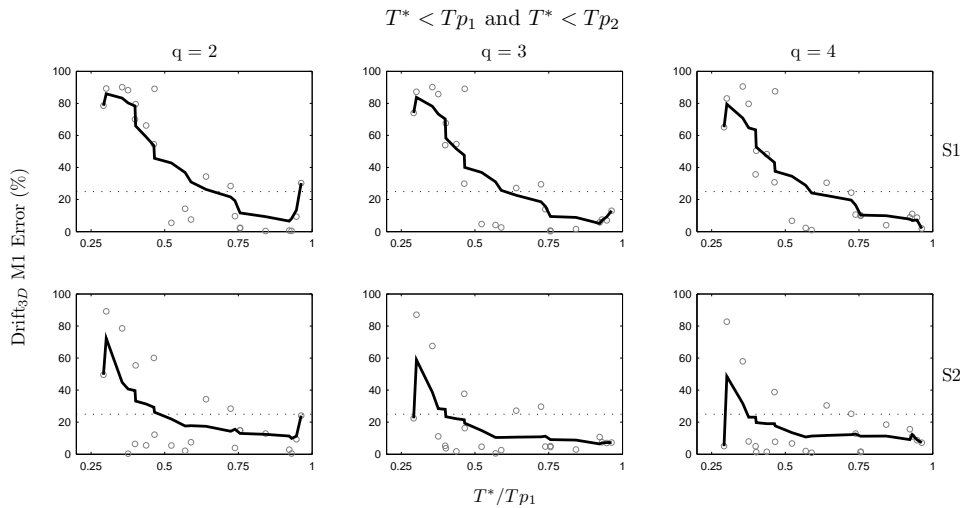
Σχήμα 6.87: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του ισοδύναμου ΣΜΕΚ βρίσκεται ανάμεσα στις περιόδους των δύο πρώτων παλμών.

### 6.5.5 Σφάλμα $Drift_{3DM1}$

Στο σχήμα 6.88 παρουσιάζονται τα σφάλματα των αθροισμάτων για τον πρώτο (S1) και για τους πρώτους δύο παλμούς (S2), για τις τρεις στάθμες έντασης ( $q = 2, q = 3, q = 4$ ).

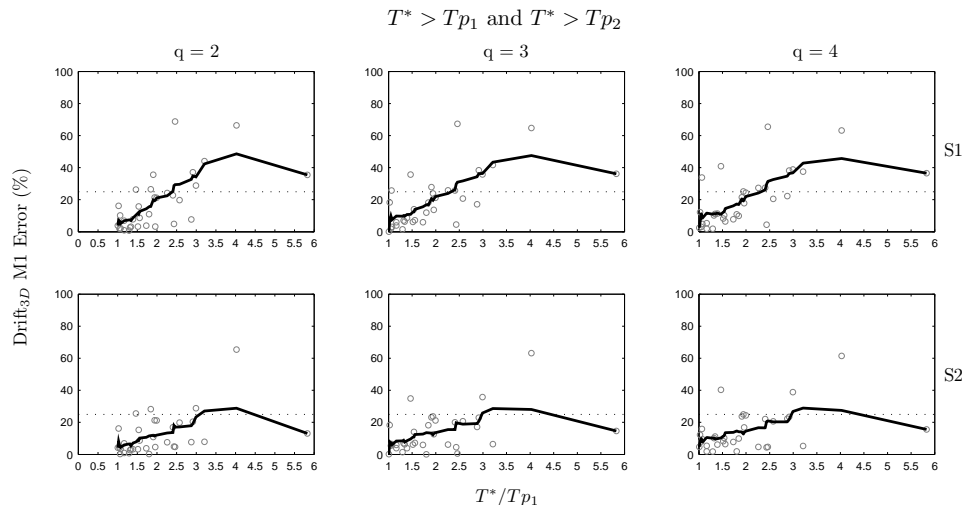


Σχήμα 6.88: Σφάλμα για το σύνολο των καταγραφών.

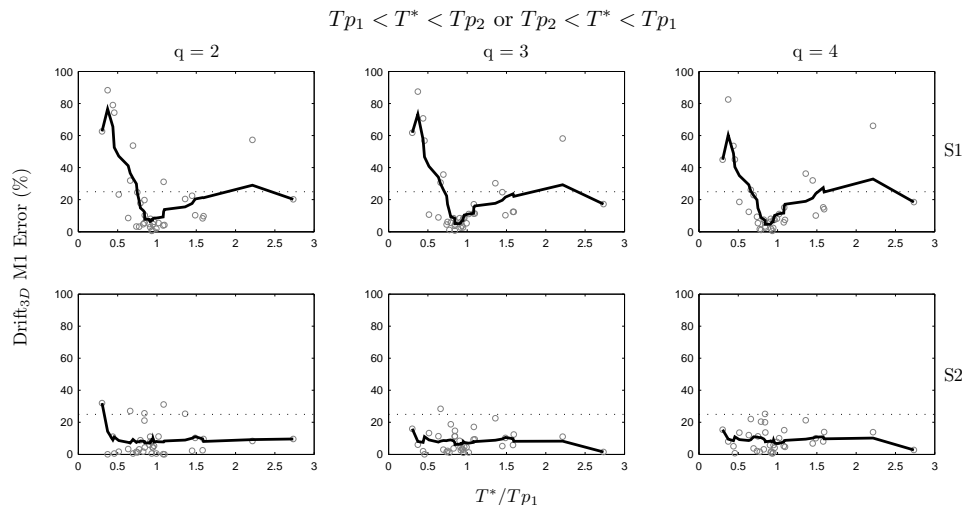


Σχήμα 6.89: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του ισοδύναμου ΣΜΕΚ είναι μικρότερη από τις περιόδους και των δύο πρώτων παλμών.

6.5. ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΤΩΝ ΑΘΡΟΙΣΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΠΑΛΜΩΝ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΙΣ ΑΡΧΙΚΕΣ ΕΔΑΦΙΚΕΣ ΚΙΝΗΣΕΙΣ



Σχήμα 6.90: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του ισοδύναμου ΣΜΕΚ είναι μεγαλύτερη από τις περιόδους και των δύο πρώτων παλμών.

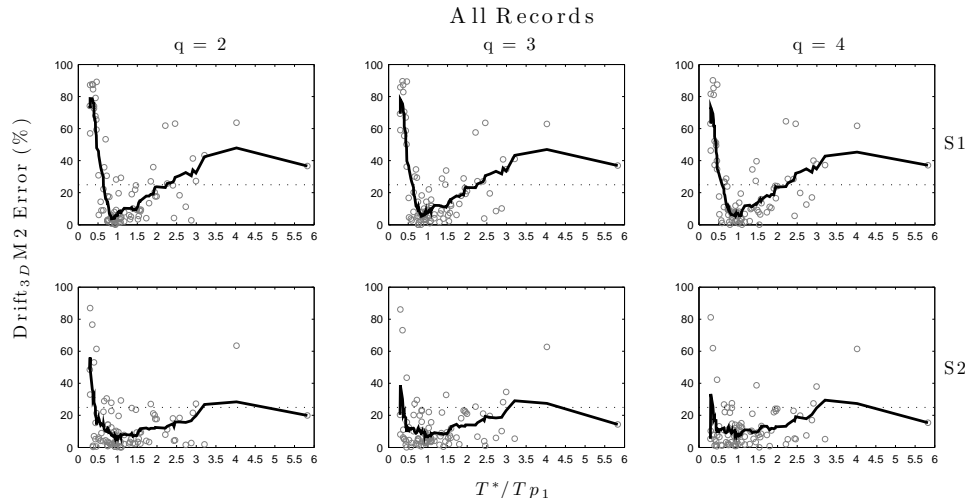


Σχήμα 6.91: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του ισοδύναμου ΣΜΕΚ βρίσκεται ανάμεσα στις περιόδους των δύο πρώτων παλμών.

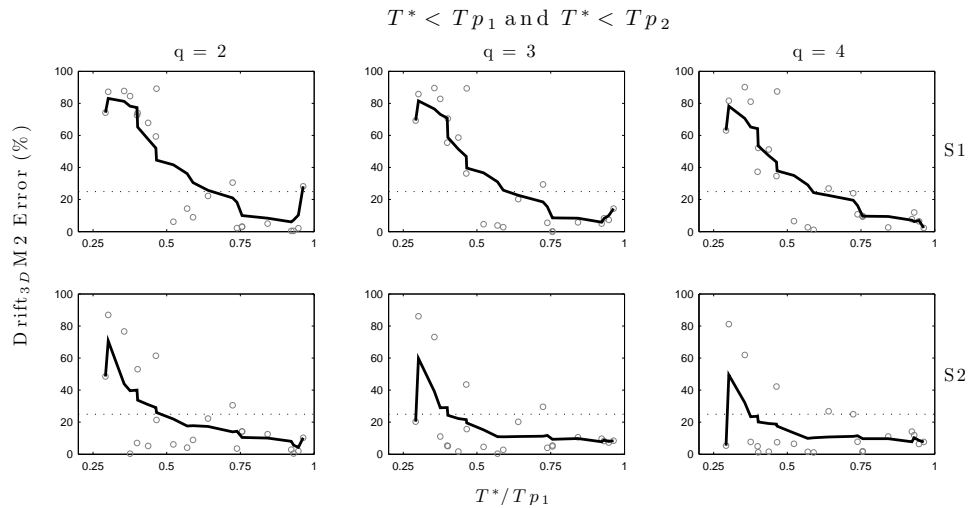
6.5.6 Σφάλμα  $Drift_{3D}M2$

Στο σχήμα 6.92 παρουσιάζονται τα σφάλματα των αθροισμάτων για τον πρώτο (S1) και για τους πρώτους δύο παλμούς (S2), για τις τρεις στάθμες έντασης ( $q = 2, q = 3, q = 4$ ).



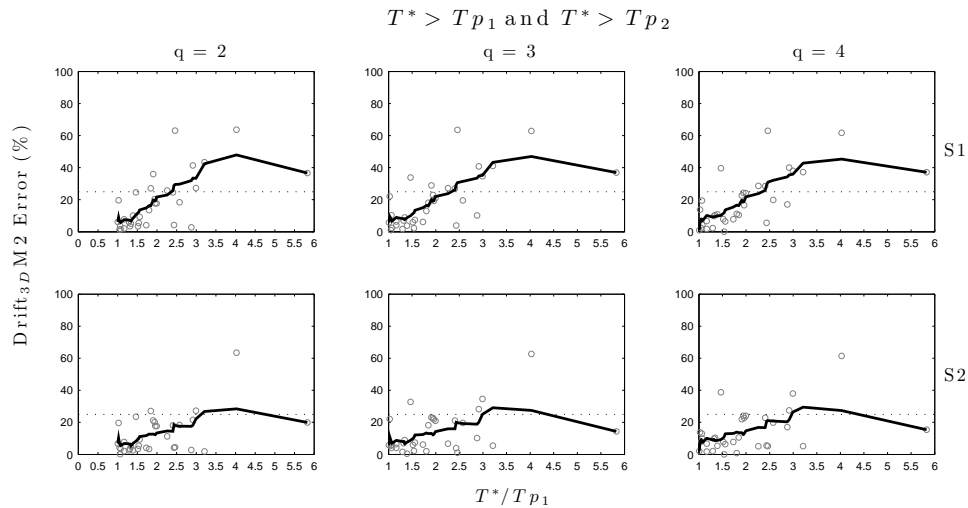


Σχήμα 6.92: Σφάλμα για το σύνολο των καταγραφών.

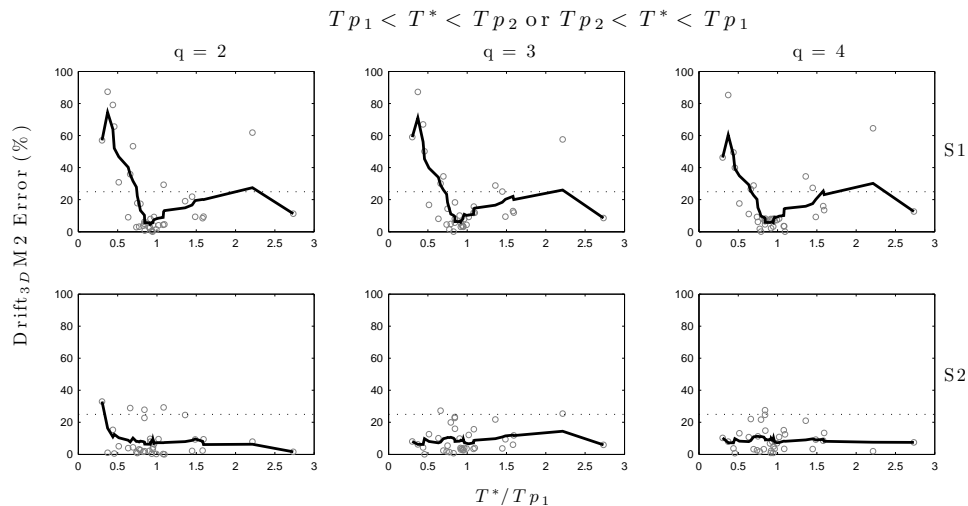


Σχήμα 6.93: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του ισοδύναμου ΣΜΕΚ είναι μικρότερη από τις περιόδους και των δύο πρώτων παλμών.

6.5. ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΤΩΝ ΑΘΡΟΙΣΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΠΑΛΜΩΝ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΙΣ ΑΡΧΙΚΕΣ ΕΔΑΦΙΚΕΣ ΚΙΝΗΣΕΙΣ



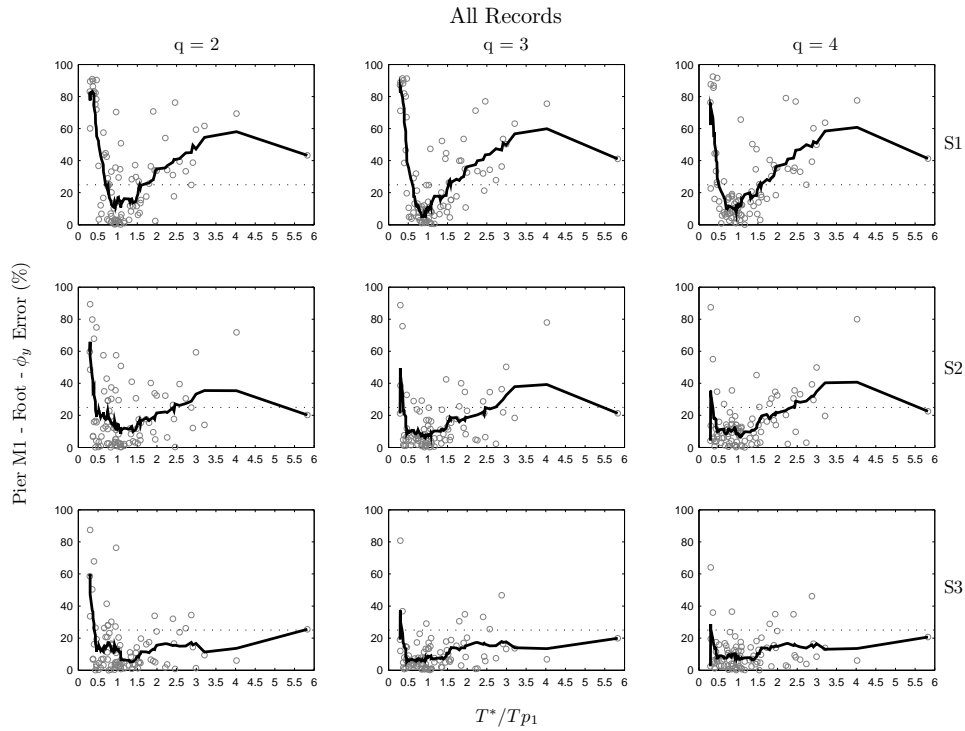
Σχήμα 6.94: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του ισοδύναμου ΣΜΕΚ είναι μεγαλύτερη από τις περιόδους και των δύο πρώτων παλμών.



Σχήμα 6.95: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του ισοδύναμου ΣΜΕΚ βρίσκεται ανάμεσα στις περιόδους των δύο πρώτων παλμών.

### 6.5.7 Σφάλμα καμπυλότητας στον Πόδα του Μεσοβάθρου M1 ( $\phi_{y-local} M1_{Foot}$ )

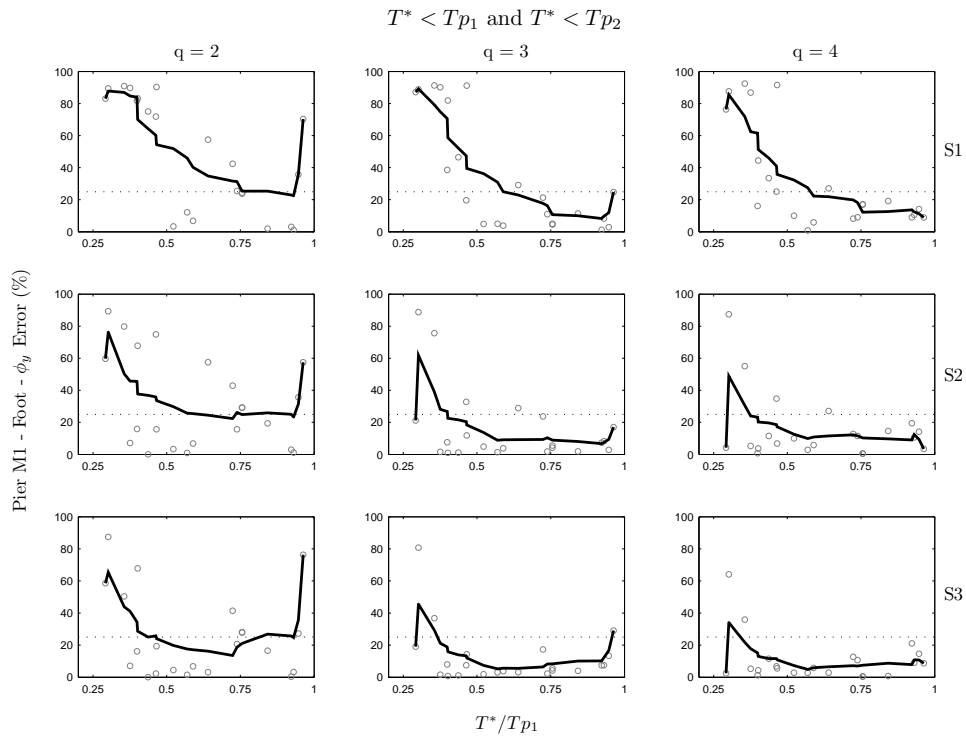
Για τα μέχρι τώρα μεγέθη τα αποτελέσματα συγκλίνουν σε μια γενική εικόνα. Μελετώντας την καμπυλότητα στις κρίσιμες διατομές των μεσοβάθρων (κεφαλές και πόδες), βλέπουμε ότι τα τοπικά μεγέθη, όπως είναι η καμπυλότητα, είναι πιο απαιτητικά όσον αφορά το πλήθος των παλμών, για τη διατήρηση του σφάλματος εντός του αποδεκτού ορίου που έχουμε θεωρήσει. Στο σχήμα 6.96 παρουσιάζονται τα σφάλματα των αθροισμάτων για τον πρώτο (S1), για τους δύο πρώτους (S2) και για τους τρεις πρώτους τρεις παλμούς (S3), για τις τρεις στάθμες έντασης ( $q = 2$ ,  $q = 3$ ,  $q = 4$ ).



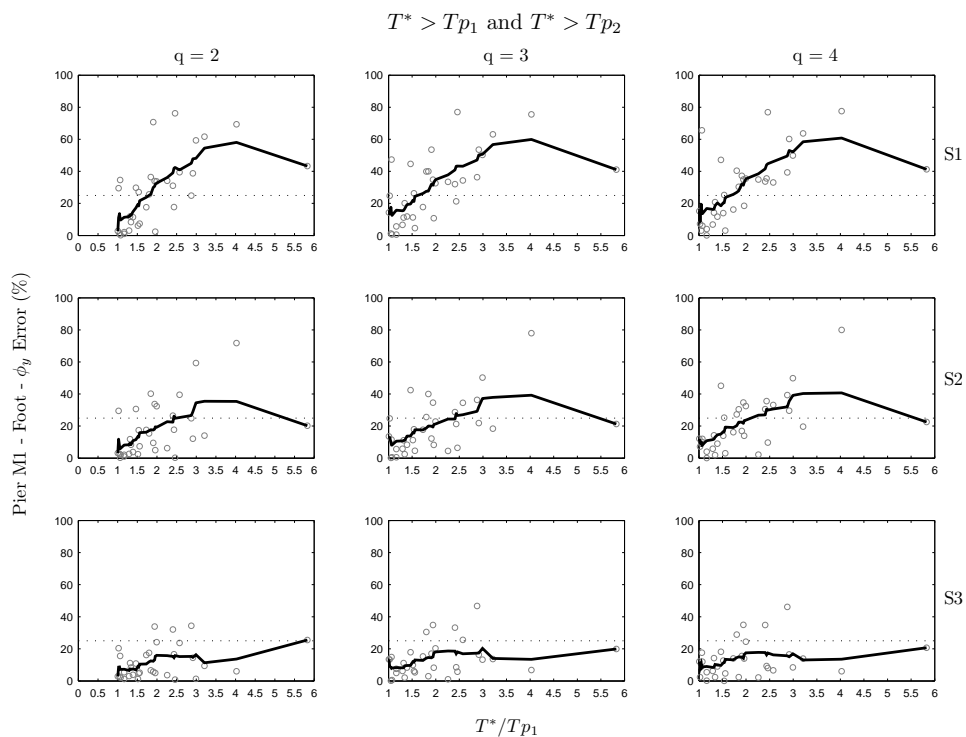
Σχήμα 6.96: Σφάλμα για το σύνολο των καταγραφών.

Για τον πρώτο παλμό, το μέσο σφάλμα είναι αποδεκτό εντός μιας στενής ζώνης που ανήκει στη συχνοτική περιοχή  $T^*/T_{p1} = [0.5 - 1.5]$ , ενώ για τους δύο πρώτους παλμούς το σφάλμα βρίσκεται εντός του αποδεκτού ορίου για περιόδους  $T^*/T_{p1} = [0.5 - 2.5]$ . Για το άθροισμα των τριών παλμών, το σφάλμα είναι αποδεκτό για όλες τις περιόδους  $T^* > 0.5T_{p1}$ . Βλέπουμε δηλαδή ότι η εικόνα για τους δυο παλμούς και το σύνολο των κλιμακώσεων δεν είναι αποδεκτή για το μέγεθος της καμπυλότητας. Και πάλι το δείγμα των καταγραφών διαχωρίζεται σε τρεις ομάδες, ώστε να εντοπιστούν οι περιοχές όπου εμφανίζονται τα μέγιστα και τα ελάχιστα σφάλματα.

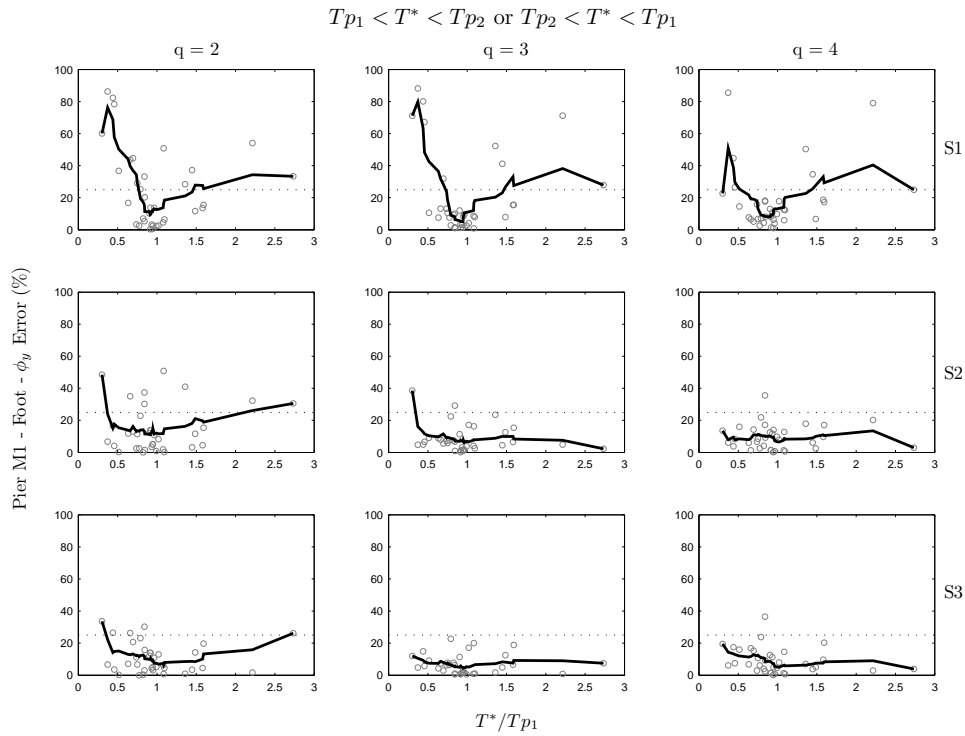
6.5. ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΤΩΝ ΑΘΡΟΙΣΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΠΑΛΜΩΝ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΙΣ ΑΡΧΙΚΕΣ ΕΔΑΦΙΚΕΣ ΚΙΝΗΣΕΙΣ



Σχήμα 6.97: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του ισοδύναμου ΣΜΕΚ είναι μικρότερη από τις περιόδους και των δύο πρώτων παλμών.



Σχήμα 6.98: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του ισοδύναμου ΣΜΕΚ είναι μεγαλύτερη από τις περιόδους και των δύο πρώτων παλμών.



Σχήμα 6.99: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του ισοδύναμου ΣΜΕΚ βρίσκεται ανάμεσα στις περιόδους των δύο πρώτων παλμών.

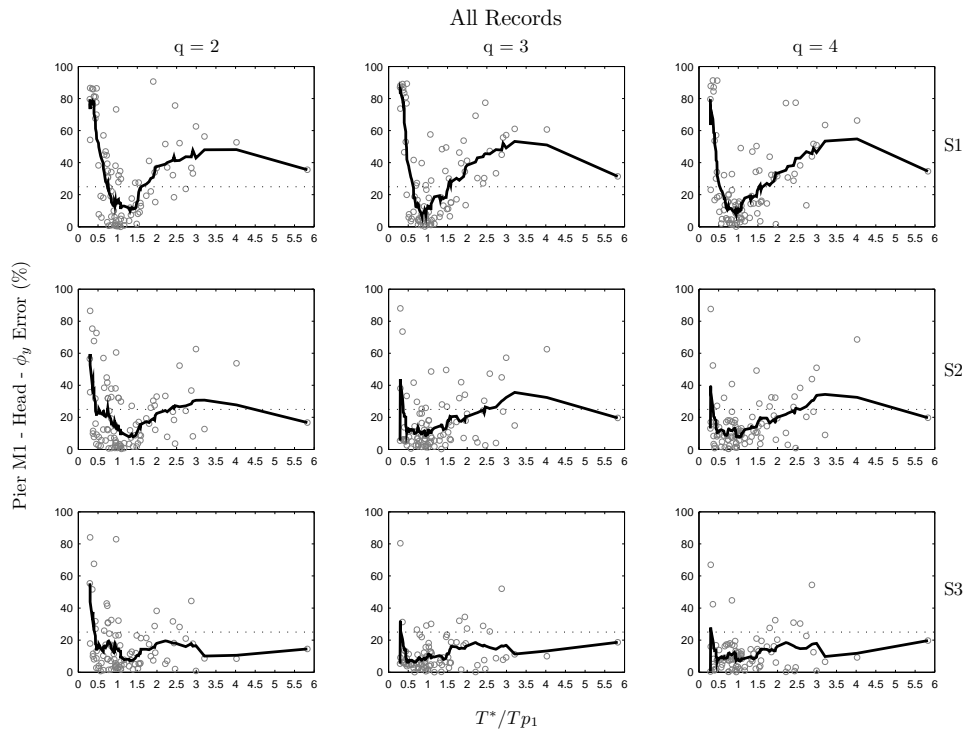
Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση που η περίοδος του ισοδύναμου ΣΜΕΚ βρίσκεται ανάμεσα στις περιόδους των δύο παλμών, παίρνουμε τα καλύτερα αποτελέσματα για τους τρεις παλμούς, οι οποίοι μας δίνουν αποδεκτό σφάλμα.

Παρακάτω παρουσιάζεται το σφάλμα για την κεφαλή του μεσοβάθρου M1 και την κεφαλή και τον πόδα του μεσοβάθρου M2, όπου η εικόνα είναι η ίδια.

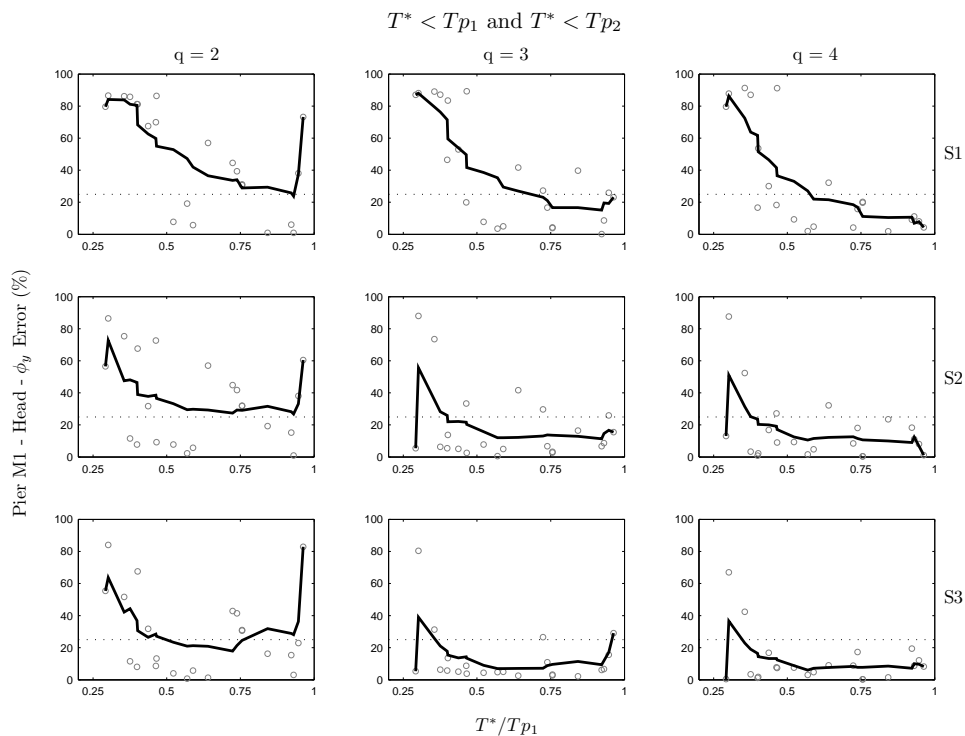
### 6.5.8 Σφάλμα καμπυλότητας στην Κεφαλή του Μεσοβάθρου M1 ( $\phi_{y-local}M1_{Head}$ )

Στο σχήμα 6.100 παρουσιάζονται τα σφάλματα των αθροισμάτων για τον πρώτο (S1), για τους δύο πρώτους (S2) και για τους τρεις πρώτους τρεις παλμούς (S3), για τις τρεις στάθμες έντασης ( $q = 2, q = 3, q = 4$ ).

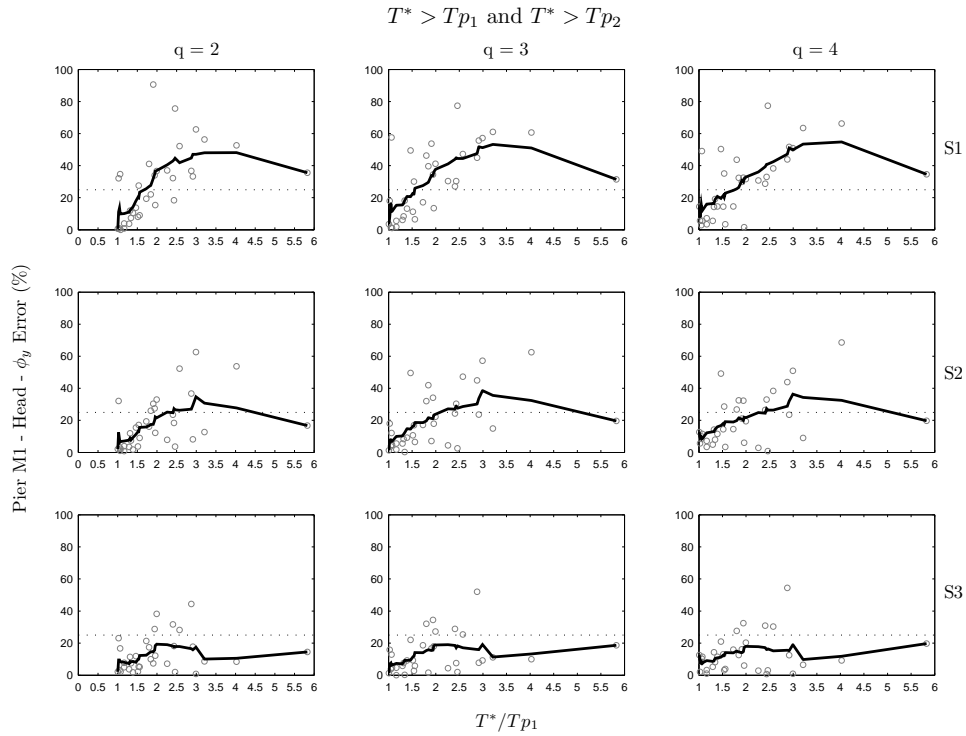
6.5. ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΤΩΝ ΑΘΡΟΙΣΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΠΑΛΜΩΝ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΙΣ ΑΡΧΙΚΕΣ ΕΔΑΦΙΚΕΣ ΚΙΝΗΣΕΙΣ



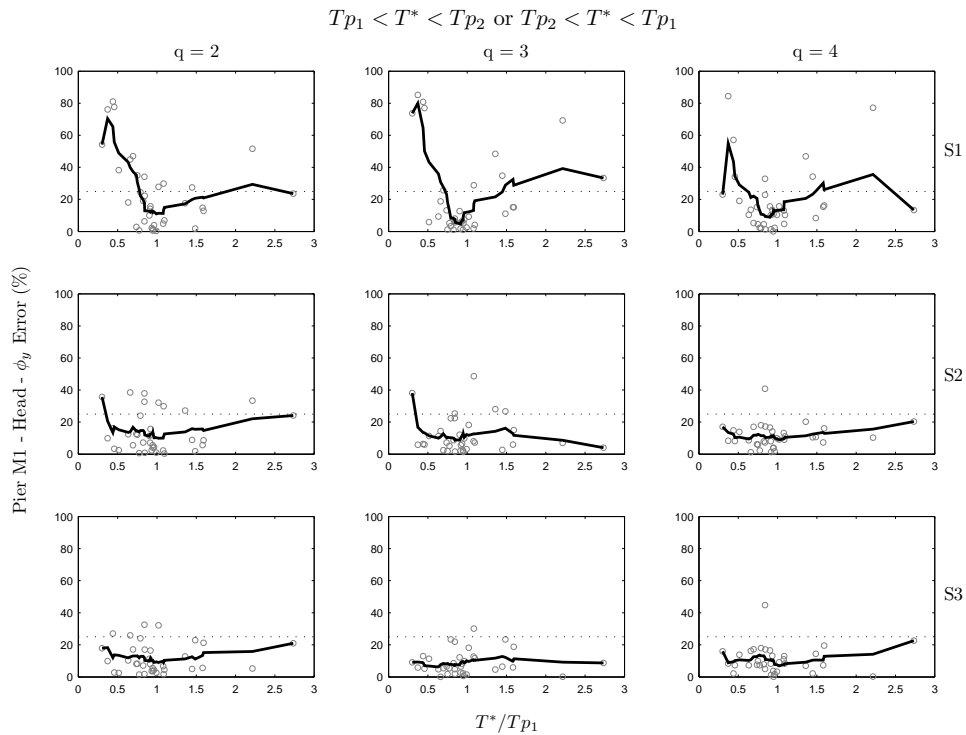
Σχήμα 6.100: Σφάλμα για το σύνολο των καταγραφών.



Σχήμα 6.101: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του ισοδύναμου ΣΜΕΚ είναι μικρότερη από τις περιόδους και των δύο πρώτων παλμών.



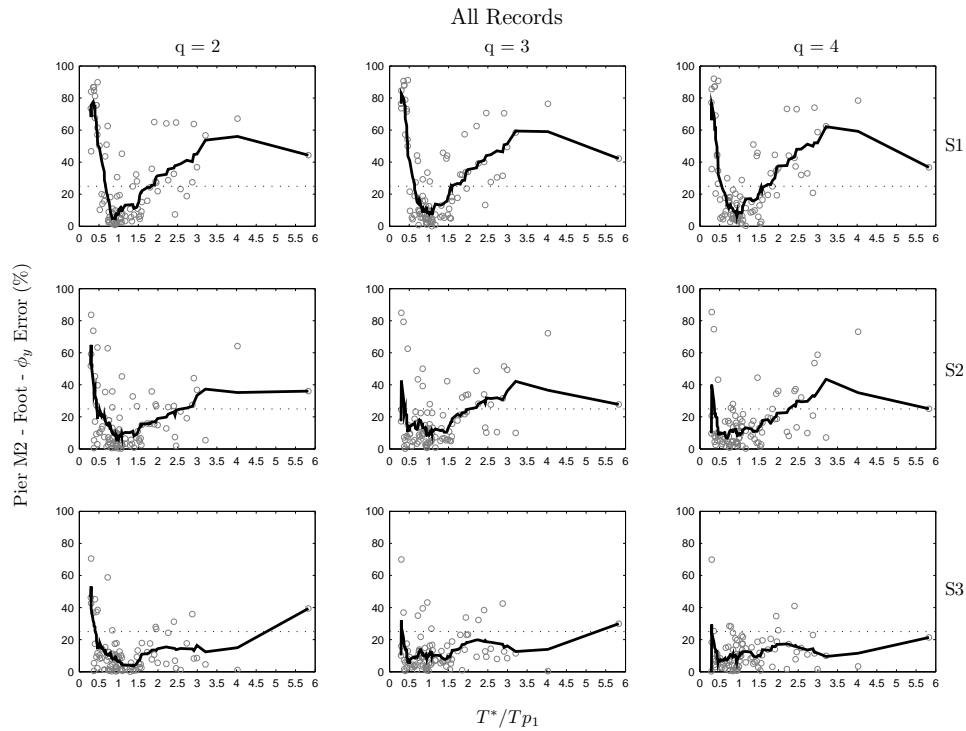
Σχήμα 6.102: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του ισοδύναμου ΣΜΕΚ είναι μεγαλύτερη από τις περιόδους και των δύο πρώτων παλμών.



Σχήμα 6.103: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του ισοδύναμου ΣΜΕΚ βρίσκεται ανάμεσα στις περιόδους των δύο πρώτων παλμών.

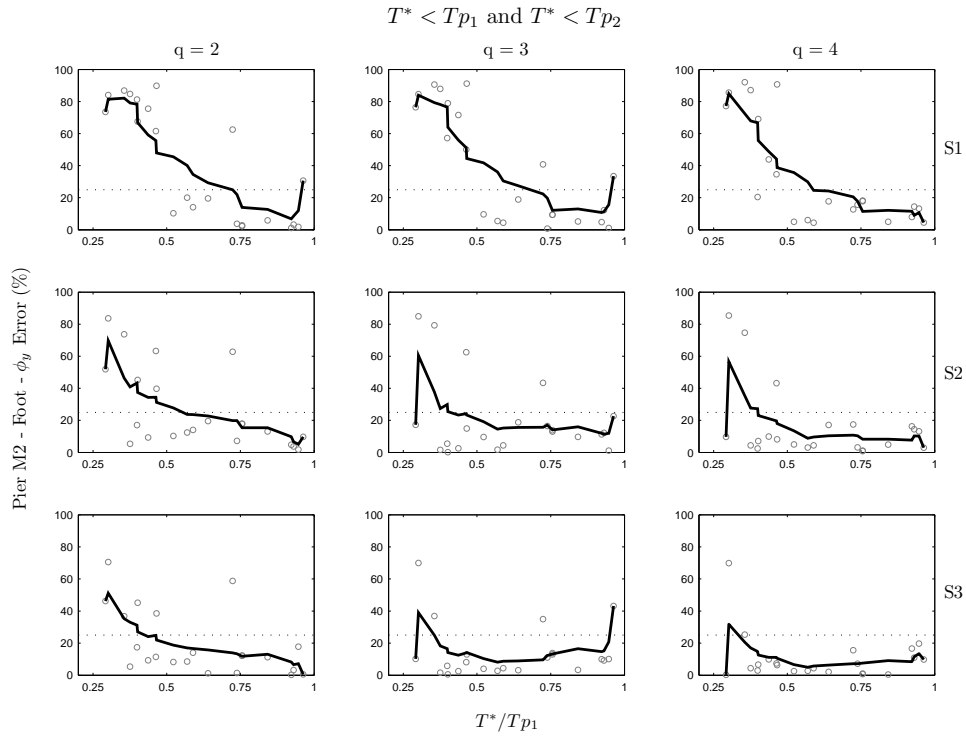
### 6.5.9 Σφάλμα καμπυλότητας στον Πόδα του Μεσοβάθρου M2 ( $\phi_{y-local}M2_{Foot}$ )

Στο σχήμα 6.104 παρουσιάζονται τα σφάλματα των αθροισμάτων για τον πρώτο (S1), για τους δύο πρώτους (S2) και για τους τρεις πρώτους τρεις παλμούς (S3), για τις τρεις στάθμες έντασης ( $q = 2$ ,  $q = 3$ ,  $q = 4$ )..

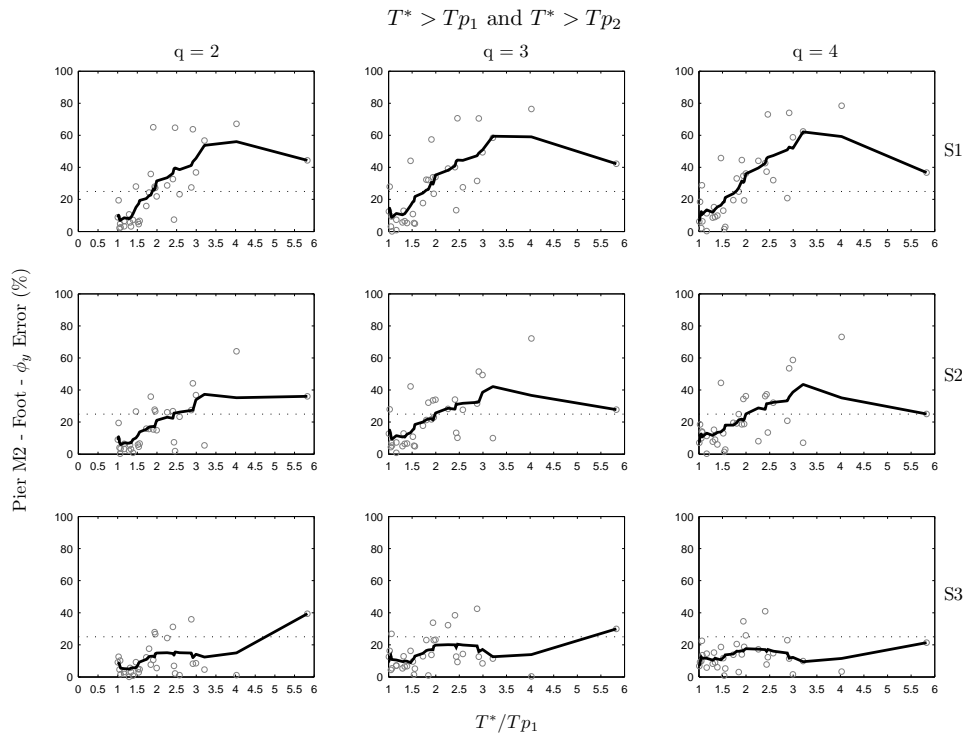


Σχήμα 6.104: Σφάλμα για το σύνολο των καταγραφών.



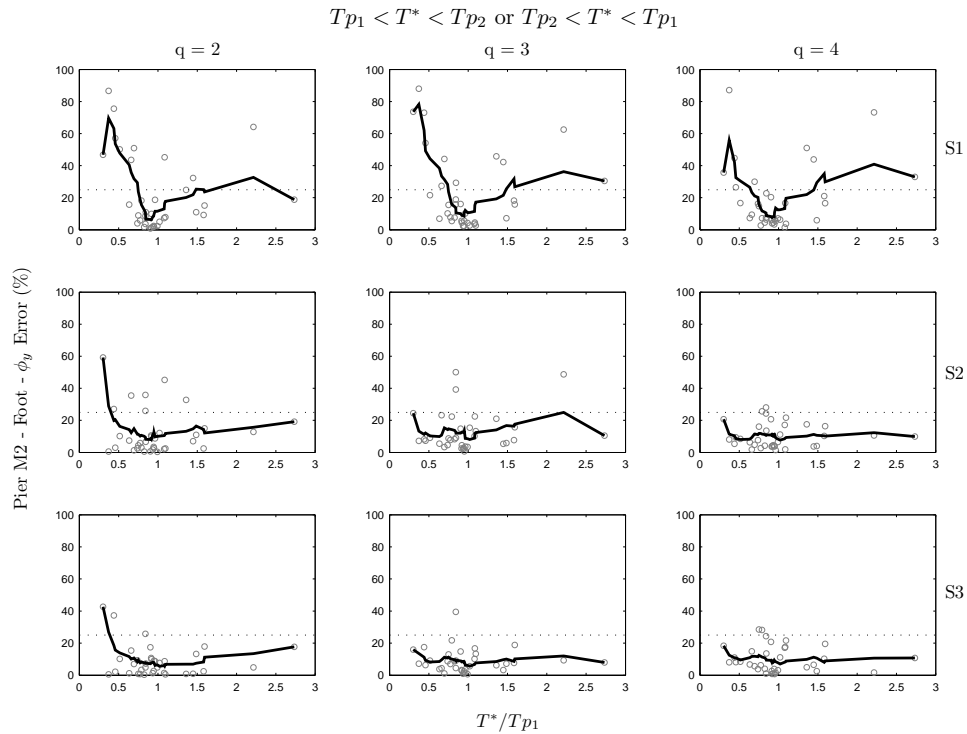


Σχήμα 6.105: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του ισοδύναμου ΣΜΕΚ είναι μικρότερη από τις περιόδους και των δύο πρώτων παλμών.



Σχήμα 6.106: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του ισοδύναμου ΣΜΕΚ είναι μεγαλύτερη από τις περιόδους και των δύο πρώτων παλμών.

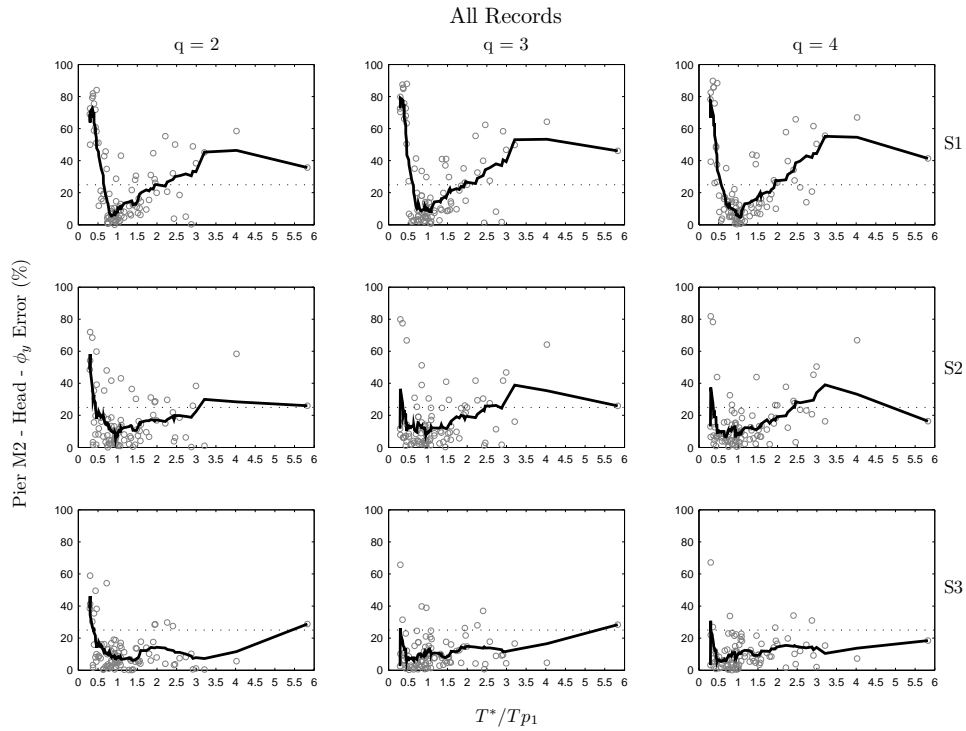
6.5. ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΤΩΝ ΑΘΡΟΙΣΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΠΑΛΜΩΝ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΙΣ ΑΡΧΙΚΕΣ  
ΕΔΑΦΙΚΕΣ ΚΙΝΗΣΕΙΣ



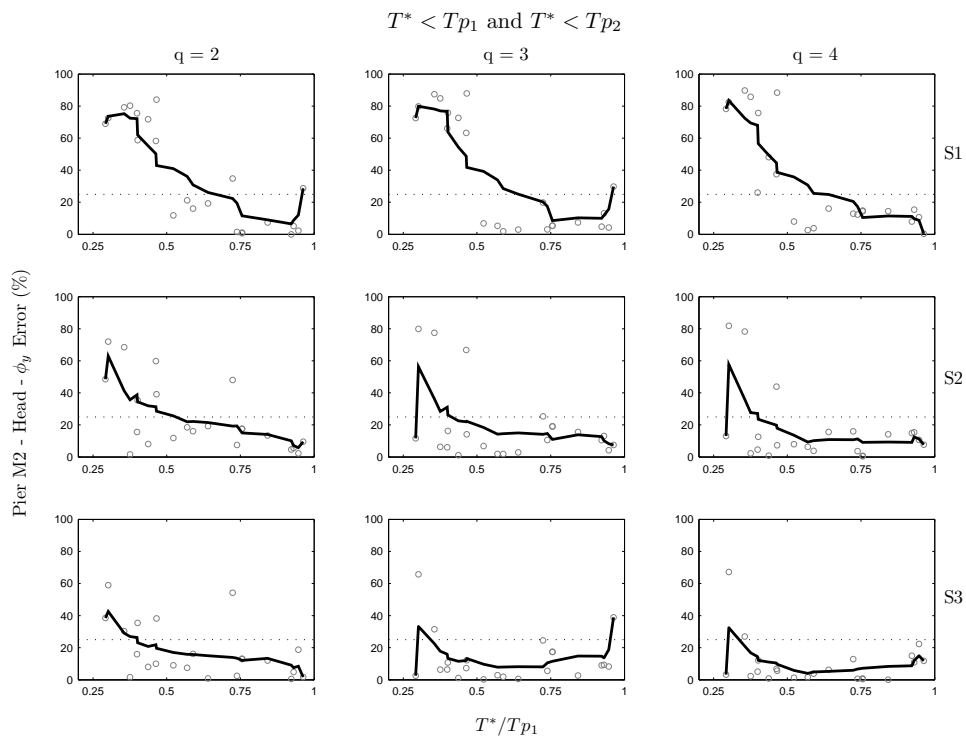
Σχήμα 6.107: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του ισοδύναμου ΣΜΕΚ βρίσκεται ανάμεσα στις περιόδους των δύο πρώτων παλμών.

6.5.10 Σφάλμα καμπυλότητας στην Κεφαλή του Μεσοβάθρου M2  
( $\phi_{y-local}M2_{Head}$ )

Στο σχήμα 6.108 παρουσιάζονται τα σφάλματα των αθροισμάτων για τον πρώτο (S1), για τους δύο πρώτους (S2) και για τους τρεις πρώτους τρεις παλμούς (S3), για τις τρεις στάθμες έντασης ( $q = 2$ ,  $q = 3$ ,  $q = 4$ ).

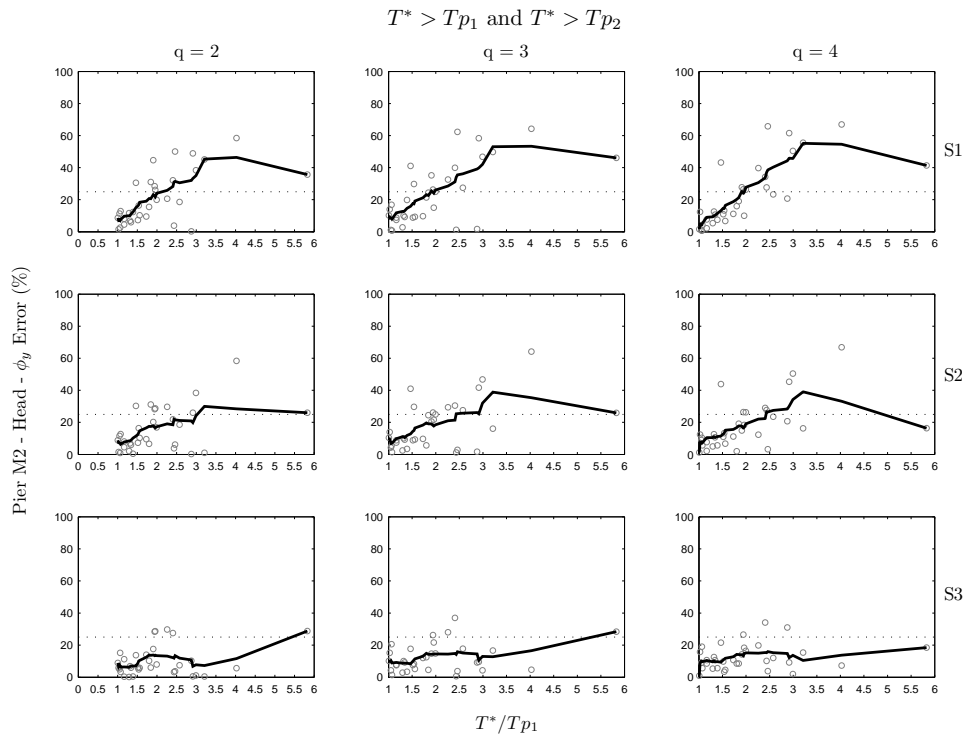


Σχήμα 6.108: Σφάλμα για το σύνολο των καταγραφών.

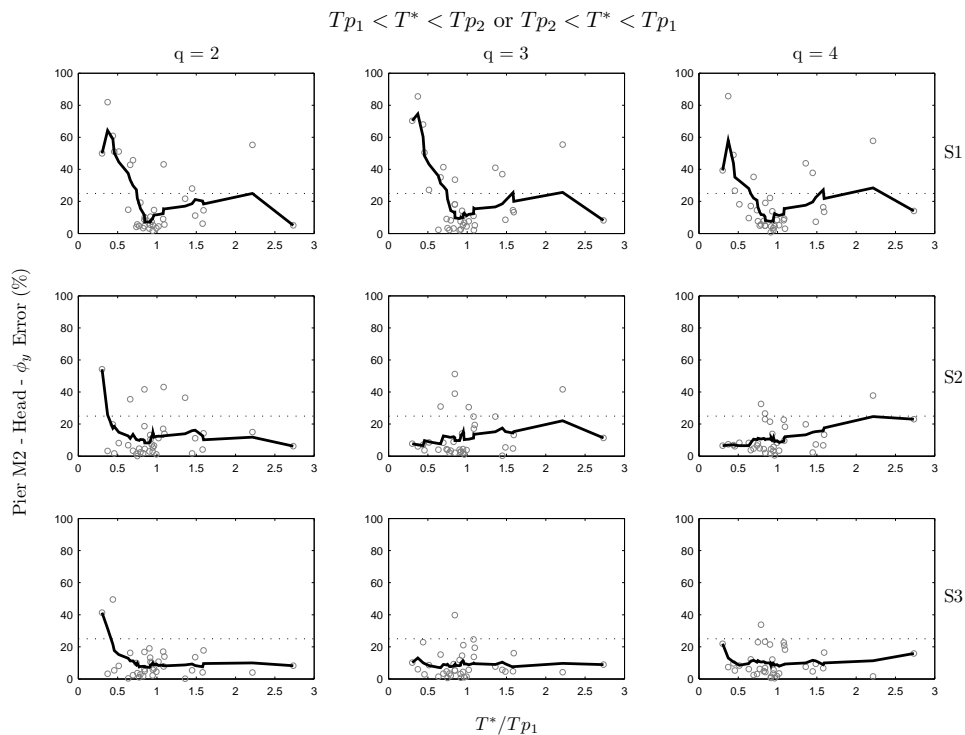


Σχήμα 6.109: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του ισοδύναμου ΣΜΕΚ είναι μικρότερη από τις περιόδους και των δύο πρώτων παλμών.

6.5. ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΤΩΝ ΑΘΡΟΙΣΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΠΑΛΜΩΝ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΙΣ ΑΡΧΙΚΕΣ ΕΔΑΦΙΚΕΣ ΚΙΝΗΣΕΙΣ



Σχήμα 6.110: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του ισοδύναμου ΣΜΕΚ είναι μεγαλύτερη από τις περιόδους και των δύο πρώτων παλμών.



Σχήμα 6.111: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του ισοδύναμου ΣΜΕΚ βρίσκεται ανάμεσα στις περιόδους των δύο πρώτων παλμών.

Σε όλα τα αποτελέσματα παρατηρείται ότι η τάξη μεγέθους του μέσου σφάλματος είναι πρακτικά η ίδια για τις τρεις κλιμακώσεις των καταγραφών. Αξίζει να σημειωθεί ότι περί τη συχνοτική περιοχή

$T^*/T_{p1} = 0.5$  όπου εμφανίζονται οι μέγιστες ανελαστικές απαιτήσεις, τα σφάλματα είναι ελαφρώς μεγαλύτερα για  $q = 2$ , απ' ότι για  $q = 3$  ή  $q = 4$ . Αυτό παρατηρείται αφού για μικρές κλιμακώσεις, όπως είναι η πρώτη, η κατασκευή αναπτύσσει τον προδιαγεγραμμένο συντελεστή συμπεριφοράς  $q = 2$  για την αρχική καταγραφή, μπορεί όμως να συμπεριφέρεται ελαστικά για τον πρώτο (S1), ή για το άθροισμα των δύο (S2), ή των τριών (S3) πρώτων παλμών.

Στο παράρτημα Β παρατίθενται τα σφάλματα για το σύνολο των άθροισμάτων και των 6 παλμών. Εκεί, μπορεί να παρατηρηθεί ότι εφόσον το σφάλμα πέσει εντός του αποδεκτού ορίου, είτε για τους δύο, είτε για τους τρεις πρώτους παλμούς, ανάλογα με το μέγεθος απόκρισης που μελετάται, η συνεισφορά των αμέσως επόμενων παλμών στη βελτίωση των αποτελεσμάτων δεν είναι σημαντική, αλλά το σφάλμα συγκλίνει στην τάξη μεγέθους που διαμορφώθηκε με τους δύο ή με τους τρεις παλμούς αντίστοιχα. Αυτό θα μπορούσε να συμβαίνει, αφού οι ανώτεροι παλμοί, ειδικά μετά τον τρίτο, εμπεριέχουν πολύ λιγότερη ενέργεια από τους πρώτους. Έτσι, δε συνεισφέρουν σημαντικά στη διόρθωση του σφάλματος. Φυσικά υπάρχουν και εξαιρέσεις που αξίζει να απομονωθούν και να μελετηθούν.



## Κεφάλαιο 7

# Συμπεράσματα

- Τα μέγιστα μεγέθη απόκρισης εμφανίζονται για τιμές του λόγου της περιόδου του ισοδύναμου μονοβαθμίου συστήματος προς την περίοδο του πρώτου παλμού  $T^*/T_{p1} = 0.50$ , ενώ τα ελάχιστα για τιμές του λόγου  $T^*/T_{p1} = 1.0$ . Επιβεβαιώνεται έτσι η παρατήρηση των Tothong and Cornell (2006), σύμφωνα με την οποία αναμένονται μεγάλοι λόγοι του δείκτη πλαστιμότητας προς το συντελεστή συμπεριφοράς  $\mu/q_y$  και συνεπώς μεγάλες ανελαστικές απαιτήσεις στις κατασκευές με περίοδο κοντά στη μισή περίοδο του δεσπόζοντος παλμού.
- Το σφάλμα εμφανίζει την ίδια κατανομή και τάξη μεγέθους για τις διάφορες κλιμακώσεις ( $q=2,3,4$ ). Εξάγεται έτσι το συμπέρασμα, ότι η τάξη μεγέθους του σφάλματος δεν έχει τόσο ισχυρή συσχέτιση με την ένταση του σεισμικού γεγονότος, όσο με το συχνοτικό του περιεχόμενο.
- Το πρόσημο του σφάλματος όλων των μεγεθών απόκρισης δεν εμφανίζει συσχέτιση με το συχνοτικό περιεχόμενο, δεν υπάρχει δηλαδή κάποια περιοχή  $T^*/T_{p1}$  όπου η απόκριση σταθερά υποεκτιμάται ή υπερεκτιμάται από τα αθροίσματα των παλμών.
- Παρατηρείται μικρότερο σφάλμα στις καταγραφές όπου η περίοδος του ισοδύναμου μονοβαθμίου βρίσκεται ανάμεσα ή είναι μεγαλύτερη από τις περιόδους των δύο πρώτων παλμών. Ειδικά στην περίπτωση που η περίοδος του ισοδύναμου ΣΜΕΚ βρίσκεται ανάμεσα στις περιόδους των δύο πρώτων παλμών, τα αποτελέσματα δείχνουν καλύτερα, αφού το μέσο σφάλμα βρίσκεται εντός των αποδεκτών ορίων και εμφανίζει μικρότερες τυπικές αποκλίσεις.
- Για λόγους  $T^*/T_{p1} < 0.50$  το μέσο σφάλμα δεν είναι αποδεκτό, πολλές φορές ακόμα και για τους 6 πρώτους παλμούς. Η εικόνα στις περιοχές αυτές είναι καλύτερη για την περίπτωση που η περίοδος του ισοδύναμου ΣΜΕΚ βρίσκεται ανάμεσα στις περιόδους των δύο πρώτων παλμών.
- Όλα τα μεγέθη απόκρισης εμφανίζουν σφάλμα της ίδιας τάξης μεγέθους σε αντίστοιχες συχνοτικές περιοχές, εκτός από τις καμπυλότητες. Το σφάλμα των καμπυλοτήτων βρίσκεται εντός των αποδεκτών ορίων για περιόδους  $T^*/T_{p1} > 0.50$  με προσέγγιση της εδαφικής κίνησης με 3 παλμούς.
- Για όλα τα άλλα μεγέθη απόκρισης το μέσο σφάλμα είναι αποδεκτό για περιόδους  $T^*/T_{p1} > 0.50$ , για τους δύο πρώτους παλμούς.





# Βιβλιογραφία

- Baker, J.W. (2007). "Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis". *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97:1486-1501.
- Chopra, A. (2007). "Dynamics of Structures, Third Edition", ISBN 0-13-156174-x. © 2007 Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, NJ.
- Clough, R., Penzien, J. (1995). "Dynamics of Structures". Computers & Structures, Inc., Berkeley, USA 1995.
- Coleman, J., Spacone, E. (2001). "Localization issues in force-based frame elements". *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 2001, 127(11): 1257-1265.
- CSI Analysis Reference Manual for SAP2000<sup>®</sup>, ETABS<sup>®</sup>, SAFE<sup>®</sup> and CsiBridge<sup>™</sup>, Computers & Structures INC., July 2011.
- De Luca, F., Vamvatsikos, D., Iervolino, I. (2011). "Near-optimal bilinear fit of capacity curves for equivalent SDOF analysis". *COMPDYN 2011, 3<sup>rd</sup> ECCOMAS Thematic Conference on, Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, Corfu, Greece, 26–28 May.
- European Standard EN 1992-1-1:2004, Eurocode 2: Design of concrete structures, Part 1-1: General rules, and rules for buildings. European Committee for Standardization (CEN). 2004.
- European Standard EN 1998-1:2004, Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. European Committee for Standardization (CEN). 2004.
- European Standard EN 1998-2 :2005, Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, Part 2: Bridges. European Committee for Standardization (CEN). 2005.
- Fardis, M. (2009). "Seismic Design, Assessment and Retrofitting of Concrete Buildings based on Eurocode 8" Springer Dordrecht Heidelberg London, New York.
- Giannelos, C., Vamvatsikos, D. (2011). "Simplified seismic performance assessment over the lifetime of a highway bridge subject to pier reinforcement corrosion". *COMPDYN 2011, 3<sup>rd</sup> ECCOMAS Thematic Conference on, Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, Corfu, Greece, 25–28 May.
- Iervolino, I., Cornell, C.A. (2008). "Probability of Occurrence of Velocity Pulses in Near-Source Ground Motions". *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.98, 5, 2262-227.
- Kardoutsou, V., Taflampas I., Psycharis I.N. (2014). "A new method for the classification of ground motions as pulse-like or non pulse-like". *2<sup>nd</sup> European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Istanbul, Turkey, Aug. 25-29.
- Kardoutsou, V., Mimoglou, P., Taflampas, I., Psycharis, I.N. (2015). "Relation of pulse period with near-fault strong motion parameters". *6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Christchurch, New Zealand, 1-4 November.
- Kardoutsou, V., Mimoglou, P., Taflampas, I., Psycharis, I.N. (2015). "Evaluation and comparison of new methods for the classification of ground motions as pulse-like or non pulse-like". *SECED 2015 Conference: Earthquake Risk and Engineering towards a Resilient World*, Cambridge UK, 9-10 July.
- Kent, D.C. and Park, R. (1971). "Flexural Members with Confined Concrete". *Journal of*

the Structural Division, ASCE, 1971, 97(ST7): 1969-1990.

Kramer, S. (1996). "Geotechnical Earthquake Engineering" Prentice-Hall International Series, New Jersey 1996.

Krawinkler, H., Alavi, B. (1998). "Development of improved design procedures for near-fault ground motions". SMIP98, seminar on utilization of strong motion data, Oakland, CA.1998.

Li, S., Xie, L. (2007). "Progress and trend on near-field problems in civil engineering". Acta Seismologica Sinica, Vol.20 No.1 (105-114), January 2007.

Liang, X., Beck, R., Sritharan S. (2015). "Understanding the Confined Concrete Behavior on the Response of Hollow Bridge Columns, Final Report". California Department of Transportation, Caltrans Project Contract: 65A0412, January 2015.

Lu, Y., Panagiotou, M. (2014). "Characterization and representation of strong near-fault ground motions using wavelet-based cumulative pulse extraction". Tenth U.S. National Conference on Earthquake Engineering Frontiers of Earthquake Engineering, Anchorage, Alaska, July 21-25.

Mander, J.B., Priestley, M.J.N., Park, R. (1984). "Seismic design of bridge piers". Research Report No. 84-2, Univ. of Canterbury, New Zealand.

Mander, J.B., Priestley, M.J.N., Park, R. (1988). "Observed stress-strain behavior of confined concrete". Journal of Structural Engineering, ASCE, 114(8), 1827-1849.

Mander, J.B., Priestley, M.J.N., Park, R. (1988). "Theoretical stress-strain model for confined concrete". Journal of Structural Engineering, ASCE, 114(8), 1804-1826.

Mavroeidis, G.P., Papageorgiou, A.S. (2003). "A mathematical representation of near-fault ground motions". Bulletin of the Seismological Society of America, 93:1099-1131.

Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M. H., Fenves, G.L, et al. (2007). "OpenSees Command Language Manual".

McKenna, F., Fenves, G. L., Scott, M. H., and Jeremic, B. (2000). "Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSees)". Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA.

Mimoglou, P., Psycharis, I.N., Taflampas, I.M. (2014). "Explicit determination of the pulse inherent in pulse-like ground motions". Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2014; 43:2261-2281.

Neuenhofer, A., Filippou, F.C. (1997). "Evaluation of nonlinear frame finite-element models". J. Struct. Eng., 123(7), 958-966.

Papanikolaou, V.K., Kappos, A.J. (2005). "Modelling confinement in concrete columns and bridge piers through 3D nonlinear finite element analysis". In: fib symposium keep concrete attractive, Budapest, Hungary; May 2005. pp. 488-95.

Paulay, T., Priestley, M.J.N. (1992). "Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings", John Wiley & Sons, Inc., pp. 98-103.

Popovics, S. (1973). "A numerical approach to the complete stress-strain curves for concrete". Cement and Concrete Research, 3(5), 583-599.

Rodriguez-Marek, A. (2000). Near-fault Seismic Site Response, Ph.D. dissertation, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley.

Scott, B.D., Park, R., Priestley, M.J.N. (1982). "Stress-Strain Behavior of Concrete Confined by Overlapping Hoops at Low and High Strain Rates", ACI Journal, Vol. 79, No. 1, pp. 13-27.

Scott, M.H., Fenves, G.L. (2006). "Plastic Hinge Integration Methods for Force-Based Beam-Column Elements". Journal of Structural Engineering, 2006, ASCE, 132(2): 244-252.

Shahi, S.K., Baker, J.W. (2011). "An empirically calibrated framework for including the effects of near-fault directivity in probabilistic seismic hazard analysis". Bulletin of the Seismological Society of America 2011, 101(2): 742-755.

Shen, J., Tsai, M., Chang, K., Lee, G. (2004). "Performance of a Seismically Isolated Bridge under Near-Fault Earthquake Ground Motions". Journal of Structural Engineering, 10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:6(861), June 2004.

Somerville, P.G., Smith, N.F., Graves, R.W., Abrahamson, N.A. (1997). "Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity", *Seismological Research Letters*, 68:199-222.

Somerville, P.G. (1998). "Development of an improved representation of near-fault ground motions" *Proc. SMIP98 Seminar on Utilization of Strong Motion Data, California Strong Instrumentation Program, Sacramento, California*, 1-20.

Somerville, P.G. (2003). "Magnitude scaling of the near-fault rupture directivity pulse", *Physics of the earth and planetary interiors*, 137:201-212.

Stewart, J.P., Chiou, S.J., Bray, J.D., Graves, R.W., Somerville, P.G., Abrahamson, N.A. (2001). "Ground motion evaluation procedures for performance based design". PEER Report-2001/09. Pacific Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, California.

Terzic, V. (2011). "Force-based Element vs Displacement-based Element", *Open System for Earthquake Engineering Simulation*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, UC Berkeley, December 2011.

Timoshenko, S., Goodier, N. (1951). "Theory of Elasticity", McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, Toronto, London 1951.

Tothong, P., Cornell, C.A. (2006). "Probabilistic seismic demand analysis using advanced ground motion intensity measures, attenuation relationships, and near-fault effects". PEER Report 2006/11. Pacific Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, California.

Vamvatsikos, D., Cornell A. (2001). "Incremental dynamic analysis" *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 2002; 31:491-514, August 2001.

Zhai, C., Chang, Z., Li, S., Chen, Z., Xie, L. (2013). "Quantitative identification of near-fault pulse-like ground motions based on energy", *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 5:351-355.

Βαμβάτσικος, Δ. (2005). "Τεχνική Έκθεση: Αποτίμηση Σεισμικής Συμπεριφοράς της υπό σχεδίαση Γέφυρας Γ7, τμήμα Μέτσοβο – Παναγιά Εγνατίας Οδού, με τη μέθοδο Ανάλυσης Δυναμικής Αντίστασης (Incremental Dynamic Analysis)", Φεβρουάριος 2005.

Γιαννέλος, Χ., Βαμβάτσικος, Δ. (2008). "Απλοποιημένες Μέθοδοι Μη-Γραμμικής Δυναμικής Ανάλυσης Γέφυρας υπό Σεισμική Καταπόνηση σε δύο διευθύνσεις". 3<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής, Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας, 5-7 Νοεμβρίου, Αθήνα 2008.

ΕΑΚ 2000, Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός 2000, ΟΑΣΠ (Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας), ΣΠΜΕ (Σύλλογος Πολιτικών Μηχανικών Ελλάδος).

Εγκύκλιος Ε39/99, "Οδηγίες Αντισεισμικής Μελέτης Γεφυρών". Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε (Υπουργείο Περιβάλλοντος Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων), Έκδοση 2000.

ΕΚΩΣ 2000, Ελληνικός Κανονισμός Ωπλισμένου Σκυροδέματος 2000, ΟΑΣΠ (Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας), ΣΠΜΕ (Σύλλογος Πολιτικών Μηχανικών Ελλάδος).

Κατσιαδέλης, Ι. (2012). "Δυναμική Ανάλυση των Κατασκευών", Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 2012.

Νέος Κανονισμός Τεχνολογίας Χαλύβων Οπλισμού Σκυροδέματος ΚΤΧ 2008, ΦΕΚ 1416/Β/17-07-2008, ΦΕΚ 2113/Β/13-10-2008, Ελληνική Δημοκρατία, Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε (Υπουργείο Περιβάλλοντος Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων), Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων, Κεντρικό Εργαστήριο Δημοσίων Έργων (ΚΕΔΕ), Αθήνα 2008.

Σιγάλας, Ι. "Αντισεισμικός Σχεδιασμός Γεφυρών". Σημειώσεις του μαθήματος Σχεδιασμός Τεχνικών Έργων ΙΙ, Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών "Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση Κατασκευών".

Σιγάλας, Ι. "Γέφυρες κατασκευασμένες με τη μέθοδο της Προβολοδόμησης", Σημειώσεις του μαθήματος Σχεδιασμός Τεχνικών Έργων ΙΙ, Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών "Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση Κατασκευών".

Σταθόπουλος, Σ., Seifried, G., Κοτσάνοπουλος, Π., Haug, H., Σταθόπουλος, Ε., Σπυρόπουλος, Ι., Σταθόπουλος, Κ. (2006). "Γέφυρα Μετσόβου", 15<sup>ο</sup> Συνέδριο Σκυροδέματος ΤΕΕ, ΕΤΕΚ Αλεξανδρούπολη, 25-27 Οκτωβρίου, 2006.

---

Φαρδής, Μ. (2011). "Σύνθεση Γεφυρών Σκυροδέματος". Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Κατασκευών.

Ψυχάρης, Ι. (2015). "Αντισεισμικός Σχεδιασμός Γεφυρών". Σημειώσεις του μαθήματος Ειδικά Θέματα Αντισεισμικής Τεχνολογίας, Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών "Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση Κατασκευών". Αθήνα 2015.

Ψυχάρης, Ι. (2015). "Αντισεισμικός Σχεδιασμός με Στάθμες Επιτελεστικότητας". Σημειώσεις του μαθήματος Αντισεισμική Τεχνολογία 2, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Αθήνα 2015.

#### Ιστοσελίδες

Engineering Strong Motion Database (ESM): <http://esm.mi.ingv.it/>

Kalliergos OTM, Consulting Engineering Company, Webpage: <http://www.kalliergos.com/>

Observatories and Research Facilities for European Seismology Database (Orfeus):

<http://www.orfeus-eu.org/>

OpenSees Webpage: <http://www.opensees.berkeley.edu/>

PEER Ground Motion Database: <http://peer.berkeley.edu/ngawest/databases.html>

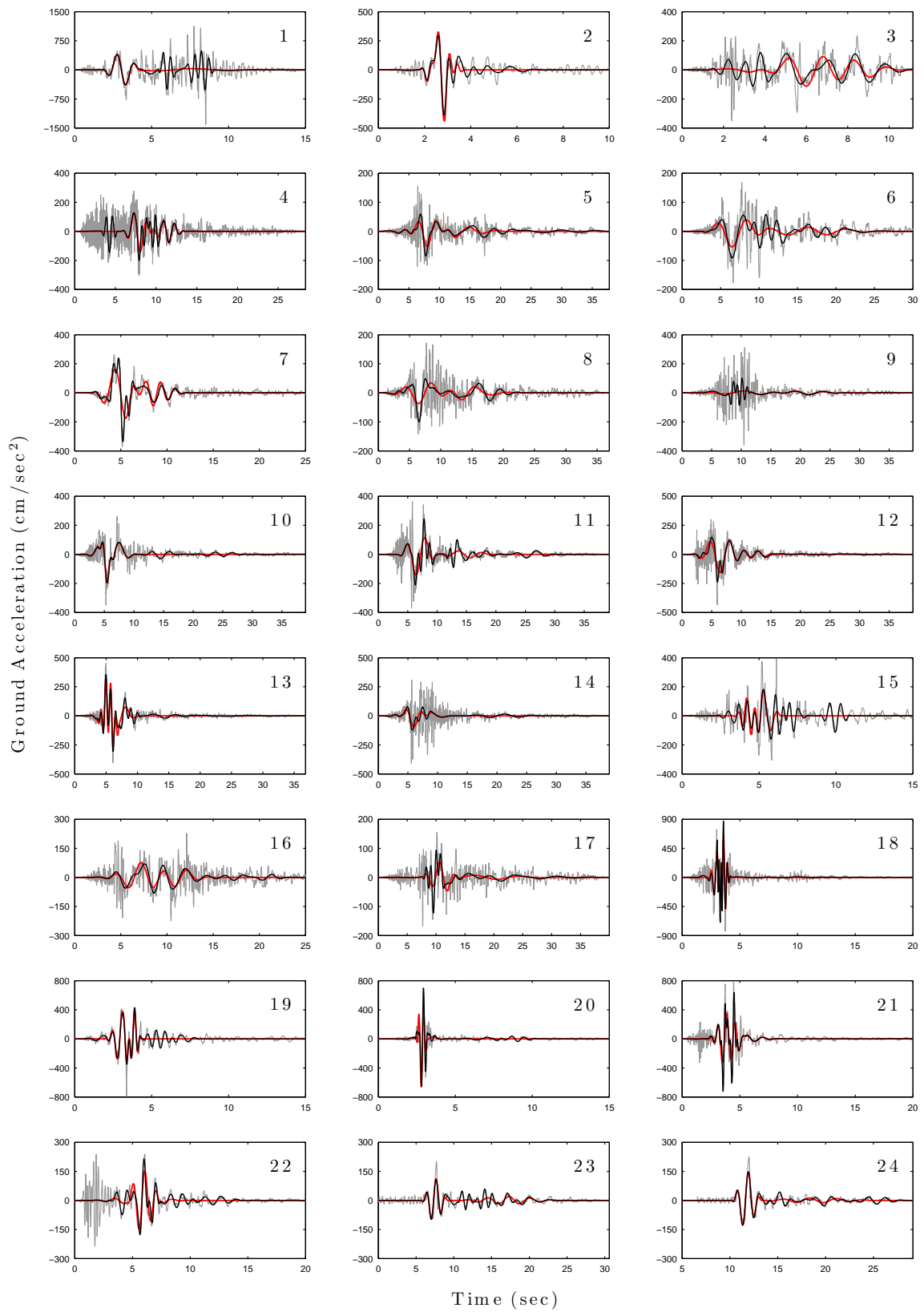
Tcl Association: <http://wiki.tcl.tk/>

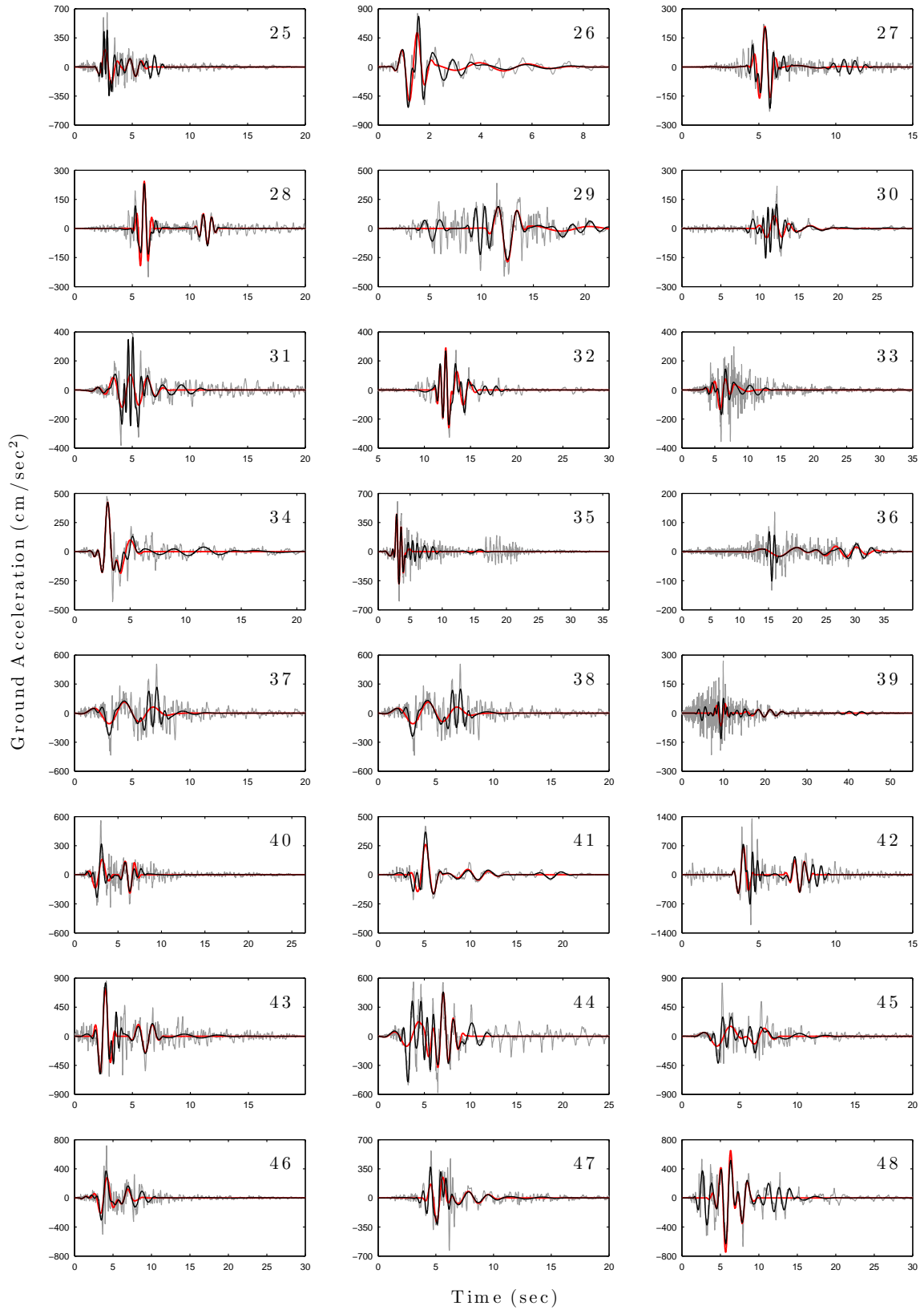
## Παράρτημα Α΄

# Χρονοϊστορίες και φάσματα εδαφικών μεγεθών

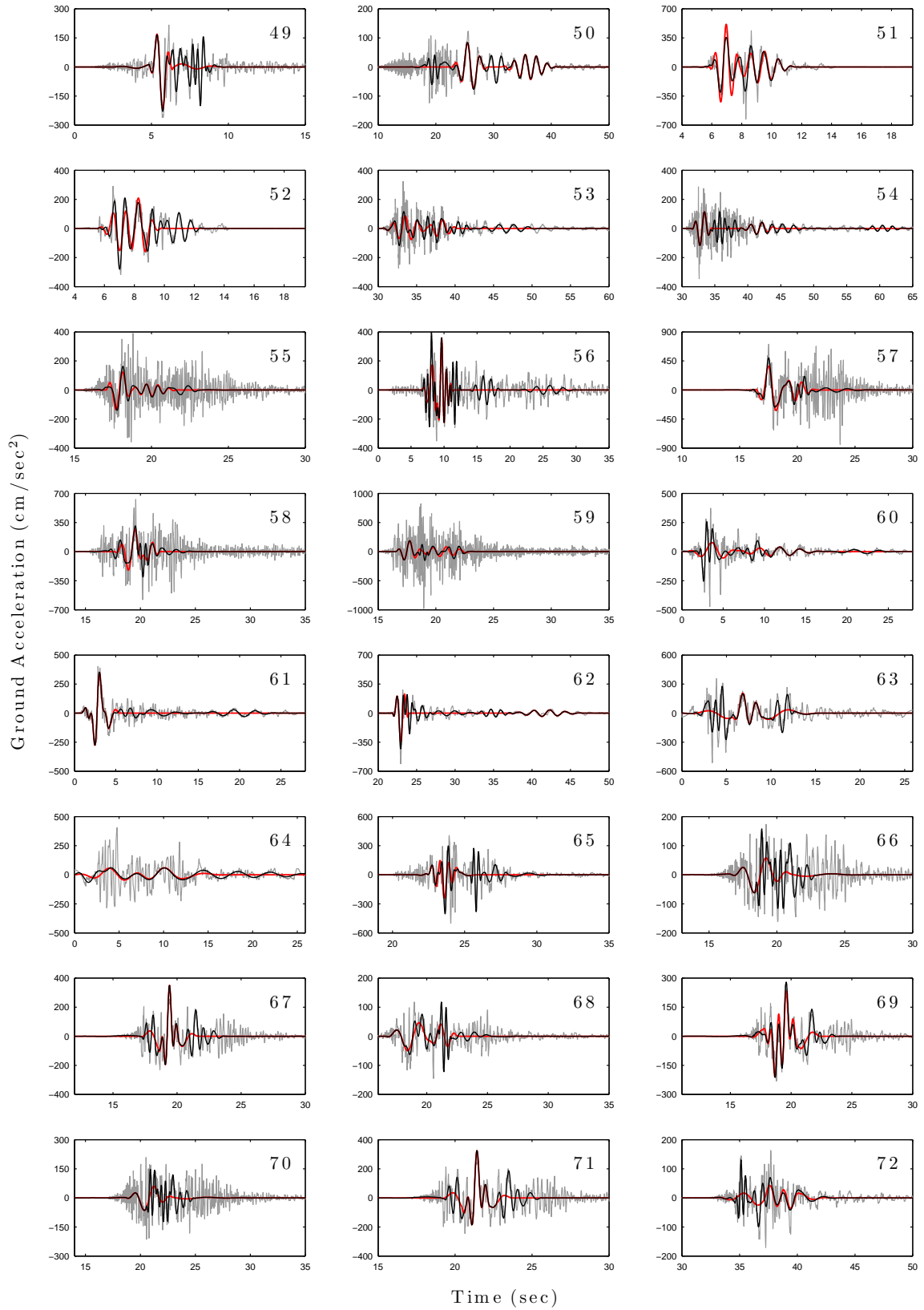
Στο παράρτημα αυτό παρατίθενται οι χρονοϊστορίες της εδαφικής επιτάχυνσης και ταχύτητας, όπως και τα ελαστικά φάσματα της ψευδο-επιτάχυνσης (PSA) και ψευδο-ταχύτητας (PSV) για απόσβεση 5% για τις 90 σεισμικές καταγραφές που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις. Με γκρι χρώμα σημαίνεται η αρχική εδαφική κίνηση, με κόκκινο η συνθετική κίνηση που παράγεται από την υπέρθεση των δύο πρώτων παλμών, ενώ με μαύρο η συνθετική κίνηση που παράγεται από την υπέρθεση των έξι πρώτων παλμών.

Α.1.1 Εδαφική Επιτάχυνση

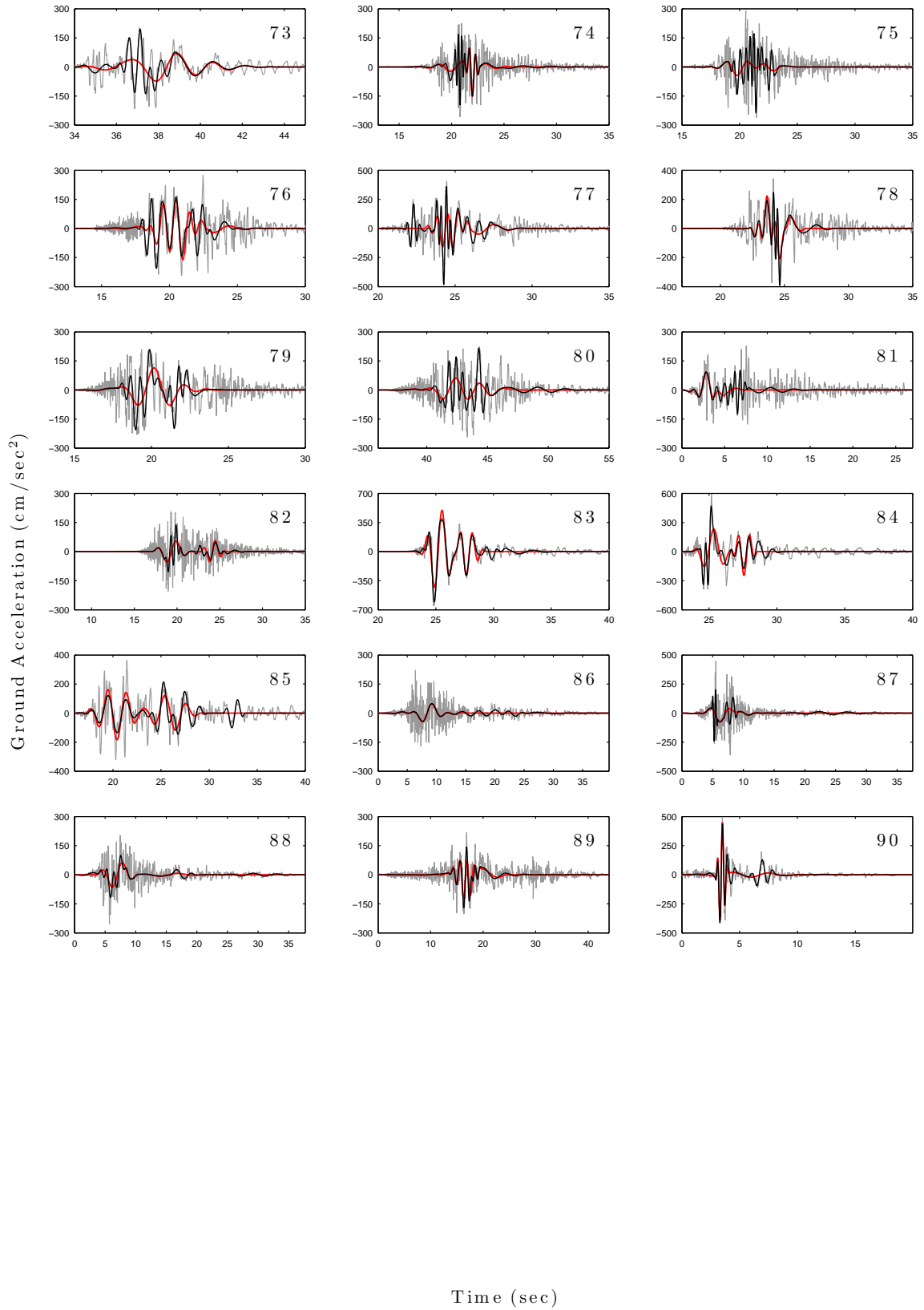




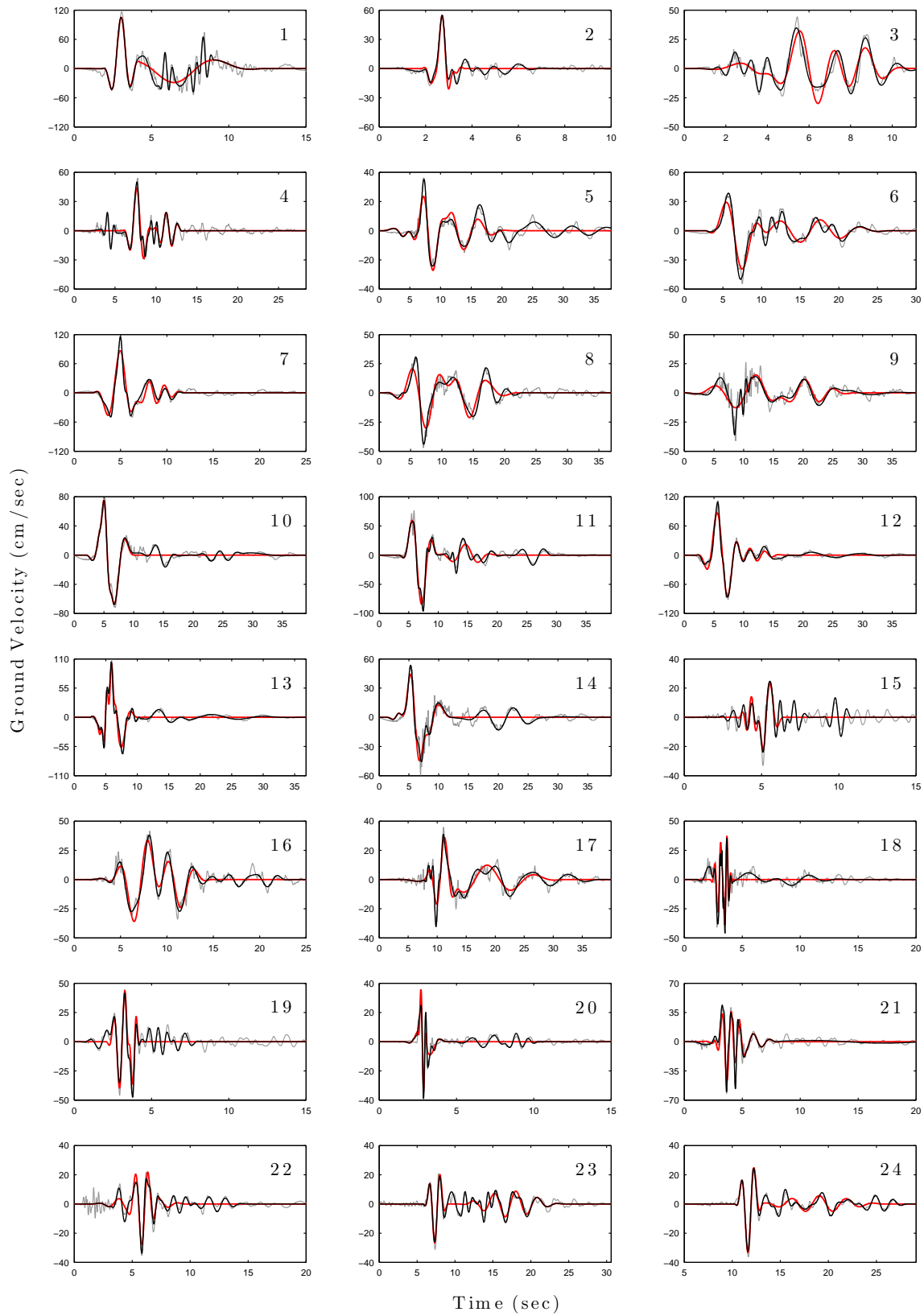
# Α.1. ΕΔΑΦΙΚΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ

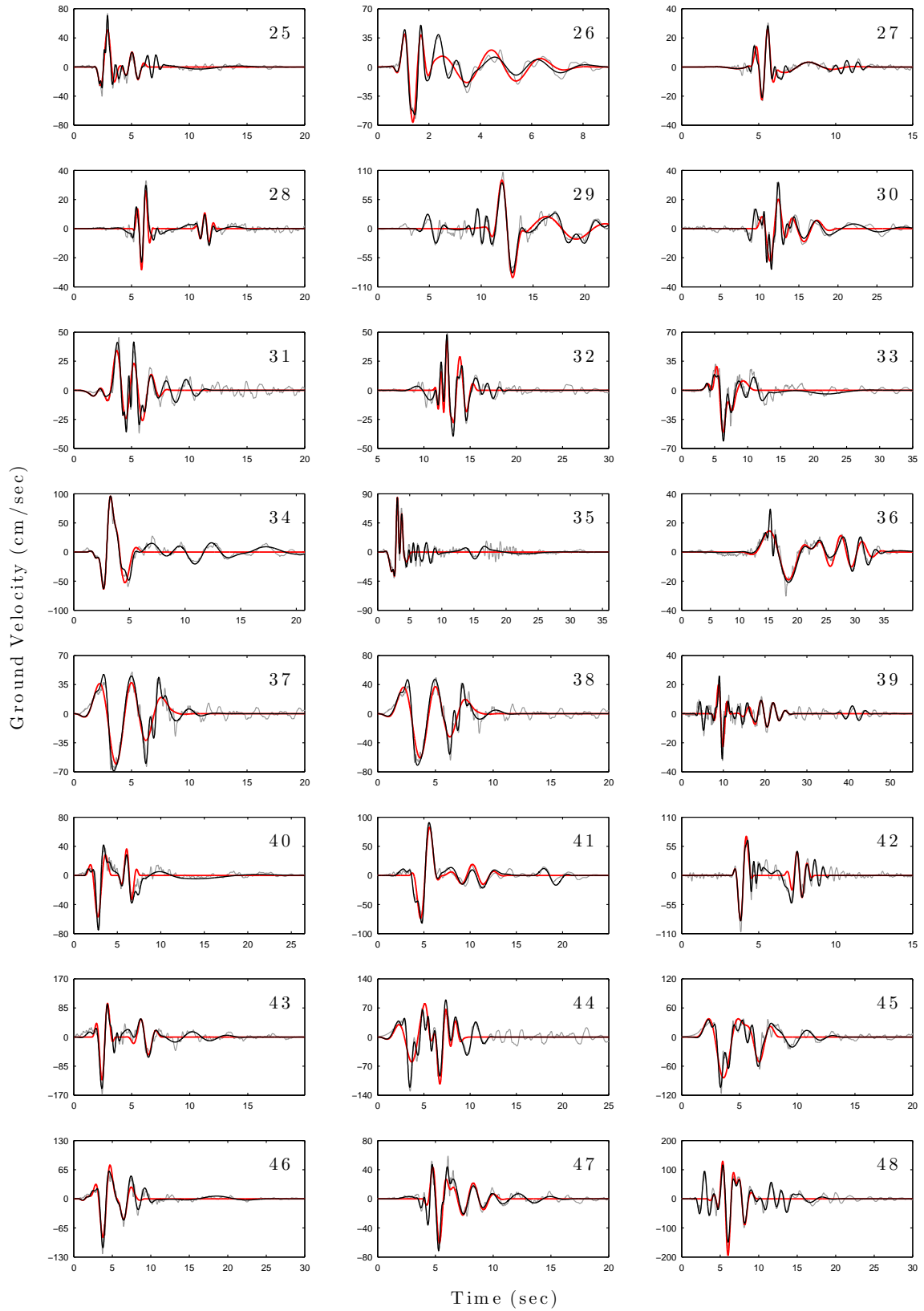




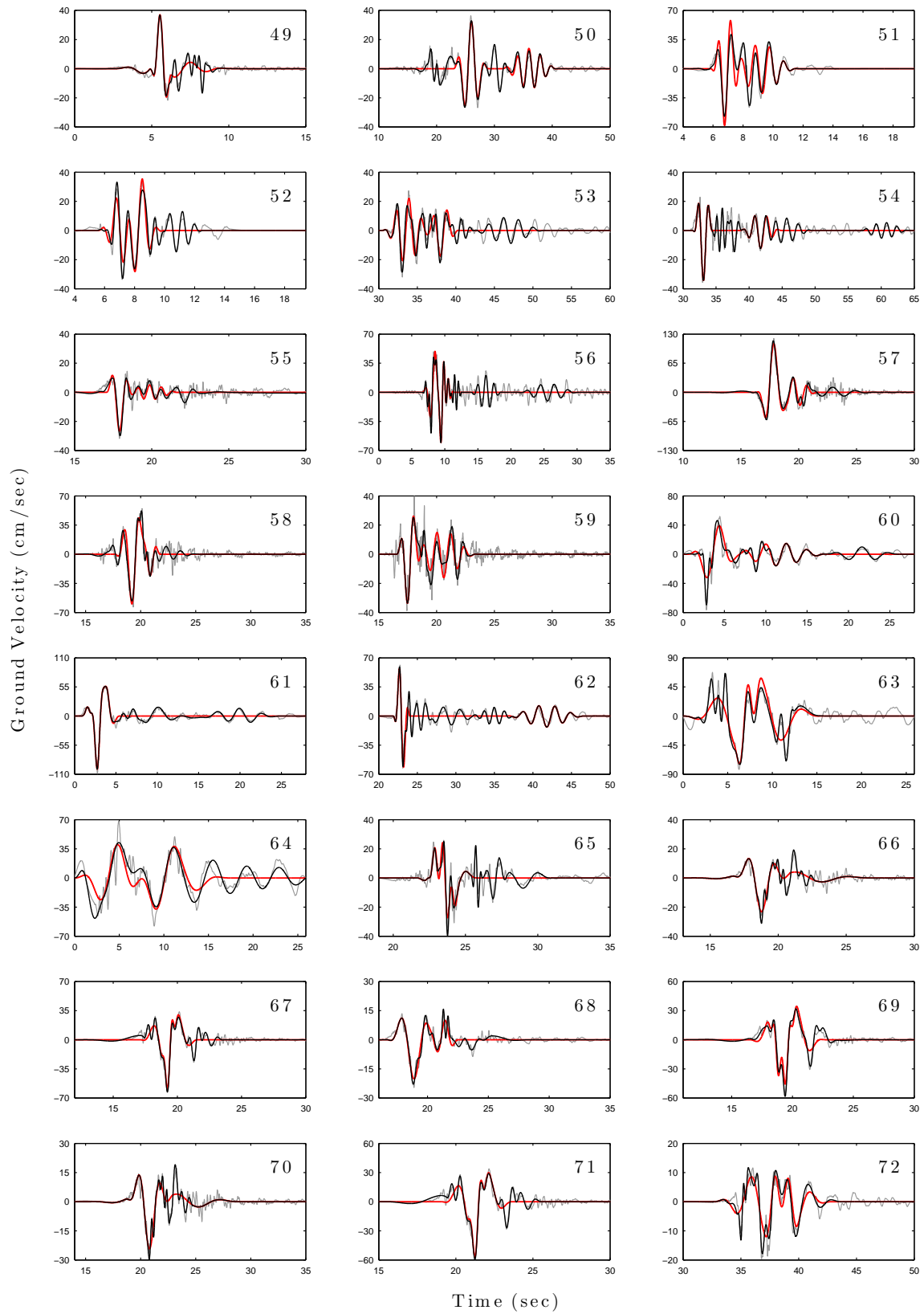


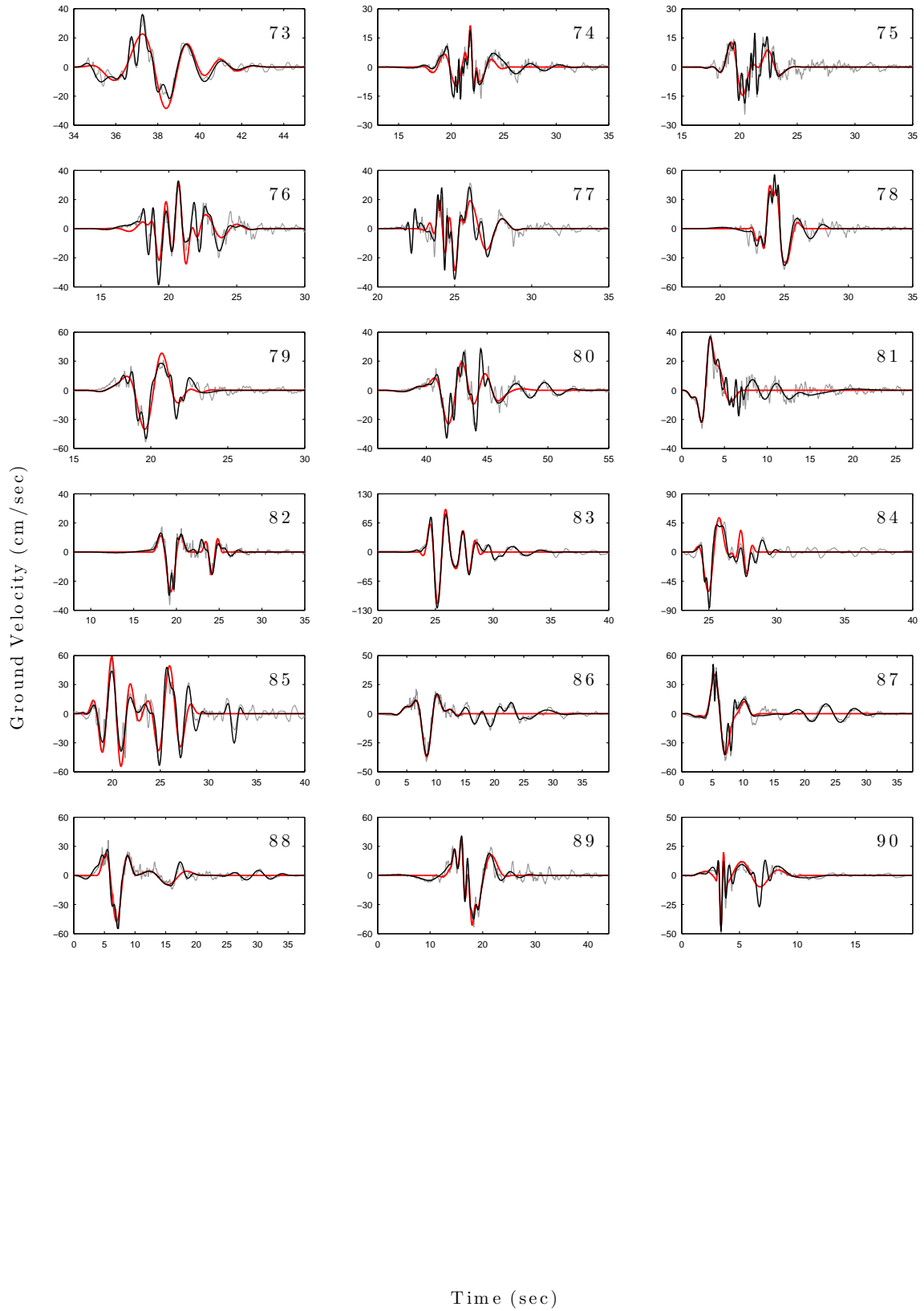
Α'.2 Εδαφική Ταχύτητα



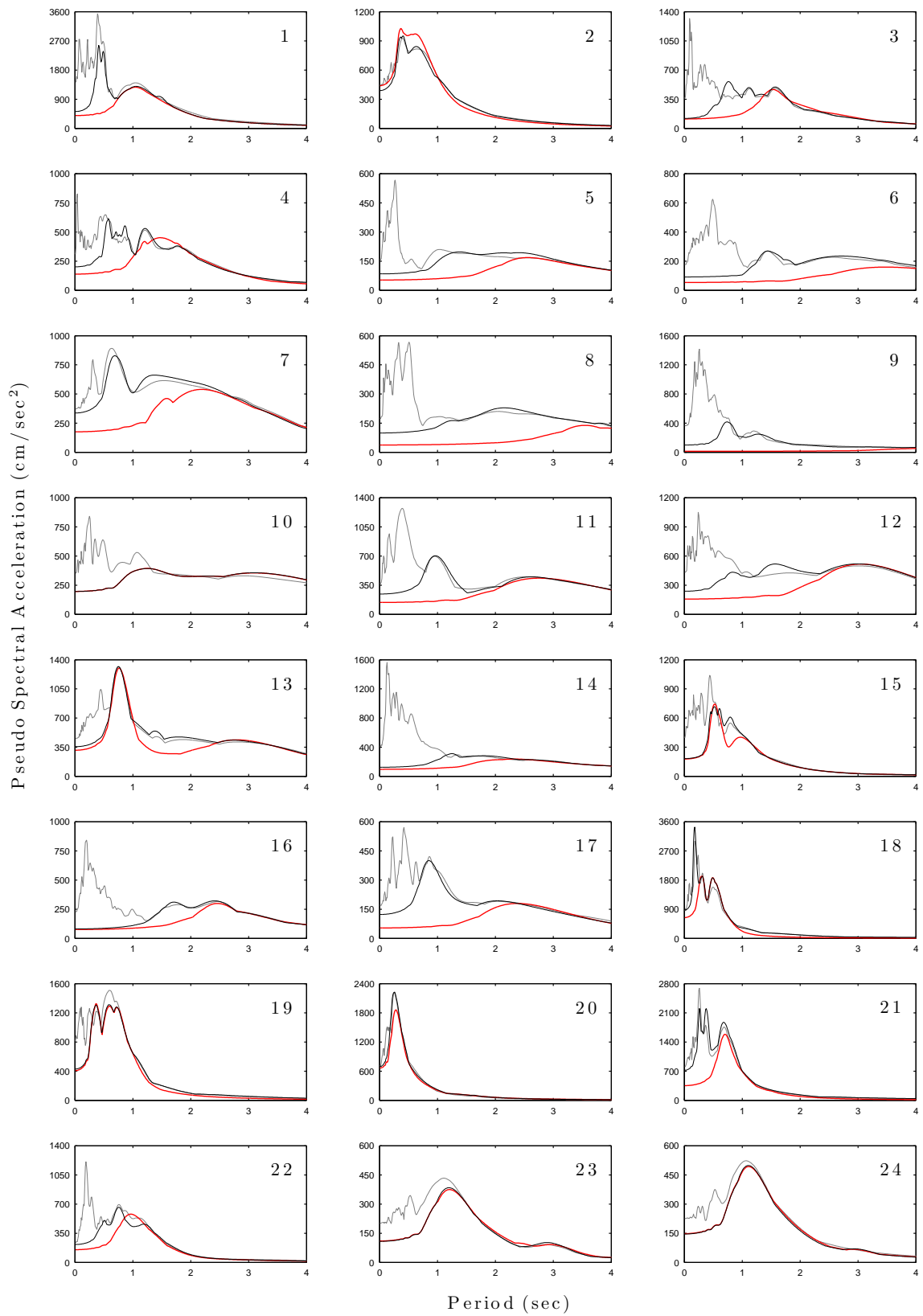


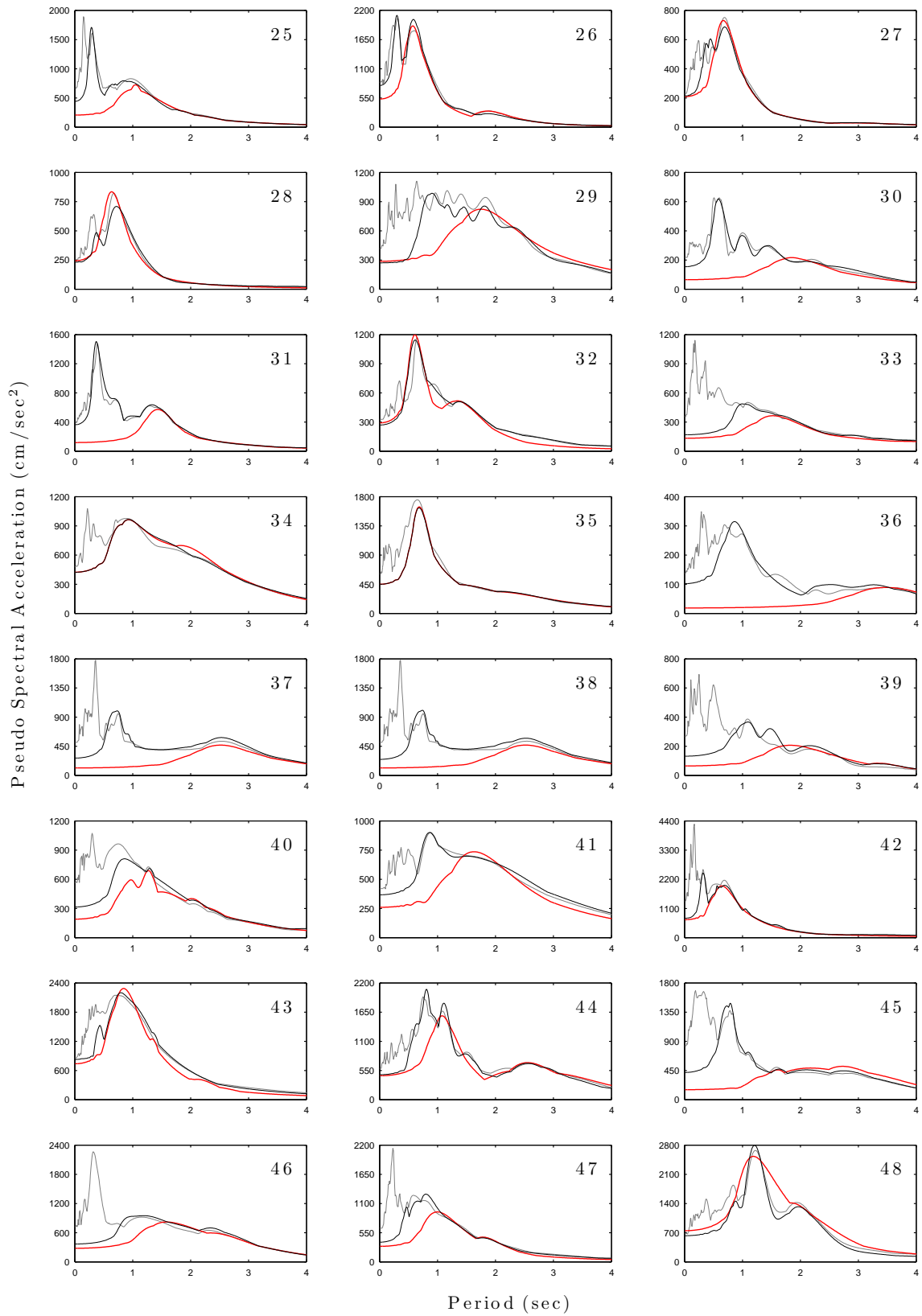
## Α.2. ΕΔΑΦΙΚΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ



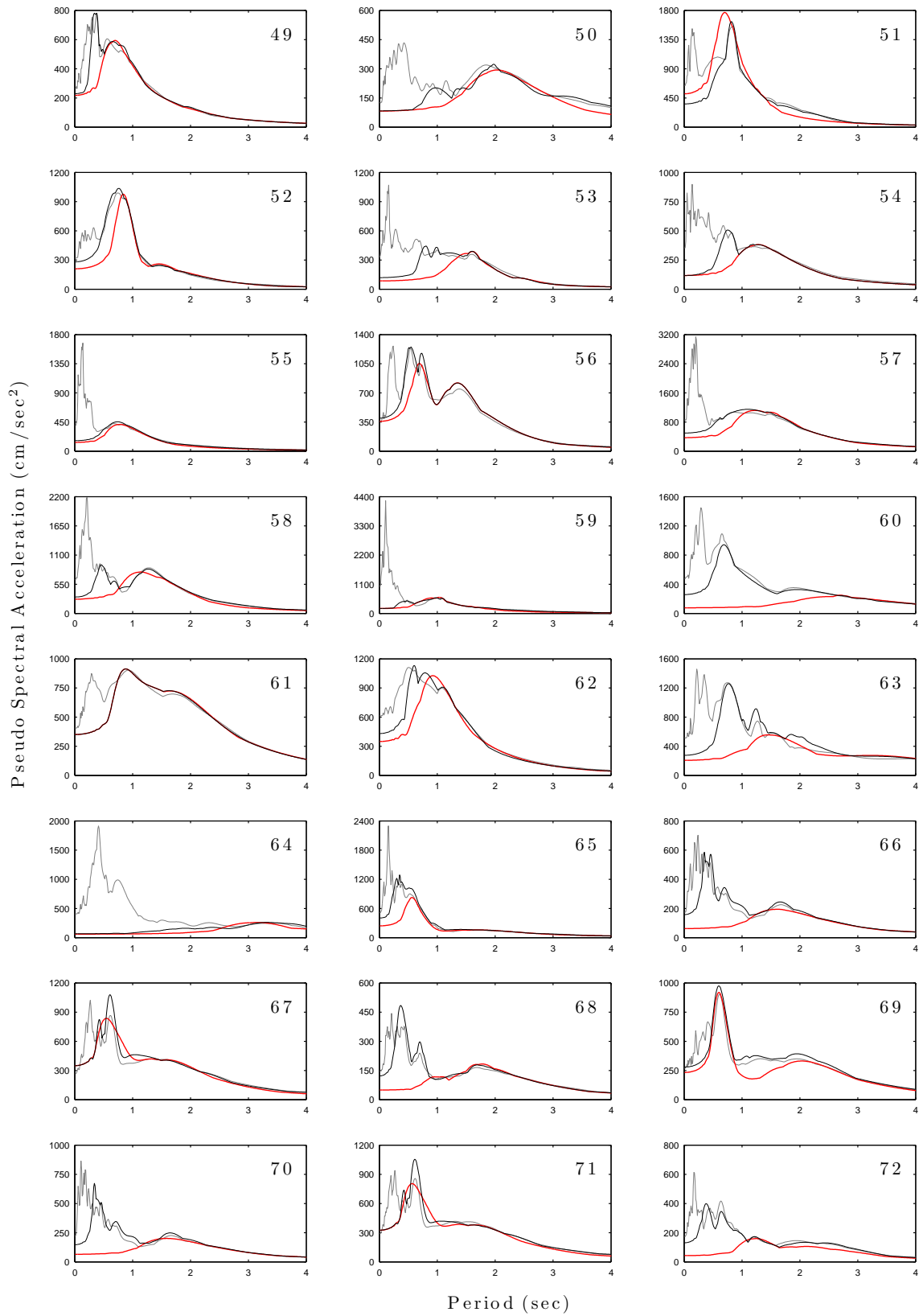


Α.3 Ψευδο-φασματική Επιτάχυνση

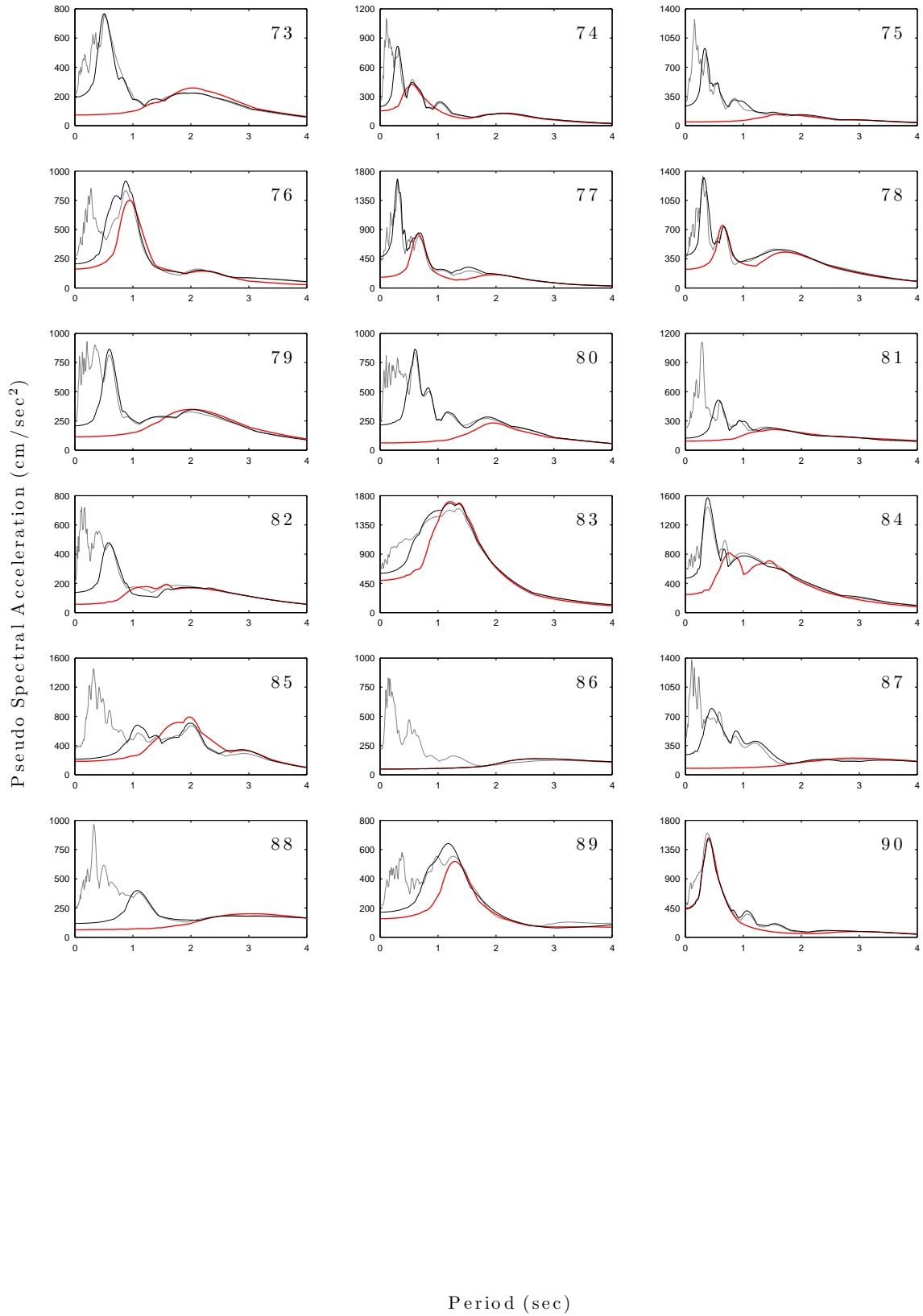




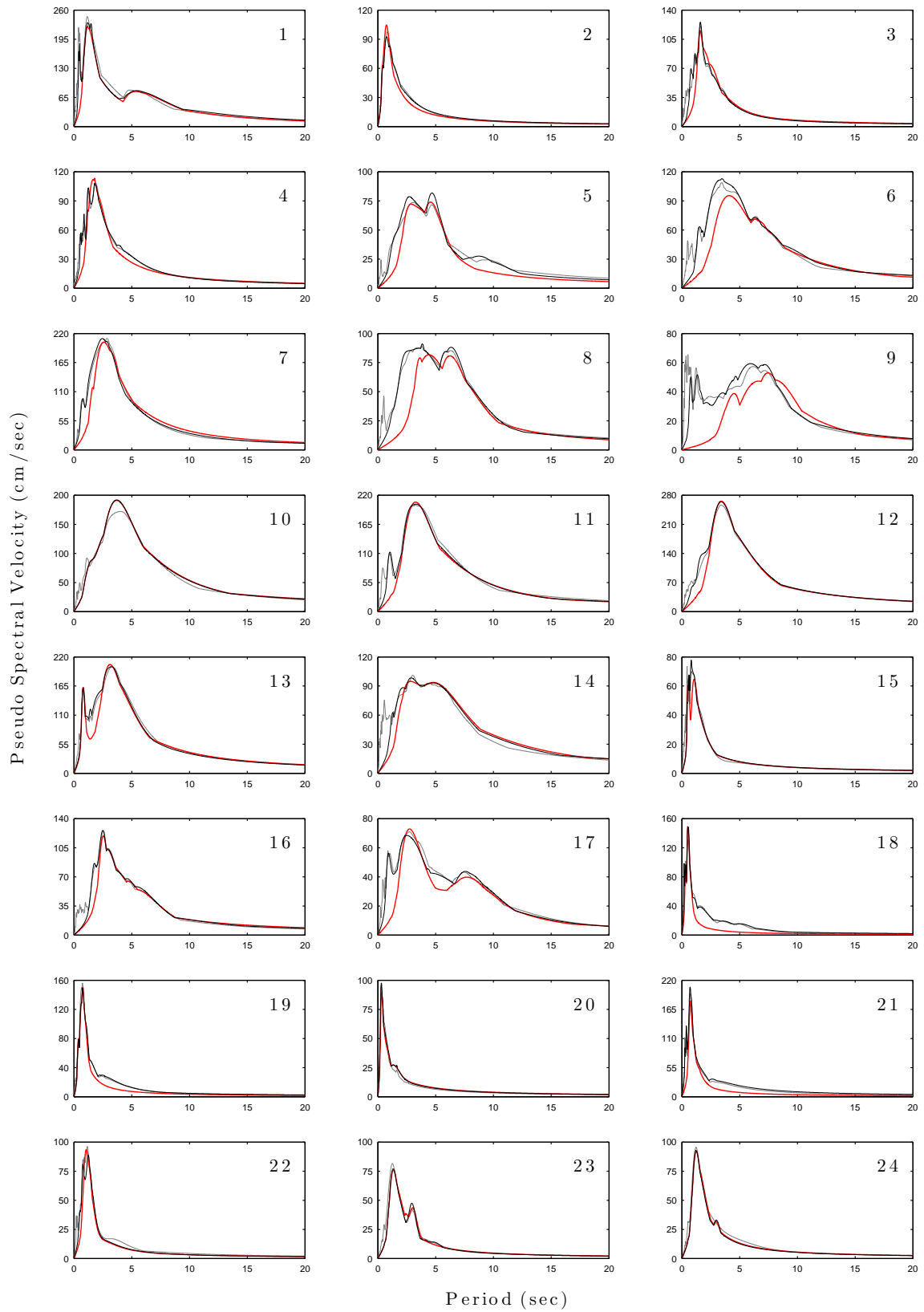
### Α.3. ΨΕΥΔΟ-ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ

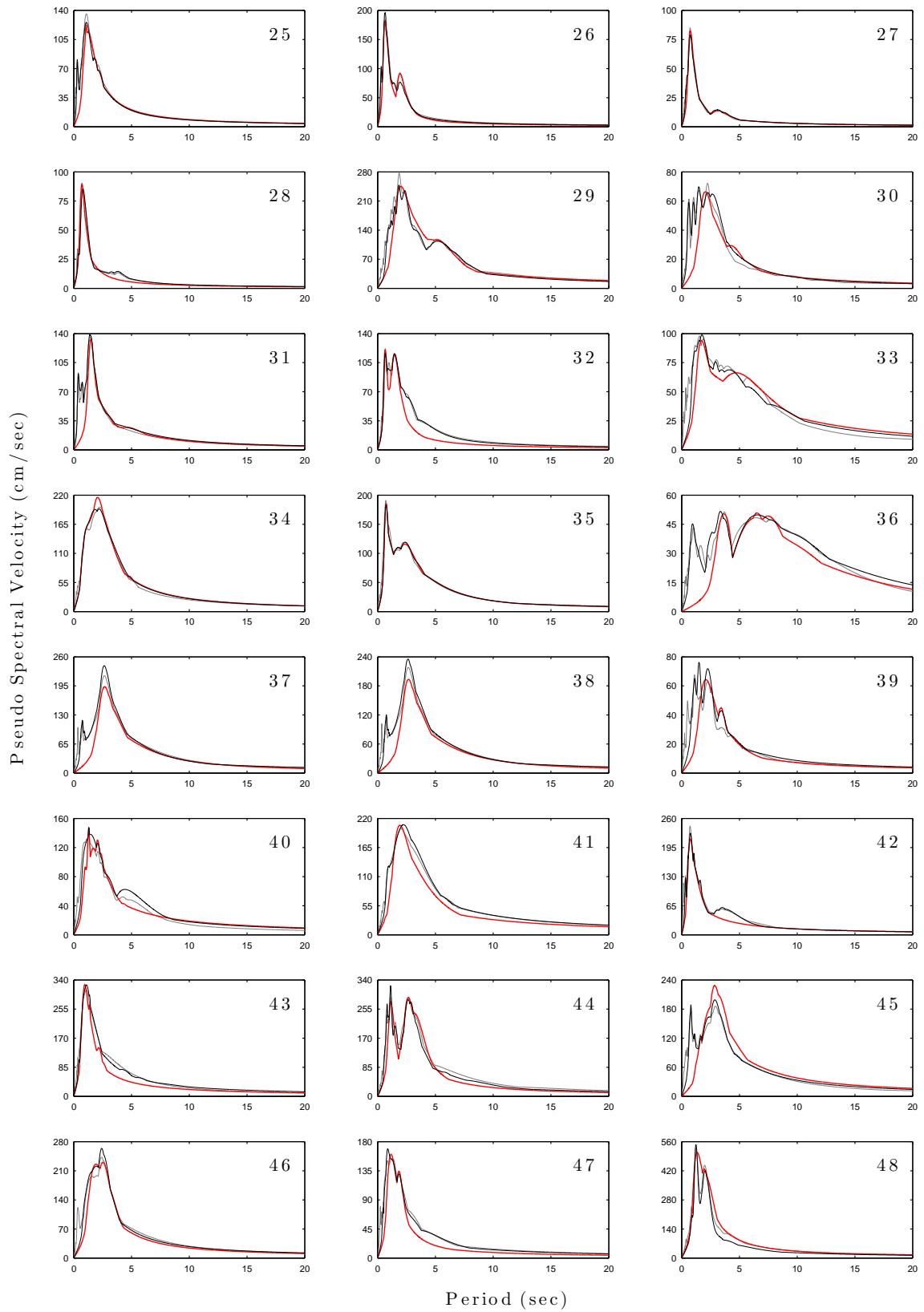




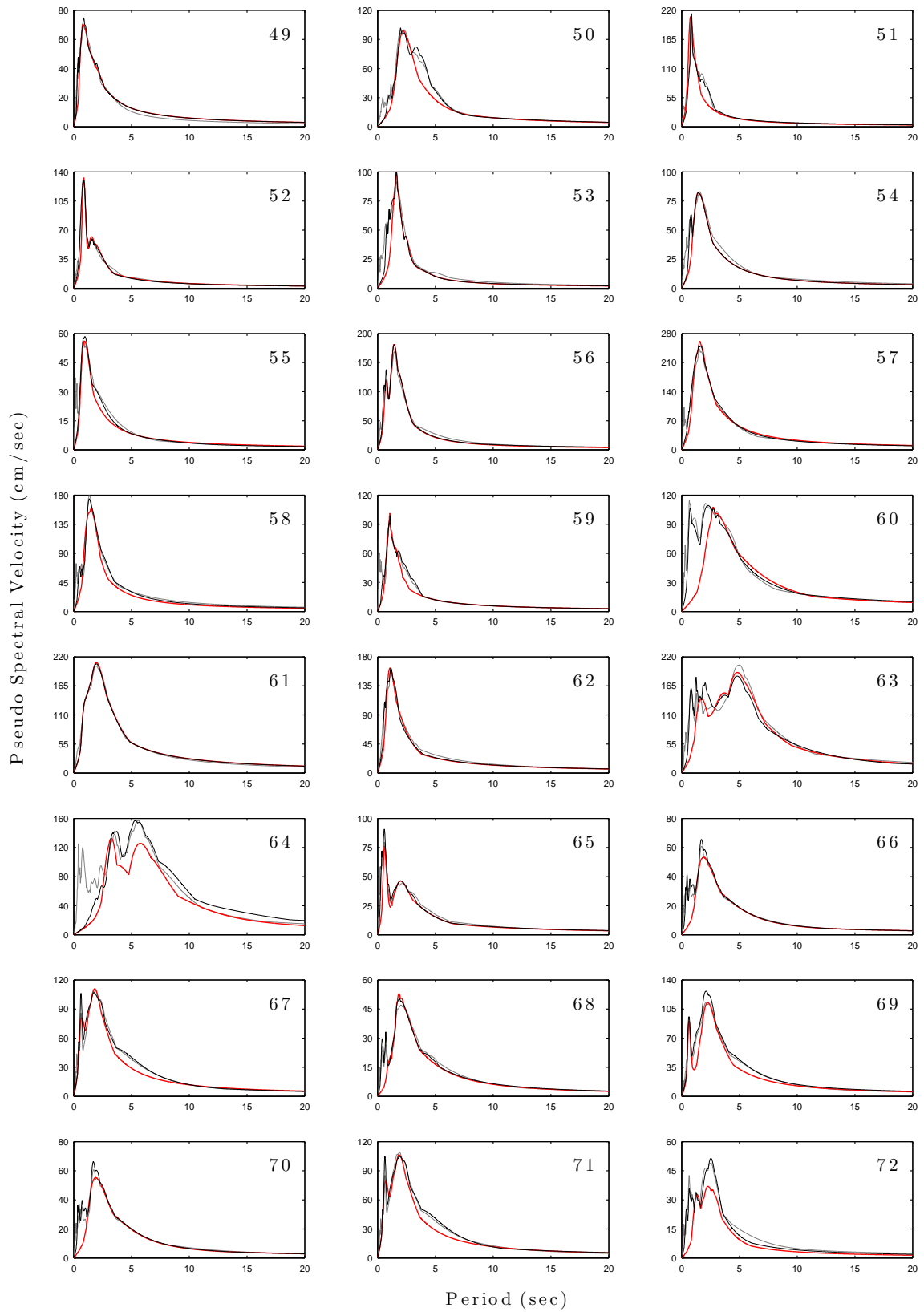


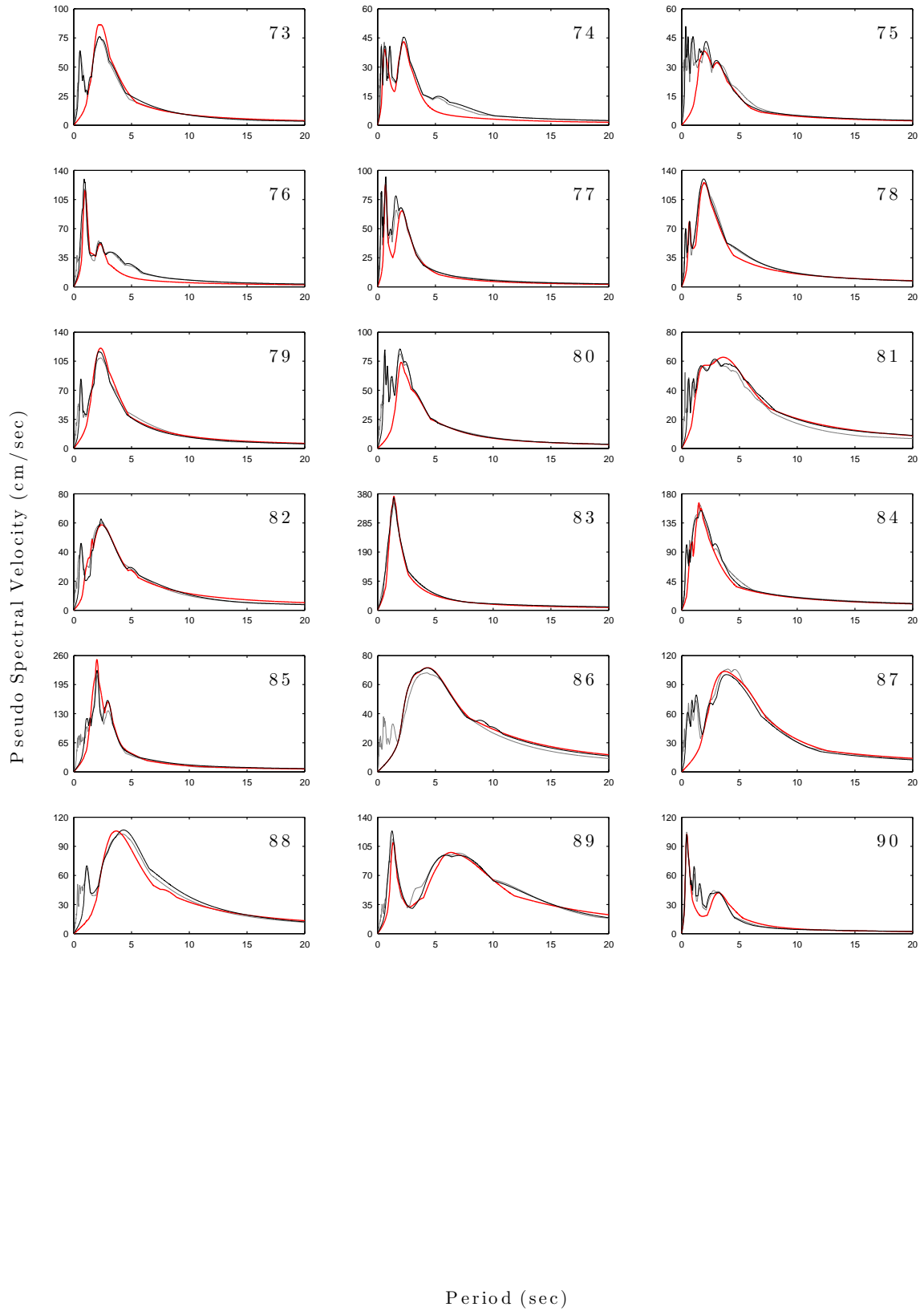
Α'.4 Ψευδο-φασματική Ταχύτητα





#### Α.4. ΨΕΥΔΟ-ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ





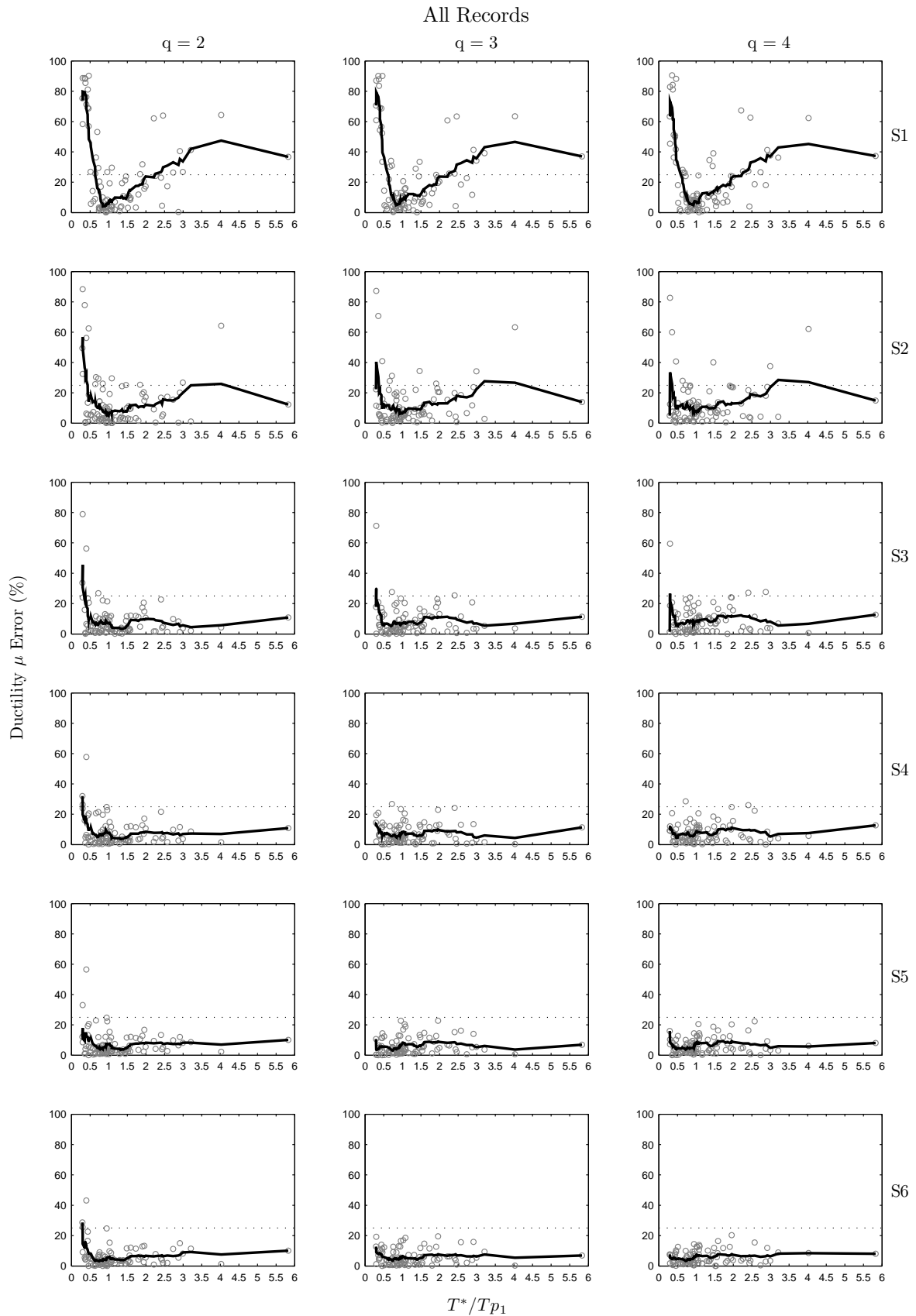


## Παράρτημα Β΄

# Σφάλματα μεγεθών απόκρισης

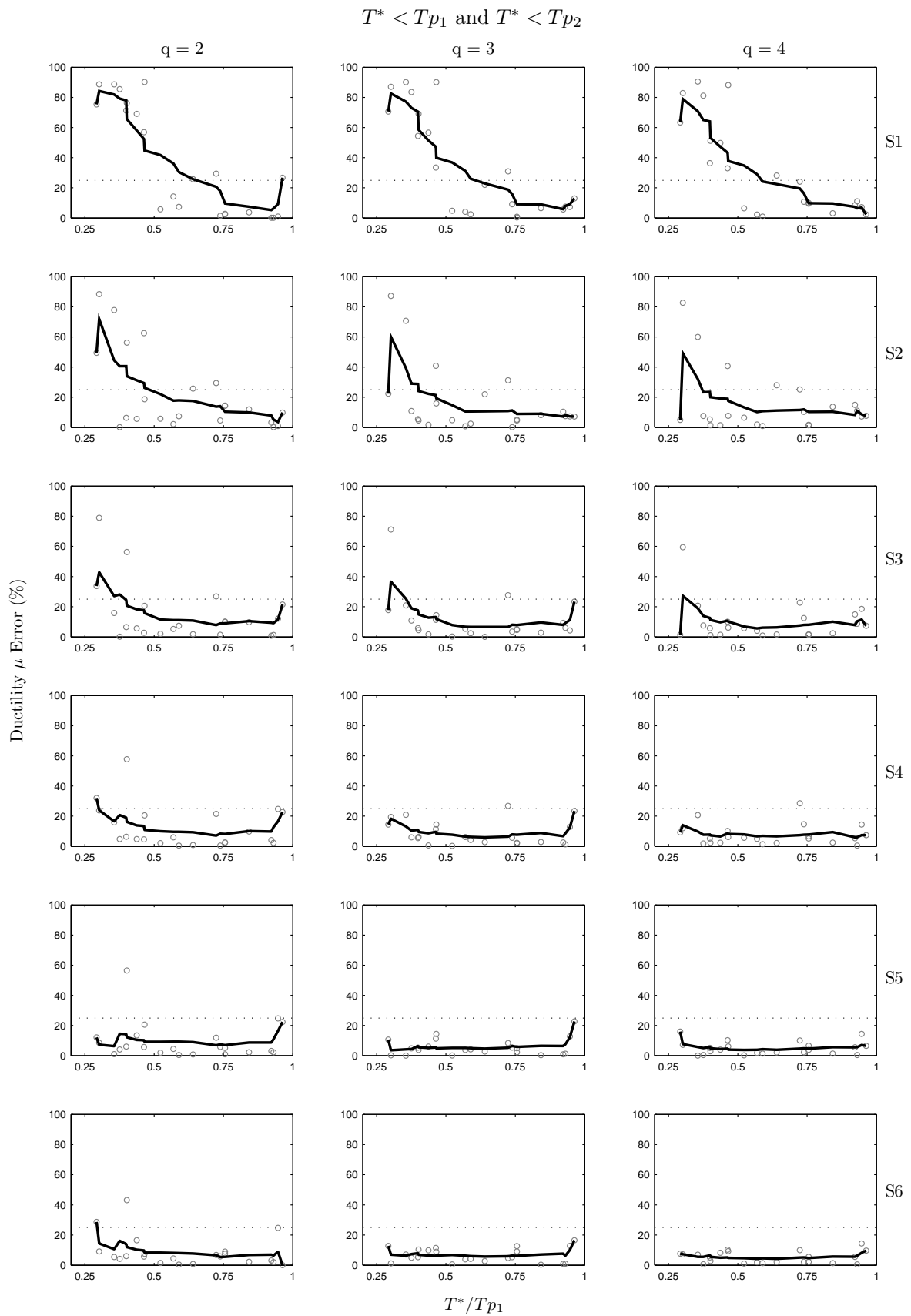
Στο παράρτημα αυτό παρατίθενται τα σφάλματα των 10 μεγεθών απόκρισης για το σύνολο των 6 αθροισμάτων των παλμών και τις τρεις κλιμακώσεις. Με γκρι κουκκίδες φαίνονται τα μέγιστα μεγέθη απόκρισης που προκύπτουν ως αποτελέσματα των μη-γραμμικών αναλύσεων χρονοϊστορίας φόρτισης, ενώ οι μαύρες συμπαγείς γραμμές δείχνουν τον Κινητό Μέσο (Moving Average) των αποτελεσμάτων.

Β.1 Σφάλμα Πλαστιμότητας

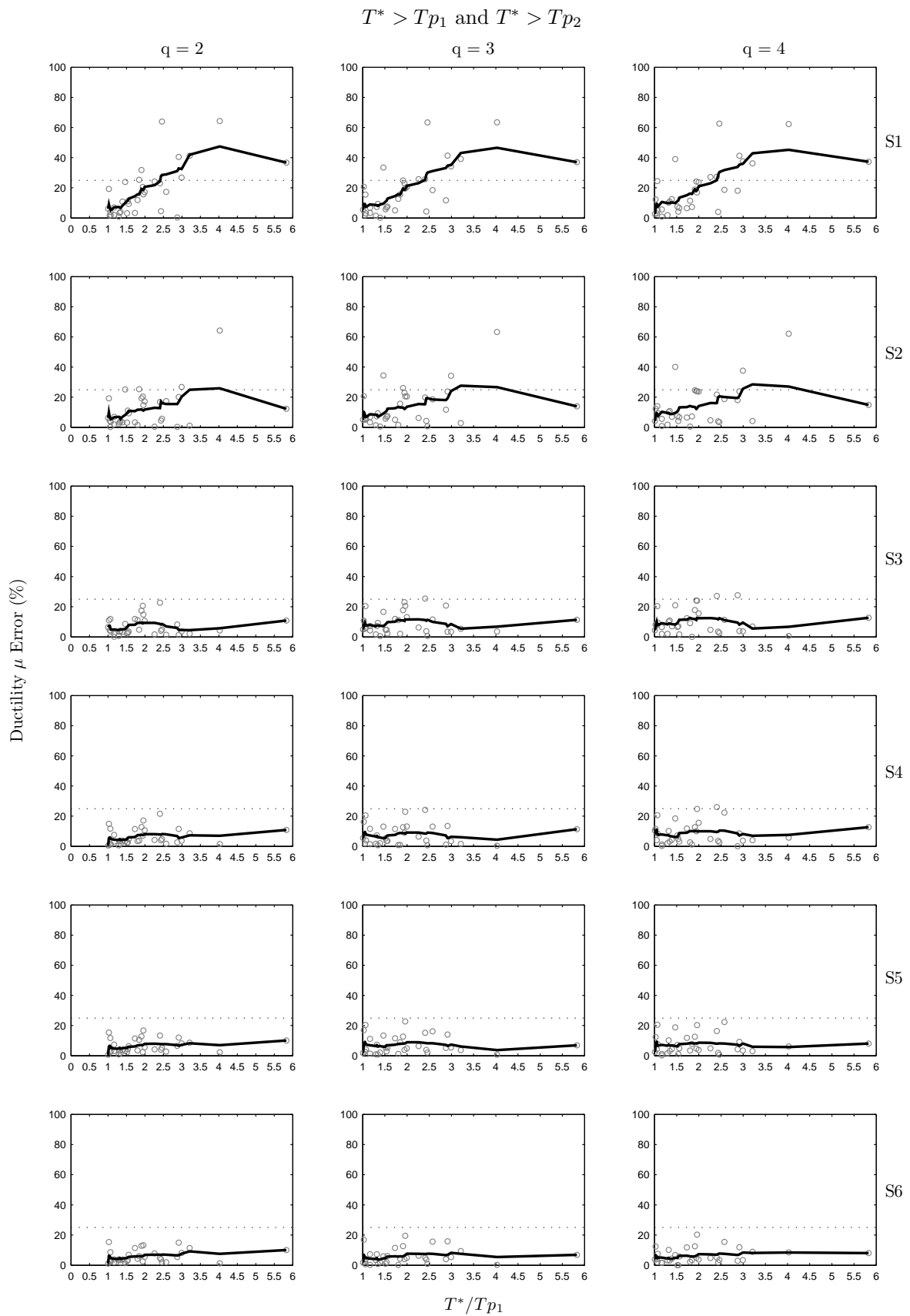


Σχήμα Β.1: Σφάλμα για το σύνολο των καταγραφών.

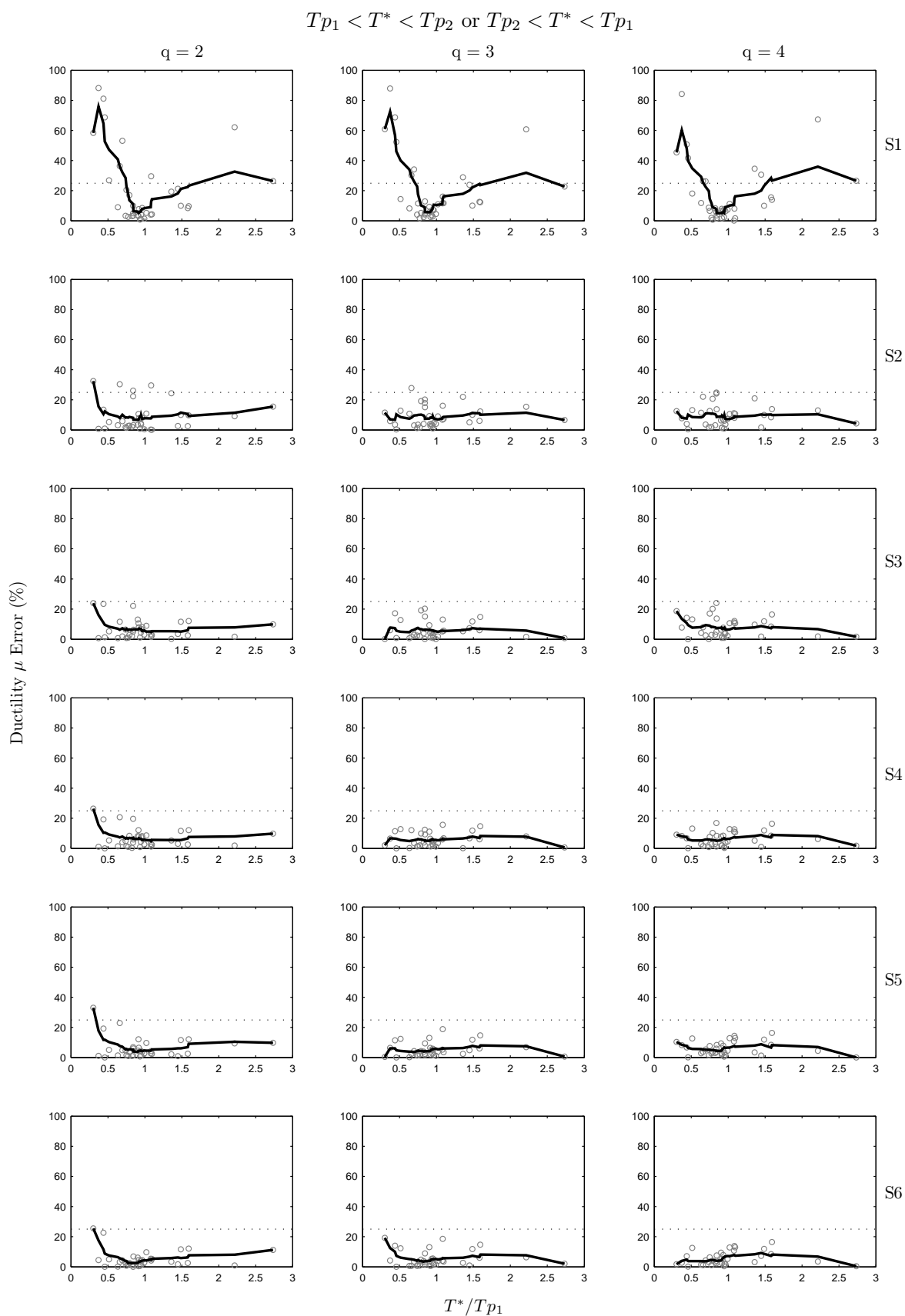




Σχήμα Β'.2: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του μονοβαθμίου είναι μικρότερη από τις περιόδους και των δύο πρώτων παλμών.

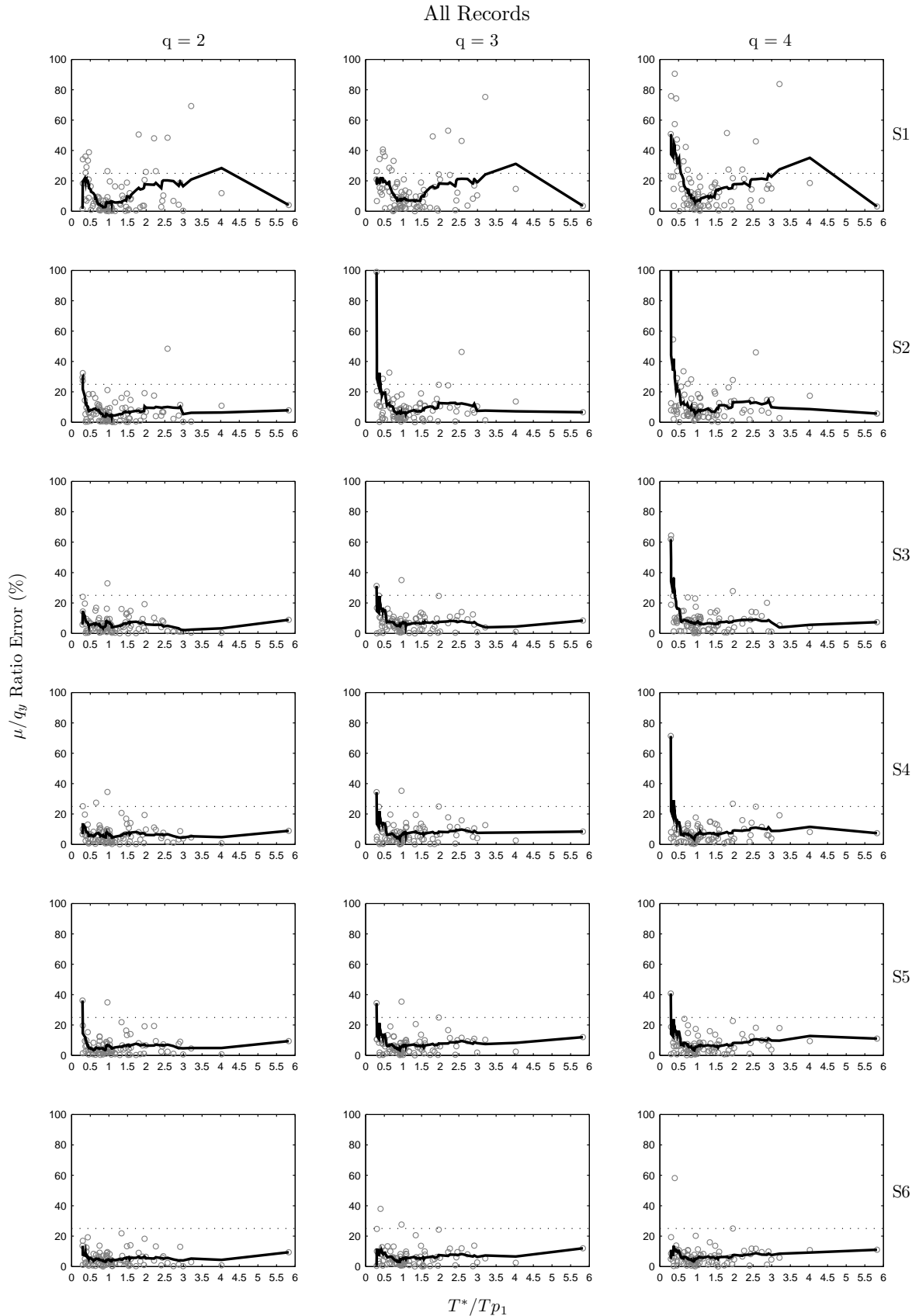


Σχήμα Β.3: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του μονοβαθμίου είναι μεγαλύτερη από τις περιόδους και των δύο πρώτων παλμών.

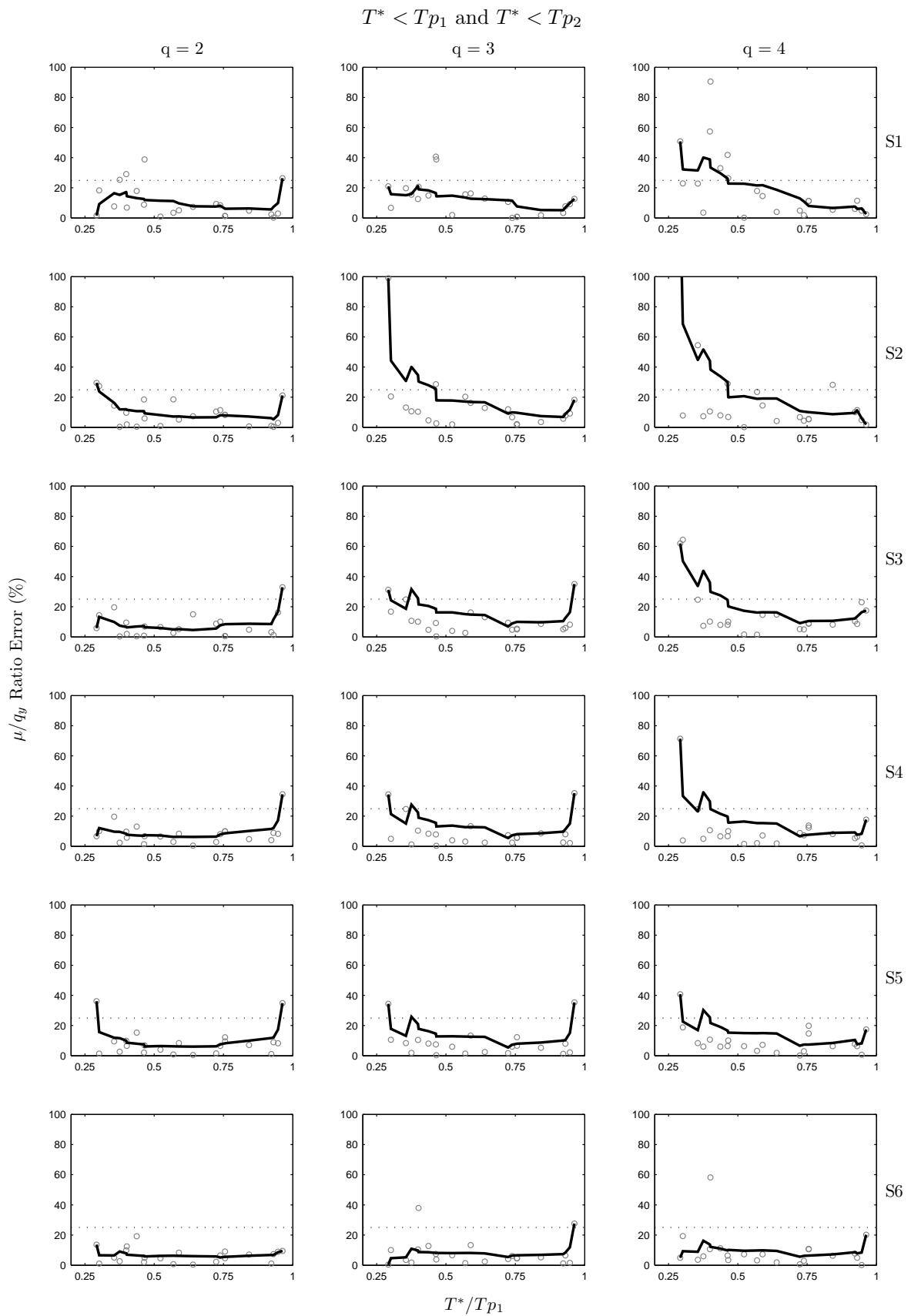


Σχήμα Β'.4: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του μονοβαθμίου βρίσκεται ανάμεσα στις περιόδους και των δύο πρώτων παλμών.

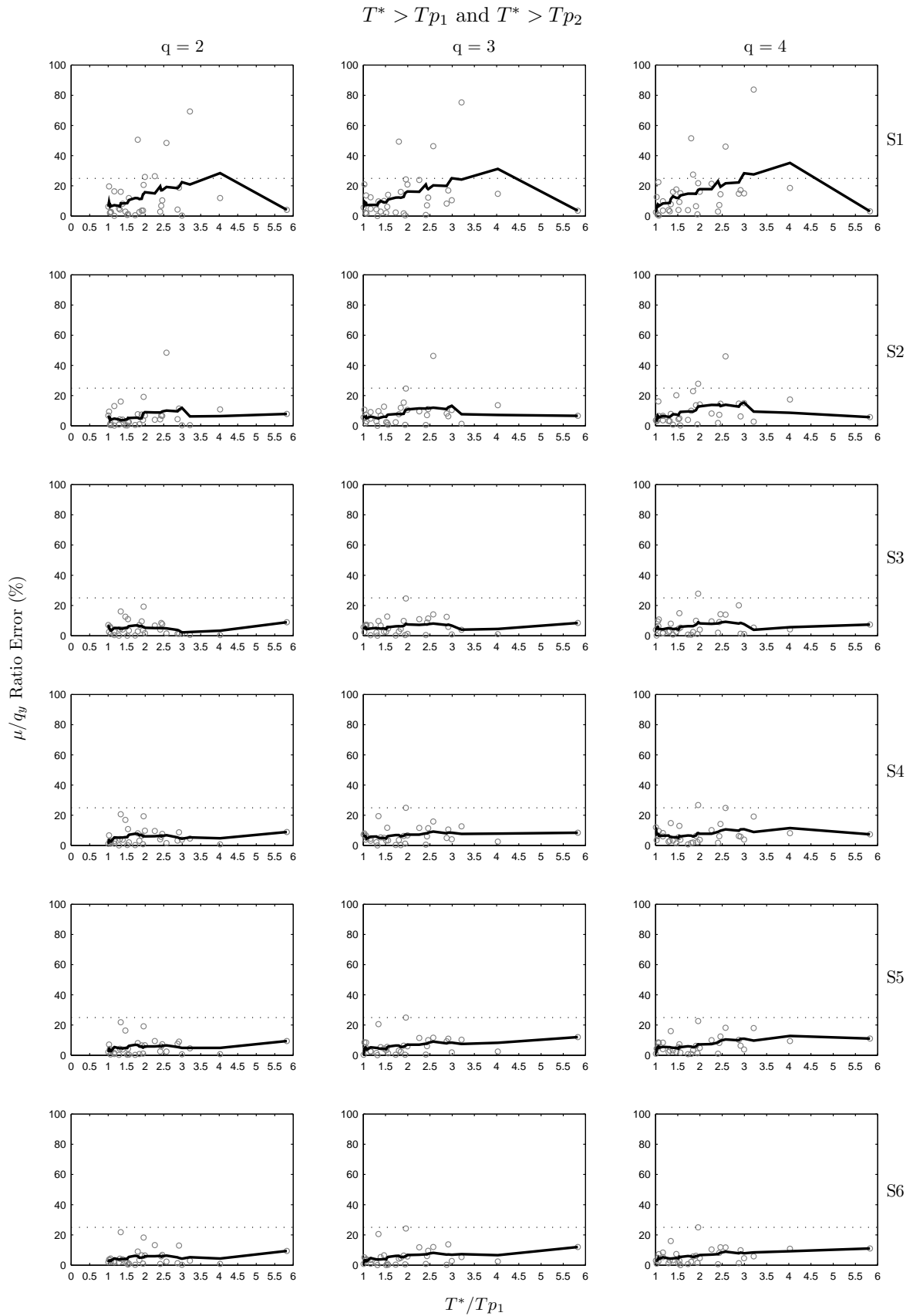
Β.2 Σφάλμα Πλαστιμότητας προς Συντελεστή Συμπεριφοράς



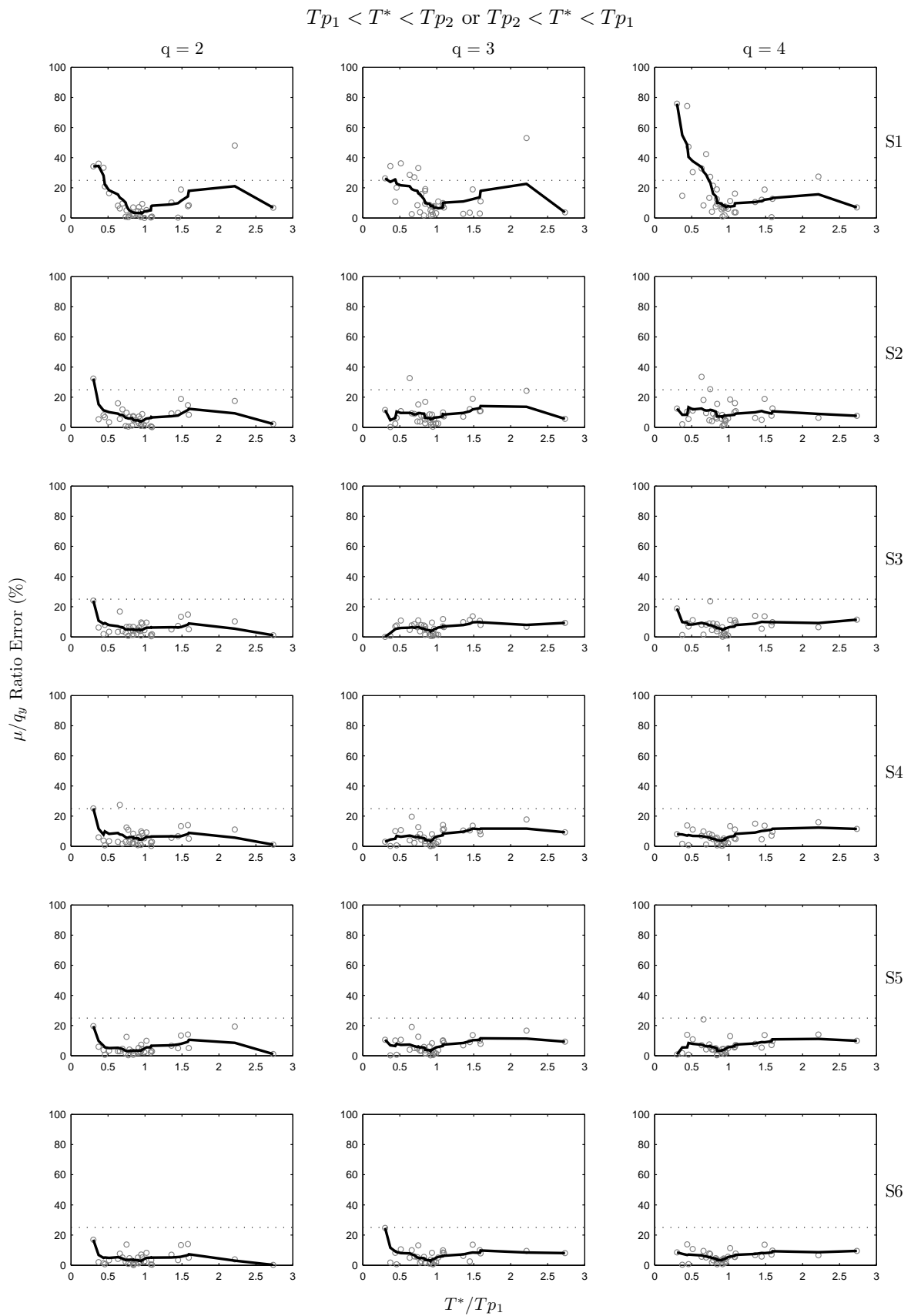
Σχήμα Β.5: Σφάλμα για το σύνολο των καταγραφών.



Σχήμα Β'.6: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του μονοβαθμίου είναι μικρότερη από τις περιόδους και των δύο πρώτων παλμών.

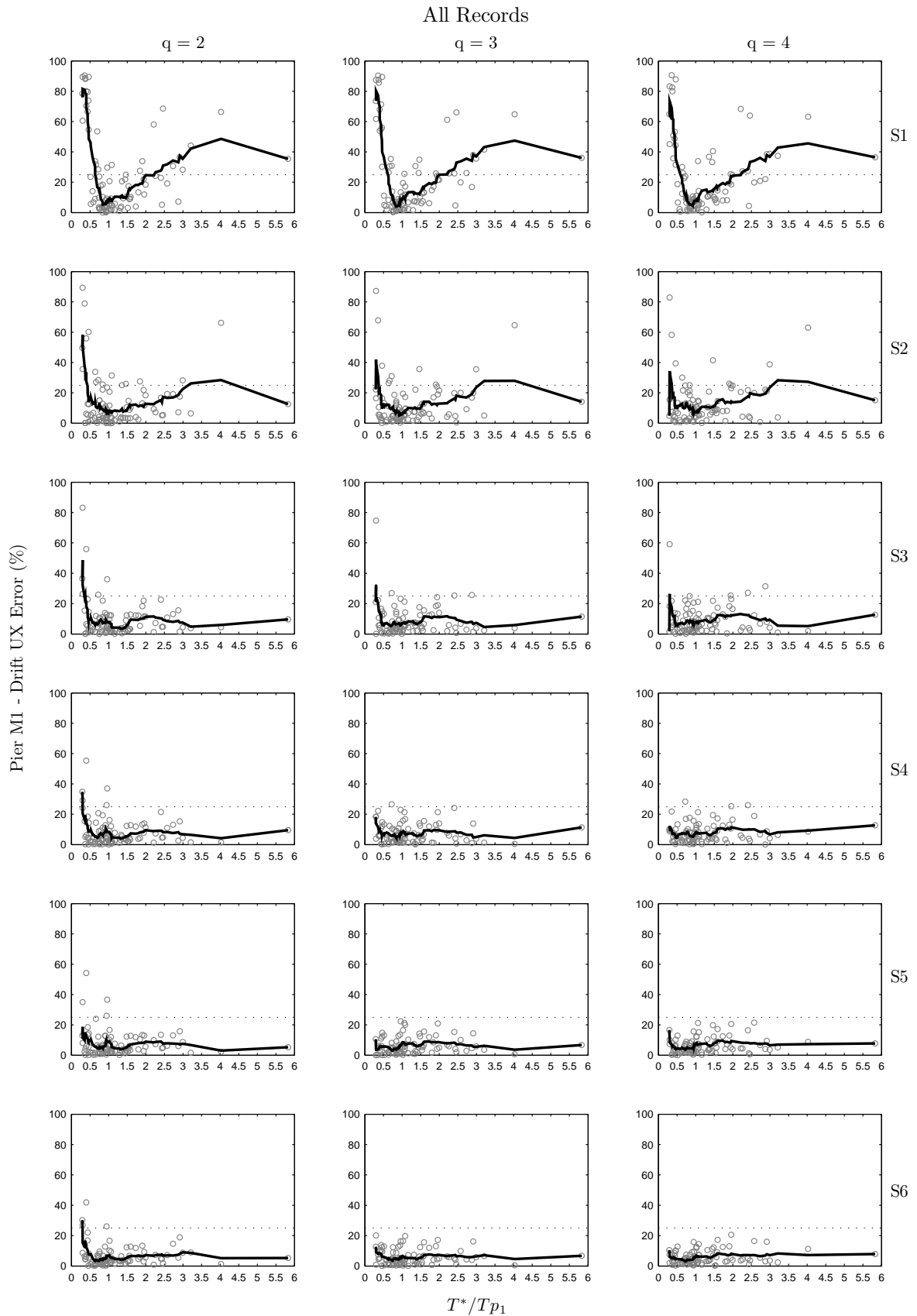


Σχήμα Β.7: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του μονοβαθμίου είναι μεγαλύτερη από τις περιόδους και των δύο πρώτων παλμών.



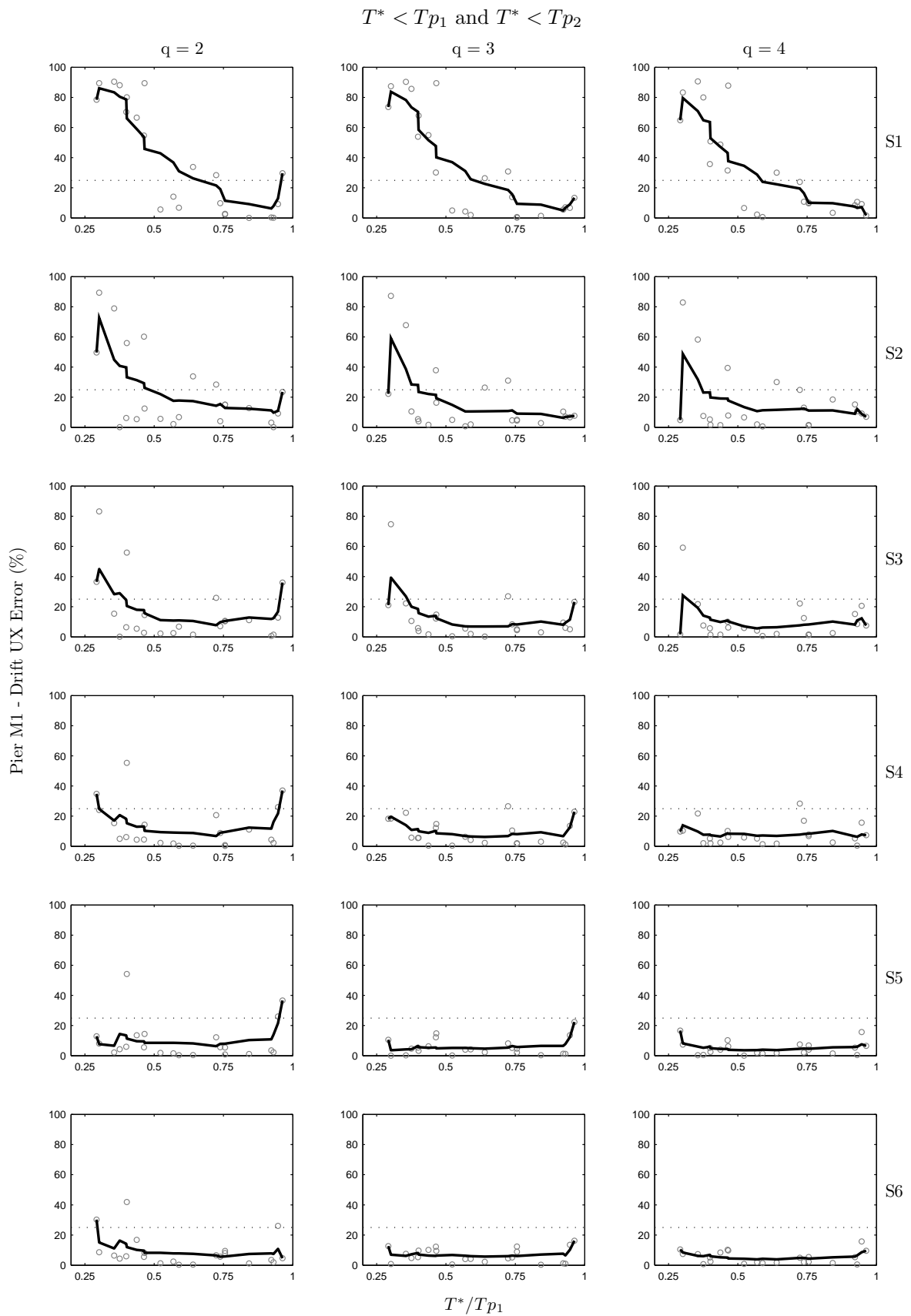
Σχήμα Β'.8: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του μονοβαθμίου βρίσκεται ανάμεσα στις περιόδους και των δύο πρώτων παλμών.

B'.3 Σφάλμα  $Drift_X M1$

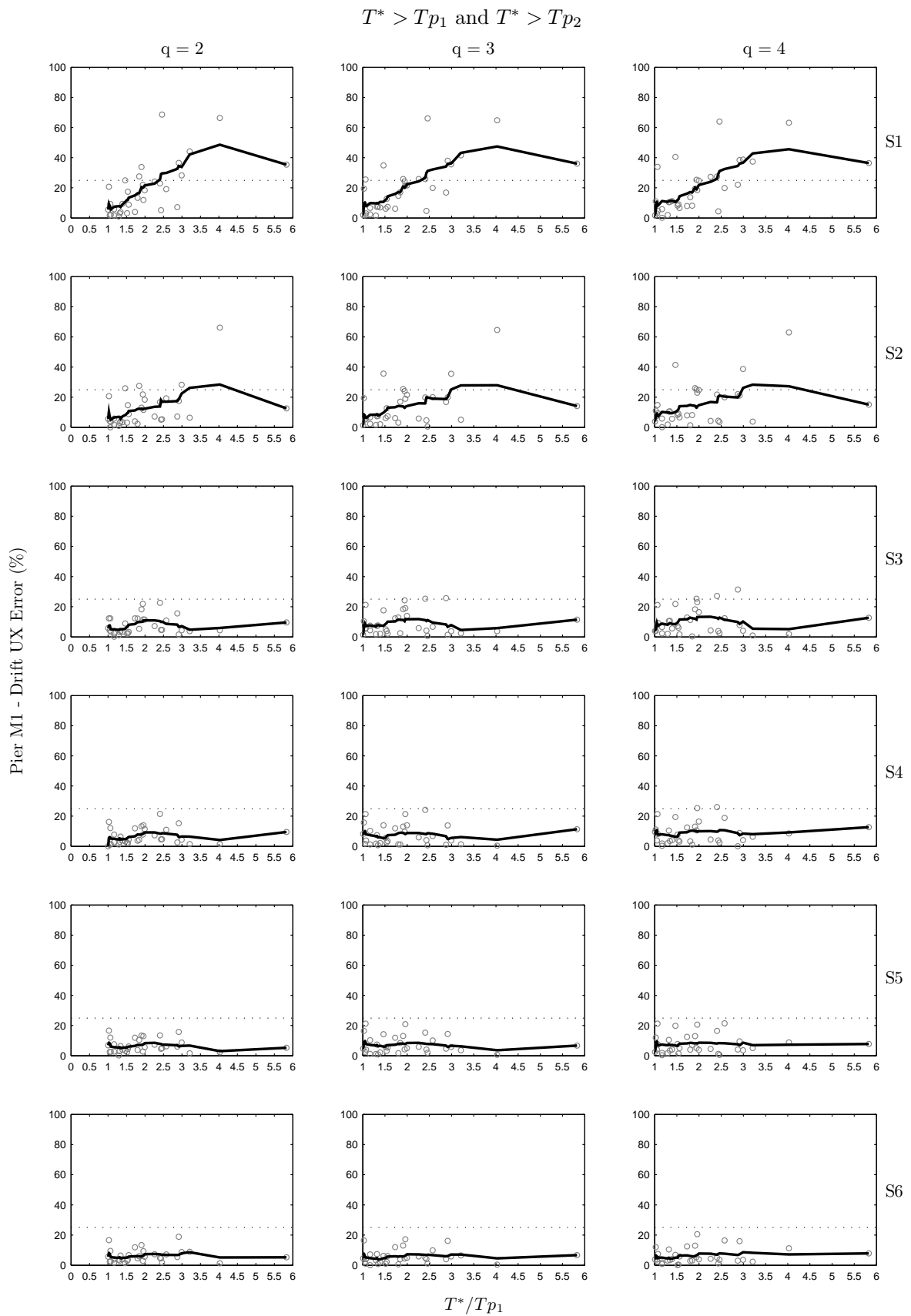


Σχήμα B'.9: Σφάλμα για το σύνολο των καταγραφών.

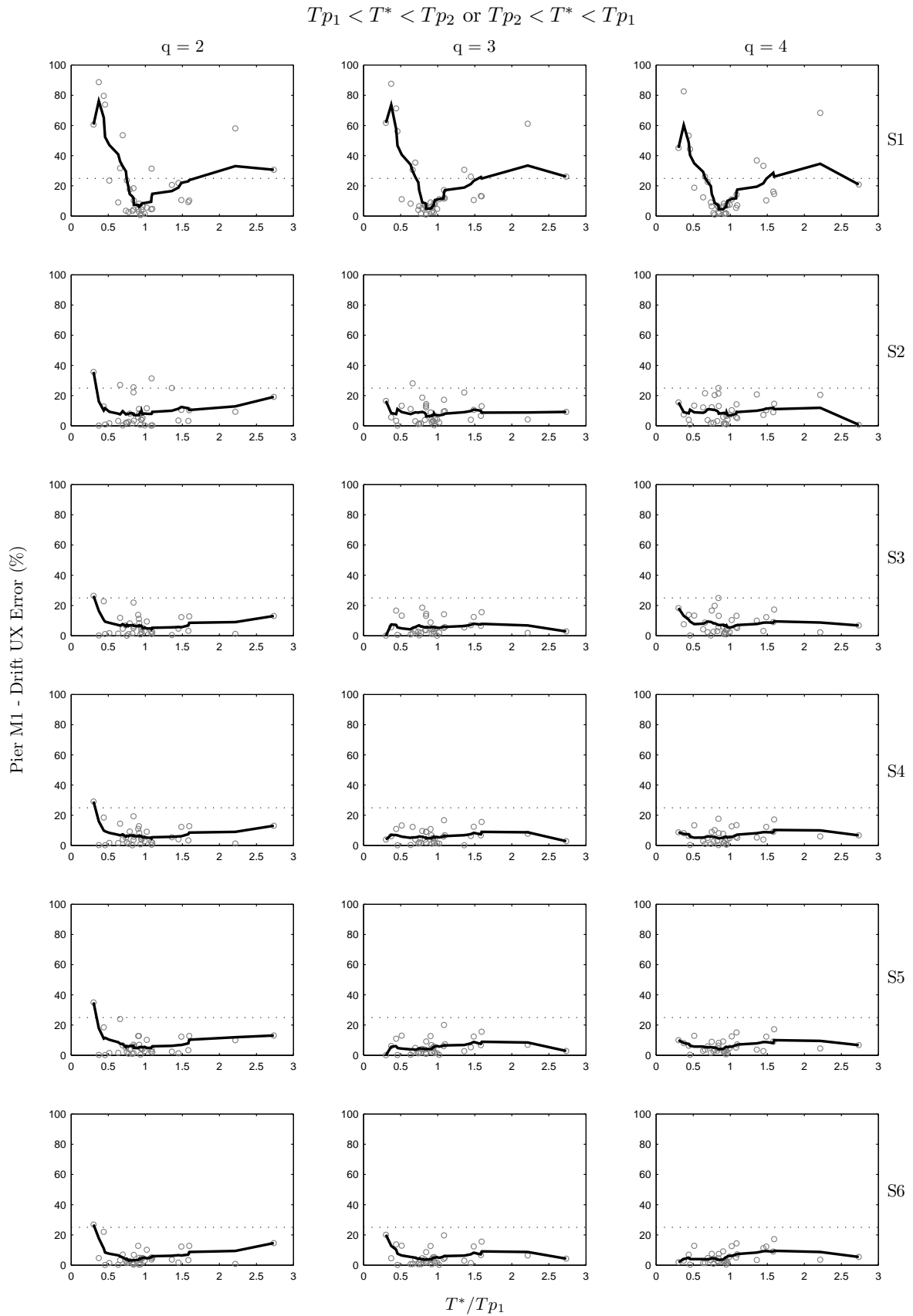




Σχήμα Β'.10: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του μονοβαθμίου είναι μικρότερη από τις περιόδους και των δύο πρώτων παλμών.

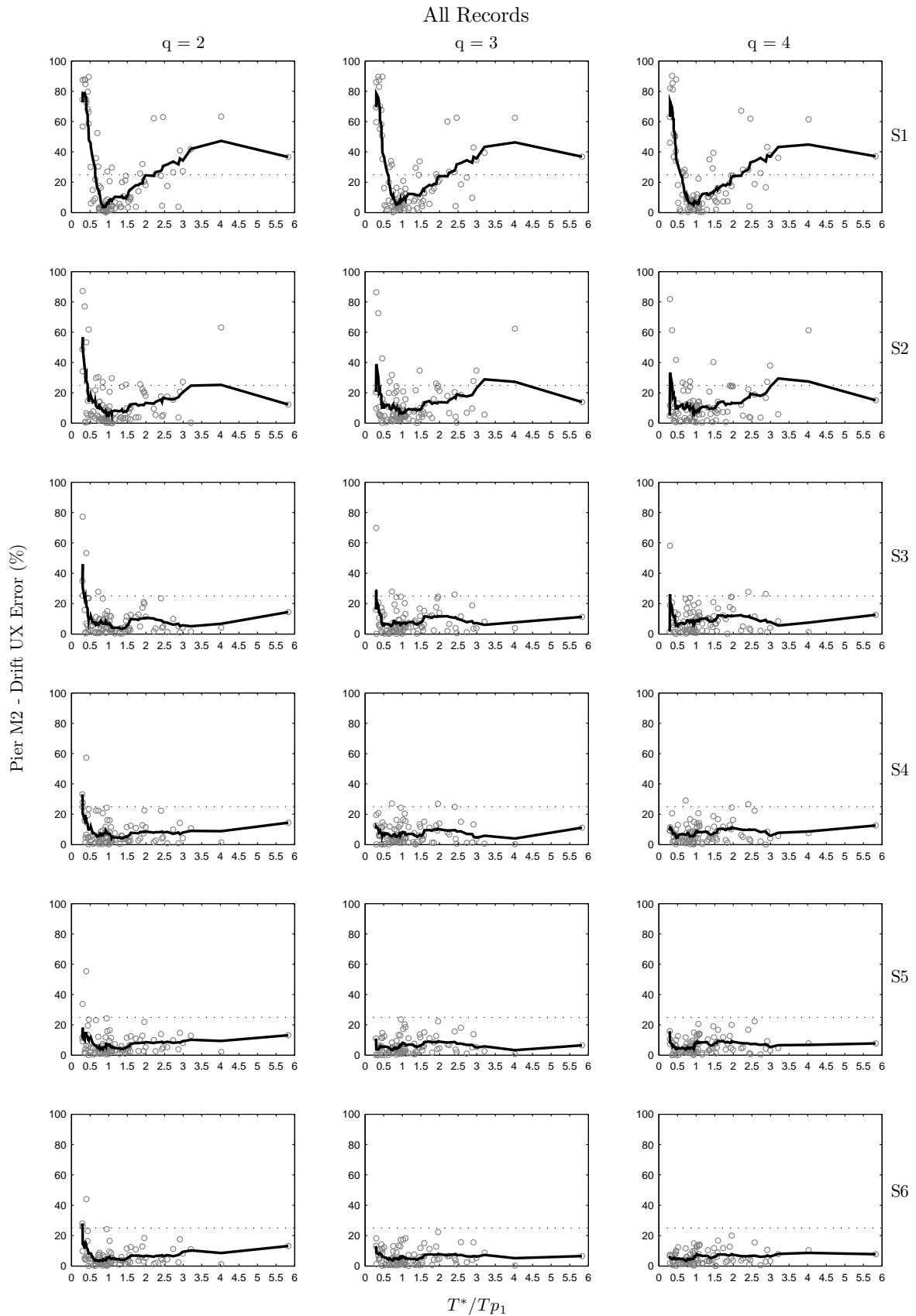


Σχήμα Β.11: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του μονοβαθμίου είναι μεγαλύτερη από τις περιόδους και των δύο πρώτων παλμών.

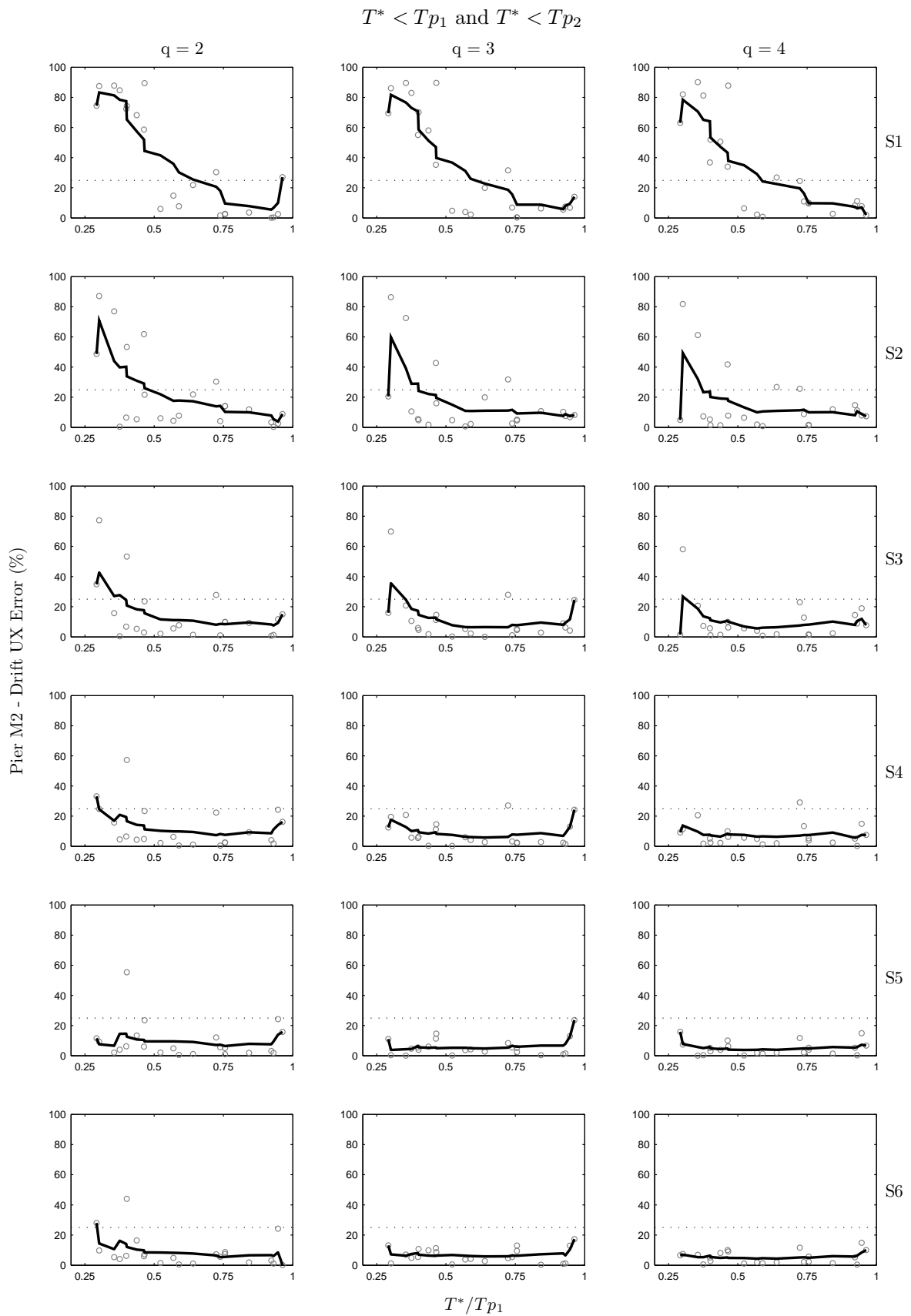


Σχήμα Β'.12: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του μονοβαθμίου βρίσκεται ανάμεσα στις περιόδους και των δύο πρώτων παλμών.

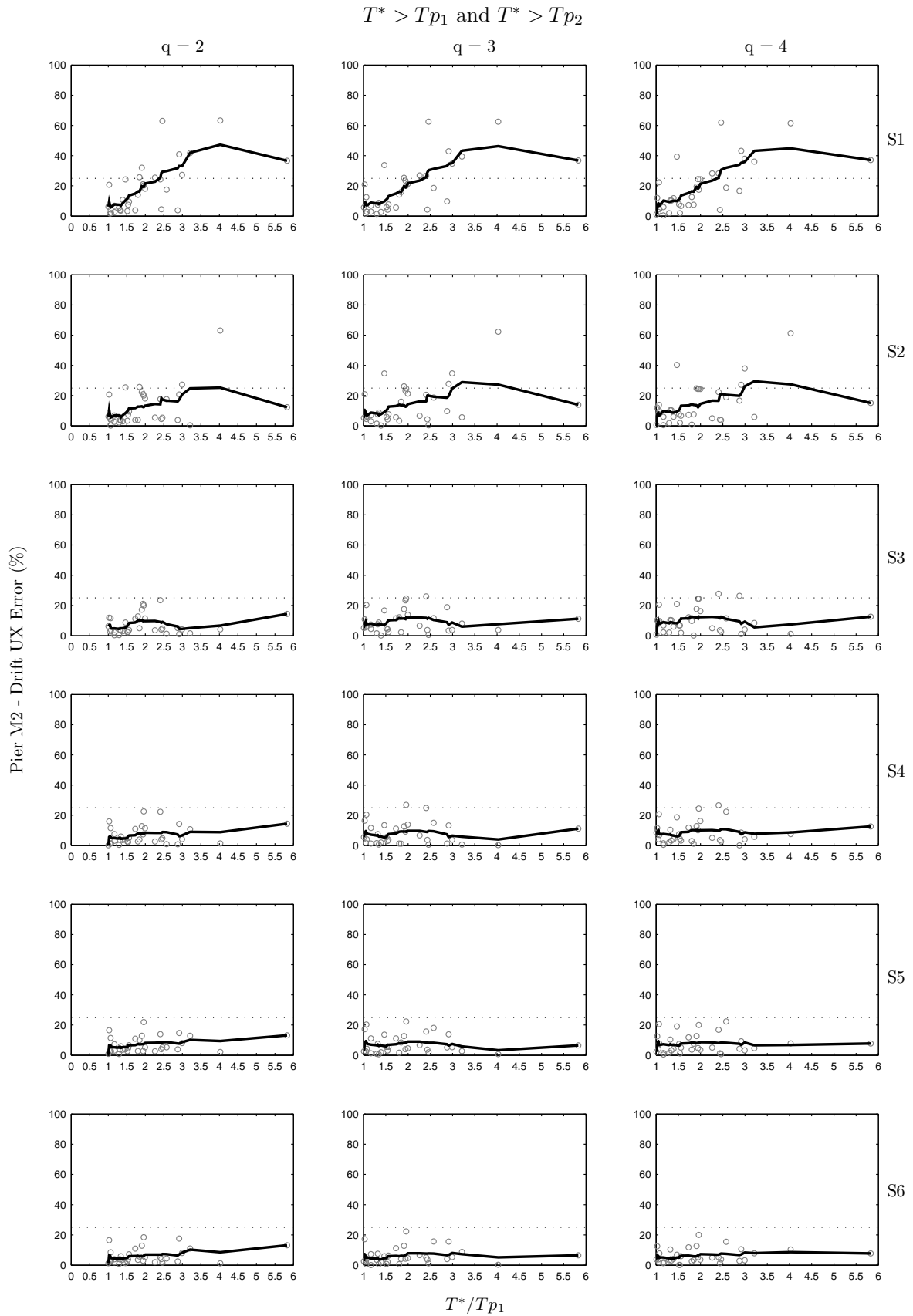
B'.4 Σφάλμα  $Drift_X M2$



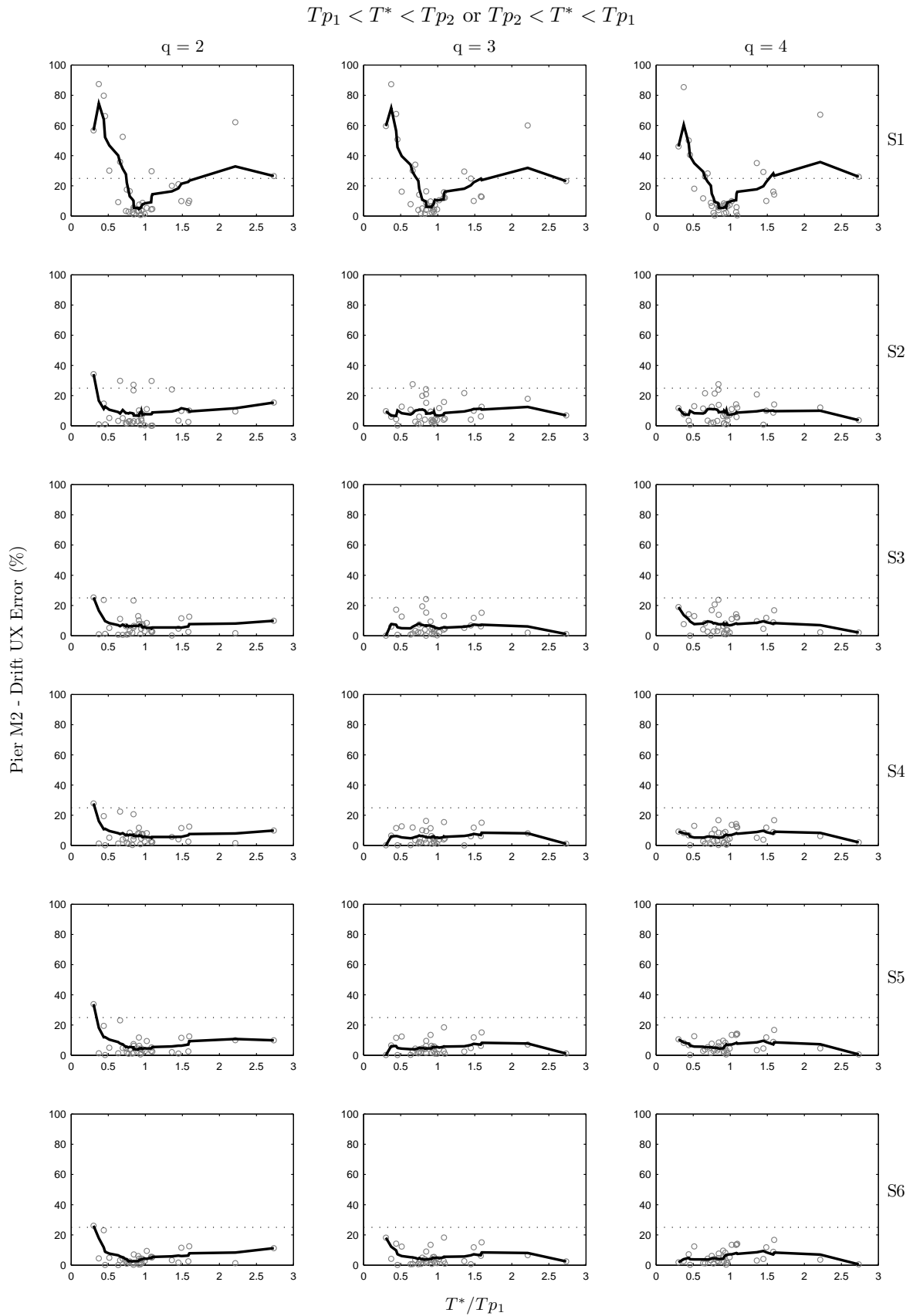
Σχήμα B'.13: Σφάλμα για το σύνολο των καταγραφών.



Σχήμα Β'.14: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του μονοβαθμίου είναι μικρότερη από τις περιόδους και των δύο πρώτων παλμών.

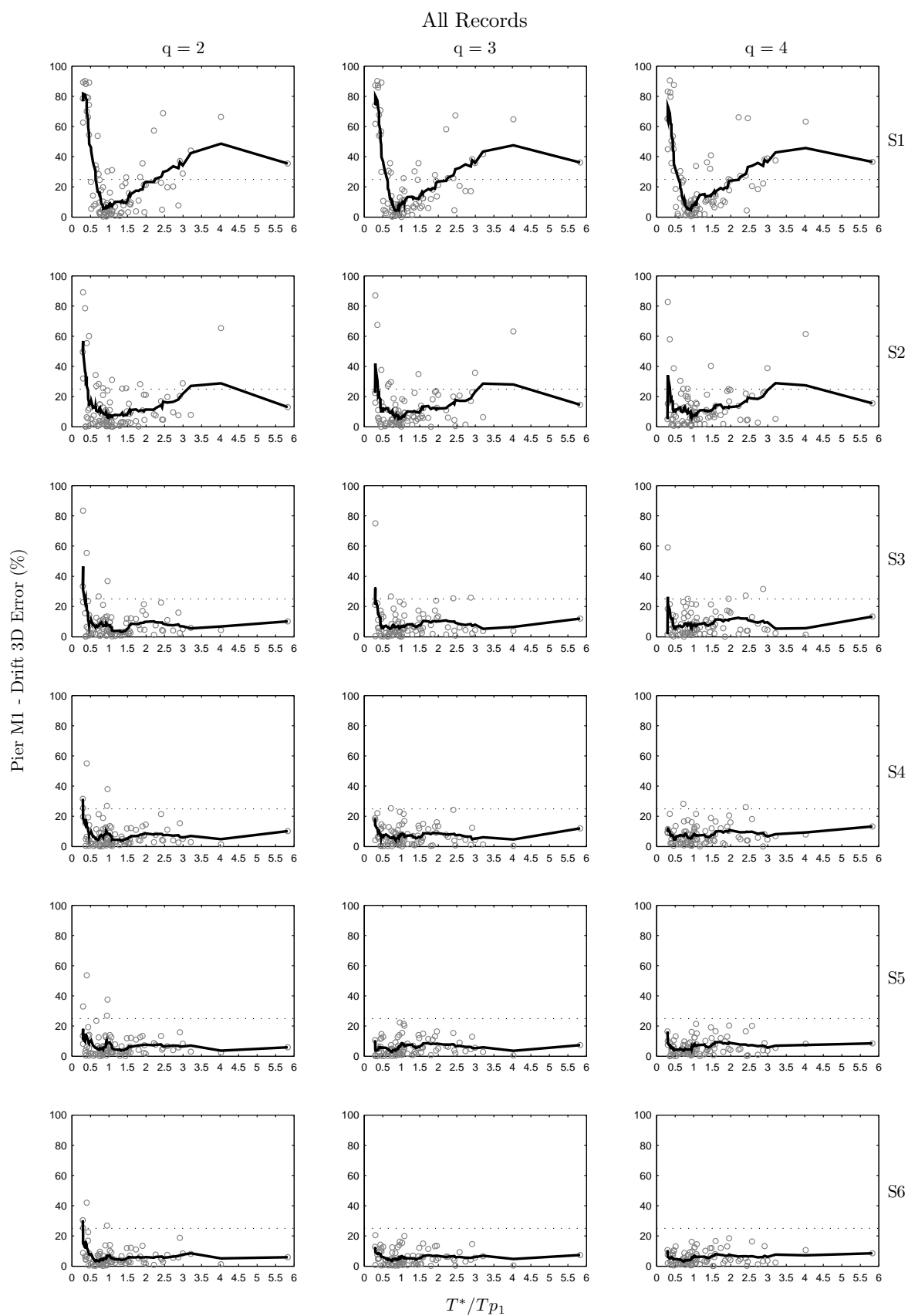


Σχήμα Β'.15: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του μονοβαθμίου είναι μεγαλύτερη από τις περιόδους και των δύο πρώτων παλμών.



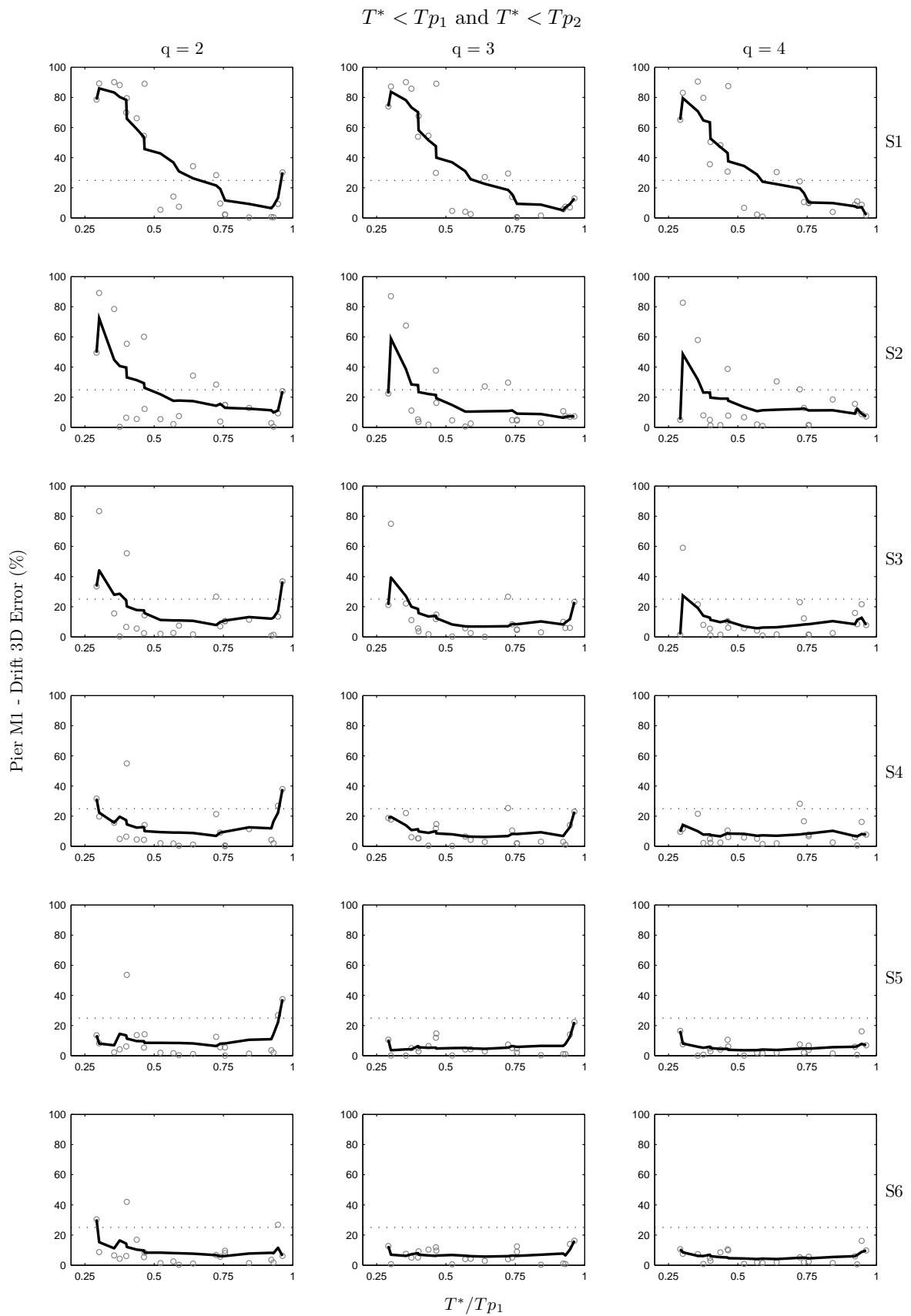
Σχήμα Β'.16: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του μονοβαθμίου βρίσκεται ανάμεσα στις περιόδους και των δύο πρώτων παλμών.

B'.5 Σφάλμα  $Drift_{3D}M1$

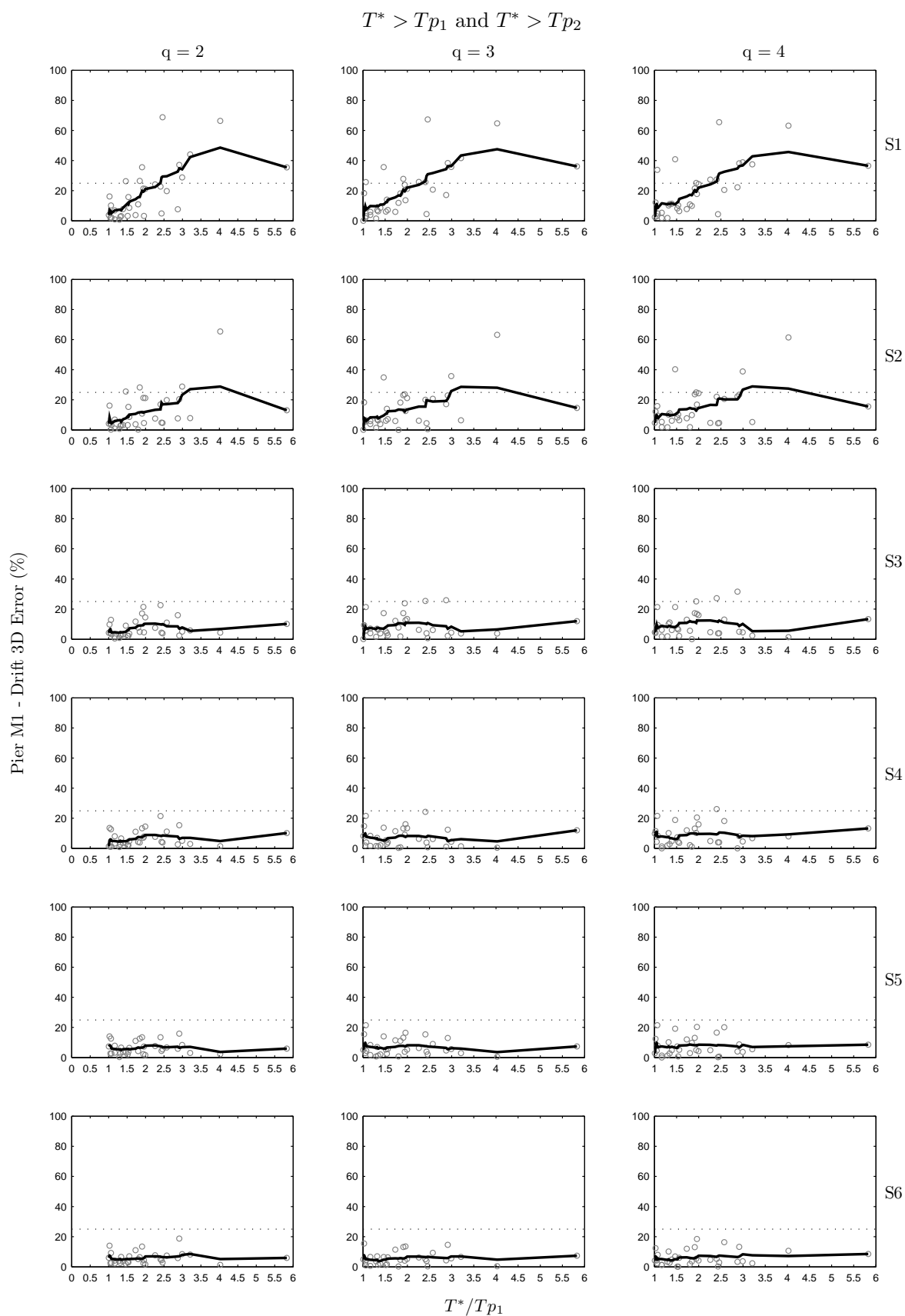


Σχήμα B'.17: Σφάλμα για το σύνολο των καταγραφών.

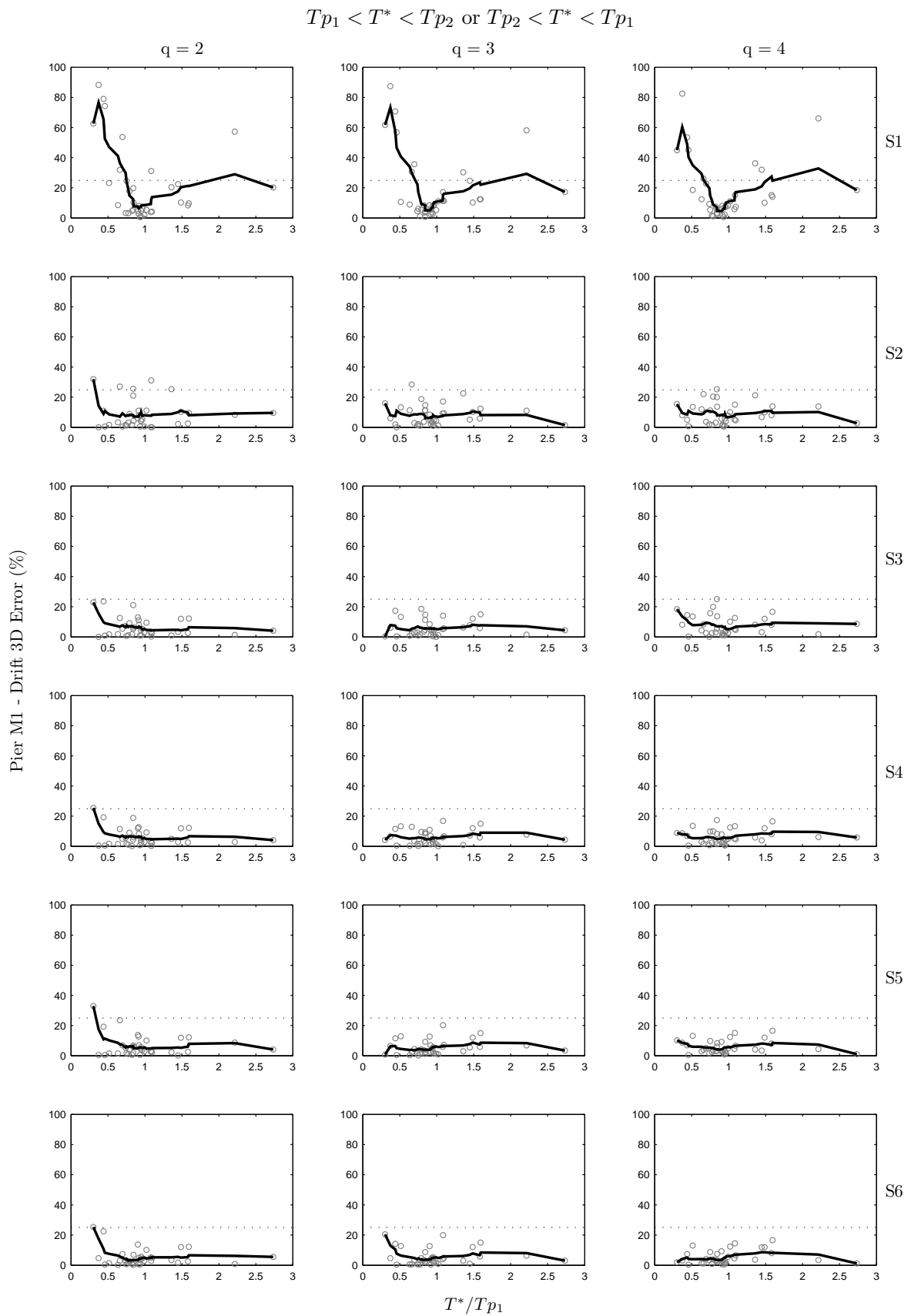




Σχήμα Β'.18: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του μονοβαθμίου είναι μικρότερη από τις περιόδους και των δύο πρώτων παλμών.

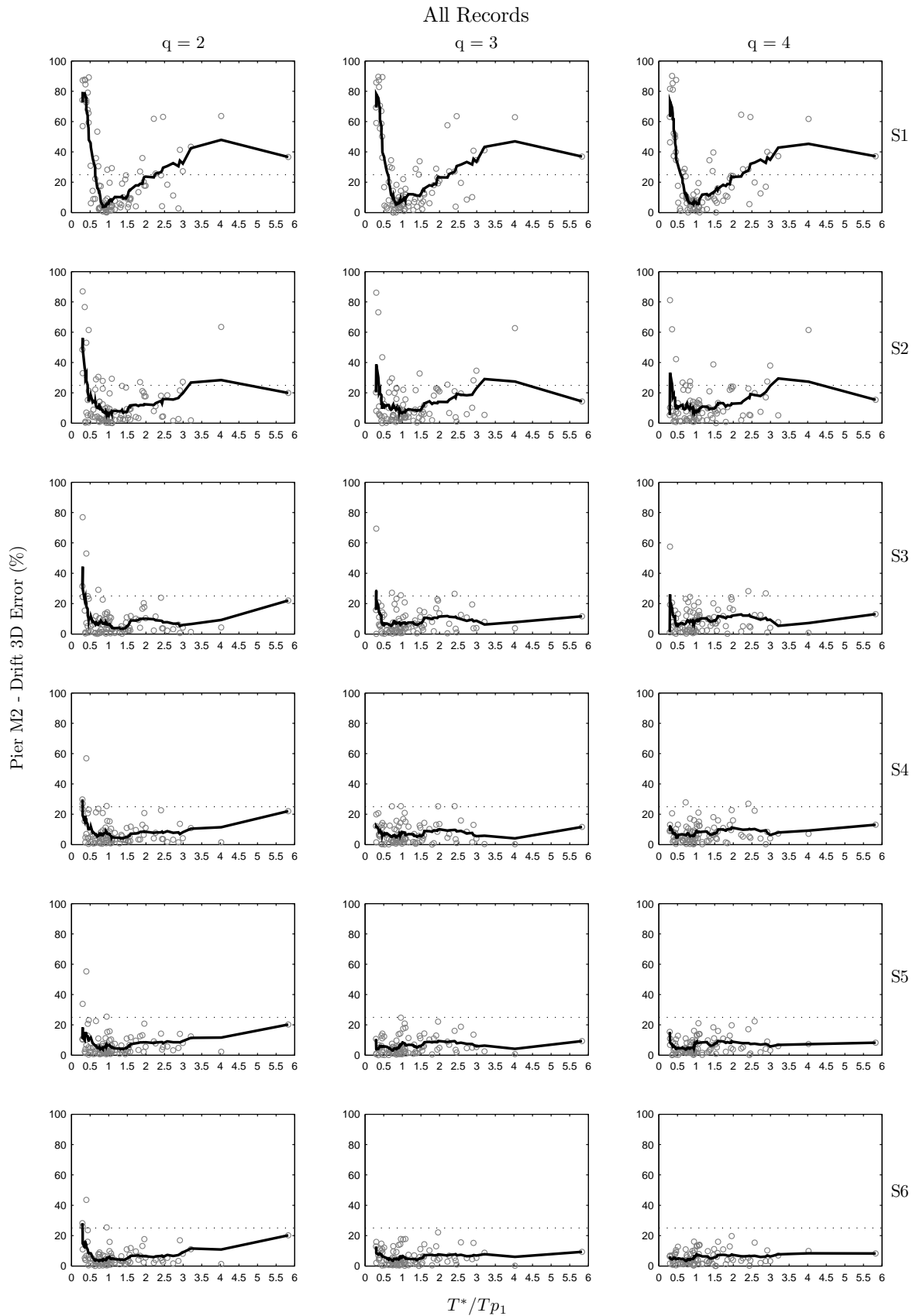


Σχήμα Β.19: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του μονοβαθμίου είναι μεγαλύτερη από τις περιόδους και των δύο πρώτων παλμών.

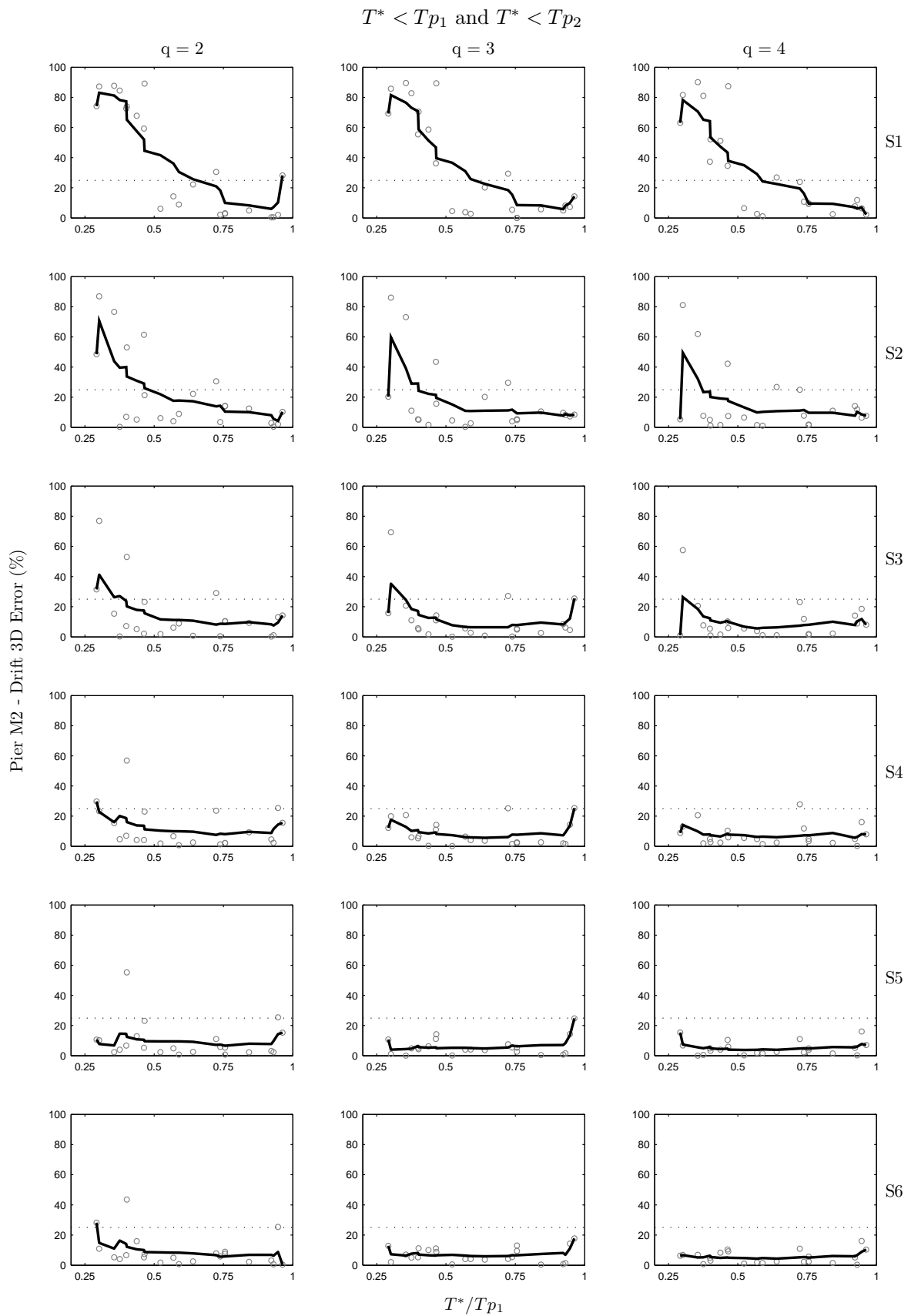


Σχήμα Β'.20: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του μονοβαθμίου βρίσκεται ανάμεσα στις περιόδους και των δύο πρώτων παλμών.

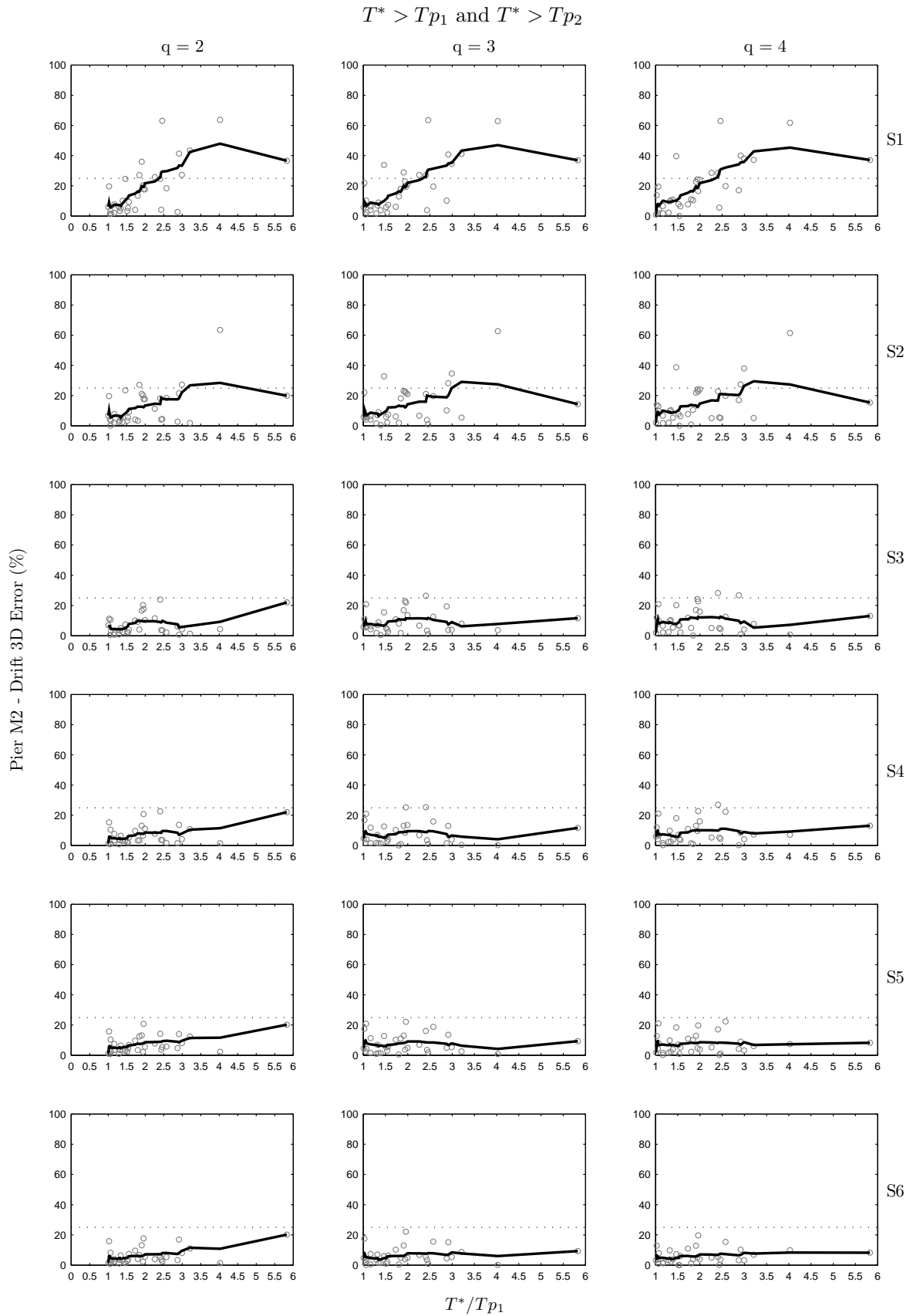
B'.6 Σφάλμα  $Drift_X M2$



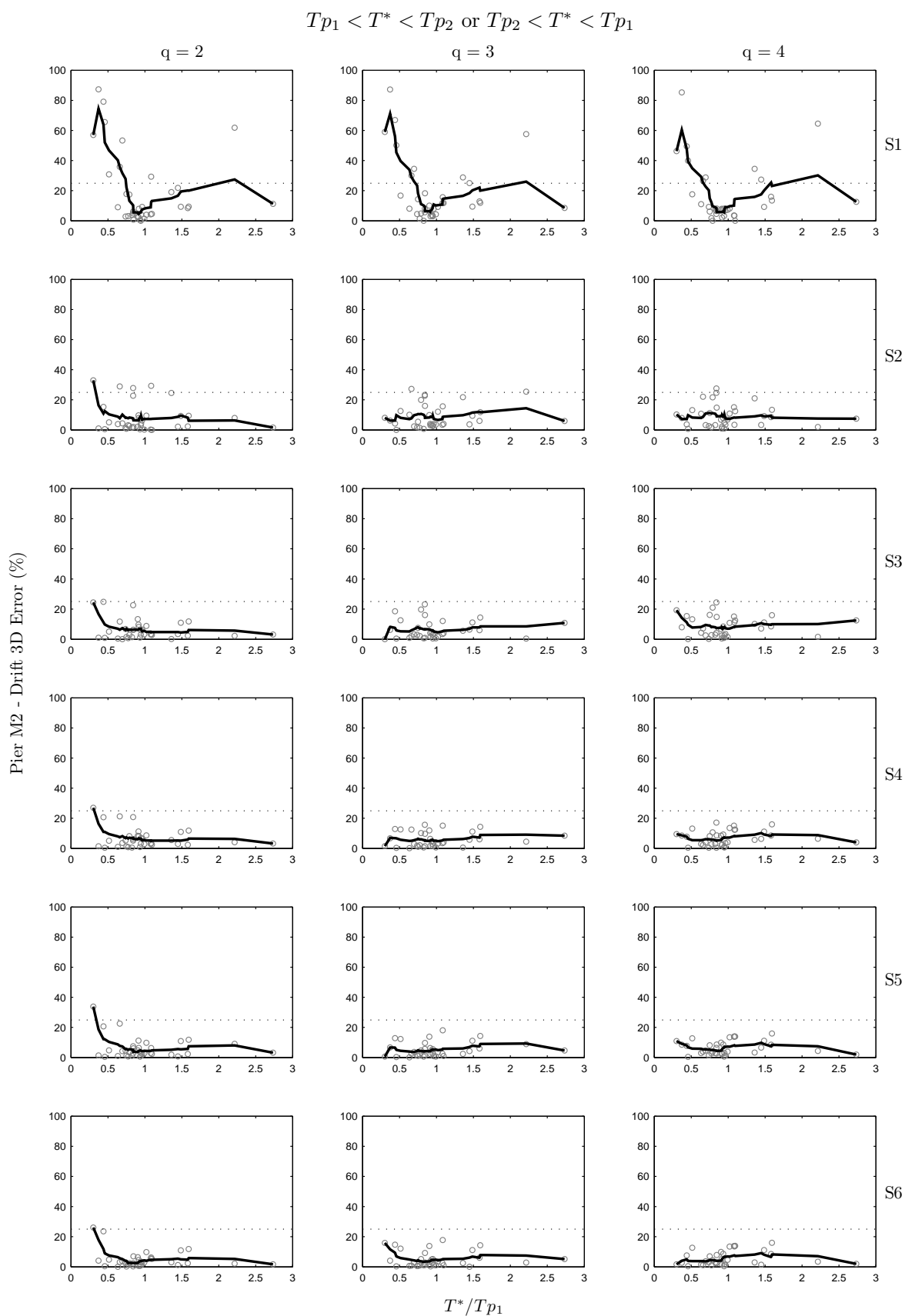
Σχήμα B'.21: Σφάλμα για το σύνολο των καταγραφών.



Σχήμα Β'.22: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του μονοβαθμίου είναι μικρότερη από τις περιόδους και των δύο πρώτων παλμών.

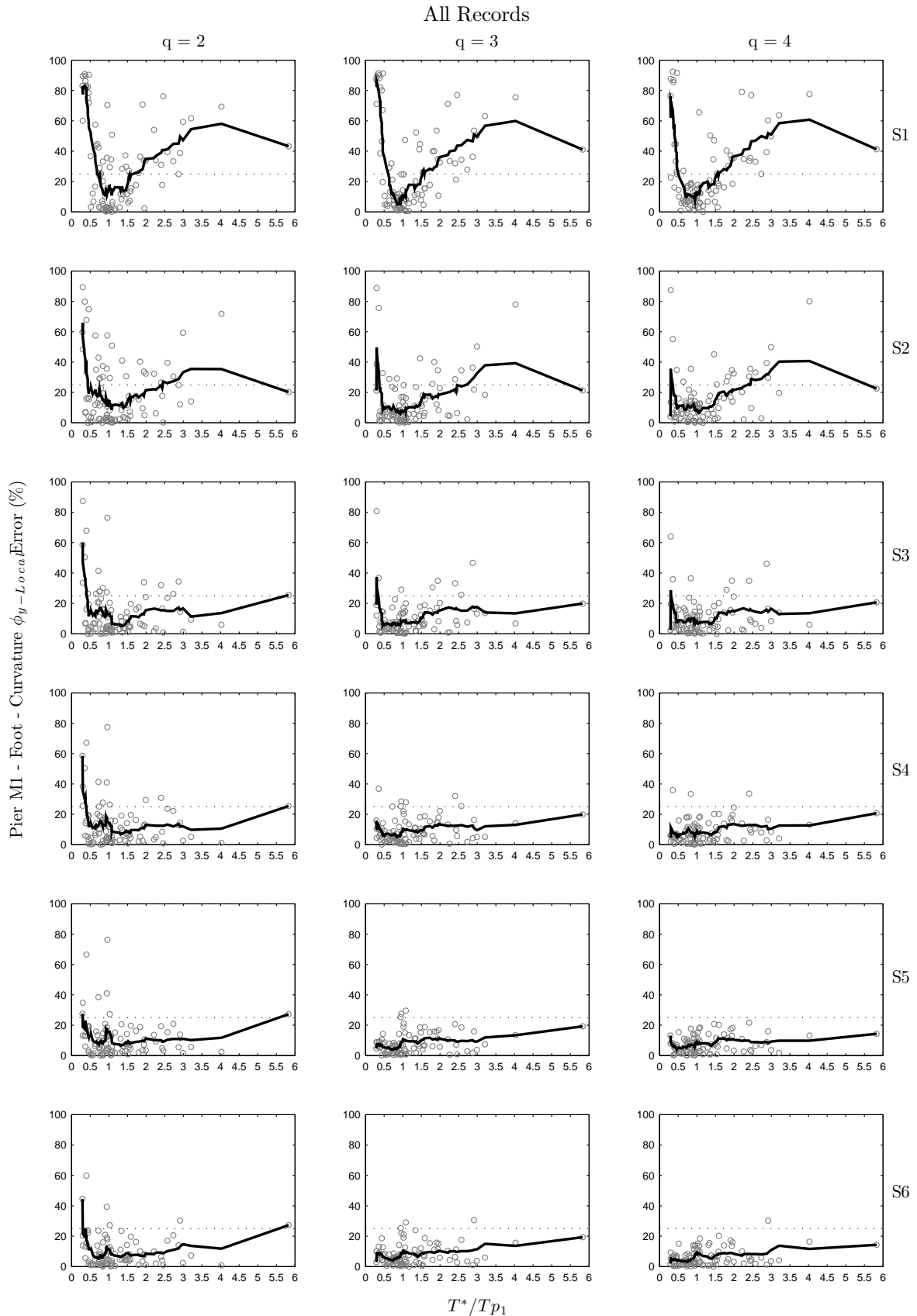


Σχήμα Β'.23: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του μονοβαθμίου είναι μεγαλύτερη από τις περιόδους και των δύο πρώτων παλμών.



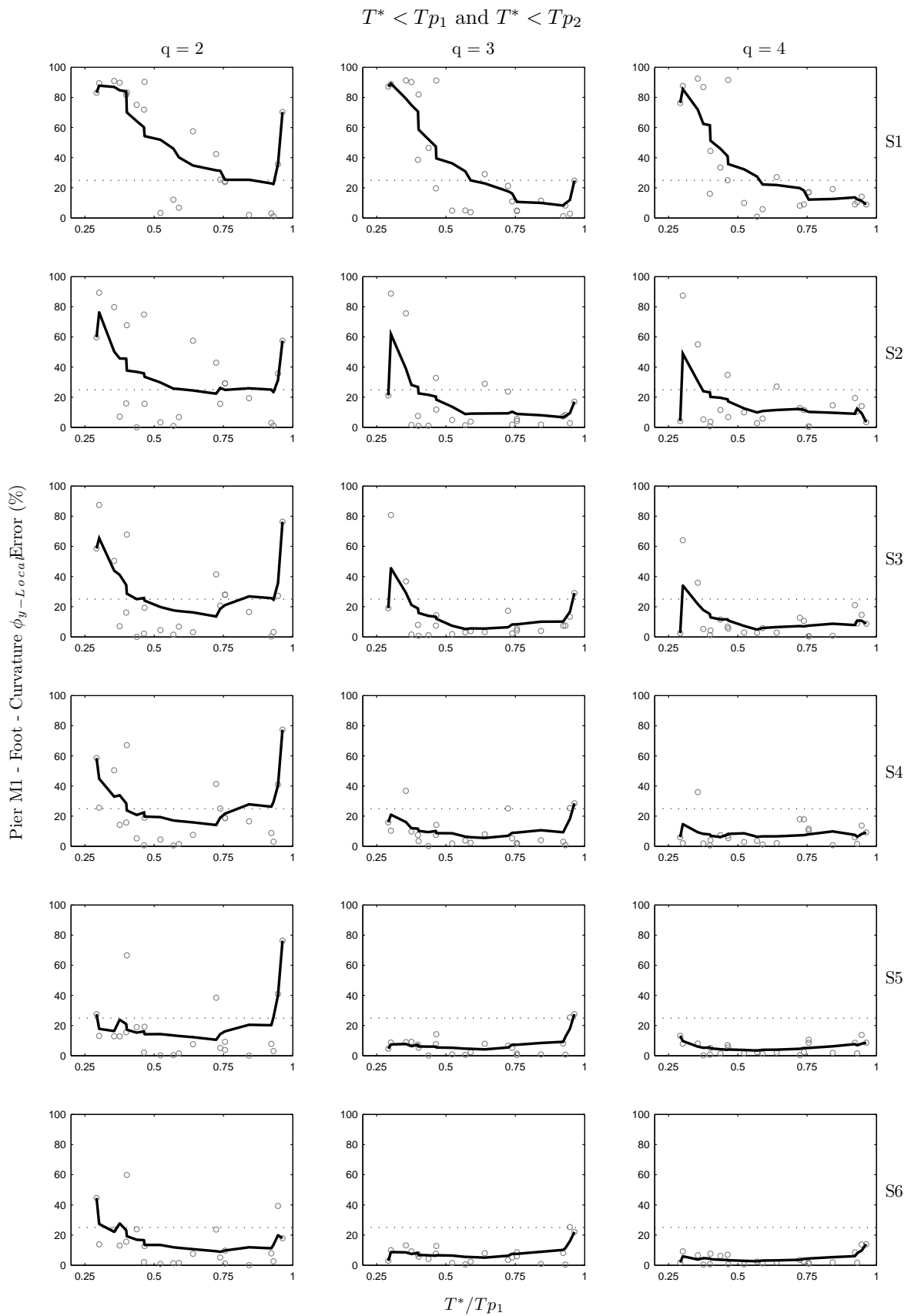
Σχήμα Β'.24: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του μονοβαθμίου βρίσκεται ανάμεσα στις περιόδους και των δύο πρώτων παλμών.

B'.7 Σφάλμα  $\phi_{y-local}M1_{Foot}$

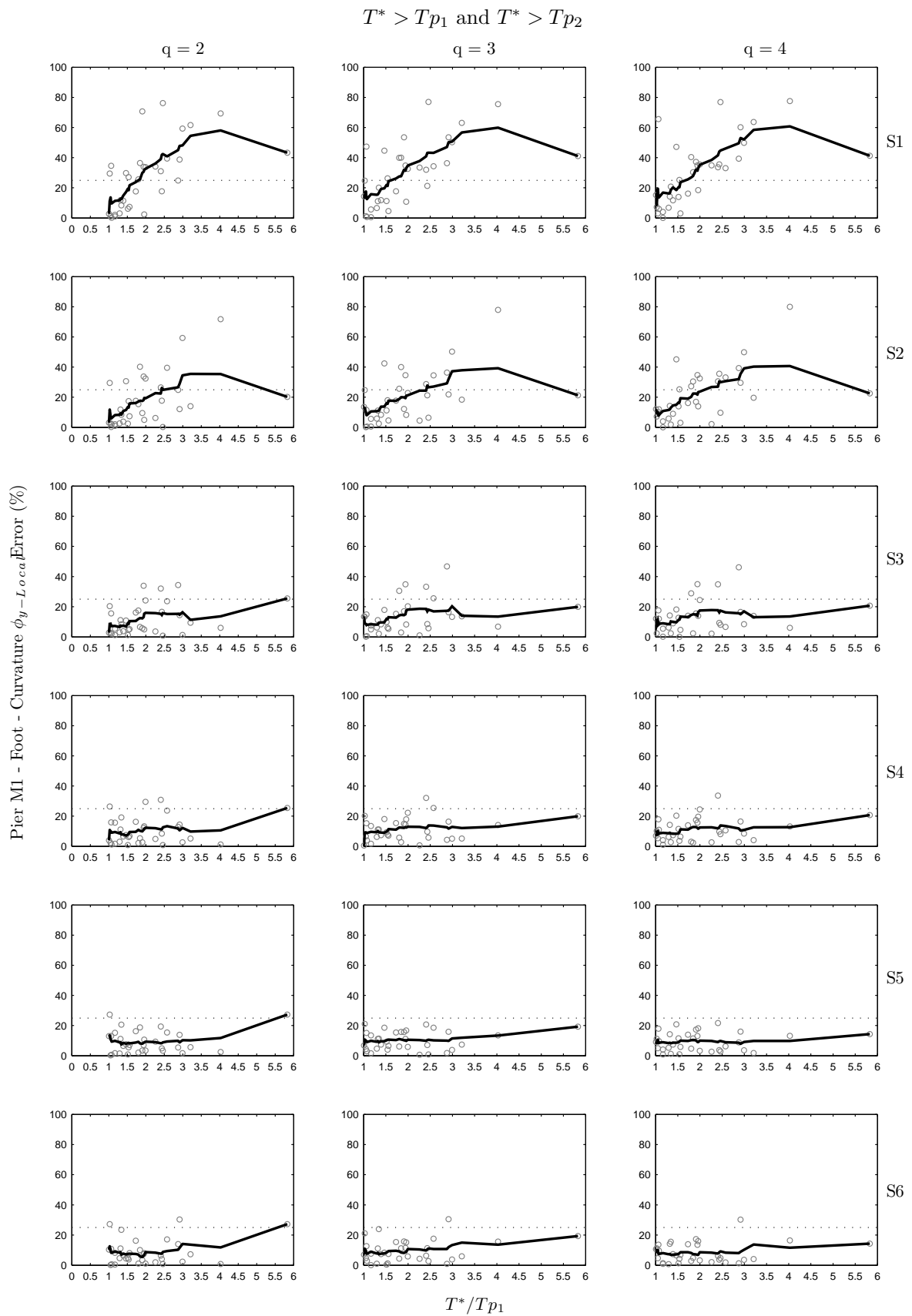


Σχήμα B'.25: Σφάλμα για το σύνολο των καταγραφών.

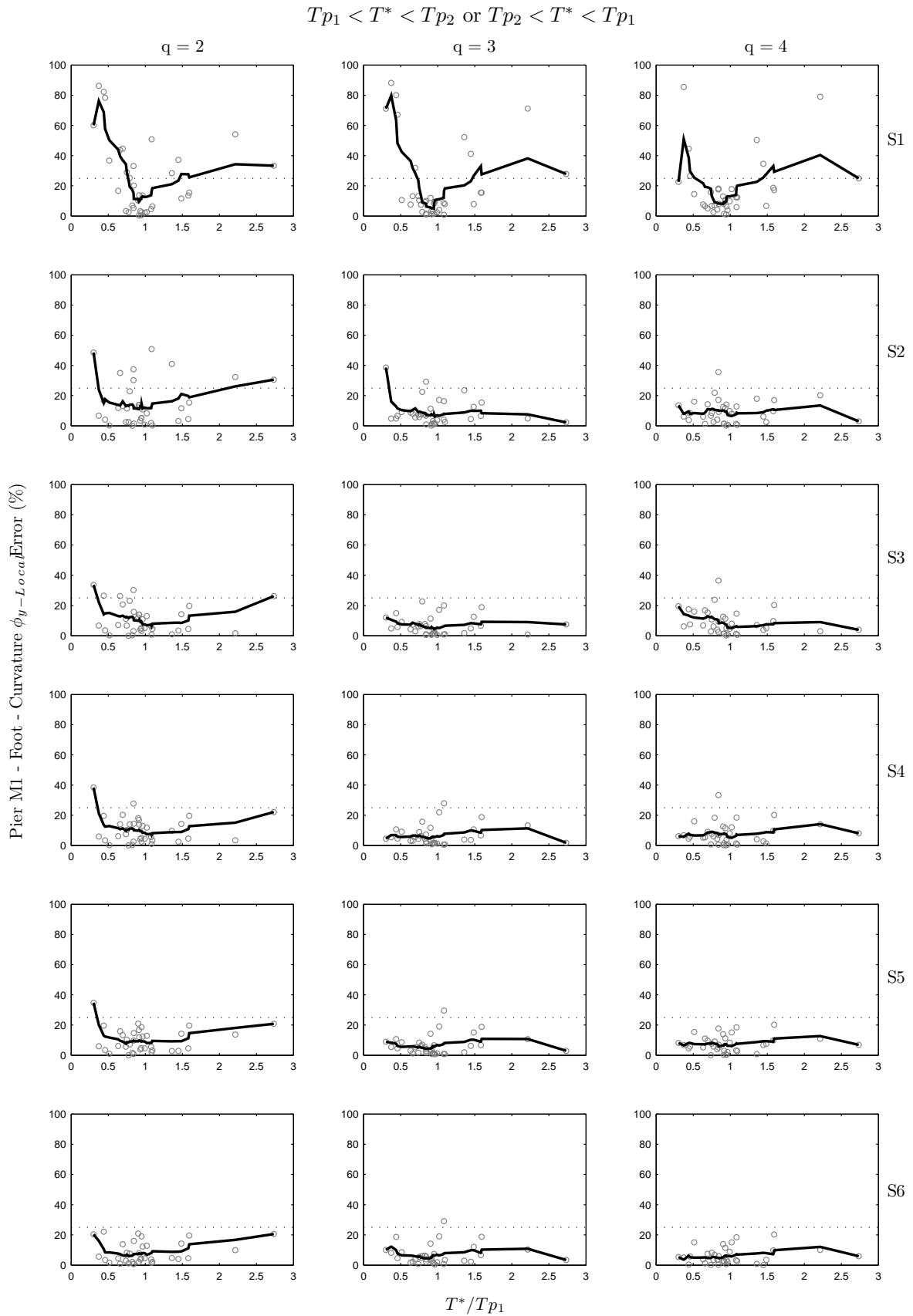




Σχήμα Β'.26: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του μονοβαθμίου είναι μικρότερη από τις περιόδους και των δύο πρώτων παλμών.

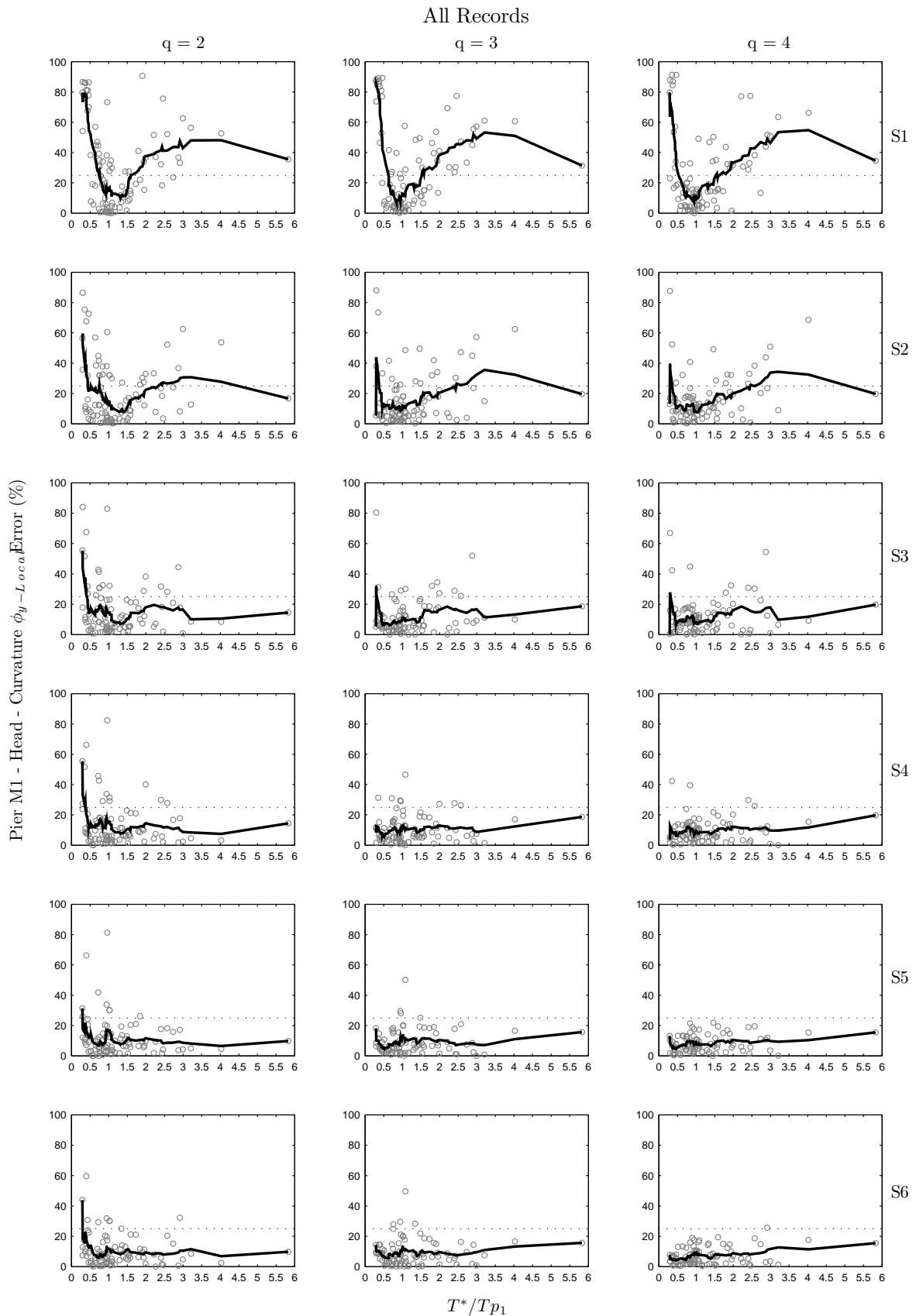


Σχήμα Β.27: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του μονοβαθμίου είναι μεγαλύτερη από τις περιόδους και των δύο πρώτων παλμών.

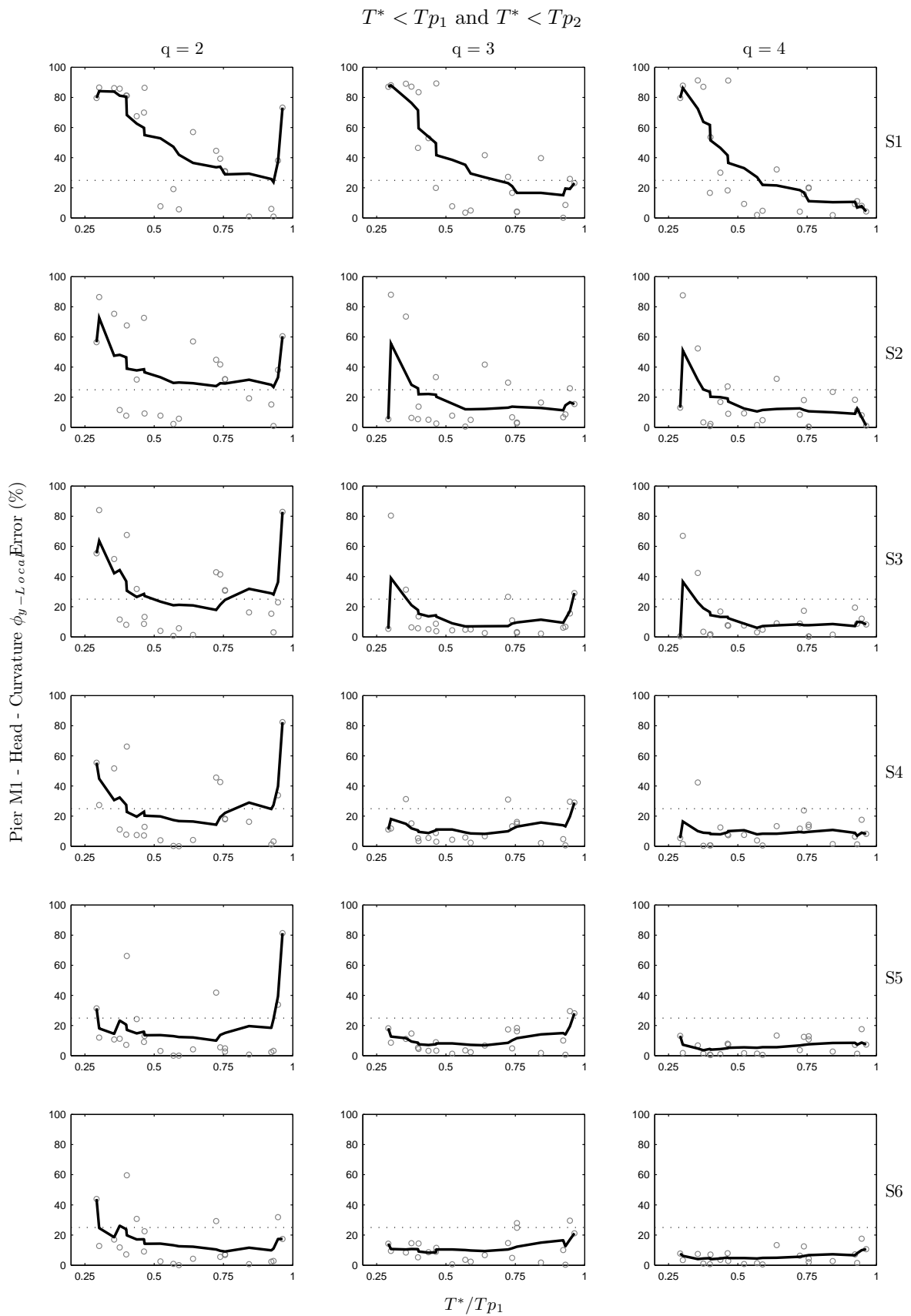


Σχήμα Β'.28: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του μονοβαθμίου βρίσκεται ανάμεσα στις περιόδους και των δύο πρώτων παλμών.

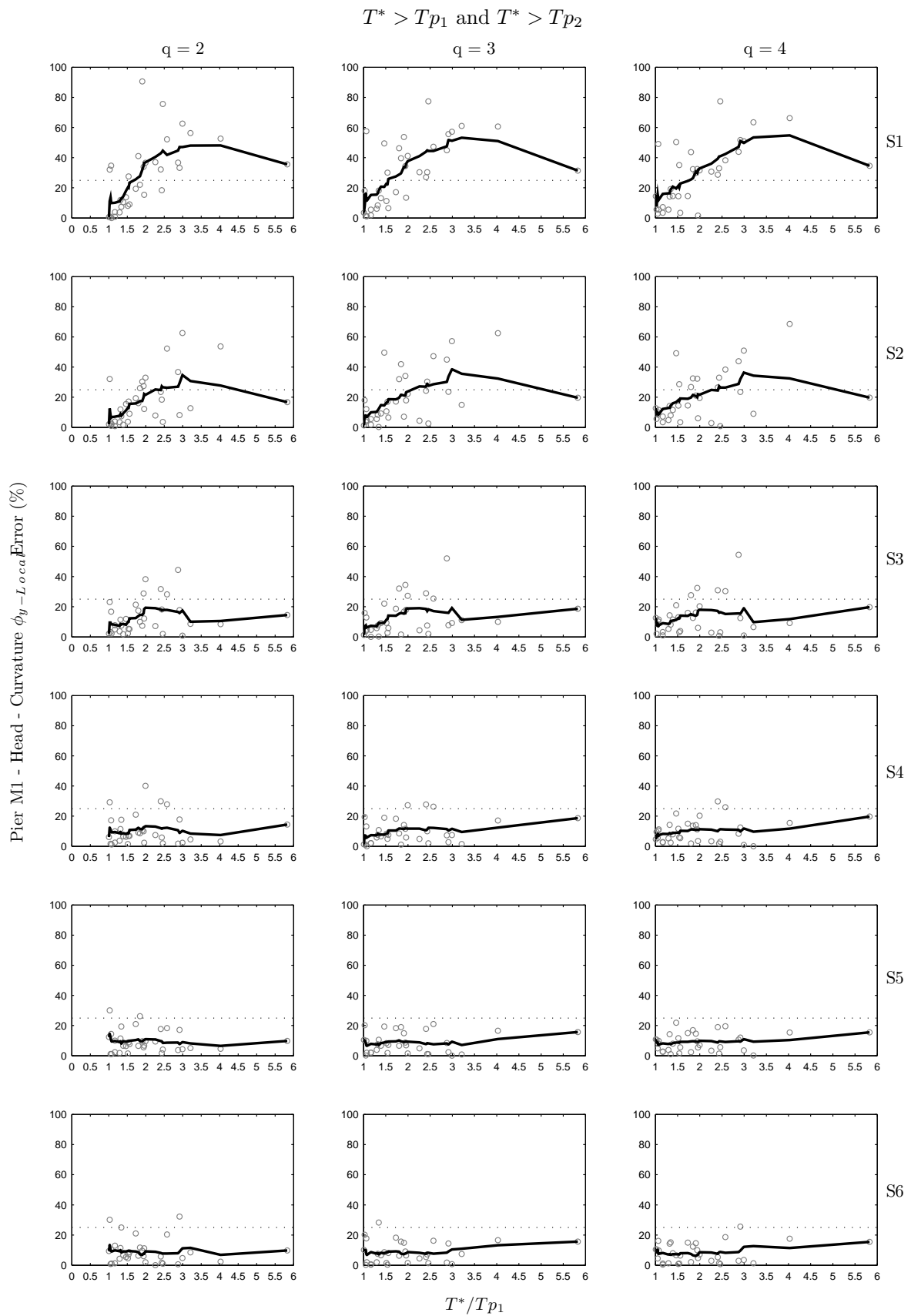
B'.8 Σφάλμα  $\phi_{y-local}M1_{Head}$



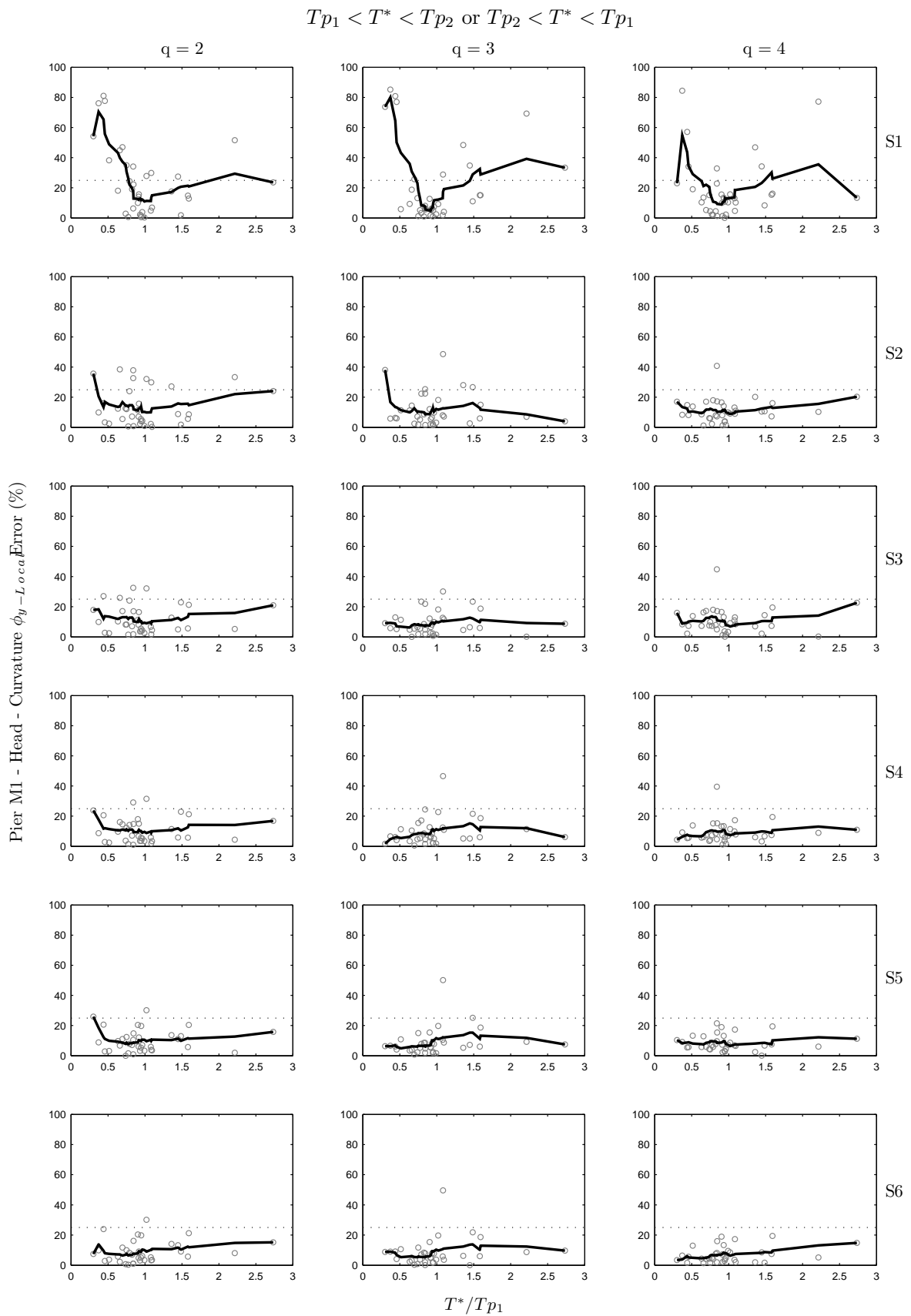
Σχήμα B'.29: Σφάλμα για το σύνολο των καταγραφών.



Σχήμα Β'.30: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του μονοβαθμίου είναι μικρότερη από τις περιόδους και των δύο πρώτων παλμών.

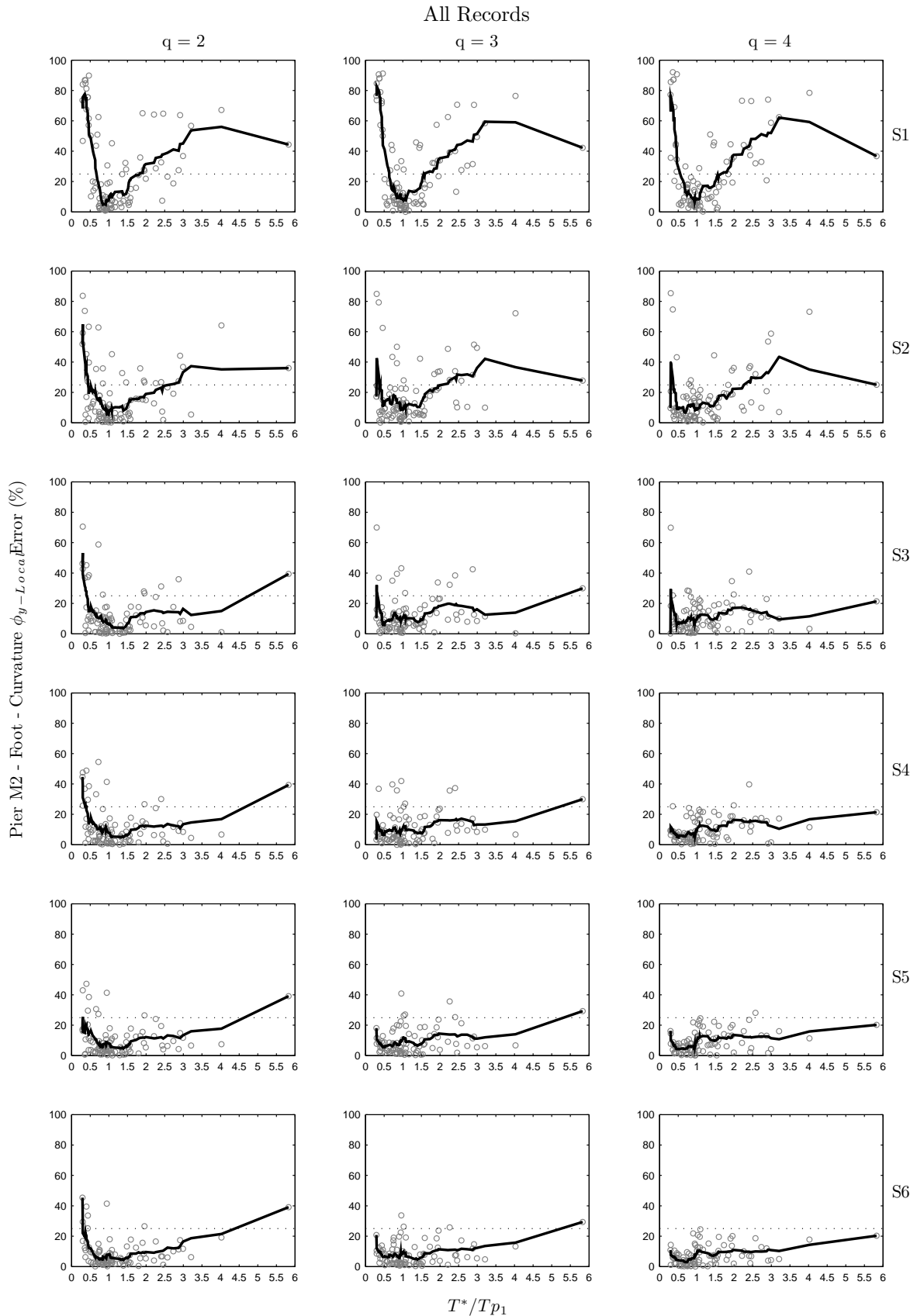


Σχήμα Β'.31: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του μονοβαθμίου είναι μεγαλύτερη από τις περιόδους και των δύο πρώτων παλμών.



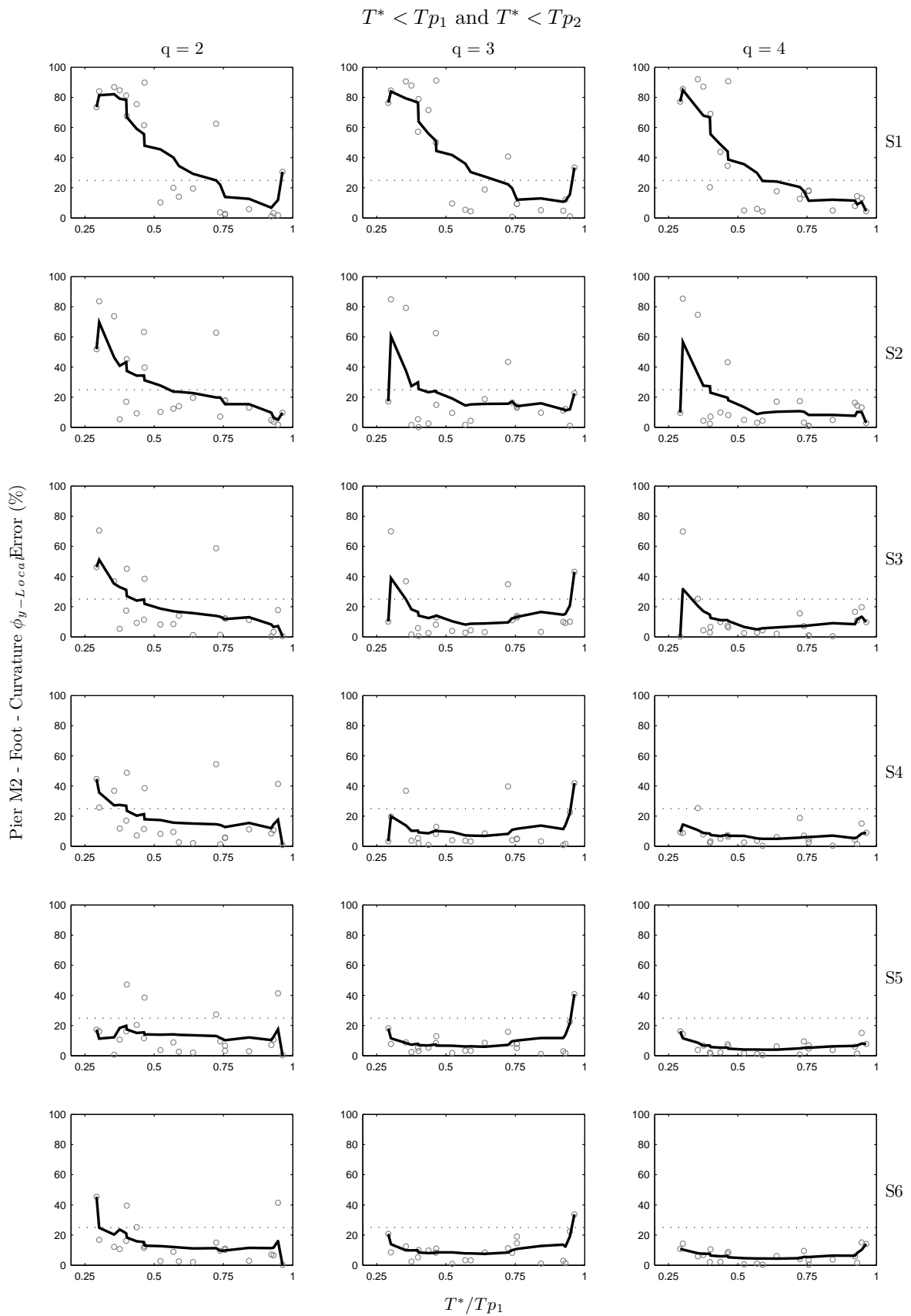
Σχήμα Β'.32: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του μονοβαθμίου βρίσκεται ανάμεσα στις περιόδους και των δύο πρώτων παλμών.

B'.9 Σφάλμα  $\phi_{y-local}M2_{Foot}$

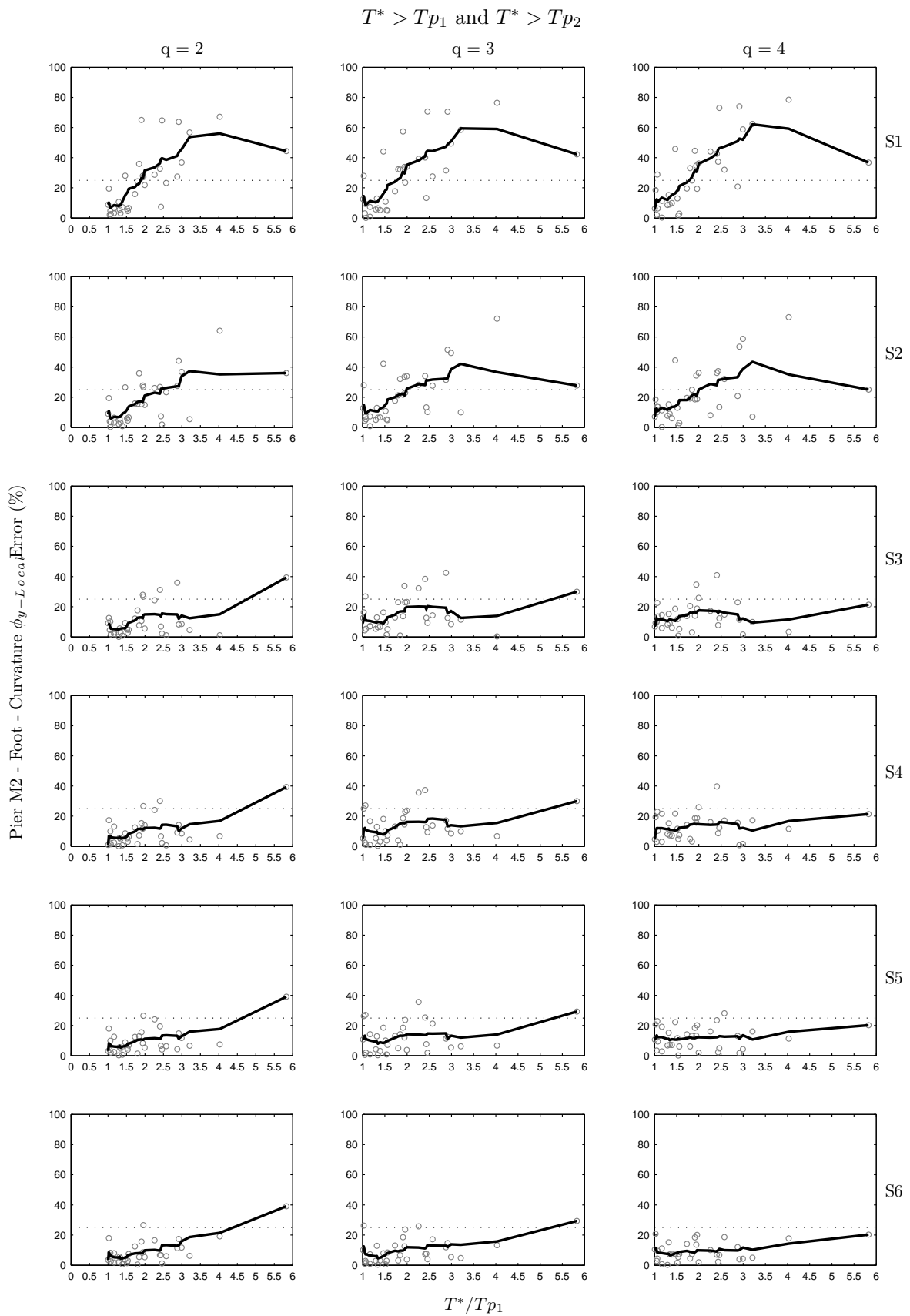


Σχήμα B'.33: Σφάλμα για το σύνολο των καταγραφών.

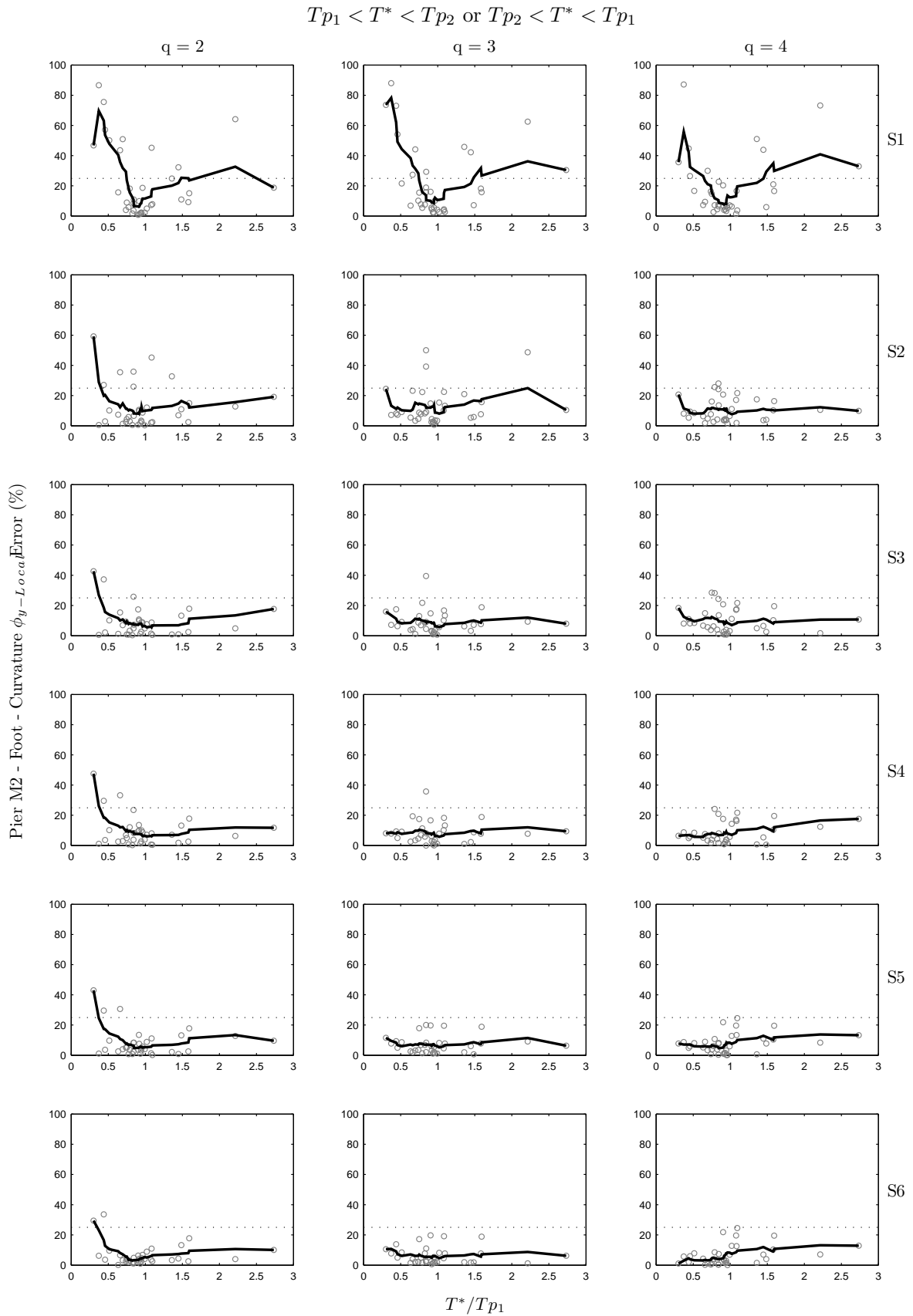




Σχήμα Β'.34: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του μονοβαθμίου είναι μικρότερη από τις περιόδους και των δύο πρώτων παλμών.

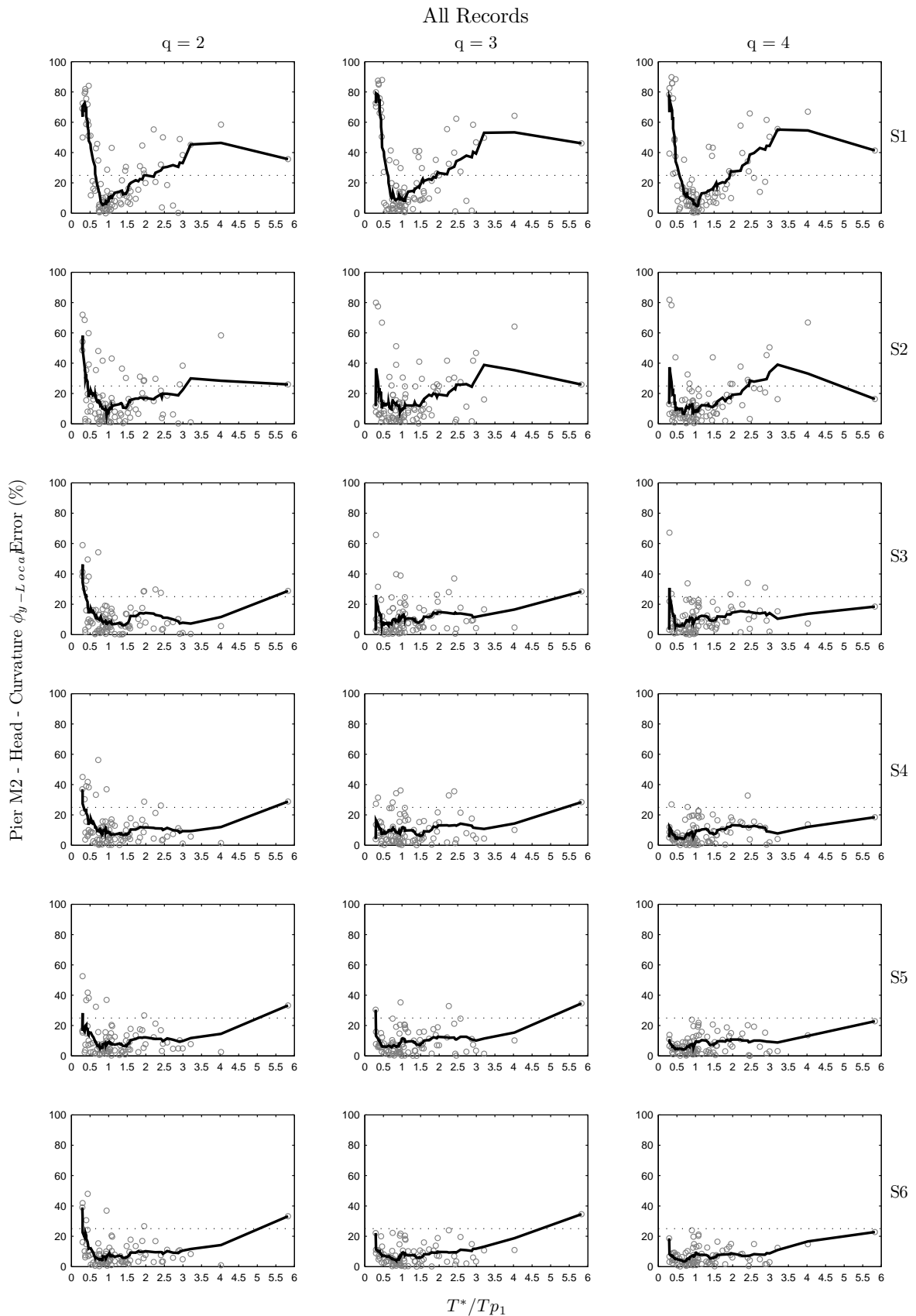


Σχήμα Β.35: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του μονοβαθμίου είναι μεγαλύτερη από τις περιόδους και των δύο πρώτων παλμών.

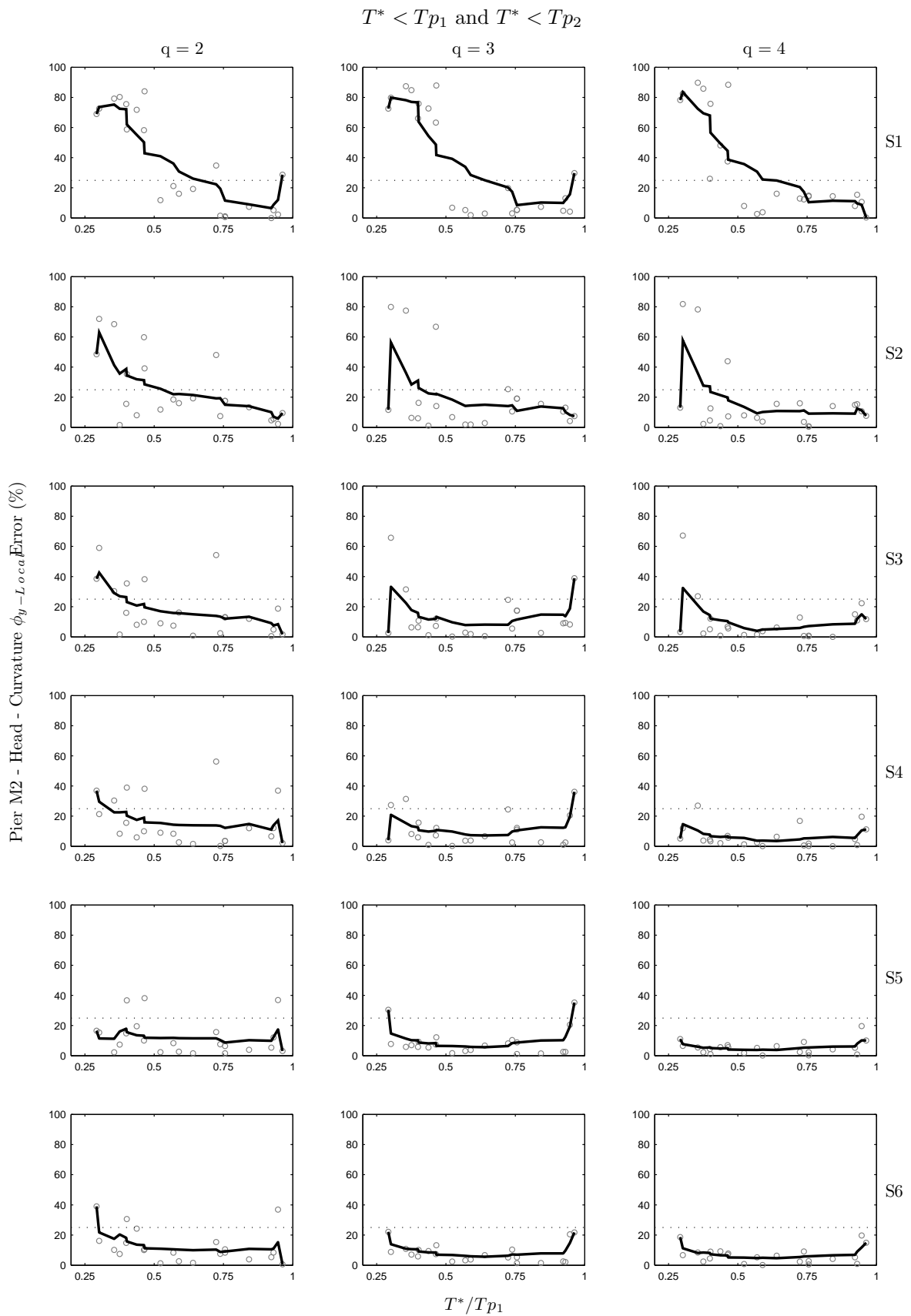


Σχήμα Β'.36: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του μονοβαθμίου βρίσκεται ανάμεσα στις περιόδους και των δύο πρώτων παλμών.

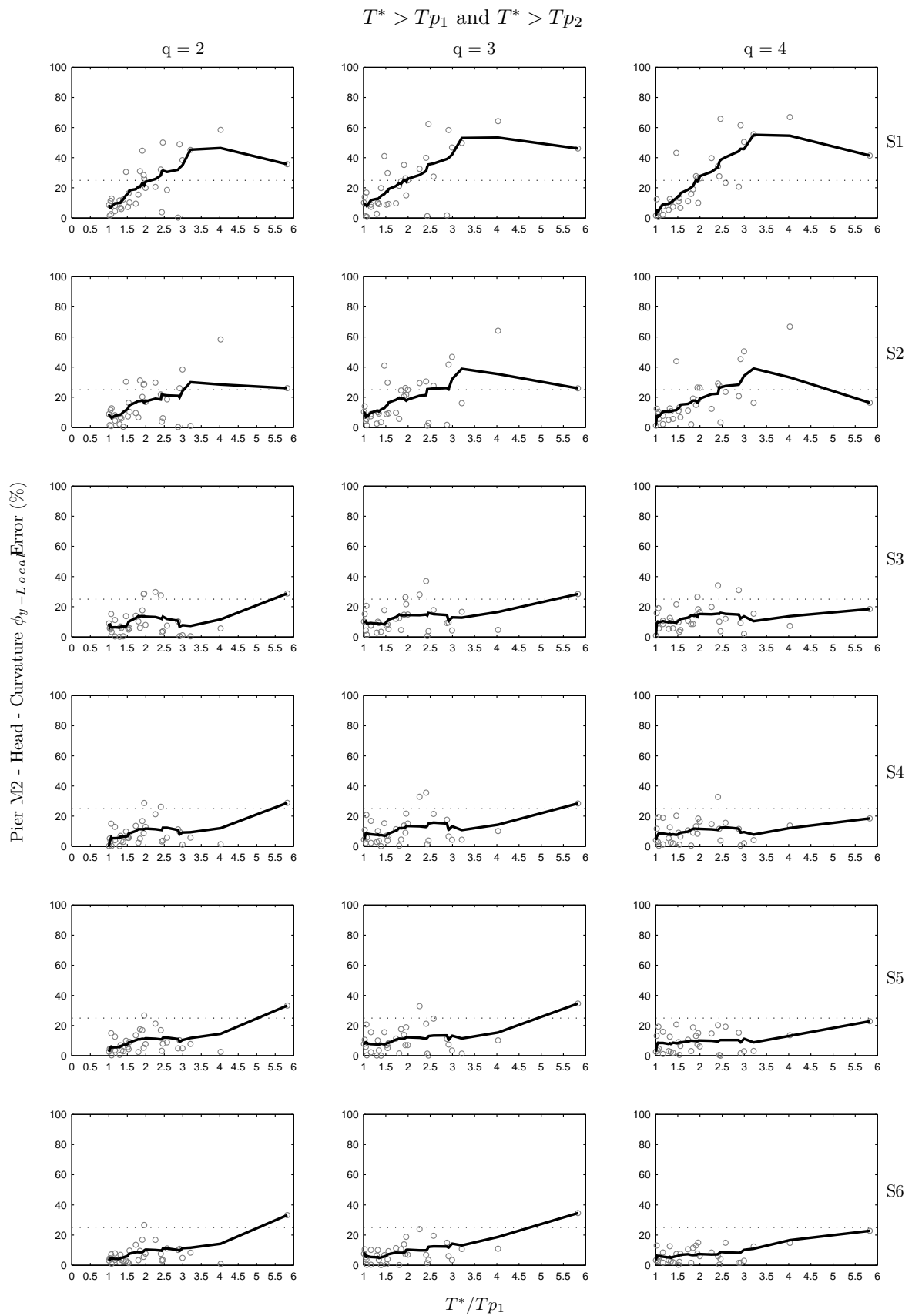
B'.10 Σφάλμα  $\phi_{y-local}M2_{Head}$



Σχήμα B'.37: Σφάλμα για το σύνολο των καταγραφών.

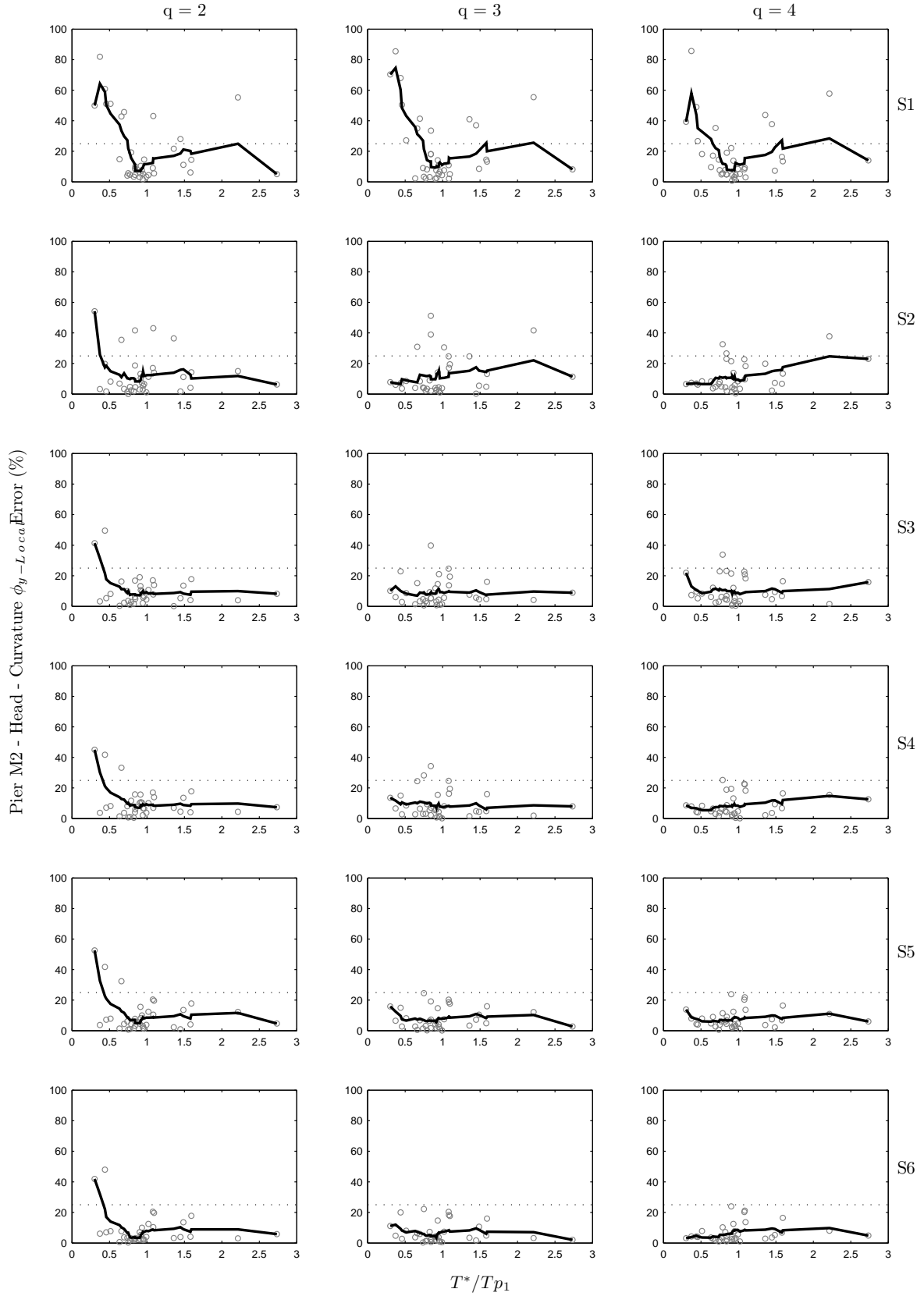


Σχήμα Β'.38: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του μονοβαθμίου είναι μικρότερη από τις περιόδους και των δύο πρώτων παλμών.



Σχήμα Β.39: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του μονοβαθμίου είναι μεγαλύτερη από τις περιόδους και των δύο πρώτων παλμών.

$$Tp_1 < T^* < Tp_2 \text{ or } Tp_2 < T^* < Tp_1$$



Σχήμα Β'.40: Σφάλμα για τις καταγραφές όπου η περίοδος του μονοβαθμίου βρίσκεται ανάμεσα στις περιόδους και των δύο πρώτων παλμών.