



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

Διπλωματική Εργασία

**ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ-
ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΣΕ ΦΥΓΟΚΕΝΤΡΙΣΤΗ**

ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ ΓΑΚΗ

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού

ΒΟΛΟΣ 2024

© 2024 Αικατερίνη Γάκη

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής Δρ. Γρηγόριος Τσινίδης
(Επιβλέπων) Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
 Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Πολυξένη Καλλιόγλου
 Λέκτορας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Γεώργιος Εφραιμίδης
 Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
 Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Επίκουρο Καθηγητή κ. Γρηγόριο Τσινίδη, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή, τη συνεχή υποστήριξη και τις ουσιαστικές συμβουλές του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, Λέκτορα κα. Πολυξένη Καλλιόγλου και Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Γεώργιο Εφραιμίδη για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους. Ιδιαίτερη ευγνωμοσύνη εκφράζω στους γονείς μου για την αμέριστη υποστήριξη τους και τη συνεχή ενθάρρυνση, που με συνόδευσαν σε κάθε βήμα της πορείας μου. Τέλος, ευχαριστώ τους φίλους μου, που έκαναν αυτά τα χρόνια μοναδικά και πιο ευχάριστα, και που ήταν πάντα δίπλα μου με κατανόηση και χαρά.

Αικατερίνη Γάκη

ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ- ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΣΕ ΦΥΓΟΚΕΝΤΡΙΣΤΗ

Αικατερίνη Γάκη

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2024

Επιβλέπων Καθηγητής: Γρηγόριος Τσινίδης, Επίκουρος Καθηγητής

Περίληψη

Η σημασία των σηράγγων, ως βασικών στοιχείων των δικτύων μεταφορών και κοινής ωφέλειας, καθιστά απαραίτητο έναν αποτελεσματικό αντισεισμικό σχεδιασμό, ιδιαίτερα σε περιοχές με έντονη σεισμική δραστηριότητα, όπως η Ελλάδα. Παρόλα αυτά, οι πρόσφατες περιπτώσεις βλαβών σε σήραγγες και υπόγειες κατασκευές αναδεικνύουν ένα σημαντικό κενό στη γνώση σχετικά με τη σεισμική απόκριση αυτών των συστημάτων. Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα εργασία εστιάζει στη διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς, αβαθών σηράγγων ορθογωνικής διατομής, εγκιβωτισμένων σε άμμο. Για το σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές αναλύσεις πειραμάτων σεισμικής τράπεζας σε προσομοιώματα σηράγγων ορθογωνικής διατομής, υπό κλίμακα, εγκιβωτισμένων σε άμμο. Τα πειράματα έλαβαν χώρα στον γεωτεχνικό φυγοκεντριστή του ερευνητικού κέντρου IFSTTAR, στη Γαλλία. Οι αναλύσεις εκτελέστηκαν με τον κώδικα πεπερασμένων διαφορών FLAC2D. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν περιλαμβάνουν την απόσβεση του συστήματος, την κατανομή του αρχικού μέτρου διάτμησης της άμμου, τις συνθήκες της διεπιφάνειας σήραγγας-εδάφους, τη δυσκαμψία της σήραγγας και την ένταση της σεισμικής διέγερσης. Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων προέκυψαν χρονοϊστορίες επιταχύνσεων και μετακινήσεων οι οποίες στη συνέχεια συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα. Από τη σύγκριση αυτή προέκυψαν διαφορές, που σε γενικές γραμμές οφείλονται σε διαφορές μεταξύ των υιοθετούμενων και πραγματικών τιμών των παραμέτρων, που επηρεάζουν τη συμπεριφορά της άμμου έναντι σεισμικής ταλάντωσης.

Λέξεις Κλειδιά: Σήραγγες, Σεισμική απόκριση, Αριθμητική προσομοίωση, Δυναμική ανάλυση

SEISMIC BEHAVIOR OF RECTANGULAR TUNNELS- NUMERICAL SIMULATION OF DYNAMIC CENTRIFUGE TESTS

Aikaterini Gaki

University of Thessaly, Department of Civil Engineering, 2024

Supervisor: Grigorios Tsinidis, Assistant Professor

Abstract

The critical role of tunnels in transportation and utility networks highlights the necessity for effective seismic design, particularly in seismic prone regions such as Greece. Despite this, recent reports of damage to tunnels and underground structures revealed a substantial knowledge gap regarding their seismic response. In this context, this study aims to investigate the parameters affecting the seismic behavior of shallow rectangular tunnels embedded in sand. To this end, numerical analyses were conducted to simulate dynamic centrifuge tests carried out on scaled rectangular models embedded in sand. The test campaign was performed at the geotechnical centrifuge of IFSTTAR research center in France. The study investigates salient parameters such as the system damping, the distribution of the small-strain shear modulus of the sand around the tunnel, the tunnel-soil interface conditions, the tunnel stiffness and the intensity of seismic excitation. The findings, which include time histories of accelerations and displacements, are compared with experimental results. This comparison revealed differences, which are mainly attributed to differences between the adopted and actual values of salient parameters affecting the response of sand and ground seismic shaking.

Keywords: *Tunnels, Seismic response, Numerical simulation, Dynamic analysis.*

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1	Εισαγωγή	1
1.1	Κίνητρο και υπόβαθρο	1
1.2	Σκοπός της διπλωματικής εργασίας	1
1.3	Οργάνωση διπλωματικής εργασίας	2
Κεφάλαιο 2	Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	3
2.1	Σεισμική συμπεριφορά σηράγγων – Βλάβες υπό σεισμική φόρτιση	3
2.1.1	Σταθμός Dakaï, Kobe, Σεισμός Hyogoken-Nambu , Ιαπωνία 1995	3
2.1.2	Βλάβες Σηράγγων, Σεισμός Chi-Chi, Taiwan 1999	5
2.1.3	Σηραγγα Longxi, Σεισμός Wenchuan, Κίνα 2008	6
2.2	Περιπτώσεις καλής σεισμικής συμπεριφοράς	6
2.3	Σεισμική συμπεριφορά	7
2.4	Μηχανισμοί αστοχίας	9
2.4.1	Συμπεριφορά έναντι σεισμικής εδαφικής ταλάντωσης	9
2.4.2	Συμπεριφορά έναντι εδαφικής αστοχίας	10
2.5	Αντισεισμικός σχεδιασμός υπόγειων κατασκευών & σηράγγων	11
2.5.1	Μελέτη επικινδυνότητας και σεισμοί σχεδιασμού	11
2.5.2	Ανάλυση στην εγκάρσια έννοια	12
2.5.3	Ανάλυση στη διαμήκη έννοια	19
2.5.4	Μέθοδοι ανάλυσης για αστοχίες εδάφους	21
2.5.5	Συνδιασμός στατικών και σεισμικών φορτίσεων	23
Κεφάλαιο 3	Εξεταζόμενο σύστημα – Αριθμητική προσομοίωση	25
3.1	Περιγραφή πειραματικού προγράμματος	25
3.1.1	Πειράματα σε γεωτεχνικό φυγοκεντριστή	25
3.1.2	Σύστημα έδαφος-σήραγγα	27
3.1.3	Κατασκευή προσομοιώματος	29
3.1.4	Ενοργάνωση	30
3.1.5	Πειραματική διαδικασία	31
3.2	Επισκόπηση του κώδικα πεπερασμένων διαφορών FLAC2D	33
3.3	Παραδοχές ανάλυσης και διαδικασία προσομοίωσης	34
3.3.1	Επιλογή Κανάβου	36
3.3.2	Ιδιότητες υλικού	37
Κεφάλαιο 4	Παραμετρική διερεύνηση	46
4.1	Ενδεικτικά Αποτελέσματα	46
4.1.1	Σύγκριση χρονοϊστοριών επιτάχυνσης για την περίπτωση T1EQ3	46
4.1.2	Σύγκριση απόλυτων μέγιστων επιταχύνσεων για την περίπτωση T1EQ3	49
4.1.3	Σύγκριση χρονοϊστοριών μετακινήσεων πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T1EQ3	50

T1EQ3	4.1.4 Σύγκριση μέγιστων μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση	54
	4.1.5 Σύγκριση χρονοϊστοριών επιτάχυνσης για την περίπτωση T1EQ4	57
	4.1.6 Σύγκριση απόλυτων μέγιστων επιταχύνσεων για την περίπτωση T1EQ4	59
T1EQ4	4.1.7 Σύγκριση χρονοϊστοριών μετακινήσεων πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση	61
T1EQ4	4.1.8 Σύγκριση μέγιστων μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση	65
	4.1.9 Σύγκριση χρονοϊστοριών επιτάχυνσης για την περίπτωση T3EQ3	68
	4.1.10 Σύγκριση απόλυτων μέγιστων επιταχύνσεων για την περίπτωση T3EQ3	70
T3EQ3	4.1.11 Σύγκριση χρονοϊστοριών μετακινήσεων πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση	71
T3EQ3	4.1.12 Σύγκριση μέγιστων μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση	75
	4.1.13 Σύγκριση χρονοϊστοριών επιτάχυνσης για την περίπτωση T3EQ4	78
	4.1.14 Σύγκριση απόλυτων μέγιστων επιταχύνσεων για την περίπτωση T3EQ4	80
T3EQ4	4.1.15 Σύγκριση χρονοϊστοριών μετακινήσεων πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση	82
T3EQ4	4.1.16 Σύγκριση μέγιστων μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση	85
	Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα	88
	Κεφάλαιο 6 Βιβλιογραφία	91
	Κεφάλαιο 7 Παράρτημα	94
	7.1 Περίπτωση T1EQ1	94
	7.1.1 Σύγκριση χρονοϊστοριών επιταχύνσεων	94
	7.1.2 Σύγκριση απόλυτων μέγιστων επιταχύνσεων	96
	7.1.3 Σύγκριση χρονοϊστοριών μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας	98
	7.1.4 Σύγκριση μέγιστων μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας	101
	7.2 Περίπτωση T1EQ2	103
	7.2.1 Σύγκριση χρονοϊστοριών επιταχύνσεων	103
	7.2.2 Σύγκριση απόλυτων μέγιστων επιταχύνσεων	105
	7.2.3 Σύγκριση χρονοϊστοριών μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας	106
	7.2.4 Σύγκριση μέγιστων μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας	109
	7.3 Περίπτωση T3EQ1	111
	7.3.1 Σύγκριση απόλυτων μέγιστων επιταχύνσεων	113
	7.3.2 Σύγκριση χρονοϊστοριών μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας	114
	7.3.3 Σύγκριση μέγιστων μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας	117
	7.4 Περίπτωση T3EQ2	119
	7.4.1 Σύγκριση χρονοϊστοριών επιταχύνσεων	119

7.4.2	Σύγκριση απόλυτων μέγιστων επιταχύνσεων	121
7.4.3	Σύγκριση ιστοριών μετακινήσεων των τοιχωμάτων της σήραγγας	122
7.4.4	Σύγκριση μέγιστων μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας	125

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Συμπεριφορά υπόγειας κατασκευής ανάλογα με την τιμή του συντελεστή σχετικής δυσκαμψίας F . (Τσινίδης 2023, Σημειώσεις μαθήματος)	8
Πίνακας 2.2: Αναλυτικές λύσεις των Wang (1993) και Penzien (2000) για την εκτίμηση διαμετρικών παραμορφώσεων και σεισμικών εντατικών μεγεθών, για σήραγγες με κυκλικές διατομές, με θεώρηση αλληλεπίδρασης εδάφους- κατασκευής. (Tsinidis 2015)	17
Πίνακας 2.3: Εντατικά μεγέθη για οριζόντιους κυματισμούς ημιτονοειδούς μορφής	20
Πίνακας 3.1: Νόμοι ομοιότητας για δοκιμές σε φυγοκεντρίστη	27
Πίνακας 3.2: Μηχανικά χαρακτηριστικά της άμμου Fontainebleau NE34 (Tsinidis et al. 2016)	28
Πίνακας 3.3: Μηχανικά χαρακτηριστικά του αλουμινίου A 2017 (Tsinidis et al. 2016)	28
Πίνακας 3.4: Πειραματικό πρόγραμμα (Tsinidis 2015)	32
Πίνακας 3.5: Χαρακτηριστικά επιβαλλόμενων διεγέρσεων	32

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2.2: Αστοχία σταθμού Dakai, σεισμός στην Ιαπωνία 1995 : α) Επιφανειακές καθιζήσεις, β) Αστοχία κεντρικών υποστρωμάτων, γ) Σχηματική απεικόνιση αστοχίας των υποστρωμάτων και καθίζηση της πλάκας οροφής (Pitilakis & Tsinidis 2014, Tsinidis 2015, Pitilakis & Tsinidis 2017 Σημειώσεις μαθήματος, Special Issue of Soil and Foundations, 1996)	4
Εικόνα 2.3: α) Τυπικές αστοχίες κατά τη διάρκεια του σεισμού Chi-Chi στην Ταϊβάν 1999, β) Πραγματική απεικόνιση αστοχίας πρανών, γ) Σχηματική αναπαράσταση αστοχίας πρανών. (Wang et al. 2001, Tsinidis et al. 2020)	5
Εικόνα 2.4: Αστοχίες της σήραγγας Longxi κατά τον σεισμό Wenchuan 2008 α) Κατάρρευση επένδυσης της σήραγγας, β) Διαμήκεις ρηγματώσεις γ) Εγκάρσιες ρηγματώσεις (Tsinidis et al. 2020, Pitilakis & Tsinidis 2017, Σημειώσεις μαθήματος)	6
Εικόνα 2.5: Περιπτώσεις συμπεριφοράς έναντι εδαφικής ταλάντωσης (Tsinidis 2015).....	10
Εικόνα 2.6: Περιπτώσεις συμπεριφορών έναντι εδαφικής αστοχίας (Tsinidis 2015)	10
Εικόνα 2.7: Συσχετισμός συντελεστή racking R με συντελεστή σχετικής δυσκαμψίας F (Wang 1993, Penzien 2000, Tsinidis 2015) ...	13
Εικόνα 2.8: Απλοποιημένη μεθοδολογία ανάλυσης υπόγειας κατασκευής ορθογωνικής διατομής, επιβολή συγκεντρωμένου φορτίου και κατανεμημένου φορτίου τριγωνικής κατανομής (Pitilakis & Tsinidis 2014).....	13
Εικόνα 2.9: Απλοποιημένη ισοδύναμη στατική ανάλυση: α) χωρίς ελατήρια, β) με ελατήρια (Πιτιλάκης & Τσινίδης 2012, Σημειώσεις ΑΣΤΕ)	14
Εικόνα 2.10: Απλοποιημένη αναλυτική μέθοδος για ανάλυση κυκλικών σιράγγων στην εγκάρσια έννοια (Τσινίδης 2023, Σημειώσεις μαθήματος).....	15
Εικόνα 2.11: Απλοποιημένη αναλυτική μέθοδος για ανάλυση ορθογωνικών σιράγγων (Τσινίδης 2023, Σημειώσεις μαθήματος) ..	16
Εικόνα 2.12: Λεπτομερής ισοδύναμη στατική ανάλυση, περιπτώσεις εισαγωγής του σεισμικού φορτίου (Tsinidis 2015).....	18
Εικόνα 2.13: Σήραγγα υποβαλλόμενη σε αρμονική φόρτιση (Wang, 1993, Tsinidis 2015)	19
Εικόνα 2.14: Απλοποιημένη ισοδύναμη στατική ανάλυσης, επιβολή σεισμικού φορτίου λαμβάνοντας υπόψη τη χωρική μεταβλητότητα της σεισμικής κίνησης (Πιτιλάκης & Τσινίδης 2012, Σημειώσεις ΑΣΤΕ).....	21
Εικόνα 2.15: Τρισδιάστατο αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης συστήματος έδαφος-σήραγγα-σταθμός μετρό που συναντά ρήγμα (Pitilakis et al 2013, Tsinidis 2015)	23
Εικόνα 2.16: Συνδυασμοί φορτίσεων σχεδιασμού (Πιτιλάκης & Τσινίδης 2012, Σημειώσεις ΑΣΤΕ)	24
Εικόνα 3.1: α) Σχηματική απεικόνιση λειτουργίας του φυγοκεντρίστη, β) Σύγκριση πρωτότυπου μοντέλου με το μοντέλο κλίμακας (Taylor, 1994).....	26
Εικόνα 3.2: Ειδικό κιβώτιο τύπου equivalent shear beam (Tsinidis 2015)	27
Εικόνα 3.3: Κοκκομετρική καμπύλη της άμμου Fontainebleau NE34 (Tsinidis et al. 2016)	28
Εικόνα 3.4: α) Διαστάσεις μοντέλων σιράγγων, β) Μέγεθος εσοχών ανάλογα με την κοκκομετρία της άμμου (Tsinidis 2015)	29
Εικόνα 3.5: Λεπτομέρεια στήριξης προσομοιωμάτων σιράγγων στις θέσεις επαφής τους με το κιβώτιο ESB (Tsinidis et al. 2015) ..	30
Εικόνα 3.6: Ενοργάνωση πειραμάτων (Tsinidis 2015).....	31
Εικόνα 3.7: Σύσκευή καταγραφής οριζόντιων παραμορφώσεων εσωτερικών τοιχωμάτων (Tsinidis et al. 2015)	31
Εικόνα 3.8: α) Χρονοϊστορία του σεισμού στο Northbridge ανοιγμένη σε 0,1g, β) Ανάλυση Fourier του σεισμού στο Northbridge, γ) Χρονοϊστορία ημιτονοειδούς φόρτισης, δ) Ανάλυση Fourier της ημιτονοειδούς φόρτισης.....	33
Εικόνα 3.9: Γενική ακολουθία ανάλυσης που ενσωματώνεται στο FLAC2D (Τσινίδης, 2022, “Soil Models-FLAC”, 2018)	34
Εικόνα 3.10: Τυπικό αριθμητικό προσομοίωμα των πειραμάτων στο FLAC2D	35
Εικόνα 3.11: Κατανομή της μέσης ενεργής τάσης σ_m (kPa) με το βάθος z(m) για την άμμο Fontainebleau NE34.....	38
Εικόνα 3.12: Κατανομή του Αρχικού Μέτρου Διάτμησης G_{max} (kPa) με το βάθος z(m).....	38
Εικόνα 3.13: Κατανομή της αρχικής ταχύτητας διατμητικών κυμάτων V_{s0} (kPa) με το βάθος z(m).....	39
Εικόνα 3.14: Καμπύλη G-γ-D για την άμμο Fontainebleau NE34 με $D_r=70\%$ βαθμονομημένη για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας.....	40
Εικόνα 3.15: Προσαρμογή στην πραγματική καμπύλη G-γ-D με το μοντέλο sig3 για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας.....	41
Εικόνα 3.16: Διάγραμμα σταθερού Αρχικού Μέτρου Διάτμησης G_{max}	42
Εικόνα 3.17: Κατανομή μέσης τάσης με το βάθος	42
Εικόνα 3.18: Κατανομή Μέτρου Ελαστικότητας με το βάθος	43
Εικόνα 3.19: Καμπύλη G-γ-D για την άμμο Fontainebleau NE34 με $D_r=70\%$ βαθμονομημένη για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB.....	44
Εικόνα 3.20: Προσαρμογή στην πραγματική καμπύλη G-γ-D με το μοντέλο sig3 για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB.....	44
Εικόνα 4.1: Σύγκριση χρονοϊστοριών επιταχύνσεων για την περίπτωση T1EQ3, με σταθερό αρχικό μέτρο διάτμησης και απόσβεση Rayleigh 1%	47
Εικόνα 4.2: Σύγκριση χρονοϊστοριών επιταχύνσεων για την περίπτωση T1EQ3, με κατανεμημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 1%	47
Εικόνα 4.3: Σύγκριση χρονοϊστοριών επιταχύνσεων για την περίπτωση T1EQ3, με κατανεμημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 3%	48
Εικόνα 4.4: Σύγκριση χρονοϊστοριών επιταχύνσεων για την περίπτωση T1EQ3, με κατανεμημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 1%	48

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

1.1 Κίνητρο και υπόβαθρο

Στα σύγχρονα πυκνοδομημένα αστικά κέντρα, ο περιορισμένος χώρος και η εκτεταμένη ανάγκη για νέες κατασκευές καθιστούν αναπόφευκτη την εκμετάλλευση του υπόγειου χώρου. Υπάρχουν τρεις κυριότερες κατηγορίες υπόγειων έργων: οι αγωγοί, οι εκτεταμένες υπόγειες πολυώροφες κατασκευές και οι σήραγγες. Ειδικά οι σήραγγες, κατασκευάζονται με αυξανόμενο ρυθμό, καθώς αποτελούν σημαντικά στοιχεία των συστημάτων μεταφοράς και των δικτύων κοινής ωφέλειας, όπως είναι σιδηροδρομικά ή οδικά δίκτυα και τα συστήματα ύδρευσης και αποχέτευσης. Παρά τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η χρήση του υπόγειου χώρου, ένα από τα κύρια μειονεκτήματα είναι το υψηλό κόστος κατασκευής των έργων, λόγω της μεγάλης έκτασης που καταλαμβάνουν, καθώς και των τεχνικών δυσκολιών που διέπουν την κατασκευή τους. Εξαιτίας αυτού, αλλά και της ταυτόχρονης ανάγκης για δημιουργία τέτοιων υποδομών, η παραμικρή βλάβη μπορεί να επιφέρει σημαντικές άμεσες και έμμεσες οικονομικές και κοινωνικές απώλειες. Έτσι, αναδεικνύεται η ανάγκη για επαρκή αντισεισμικό σχεδιασμό, ιδιαίτερα σε χώρες με έντονη σεισμική δραστηριότητα όπως η Ελλάδα.

1.2 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στη σεισμική απόκριση σηράγγων ορθογωνικής διατομής, όπως είναι οι σήραγγες μετρό, οι υπόγειες διαβάσεις κλπ., καθώς για αυτές τις κατασκευές υπάρχει μεγαλύτερο κενό στην υπάρχουσα βιβλιογραφία. Συγκεκριμένα, διερευνάται η απόκριση των κατασκευών αυτών έναντι σεισμικής ταλάντωσης στην εγκάρσια έννοια, μέσω της αριθμητικής προσομοίωσης δυναμικών πειραμάτων σε φυγοκεντριστή, τα οποία διεξήχθησαν σε υπό κλίμακα δοκίμια ορθογωνικών σηράγγων σε άμμο, στο ερευνητικό κέντρο IFSTTAR της Γαλλίας. Μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων

των αριθμητικών αναλύσεων με τις καταγραφές από τα πειράματα, αναδεικνύονται στοιχεία της συμπεριφοράς των κατασκευών αυτών και διερευνάται η αποτελεσματικότητα των αριθμητικών προσομοιώσεων που χρησιμοποιούνται στην πράξη.

1.3 Οργάνωση διπλωματικής εργασίας

Το υπόλοιπο της διπλωματικής εργασίας χωρίζεται σε έξι ενότητες που καταλαμβάνουν τα Κεφάλαια 2-7, αντίστοιχα. Αναλυτικά:

Στο 2^ο Κεφάλαιο, παρουσιάζεται μια ανασκόπηση της υπάρχουσας βιβλιογραφίας. Συγκεκριμένα, η ανασκόπηση επικεντρώνεται στη σεισμική συμπεριφορά υπόγειων κατασκευών κατά τη διάρκεια πρόσφατων σεισμών και τις σημαντικότερες βλάβες που υπέστησαν. Ακόμη, γίνεται αναφορά στους μηχανισμούς αστοχίας έναντι εδαφικής ταλάντωσης και έναντι εδαφικής αστοχίας. Τέλος, παρουσιάζονται οι βασικές διαθέσιμες μεθοδολογίες ανάλυσης υπόγειων κατασκευών και σηράγγων στην εγκάρσια και τη διαμήκη έννοια.

Στο 3^ο Κεφάλαιο περιγράφεται το εξεταζόμενο σύστημα και η σειρά των πειραμάτων σεισμικής τράπεζας σε γεωτεχνικό φυγοκεντριστή που πραγματοποιήθηκαν σε υπό κλίμακα δοκίμια σηράγγων ορθογωνικής διατομής που εγκιβωτίστηκαν σε άμμο. Επίσης παρουσιάζεται το αριθμητικό προσομοίωμα εδάφους-σήραγγας και παρουσιάζεται συνοπτικά ο αριθμητικός κώδικας FLAC2D. Τέλος, αναφέρονται οι παραδοχές που υιοθετήθηκαν σε κάθε περίπτωση.

Στο 4^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα από τις αριθμητικές παραμετρικές αναλύσεις, με σκοπό τη διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς σηράγγων ορθογωνικής διατομής στην εγκάρσια έννοια. Παράλληλα, εξετάζεται η αποτελεσματικότητα του κώδικα πεπερασμένων διαφορών FLAC2D, μέσω συγκρίσεων χρονοϊστοριών επιταχύνσεων και οριζόντιων μετακινήσεων.

Στο 5^ο Κεφάλαιο συνοψίζονται τα κύρια συμπεράσματα της παρούσας εργασίας και γίνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Στο 6^ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται η βιβλιογραφία.

Στο 7^ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται το Παράρτημα, όπου παρατίθενται αναλυτικά όλα τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων.

Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1 Σεισμική συμπεριφορά σηράγγων – Βλάβες υπό σεισμική φόρτιση

Με βάση τη σύγχρονη βιβλιογραφία, οι υπόγειες κατασκευές, όπως οι σήραγγες, συνήθως παρουσιάζουν καλύτερη συμπεριφορά συγκριτικά με τις υπέργειες κατασκευές, όταν αντιμετωπίζουν το ίδιο επίπεδο σεισμικής έντασης. Για τον λόγο αυτό, οι μελέτες για τη σεισμική τους απόκριση είναι σχετικά περιορισμένες σε σχέση με τις υπέργειες κατασκευές. Η διαφοροποίηση στη συμπεριφορά οφείλεται κυρίως, στον πλήρη εγκιβωτισμό των υπόγειων κατασκευών στο έδαφος, ο οποίος με τη σειρά του οδηγεί στην υπερίσχυση των εδαφικών παραμορφώσεων, λόγω σεισμού, έναντι των αδρανειακών δυνάμεων της κατασκευής κατά την ταλάντωση. Ωστόσο, βλάβες, ακόμα και καταρρεύσεις, που εμφανίστηκαν σε υπόγειες κατασκευές κατά τη διάρκεια πρόσφατων σεισμών, αναδεικνύουν το πρόβλημα και επισημαίνουν την ανάγκη για έναν ορθολογικό αντισεισμικό σχεδιασμό. Παρακάτω, γίνεται αναφορά σε χαρακτηριστικές περιπτώσεις βλαβών σε σήραγγες, κατά τη διάρκεια πρόσφατων σεισμών.

2.1.1 ΣΤΑΘΜΟΣ ΔΑΚΑΙ, ΚΟΒΕ, ΣΕΙΣΜΟΣ HYOOKEN-NAMBU , ΙΑΠΩΝΙΑ 1995

Η σημαντικότερη καταγραφή ολικής κατάρρευσης υπόγειας κατασκευής ορθογωνικής διατομής, είναι αυτή του υπόγειου σταθμού Dakai, στο Kobe της Ιαπωνίας το 1995, ο οποίος κατέρρευσε λόγω σεισμικής ταλάντωσης κατά τη διάρκεια του ισχυρού σεισμού Hyogoken-Nambu. Ο ανεπαρκής αντισεισμικός σχεδιασμός του σταθμού, οδήγησε σε διατμητική αστοχία κεντρικών υποστυλωμάτων λόγω έλλειψης διατμητικού οπλισμού και σε λυγισμό των στοιχείων αυτών. Ο λυγισμός αρκετών κεντρικών υποστυλωμάτων είχε ως αποτέλεσμα την κατάρρευση της πλάκας οροφής, η οποία επέφερε καθιζήσεις στην επιφάνεια της τάξης

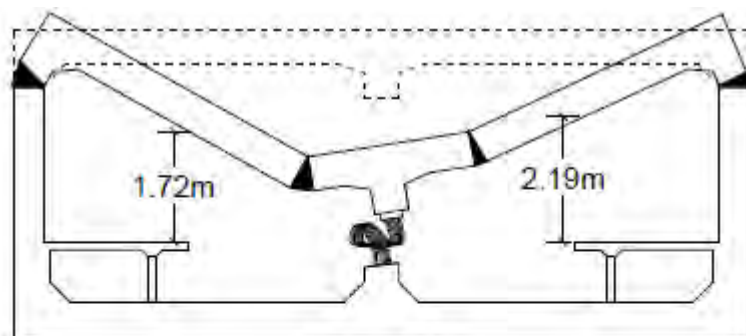
των 2-2.5 μέτρων. Αναλύσεις μετά το συμβάν ανέδειξαν πως οι ισχυρές τέμνουσες δυνάμεις που αναπτύχθηκαν οφείλονταν στη σχετική μετακίνηση μεταξύ των πλακών οροφής και δαπέδου, που έφτασε έως και τα 30 χιλιοστά. Εξίσου σημαντικός παράγοντας στην απόκριση της κατασκευής ήταν και το βάρος της υπερκείμενης εδαφικής μάζας (Hashash et al., 2001, Pitilakis & Tsinidis, 2014, Pitilakis & Tsinidis, 2017, Tsinidis, 2015, Tsinidis et al. 2020).



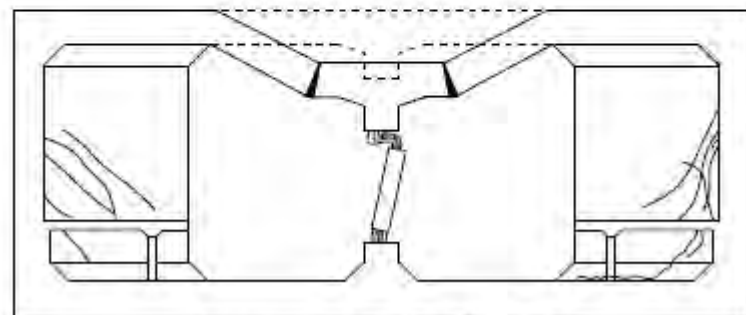
α



β



Column 10



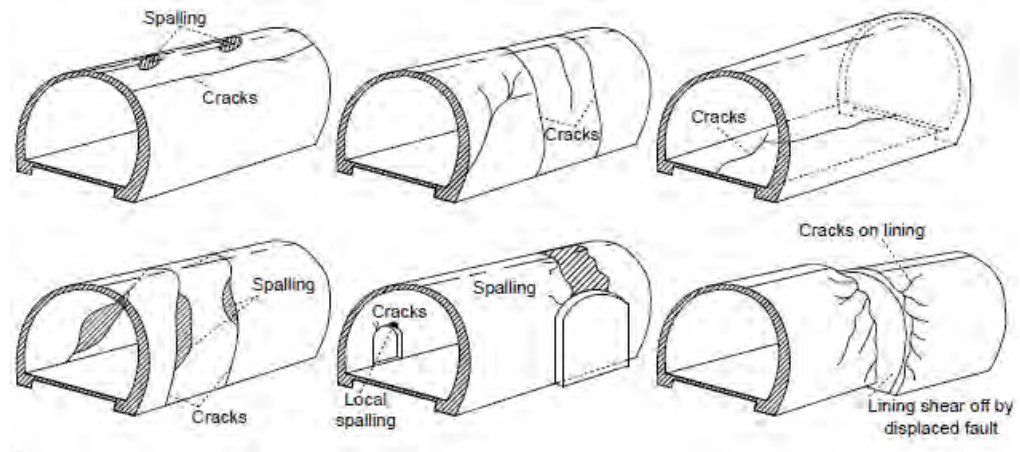
Transversal wall (to Nagata)

γ

Εικόνα 2.1: Αστοχία σταθμού Daka, σεισμός στην Ιαπωνία 1995 : α) Επιφανειακές καθιζήσεις, β) Αστοχία κεντρικών υποστυλωμάτων, γ) Σχηματική απεικόνιση αστοχίας των υποστυλωμάτων και καθίζηση της πλάκας οροφής (Pitilakis & Tsinidis 2014, Tsinidis 2015, Pitilakis & Tsinidis 2017, Special Issue of Soil and Foundations, 1996)

2.1.2 ΒΛΑΒΕΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ, ΣΕΙΣΜΟΣ CHI-CHI, TAIWAN 1999

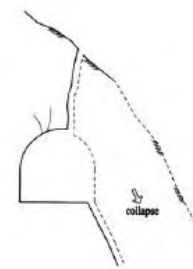
Η ενεργοποίηση του ρήγματος Chelungpu, μήκους 60 χιλιομέτρων, προκάλεσε τον σεισμό Chi-Chi, μεγέθους 7.3 της κλίμακας Richter, στην Ταϊβάν το 1999. Συγκεκριμένα 49 από τις 57 ορεινές σήραγγες στην επικεντρική περιοχή υπέστησαν σοβαρές βλάβες διαφόρων τύπων. Οι συχνότερες βλάβες αφορούσαν κατολισθήσεις στις εισόδους και εξόδους των σηράγγων, λόγω αστάθειας των πρανών. Παρατηρήθηκαν επίσης, ρηγματώσεις, αποφλοιώσεις της επένδυσης, εκτεθειμένοι οπλισμοί καθώς και εισροή υπόγειου νερού. Οι γενικές μορφές βλαβών που αναφέρθηκαν παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.2 (Wang et al., 2001).



α



β



γ

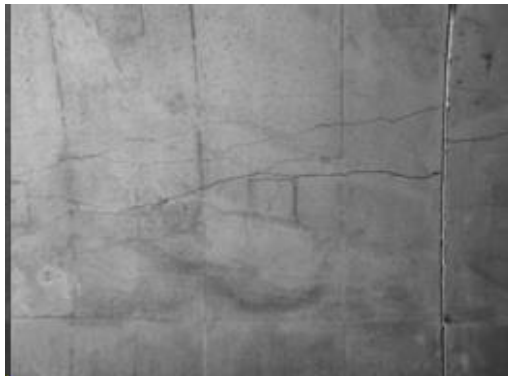
Εικόνα 2.2: α) Τυπικές αστοχίες κατά τη διάρκεια του σεισμού Chi-Chi στην Ταϊβάν 1999, β) Πραγματική απεικόνιση αστοχίας πρανών, γ) Σχηματική αναπαράσταση αστοχίας πρανών (Wang et al. 2001, Tsinidis et al. 2020)

2.1.3 ΣΗΡΑΓΓΑ LONGXI, ΣΕΙΣΜΟΣ WENCHUAN, ΚΙΝΑ 2008

Πιο πρόσφατο παράδειγμα αποτελεί η κατάρρευση της σήραγγας Longxi, στην Κίνα το 2008, κατά τη διάρκεια του σεισμού Wenchuan. Η ιδιαιτερότητα της συγκεκριμένης περίπτωσης έγκειται στο γεγονός, πως η σήραγγα διαπερνά σεισμικό ρήγμα. Στο σημείο διασταύρωσης της σήραγγας με το ρήγμα, τμήμα της επένδυσης κατέρρευσε, παρασύροντας και την περιβάλλουσα βραχώμαζα. Επιπλέον, όπως φαίνεται και στα ακόλουθα σχήματα, η επένδυση υπέστη ρηγματώσεις τόσο εγκάρσια όσο και διαμήκους της σήραγγας (Tsinidis et al. 2020).



α



β



γ

Εικόνα 2.3: Αστοχίες της σήραγγας Longxi κατά τον σεισμό Wenchuan 2008 α) Κατάρρευση επένδυσης της σήραγγας, β) Διαμήκεις ρηγματώσεις γ) Εγκάρσιες ρηγματώσεις (Tsinidis et al. 2020, Pitilakis & Tsinidis 2017)

2.2 Περιπτώσεις καλής σεισμικής συμπεριφοράς

Αντίθετα με τα προηγούμενα, τυπικό παράδειγμα καλής σεισμικής συμπεριφοράς αποτελεί το υπόγειο σιδηροδρομικό δίκτυο BART (Bay Area Rapid Transit), στην περιοχή της

Καλιφόρνιας των Ηνωμένων Πολιτειών, το οποίο φέρει βυθισμένη σήραγγα. Πρόκειται για μία από τις πρώτες υπόγειες εγκαταστάσεις που σχεδιάστηκαν έναντι σεισμικής φόρτισης. Κατά τη διάρκεια του σεισμού στη Loma Prieta, το 1989, παρατηρήθηκαν μόνιμες παραμορφώσεις στους αρμούς του βυθισμένου τμήματος, οι οποίες όμως δε ξεπέρασαν τις αναμενόμενες κατά το σχεδιασμό, δίνοντας έτσι μια ικανοποιητική συμπεριφορά (Tsinidis, 2015).

Αντίστοιχο παράδειγμα καλής απόκρισης, είναι και το Μετρό της Αθήνας, το οποίο ενώ βρισκόταν υπό κατασκευή, υπέστη το σεισμό του 1999. Οι εγκαταστάσεις σχεδιάστηκαν αντισεισμικά λαμβάνοντας υπόψη επιταχύνσεις της τάξης $0.2\text{ g} - 0.3\text{ g}$.

Από τα παραπάνω γίνεται κατανοητό πως οι υπόγειες κατασκευές, ανεξαρτήτως διατομής, επιπονούνται τόσο από τη δράση των σεισμικών κυμάτων, όσο και από τις μόνιμες εδαφικές παραμορφώσεις. Η ανάγκη για εξασφάλιση της ασφάλειας και ακεραιότητας τέτοιων κατασκευών αναδεικνύει τη σημασία επιπρόσθετης έρευνας.

2.3 Σεισμική συμπεριφορά

Εξαιτίας του πλήρη εγκιβωτισμού των υπόγειων κατασκευών στο έδαφος, η συμπεριφορά τους έναντι σεισμικών κυμάτων, διαφέρει κατά πολύ από αυτή των υπέργειων κατασκευών. Κύριο αίτιο είναι τα σύνθετα φαινόμενα αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής που προκύπτουν, καθιστώντας τα αδρανειακά φορτία των υπόγειων κατασκευών λιγότερο σημαντικά, σε σχέση με τις επιβαλλόμενες εδαφικές μετακινήσεις στις κατασκευές κατά τη σεισμική ταλάντωση. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, οι κύριες παράμετροι που επηρεάζουν τις παραμορφώσεις και τις κατανομές τάσεων στη διατομή μιας σήραγγας είναι: (i) η σχετική δυσκαμψία εδάφους-κατασκευής, (ii) οι ιδιότητες της διεπιφάνειας εδάφους-κατασκευής, (iii) η γεωμετρία της κατασκευής, (iv) το βάθος εγκιβωτισμού και (v) τα χαρακτηριστικά της σεισμικής διέγερσης.

Αναλυτικότερα, έχει παρατηρηθεί πως όσο αυξάνεται το ύψος της υπερκείμενης, της υπόγειας κατασκευής, εδαφικής στρώσης, τόσο λιγότερες βλάβες παρατηρούνται. Επίσης, οι σήραγγες σε βραχώδη εδάφη είναι ιδιαίτερα ανθεκτικές στον σεισμικό κίνδυνο, ενώ αντίθετα, οι κατασκευές σε μαλακά εδάφη είναι περισσότερο επιρρεπείς σε βλάβες. Η

παρουσία επένδυσης αποτελεί έναν ακόμη καθοριστικό παράγοντα στη συμπεριφορά έναντι σεισμού, καθώς έχει παρατηρηθεί πως οι επενδυμένες σήραγγες είναι γενικά πιο ασφαλείς.

Η σχετική δυσκαμψία εδάφους-κατασκευής, επηρεάζει καθοριστικά την σεισμική απόκριση της υπόγειας κατασκευής. Συνήθως εκφράζεται με τον λόγο της εδαφικής δυσκαμψίας προς τη δυσκαμψία της κατασκευής, που ονομάζεται *λόγος σχετικής δυσκαμψίας* και συμβολίζεται με F . Ανάλογα με την τιμή του F , μπορεί να εκτιμηθεί η εμφάνιση ή όχι παραμορφώσεων της εξεταζόμενης κατασκευής, σύμφωνα με τον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Συμπεριφορά υπόγειας κατασκευής ανάλογα με την τιμή του συντελεστή σχετικής δυσκαμψίας F (Τσινίδης 2023).

$F \rightarrow 0$	Δύσκαμπτη κατασκευή	Δεν θα εμφανίσει παραμόρφωση racking / ovaling
$F < 1.0$	Η κατασκευή εμφανίζεται πιο δύσκαμπτη από το περιβάλλον έδαφος	Η παραμόρφωση της κατασκευής θα είναι μικρότερη από την εδαφική παραμόρφωση
$F = 1.0$	Η κατασκευή και το περιβάλλον έδαφος εμφανίζουν την ίδια δυσκαμψία	Η παραμόρφωση της κατασκευής θα είναι ίση με την παραμόρφωση του εδάφους στο ελεύθερο πεδίο
$F > 1.0$	Το έδαφος εμφανίζεται πιο δύσκαμπτο της κατασκευής	Η παραμόρφωση της κατασκευής θα είναι μεγαλύτερη της εδαφικής παραμόρφωσης

Όσον αφορά τα χαρακτηριστικά της σεισμικής διέγερσης, η διάρκεια της σεισμικής δόνησης είναι υψίστης σημασίας για τη συμπεριφορά και την τρωτότητα υπόγειων κατασκευών. Άλλοι παράγοντες που δύνανται να επηρεάσουν τη σεισμική συμπεριφορά, είναι το επίπεδο της επιτάχυνσης και η μέγιστη επιτάχυνση PGA, η ταχύτητα και το συχνотικό περιεχόμενο, τα οποία είναι άμεσα συνδεδεμένα με το βάθος του επίκεντρου του σεισμού. Τέλος, δε μπορεί να αγνοηθεί και η σημαντική επιρροή, στο σεισμικό φορτίο, που προκαλεί η ύπαρξη υπέργειων κατασκευών. Σε περίπτωση πολύπλοκα δομημένου περιβάλλοντος, είναι δυνατόν, η σεισμική ενέργεια να παγιδεύεται μεταξύ της σήραγγας και της υπέργειας κατασκευής και να παρατηρείται μείωση ή αύξηση των επιταχύνσεων στην υπόγεια

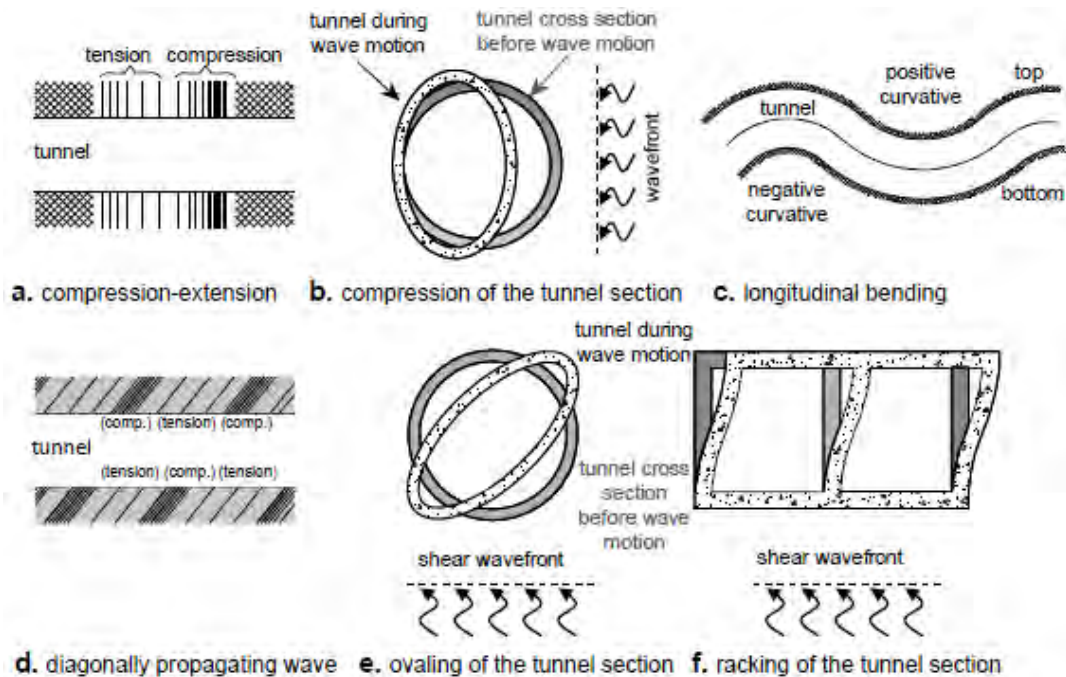
κατασκευή, σε σχέση με την περίπτωση όπου δεν υπάρχει η υπέργεια κατασκευή (Hashash et al. 2001, Πιτιλάκης & Τσινίδης 2012, Τσινίδης 2023).

2.4 Μηχανισμοί αστοχίας

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, στις υπόγειες κατασκευές υπερισχύουν τα φορτία καταναγκασμού μετακινήσεων του εδάφους στην κατασκευή έναντι των αδρανειακών της κατασκευής. Οι σεισμικές φορτίσεις στις υπόγειες κατασκευές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο κατηγορίες: φορτίσεις λόγω σεισμικής ταλάντωσης και λόγω κινηματικής καταπόνησης λόγω αστοχίας του εδάφους από σεισμικά προκαλούμενα φαινόμενα, όπως ρευστοποιήσεις, κατολισθήσεις και μετακινήσεις σε ρήγματα.

2.4.1 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΕΝΑΝΤΙ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗΣ

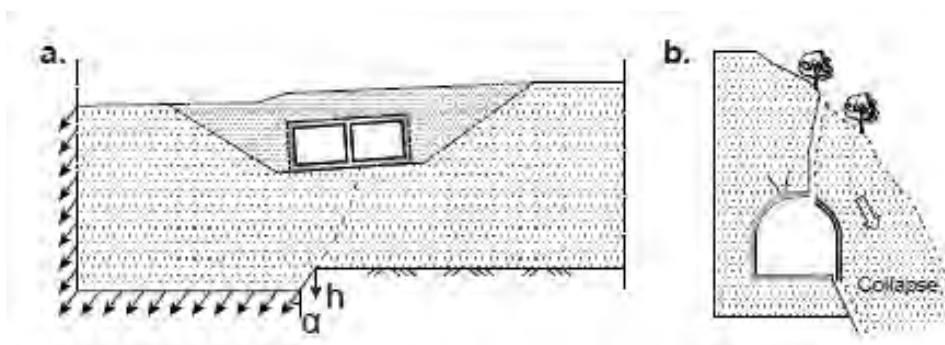
Κατά τη διάδοση σεισμικών κυμάτων, εντός του εδάφους, τρεις είναι οι βασικότερες μορφές παραμόρφωσης των υπόγειων κατασκευών που συναντώνται: i) η αξονική σύνθλιψη και εφελκυσμός κατά τη διαμήκη έννοια, ii) η διαμήκης κάμψη και iii) η εγκάρσια διατμητική παραμόρφωση. Διάφορες μορφές παραμόρφωσης υπόγειων κατασκευών λόγω σεισμικής ταλάντωσης παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.4. Η περίπτωση παραμόρφωσης της Εικόνας 2.4α παρατηρείται όταν το έδαφος ταλαντώνεται παράλληλα στον άξονα της σήραγγας, ενώ η περίπτωση παραμόρφωσης της Εικόνας 2.4γ όταν η εδαφική κίνηση είναι κάθετη στον άξονα της. Ακολούθως, η εγκάρσια διατμητική παραμόρφωση παρατηρείται κατά την κατακόρυφη διάδοση των κυμάτων από το βράχο προς την επιφάνεια του εδάφους. Για τις κυκλικές διατομές, η παραμόρφωση που υπόκεινται η κατασκευή είναι διαμετρική (ovaling) και για τις ορθογωνικές διατομές είναι διατμητική (racking). Η παραπάνω περιγραφή φαίνεται αντίστοιχα στις e και f της Εικόνας 2.4. Το μέγεθος των βλαβών που θα προκληθούν, εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό και από τη χωρική μεταβλητότητα της σεισμικής κίνησης, λόγω της στρωματογραφίας του εδάφους (Tsinidis 2015, Πιτιλάκης & Τσινίδης 2012, Τσινίδης 2023).



Εικόνα 2.4: Πιθανές μορφές παραμόρφωσης σηράγγων έναντι εδαφικής ταλάντωσης (Tsinidis 2015)

2.4.2 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΕΝΑΝΤΙ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

Ο όρος εδαφική αστοχία αναφέρεται κυρίως σε μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις και παραμορφώσεις που προκαλούνται εξαιτίας ρευστοποίησης, μετακίνησης ρήγματος και ολίσθησης πρανούς κατά τη διάρκεια ενός σεισμικού γεγονότος. Το βασικότερο πρόβλημα, έγκειται στον προσδιορισμό των ολικών και διαφορικών μετακινήσεων, εξαιτίας αυτών των φαινομένων, καθώς η μετέπειτα ανάλυση αποτελεί στατικό πρόβλημα. Κάνοντας χρήση ήδη υπαρχόντων κανονιστικών διατάξεων, για υπόγειους αγωγούς, αλλά και με τα κατάλληλα αριθμητικά εργαλεία, ο προσδιορισμός των ζητούμενων εντατικών μεγεθών για το σχεδιασμό είναι εφικτός (Tsinidis 2015).



Εικόνα 2.5: Περιπτώσεις συμπεριφορών έναντι εδαφικής αστοχίας (Tsinidis 2015)

2.5 Αντισεισμικός σχεδιασμός υπόγειων κατασκευών & σηράγγων

Σε μία σεισμογενή χώρα, όπως η Ελλάδα, η αντισεισμική μελέτη εκτεταμένων υπόγειων κατασκευών και σηράγγων εμφανίζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Συχνά, εφαρμόζονται κανονισμοί που προορίζονται για υπέργειες κατασκευές, όπως ο Ευρωκώδικας 8, ωστόσο η πρακτική αυτή, πολλές φορές, δύναται να οδηγήσει σε περιορισμένη ασφάλεια των υπόγειων έργων έναντι σεισμικού κινδύνου, αφού οι εν λόγω κανονισμοί δεν λαμβάνουν υπόψη τις ιδιαίτερες συνθήκες που επικρατούν στο υπόγειο περιβάλλον.

Συνήθης πρακτική είναι να διεξάγονται ο σχεδιασμός και η ανάλυση έναντι στατικών και σεισμικών φορτίων σε διακριτά βήματα. Ακόμη, εξαιτίας της μεγάλης ποικιλίας μορφών αστοχίας και παραμόρφωσης που συναντώνται στις υπόγειες κατασκευές και σήραγγες, κατά τη διάρκεια σεισμικής δόνησης, η ανάλυση διαφοροποιείται κατά την εγκάρσια και τη διαμήκη έννοια των κατασκευών αυτών, με τα αποτελέσματα κάθε ανάλυσης να συντίθενται στο τελικό στάδιο σχεδιασμού. Σε κάθε περίπτωση απαιτείται αρχικά η εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας στην περιοχή ενδιαφέροντος (θέση της κατασκευής).

2.5.1 ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Αρχικά, απαραίτητη είναι η μελέτη σεισμικής επικινδυνότητας, της περιοχής ενδιαφέροντος, ώστε να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά κίνησης του εδάφους. Οι δύο πιο διαδεδομένες μέθοδοι είναι η πιθανοτική, PSHA (probabilistic seismic hazard analysis) και η αιτιοκρατική, DSHA (deterministic seismic hazard analysis) (Kramer 1996, Pitilakis 2010) .

Δεύτερο βήμα, είναι η επιλογή του σεισμού σχεδιασμού. Στους σεισμούς μικρής έντασης κατατάσσεται ο Σεισμός Σχεδιασμού Λειτουργίας (ΛΣΣ), ο οποίος έχει πιθανότητα εμφάνισης 10% σε 50 χρόνια, και κατά τη διάρκεια αυτού, η κατασκευή πρέπει να παραμείνει στην ελαστική περιοχή, χωρίς να υποστεί ζημιές. Στους σεισμούς μεγάλης έντασης, εντάσσεται ο Μέγιστος Σεισμός Σχεδιασμού (ΜΣΣ), με πιθανότητα εμφάνισης 5% σε 50 χρόνια. Κατά τη διάρκεια σεισμών μεγάλης έντασης, επιτρέπεται η εμφάνιση ανελαστικών παραμορφώσεων και η δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων, αλλά απαγορεύεται ρητά η κατάρρευση της κατασκευής.

2.5.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΗΝ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΕΝΝΟΙΑ

Η σεισμική ανάλυση στην εγκάρσια έννοια υπόγειων κατασκευών και σηράγγων είναι κρίσιμη για την εκτίμηση των μέγιστων σεισμικών εντατικών φορτίων της επένδυσης. Στη βιβλιογραφία εμφανίζονται πολλές μέθοδοι ανάλυσης, οι οποίες ταξινομούνται σε τρεις βασικές, ανάλογα με τον τρόπο επιβολής του σεισμικού φορτίου (Pitilakis & Tsiniidis, 2014).

Οι κατηγορίες αυτές είναι οι:

- Μέθοδοι βασισμένες σε δυνάμεις (forced-based methods)
- Μέθοδοι βασισμένες σε μετακινήσεις (displacement-based methods)
- Αριθμητικές μέθοδοι (numerical methods)

Οι δύο πρώτες κατηγορίες αναλύονται περαιτέρω σε:

- Μεθόδους προσέγγισης ελεύθερου πεδίου, που αγνοούν τα φαινόμενα αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής και
- Μεθόδους που λαμβάνουν υπόψη τα σύνθετα φαινόμενα αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής

Οι μέθοδοι που ακολουθούν στη συνέχεια αφορούν σε κατασκευές με κυκλικές αλλά και ορθογωνικές διατομές.

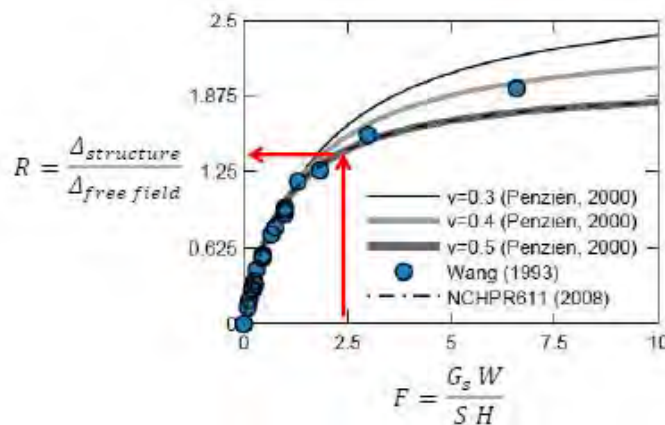
2.5.2.1 Μέθοδοι βασισμένες σε δυνάμεις

Στην απλοποιημένη μεθοδολογία ανάλυσης ορθογωνικής διατομής F-R (Wang 1993), οι παραμορφώσεις λόγω σεισμού εφαρμόζονται στην κατασκευή σαν ισοδύναμα στατικά φορτία. Κάνοντας μια μονοδιάστατη ανάλυση εδαφικής απόκρισης, εκτιμώνται οι εδαφικές σεισμικές παραμορφώσεις στο ελεύθερο πεδίο και έπειτα υπολογίζονται οι συντελεστές F και R. Ο συντελεστής F, είναι ο συντελεστής σχετικής δυσκαμψίας, για τον οποίο έγινε αναφορά στην παράγραφο 2.3 και εδώ υπολογίζεται με χρήση της εξίσωσης 2.1 για ορθογωνικές διατομές:

$$F = \frac{G_s W}{S H} \quad (2.1)$$

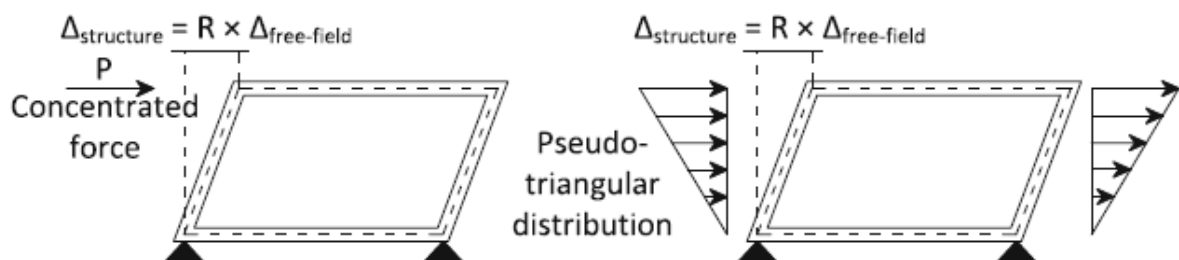
Ο συντελεστής διατμητικής παραμόρφωσης (racking) R, είναι ο λόγος της παραμόρφωσης της κατασκευής, προς την αντίστοιχη παραμόρφωση του εδάφους, στο ίδιο βάθος με την

κατασκευή, σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου (μακριά από την κατασκευή). Με τον υπολογισμό του συντελεστή R , λαμβάνονται υπόψη και τα φαινόμενα αλληλεπίδρασης εδάφους κατασκευής. Ο συσχετισμός του συντελεστή σχετικής δυσκαμψίας και του συντελεστή διατμητικής παραμόρφωσης γίνεται με τη χρήση συσχετίσεων όπως αυτές που παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.6, οι οποίες προέκυψαν από αναλυτικές λύσεις ή αριθμητικές αναλύσεις (Wang, 1993).



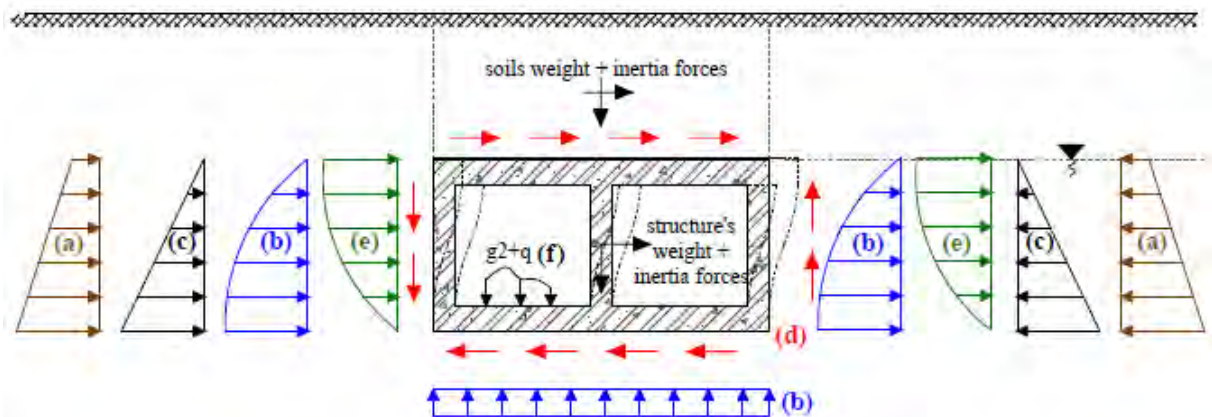
Εικόνα 2.6: Συσχετισμός συντελεστή racking R με συντελεστή σχετικής δυσκαμψίας F (Wang 1993, Penzien 2000, Tsinidis 2015)

Στη συνέχεια, αφού προσδιοριστεί η παραμόρφωση της κατασκευής $\Delta_{\text{structure}}$, γίνεται εκτίμηση των σεισμικών εντατικών μεγεθών της εξεταζόμενης κατασκευής μέσω στατικών αναλύσεων. Στην Εικόνα 2.7 παρουσιάζονται δύο περιπτώσεις επιβολής του ισοδύναμου σεισμικού φορτίου είτε ως συγκεντρωμένο φορτίο στην κορυφή της διατομής είτε ως κατανεμημένο φορτίο με τριγωνική κατανομή (Wang, 1993).

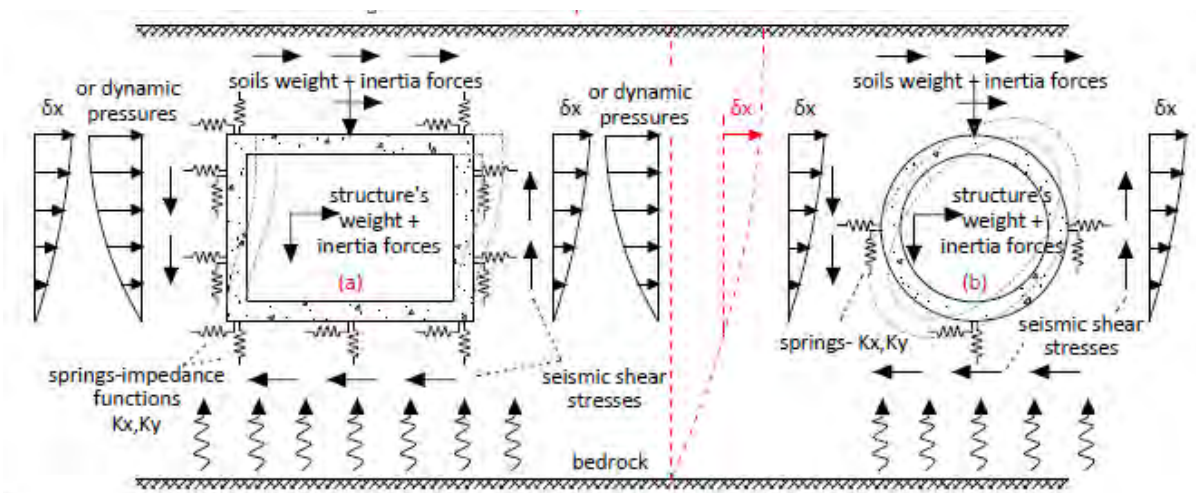


Εικόνα 2.7: Απλοποιημένη μεθοδολογία ανάλυσης υπόγειας κατασκευής ορθογωνικής διατομής, επιβολή συγκεντρωμένου φορτίου και κατανεμημένου φορτίου τριγωνικής κατανομής (Pitilakis & Tsinidis 2014)

Επόμενη μέθοδος αυτής της κατηγορίας, είναι η ισοδύναμη στατική ανάλυση (ISO 23469, 2005). Σε αυτή τη μεθοδολογία, η σεισμική ανάλυση απλοποιείται σε στατική, προσομοιώνοντας την κατασκευή με στοιχεία δοκού. Στην περίπτωση όπου αγνοούνται τα φαινόμενα αλληλεπίδρασης εδάφους κατασκευής, τότε τα σεισμικά φορτία εισάγονται στο σύστημα με τη μορφή ψευδοστατικών φορτίσεων (σεισμικές ωθήσεις, αδρανειακά φορτία κατασκευής και υπερκείμενου εδάφους και δυνάμεις τριβής περιμετρικά της κατασκευής) επιβαλλόμενα απευθείας στην κατασκευή. Στην αντίθετη περίπτωση, το έδαφος προσομοιώνεται με κατάλληλα ελατήρια μέσω των οποίων επιβάλλονται τα ισοδύναμα σεισμικά φορτία.



α



β

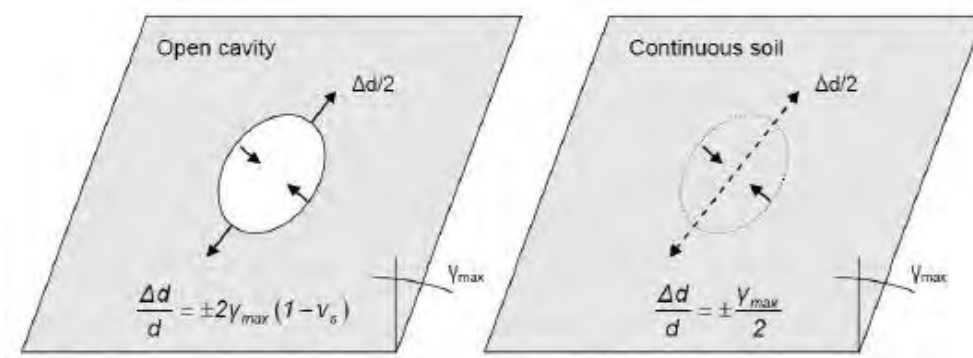
Εικόνα 2.8: Απλοποιημένη ισοδύναμη στατική ανάλυση: α) χωρίς ελατήρια, β) με ελατήρια (Πιτλάκης & Τσινίδης 2012)

Παρά την ευκολία χρήσης, της μεθόδου αυτής, προκύπτουν διάφορα προβλήματα κατά την εφαρμογή της. Για παράδειγμα, οι υιοθετούμενες κατανομές σεισμικών ωθήσεων που συνήθως προκύπτουν από προσεγγίσεις για υπέργειες κατασκευές (π.χ. θεώρηση Monopobe Okabe) δεν ισχύουν απόλυτα σε περιπτώσεις υπόγειων κατασκευών (π.χ. σε βαθιές σήραγγες, άνω των 20 μέτρων, ούτε για σήραγγες σε βράχο). Ακόμη, η αναπαράσταση του εδάφους με ελατήρια, προκαλεί προβλήματα προσομοίωσης της κινηματικής και αδρανειακής αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής, καθώς τα διαθέσιμα «ελατήρια» δεν δύνανται να περιγράψουν ικανοποιητικά τα φαινόμενα αυτά.

2.5.2.2 Μέθοδοι βασισμένες σε μετακινήσεις

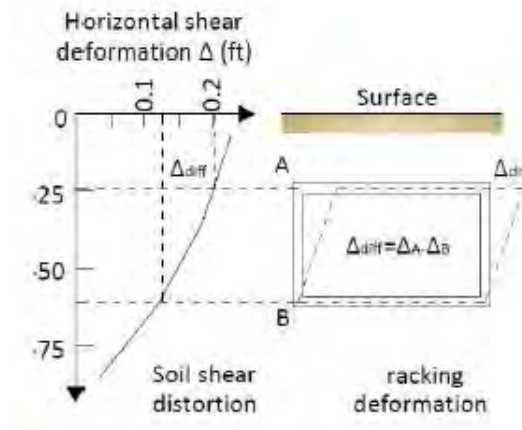
Στις διαθέσιμες απλοποιημένες αναλυτικές μεθόδους εντάσσονται αρχικά απλοποιημένες αναλυτικές σχέσεις για τον υπολογισμό σεισμικών παραμορφώσεων και εντατικών μεγεθών των διατομών των εξεταζόμενων σηράγγων. Για την εξαγωγή των αναλυτικών σχέσεων συνήθως γίνεται η θεώρηση ελαστικής, ισοτροπικής και ομογενούς συμπεριφοράς του εδάφους. Η σήραγγα θεωρείται ότι συμπεριφέρεται επίσης ελαστικά, ενώ λόγω του μεγάλου μήκους της σήραγγας, σε σχέση με τη διάμετρο της, θεωρείται επίπεδη παραμόρφωση στην εγκάρσια έννοια.

Στην απλούστερη των περιπτώσεων, αγνοούνται τα φαινόμενα αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής. Για κατασκευές με κυκλικές διατομές, υπολογίζεται η διαμετρική παραμόρφωση, τύπου ovaling, Δd , μέσω της αρχικής διαμέτρου της σήραγγας d , της μέγιστης παραμόρφωσης $\gamma_{\max}$ και του λόγου Poisson, ν_s , σύμφωνα με τις σχέσεις της Εικόνας 2.9. Η σεισμική δράση εισάγεται στατικά στο πρόβλημα με τον όρο της μέγιστης παραμόρφωσης.



Εικόνα 2.9: Απλοποιημένη αναλυτική μέθοδος για ανάλυση κυκλικών σηράγγων στην εγκάρσια έννοια (Τσινίδης 2023)

Για ορθογωνικές διατομές, υπολογίζεται η σεισμική διατμητική παραμόρφωση, του εδάφους, τύπου racking, στο βάθος της εξεταζόμενης κατασκευής (μέσω μονοδιάστατης ανάλυσης εδαφικής απόκρισης) με την εισαγωγή των σεισμικών φορτίων να γίνεται στο σύστημα, ως στατικός καταναγκασμός μετακίνησης.



Εικόνα 2.10: Απλοποιημένη αναλυτική μέθοδος για ανάλυση ορθογωνικών σήραγγων (Τσινίδης 2023)

Λαμβάνοντας υπόψη τα σύνθετα ζητήματα αλληλεπίδρασης εδάφους- κατασκευής, το πρόβλημα περιπλέκεται. Στις πλέον γνωστές, αναλυτικές λύσεις, των Wang (1993) και Penzien (2000), για κυκλικές διατομές, τα σύνθετα θέματα αλληλεπίδρασης λαμβάνονται υπόψη μέσω των συντελεστών σχετικής δυσκαμψίας και σχετικής συμπιεστότητας που δίνονται στις εξισώσεις 2.2 και 2.3 αντίστοιχα.

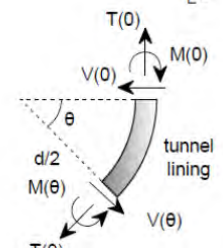
$$F = \frac{E_m (1 - \nu_l^2) R^3}{6 E_l (1 + \nu_m)} \quad (2.2)$$

$$C = \frac{E_m (1 - \nu_l^2) R}{E_l t (1 + \nu_m) (1 - 2\nu_m)} \quad (2.3)$$

όπου E_m : μέτρο ελαστικότητας εδάφους, ν_l : λόγος Poisson επένδυσης, R : ακτίνα σήραγγας, E_l : μέτρο ελαστικότητας επένδυσης, t : πάχος επένδυσης, ν_m : λόγος Poisson εδάφους και I : ροπή αδράνειας. Ανάλογα με την παραδοχή πλήρους ή μηδενικής ολίσθησης οι αναλυτικές λύσεις διαφοροποιούνται. Στην πρώτη περίπτωση, γίνεται η θεώρηση ότι δεν μεταφέρονται

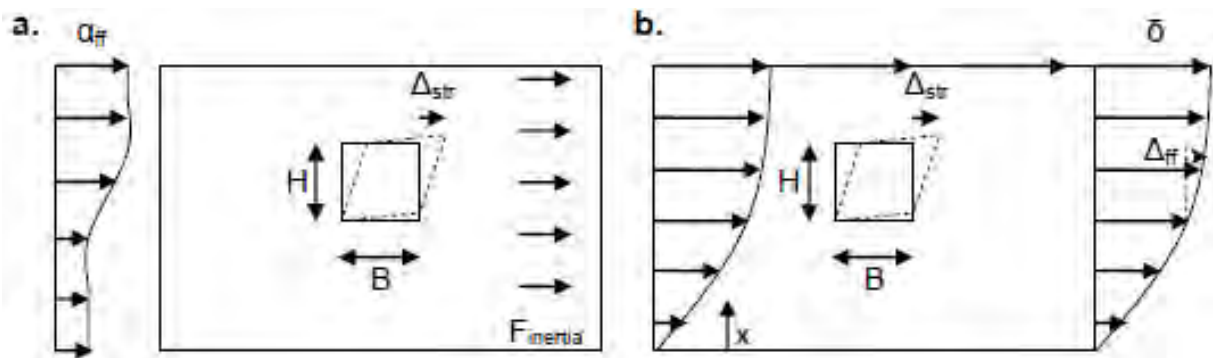
διατμητικές τάσεις από το έδαφος στην κατασκευή, ενώ στη δεύτερη ισχύει το αντίθετο, δηλαδή θεωρείται πλήρης μεταφορά των τάσεων. Στον Πίνακα 2.2 φαίνονται αναλυτικά οι λύσεις των Wang και Penzien για κάθε θεώρηση ξεχωριστά.

Πίνακας 2.2: Αναλυτικές λύσεις των Wang (1993) και Penzien (2000) για την εκτίμηση διαμετρικών παραμορφώσεων και σεισμικών εντατικών μεγεθών, για σήραγγες με κυκλικές διατομές, με θεώρηση αλληλεπίδρασης εδάφους- κατασκευής. (Tsinidis 2015)

Reference	Full slip conditions without normal separation	No slip conditions
Wang (1993)	$\frac{\Delta d}{d} = \pm \frac{1}{3} K_1 F \gamma_{max}$ $T_{max} = \pm \frac{1}{6} K_1 \frac{E_s}{(1+\nu_s)} R \gamma_{max}$ $M_{max} = \pm \frac{1}{6} K_1 \frac{E_s}{(1+\nu_s)} R^2 \gamma_{max}$ $K_1 = \frac{12(1-\nu_s)}{2F+5-6\nu_s}$ $R_c = \frac{\Delta d_{stru}}{\Delta d_{free-field}} = \frac{2}{3} K_1 F = \frac{4(1-\nu_s)F}{2.5-3\nu_s+F}$	$T_{max} = \pm K_2 \tau_{max} = \pm K_2 \frac{E_s}{2(1+\nu_s)} R \gamma_{max}$ $K_2 = 1 + \frac{F[(1-2\nu_s)-(1-2\nu_s)C] - \frac{1}{2}(1-2\nu_s)^2 + 2}{F[(3-2\nu_s)+(1-2\nu_s)C] + C\left[\frac{5}{2}-8\nu_s+6\nu_s^2\right] + 6-8\nu_s}$  Sign convention for internal force components (Penzien and Wu, 1998)
Reference	Full slip conditions without normal separation	No slip conditions
Penzien (2000)	$\pm \Delta d_{stru}^n = \pm R \Delta d_{ff}^n, R^n = \frac{\Delta d_{stru}^n}{\Delta d_{ff}^n} = \pm \frac{4(1-\nu_s)}{(1+a_s)}$ $T(\theta) = -\frac{12E_t I_t \Delta d_{stru}^n}{D^3(1-\nu_t^2)} \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right)$ $M(\theta) = -\frac{6E_t I_t \Delta d_{stru}^n}{D^2(1-\nu_t^2)} \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right)$ $V(\theta) = -\frac{24E_t I_t \Delta d_{stru}^n}{D^3(1-\nu_t^2)} \sin 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right)$ $a_s = \frac{12(5-6\nu_s)E_t I_t}{D^3 G_s (1-\nu_t^2)}$	$\pm \Delta d_{stru} = \pm R \Delta d_{ff}, R = \frac{\Delta d_{stru}}{\Delta d_{ff}} = \pm \frac{4(1-\nu_s)}{(1+a_s)}$ $T(\theta) = -\frac{24E_t I_t \Delta d_{stru}}{D^3(1-\nu_t^2)} \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right)$ $M(\theta) = -\frac{6E_t I_t \Delta d_{stru}}{D^2(1-\nu_t^2)} \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right)$ $V(\theta) = -\frac{24E_t I_t \Delta d_{stru}}{D^3(1-\nu_t^2)} \sin 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right)$ $a_s = \frac{24(3-4\nu_s)E_t I_t}{D^3 G_s (1-\nu_t^2)}$
Notation:	G_s : shear modulus of the soil, E_s : modulus of elasticity of the soil, ν_s : Poisson ratio of the soil, E_t : modulus of elasticity of the lining, ν_t : Poisson ratio of the lining, I_t : moment of inertia of the tunnel lining (per unit width), R : tunnel radius, t : lining thickness, D : diameter of the tunnel	

2.5.2.3 Αριθμητικές μέθοδοι

Η χρήση αριθμητικών μεθόδων λύνει τα προβλήματα προσομοίωσης των μη γραμμικών χαρακτηριστικών του συστήματος εδάφους-κατασκευής. Στις μεθόδους αυτές εντάσσεται η λεπτομερής ισοδύναμη στατική ανάλυση σύμφωνα με την οποία το σύστημα έδαφος-κατασκευή προσομοιώνεται με δισδιάστατα αριθμητικά μοντέλα. Το σύστημα προσομοιώνεται στις δύο διαστάσεις, με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων, όπου η σήραγγα προσομοιώνεται με στοιχεία δοκού και το έδαφος με στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης. Το σεισμικό φορτίο εισάγεται στατικά με τη μορφή μετακινήσεων ή αδρανειακών δυνάμεων στο περιβάλλον έδαφος, «αναγκάζοντας» την κατασκευή σε παραμόρφωση. Στην απλούστερη περίπτωση, οι απαιτούμενες επιταχύνσεις (για την εκτίμηση των αδρανειακών δυνάμεων) ή οι μετακινήσεις προσδιορίζονται μέσω μονοδιάστατων αναλύσεων εδαφικής απόκρισης.



Εικόνα 2.11: Λεπτομερής ισοδύναμη στατική ανάλυση, περιπτώσεις εισαγωγής του σεισμικού φορτίου (Tsinidis 2015)

Τέλος, για την εγκάρσια ανάλυση, η πλέον ακριβής μέθοδος είναι αυτή της πλήρους δυναμικής ανάλυσης. Το σύστημα προσομοιώνεται στις δύο διαστάσεις, με χρήση πεπερασμένων στοιχείων, όπου η σήραγγα προσομοιώνεται με στοιχεία δοκού και το έδαφος με στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης. Η μέθοδος αυτή, περιγράφει ικανοποιητικά την κινηματική και την αδρανειακή συμπεριφορά του συστήματος εδάφους-κατασκευής καθώς επίσης και τη μη γραμμική συμπεριφορά του εδάφους και της διεπιφάνειας εδάφους κατασκευής. Κύριο και βασικότερο μειονέκτημα της μεθοδολογίας αυτής είναι το μεγάλο υπολογιστικό κόστος που τη συνοδεύει.

2.5.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΗ ΔΙΑΜΗΚΗ ΕΝΝΟΙΑ

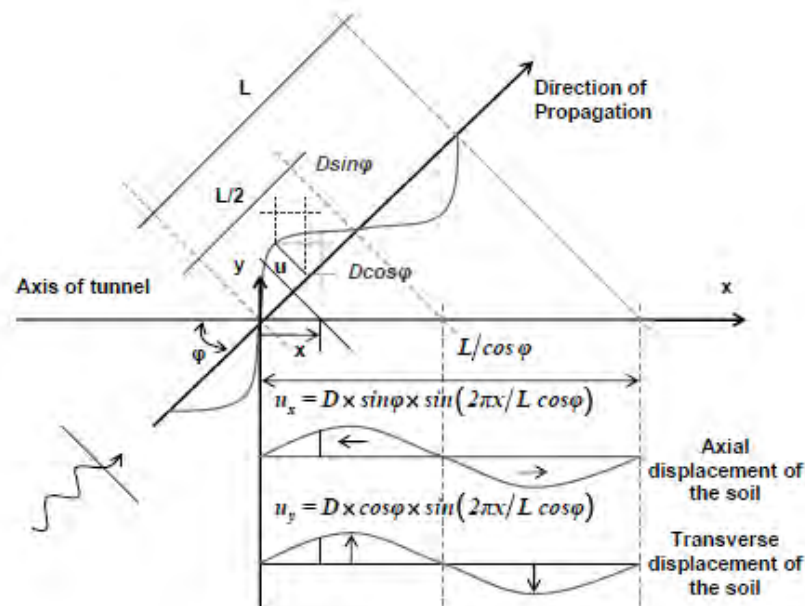
Η ανάλυση στη διαμήκη έννοια, είναι εξίσου σημαντική, ειδικά σε περιπτώσεις όπου οι εξεταζόμενες κατασκευές διατρέχουν ζώνες αλλαγής του εδαφικού υλικού ή εμφανίζονται προβλήματα ασύγχρονης κίνησης. Σε αυτή την κατεύθυνση υπάρχουν δύο κατηγορίες μεθόδων ανάλυσης:

- Μέθοδοι βασισμένες σε μετακινήσεις (displacement-based methods)
- Αριθμητικές μέθοδοι (numerical methods)

2.5.3.1 Μέθοδοι βασισμένες σε μετακινήσεις

Στις μεθόδους αυτές εντάσσονται αναλυτικές λύσεις. Οι πιο διαδεδομένες αναλυτικές λύσεις για ανάλυση στη διαμήκη έννοια, είναι βασισμένες στη θεώρηση του Newmark (1965). Σε όλες τις μεθόδους που θα ακολουθήσουν η σήραγγα προσομοιώνεται ως δοκός πάνω σε ειδικού τύπου ελατήρια.

Οι St. John and Zahrah (1987), προτείνουν κλειστού τύπου αναλυτικές λύσεις, είτε με θεώρηση ελεύθερου πεδίου, είτε με θεώρηση αλληλεπίδρασης εδάφους- κατασκευής. Στις λύσεις αυτές η κατασκευή θεωρείται ότι υποβάλλεται σε αρμονική φόρτιση.



Εικόνα 2.12: Σήραγγα υποβαλλόμενη σε αρμονική φόρτιση (Wang, 1993, Tsinidis 2015)

Για τις περιπτώσεις όπου λαμβάνεται υπόψη η αλληλεπίδραση εδάφους κατασκευής προτάθηκε η χρήση ελατηρίων για την προσομοίωση των φαινομένων αυτών. Χρησιμοποιώντας απλοποιήσεις, οι ερευνητές πρότειναν τις ακόλουθες σχέσεις για τον προσδιορισμό της δυσκαμψίας των ελατηρίων σε κάθετη και οριζόντια διεύθυνση.

$$K_{h,a} = \frac{16\pi G_s (1-\nu_s)}{(3-4\nu_s)} \frac{d}{L} \quad (2.4)$$

$$K_v = \frac{2\pi G_s}{(1-\nu_s)} \frac{d}{L} \quad (2.5)$$

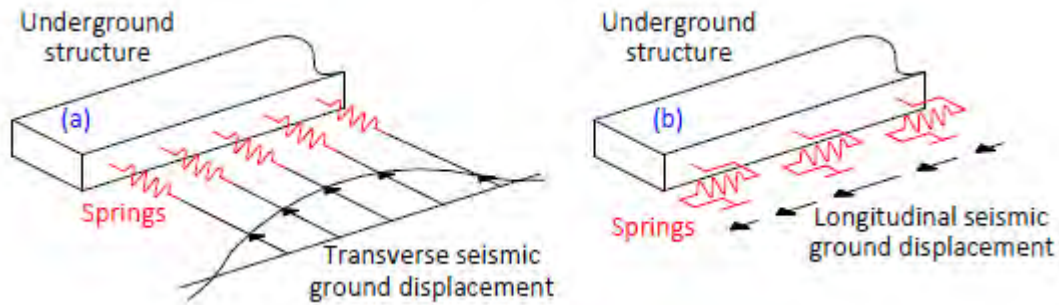
όπου K_h : η δυσκαμψία των ελατηρίων για οριζόντιο διατμητικό φορτίο, K_a : η δυσκαμψία των ελατηρίων για οριζόντιο αξονικό φορτίο, K_v : δυσκαμψία ελατηρίων για κατακόρυφο φορτίο, d : το πλάτος της κατασκευής και L : είναι το μήκος κύματος της αρμονική διέγερσης. Στον Πίνακα 2.3 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι σχέσεις υπολογισμού των εντατικών μεγεθών για οριζόντιους κυματισμούς και θεώρηση ελεύθερου πεδίου ή αλληλεπίδρασης.

Πίνακας 2.3: Εντατικά μεγέθη για οριζόντιους κυματισμούς ημιτονοειδούς μορφής

Wave excitation	Free field approach	Soil structure interaction approach
	$M = \frac{E_t I_t}{\rho} = \left(\frac{2\pi}{L} \right)^2 \cos^3 \varphi E_t I_t A \sin \left(\frac{2\pi x}{L / \cos \varphi} \right)$	$\{M, V, P\}_{ss} = \frac{\{M, V, P\}_{ff}}{1 + \frac{E_t I_t}{K_h} \left(\frac{2\pi}{L} \right)^4 \cos^4 \varphi}$
$u_y = \cos \varphi \sin \left(\frac{2\pi x}{L / \cos \varphi} \right) A$	$V = \frac{\partial M}{\partial x} = \left(\frac{2\pi}{L} \right)^3 \cos^4 \varphi E_t I_t A \cos \left(\frac{2\pi x}{L / \cos \varphi} \right)$	
$u_x = \sin \varphi \sin \left(\frac{2\pi x}{L / \cos \varphi} \right) A$	$P = \frac{\partial V}{\partial x} = \left(\frac{2\pi}{L} \right)^4 \cos^5 \varphi E_t I_t A \sin \left(\frac{2\pi x}{L / \cos \varphi} \right)$	$Q_{ss} = \frac{Q_{ff}}{1 + \frac{E_t A_t}{K_a} \left(\frac{2\pi}{L} \right)^2 \cos^2 \varphi}$
	$Q = \left(\frac{2\pi}{L} \right) \sin \varphi \cos \varphi E_t A_t A \cos \left(\frac{2\pi x}{L / \cos \varphi} \right)$	
A : shear wave amplitude, L : shear wave wavelength, φ : angle of incidence, M : bending moment, V : shear force, P : equivalent load density (per unit length), Q : axial force, K_h, K_a : transversal and axial soil moduli		

Άλλη μέθοδος που εντάσσεται στην κατηγορία αυτή είναι η απλοποιημένη στατική ανάλυση, στη διαμήκη έννοια. Όμοια με την εγκάρσια έννοια, τα σεισμικά φορτία εισάγονται

στα ελατήρια με τη μορφή παραμορφώσεων. Απαραίτητα προϋπόθεση για την εφαρμογή της μεθόδου είναι η σωστή τοποθέτηση των ελατηρίων ανάλογα με τα αναμενόμενα μήκη κύματος των σεισμικών κυμάτων.



Εικόνα 2.13: Απλοποιημένη ισοδύναμη στατική ανάλυση, επιβολή σεισμικού φορτίου λαμβάνοντας υπόψη τη χωρική μεταβλητότητα της σεισμικής κίνησης (Πιτιλάκης & Τσινίδης 2012)

Βελτιωμένη εκδοχή της προηγούμενης μεθόδου, αποτελεί η απλοποιημένη δυναμική ανάλυση, με τη διαφορά ότι το σεισμικό φορτίο εισάγεται σαν χρονοϊστορία μετακινήσεων, ώστε να λαμβάνεται υπόψη και η χρονική μεταβλητότητα της σεισμικής κίνησης.

2.5.3.2 Αριθμητικές αναλύσεις

Η πλήρη δυναμική ανάλυση, , κάνοντας χρήση τρισδιάστατων αριθμητικών μοντέλων, δίνει τη δυνατότητα προσομοίωσης σύνθετων συστημάτων. Με αυτή τη μέθοδο, είναι δυνατή η ταυτόχρονη ανάλυση της εγκάρσιας και της διαμήκουσ έννοιας, λαμβάνοντας υπόψη τη μη γραμμική συμπεριφορά του εδάφους και της διεπιφάνειας εδάφους με την κατασκευή.

Παρόλα αυτά, το υψηλό υπολογιστικό κόστος οδηγεί στη χρήση απλοποιημένων αναλύσεων.

2.5.4 ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΓΙΑ ΑΣΤΟΧΙΕΣ ΕΔΑΦΟΥΣ

Οι υπόγειες κατασκευές είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες σε μετακινήσεις που προκύπτουν από εδαφικές αστοχίες που σχετίζονται με ρευστοποίηση, αστοχία πρανών ή ενεργοποίηση ρήγματος.

2.5.4.1 Ρευστοποίηση

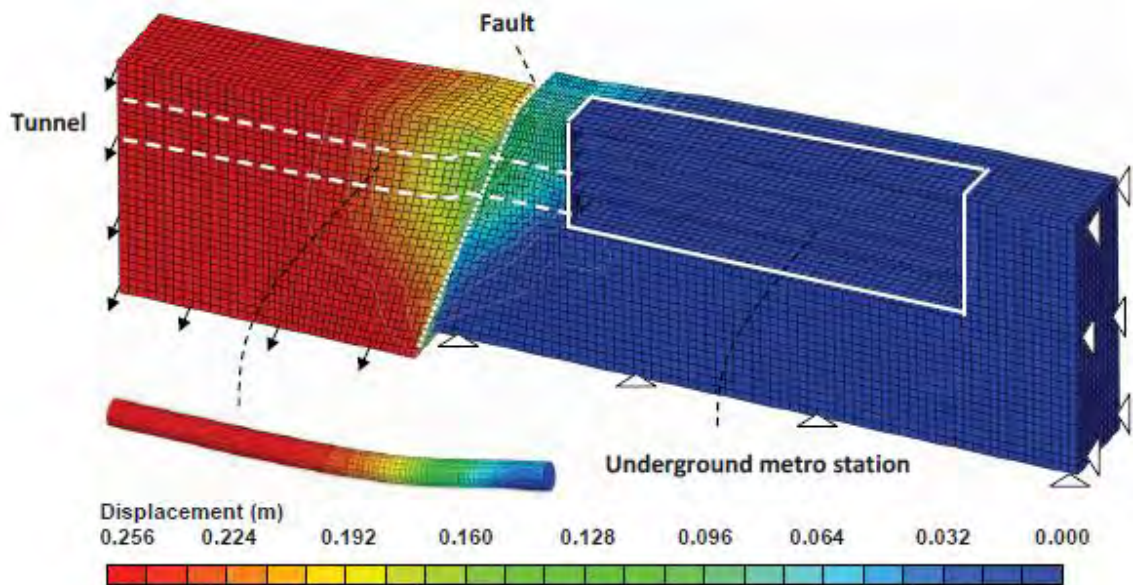
Η ρευστοποίηση μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα, όπως οριζόντιες μετακινήσεις στην εγκάρσια και τη διαμήκη έννοια, αλλά και ζητήματα ανύψωσης λόγω αύξησης της πίεσης των πόρων, κυρίως στη θεμελίωση της σήραγγας.

Για τον περιορισμό εμφάνισης του φαινομένου, τα πιο διαδεδομένα μέτρα που μπορούν να ληφθούν είναι: βελτίωση του εδάφους περιμετρικά της κατασκευής, αύξηση των μόνιμων φορτίων ή και άντληση του υπόγειου νερού.

Συνήθως η ανάλυση των φαινομένων αυτών γίνεται μέσω αριθμητικών αναλύσεων για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς του εδάφους, με χρήση κατάλληλου λογισμικού (π.χ. κώδικας FLAC και OpenSees).

2.5.4.2 Μετακινήσεις από ενεργοποίηση ρηγμάτων

Για την εκτίμηση των μετακινήσεων του εδάφους λόγω ενεργοποίησης ρηγμάτων σε προκαταρκτικές αναλύσεις, εύκαμπτων σήραγγων, χρησιμοποιούνται μεθοδολογίες που αναφέρονται σε υπόγειους αγωγούς. Προτιμότερες είναι οι δισδιάστατες και τρισδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις των συστημάτων εδάφους-σήραγγας. Οι Wells and Coppersmith (1994), προτείνουν εμπειρικές σχέσεις, για τον υπολογισμό των μετακινήσεων των ρηγμάτων, οι οποίες μετέπειτα, μπορούν να εφαρμοστούν στην βάση της κατασκευής στατικά. Παράδειγμα αριθμητικής ανάλυσης με τρισδιάστατο αριθμητικό μοντέλο παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.14.



Εικόνα 2.14: Τρισδιάστατο αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης συστήματος έδαφος-σήραγγα-σταθμός μετρό που συναντά ρήγμα (Pitilakis et al 2013, Tsinidis 2015)

2.5.5 ΣΥΝΔΙΑΣΜΟΣ ΣΤΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ

Στα προκαταρκτικά στάδια της μελέτης, κατά την στατική ανάλυση, και στις δύο διευθύνσεις, η σήραγγα προσομοιώνεται με στοιχεία δοκού, ενώ το έδαφος με γραμμικά ελατήρια, τύπου Winkler.

Ακολουθούν οι συνδυασμοί των φορτίσεων σχεδιασμού, για κάθε σεισμό:

- ΛΣΣ: $U = 1,05 \times (g1 + g2) + 1,3 \times q + (1,05-1,30) \times E1 + E2 + 1,3 \times EQ$
- ΜΣΣ: $U = g1 + g2 + q + E1 + E2 + EQ$

όπου ΛΣΣ: Σεισμός σχεδιασμού λειτουργίας (10% σε 50 χρόνια)

ΜΣΣ: Μέγιστος σεισμός σχεδιασμού (5% σε 50 χρόνια)

$g1, g2$: μόνιμα φορτία

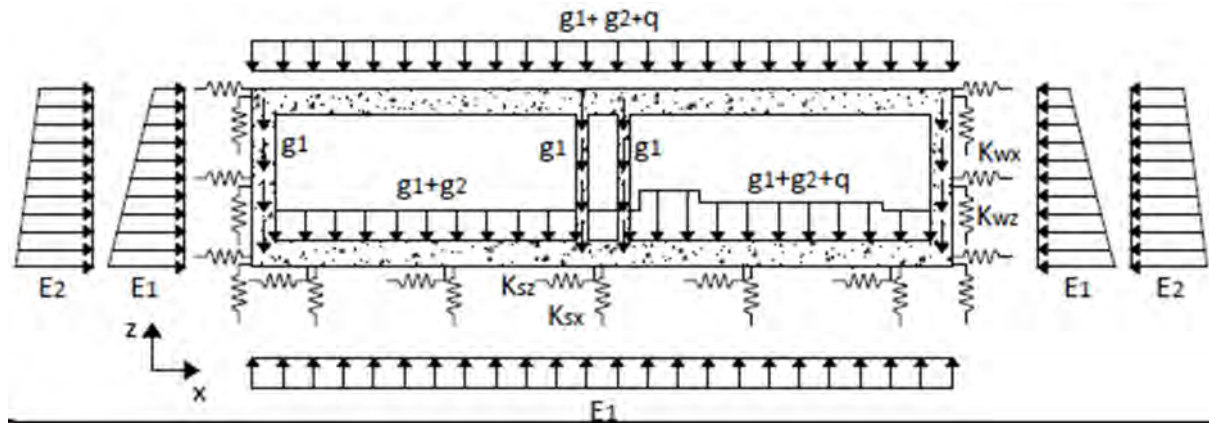
q : κινητά φορτία

$E1$: υδροστατικές πιέσεις και άνωση

$E2$: γεωστατικές πιέσεις στην κατασκευή

EQ : σεισμικά φορτία

(Tsinidis 2015, Πιτιλάκης & Τσινίδης 2012)



Εικόνα 2.15: Συνδυασμοί φορτίσεων σχεδιασμού (Πιτλάκης & Τσινίδης 2012)

Αφού ολοκληρωθούν οι στατικές και οι δυναμικές αναλύσεις, εφαρμόζεται συνδυασμός αυτών για τον τελικό σχεδιασμό.

Για την ίδια περίπτωση, τα αποτελέσματα που προκύπτουν μέσω των διαφορετικών μεθοδολογιών διαφοροποιούνται λίγο έως και αρκετά, γεγονός που οφείλεται στις διαφορετικές παραδοχές που υιοθετούνται σε κάθε περίπτωση. Για το λόγο αυτό, είναι απαραίτητη η βαθμονόμηση τους με πειραματικά αποτελέσματα, όπως θα παρουσιαστεί στα επόμενα κεφάλαια.

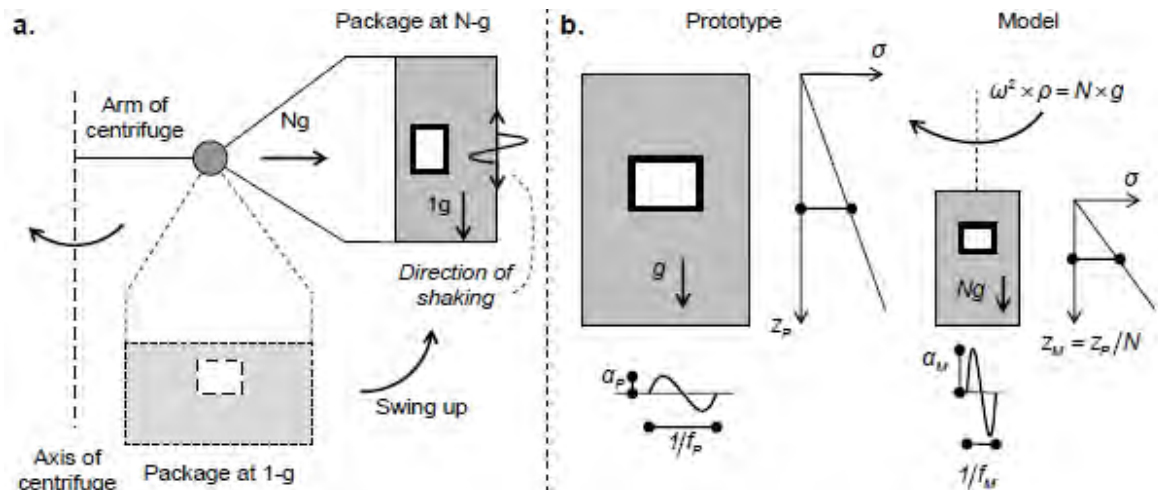
Κεφάλαιο 3 Εξεταζόμενο σύστημα – Αριθμητική προσομοίωση

Διερευνάται η απόκριση των σηράγγων ορθογωνικής διατομής έναντι σεισμικής ταλάντωσης στην εγκάρσια έννοια, μέσω της αριθμητικής προσομοίωσης δυναμικών πειραμάτων σε φυγοκεντριστή, τα οποία διεξήχθησαν σε υπό κλίμακα δοκίμια ορθογωνικών σηράγγων σε άμμο στο ερευνητικό κέντρο IFSTTAR της Γαλλίας. Μέσω της σύγκρισης αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων με τις καταγραφές από τα πειράματα, αναδεικνύονται στοιχεία της συμπεριφοράς των κατασκευών αυτών και διερευνάται η αποτελεσματικότητα των αριθμητικών προσομοιώσεων που χρησιμοποιούνται στην πράξη.

3.1 Περιγραφή πειραματικού προγράμματος

3.1.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΣΕ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΟ ΦΥΓΟΚΕΝΤΡΙΣΤΗ

Στα πλαίσια του προγράμματος DRESBUS II, πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε υπό κλίμακα δοκίμια ορθογωνικών σηράγγων σε άμμο στον γεωτεχνικό φυγοκεντριστή του ερευνητικού κέντρου IFSTTAR, στη Γαλλία. Τα συστήματα υποβλήθηκαν σε φυγόκεντρο επιτάχυνση ίση με 40g, δηλαδή υιοθετήθηκε συντελεστής κλίμακας $N=40$, ενώ οι σεισμικές δονήσεις εισήχθησαν από τη βάση, μέσω κατάλληλα σχεδιασμένης σεισμικής τράπεζας, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.1.



Εικόνα 3.1: α) Σχηματική απεικόνιση λειτουργίας του φυγοκεντριστή, β) Σύγκριση πρωτότυπου μοντέλου με το μοντέλο κλίμακας (Taylor, 1994)

Με σκοπό την καλύτερη κατανόηση των νόμων κλίμακας, θα γίνει μια συνοπτική αναφορά στη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε. Αν η κλίμακα του πραγματικού προβλήματος μειώνεται κατά N φορές, τότε οι σχέσεις υπολογισμού του μήκους, του εμβαδού και του όγκου του μοντέλου είναι:

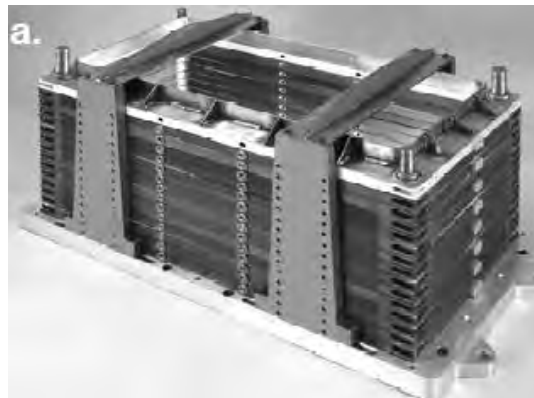
$$L_{Model} = L_{Prototype} / N, \quad A_{Model} = A_{Prototype} / N^2, \quad V_{Model} = V_{Prototype} / N^3 \quad (3.1)$$

Στη συνέχεια, αποσκοπώντας αναλογία των τάσεων μεταξύ του υπό κλίμακα προσομοιώματος και του πρωτότυπου προβλήματος, η επιτάχυνση της βαρύτητας του μοντέλου πρέπει να αυξηθεί κατά N φορές, για αυτό και η φυγόκεντρος επιτάχυνση της συγκεκριμένης περίπτωσης είναι $40g$. Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται οι νόμοι ομοιότητας που ισχύουν για γεωτεχνικές δοκιμές σε φυγοκεντριστή, όπου L είναι το μήκος, T ο χρόνος, M η μάζα και N ο συντελεστής κλίμακας. Ο κυριότερος λόγος που επιλέγεται η μείωση της κλίμακας είναι το πολύ υψηλό κόστος ή και η αδυναμία πραγματοποίησης τέτοιων πειραμάτων σε πραγματική κλίμακα.

Πίνακας 3.1: Νόμοι ομοιότητας για δοκιμές σε φυγοκεντριστή

Parameter	Dimensions (*)	Model/Prototype
Length	L	1/N
Mass	M	1/N ³
Stress	ML ⁻¹ T ⁻²	1
Strain	1	1
Force	MLT ⁻²	1/N ²
Time (dynamic loading)	T	1/N
Frequency	1/T	N
Acceleration	LT ⁻²	N
Velocity	LT ⁻¹	1
Displacement	L	1/N

Για την κατασκευή των προσομοιωμάτων σήραγγας-έδαφος χρησιμοποιήθηκε ένα ειδικό κιβώτιο, τύπου equivalent shear beam (Εικόνα 3.2), με εσωτερικές διαστάσεις 800mm μήκος, 340mm πλάτος και 400mm βάθος. Το κιβώτιο, είναι ειδικά κατασκευασμένο ώστε να ελαχιστοποιούνται οι παράπλευρες επιδράσεις των ορίων, λόγω της πιθανής αλληλεπίδρασης εδάφους – κιβωτίου, στην σεισμική συμπεριφορά του περιεχόμενου συστήματος.



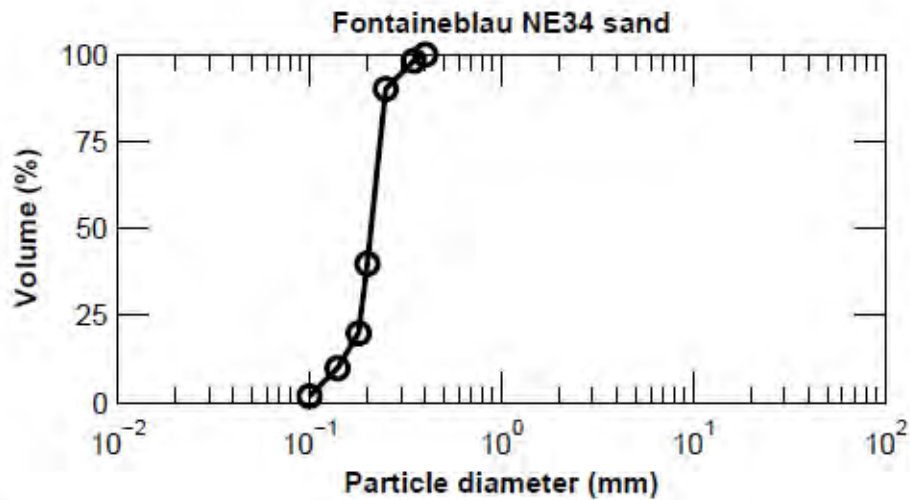
Εικόνα 3.2: Ειδικό κιβώτιο τύπου equivalent shear beam (Tsinidis 2015)

3.1.2 ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΔΑΦΟΣ-ΣΗΡΑΓΓΑ

Τα εδαφικά προσομοιώματα κατασκευάστηκαν με στεγνή άμμο τύπου Fontainbleau NE34 με σχετική πυκνότητα 70%. Η κοκκομετρική καμπύλη της άμμου φαίνεται στην Εικόνα 3.2 και τα μηχανικά της χαρακτηριστικά στον Πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2: Μηχανικά χαρακτηριστικά της άμμου Fontainebleau NE34 (Tsinidis et al. 2016)

	ρ_s (g/cm ³)	e_{max}	e_{min}	d_{50} (mm)	ϕ_{crit} (°)
Fontainebleau NE 34 sand	2.64	0.860	0.550	0.200	33



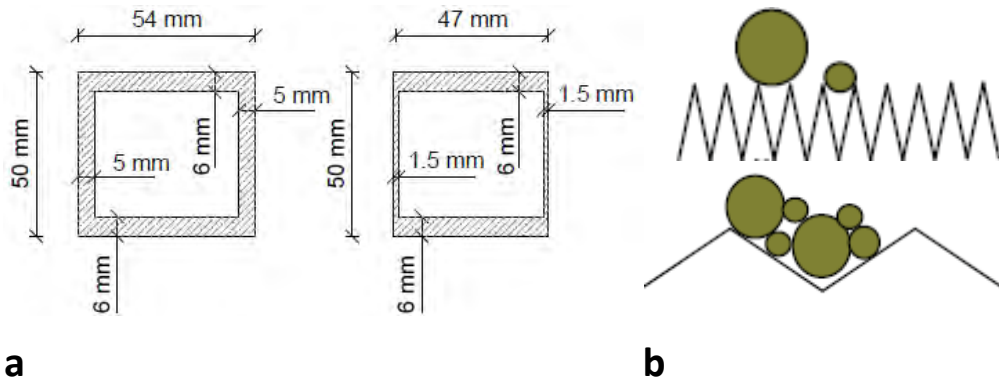
Εικόνα 3.3: Κοκκομετρική καμπύλη της άμμου Fontainebleau NE34 (Tsinidis et al. 2016)

Για την κατασκευή των μοντέλων των σιράγγων, έγινε χρήση Α αλουμινίου 2017, του οποίου τα χαρακτηριστικά παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 3.3.

Πίνακας 3.3: Μηχανικά χαρακτηριστικά του αλουμινίου Α 2017 (Tsinidis et al. 2016)

	Unit weight, γ (kN/m ³)	Elastic modulus, E (GPa)	Poisson ratio, ν	Yield strength, f_y (MPa)
Tunnel models	2.7	71.00	0.33	400.00

Για την αναπαράσταση εύκαμπτων και δύσκαμπτων σιράγγων, επιλέχθηκαν οι κατάλληλες διαστάσεις, έτσι ώστε να επιτευχθούν οι επιθυμητοί συντελεστές σχετικής δυσκαμψίας F . Παρόμοια διαδικασία ακολουθήθηκε και για τα χαρακτηριστικά των εξωτερικών διεπιφανειών των μοντέλων. Ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων της άμμου, χαράχθηκαν εσοχές για την προσομοίωσης αδρής επιφάνειας.

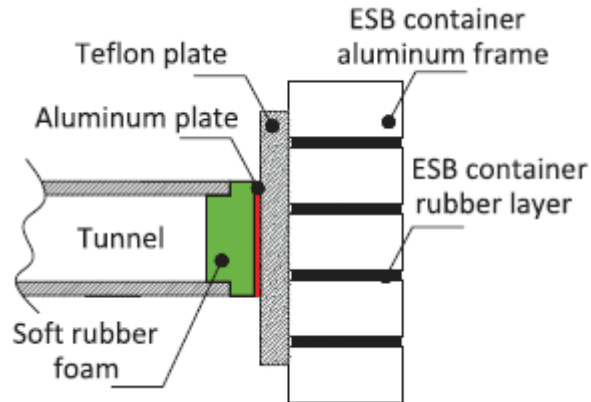


Εικόνα 3.4: α) Διαστάσεις μοντέλων σηράγγων, β) Μέγεθος εσοχών ανάλογα με την κοκκομετρία της άμμου (Tsinidis 2015)

3.1.3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ

Η διάστρωση της άμμου μέσα στο κιβώτιο έγινε με αυτοματοποιημένο τρόπο, μέσω κατάλληλης διάταξης. Η διάταξη απελευθέρωνε την άμμο στο εσωτερικό του κουτιού, με τη μορφή κουρτίνας, με συγκεκριμένη ταχύτητα και από συγκεκριμένο ύψος, ώστε να προκύψει η απαιτούμενη σχετική πυκνότητα ($D_r=70\%$). Τα προσομοιώματα των σηράγγων και ο εξοπλισμός καταγραφής τοποθετήθηκαν στις κατάλληλες θέσεις κατά τη διαδικασία διάστρωσης της άμμου.

Για την εξασφάλιση της συμπεριφοράς επίπεδης παραμόρφωσης, στις θέσεις επαφής των μοντέλων των σηράγγων με το κιβώτιο ESB, τοποθετήθηκαν πλάκες από Teflon. Όπως φαίνεται και στη διάταξη της Εικόνας 3.4, στο τέλος της σήραγγας τοποθετείται μαλακό αφρώδες υλικό, που επιτρέπει την ελεύθερη παραμόρφωση κατά το σεισμό, ενώ ανάμεσα στο Teflon και το μαλακό υλικό υπάρχει μια λεπτή πλάκα αλουμινίου που αποσκοπεί τη μείωση των διατμητικών τάσεων μεταξύ των δύο υλικών (Tsinidis 2015, Tsinidis et al. 2015, Tsinidis et al. 2016).

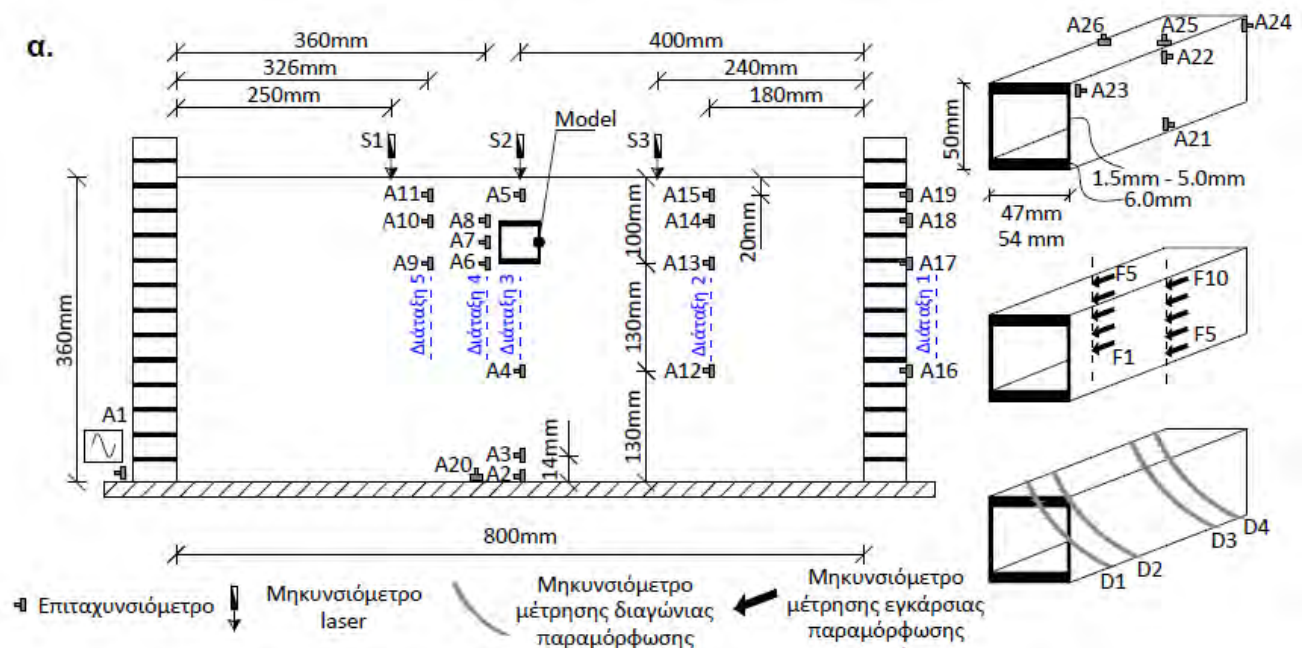


Εικόνα 3.5: Λεπτομέρεια στήριξης προσομοιωμάτων σηράγγων στις θέσεις επαφής τους με το κιβώτιο ESB (Tsinidis et al. 2015)

3.1.4 ΕΝΟΡΓΑΝΩΣΗ

Ένα ιδιαίτερα πυκνό σύστημα οργάνων καταγραφής χρησιμοποιήθηκε για την καταγραφή της συμπεριφοράς του συστήματος έδαφος – σήραγγα. Αρχικά, ομάδες πιεζοηλεκτρικών επιταχυνσιομέτρων τοποθετήθηκαν, τόσο στο εσωτερικό του εδάφους, όσο και πάνω στη σήραγγα και το κιβώτιο ESB. Για την καταγραφή των επιφανειακών καθιζήσεων της εδαφικής στρώσης της άμμου, έγινε χρήση ειδικών αισθητήρων μετακινήσεων. Οι προηγούμενες διατάξεις παρουσιάζονται αναλυτικότερα στην Εικόνα 3.6.

Στα εσωτερικά τοιχώματα των σηράγγων τοποθετήθηκε μία συσκευή μέτρησης των οριζόντιων παραμορφώσεων που έχει τη μορφή «πιρουνιού» (Εικόνα 3.7). Η συσκευή αυτή αποτελείται από δύο ομάδες των 5 μηχανομετρών, που επιτρέπουν την καταγραφή των σχετικών μετακινήσεων των τοιχομάτων σε σχέση με τη βάση της σήραγγας. Έπειτα, για την καταγραφή των εγκάρσιων και διαγώνιων παραμορφώσεων των τοιχομάτων, χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλες διατάξεις μηχανομετρών τύπου strain gauge (Tsinidis 2015, Tsinidis et al. 2015, Tsinidis et al. 2016).



Εικόνα 3.6: Ενοργάνωση πειραμάτων (Tsinidis 2015)



Εικόνα 3.7: Συσκευή καταγραφής οριζόντιων παραμορφώσεων εσωτερικών τοιχομάτων (Tsinidis et al. 2015)

3.1.5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Από το συνδυασμό της σχετικής δυσκαμψίας και της κατάστασης της εξωτερικής διεπιφάνειας, προέκυψαν συνολικά τέσσερις δοκιμές, οι οποίες φαίνονται αναλυτικά στον Πίνακα 3.4.

Πίνακας 3.4: Πειραματικό πρόγραμμα (Tsinidis 2015)

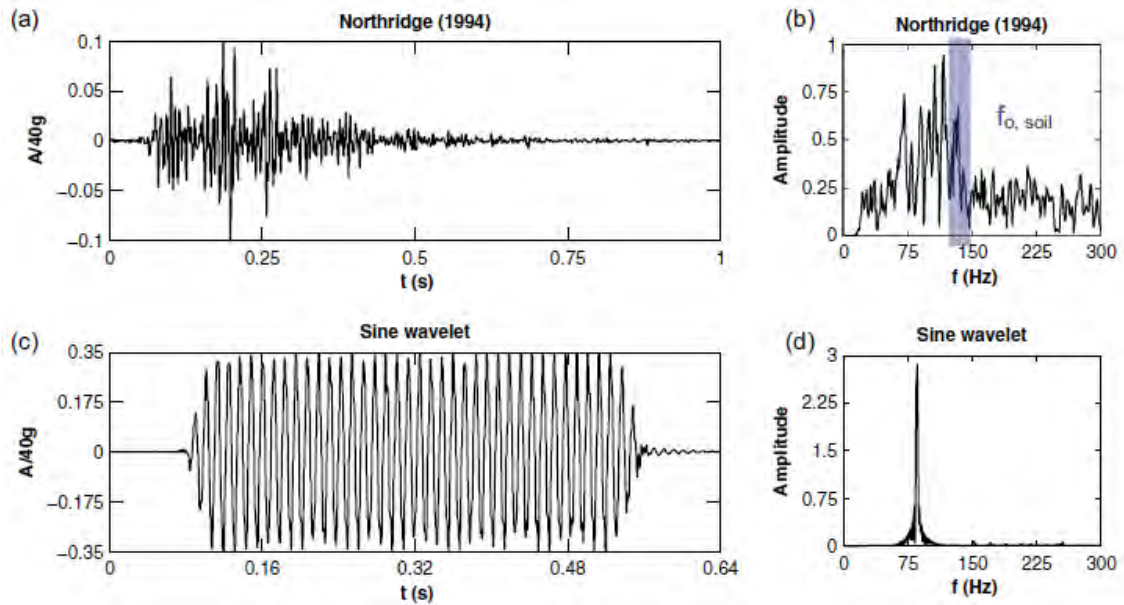
Περίπτωση	Δυσκαμψία σήραγγας	Σχετική πυκνότητα άμμου, D_r (%)	Εξωτερική επιφάνεια σήραγγας
Τεστ 1	Εύκαμπτη	70	Αδρή
Τεστ 2	Εύκαμπτη		Λεία
Τεστ 3	Δύσκαμπτη		Αδρή
Τεστ 4	Δύσκαμπτη		Λεία

Η βάση κάθε διάταξης υποβλήθηκε σε μια σειρά τεσσάρων διεγέρσεων, μέσω κατάλληλης σεισμικής τράπεζας. Οι τρεις κάνουν χρήση της καταγραφής από το σεισμό του Northridge (1994), ανηγμένη σε 0,1g, 0,2g και 0,3g, ενώ η τέταρτη ακολουθεί μια ημιτονοειδή φόρτιση συχνότητας 85 Hz και πλάτους 0,3g. Συγκεντρωτικά τα χαρακτηριστικά των προηγούμενων διεγέρσεων παρουσιάζονται τόσο στον Πίνακα 3.5, όσο και στην Εικόνα 3.8.

Πίνακας 3.5: Χαρακτηριστικά επιβαλλόμενων διεγέρσεων

	Καταγραφές εισόδου	Ανηγμένο πλάτος (g)
EQ1	Καταγραφή του σεισμού Northbridge	4 [0.10]
EQ2		8 [0.20]
EQ3		12 [0.30]
EQ4	Ημιτονοειδή φόρτιση (85Hz)	12 [0.30]

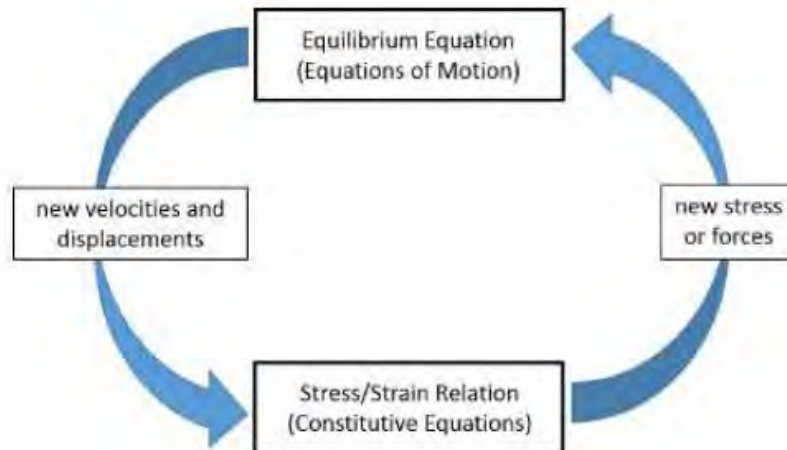
Έπειτα από μερικούς δοκιμαστικούς κύκλους του φυγοκεντριστή, πραγματοποιήθηκε μια δοκιμή CPT, στο «ελεύθερο πεδίο», δηλαδή μακριά από τη σήραγγα. Μετά την απομάκρυνση της συσκευής CPT, ξεκίνησε η εφαρμογή των σεισμικών διεγέρσεων σε σειρά.



Εικόνα 3.8: a) Χρονοϊστορία του σεισμού στο Northridge ανοιγμένη σε $0,1g$, b) Ανάλυση Fourier του σεισμού στο Northridge, c) Χρονοϊστορία ημιτονοειδούς φόρτισης, d) Ανάλυση Fourier της ημιτονοειδούς φόρτισης (Tsinidis 2015)

3.2 Επισκόπηση του κώδικα πεπερασμένων διαφορών FLAC2D

Το FLAC2D (Fast Lagrangian Analysis of Continua) είναι ένας κώδικας πεπερασμένων διαφορών, που αναπτύχθηκε πρώτη φορά το 1986, για την ανάλυση προβλημάτων γεωτεχνικής μηχανικής σε δύο διαστάσεις. Ο κώδικας αυτός, βασίζεται σε ένα σχήμα υπολογισμού «Lagrangian», το οποίο είναι κατάλληλο για την προσομοίωση προβλημάτων μεγάλων παραμορφώσεων και προσφέρει στο χρήστη ένα ευρύ φάσμα δυνατοτήτων για την επίλυση σύνθετων προβλημάτων. Για την επίλυση του συστήματος γραμμικών εξισώσεων που προκύπτει από κάθε πρόβλημα χρησιμοποιείται ρητός αλγόριθμος επίλυσης (explicit). Ανεξάρτητα από το αν πρόκειται για στατική ή για δυναμική ανάλυση, η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος περιλαμβάνει την επίλυση εξισώσεων κίνησης ή εξισώσεων δυναμικής ισορροπίας. Η γενική ακολουθία ανάλυσης απεικονίζεται στην Εικόνα 3.9.



Εικόνα 3.9: Γενική ακολουθία ανάλυσης που ενσωματώνεται στο FLAC2D (Τσινίδης, 2022, “Soil Models-FLAC”, 2018)

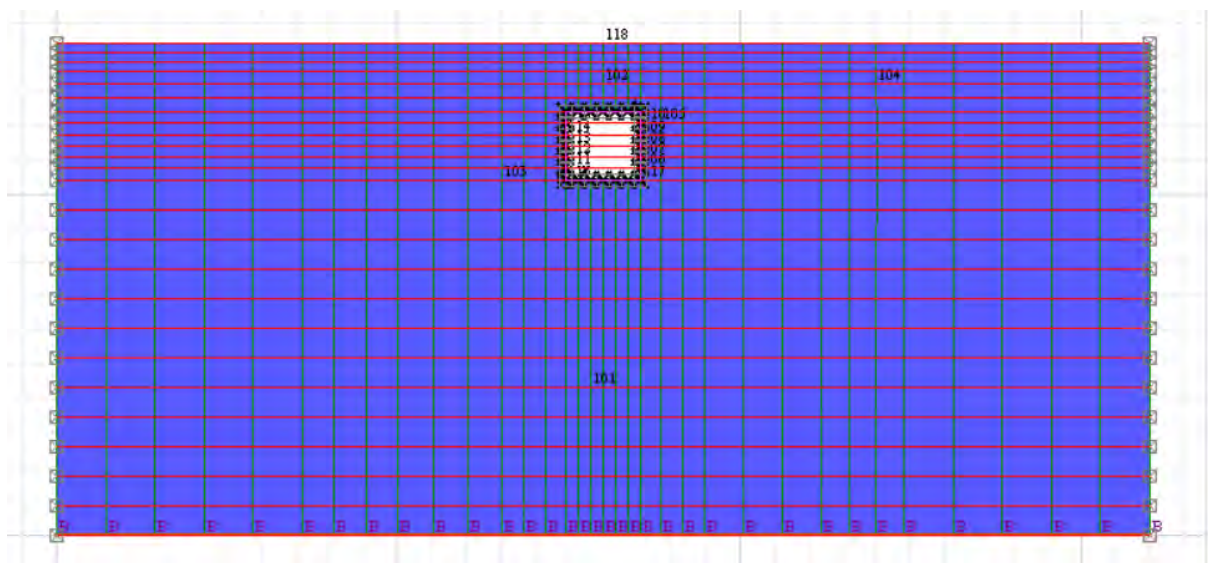
Αναλυτικότερα, αρχικά συντάσσονται οι εξισώσεις κίνησης του προβλήματος και έπειτα επιλύεται το σύστημα εξισώσεων που οδηγεί στον υπολογισμό των ταχυτήτων και των μετακινήσεων. Ακολουθεί ο υπολογισμός των ρυθμών παραμόρφωσης, με βάση τις μεταβολές των μετακινήσεων, και τελικά προκύπτουν οι νέες τάσεις ή δυνάμεις. Αξίζει να σημειωθεί, πως όλες οι τιμές των μεταβλητών του πλέγματος πεπερασμένων διαφορών παραμένουν σταθερές σε κάθε βήμα της ανάλυσης. Βασικό χαρακτηριστικό των ρητών αλγορίθμων είναι, ότι επιλέγεται ελάχιστο χρονικό βήμα ώστε να μην επηρεάζεται η υπολογιζόμενη απόκριση. Η γλώσσα προγραμματισμού που χρησιμοποιείται από το FLAC ονομάζεται FISH και με βάση αυτή έγινε η προσομοίωση του εξεταζόμενου προβλήματος.

3.3 Παραδοχές ανάλυσης και διαδικασία προσομοίωσης

Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για αντιπροσωπευτικές περιπτώσεις δοκιμών, που περιλάμβαναν μία εύκαμπτη σήραγγα (περίπτωση T1) και μια δύσκαμπτη σήραγγα (περίπτωση T3), για όλες τις σεισμικές δονήσεις από EQ1 έως EQ4. Για το σύστημα έδαφος-σήραγγα χρησιμοποιούνται διδιάστατα προσομοιώματα, καθώς λαμβάνεται υπόψη η παραδοχή της επίπεδης παραμόρφωσης, δεδομένου ότι το μήκος του κιβωτίου είναι αρκετά μεγαλύτερο από τις άλλες δύο διαστάσεις. Συνεπώς, για τις αναλύσεις, το πάχος στη διαμήκη

διεύθυνση θεωρείται ίσο με ένα μέτρο. Και στις δύο περιπτώσεις επιλέχθηκε η αδρή εξωτερική επιφάνεια, καθώς αυτή προσεγγίζει καλύτερα το πραγματικό πρόβλημα. Σε όλα τα στάδια ανάλυσης, χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb (ελαστικό-τέλεια πλαστικό μοντέλο) για την περιγραφή της συμπεριφοράς της άμμου σε σεισμική ταλάντωση. Στη δυναμική ανάλυση προστέθηκε απόσβεση Rayleigh, για την καλύτερη προσομοίωση των πραγματικών συνθηκών. Στη συνέχεια, τα αριθμητικά αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα καταγεγραμμένα αποτελέσματα των πειραμάτων.

Όλες οι αναλύσεις πραγματοποιούνται στις πραγματικές διαστάσεις. Στην Εικόνα 3.10 παρουσιάζεται το τυπικό αριθμητικό προσομοίωμα των πειραμάτων στο FLAC2D.



Εικόνα 3.10: Τυπικό αριθμητικό προσομοίωμα των πειραμάτων στο FLAC2D

Συγκεκριμένα, οι διαστάσεις του πρωτότυπου μοντέλου έχουν πολλαπλασιαστεί με τον συντελεστή κλίμακας $N=40$. Το έδαφος προσομοιώθηκε με στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης, ενώ η σήραγγα προσομοιώθηκε με στοιχεία δοκού. Για την προσομοίωση της διεπιφάνειας σήραγγας-εδάφους χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία διεπιφάνειας που ακολουθούν τον νόμο Coulomb. Ο συντελεστής τριβής που θεωρήθηκε τέθηκε ίσος με 0.7.

Για την κατασκευή του προσομοιώματος απαιτείται και προσοχή στην προσομοίωση των οριακών συνθηκών, ώστε να αναπαραχθούν πιστά οι πραγματικές συνθήκες των πειραμάτων. Συγκεκριμένα, τα όρια είναι περιορισμένα, λόγω του κιβωτίου ESB, και επηρεάζουν τη συμπεριφορά του εδάφους και της σήραγγας σε σχέση με αυτή που θα

προκύψει από θεώρηση συνθηκών ελεύθερου πεδίου (free field). Εξαιτίας των ορίων του κιβωτίου, εμφανίζονται ανακλάσεις των σεισμικών κυμάτων, οι οποίες επηρεάζουν την κατανομή των τάσεων και των παραμορφώσεων. Η παρουσία των ανακλάσεων καθιστά πιο περίπλοκη την προσομοίωση σε σύγκριση με την περίπτωση συνθηκών ελεύθερου πεδίου, όπου τα κύματα μπορούν και διαδίδονται ελεύθερα χωρίς να επηρεάζονται από τα όρια. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, η βάση του προσομοιώματος θεωρήθηκε άκαμπτη, και τα πλευρικά όρια δεσμευτήκαν (με αβαρείς ατενείς ράβδους), ώστε να κινούνται συγχρονισμένα, προσομοιώνοντας απλοποιημένα την συμπεριφορά του κιβωτίου ESB κατά τη σεισμική διέγερση.

3.3.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΑΝΑΒΟΥ

Για την επίτευξη ακρίβειας στην προσομοίωση, δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στη διακριτοποίηση του προσομοιώματος του εδάφους. Η διακριτοποίηση έγινε με πυκνότερο πλέγμα στην περιοχή γύρω από τη σήραγγα, επιτρέποντας την καλύτερη αποτύπωση των τοπικών φαινομένων και την ακριβέστερη καταγραφή των αποτελεσμάτων στη ζώνη αυτή. Σε περιοχές μακριά από τη σήραγγα, χρησιμοποιήθηκε πιο αραιή διακριτοποίηση για να μειωθεί ο υπολογιστικός φόρτος.

Ένα επιπλέον ζήτημα που προκύπτει είναι ότι, το μέγεθος του κανάβου που επιλέγεται, καθορίζει ουσιαστικά και τη μέγιστη συχνότητα κύματος που μπορεί να διαδοθεί στο προσομοίωμα. Συγκεκριμένα, για τα έργα Πολιτικού Μηχανικού η μέγιστη συχνότητα ενδιαφέροντος είναι τα 10Hz. Η σχέση (3.2) προσδιορίζει το μέγιστο μήκος που πρέπει να έχει ένα επιφανειακό φορτίο ώστε να αναπαραχθεί σωστά η απαιτούμενη συχνότητα (Kuhlemeyer and Lysmer, 1973):

$$L_{max} = \frac{L_u}{10} = \frac{V_s \times T_u}{10} \quad (3.2)$$

όπου V_s : η ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων για την εδαφική στρώση, T_u : η περίοδος που αναφέρεται στη μέγιστη συχνότητα και L_u : το μήκος κύματος που αντιστοιχεί στη μέγιστη συχνότητα. Για τη διάδοση του επιθυμητού μήκους κύματος, απαιτούνται τουλάχιστον 10

ζώνες, όπως δηλώνει ο παρονομαστής 10. Για την άμμο Fontaineblau NE34 και για μία μέση ταχύτητα διατμητικών κυμάτων 220 m/s το μέγιστο μήκος της επιφανειακής ζώνης υπολογίζεται στα 2.2m.

3.3.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΟΥ

Για πολύ μικρές παραμορφώσεις το έδαφος μπορεί να θεωρηθεί ότι συμπεριφέρεται ελαστικά. Όταν ξεπεραστεί αυτό το όριο παραμορφώσεων, της τάξης του 10^{-5} , αρχίζει η μη γραμμική συμπεριφορά και για μεγαλύτερες παραμορφώσεις εμφανίζονται πλαστικοποιήσεις. Η πιο συνήθης περιγραφή της μη γραμμικής συμπεριφοράς του εδάφους γίνεται μέσω των καμπυλών G-γ-D, που παρουσιάζουν τη μείωση της δυσκαμψίας του εδάφους και την αύξηση της απόσβεσης του εδάφους με την αύξηση της διατμητικής παραμόρφωσης του εδάφους.

Για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του εδάφους χρησιμοποιήθηκε καταστατικό προσομοίωμα με κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb. Η γωνία τριβής της άμμου τέθηκε ίση με 33° , ενώ τέθηκε συνοχή $c = 1$ kPa για να αποφευχθούν αριθμητικά προβλήματα κατά την επίλυση. Το κριτήριο αστοχίας συνδυάστηκε με κατάλληλα επιλεγμένες καμπύλες G-γ-D για να περιγραφεί η πτώση της δυσκαμψίας της άμμου με την αύξηση της διατμητικής παραμόρφωσης του εδάφους. Τέλος, τέθηκε πρόσθετη απόσβεση στο σύστημα με τη μορφή Rayleigh, ώστε να εξασφαλιστεί η προσομοίωση της απόσβεσης σε μικρές παραμορφώσεις του εδάφους.

Ακολουθώντας τη μεθοδολογία που προτάθηκε από τους Hardin and Drenvich (1972), για κοκκώδεις άμμους, ο υπολογισμός του μέγιστου μέτρου διάτμησης, για μικρές παραμορφώσεις, G_{max} , εξαρτάται από τη μέση τάση σ_m και υπολογίζεται με βάση τη σχέση (3.3) :

$$G_{max} = 3230 \frac{(2.973 - e)^2}{(1 + e)} OCR^k (\sigma'_m)^{1/2} \quad (3.3)$$

όπου e : είναι ο λόγος κενών, OCR: ο λόγος υπερστερεοποίησης, σ_m : η μέση τάση, k : σταθερά υπερστερεοποίησης. Η μέση τάση υπολογίζεται από τη σχέση (3.4):

$$\sigma_c = \frac{(1 + 2K_0)\gamma_d z}{3} \quad (3.4)$$

όπου z : είναι το βάθος, γ_d : το ειδικό βάρος της ξηρής άμμου και K_0 : ένας συντελεστής που εξαρτάται από τη σχετική πυκνότητα της άμμου D_r (εδώ $D_r=70\%$) και προσδιορίζεται με τη σχέση (3.5):

$$K_0 = -\frac{1}{2.9}D_r + 0.63 \quad (3.5)$$

Τα διαγράμματα που προκύπτουν για την εξεταζόμενη άμμο παρουσιάζονται με τη σειρά παρακάτω στις Εικόνες 3.11 έως 3.13:



Εικόνα 3.11: Κατανομή της μέση ενεργής τάσης σ_m (kPa) με το βάθος z (m) για την άμμο Fontainebleau NE34



Εικόνα 3.12: Κατανομή του Αρχικού Μέτρου Διάτμησης G_{max} (kPa) με το βάθος z (m)



Εικόνα 3.13: Κατανομή της αρχικής ταχύτητας διατμητικών κυμάτων V_{s0} (kPa) με το βάθος z (m)

Οι Harding and Drenvich (1972) και Ishibashi and Zhang (1993) πρότειναν σχέσεις για τη συσχέτιση της απομείωσης του μέτρου διάτμησης με την αύξηση της διατμητικής παραμόρφωσης, καθώς και συσχετίσεις του λόγου απόσβεσης D με το λόγο $G/G_{\max}$.

$$D = f\left(\frac{G}{G_{\max}}\right) \quad (3.6)$$

Συγκεκριμένα, οι Ishibashi and Zhang (1993) πρότειναν σχέσεις για την απομείωση του μέτρου διάτμησης με την αύξηση της διατμητικής παραμόρφωσης ως ακολούθως:

$$\frac{G}{G_{\max}} = K(\gamma) \sigma_c^{m(\gamma) - m_0} \quad (3.7)$$

όπου $K(\gamma)$ και $m(\gamma)-m_0$ υπολογίζονται αντίστοιχα από τις σχέσεις (3.8) και (3.9):

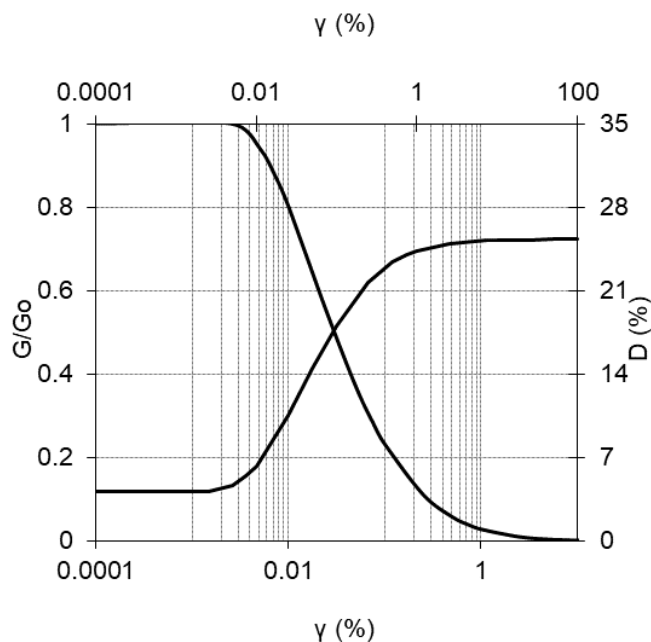
$$K(\gamma) = 0.5 \left[1 + \tan h \left\{ \ln \left(\frac{0.000102}{\gamma} \right)^{0.613} \right\} \right] \quad (3.8)$$

$$m(\gamma) - m_0 = 0.34 \left[1 - \tan h \left\{ \ln \left(\frac{0.000556}{\gamma} \right)^{0.4} \right\} \right] \quad (3.9)$$

με γ : διατμητική παραμόρφωση. Οι Li et al. (2013) πραγματοποιώντας πειράματα στο γεωτεχνικό φυγοκεντριστή του ερευνητικού κέντρου IFSTTAR, σε άμμο τύπου Fontaineblau NE34, σχετικής πυκνότητας $D_r=80\%$, προσδιόρισαν την απόσβεση σύμφωνα με τη σχέση (3.10):

$$D = 25.3 \left\{ 0.513 \left(\frac{G}{G_{\max}} \right)^2 - 1.351 \left(\frac{G}{G_{\max}} \right) + 1 \right\} \quad (3.10)$$

Υιοθετώντας την παραπάνω μεθοδολογία, με την αρκετά καλή προσέγγιση της σχετικής πυκνότητας (80% αντί για 70%), και για μία μέση τάση $\sigma_m=28,1$ kPa στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας, δηλαδή στα 2,5m, προκύπτει η ακόλουθη καμπύλη G- γ -D που παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.14:



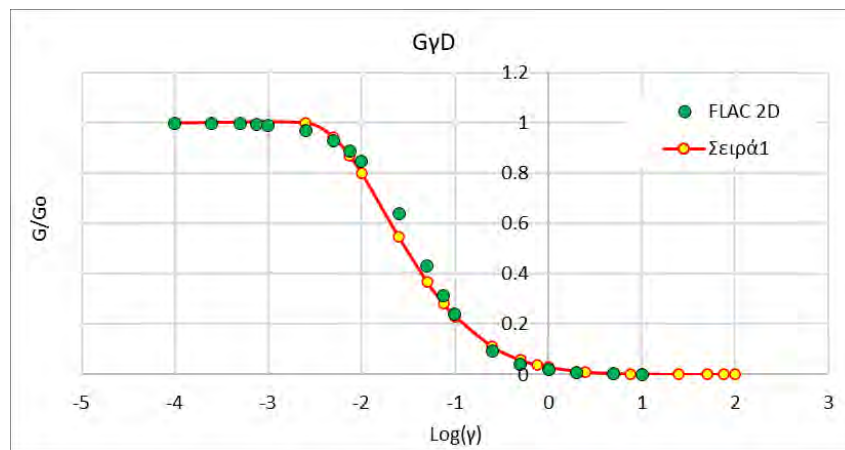
Εικόνα 3.14: Καμπύλη G- γ -D για την άμμο Fontaineblau NE34 με $D_r=70\%$ βαθμονομημένη για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας

Η εισαγωγή της καμπύλης αυτής στο FLAC2D γίνεται μέσω ενσωματωμένων συναρτήσεων του κώδικα. Σύμφωνα με το εγχειρίδιο θεωρίας και χρήσης του FLAC2D υπάρχουν 4 διαφορετικά μοντέλα που μπορούν να εφαρμοστούν, τα οποία είναι τα εξής:

default model, sig 3, sig 4 και hardin. Καλύτερη προσαρμογή της καμπύλης στην πραγματική επιτεύχθηκε με το μοντέλο sig 3, το οποίο και επιλέχθηκε τελικά. Η βαθμονόμηση στη σχέση (3.11) γίνεται προσαρμόζοντας κατάλληλα τους συντελεστές a, b, x_0 .

$$M_s = \frac{a}{1 + \exp(-(L - x_0)/b)} \quad (3.11)$$

Η βέλτιστη προσαρμογή της καμπύλης G-γ-D παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.15 με $b=-0,35$ και $x_0=-1,4$:

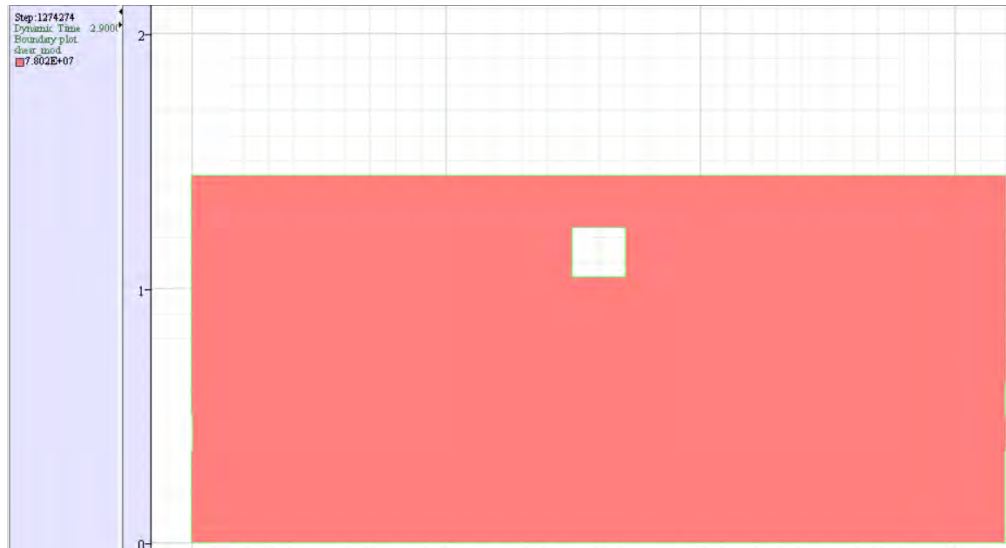


Εικόνα 3.15: Βαθμονόμηση της καμπύλης G-γ-D για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας με το μοντέλο sig3

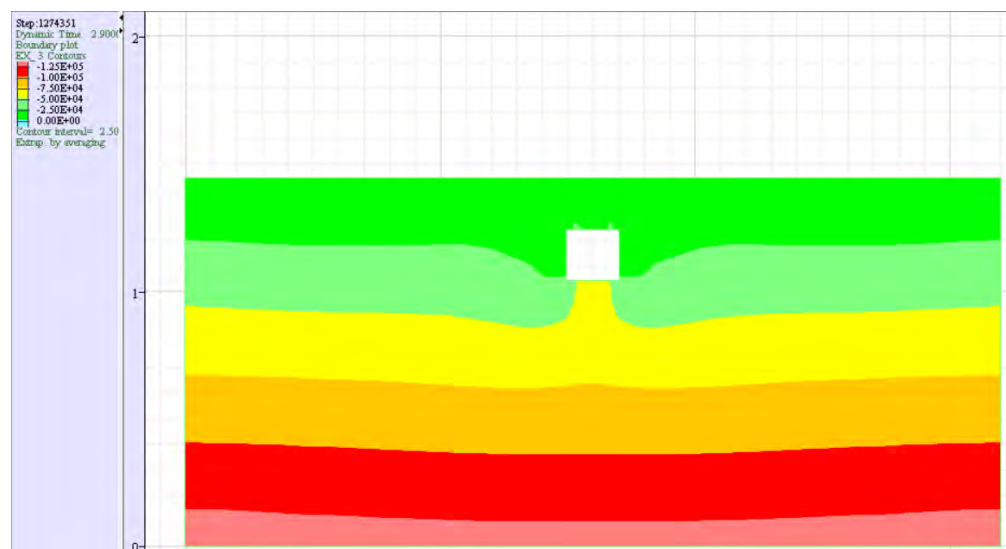
Αρχικά, οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν θεωρώντας σταθερή τιμή του αρχικού μέτρου διάτμησης (μέτρο σε μικρές παραμορφώσεις), σε όλο το εδαφικό προφίλ που εξετάζεται, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.15. Το αρχικό μέτρο διάτμησης G_{max} συνδέεται με την ταχύτητα διατμητικών κυμάτων σε μικρές παραμορφώσεις (V_{s0}) μέσω της ακόλουθης εξίσωσης:

$$G_{max} = \rho \cdot V_s^2 \quad (3.12)$$

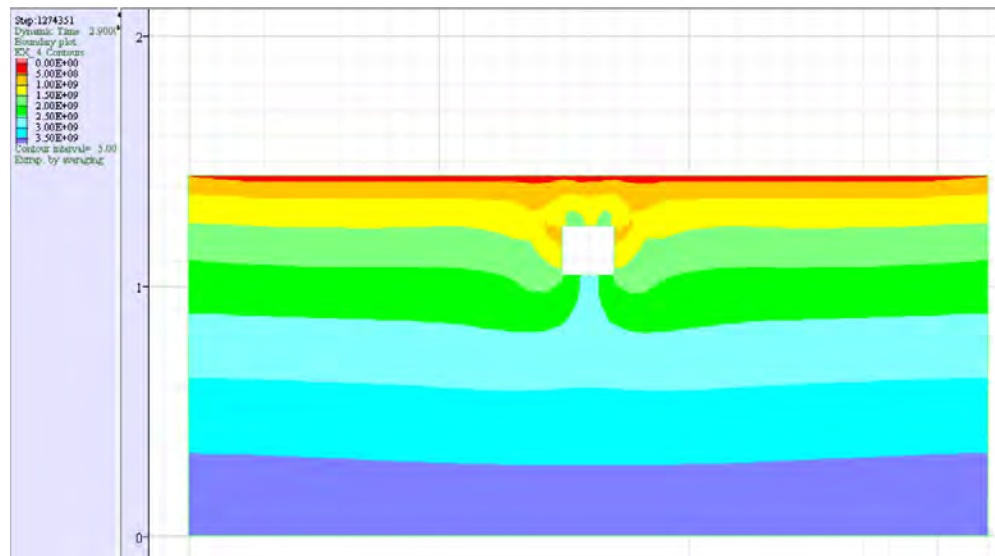
όπου ρ : η πυκνότητα του εδάφους. Η τιμή του G_{max} υπολογίστηκε για μία μέση τιμή της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων περίπου $V_{s0} = 220$ m/s

Εικόνα 3.16: Διάγραμμα σταθερού αρχικού μέτρου διάτμησης $G_{\max}$

Ωστόσο, επειδή αυτή η προσέγγιση δεν αντιπροσωπεύει επαρκώς την πραγματικότητα, εφαρμόστηκε κατανομή του αρχικού μέτρου διάτμησης, η οποία συναρτάται με τη μέση τάση (Σχέση 3.3). Η κατανομή της μέσης τάσης παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.17, ενώ του αρχικού μέτρου ελαστικότητας (E_0) παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.18. Η εισαγωγή στις αναλύσεις του, συναρτώμενου με τη μέση τάση, αρχικού μέτρου διάτμησης, έγινε μέσω κώδικα που συντάχθηκε στη γλώσσα προγραμματισμού FISH του κώδικα FLAC2D.



Εικόνα 3.17: Κατανομή μέσης τάσης με το βάθος



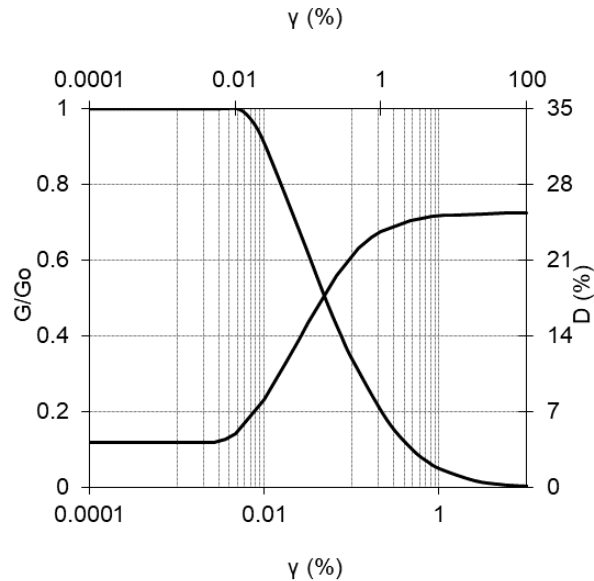
Εικόνα 3.18: Κατανομή μέτρου ελαστικότητας της άμμου σε μικρές παραμορφώσεις με το βάθος

Σημειώνεται ότι το μέτρο ελαστικότητας με το μέτρο διάτμησης συνδέονται μέσω της σχέσης:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (3.13)$$

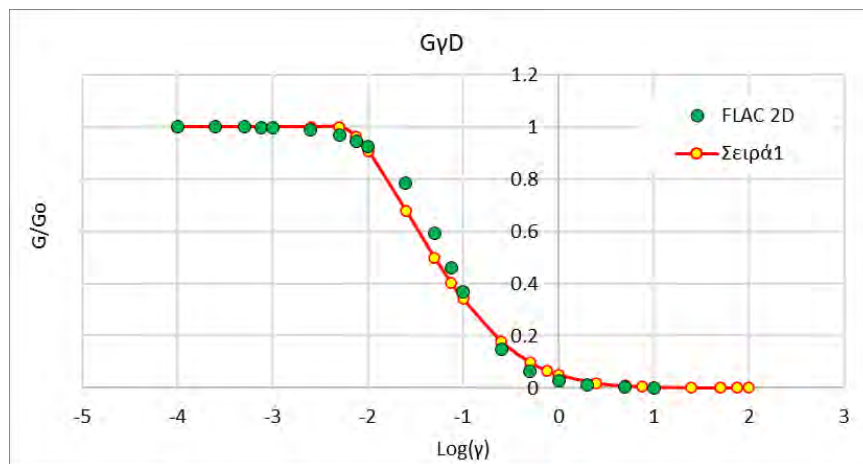
Όπως παρατηρείται στην Εικόνα 3.17 η τιμή του μέτρου ελαστικότητας και κατά συνέπεια του μέτρου διάτμησης, μειώνεται γύρω από τα τοιχώματα της σήραγγας. Αυτή η μείωση οφείλεται στην απομείωση της μέσης τάσης σ_m λόγω του κενού στο εσωτερικό της σήραγγας.

Λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της καμπύλης G-γ-D στη συμπεριφορά της άμμου, πραγματοποιήθηκαν στη συνέχεια αναλύσεις υιοθετώντας μια καμπύλη G-γ-D βαθμονομημένη για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB, δηλαδή στα 7,5m. Η καμπύλη G-γ-D που προκύπτει βάσει των παραπάνω, παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.19:



Εικόνα 3.19: Καμπύλη G-γ-D για την άμμο Fontainebleau NE34 με $D_r=70\%$ βαθμονομημένη για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB

Η εισαγωγή της παραπάνω καμπύλης στον κώδικα FLAC, έγινε όπως προηγουμένως (παράμετροι: $b=0,33$ και $x_0=1,18$) και παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.20:



Εικόνα 3.20: Βαθμονόμηση της καμπύλης G-γ-D για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB με το μοντέλο sig3

Για να ελεγχθεί η επίδραση της πρόσθετης απόσβεσης Rayleigh, οι δύο προηγούμενες περιπτώσεις με την κατανομή της καμπύλης G-γ-D, πραγματοποιήθηκαν με αποσβέσεις Rayleigh 1% και 3%. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις ευαισθησίας με πλήρη σύνδεση της διεπιφάνειας σήραγγας-εδάφους, για τις ενδεικτικές περιπτώσεις T1EQ1 και T1EQ4, με κατανομή του αρχικού μέτρου διάτμησης, καμπύλη G-γ-D κατανεμημένη στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 1%.

Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 42 αναλύσεις, από τις οποίες οι βασικές περιπτώσεις παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.6:

Πίνακας 3.6: Πρόγραμμα βασικών περιπτώσεων ανάλυσης

	Test T1 και Test T3			
	EQ1	EQ2	EQ3	EQ4
Περιπτώσεις ανάλυσης	Σταθερή τιμή του Αρχικού Μέτρου Διάτμησης με απόσβεση Rayleigh 1%			
	Κατανεμημένο Αρχικό Μέτρο Διάτμησης, με υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση 1%			
	Κατανεμημένο Αρχικό Μέτρο Διάτμησης, με υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση 3%			
	Κατανεμημένο Αρχικό Μέτρο Διάτμησης, με υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση 1%			
	κατανεμημένο Αρχικό Μέτρο Διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση 3%			

Στις προαναφερόμενες περιπτώσεις προστίθενται και οι δύο αναλύσεις ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκαν στο τέλος.

Κεφάλαιο 4 Παραμετρική διερεύνηση

4.1 Ενδεικτικά Αποτελέσματα

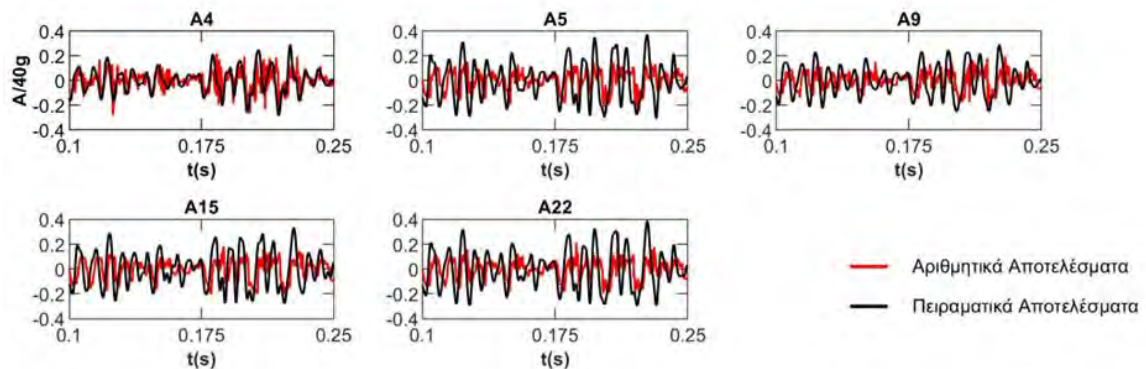
Από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν προέκυψαν χρονοϊστορίες επιταχύνσεων και οριζόντιων μετακινήσεων σε ορισμένες θέσεις του προσομοιώματος. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με την Εικόνα 3.6, του προηγούμενου κεφαλαίου, καταγράφηκαν αποτελέσματα επιταχύνσεων για τις θέσεις A4, A5, A9, A15 και A22. Οι οριζόντιες μετακινήσεις καταγράφηκαν σε όλες τις θέσεις των μηχανοσυστημάτων της συσκευής μέτρησης οριζόντιων παραμορφώσεων στο εσωτερικό της σήραγγας. Οι χρονοϊστορίες και οι απόλυτες μέγιστες τιμές τους συγκρίθηκαν με τα πειραματικά αποτελέσματα για κάθε περίπτωση ανάλυσης. Επισημαίνεται ότι, όλα τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην κλίμακα του πειράματος.

Παρακάτω παρατίθενται ενδεικτικά τα αποτελέσματα για τις περιπτώσεις T1EQ3, T1EQ4, T3EQ3 και T3EQ4. Τα διαγράμματα για τις υπόλοιπες περιπτώσεις παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα. Σημειώνεται ότι, κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας, οι σεισμοί υποβλήθηκαν στο σύστημα διαδοχικά, ο ένας μετά τον άλλον. Στις αναλύσεις, ωστόσο, κάθε σεισμός εξετάστηκε ξεχωριστά, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι μετακινήσεις που ενδεχομένως προκλήθηκαν από προηγούμενες διεγέρσεις.

4.1.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΩΝ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ T1EQ3

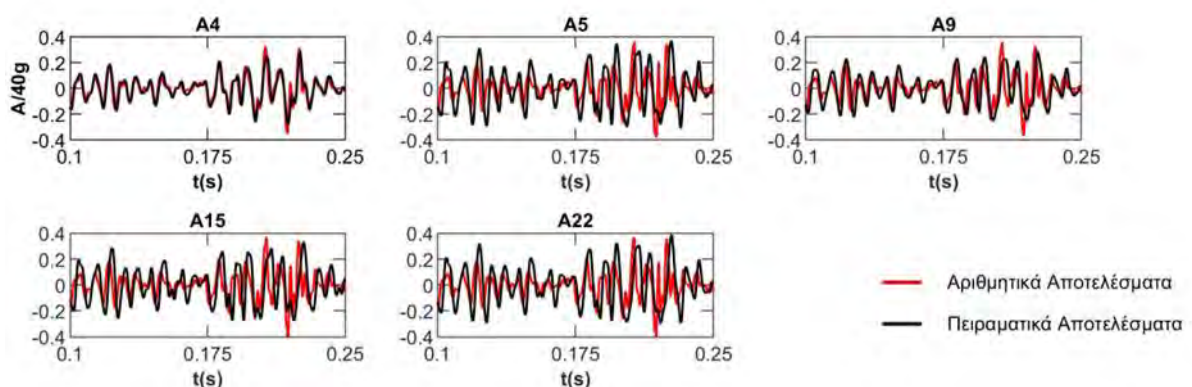
Αρχικά, στις Εικόνες 4.1 έως 4.4 συγκρίνονται οι χρονοϊστορίες των επιταχύνσεων για όλες τις εξεταζόμενες θέσεις, για την περίπτωση της εύκαμπτης σήραγγας (T1) και το σήμα EQ3. Στην Εικόνα 4.1, η οποία αφορά την περίπτωση με σταθερή τιμή του αρχικού μέτρου διάτμησης, παρατηρείται διαφορά φάσεων μεταξύ των αριθμητικών και των πειραματικών αποτελεσμάτων. Αυτό υποδεικνύει ότι το μοντέλο δεν αναπαριστά σωστά τη δυσκαμψία του

εδάφους, κάτι αναμενόμενο, καθώς η τιμή του $G_{\max}$ δεν είναι σταθερή και εξαρτάται από τη μέση τάση.

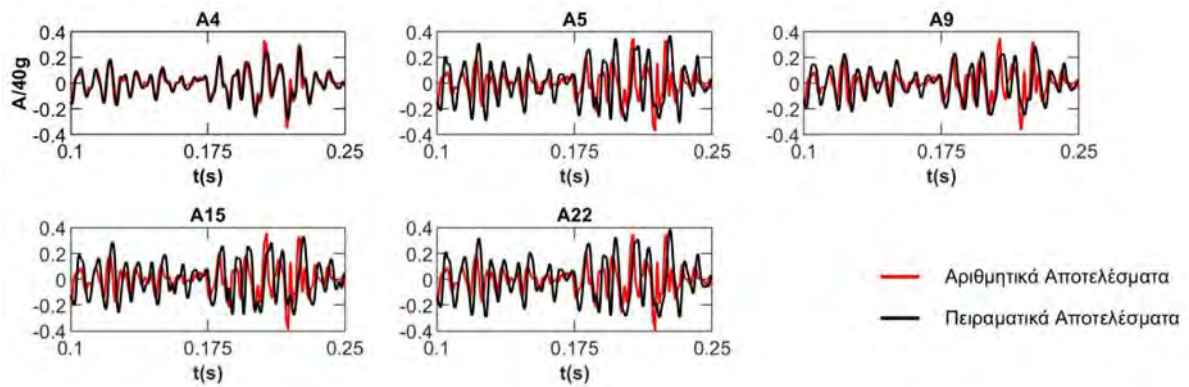


Εικόνα 4.1: Σύγκριση χρονοϊστοριών επιταχύνσεων για την περίπτωση T1EQ3, με σταθερό αρχικό μέτρο διάτμησης και απόσβεση Rayleigh 1%

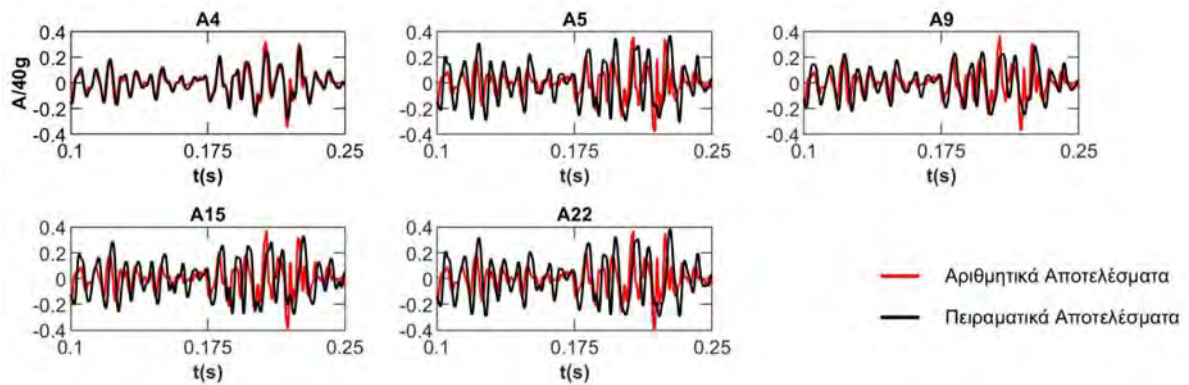
Στις περιπτώσεις όπου έχει εισαχθεί στο μοντέλο η κατανομή του αρχικού μέτρου διάτμησης, η αντιστοίχιση με τα πειραματικά αποτελέσματα είναι εμφανώς καλύτερη. Ένας δείκτης σωστής εισαγωγής της σεισμικής διέγερσης είναι το γεγονός ότι στη θέση A4 οι χρονοϊστορίες σχεδόν ταυτίζονται. Η θέση A4 βρίσκεται λίγο πάνω από τη σεισμική τράπεζα, οπότε η καταγραφή της θα πρέπει να είναι πολύ κοντά στην καταγραφή του σεισμού που εισάγεται στο σύστημα. Παρόμοια αποτελέσματα παρατηρούνται και στις υπόλοιπες περιπτώσεις, με μικρές διαφορές στην εμφάνιση ορισμένων μεγίστων που πιθανώς οφείλονται σε αριθμητικές αστάθειες.



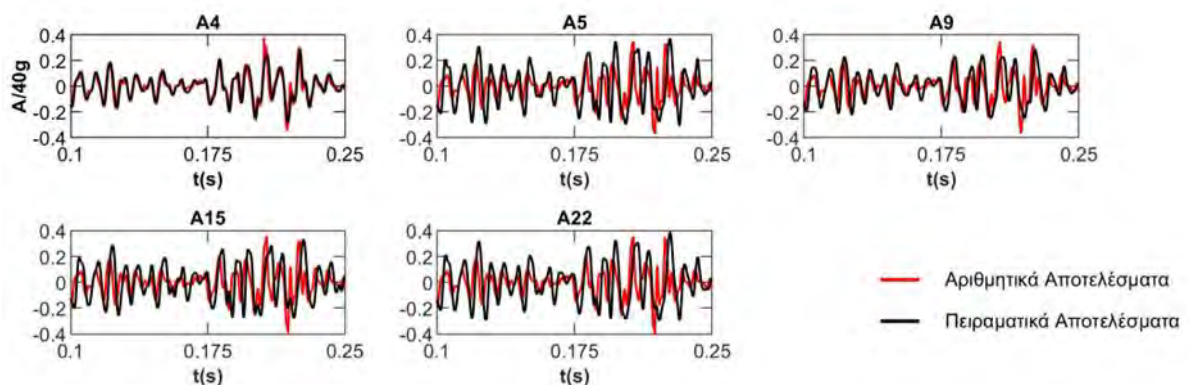
Εικόνα 4.2: Σύγκριση χρονοϊστοριών επιταχύνσεων για την περίπτωση T1EQ3, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 1%



Εικόνα 4.3: Σύγκριση χρονοϊστοριών επιταχύνσεων για την περίπτωση T1EQ3, με καταναμημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 3%



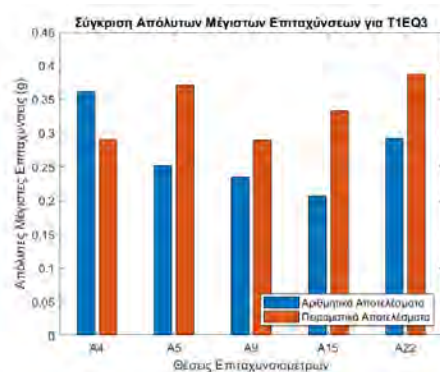
Εικόνα 4.4: Σύγκριση χρονοϊστοριών επιταχύνσεων για την περίπτωση T1EQ3, με καταναμημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 1%



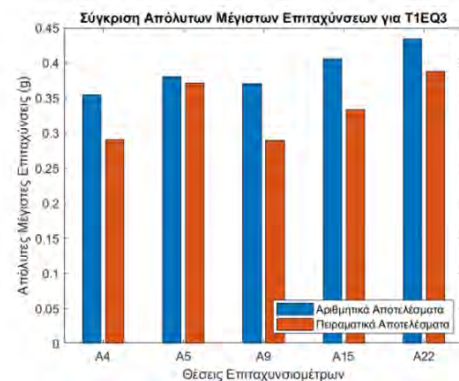
Εικόνα 4.5: Σύγκριση χρονοϊστοριών επιταχύνσεων για την περίπτωση T1EQ3, με καταναμημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 3%

4.1.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΛΥΤΩΝ ΜΕΓΙΣΤΩΝ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ T1EQ3

Στις Εικόνες 4.6 έως 4.10 παρουσιάζονται οι συγκρίσεις των απόλυτων μέγιστων επιταχύνσεων των αριθμητικών αποτελεσμάτων με αυτές των πειραματικών αποτελεσμάτων. Οι περιπτώσεις όπου υιοθετήθηκε κατανομή του $G_{\max}$ φαίνεται να προσεγγίζουν ικανοποιητικά τις μέγιστες επιταχύνσεις που προέκυψαν κατά την πειραματική διαδικασία. Μετά από επεξεργασία των δεδομένων, προέκυψε ενδεικτικά για τη θέση A22, η οποία βρίσκεται πάνω στη σήραγγα, ποσοστιαία διαφορά σχεδόν 28%, για την περίπτωση με τη σταθερή τιμή του αρχικού μέτρου διάτμησης. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις, που λαμβάνεται υπόψη η κατανομή του $G_{\max}$, η διαφορά είναι κοντά στο 10%, με εξαίρεση την περίπτωση όπου υιοθετήθηκε κατανομή του $G_{\max}$ στο μέσο βάθος του κουτιού ESB με απόσβεση Rayleigh 1%, στην οποία η διαφορά είναι περίπου 1,5%.

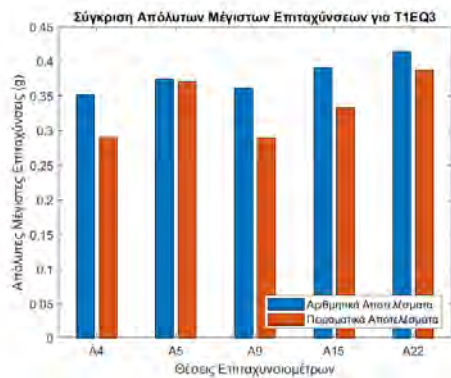


Εικόνα 4.6: Σύγκριση απόλυτων μέγιστων επιταχύνσεων για την περίπτωση T1EQ3, με σταθερό αρχικό μέτρο διάτμησης και απόσβεση Rayleigh 1%

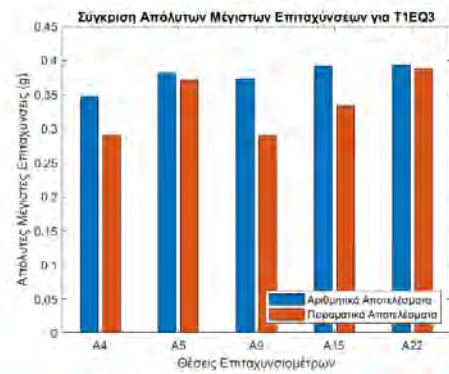


Εικόνα 4.7: Σύγκριση απόλυτων μέγιστων επιταχύνσεων για την περίπτωση T1EQ3, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 1%

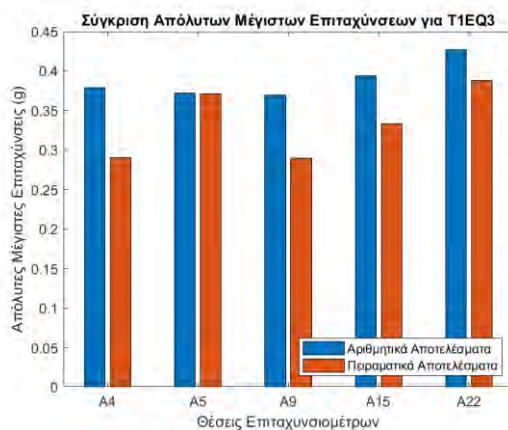
Αντίστοιχες συγκρίσεις έγιναν και για τη θέση A15, που βρίσκεται στο ελεύθερο πεδίο, με όλες τις περιπτώσεις της κατανομής του $G_{\max}$ να παρουσιάζουν ποσοστιαία διαφορά 16%. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.6, στην περίπτωση με τη σταθερή τιμή του $G_{\max}$, η διαφορά είναι αρκετά μεγαλύτερη, αγγίζοντας σχεδόν 47%.



Εικόνα 4.8: Σύγκριση απόλυτων μέγιστων επιταχύνσεων για την περίπτωση T1EQ3, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 3%



Εικόνα 4.9: Σύγκριση απόλυτων μέγιστων επιταχύνσεων για την περίπτωση T1EQ3, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 1%

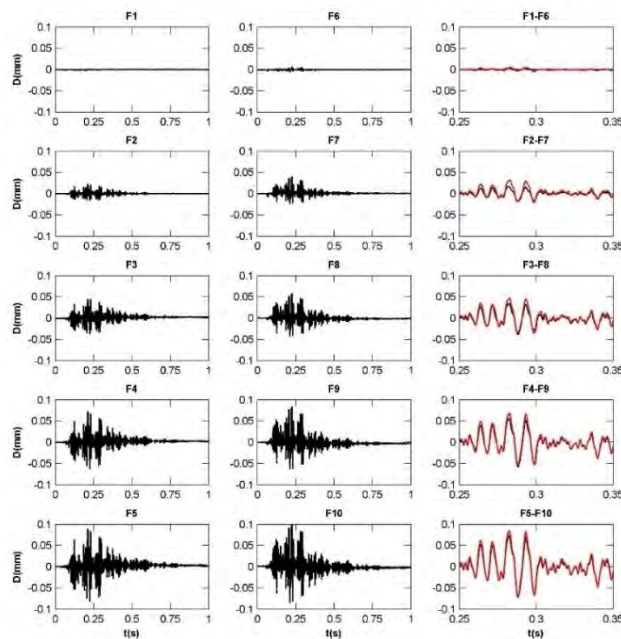


Εικόνα 4.10: Σύγκριση απόλυτων μέγιστων επιταχύνσεων για την περίπτωση T1EQ3, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 3%

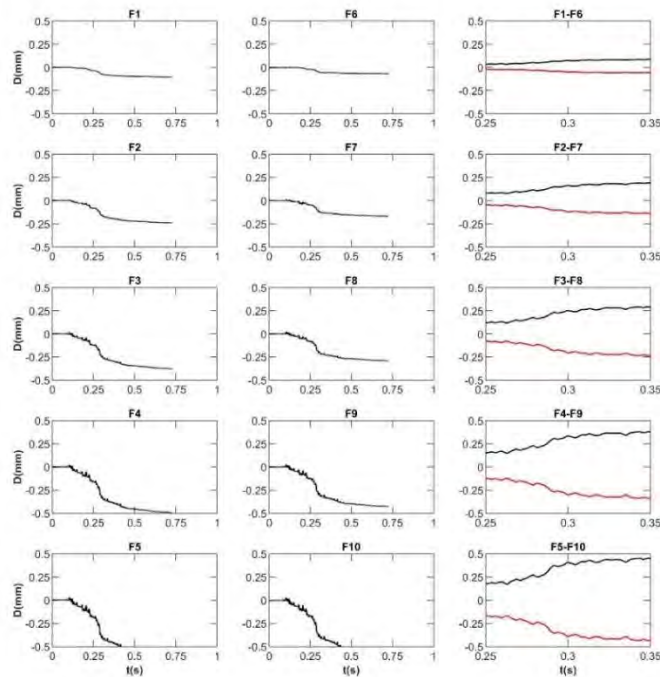
4.1.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΩΝ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΠΛΕΥΡΙΚΩΝ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ T1EQ3

Οι χρονοϊστορίες των οριζόντιων μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας αποτυπώνονται στις Εικόνες 4.11 έως 4.16. Στην Εικόνα 4.11 εμφανίζονται τα πειραματικά αποτελέσματα, όπου έχει γίνει αντιστροφή του πρόσημου στις καταγραφές του

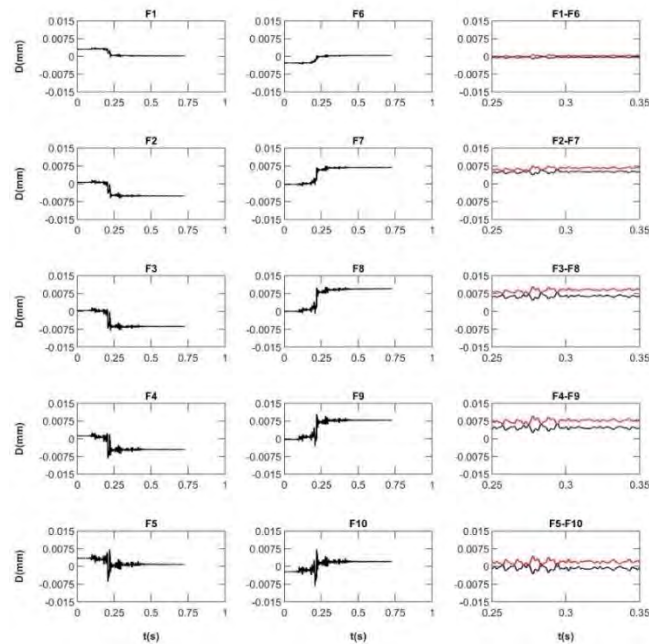
ενός τοιχώματος. Στην Εικόνα 4.12, η οποία αναφέρεται στην περίπτωση με σταθερή τιμή του αρχικού μέτρου διάτμησης, φαίνεται ότι το μοντέλο υπερεκτιμά τη δυσκαμψία της άμμου γύρω από τη σήραγγα, με αποτέλεσμα οι μετακινήσεις να εμφανίζονται μεγαλύτερες. Αντίθετα, στις υπόλοιπες περιπτώσεις που λαμβάνουν υπόψη την κατανομή του G_{max} , το μοντέλο υποεκτιμά τη δυσκαμψία της άμμου, οδηγώντας σε πολύ μικρότερες παραμορφώσεις των τοιχωμάτων της σήραγγας. Ωστόσο, παρατηρώντας την τρίτη στήλη σε κάθε περίπτωση, επιβεβαιώνεται η διατμητική παραμόρφωση των σηράγγων ορθογωνικής διατομής (racking), όταν υποβάλλονται σε εδαφική ταλάντωση.



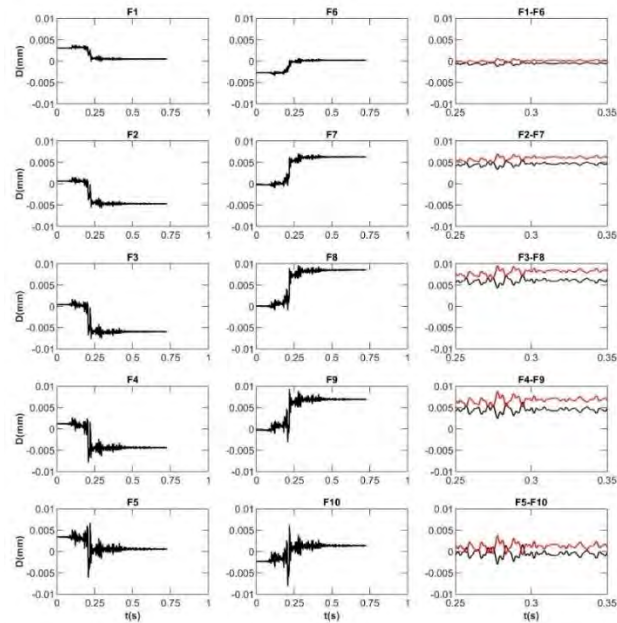
Εικόνα 4.11: Πειραματικά αποτελέσματα χρονοϊστοριών μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T1EQ3



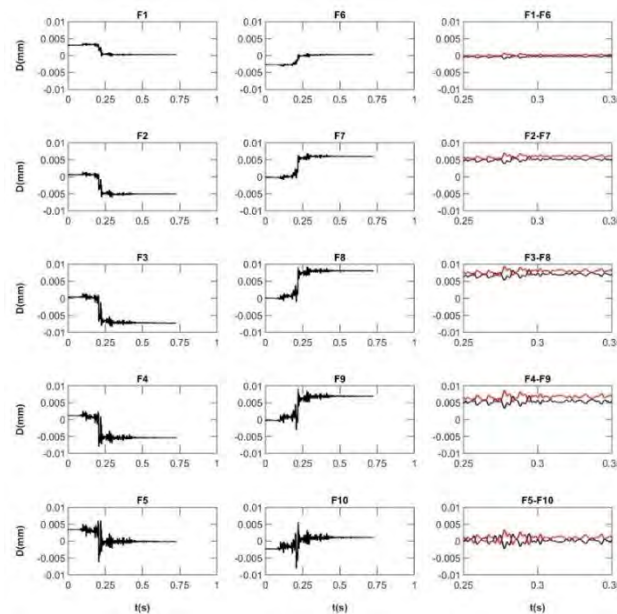
Εικόνα 4.12: Αριθμητικά αποτελέσματα χρονιοιστοριών μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T1EQ3, με σταθερό αρχικό μέτρο διάτμησης και απόσβεση Rayleigh 1%



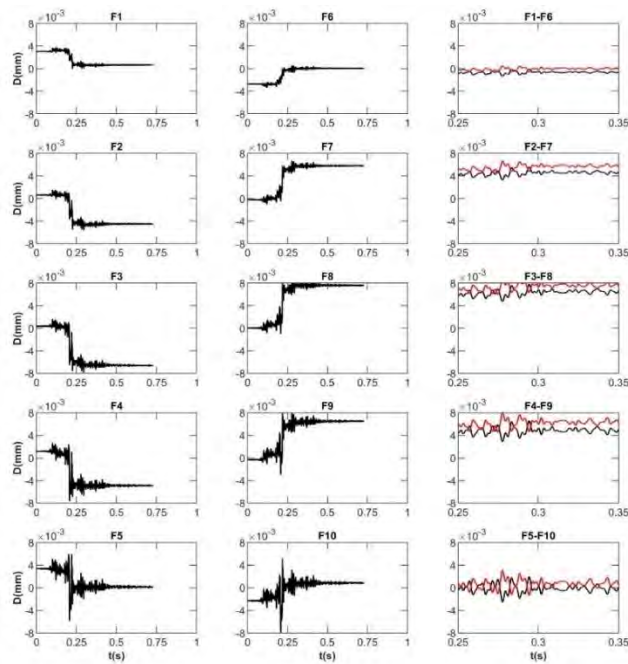
Εικόνα 4.13: Αριθμητικά αποτελέσματα χρονιοιστοριών μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T1EQ3, με κατανεμημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 1%



Εικόνα 4.14: Αριθμητικά αποτελέσματα χρονοϊστοριών μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T1EQ3, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 3%



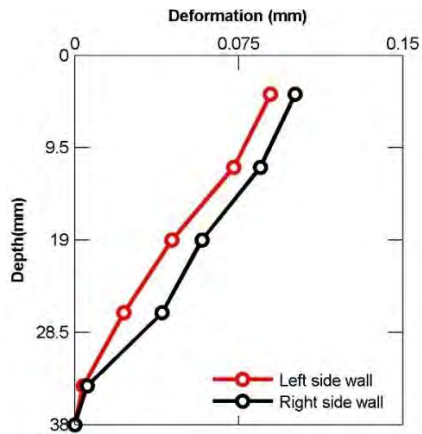
Εικόνα 4.15: Αριθμητικά αποτελέσματα χρονοϊστοριών μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T1EQ3, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 1%



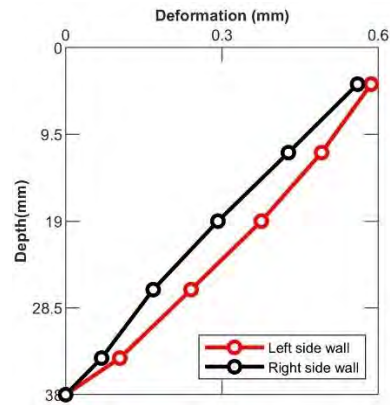
Εικόνα 4.16: Αριθμητικά αποτελέσματα χρονοϊστοριών μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T1EQ3, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 3%

4.1.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΓΙΣΤΩΝ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΤΩΝ ΠΛΕΥΡΙΚΩΝ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ T1EQ3

Στις Εικόνες 4.17 έως 4.22 παρουσιάζονται οι συγκρίσεις για τις μέγιστες μετακινήσεις των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας. Συγκρίνοντας τα πειραματικά αποτελέσματα της Εικόνας 4.17 με εκείνα της πρώτης περίπτωσης, με το σταθερό αρχικό μέτρο διάτμησης (Εικόνας 4.18), επιβεβαιώνεται ότι η δυσκαμψία του εδάφους γύρω από τη σήραγγα υπερεκτιμάται από το αριθμητικό προσομοίωμα, οδηγώντας σε μεγαλύτερες μετακινήσεις. Δεδομένης της σχεδόν κοινής μετακίνησης των δύο τοιχωμάτων, συγκρίθηκαν οι μέσες τιμές των αποτελεσμάτων στην κορυφή. Για την πρώτη περίπτωση προέκυψε ποσοστιαία διαφορά 143%, καθώς τα αποτελέσματα διαφέρουν κατά μία τάξη μεγέθους, με τα αριθμητικά να βρίσκονται σχεδόν μία τάξη πάνω.

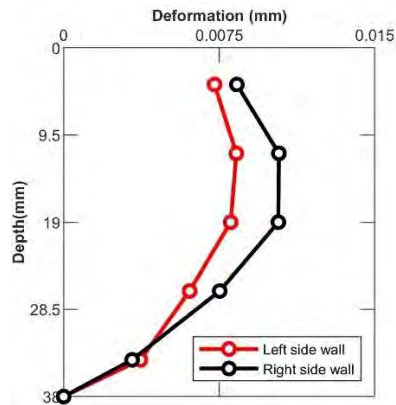


Εικόνα 4.17: Πειραματικά αποτελέσματα για μέγιστη παραμόρφωση των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T1EQ3

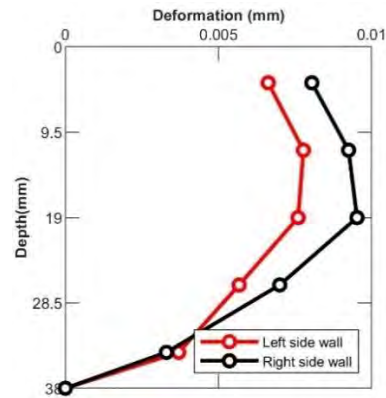


Εικόνα 4.18: Αριθμητικά αποτελέσματα για μέγιστη παραμόρφωση των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T1EQ3, με σταθερό αρχικό μέτρο διάτμησης και απόσβεση Rayleigh 1%

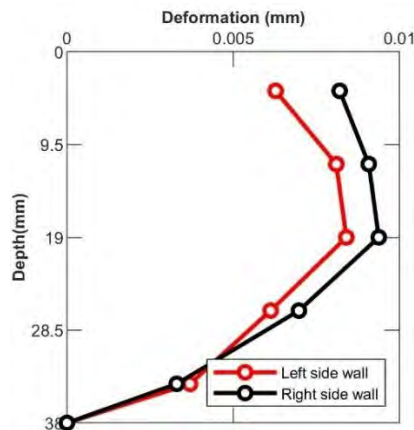
Στις υπόλοιπες περιπτώσεις, με την κατανομή του αρχικού μέτρου διάτμησης, οι αριθμητικές τιμές είναι κατά μία τάξη μικρότερες, καθώς, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η δυσκαμψία του εδάφους υποεκτιμάται, με αποτέλεσμα οι διαφορές κυμαίνονται από 169 έως 173%. Στις περιπτώσεις της κατανομής του G_{max} , δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφοροποιήσεις όταν μεταβάλλεται η απόσβεση ή η αρχική καμπύλη του G_{max} .



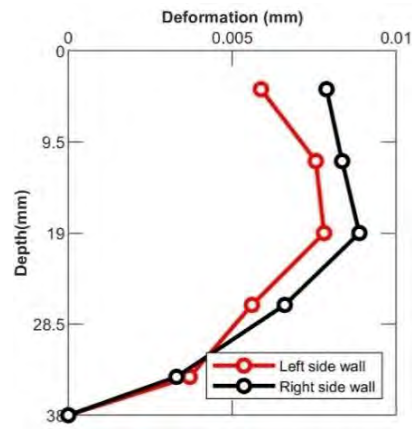
Εικόνα 4.19: Αριθμητικά αποτελέσματα για μέγιστη παραμόρφωση των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T1EQ3, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 1%



Εικόνα 4.20: Αριθμητικά αποτελέσματα για μέγιστη παραμόρφωση των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T1EQ3, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 3%



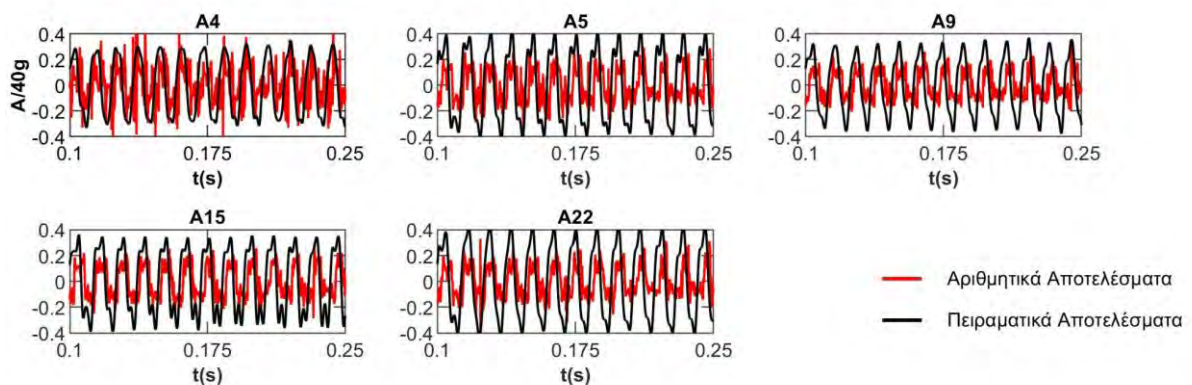
Εικόνα 4.21: Αριθμητικά αποτελέσματα για μέγιστη παραμόρφωση των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T1EQ3, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 1%



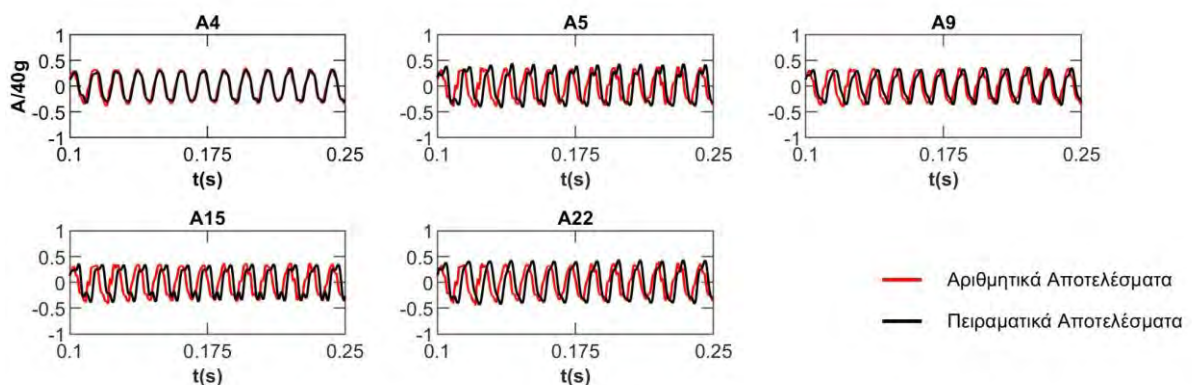
Εικόνα 4.22: Αριθμητικά αποτελέσματα για μέγιστη παραμόρφωση των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T1EQ3, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 3%

4.1.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΩΝ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ T1EQ4

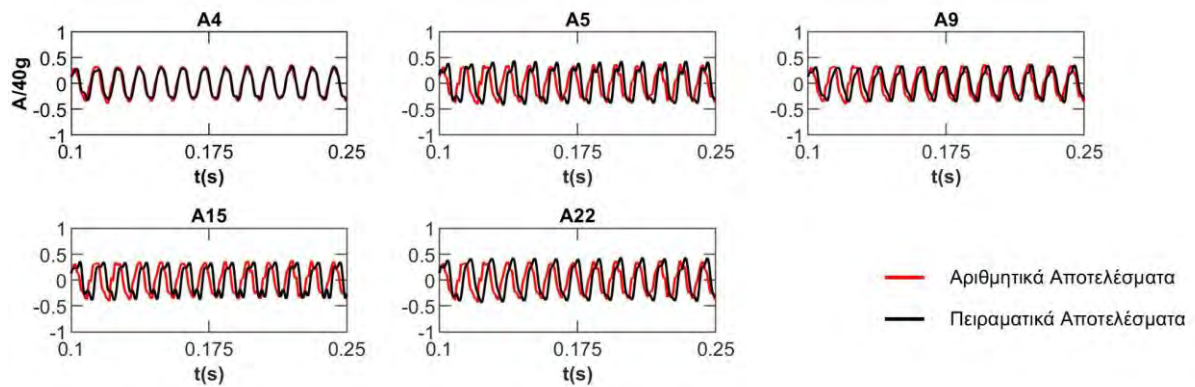
Στην ημιτονοειδή φόρτιση, εκτός από την θεώρηση του σταθερού $G_{\max}$, στις υπόλοιπες περιπτώσεις το μοντέλο προσέγγισε αρκετά ικανοποιητικά τα πειραματικά αποτελέσματα. Για τη συγκεκριμένη περίπτωση T1EQ4, πραγματοποιήθηκε και μία ανάλυση ευαισθησίας θεωρώντας πλήρη σύνδεση της διεπιφάνειας εδάφους-σήραγγας. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.28. Αντίστοιχα με την προηγούμενη περίπτωση του σεισμού EQ3, τα αποτελέσματα με την κατανομή του αρχικού μέτρου διάτμησης δεν διαφοροποιούνται με τη μεταβολή της απόσβεσης Rayleigh ή της αρχικής καμπύλης $G_{\max}$.



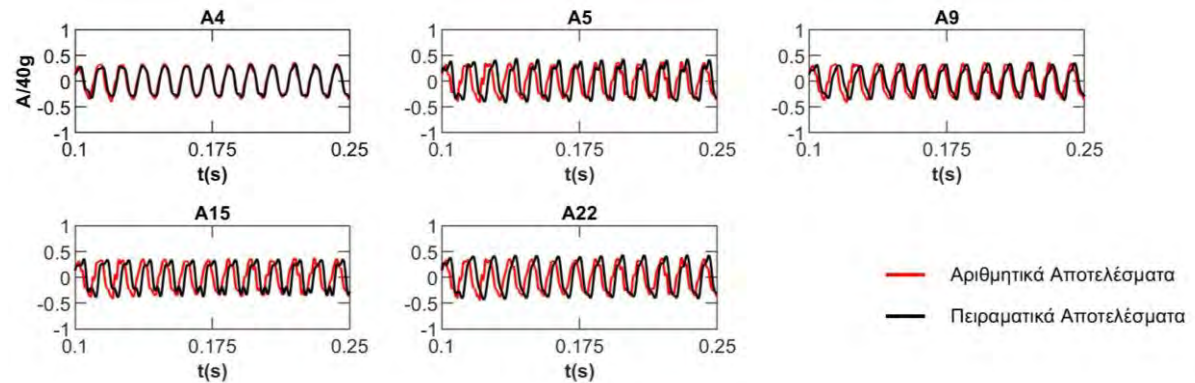
Εικόνα 4.23: Σύγκριση χρονοϊστοριών επιταχύνσεων για την περίπτωση T1EQ4, με σταθερό αρχικό μέτρο διάτμησης και απόσβεση Rayleigh 1%



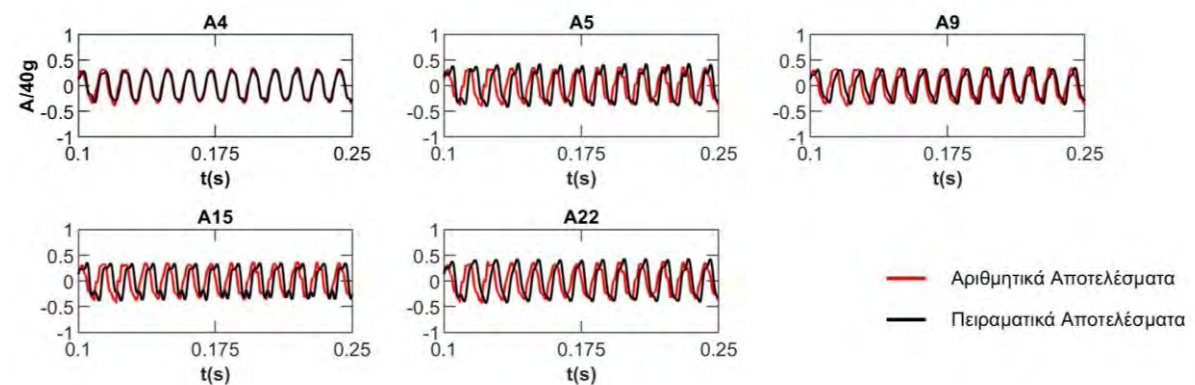
Εικόνα 4.24: Σύγκριση χρονοϊστοριών επιταχύνσεων για την περίπτωση T1EQ4, με καταμετρημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G- γ -D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 1%



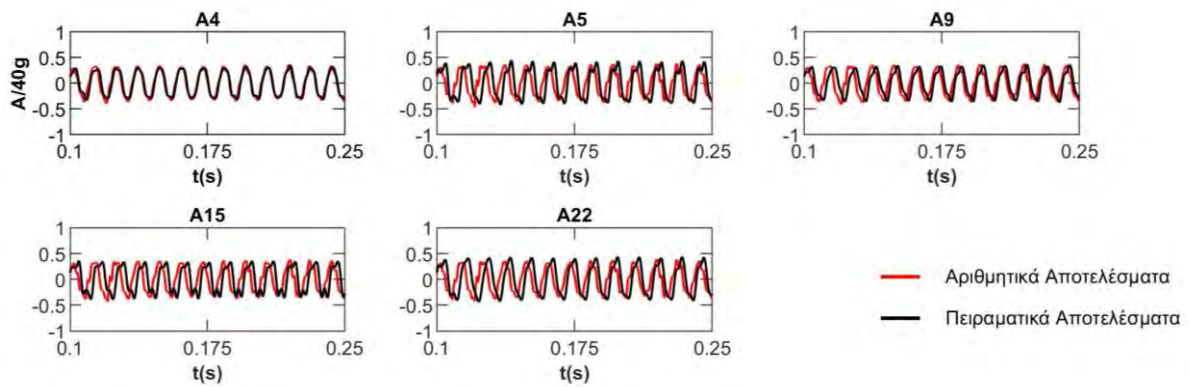
Εικόνα 4.25: Σύγκριση χρονοιστοριών επιταχύνσεων για την περίπτωση T1EQ4, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 3%



Εικόνα 4.26: Σύγκριση χρονοιστοριών επιταχύνσεων για την περίπτωση T1EQ4, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 1%



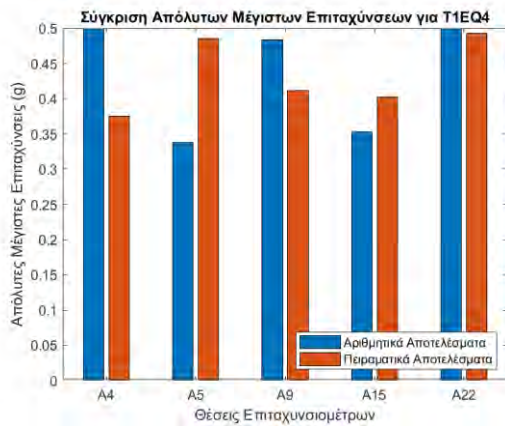
Εικόνα 4.27: Σύγκριση χρονοιστοριών επιταχύνσεων για την περίπτωση T1EQ4, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 3%



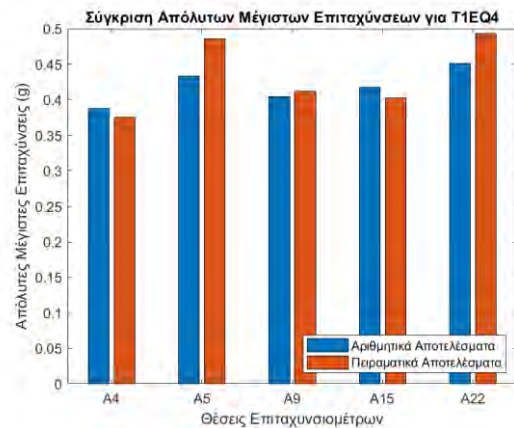
Εικόνα 4.28: Σύγκριση χρονοϊστοριών επιταχύνσεων για την περίπτωση T1EQ4, με καταμετρημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 1%, με πλήρη σύνδεση σήραγγας-εδάφους

4.1.6 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΛΥΤΩΝ ΜΕΓΙΣΤΩΝ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ T1EQ4

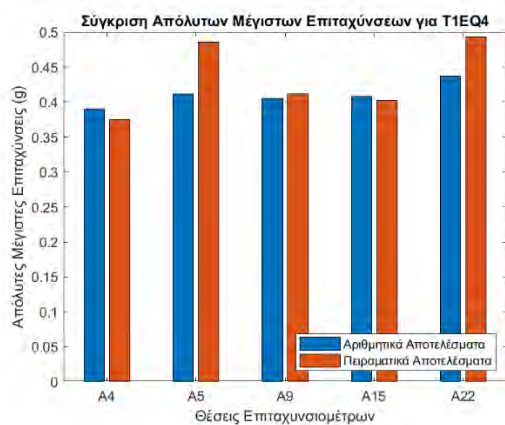
Στις παρακάτω Εικόνες 4.29 έως 4.34 συγκρίνονται οι απόλυτες μέγιστες επιταχύνσεις για την περίπτωση της ημιτονοειδούς φόρτισης T1EQ4. Σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.29, παρατηρούνται μέγιστα που δεν εμφανίζονται για λόγους εποπτείας. Παρόμοια φαινόμενα εντοπίζονται και στις επόμενες εικόνες. Επιπλέον, στις αναλύσεις όπου λαμβάνεται υπόψη η κατανομή του $G_{\max}$, η αντιστοίχιση είναι αρκετά ικανοποιητική για κάθε θέση καταγραφής. Αυτό γίνεται πιο κατανοητό και από τις ποσοστιαίες διαφορές των τιμών: για τη θέση A22 κυμαίνεται από 9 έως 12%, ενώ για την θέση A15 είναι από 1,5 έως 7,5%. Στην περίπτωση με τη σταθερή τιμή του $G_{\max}$, η ποσοστιαία διαφορά του A22 είναι 16%, ενώ για το A15 είναι περίπου 13%.



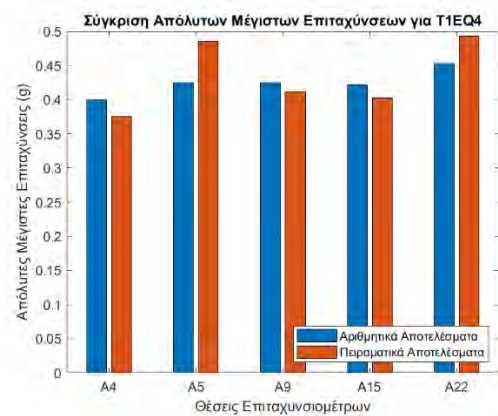
Εικόνα 4.29: Σύγκριση απόλυτων μέγιστων επιταχύνσεων για την περίπτωση T1EQ4, με σταθερό αρχικό μέτρο διάτμησης και απόσβεση Rayleigh 1%



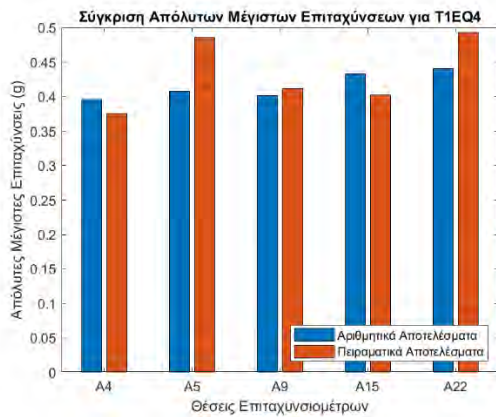
Εικόνα 4.30: Σύγκριση απόλυτων μέγιστων επιταχύνσεων για την περίπτωση T1EQ4, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, ισοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 1%



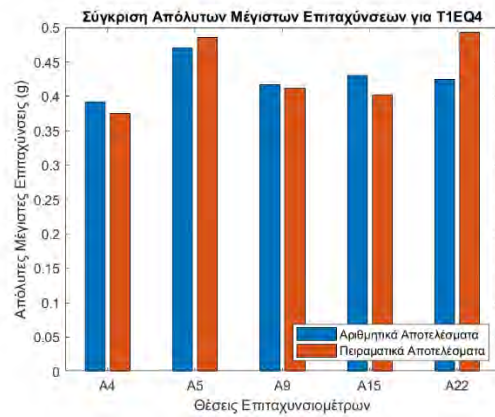
Εικόνα 4.31: Σύγκριση απόλυτων μέγιστων επιταχύνσεων για την περίπτωση T1EQ4, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, ισοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 3%



Εικόνα 4.32: Σύγκριση απόλυτων μέγιστων επιταχύνσεων για την περίπτωση T1EQ4, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, ισοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 1%



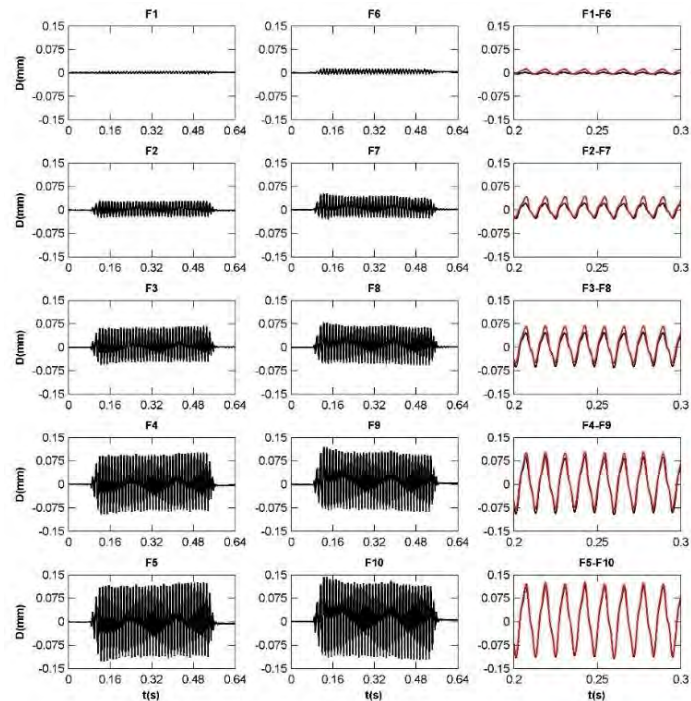
Εικόνα 4.33: Σύγκριση απόλυτων μέγιστων επιταχύνσεων για την περίπτωση T1EQ4, με κατανεμημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 3%



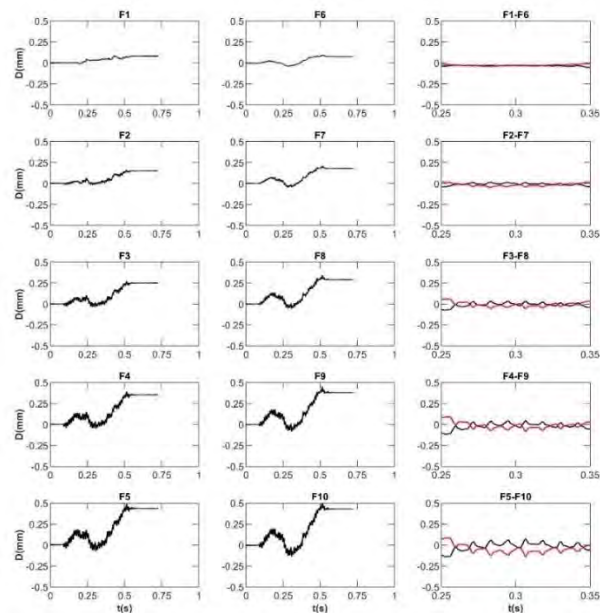
Εικόνα 4.34: Σύγκριση απόλυτων μέγιστων επιταχύνσεων για την περίπτωση T1EQ4, με κατανεμημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 1%, με πλήρη σύνδεση σήραγγας-εδάφους

4.1.7 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΩΝ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΠΛΕΥΡΙΚΩΝ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ T1EQ4

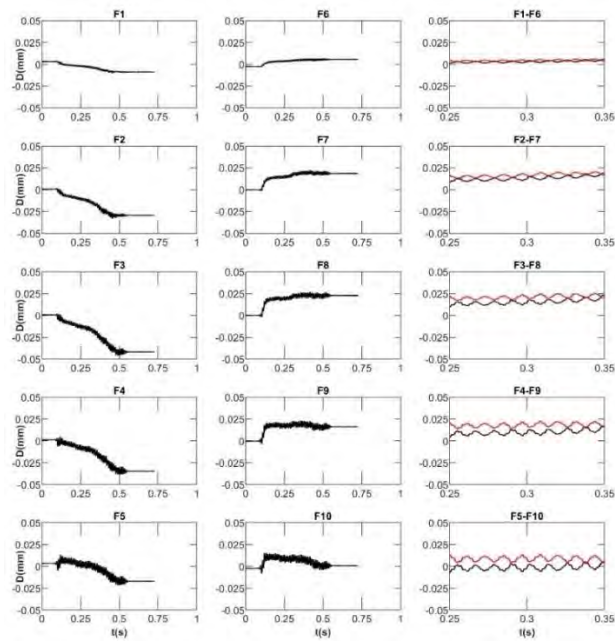
Στις Εικόνες 4.36 έως 4.41, όπου παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα των χρονοϊστοριών των μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας, παρατηρούνται μόνιμες παραμορφώσεις. Η περιοδικότητα του σήματος EQ4, και συγκεκριμένα η αύξηση του αριθμού των ισχυρών κύκλων φόρτισης οδηγεί στην πλαστικοποίηση του εδάφους. Παρόλα αυτά, η διατμητική συμπεριφορά των τοιχωμάτων παραμένει εμφανής σε κάθε περίπτωση.



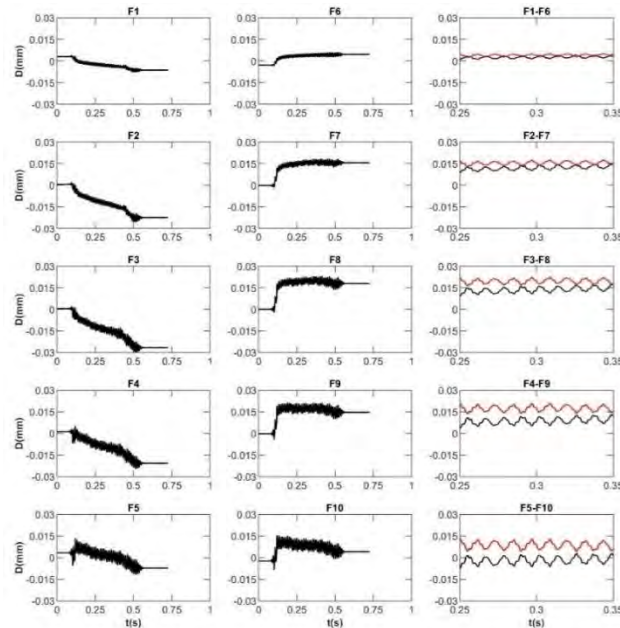
Εικόνα 4.35: Πειραματικά αποτελέσματα χρονοϊστοριών μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T1EQ4



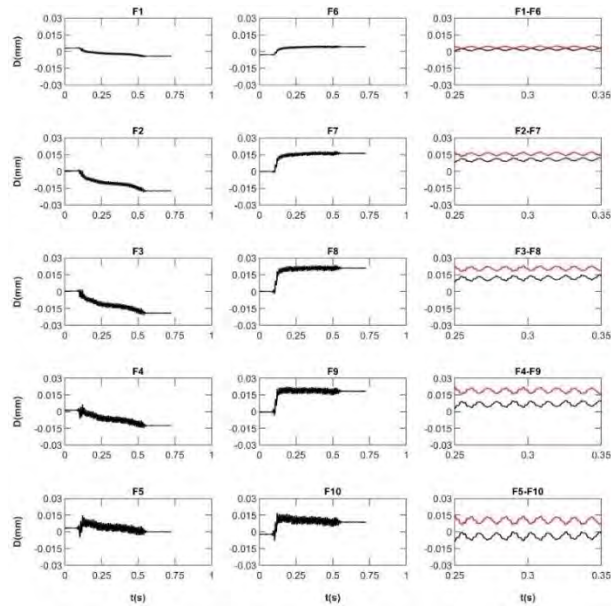
Εικόνα 4.36: Αριθμητικά αποτελέσματα χρονοϊστοριών μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T1EQ4, με σταθερό αρχικό μέτρο διάτμησης και απόσβεση Rayleigh 1%



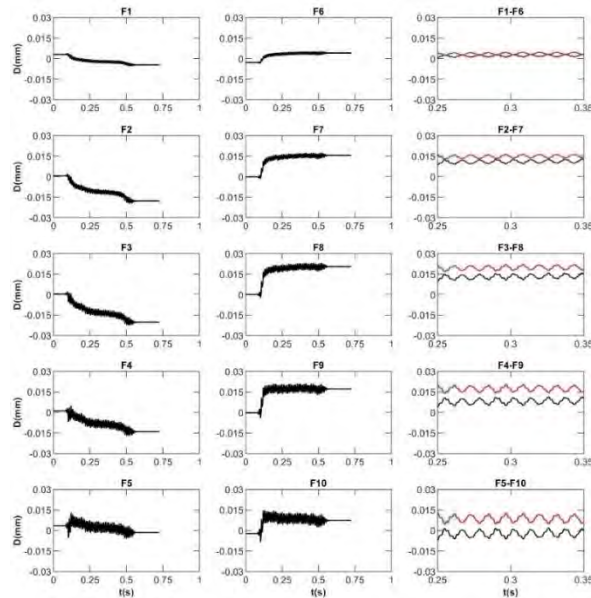
Εικόνα 4.37: Αριθμητικά αποτελέσματα χρονιοιστοριών μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T1EQ4, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 1%



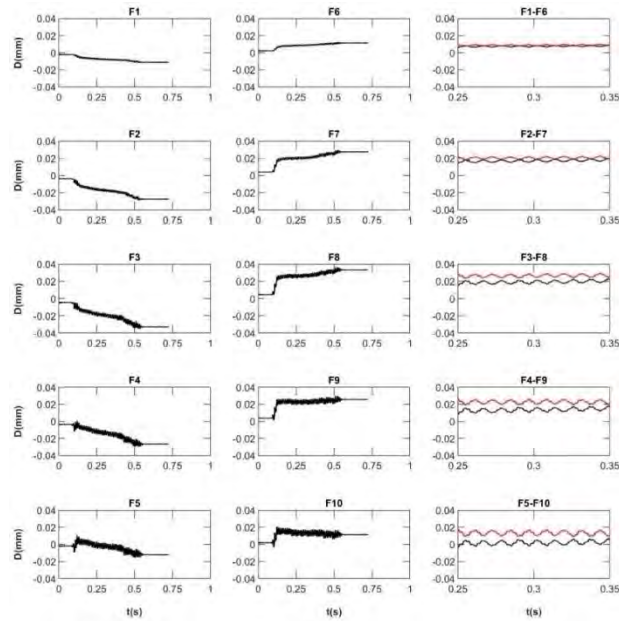
Εικόνα 4.38: Αριθμητικά αποτελέσματα χρονιοιστοριών μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T1EQ4, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 3%



Εικόνα 4.39: Αριθμητικά αποτελέσματα χρονοϊστοριών μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T1EQ4, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 1%



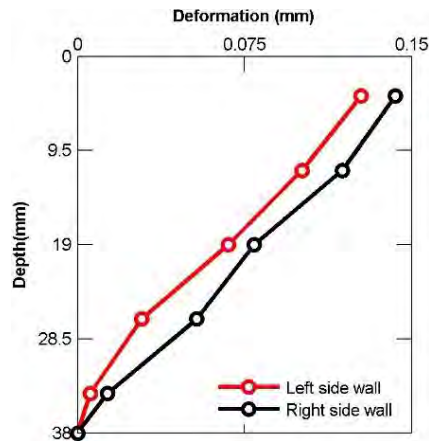
Εικόνα 4.40: Αριθμητικά αποτελέσματα χρονοϊστοριών μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T1EQ4, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 3%



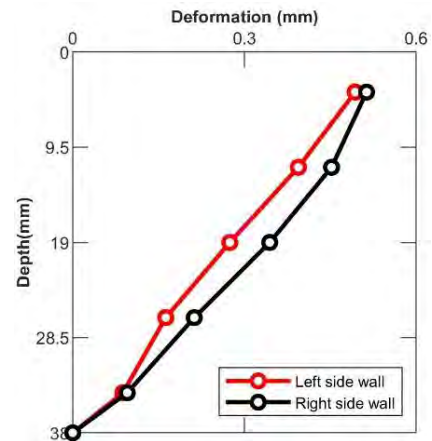
Εικόνα 4.41: Αριθμητικά αποτελέσματα χρονιοιστοριών μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T1EQ4, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 1%, με πλήρη σύνδεση σήραγγας-εδάφους

4.1.8 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΓΙΣΤΩΝ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΤΩΝ ΠΛΕΥΡΙΚΩΝ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ T1EQ4

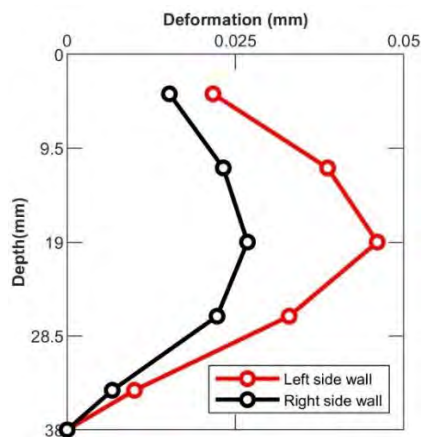
Στην Εικόνα 4.42 παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα για τη μέγιστη παραμόρφωση των πλευρικών τοιχωμάτων της εύκαμπτης σήραγγας T1 κατά την ημιτονοειδή φόρτιση EQ4. Τα αριθμητικά αποτελέσματα εμφανίζονται διαδοχικά στις Εικόνες 4.43 έως 4.48. Στις περιπτώσεις όπου λήφθηκε υπόψη η κατανομή του αρχικού μέτρου διάτμησης, η ποσοστιαία διαφορά των μέσων τιμών των μέγιστων μετακινήσεων των κόμβων στην κορυφή κάθε τοιχώματος είναι μεταξύ 150 και 160%. Η υποεκτίμηση της εδαφικής δυσκαμψίας είναι εμφανής και στην ανάλυση ευαισθησίας, όπου οι μετακινήσεις προκύπτουν κατά μία τάξη μικρότερες από τα πειραματικά αποτελέσματα.



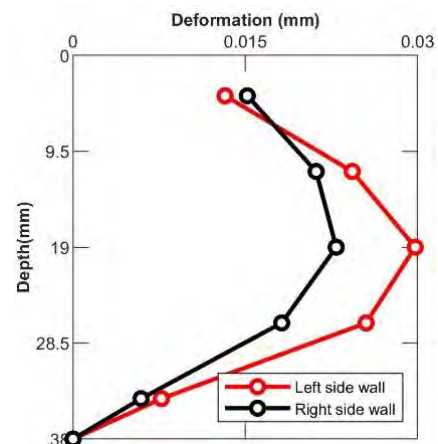
Εικόνα 4.42: Πειραματικά αποτελέσματα για μέγιστη παραμόρφωση των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T1EQ4



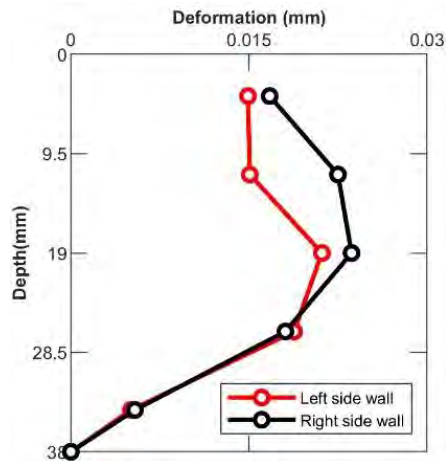
Εικόνα 4.43: Αριθμητικά αποτελέσματα για μέγιστη παραμόρφωση των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T1EQ4, με σταθερό αρχικό μέτρο διάτμησης και απόσβεση Rayleigh 1%



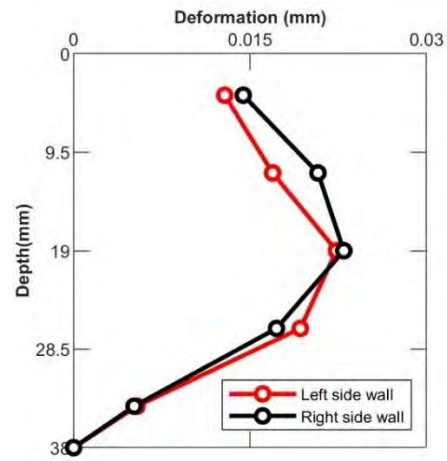
Εικόνα 4.44: Αριθμητικά αποτελέσματα για μέγιστη παραμόρφωση των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T1EQ4, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 1%



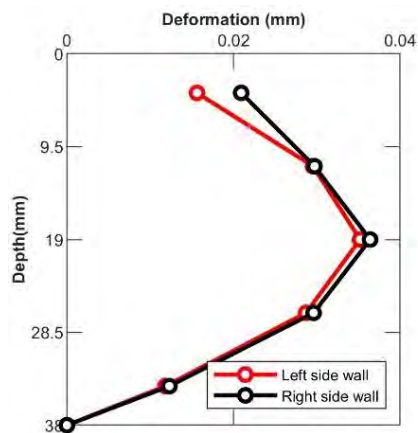
Εικόνα 4.45: Αριθμητικά αποτελέσματα για μέγιστη παραμόρφωση των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T1EQ4, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 3%



Εικόνα 4.46: Αριθμητικά αποτελέσματα για μέγιστη παραμόρφωση των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T1EQ4, με κατανεμημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 1%



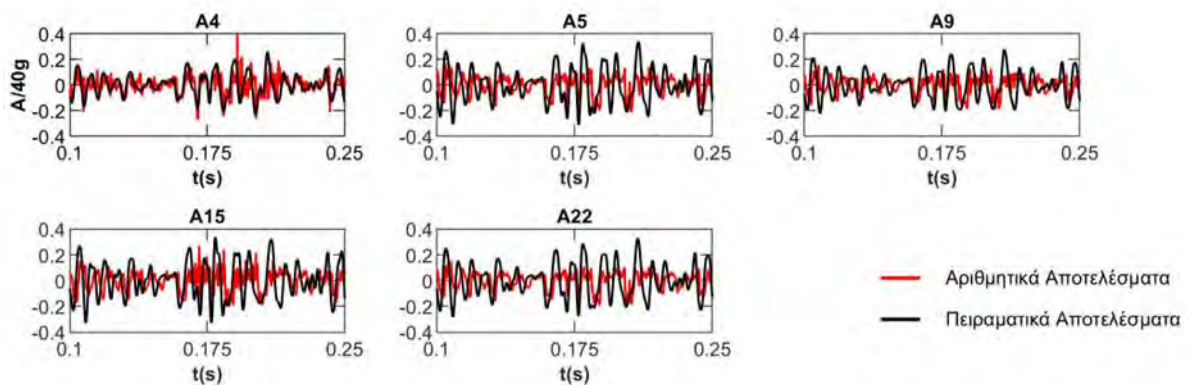
Εικόνα 4.47: Αριθμητικά αποτελέσματα για μέγιστη παραμόρφωση των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T1EQ4, με κατανεμημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 3%



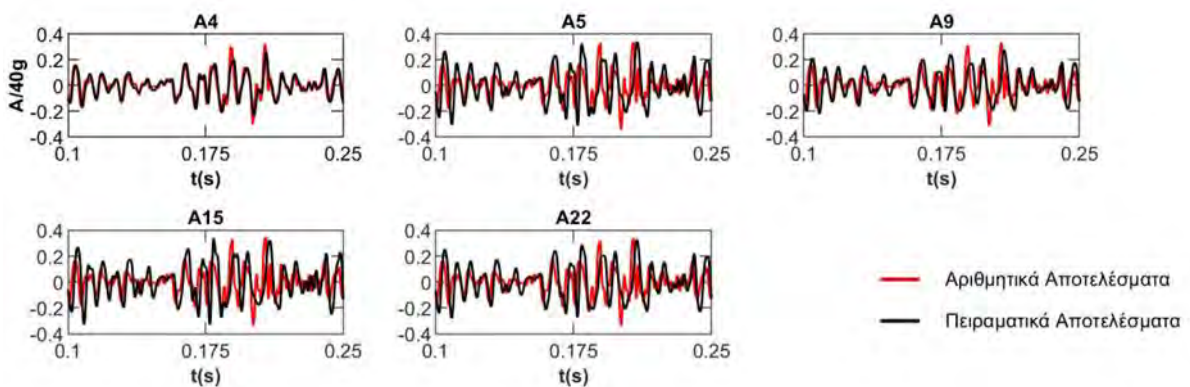
Εικόνα 4.48: Αριθμητικά αποτελέσματα για μέγιστη παραμόρφωση των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T1EQ4, με κατανεμημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 1%, με πλήρη σύνδεση σήραγγας-εδάφους

4.1.9 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΩΝ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ Τ3ΕQ3

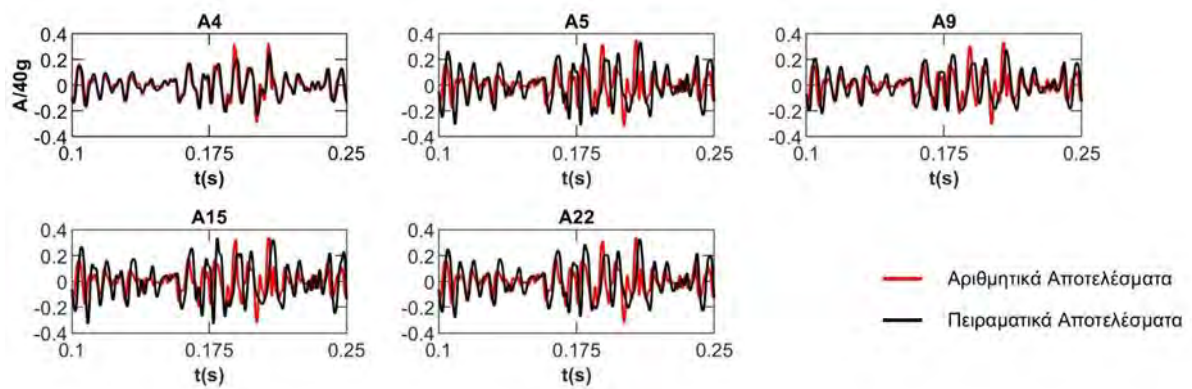
Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι συγκρίσεις των χρονοϊστοριών των επιταχύνσεων για τη δύσκαμπτη σήραγγα T3 και τη σεισμική διέγερση EQ3. Αντίστοιχα αποτελέσματα με την περίπτωση της εύκαμπτης σήραγγας προκύπτουν για τις επιταχύνσεις. Διαφορές φάσης παρατηρούνται στην πρώτη περίπτωση, όπου θεωρείται σταθερό το $G_{\max}$, ενώ οι προσεγγίσεις βελτιώνονται όταν λαμβάνεται υπόψη η κατανομή του αρχικού μέτρου διάτμησης. Δεδομένου ότι η δυσκαμψία της σήραγγας επηρεάζει σημαντικά τη σχετική δυσκαμψία σήραγγας-εδάφους, αναμένονται μικρότερες μετακινήσεις των πλευρικών τοιχωμάτων.



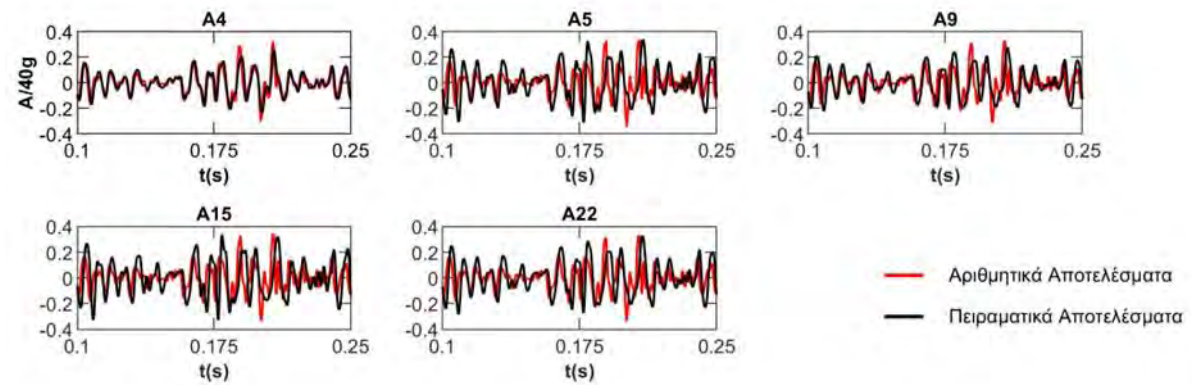
Εικόνα 4.49: Σύγκριση χρονοϊστοριών επιταχύνσεων για την περίπτωση Τ3ΕQ3, με σταθερό αρχικό μέτρο διάτμησης και απόσβεση Rayleigh 1%



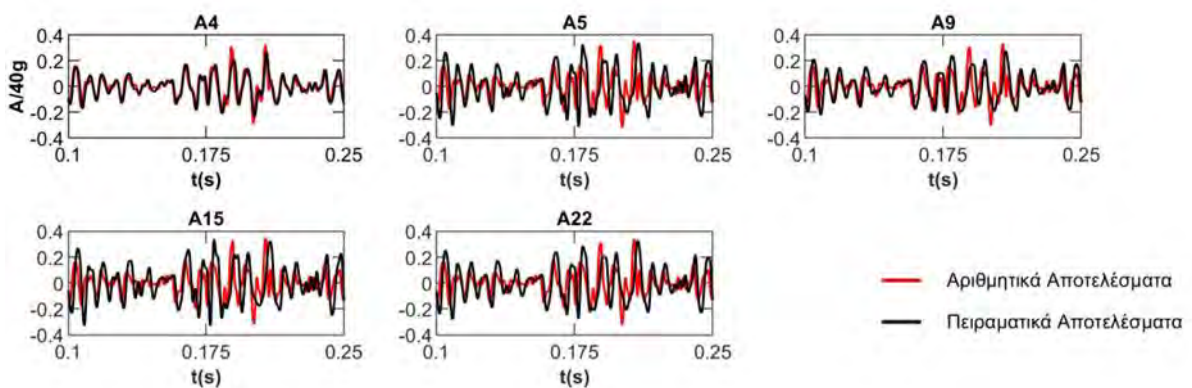
Εικόνα 4.50: Σύγκριση χρονοϊστοριών επιταχύνσεων για την περίπτωση Τ3ΕQ3, με καταμετρημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 1%



Εικόνα 4.51: Σύγκριση χρονοϊστοριών επιταχύνσεων για την περίπτωση T3EQ3, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 3%



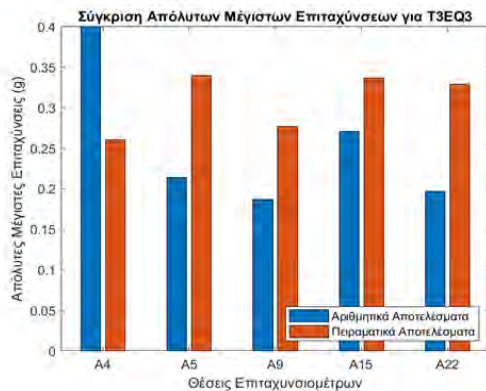
Εικόνα 4.52: Σύγκριση χρονοϊστοριών επιταχύνσεων για την περίπτωση T3EQ3, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 1%



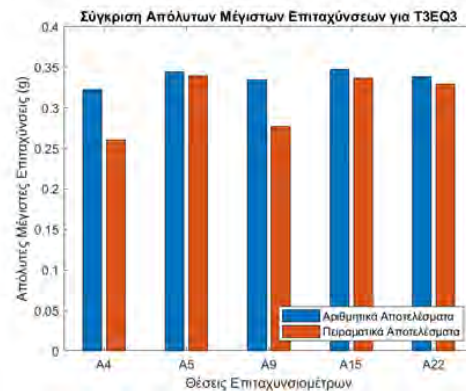
Εικόνα 4.53: Σύγκριση χρονοϊστοριών επιταχύνσεων για την περίπτωση T3EQ3, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 3%

4.1.10 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΛΥΤΩΝ ΜΕΓΙΣΤΩΝ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ Τ3ΕQ3

Στις ακόλουθες συγκρίσεις των απόλυτων μέγιστων επιταχύνσεων εμφανίζονται μέγιστα που δεν παρουσιάζονται για εποπτικούς λόγους. Τα μέγιστα αυτά δε συμβαδίζουν με τα πειραματικά αποτελέσματα και οφείλονται κυρίως σε αριθμητικές αστάθειες.

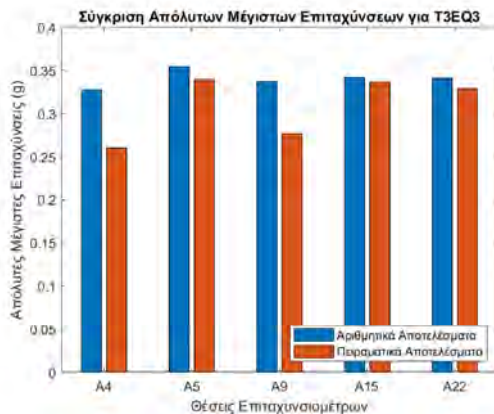


Εικόνα 4.54: Σύγκριση απόλυτων μέγιστων επιταχύνσεων για την περίπτωση Τ3ΕQ3, με σταθερό αρχικό μέτρο διάτμησης και απόσβεση Rayleigh 1%

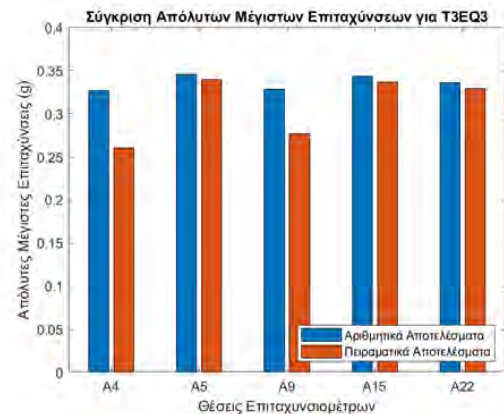


Εικόνα 4.55: Σύγκριση απόλυτων μέγιστων επιταχύνσεων για την περίπτωση Τ3ΕQ3, με καταναμημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 1%

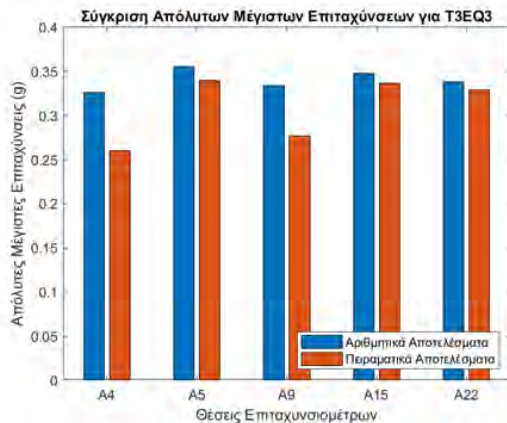
Στην πρώτη περίπτωση, με τη σταθερή τιμή του G_{max} , η διαφορά μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων για τη θέση A22, πάνω στη σήραγγα, είναι 50%, ενώ για τη θέση A15, στο ελεύθερο πεδίο, είναι 22%. Αυτά τα ποσοστά μειώνονται σημαντικά στις υπόλοιπες περιπτώσεις, όπου λαμβάνεται υπόψη η κατανομή του G_{max} . Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η T3 είναι μια δύσκαμπτη σήραγγα με αποτέλεσμα να προκύπτουν μικρότερες παραμορφώσεις και επομένως μικρότερη πτώση του μέτρου διάτμησης G . Έτσι, οι διαφορές μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων είναι μικρότερες. Για τη θέση A22, η ποσοστιαία διαφορά κυμαίνεται από 1,5 έως 3%, ενώ για τη θέση A15 από 2 έως 3,5%. Εξάιρεση αποτελεί η περίπτωση με καταναμημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, χρήση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένων για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και για απόσβεση Rayleigh 1%, όπου, λόγω αριθμητικών ασταθειών, η διαφορά στη θέση A15 φτάνει στο 26%.



Εικόνα 4.56: Σύγκριση απόλυτων μέγιστων επιταχύνσεων για την περίπτωση T3EQ3, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 3%



Εικόνα 4.57: Σύγκριση απόλυτων μέγιστων επιταχύνσεων για την περίπτωση T3EQ3, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 1%

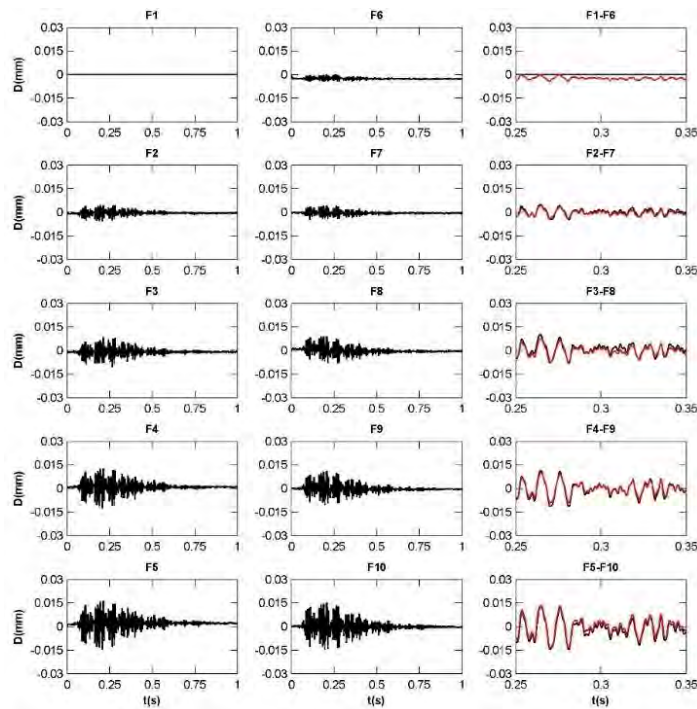


Εικόνα 4.58: Σύγκριση απόλυτων μέγιστων επιταχύνσεων για την περίπτωση T3EQ3, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 3%

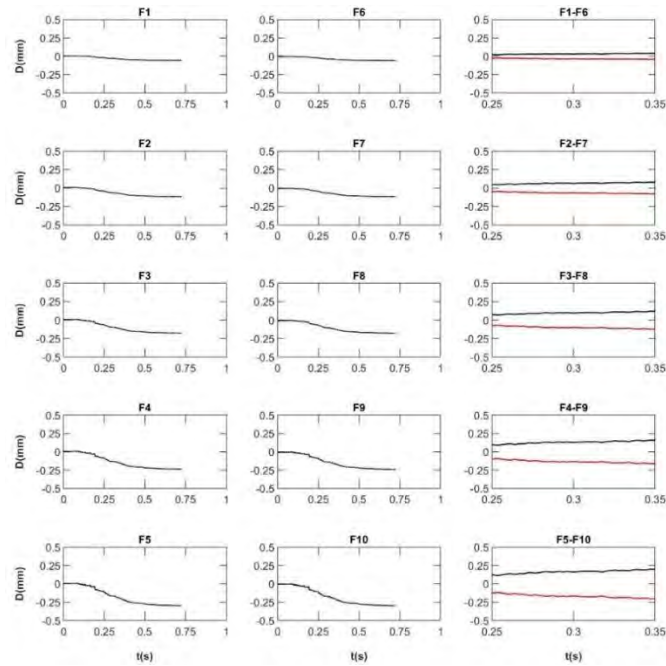
4.1.11 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΩΝ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΠΛΕΥΡΙΚΩΝ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ T3EQ3

Όπως προαναφέρθηκε, λόγω της αυξημένης δυσκαμψίας της σήραγγας T3, αναμένονται μικρότερες παραμορφώσεις στα πλευρικά της τοιχώματα. Αυτό επιβεβαιώνεται

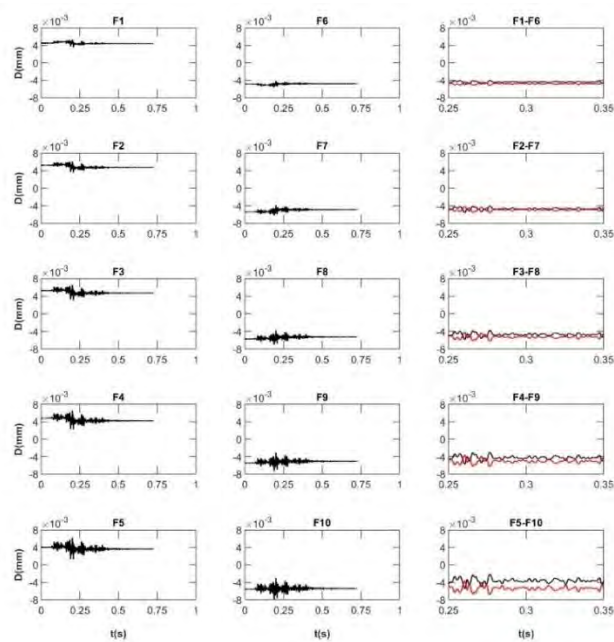
στις Εικόνες 4.60 έως 4.64, όπου οι μετακινήσεις είναι μικρότερες σε σύγκριση με τις αντίστοιχες περιπτώσεις της εύκαμπτης σήραγγας T1 (Εικόνες 4.12 έως 4.16). Το φαινόμενο είναι πιο ευδιάκριτο στη σύγκριση των μέγιστων μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας που ακολουθεί στη συνέχεια.



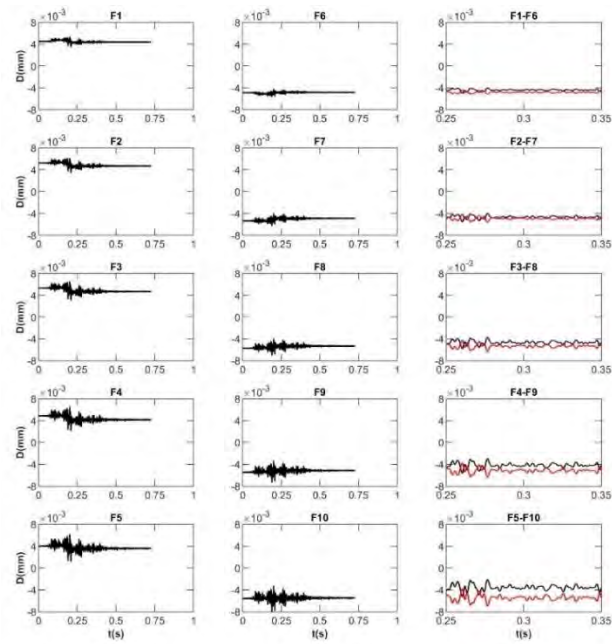
Εικόνα 4.59: Πειραματικά αποτελέσματα χρονοϊστοριών μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T3EQ3



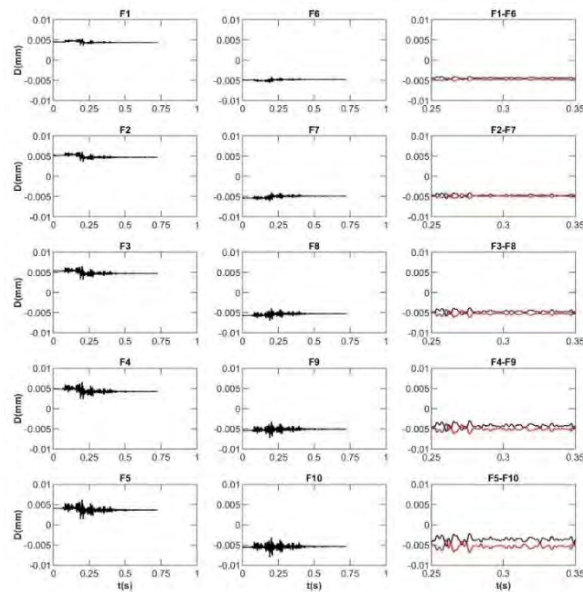
Εικόνα 4.60: Αριθμητικά αποτελέσματα χρονοϊστοριών μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T3EQ3, με σταθερό αρχικό μέτρο διάτμησης και απόσβεση Rayleigh 1%



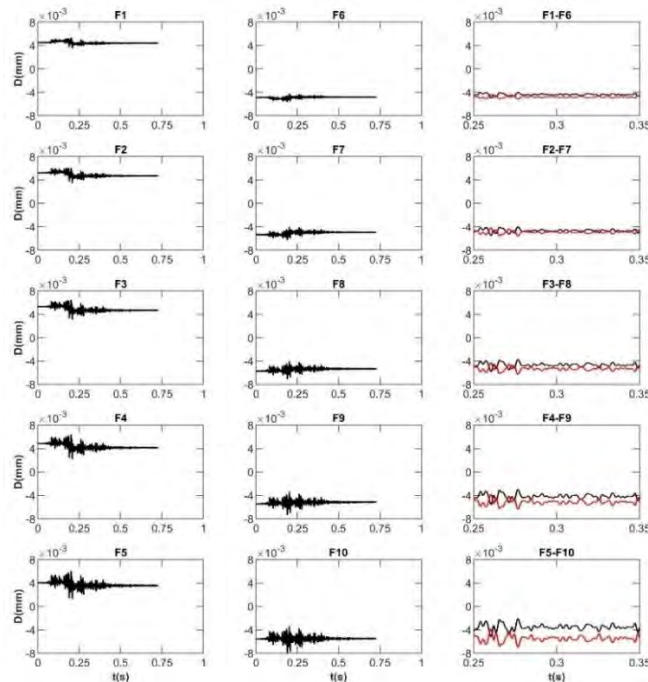
Εικόνα 4.61: Αριθμητικά αποτελέσματα χρονοϊστοριών μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T3EQ3, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 1%



Εικόνα 4.62: Αριθμητικά αποτελέσματα χρονιοιστοριών μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση Τ3ΕQ3, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 3%



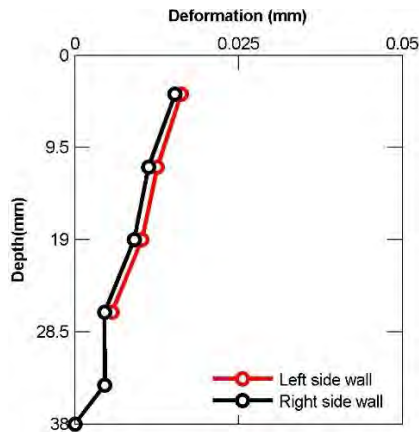
Εικόνα 4.63: Αριθμητικά αποτελέσματα χρονιοιστοριών μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση Τ3ΕQ3, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 1%



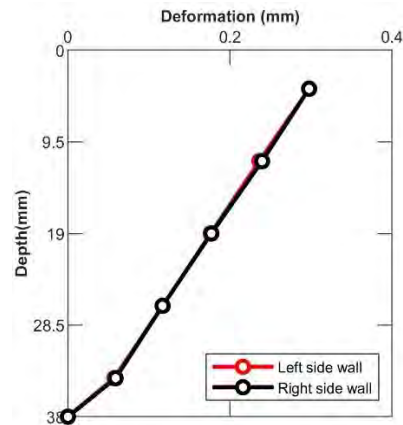
Εικόνα 4.64: Αριθμητικά αποτελέσματα χρονοϊστοριών μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση Τ3ΕQ3, με καταμετρημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 3%

4.1.12 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΓΙΣΤΩΝ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΤΩΝ ΠΛΕΥΡΙΚΩΝ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ Τ3ΕQ3

Στην Εικόνα 4.65 παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα για τη μέγιστη παραμόρφωση των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας, ενώ στις Εικόνες 4.65 έως 4.70 παρατίθενται τα αντίστοιχα αριθμητικά αποτελέσματα. Στην Εικόνα 4.66, όπου εξετάζεται η περίπτωση της σταθερής τιμής του αρχικού μέτρου διάτμησης, διακρίνεται η υπερεκτίμηση της δυσκαμψίας του εδάφους, καθώς οι μετακινήσεις είναι μεγαλύτερες σε σύγκριση με τις πειραματικές. Στις περιπτώσεις με την κατανομή του G_{max} , παρατηρείται υποεκτίμηση της δυσκαμψίας της άμμου, με αποτέλεσμα οι μετακινήσεις να είναι μικρότερες από τις πειραματικές. Παρόλα αυτά, συγκριτικά με τις αντίστοιχες περιπτώσεις της εύκαμπτης T1, οι τιμές είναι και πάλι μικρότερες.

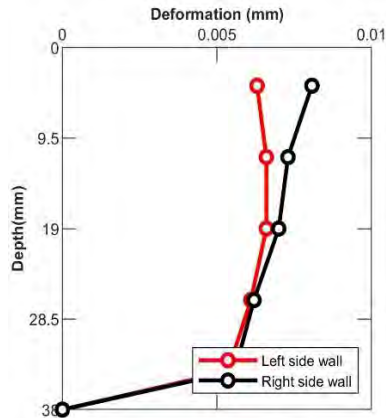


Εικόνα 4.65: Πειραματικά αποτελέσματα για μέγιστη παραμόρφωση των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T3EQ3

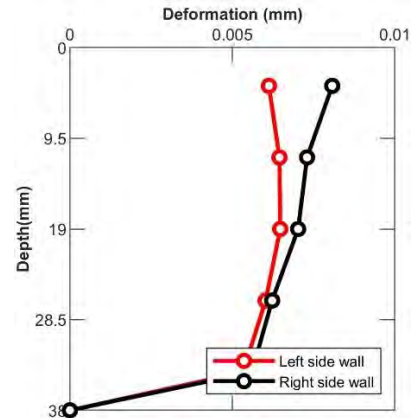


Εικόνα 4.66: Αριθμητικά αποτελέσματα για μέγιστη παραμόρφωση των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T3EQ3, με σταθερό αρχικό μέτρο διάτμησης και απόσβεση Rayleigh 1%

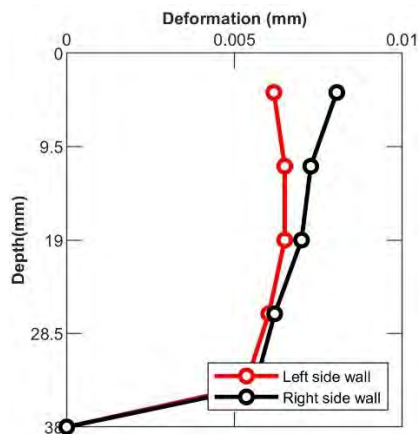
Στις αναλύσεις με την δύσκαμπτη σήραγγα T3, παρατηρείται ότι, σε αντίθεση με την εύκαμπτη σήραγγα T1, τα πειραματικά και τα αριθμητικά αποτελέσματα των μετακινήσεων βρίσκονται στην ίδια τάξη μεγέθους. Σε όλες τις περιπτώσεις με τη θεώρηση της κατανομής του G_{max} , η ποσοστιαία διαφορά από τα πειραματικά αποτελέσματα είναι 75 με 76%. Εξάιρεση αποτελεί για ακόμη μια φορά η πρώτη περίπτωση, με τη σταθερή τιμή του G_{max} , όπου η διαφορά φτάνει 180%.



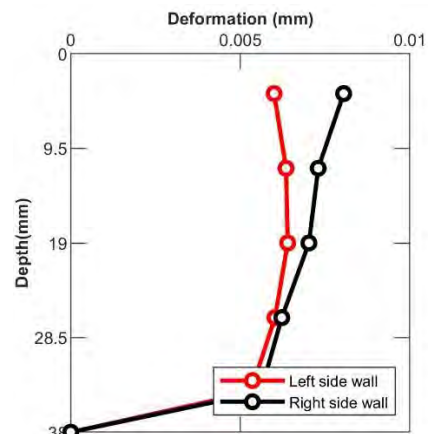
Εικόνα 4.67: Αριθμητικά αποτελέσματα για μέγιστη παραμόρφωση των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση Τ3ΕQ3, με κατανεμημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 1%



Εικόνα 4.68: Αριθμητικά αποτελέσματα για μέγιστη παραμόρφωση των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση Τ3ΕQ3, με κατανεμημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 3%



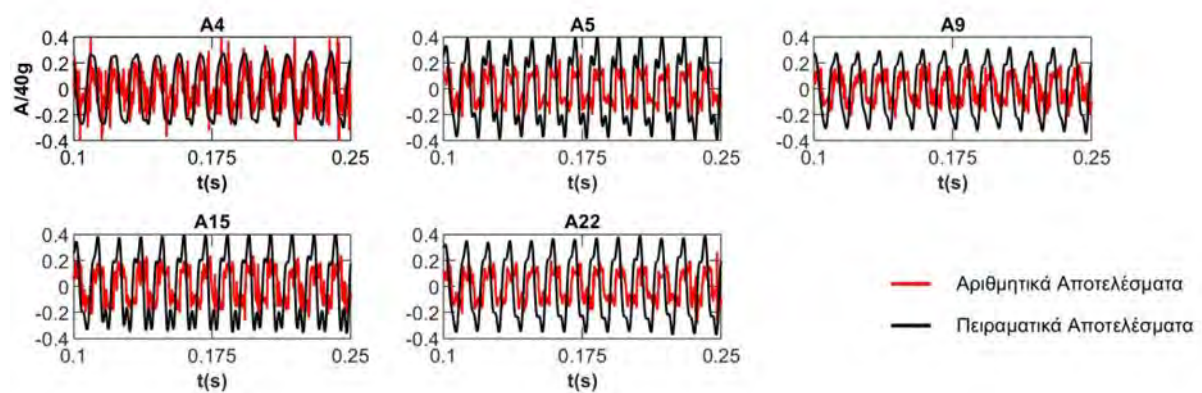
Εικόνα 4.69: Αριθμητικά αποτελέσματα για μέγιστη παραμόρφωση των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση Τ3ΕQ3, με κατανεμημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 1%



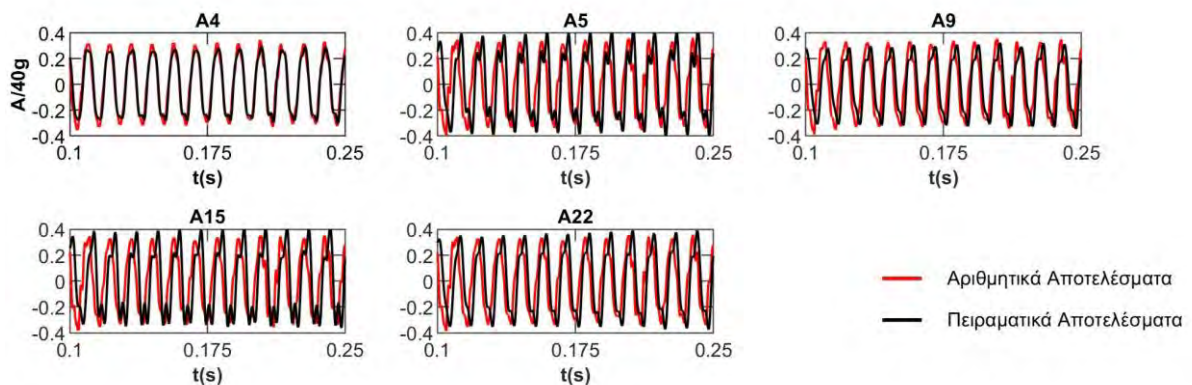
Εικόνα 4.70: Αριθμητικά αποτελέσματα για μέγιστη παραμόρφωση των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση Τ3ΕQ3, με κατανεμημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 3%

4.1.13 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΩΝ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ Τ3ΕQ4

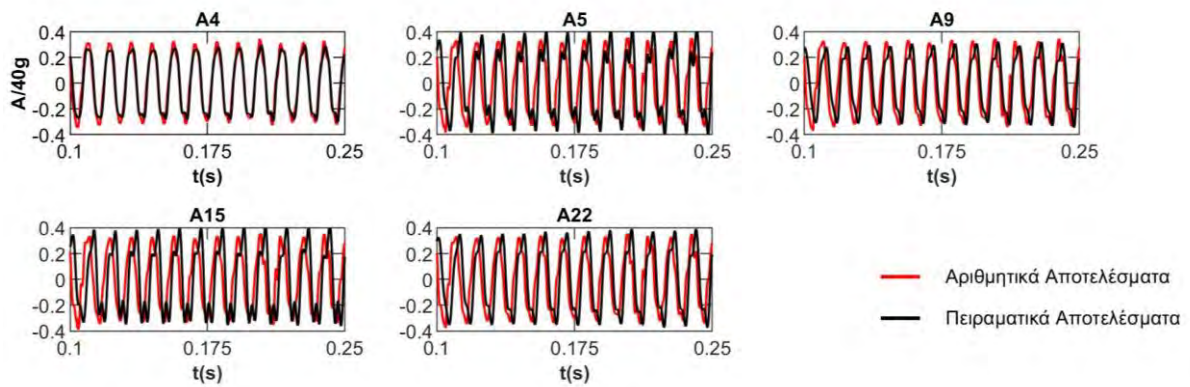
Στις Εικόνες 4.71 έως 4.75 παρουσιάζονται οι συγκρίσεις των χρονοϊστοριών των επιταχύνσεων για την δύσκαμπτη σήραγγα T3 κατά την ημιτονοειδή φόρτιση EQ4. Οι αντιστοιχίσεις είναι καλύτερες στην περίπτωση της T3 καθώς η μείωση της δυσκαμψίας της σήραγγας συμβάλει στην καλύτερη προσέγγιση της δυσκαμψίας της άμμου. Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, τα αποτελέσματα είναι πιο ικανοποιητικά όταν λαμβάνεται υπόψη η κατανομή του αρχικού μέτρου διάτμησης, σε σύγκριση με την σταθερή τιμή του.



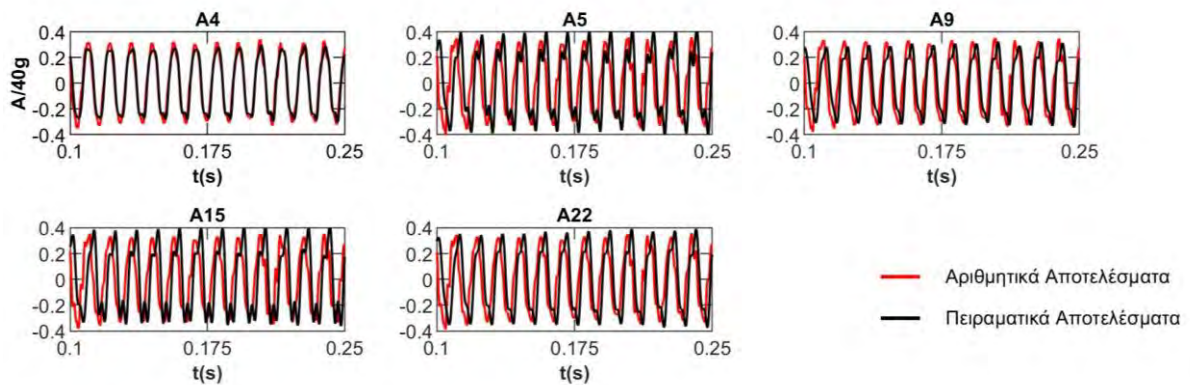
Εικόνα 4.71: Σύγκριση χρονοϊστοριών επιταχύνσεων για την περίπτωση Τ3ΕQ4, με σταθερό αρχικό μέτρο διάτμησης και απόσβεση Rayleigh 1%



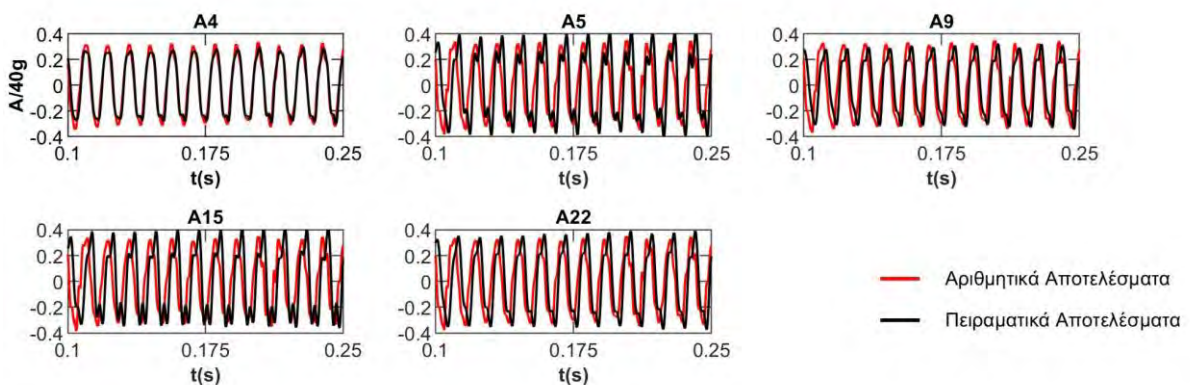
Εικόνα 4.72: Σύγκριση χρονοϊστοριών επιταχύνσεων για την περίπτωση Τ3ΕQ4, με καταμετρημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 1%



Εικόνα 4.73: Σύγκριση χρονιοιστοριών επιταχύνσεων για την περίπτωση Τ3ΕQ4, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 3%



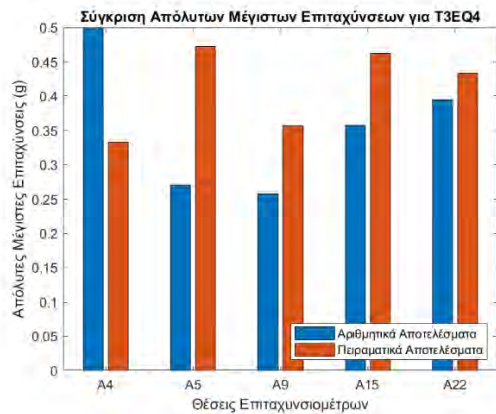
Εικόνα 4.74: Σύγκριση χρονιοιστοριών επιταχύνσεων για την περίπτωση Τ3ΕQ4, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 1%



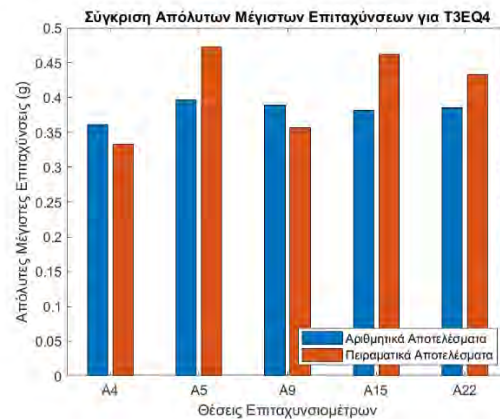
Εικόνα 4.75: Σύγκριση χρονιοιστοριών επιταχύνσεων για την περίπτωση Τ3ΕQ4, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 3%

4.1.14 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΛΥΤΩΝ ΜΕΓΙΣΤΩΝ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ Τ3ΕQ4

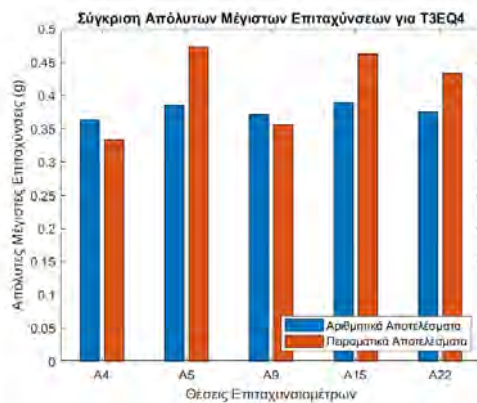
Οι Εικόνες 4.76 έως 4.80 παρουσιάζουν τις συγκρίσεις των απόλυτων μέγιστων επιταχύνσεων. Στην Εικόνα 4.76, για την περίπτωση με σταθερό αρχικό μέτρο διάτμησης, εμφανίζονται μέγιστα στη θέση A4, τα οποία δεν παρουσιάζονται για εποπτικούς λόγους και οφείλονται σε αριθμητικές αστάθειες. Σε αυτή την περίπτωση, η διαφορά με τα πειραματικά αποτελέσματα στη θέση A22 είναι 9%, ενώ στη θέση A15 είναι 25,5%. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις, με το κατανεμημένο αρχικό μέτρο διάτμησης οι ποσοστιαίες διαφορές δε ξεπερνούν σε καμία θέση το 20%.



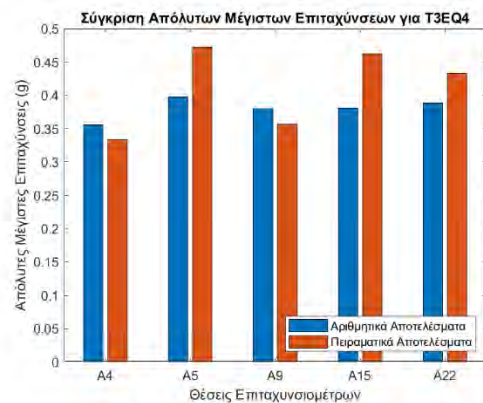
Εικόνα 4.76: Σύγκριση απόλυτων μέγιστων επιταχύνσεων για την περίπτωση Τ3ΕQ4, με σταθερό αρχικό μέτρο διάτμησης και απόσβεση Rayleigh 1%



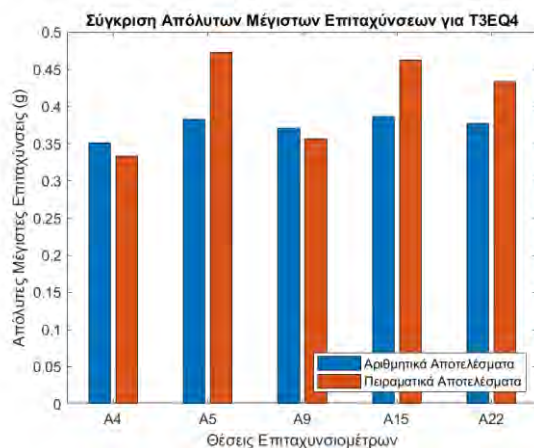
Εικόνα 4.77: Σύγκριση απόλυτων μέγιστων επιταχύνσεων για την περίπτωση Τ3ΕQ4, με κατανεμημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 1%



Εικόνα 4.78: Σύγκριση απόλυτων μέγιστων επιταχύνσεων για την περίπτωση T3EQ4, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 3%



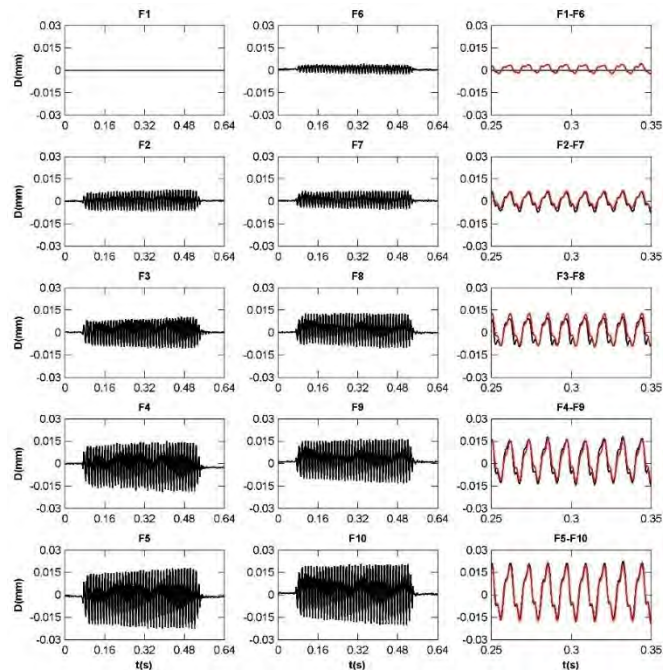
Εικόνα 4.79: Σύγκριση απόλυτων μέγιστων επιταχύνσεων για την περίπτωση T3EQ4, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 1%



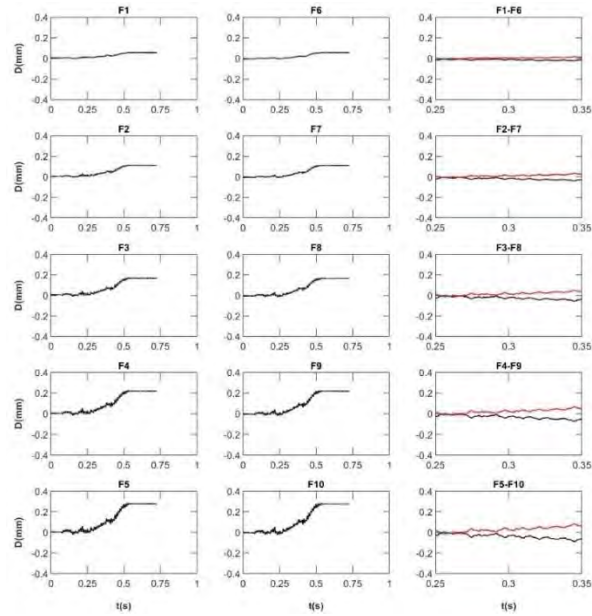
Εικόνα 4.80: Σύγκριση απόλυτων μέγιστων επιταχύνσεων για την περίπτωση T3EQ4, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 3%

4.1.15 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΩΝ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΠΛΕΥΡΙΚΩΝ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ Τ3ΕQ4

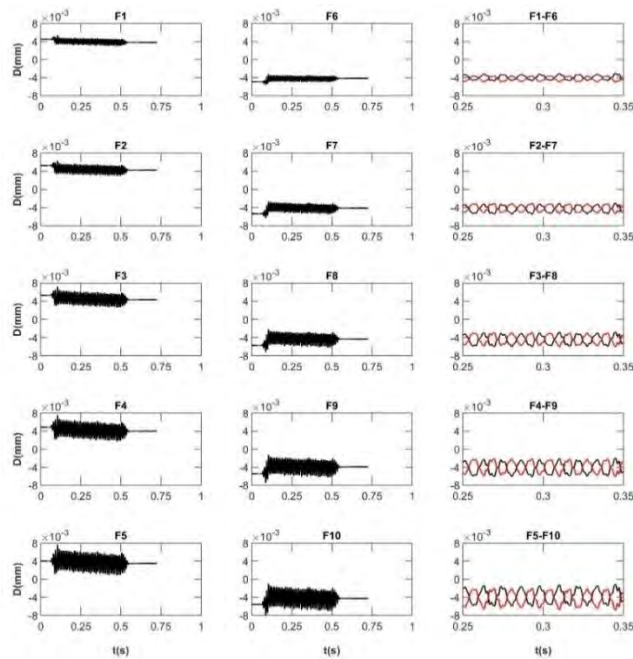
Στην Εικόνα 4.81 παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα των χρονοϊστοριών των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας, ενώ στις Εικόνες 4.82 έως 4.86 αποτυπώνονται τα αριθμητικά αποτελέσματα για κάθε εξεταζόμενη περίπτωση. Όπως και με την εύκαμπτη σήραγγα T1, παρατηρούνται μόνιμες παραμορφώσεις λόγω πλαστικοποιήσεων. Οι ισχυροί κύκλοι φόρτισης είναι πιο συχνοί λόγω της περιοδικότητας του σήματος, οδηγώντας σε περισσότερες πλαστικοποιήσεις συγκριτικά με τα σήματα EQ1 έως EQ3. Στην πρώτη περίπτωση, με το σταθερό $G_{\max}$, οι μετακινήσεις είναι μεγαλύτερες από τις πειραματικές, ενώ στις περιπτώσεις με την κατανομή του $G_{\max}$, εμφανίζονται αρκετά μικρότερες.



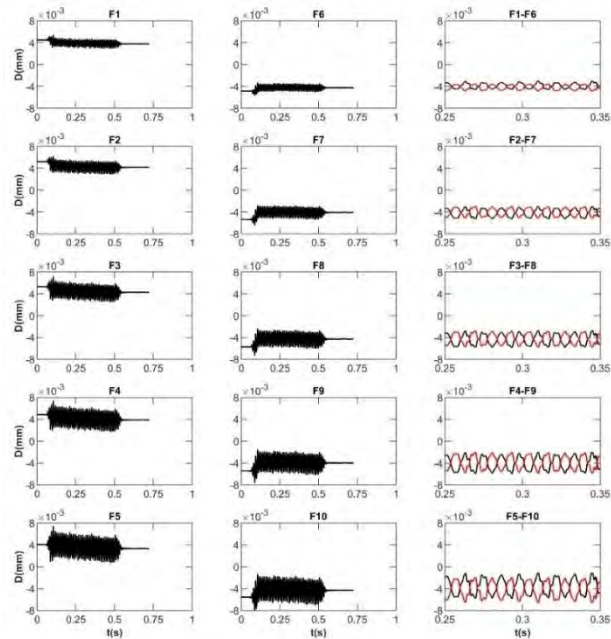
Εικόνα 4.81: Πειραματικά αποτελέσματα χρονοϊστοριών μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση Τ3ΕQ4



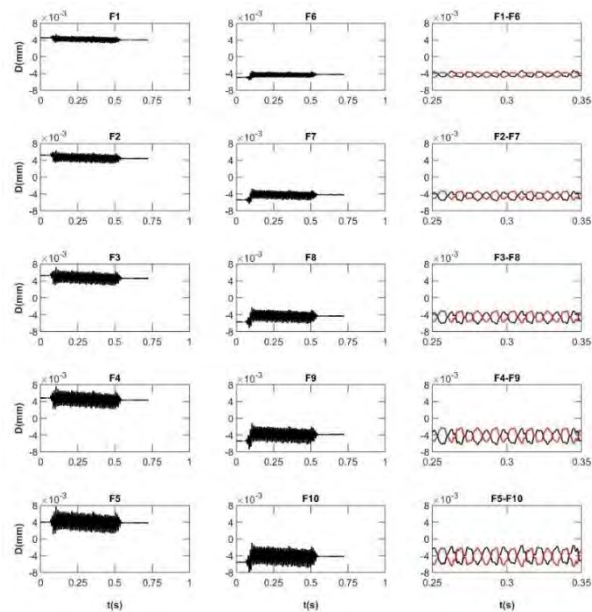
Εικόνα 4.82: Αριθμητικά αποτελέσματα χρονοϊστοριών μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T3EQ4, με σταθερό αρχικό μέτρο διάτμησης και απόσβεση Rayleigh 1%



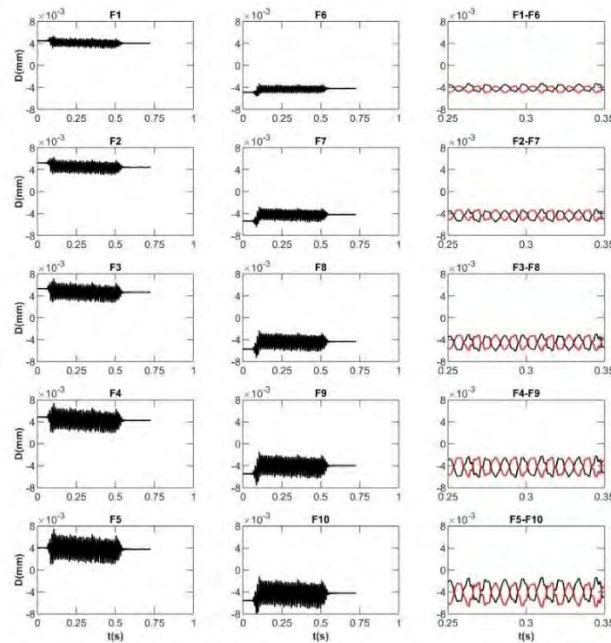
Εικόνα 4.83: Αριθμητικά αποτελέσματα χρονοϊστοριών μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T3EQ4, με καταναμημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 1%



Εικόνα 4.84: Αριθμητικά αποτελέσματα χρονοϊστοριών μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T3EQ4, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 3%



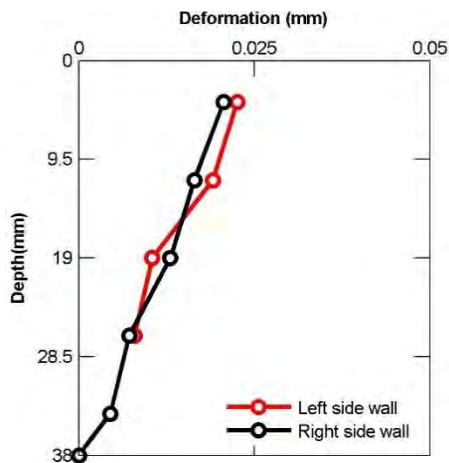
Εικόνα 4.85: Αριθμητικά αποτελέσματα χρονοϊστοριών μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T3EQ4, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 1%



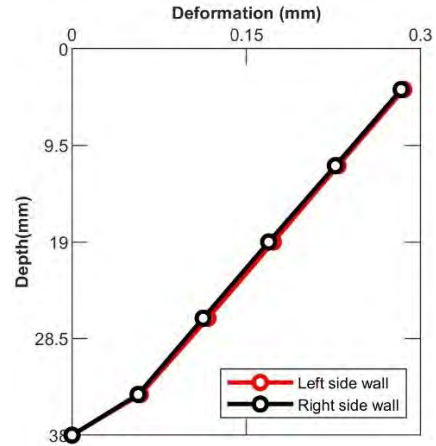
Εικόνα 4.86: Αριθμητικά αποτελέσματα χρονοϊστοριών μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T3EQ4, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 3%

4.1.16 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΓΙΣΤΩΝ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΤΩΝ ΠΛΕΥΡΙΚΩΝ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ T3EQ4

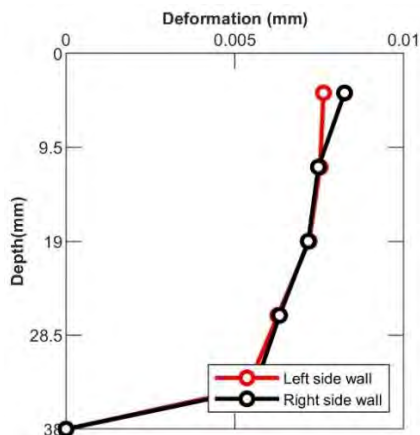
Στην Εικόνα 4.87 παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα των μέγιστων μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας, όπου παρατηρείται σχεδόν ταύτιση στις κινήσεις των δύο τοιχωμάτων. Αυτή η συμπεριφορά επαναλαμβάνεται και στα αριθμητικά αποτελέσματα (Εικόνες 4.88 έως 4.92), αν και οι τιμές διαφέρουν αρκετά. Στην περίπτωση με σταθερή τιμή του G_{max} , τα τοιχώματα κινούνται πανομοιότυπα, αλλά οι τιμές των μετακινήσεων είναι πολύ μεγαλύτερες των πειραματικών αποτελεσμάτων, με διαφορά που αγγίζει το 172%. Αντίθετα, στις περιπτώσεις με κατανομή του G_{max} , τα τοιχώματα κινούνται επίσης μαζί, αλλά με πολύ μικρότερες μετακινήσεις από τις αναμενόμενες, δηλαδή κυμαίνονται μεταξύ 91 και 93%.



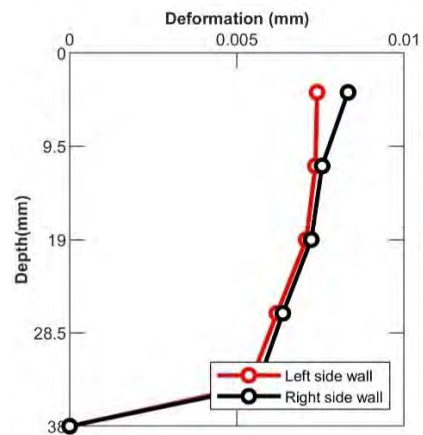
Εικόνα 4.87: Πειραματικά αποτελέσματα για μέγιστη παραμόρφωση των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T3EQ4



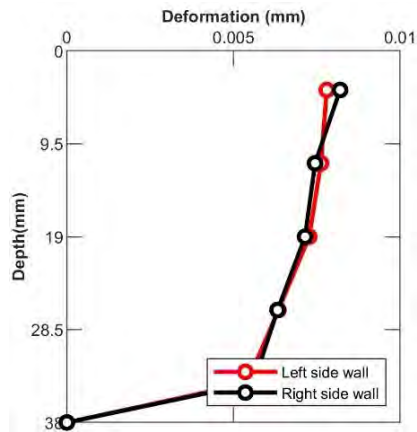
Εικόνα 4.88: Αριθμητικά αποτελέσματα για μέγιστη παραμόρφωση των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T3EQ4, με σταθερό αρχικό μέτρο διάτμησης και απόσβεση Rayleigh 1%



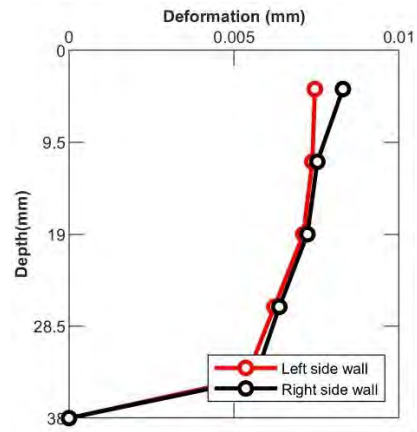
Εικόνα 4.89: Αριθμητικά αποτελέσματα για μέγιστη παραμόρφωση των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T3EQ4, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 1%



Εικόνα 4.90: Αριθμητικά αποτελέσματα για μέγιστη παραμόρφωση των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T3EQ4, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 3%



Εικόνα 4.91: Αριθμητικά αποτελέσματα για μέγιστη παραμόρφωση των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T3EQ4, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 1%



Εικόνα 4.92: Αριθμητικά αποτελέσματα για μέγιστη παραμόρφωση των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T3EQ4, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 3%

Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα

Οι σήραγγες αποτελούν κρίσιμα τμήματα των δικτύων μεταφορών και των υποδομών κοινής ωφέλειας. Η ανάγκη για την κατασκευή τέτοιων έργων σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές, καθιστά απαραίτητη την υιοθέτηση ενός αποτελεσματικού αντισεισμικού σχεδιασμού. Βασική προϋπόθεση για αυτόν το σχεδιασμό είναι η σε βάθος κατανόηση της σεισμικής συμπεριφοράς των σηράγγων. Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα εργασία εξετάζει παράγοντες που επηρεάζουν την απόκριση σηράγγων σε σεισμική διέγερση. Η ανάλυση επικεντρώνεται στη σεισμική συμπεριφορά έναντι ταλάντωσης στην εγκάρσια έννοια και χρησιμοποιεί αριθμητικές μεθόδους για να διερευνήσει την απόκριση αυτή. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις σήραγγες ορθογωνικής διατομής, καθώς για αυτές υπάρχει σημαντικό κενό στη διαθέσιμη βιβλιογραφία.

Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η αριθμητική προσομοίωση πειραμάτων σεισμικής τράπεζας σε γεωτεχνικό φυγοκεντριστή. Τα πειράματα διεξήχθησαν σε υπό κλίμακα δοκίμια ορθογωνικών σηράγγων σε άμμο, στο ερευνητικό κέντρο IFSTTAR στη Γαλλία. Οι επιταχύνσεις σε διάφορες θέσεις του εδάφους και των σηράγγων καθώς και οι οριζόντιες μετακινήσεις των τοιχωμάτων των σηράγγων που υπολογίστηκαν αριθμητικά για διάφορες υποθέσεις και παραδοχές, συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα, σε μία προσπάθεια να εξεταστούν τόσο η συμπεριφορά της κατασκευής, όσο και η ακρίβεια του υπολογιστικού μοντέλου στην προσομοίωση της συμπεριφοράς του συστήματος.

Τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται παρακάτω:

- Επιβεβαιώθηκε από όλες τις αναλύσεις η διατμητική παραμόρφωση των ορθογωνικών σηράγγων (racking) υπό το καθεστώς σεισμικής ταλάντωσης στην εγκάρσια έννοια.

- Για τις εξεταζόμενες παραδοχές, αναφορικά με το αρχικό μέτρο διάτμησης της άμμου, αποδείχθηκε ότι η απλοποιημένη προσέγγιση ανάλυσης, η οποία υιοθετεί σταθερή τιμή του αρχικού μέτρου διάτμησης σε όλο το εδαφικό προσομοίωμα, δύναται να υπερεκτιμά τη σεισμική συμπεριφορά της σήραγγας, ενώ όταν λαμβάνεται κατανομή του αρχικού μέτρου διάτμησης υποεκτιμάται η σεισμική της συμπεριφορά.
- Τα φαινόμενα υπερεκτίμησης ή υποεκτίμησης της αρχικής δυσκαμψίας της άμμου, αντίστοιχα, εμφανίζονται εντονότερα στις περιπτώσεις της εύκαμπτης σήραγγας (τεστ T1).
- Αναδείχθηκε η σημαντική επιρροή της δυσκαμψίας της σήραγγας στη σχετική δυσκαμψία σήραγγας-εδάφους, η οποία αρχικά επηρεάζει το αρχικό μέτρο διάτμησης $G_{\max}$ και έπειτα τη πτώση της δυσκαμψίας της άμμου. Όσο πιο εύκαμπτη είναι η σήραγγα τόσο μεγαλύτερες είναι οι παραμορφώσεις της άμμου περιμετρικά της σήραγγας κατά τη διέγερση (σε σχέση με τη δύσκαμπτη σήραγγα) άρα πιο έντονη η πτώση της δυσκαμψίας της άμμου περιμετρικά της σήραγγας.
- Η μέση τάση σ_m μειώνεται στην περιοχή γύρω από τη σήραγγα, γεγονός που συνεπάγεται τη μείωση του αρχικού μέτρου διάτμησης $G_{\max}$. Αυτό οδηγεί σε αυξημένες πλαστικοποιήσεις και μόνιμες παραμορφώσεις γύρω από τη σήραγγα.
- Στο ημιτονοειδές σήμα EQ4 παρατηρούνται μεγαλύτερες πλαστικοποιήσεις περιμετρικά της σήραγγας που οφείλονται στον αυξημένο αριθμό των ισχυρών κύκλων φόρτισης της διέγερσης.
- Δεν παρατηρούνται ιδιαίτερες διαφορές όταν μεταβάλλεται η απόσβεση Rayleigh του συστήματος ή η κατανομή του αρχικού μέτρου διάτμησης ή οι ιδιότητες της διεπιφάνειας εδάφους-κατασκευής.
- Το προσομοίωμα κατέστη δυνατό να αναπαράξει την αδρανειακή απόκριση του συστήματος, ωστόσο παρατηρούνται σημαντικές αποκλίσεις στις μετακινήσεις σε σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα, λόγω της πολυπλοκότητας του προβλήματος.

Η έρευνα θα μπορούσε μελλοντικά να επικεντρωθεί στην επίδραση του νερού στη σεισμική απόκριση του συστήματος. Η παρουσία νερού μειώνει τις ενεργές τάσεις, με αποτέλεσμα τη μείωση της αντοχής του εδάφους, καθιστώντας απαραίτητη τη διερεύνηση της συμπεριφοράς του συστήματος σε τέτοιες συνθήκες. Επιπλέον, θα ήταν ιδιαίτερα ενδιαφέρον να μελετηθεί η συμπεριφορά των σιράγγων σε πολυστρωματικό έδαφος, όπου οι ετερογενείς ιδιότητες του εδάφους ενδέχεται να επηρεάσουν σημαντικά τη συνολική απόκριση του συστήματος.

Κεφάλαιο 6 Βιβλιογραφία

- FLAC Version, 7. (2011). Dynamic analysis manual.
- Hardin B.O. and Drnevich V.P. (1972) Shear modulus and damping in soil. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 98(7):667-692.
- Hashash Y.M.A., Hook J.J., Schmidt B. and Yao J.I-C. (2001) Seismic design and analysis of underground structures. Tunneling and Underground Space Technology, 16(2):247-293.
- Ishibashi I. and Zhang X. (1993) Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay. Soils and Foundations, 33(1):182-191.
- Kramer S.L. (1996) Geotechnical earthquake engineering. Prentice Hall Inc, Upper Saddle River, New Jersey, 653 p.
- Kuhlemeyer R.L. and Lysmer J. (1973) Finite element method accuracy for wave propagation problems. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 99(5):421-427.
- Li Z., Escoffier S. and Kotronis P. (2013) Using centrifuge tests data to identify the dynamic soil properties: Application to Fontainebleau sand. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 52:77-87.
- Li, T. (2012). Damage to mountain tunnels related to the Wenchuan earthquake and some suggestions for aseismic tunnel construction. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 71, 297-308.
- Penzien J. (2000) Seismically induced racking of tunnel linings. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 29:683-691.
- Penzien J. and Wu C. (1998) Stresses in linings of bored tunnels. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 27:283-300.

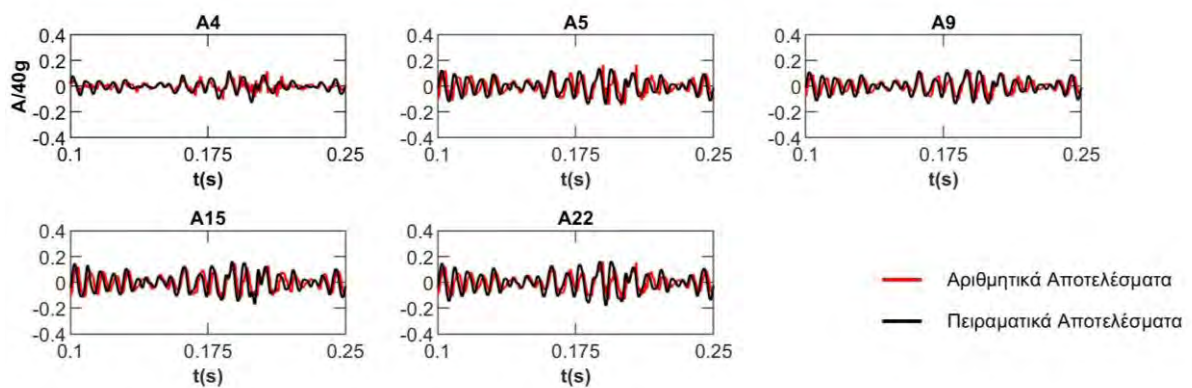
- Pitilakis K. & Tsinidis G. (2017) Seismic Performance and Analysis of Tunnels. Aristotle University of Thessaloniki, School of Civil Engineering, Research Unit of Soil Dynamics and Geotechnical Earthquake Engineering SDGEE, Lecture slides
- Pitilakis K. (2010) Geotechnical earthquake engineering, Ziti Publications, Thessaloniki, Greece, 752 p. [in Greek]
- Pitilakis K. and Tsinidis G. (2014) Performance and seismic design of underground structures. In: Maugeri M and Soccodato C (eds.) Earthquake geotechnical engineering design, Geotechnical Geological and Earthquake Engineering, 28:279-340, Springer international publishing, Switzerland.
- Sharma S. and Judd W.R. (1991) Underground opening damage from earthquakes. Engineering Geology, 30:263-276.
- St. John C.M. and Zahrah T.F. (1987) Aseismic design of underground structures. Tunnelling and Underground Space Technology, 2(2):165–197.
- Taylor R.N. (1995). Centrifuge in modelling: principles and scale effects. In: Taylor R.N(ed.) Geotechnical centrifuge technology, Blackie Academic & Professional, Glasgow.
- Tsinidis G., Pitilakis K., Madabhushi G. and Heron C. (2015a) Dynamic response of flexible square tunnels: centrifuge testing and validation of existing design methodologies. Geotechnique, 65(5):401-417.
- Tsinidis G., Rovithis E., Pitilakis K. and Chazelas J.L. (2015c) Dynamic response of shallow rectangular tunnels in sand by centrifuge testing. In: Taucer F. and Apostolska R. (eds.) Experimental research in earthquake engineering - EU-SERIES concluding workshop, Geotechnical Geological and Earthquake Engineering, 35:493-507, Springer International Publishing, Switzerland.
- Tsinidis, G. (2016). On the seismic behaviour and design of tunnels (PhD thesis). Aristotle University of Thessaloniki.
- Tsinidis, G., de Silva, F., Anastasopoulos, I., Bilotta, E., Bobet, A., Hashash, Y. M. A., He, C., Kampas, G., Knappett, J., Madabhushi, G., Nikitas, N., Pitilakis, K., Silvestri, F., Viggiani, G., & Fuentes, R. (2020). Seismic behaviour of tunnels: From experiments to analysis. Tunnelling and Underground Space Technology, 99, 103334.

- Tsinidis, G., Pitilakis, K., Madabhushi, G., & Heron, C. (2015). Dynamic response of flexible square tunnels: Centrifuge testing and validation of existing design methodologies. *Géotechnique*, 65(5), 401–417.
- Ulgen, D., Saglam, S., & Ozkan, M. Y. (2015). Assessment of racking deformation of rectangular underground structures by centrifuge tests. *Géotechnique Letters* 5, 261-268
- Wang J.N. (1993) Seismic design of tunnels: A simple state of the art design approach. Parsons Brinckerhoff Inc., New York.
- Wang W.L., Wang T.T., Su J.J., Lin C.H., Seng C.R. and Huang T.H. (2001) Assessment of damage in mountain tunnels due to the Taiwan Chi-Chi earthquake. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 16:133-150.
- Wang, Z., Gao, B., Jiang, Y., & Yuan, S. (2009). Investigation and assessment on mountain tunnels and geotechnical damage after the Wenchuan earthquake. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 52, 546-558.
- Wells D.L. and Coppersmith K.J. (1994) New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(4):974-1002.
- Πιτιλάκης, Κ., Τσινίδης, Γ., (2012) Εισαγωγή στον αντισεισμικό σχεδιασμό αγωγών, σιδηρόδρομων και εκτεταμένων υπογείων κατασκευών. Σημειώσεις ΑΣΤΕ, Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα: Αντισεισμικός Σχεδιασμός Τεχνικών Έργων.
- Τσινίδης, Γ. (2022). Applications FLAC-2D, Υπολογιστική Γεωτεχνική Μηχανική, Σημειώσεις μαθήματος. Retrieved April 2023, from <https://eclass.uth.gr/>
- Τσινίδης, Γ., & Πιτιλάκης, Κ. (2011). Γενική παρουσίαση του γραφικού περιβάλλοντος του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS v6.9-1.

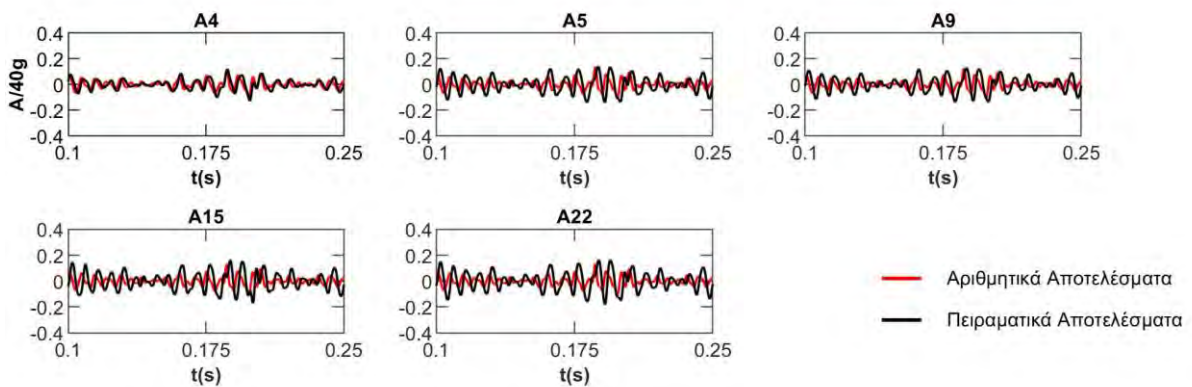
Κεφάλαιο 7 Παράρτημα

7.1 Περίπτωση T1EQ1

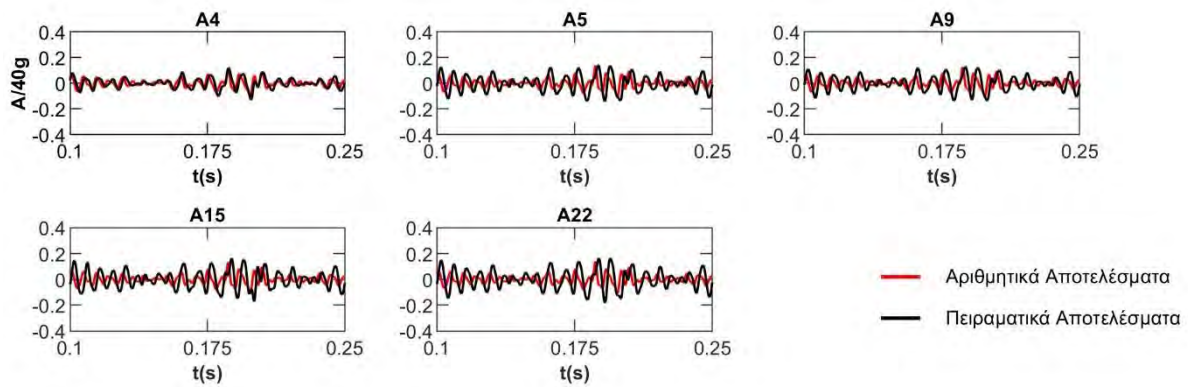
7.1.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΩΝ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΕΩΝ



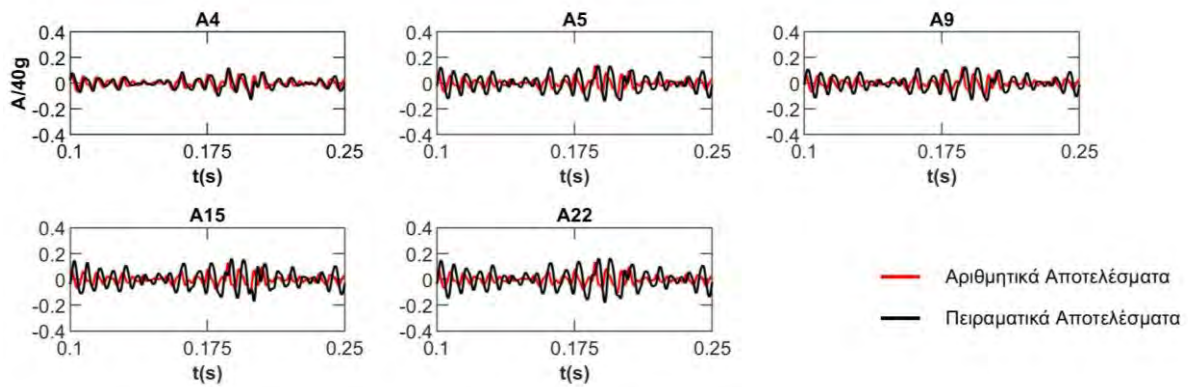
Εικόνα Α. 1: Σύγκριση χρονοϊστοριών επιταχύνσεων για την περίπτωση T1EQ1, με σταθερό αρχικό μέτρο διάτμησης και απόσβεση Rayleigh 1%



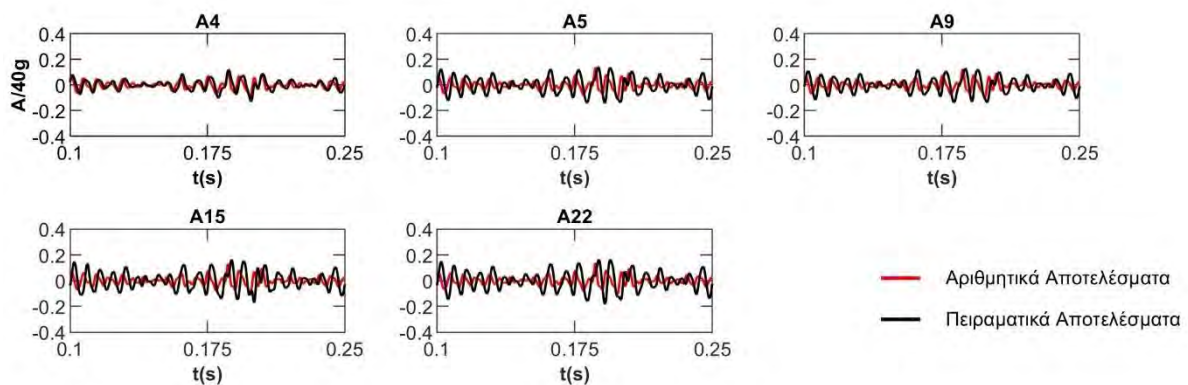
Εικόνα Α. 2: Σύγκριση χρονοϊστοριών επιταχύνσεων για την περίπτωση T1EQ1, με καταναμημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 1%



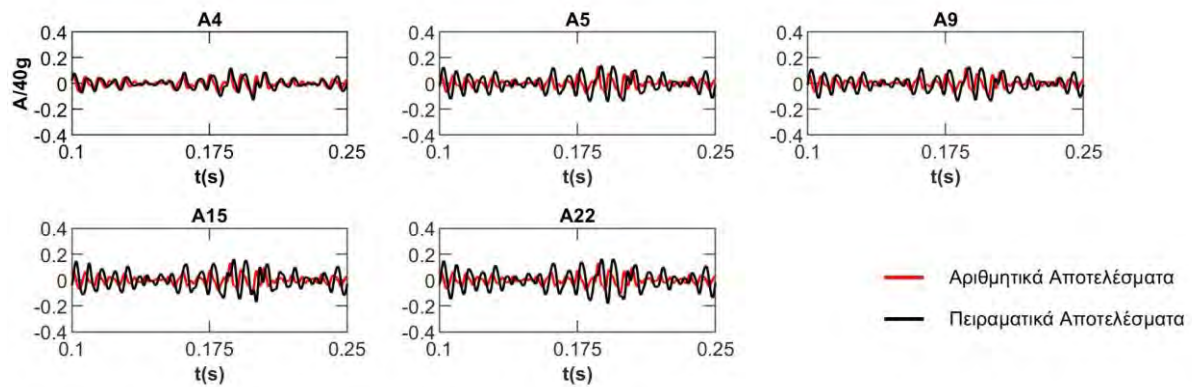
Εικόνα Α. 3: Σύγκριση χρονοϊστοριών επιταχύνσεων για την περίπτωση T1EQ1, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκλιωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 3%



Εικόνα Α. 4: Σύγκριση χρονοϊστοριών επιταχύνσεων για την περίπτωση T1EQ1, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 1%

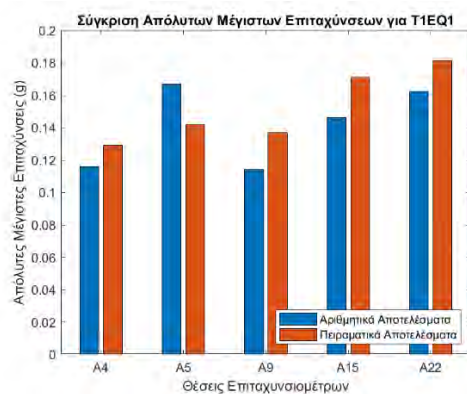


Εικόνα Α. 5: Σύγκριση χρονοϊστοριών επιταχύνσεων για την περίπτωση T1EQ1, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 3%

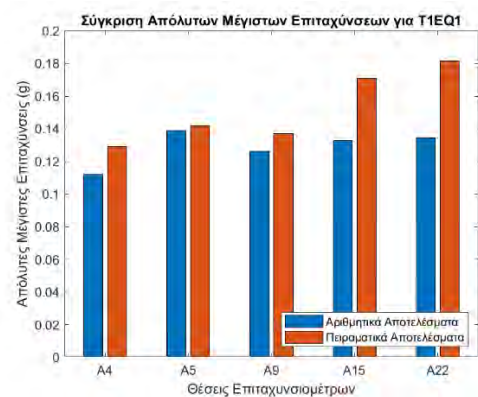


Εικόνα Α. 6: Σύγκριση χρονοϊστοριών επιταχύνσεων για την περίπτωση T1EQ1, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 1%, με πλήρη σύνδεση σήραγγας-εδάφους

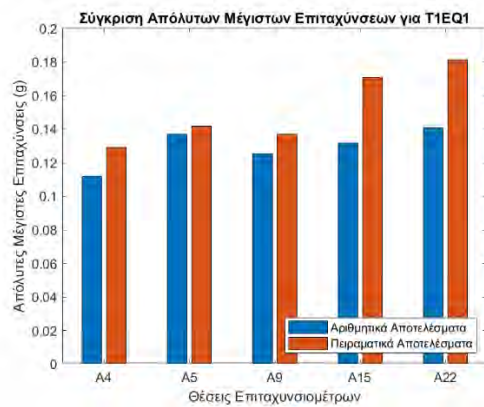
7.1.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΛΥΤΩΝ ΜΕΓΙΣΤΩΝ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΕΩΝ



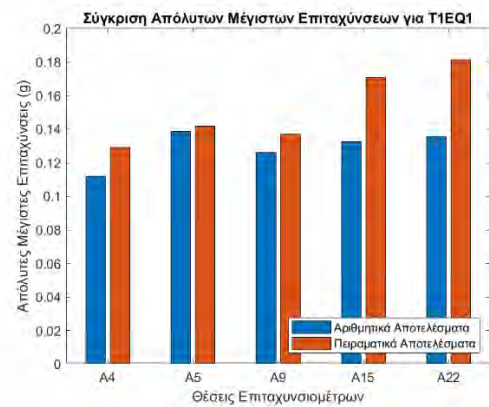
Εικόνα Α. 7: Σύγκριση απόλυτων μέγιστων επιταχύνσεων για την περίπτωση T1EQ1, με σταθερό αρχικό μέτρο διάτμησης και απόσβεση Rayleigh 1%



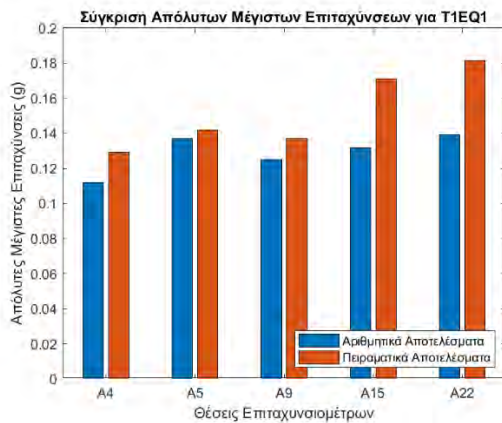
Εικόνα Α. 8: Σύγκριση απόλυτων μέγιστων επιταχύνσεων για την περίπτωση T1EQ1, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 1%



Εικόνα Α. 9: Σύγκριση απόλυτων μέγιστων επιταχύνσεων για την περίπτωση T1EQ1, με κατανεμημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 3%

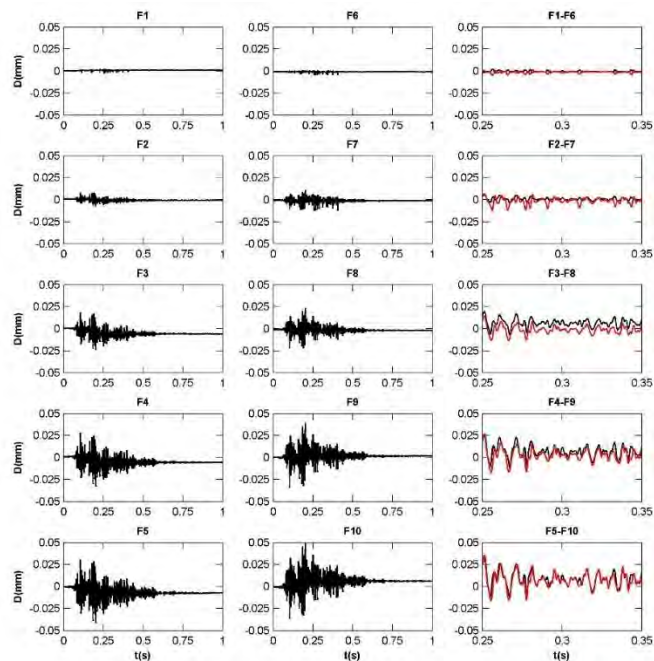


Εικόνα Α. 10: Σύγκριση απόλυτων μέγιστων επιταχύνσεων για την περίπτωση T1EQ1, με κατανεμημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 1%

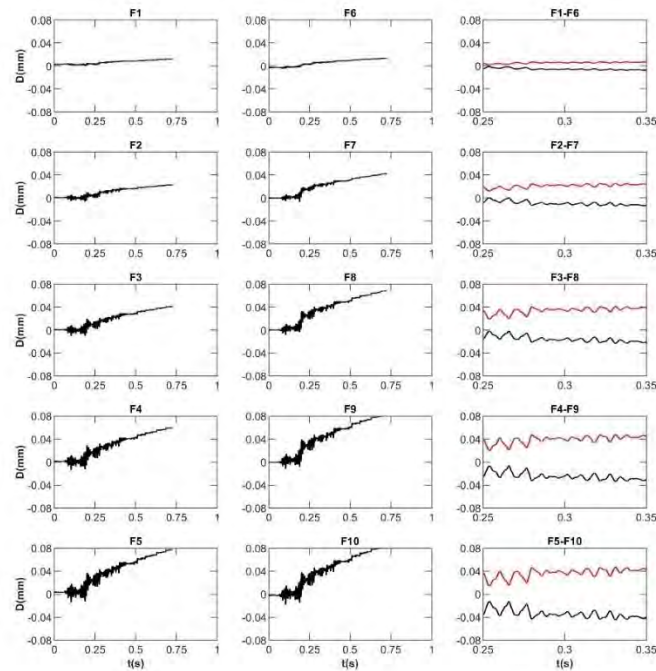


Εικόνα Α. 11: Σύγκριση απόλυτων μέγιστων επιταχύνσεων για την περίπτωση T1EQ1, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 3%

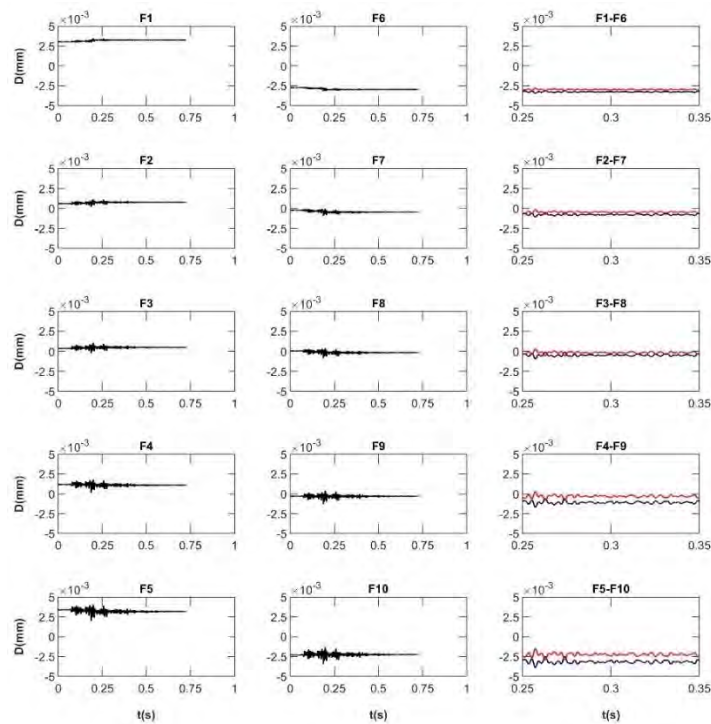
7.1.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΩΝ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΤΩΝ ΠΛΕΥΡΙΚΩΝ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ



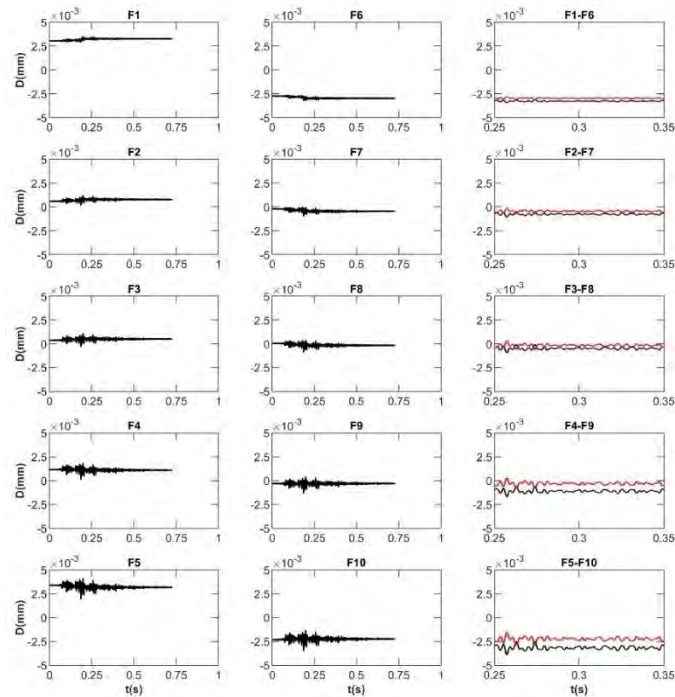
Εικόνα Α. 12: Πειραματικά αποτελέσματα χρονοϊστοριών μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T1EQ1



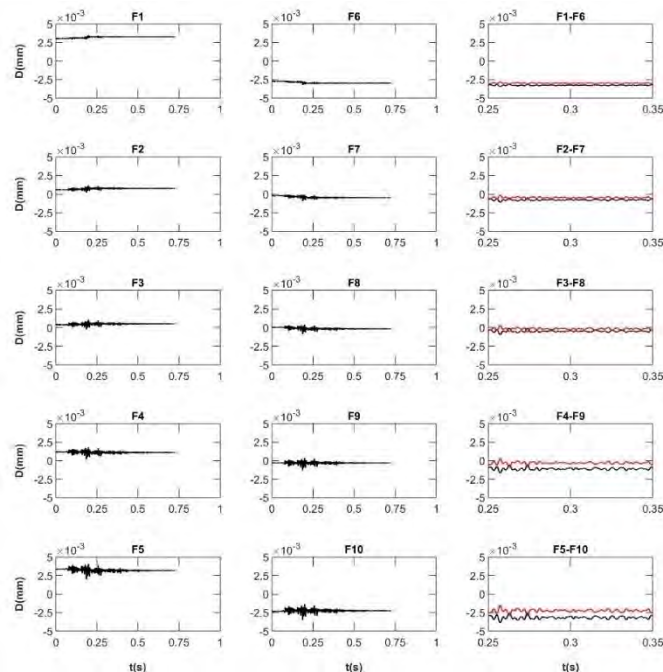
Εικόνα Α. 13: Αριθμητικά αποτελέσματα χρονοϊστοριών μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T1EQ1, με σταθερό αρχικό μέτρο διάτμησης και απόσβεση Rayleigh 1%



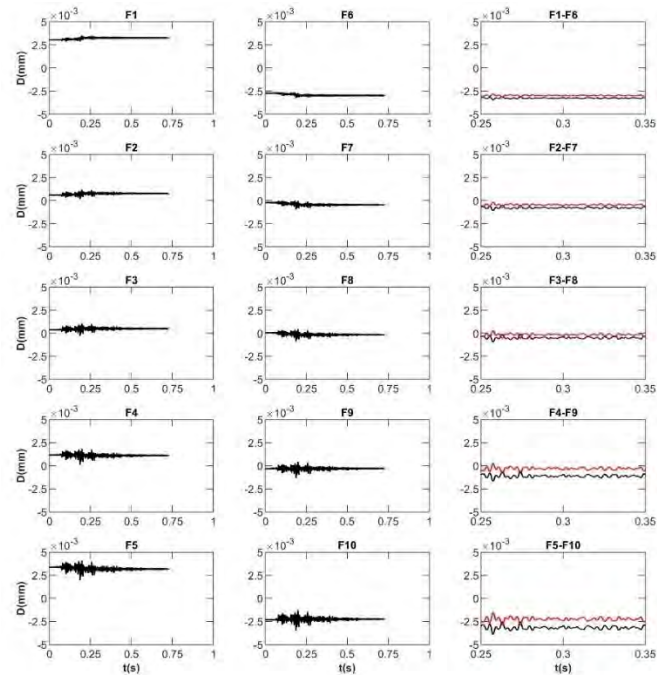
Εικόνα Α. 14: Αριθμητικά αποτελέσματα χρονοϊστοριών μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T1EQ1, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 1%



Εικόνα Α. 15: Αριθμητικά αποτελέσματα χρονοϊστοριών μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T1EQ1, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 3%

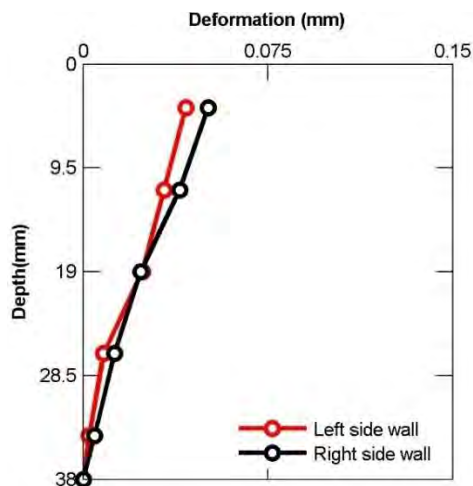


Εικόνα Α. 16: Αριθμητικά αποτελέσματα χρονοϊστοριών μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T1EQ1, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 1%

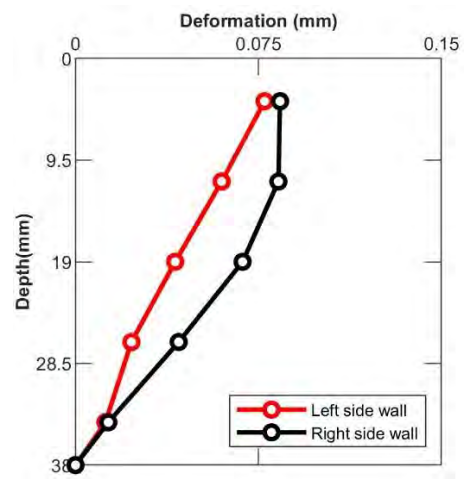


Εικόνα Α. 17: Αριθμητικά αποτελέσματα χρονοϊστοριών μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T1EQ1, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 3%

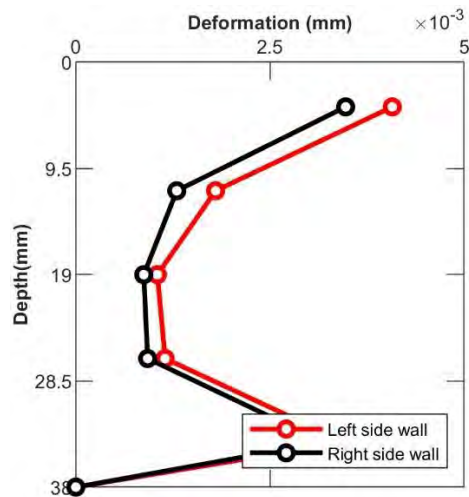
7.1.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΓΙΣΤΩΝ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΤΩΝ ΠΛΕΥΡΙΚΩΝ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ



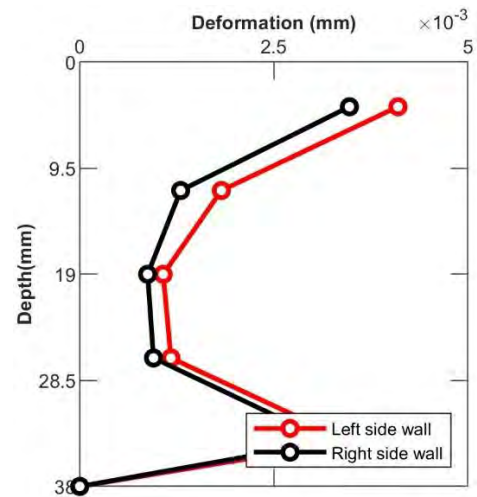
Εικόνα Α. 18: Πειραματικά αποτελέσματα για μέγιστη παραμόρφωση των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T1EQ1



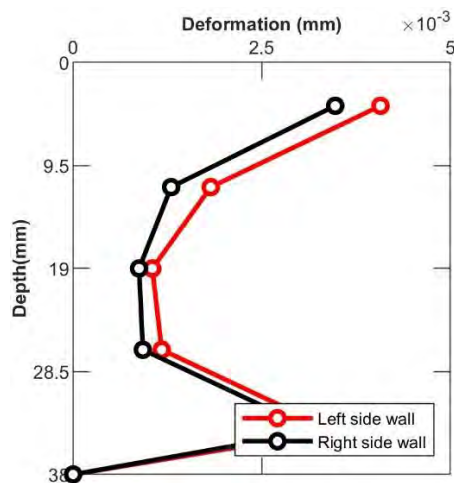
Εικόνα Α. 19: Αριθμητικά αποτελέσματα για μέγιστη παραμόρφωση των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T1EQ1, με σταθερό αρχικό μέτρο διάτμησης και απόσβεση Rayleigh 1%



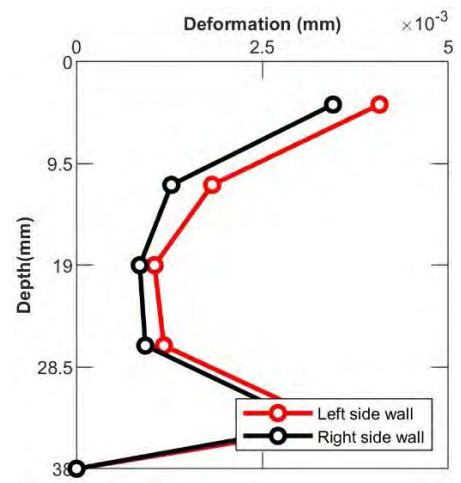
Εικόνα Α. 20: Αριθμητικά αποτελέσματα για μέγιστη παραμόρφωση των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T1EQ1, με καταναμεμένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 1%



Εικόνα Α. 21: Αριθμητικά αποτελέσματα για μέγιστη παραμόρφωση των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T1EQ1, με καταναμεμένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 3%



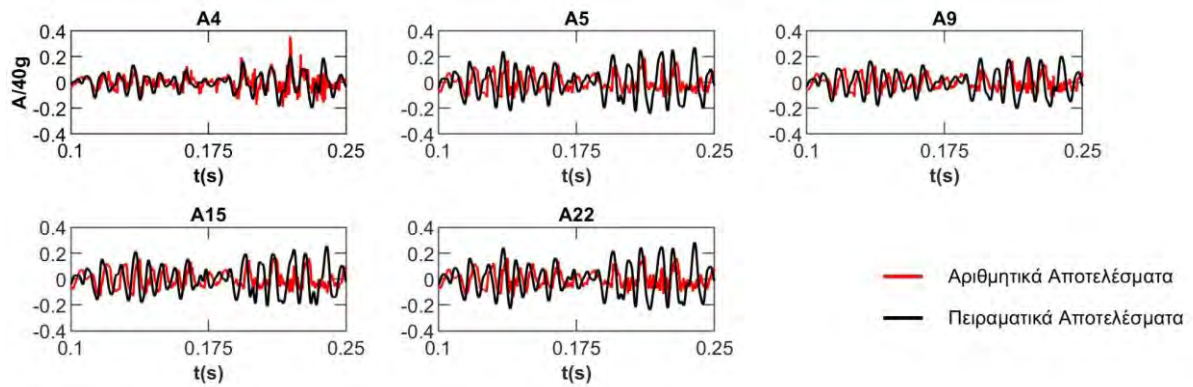
Εικόνα Α. 22: Αριθμητικά αποτελέσματα για μέγιστη παραμόρφωση των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T1EQ1, με καταναμεμένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 1%



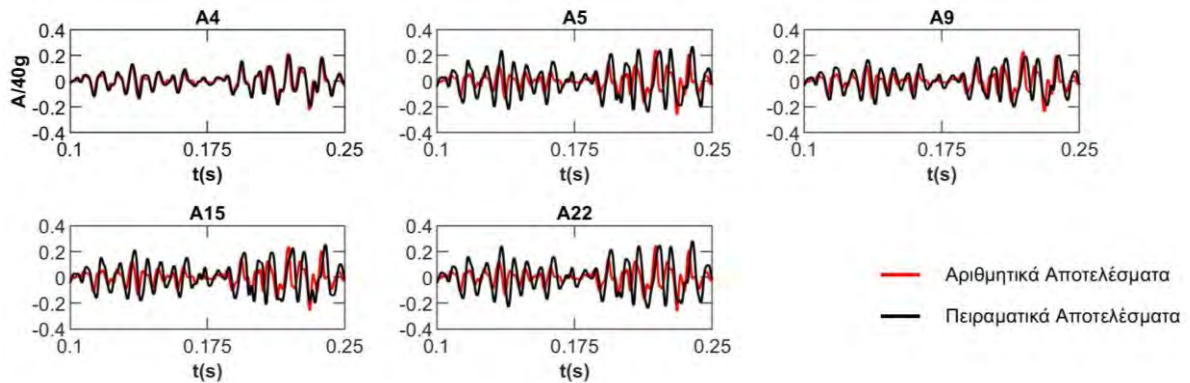
Εικόνα Α. 23: Αριθμητικά αποτελέσματα για μέγιστη παραμόρφωση των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T1EQ1, με καταναμεμένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 3%

7.2 Περίπτωση T1EQ2

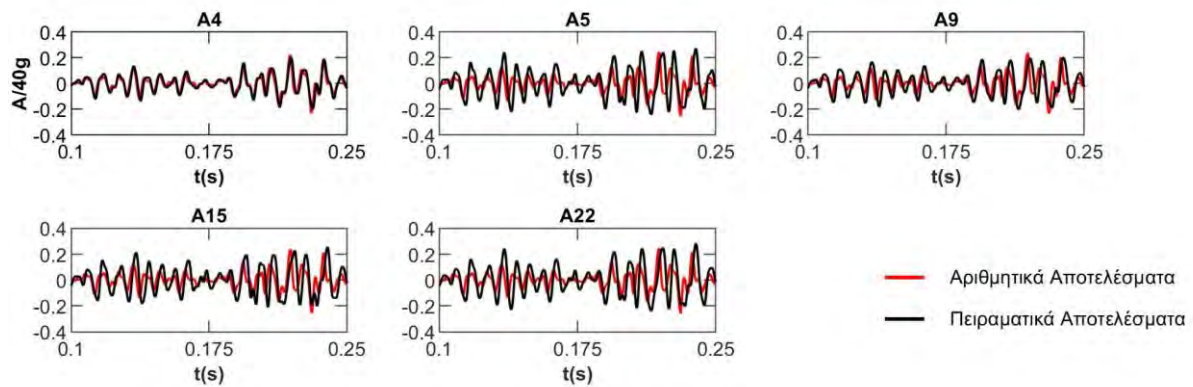
7.2.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΩΝ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΕΩΝ



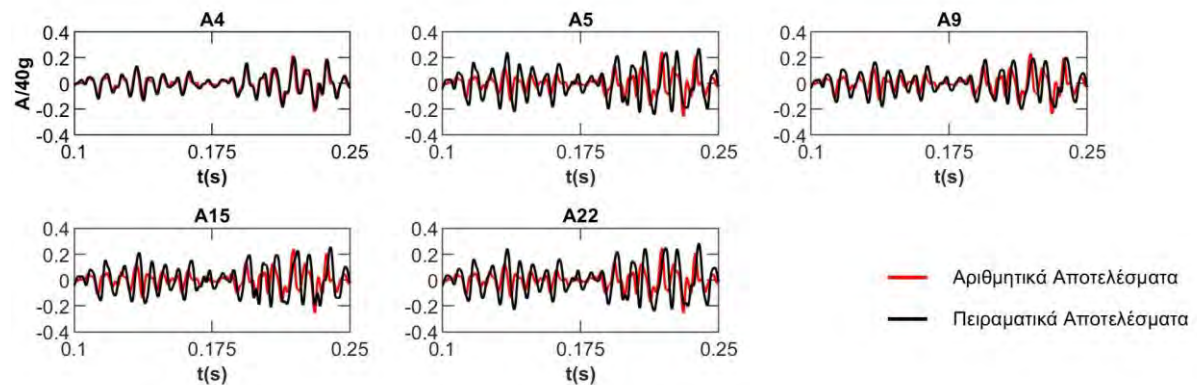
Εικόνα Α. 24: Σύγκριση χρονοϊστοριών επιταχύνσεων για την περίπτωση T1EQ2, με σταθερό αρχικό μέτρο διάτμησης και απόσβεση Rayleigh 1%



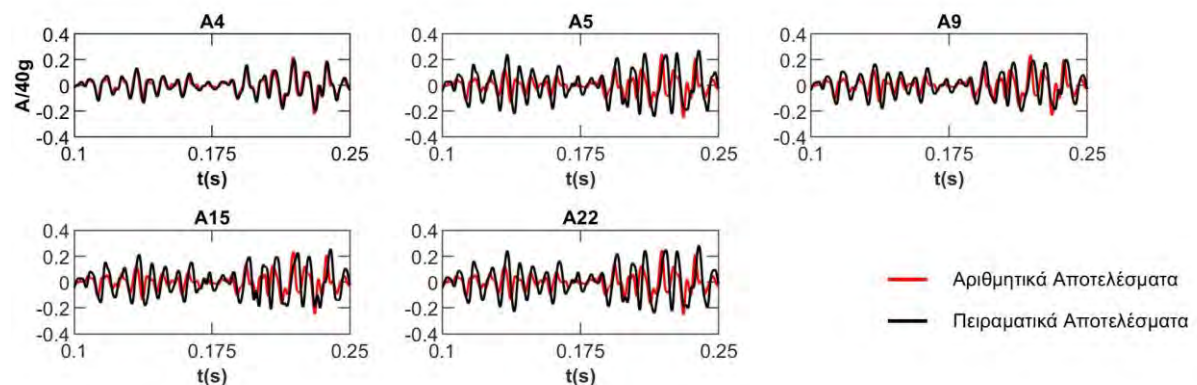
Εικόνα Α. 25: Σύγκριση χρονοϊστοριών επιταχύνσεων για την περίπτωση T1EQ2, με κατανεμημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 1%



Εικόνα Α. 26: Σύγκριση χρονοϊστοριών επιταχύνσεων για την περίπτωση T1EQ2, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 3%

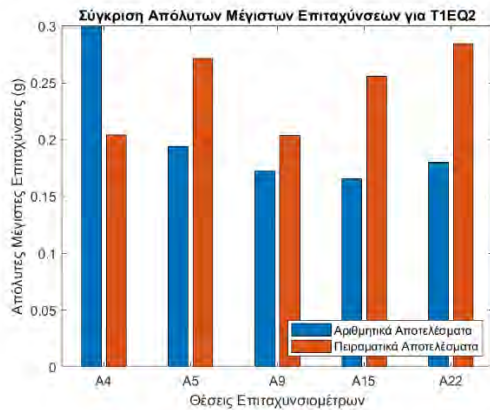


Εικόνα Α. 27: Σύγκριση χρονοϊστοριών επιταχύνσεων για την περίπτωση T1EQ2, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 1%

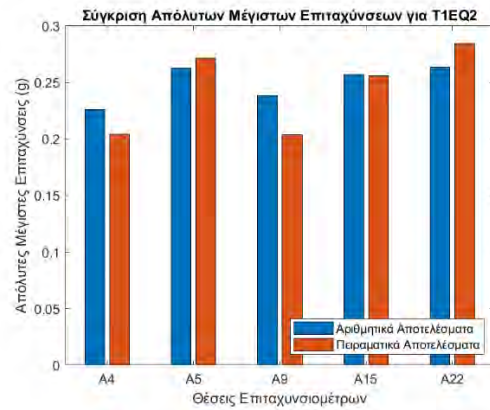


Εικόνα Α. 28: Σύγκριση χρονοϊστοριών επιταχύνσεων για την περίπτωση T1EQ2, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 3%

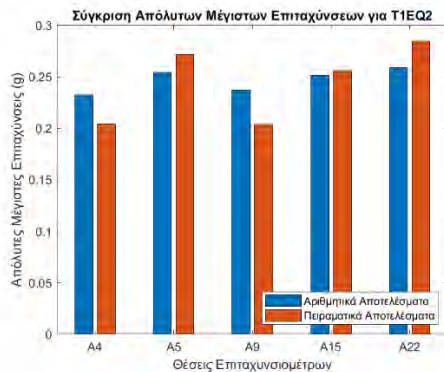
7.2.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΛΥΤΩΝ ΜΕΓΙΣΤΩΝ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΕΩΝ



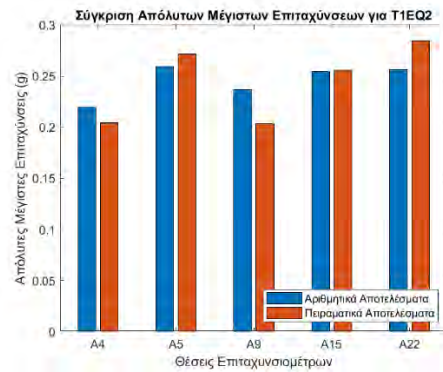
Εικόνα Α. 29: Σύγκριση απόλυτων μέγιστων επιταχύνσεων για την περίπτωση T1EQ2, με σταθερό αρχικό μέτρο διάτμησης και απόσβεση Rayleigh 1%



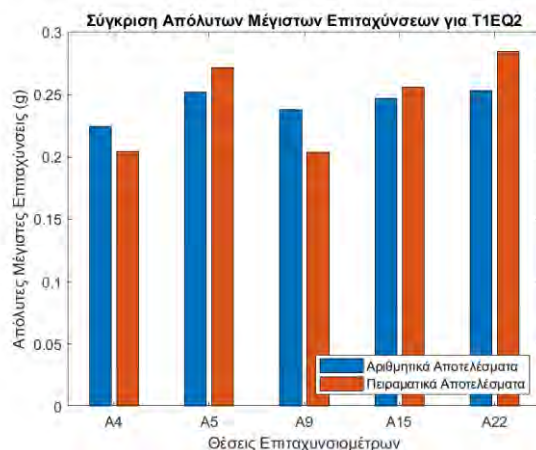
Εικόνα Α. 30: Σύγκριση απόλυτων μέγιστων επιταχύνσεων για την περίπτωση T1EQ2, με κατανεμημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 1%



Εικόνα Α. 31: Σύγκριση απόλυτων μέγιστων επιταχύνσεων για την περίπτωση T1EQ2, με κατανεμημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 3%

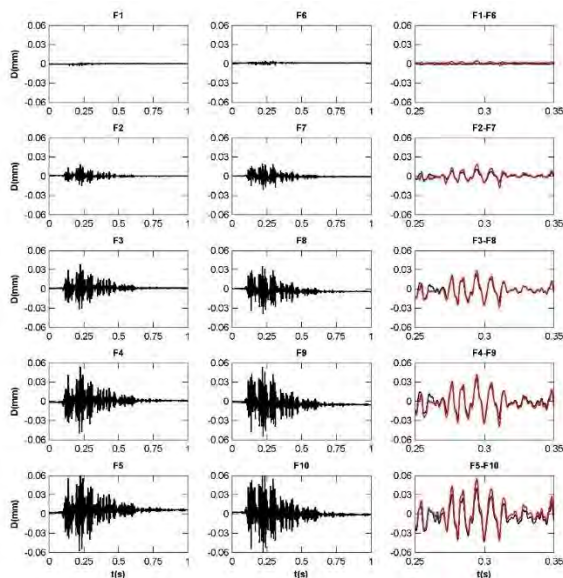


Εικόνα Α. 32: Σύγκριση απόλυτων μέγιστων επιταχύνσεων για την περίπτωση T1EQ2, με κατανεμημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 1%

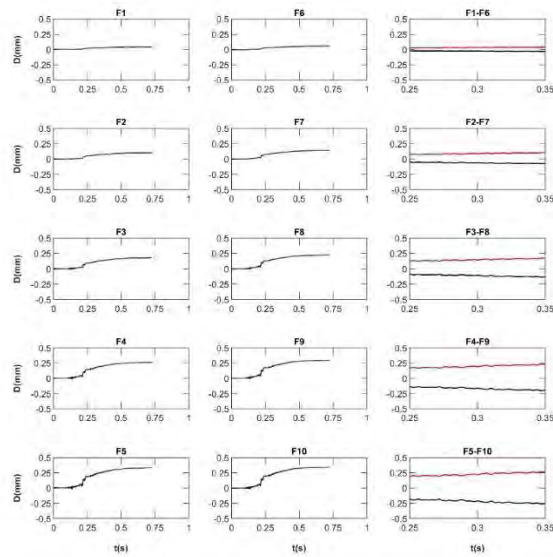


Εικόνα Α. 33: Σύγκριση απόλυτων μέγιστων επιταχύνσεων για την περίπτωση T1EQ2, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 3%

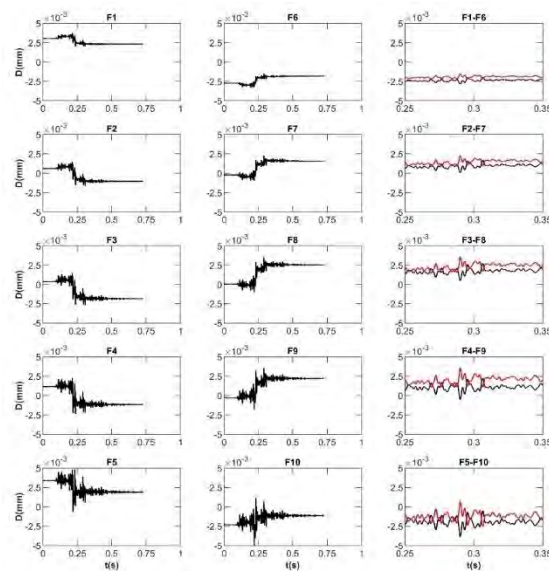
7.2.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΩΝ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΤΩΝ ΠΛΕΥΡΙΚΩΝ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ



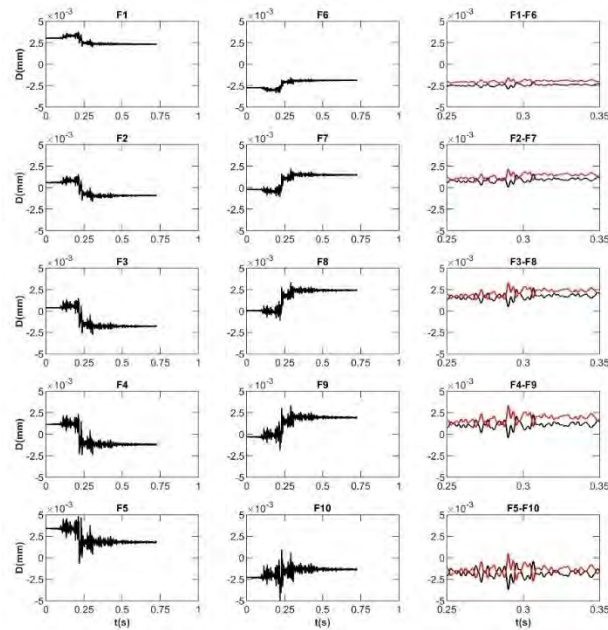
Εικόνα Α. 34: Πειραματικά αποτελέσματα χρονοϊστοριών μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T1EQ2



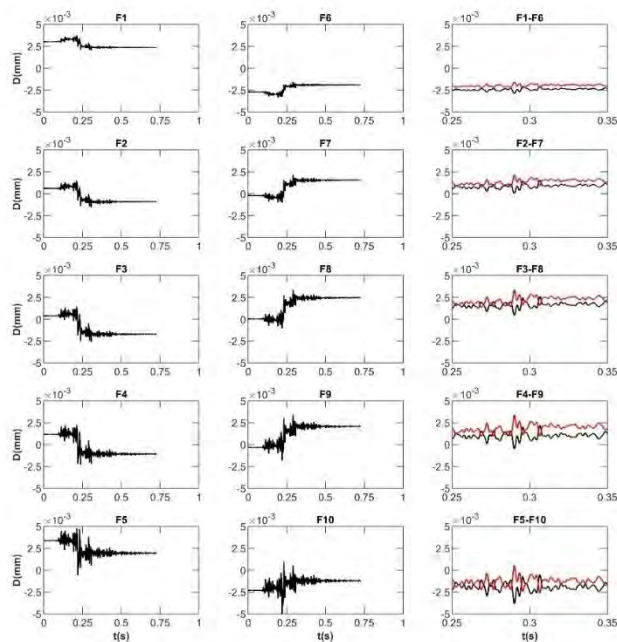
Εικόνα Α. 35: Αριθμητικά αποτελέσματα χρονοϊστοριών μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T1EQ2, με σταθερό αρχικό μέτρο διάτμησης και απόσβεση Rayleigh 1%



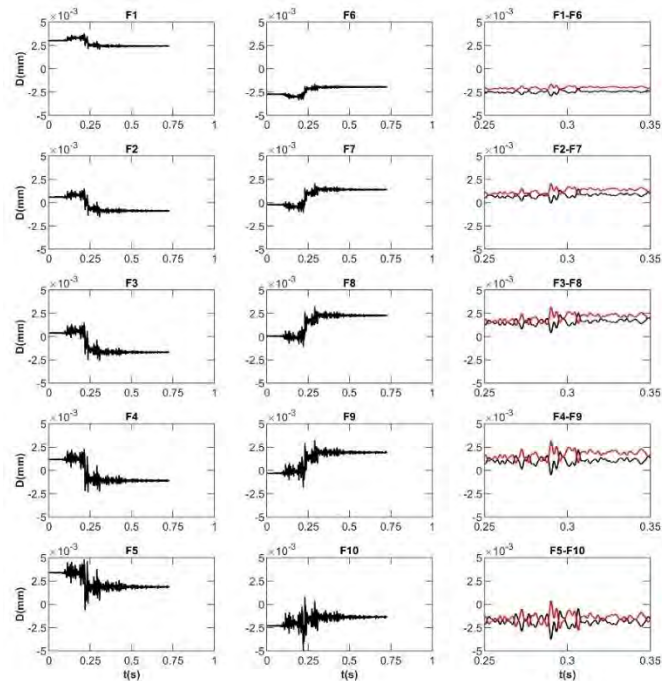
Εικόνα Α. 36: Αριθμητικά αποτελέσματα χρονοϊστοριών μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T1EQ2, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 1%



Εικόνα Α. 37: Αριθμητικά αποτελέσματα χρονοϊστοριών μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T1EQ2, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 3%

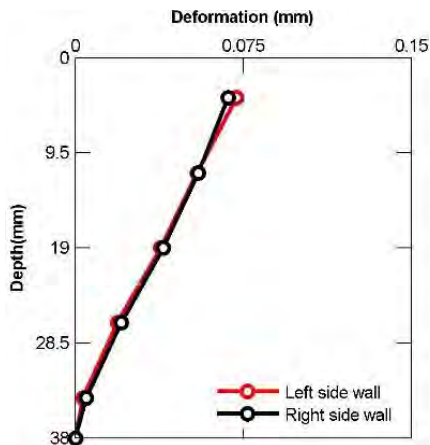


Εικόνα Α. 38: Αριθμητικά αποτελέσματα χρονοϊστοριών μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T1EQ2, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 1%

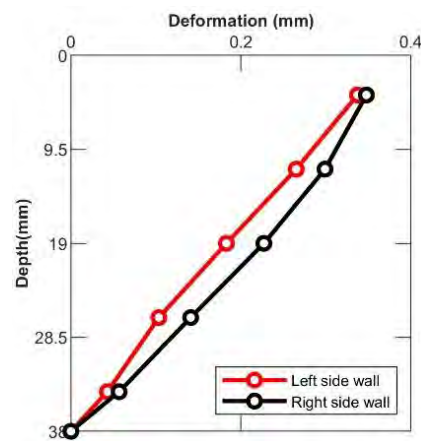


Εικόνα Α. 39: Αριθμητικά αποτελέσματα χρονοϊστοριών μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T1EQ2, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 3%

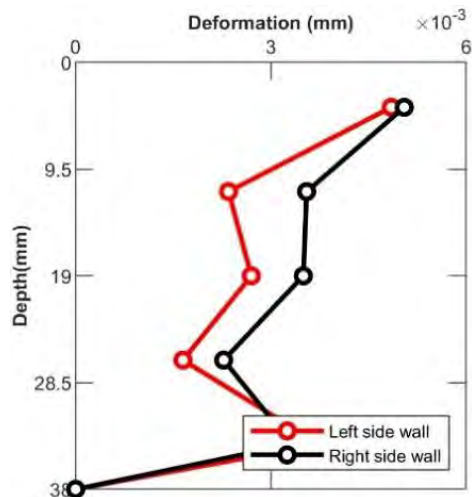
7.2.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΓΙΣΤΩΝ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΤΩΝ ΠΛΕΥΡΙΚΩΝ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ



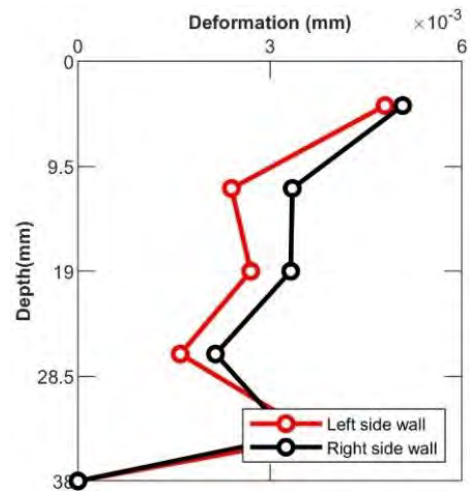
Εικόνα Α. 40: Πειραματικά αποτελέσματα για μέγιστη παραμόρφωση των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T1EQ2



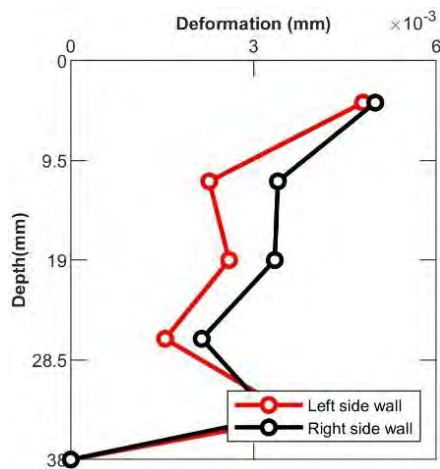
Εικόνα Α. 41: Αριθμητικά αποτελέσματα για μέγιστη παραμόρφωση των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T1EQ2, με σταθερό αρχικό μέτρο διάτμησης και απόσβεση Rayleigh 1%



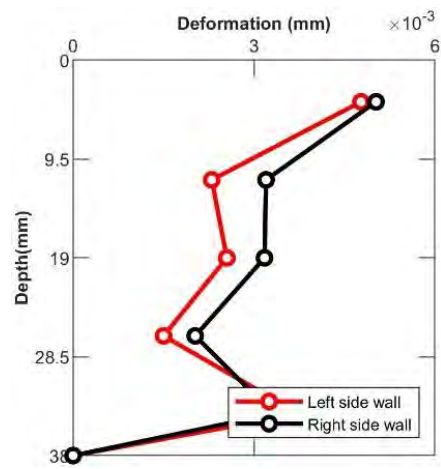
Εικόνα Α. 42: Αριθμητικά αποτελέσματα για μέγιστη παραμόρφωση των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T1EQ2, με κατανεμημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 1%



Εικόνα Α. 43: Αριθμητικά αποτελέσματα για μέγιστη παραμόρφωση των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T1EQ2, με κατανεμημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 3%

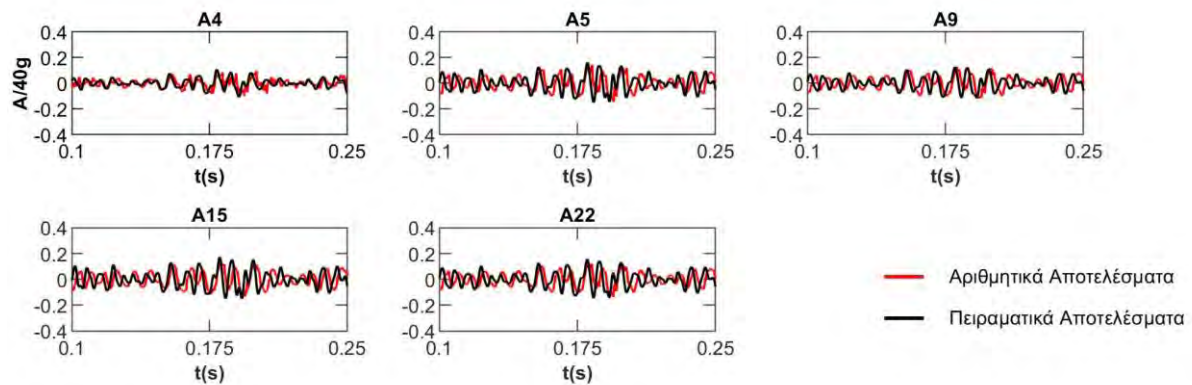


Εικόνα Α. 44: Αριθμητικά αποτελέσματα για μέγιστη παραμόρφωση των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T1EQ2, με κατανεμημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 1%

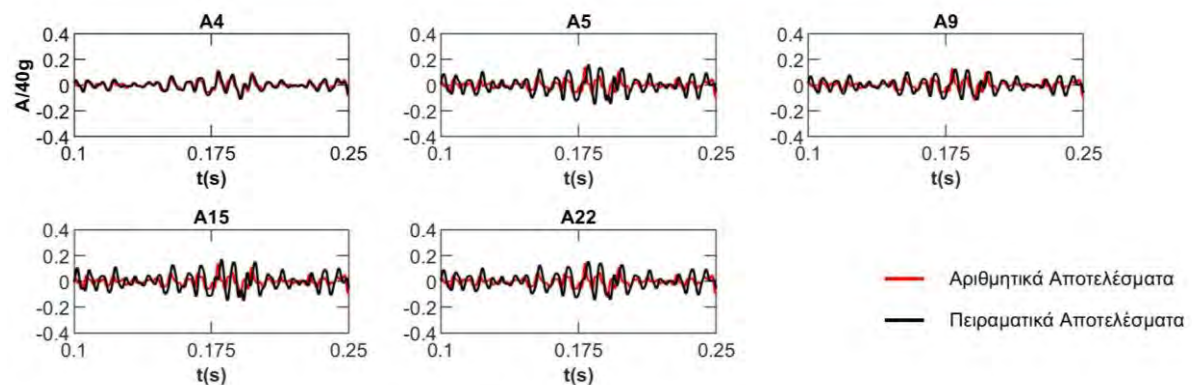


Εικόνα Α. 45: Αριθμητικά αποτελέσματα για μέγιστη παραμόρφωση των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T1EQ2, με κατανεμημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 3%

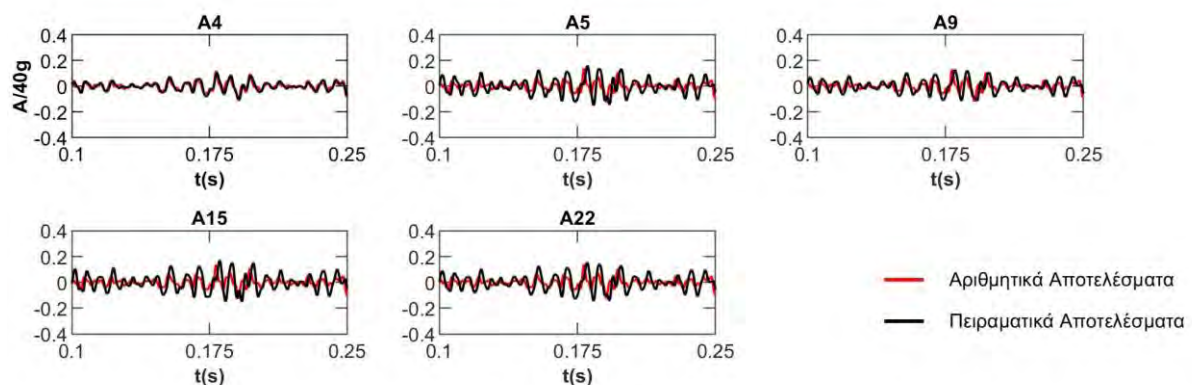
7.3 Περίπτωση Τ3ΕQ1



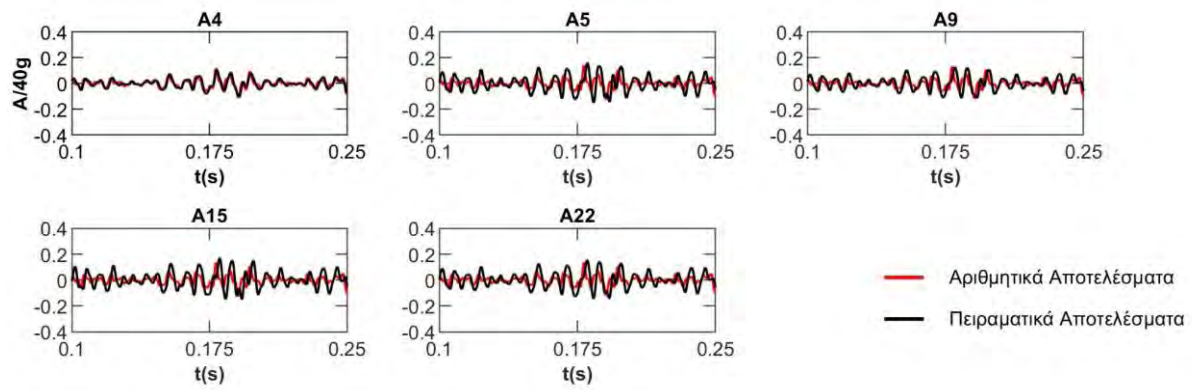
Εικόνα Α. 46: Σύγκριση χρονοϊστοριών επιταχύνσεων για την περίπτωση Τ3ΕQ1, με σταθερό αρχικό μέτρο διάτμησης και απόσβεση Rayleigh 1%



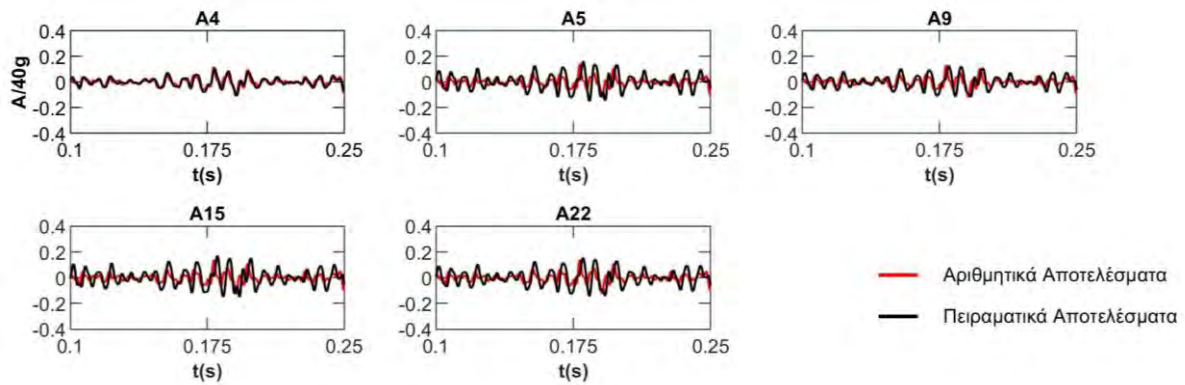
Εικόνα Α. 47: Σύγκριση χρονοϊστοριών επιταχύνσεων για την περίπτωση Τ3ΕQ1, με καταμετρημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 1%



Εικόνα Α. 48: Σύγκριση χρονοϊστοριών επιταχύνσεων για την περίπτωση Τ3ΕQ1, με καταμετρημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 3%

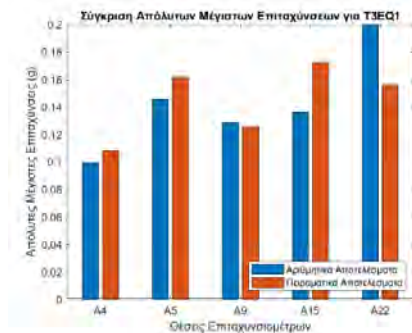


Εικόνα Α. 49: Σύγκριση χρονοϊστοριών επιταχύνσεων για την περίπτωση T3EQ1, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 1%

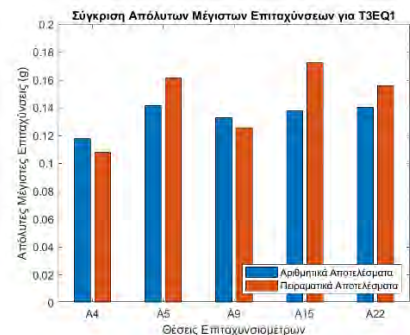


Εικόνα Α. 50: Σύγκριση χρονοϊστοριών επιταχύνσεων για την περίπτωση T3EQ1, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 3%

7.3.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΛΥΤΩΝ ΜΕΓΙΣΤΩΝ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΕΩΝ



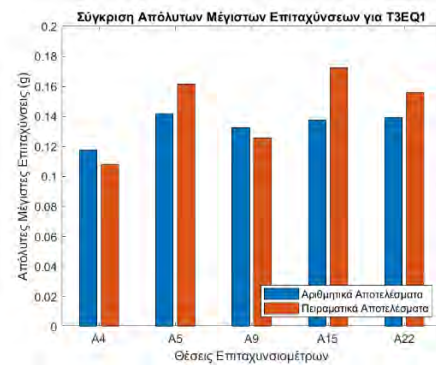
Εικόνα Α. 51: Σύγκριση απόλυτων μέγιστων επιταχύνσεων για την περίπτωση T3EQ1, με σταθερό αρχικό μέτρο διάτμησης και απόσβεση Rayleigh 1%



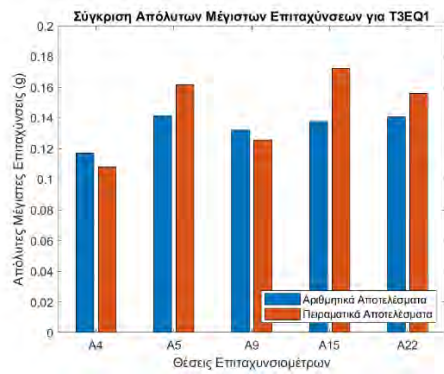
Εικόνα Α. 52: Σύγκριση απόλυτων μέγιστων επιταχύνσεων για την περίπτωση T3EQ1, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-y-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 1%



Εικόνα Α. 53: Σύγκριση απόλυτων μέγιστων επιταχύνσεων για την περίπτωση T3EQ1, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-y-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 3%

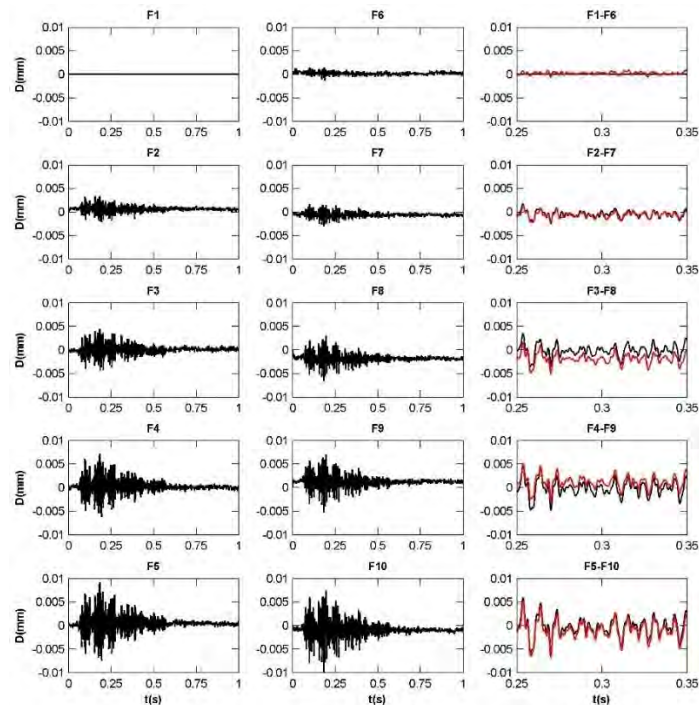


Εικόνα Α. 54: Σύγκριση απόλυτων μέγιστων επιταχύνσεων για την περίπτωση T3EQ1, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-y-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 1%

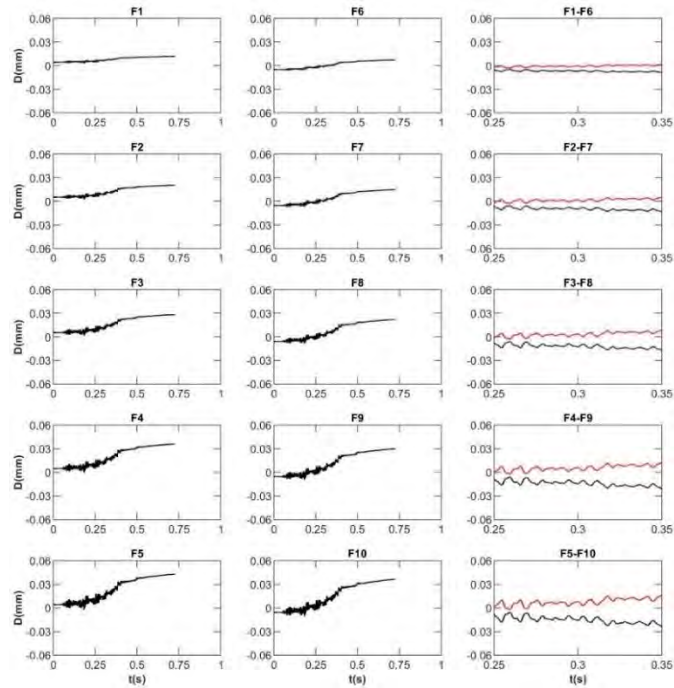


Εικόνα Α. 55: Σύγκριση απόλυτων μέγιστων επιταχύνσεων για την περίπτωση T3EQ1, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 3%

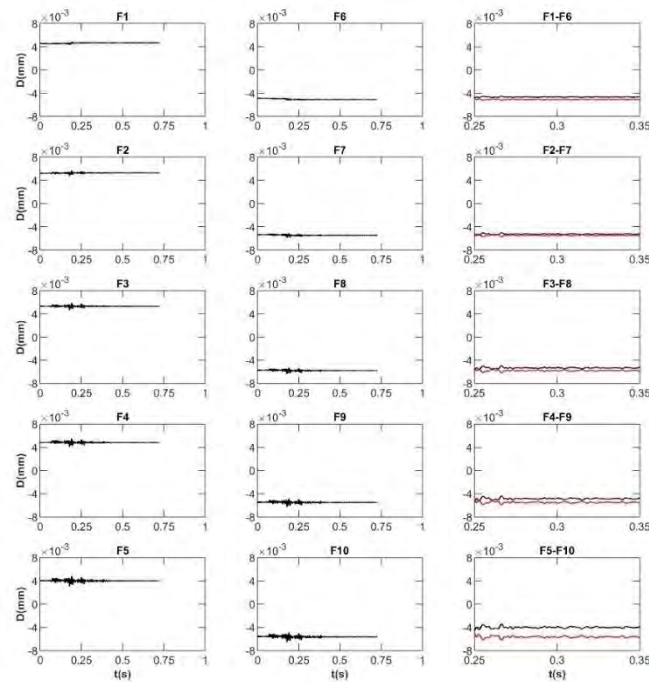
7.3.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΩΝ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΤΩΝ ΠΛΕΥΡΙΚΩΝ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ



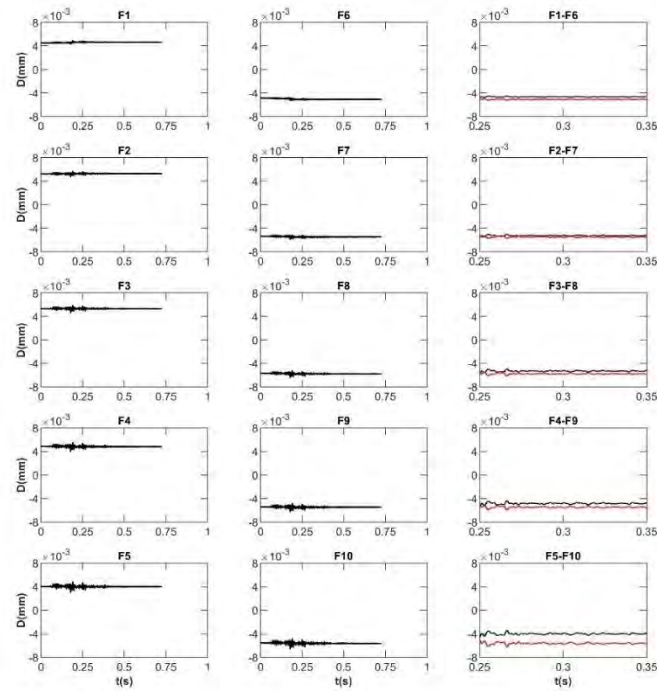
Εικόνα Α. 56: Πειραματικά αποτελέσματα χρονοϊστοριών μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T3EQ1



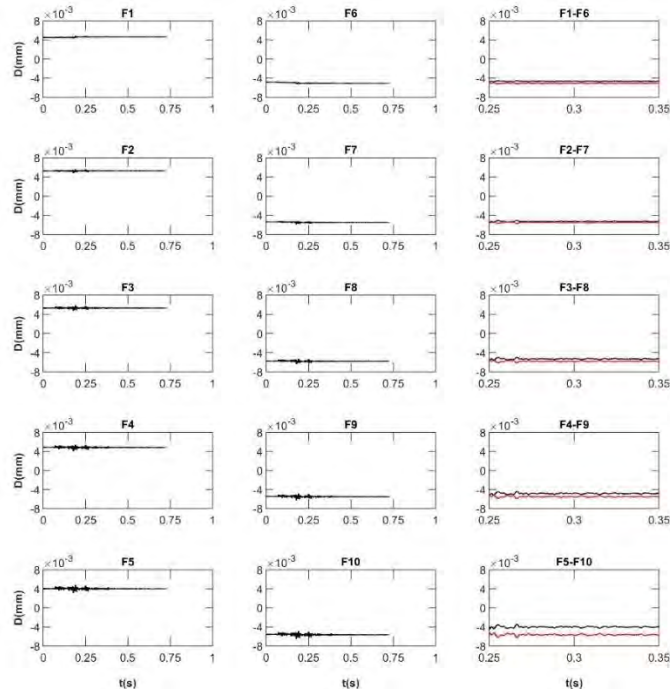
Εικόνα Α. 57: Αριθμητικά αποτελέσματα χρονοϊστοριών μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση Τ3ΕQ1, με σταθερό αρχικό μέτρο διάτμησης και απόσβεση Rayleigh 1%



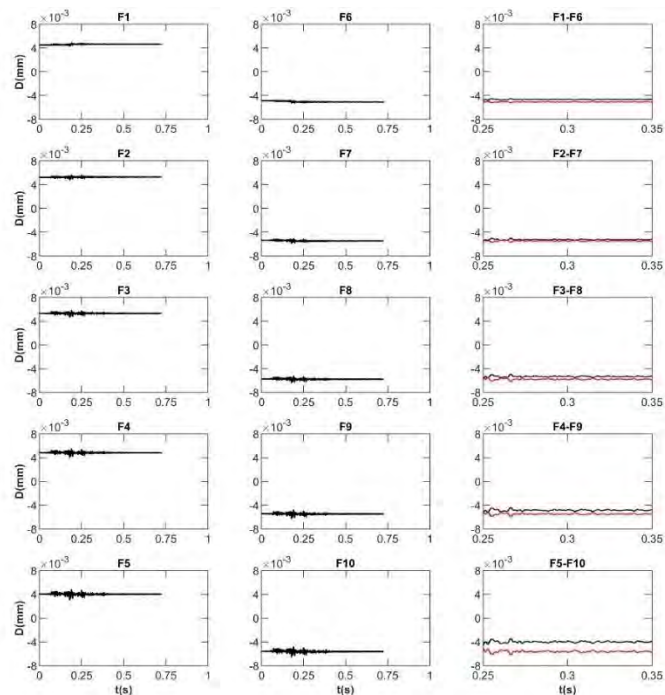
Εικόνα Α. 58: Αριθμητικά αποτελέσματα χρονοϊστοριών μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση Τ3ΕQ1, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 1%



Εικόνα Α. 59: Αριθμητικά αποτελέσματα χρονοϊστοριών μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση Τ3ΕQ1, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 3%

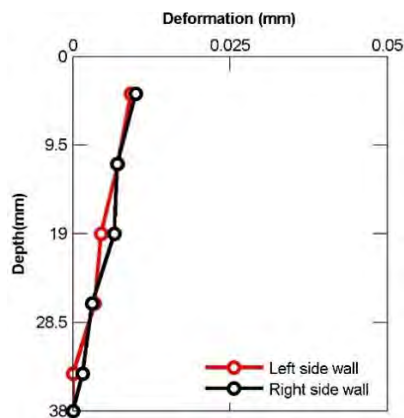


Εικόνα Α. 60: Αριθμητικά αποτελέσματα χρονοϊστοριών μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση Τ3ΕQ1, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 1%

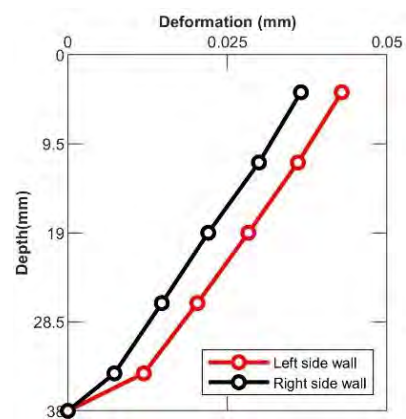


Εικόνα Α. 61: Αριθμητικά αποτελέσματα χρονοϊστοριών μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση Τ3ΕQ1, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 3%

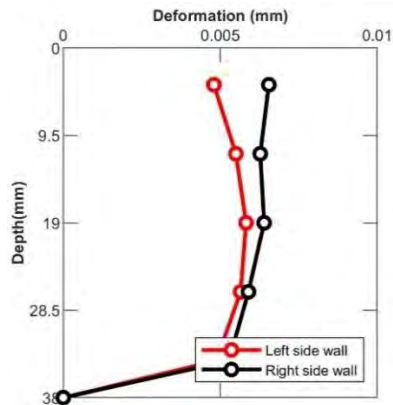
7.3.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΓΙΣΤΩΝ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΤΩΝ ΠΛΕΥΡΙΚΩΝ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ



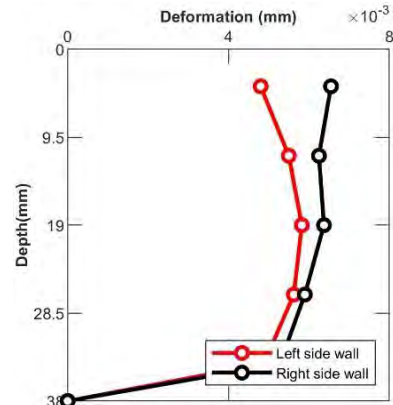
Εικόνα Α. 62: Πειραματικά αποτελέσματα για μέγιστη παραμόρφωση των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση Τ3ΕQ1



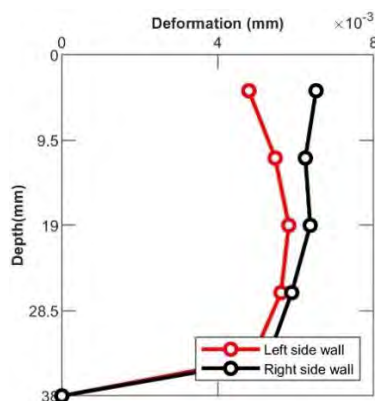
Εικόνα Α. 63: Αριθμητικά αποτελέσματα για μέγιστη παραμόρφωση των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση Τ3ΕQ1, με σταθερό αρχικό μέτρο διάτμησης και απόσβεση Rayleigh 1%



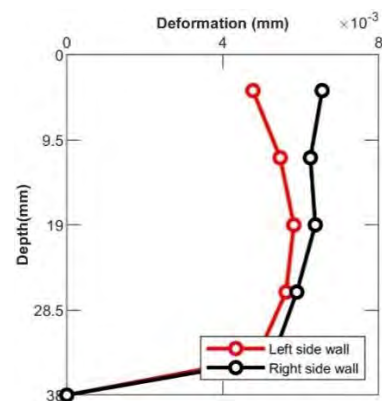
Εικόνα Α. 64: Αριθμητικά αποτελέσματα για μέγιστη παραμόρφωση των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T3EQ1, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 1%



Εικόνα Α. 65: Αριθμητικά αποτελέσματα για μέγιστη παραμόρφωση των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T3EQ1, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 3%



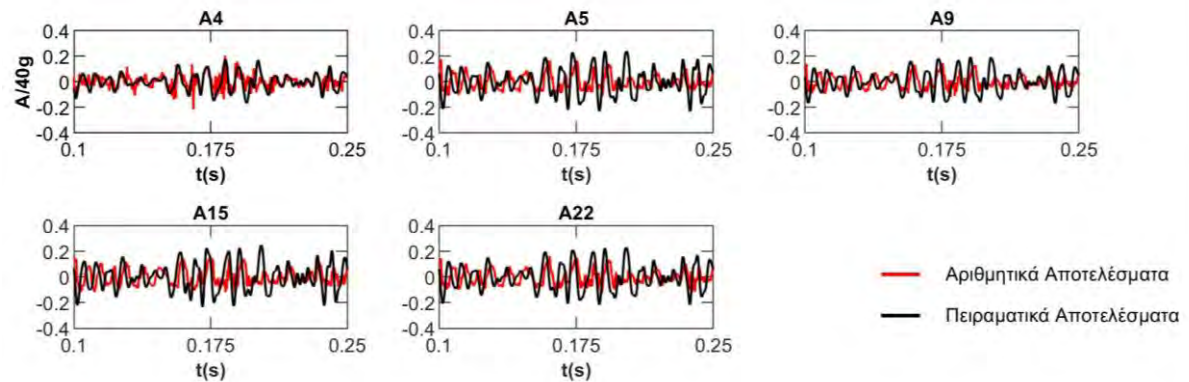
Εικόνα Α. 66: Αριθμητικά αποτελέσματα για μέγιστη παραμόρφωση των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T3EQ1, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 1%



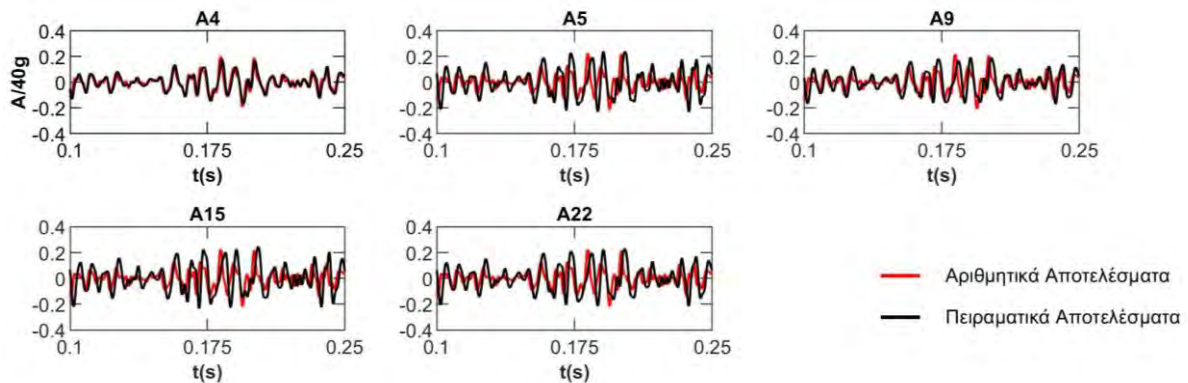
Εικόνα Α. 67: Αριθμητικά αποτελέσματα για μέγιστη παραμόρφωση των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T3EQ1, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 3%

7.4 Περίπτωση Τ3ΕQ2

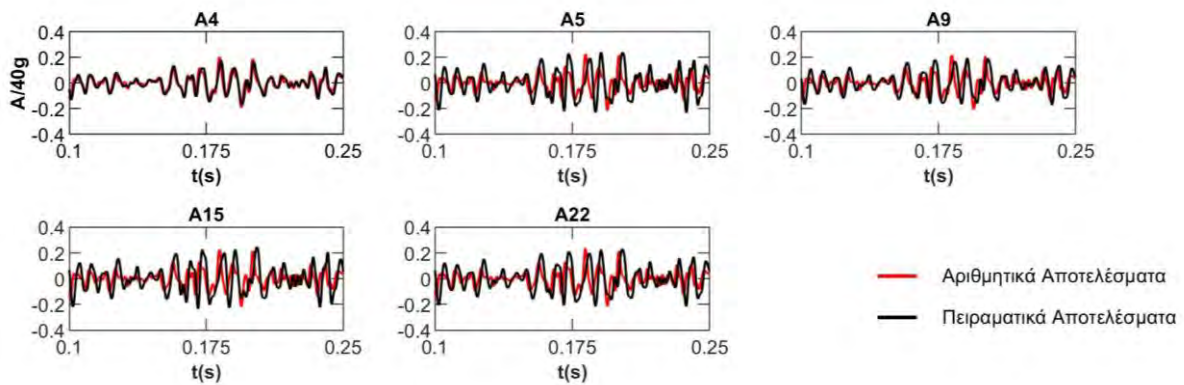
7.4.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΩΝ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΕΩΝ



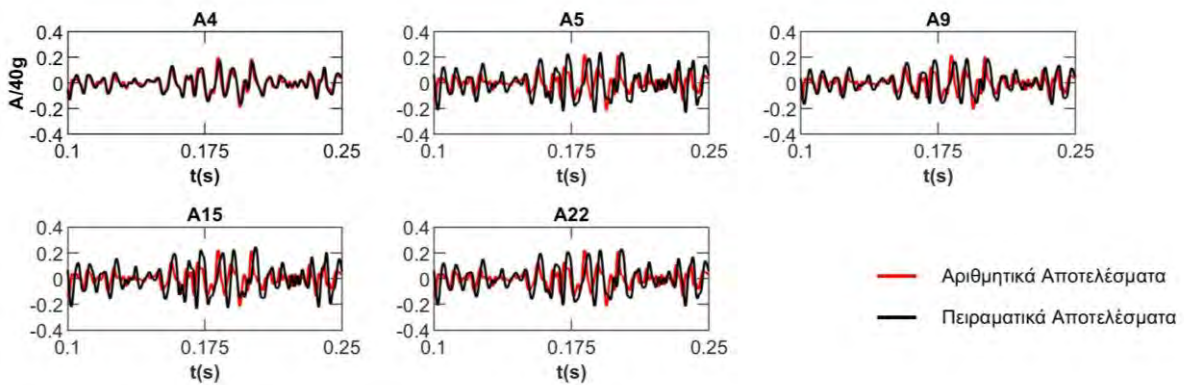
Εικόνα Α. 68: Σύγκριση χρονοϊστοριών επιταχύνσεων για την περίπτωση Τ3ΕQ2, με σταθερό αρχικό μέτρο διάτμησης και απόσβεση Rayleigh 1%



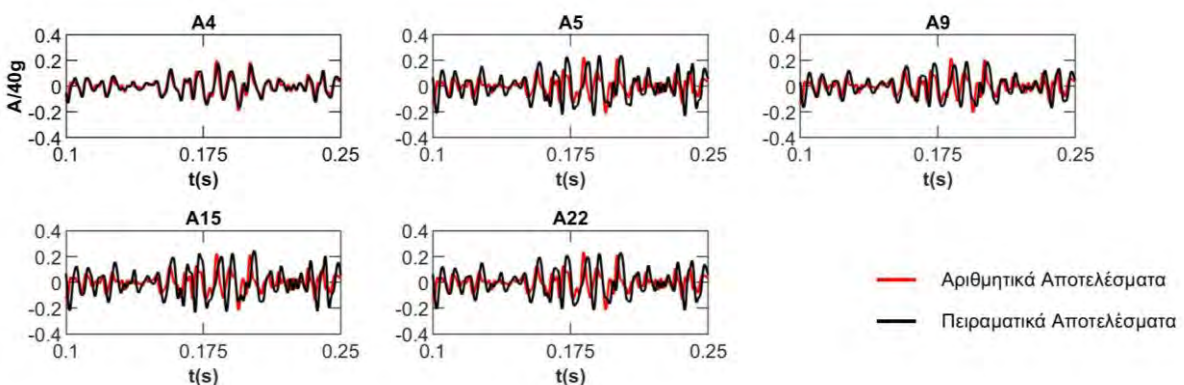
Εικόνα Α. 69: Σύγκριση χρονοϊστοριών επιταχύνσεων για την περίπτωση Τ3ΕQ2, με καταμεμημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 1%



Εικόνα Α. 70: Σύγκριση χρονιοιστοριών επιταχύνσεων για την περίπτωση T3EQ2, με καταμεμημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 3%

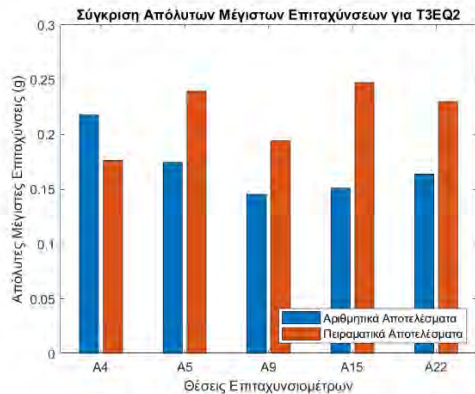


Εικόνα Α. 71: Σύγκριση χρονιοιστοριών επιταχύνσεων για την περίπτωση T3EQ2, με καταμεμημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 1%

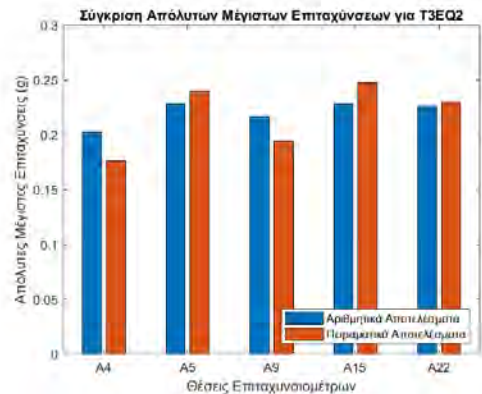


Εικόνα Α. 72: Σύγκριση χρονιοιστοριών επιταχύνσεων για την περίπτωση T3EQ2, με καταμεμημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 3%

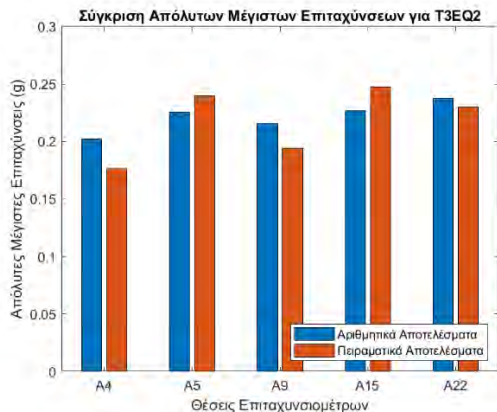
7.4.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΛΥΤΩΝ ΜΕΓΙΣΤΩΝ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΕΩΝ



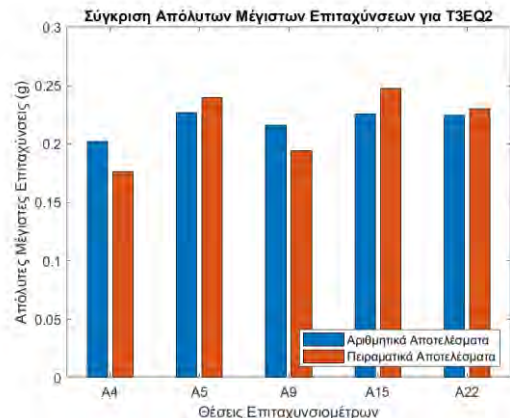
Εικόνα Α. 73: Σύγκριση απόλυτων μέγιστων επιταχύνσεων για την περίπτωση T3EQ2, με σταθερό αρχικό μέτρο διάτμησης και απόσβεση Rayleigh 1%



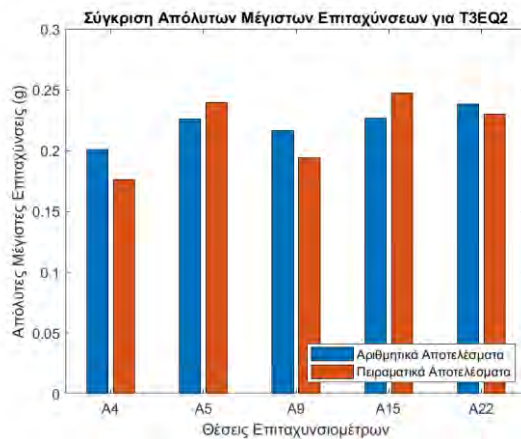
Εικόνα Α. 74: Σύγκριση απόλυτων μέγιστων επιταχύνσεων για την περίπτωση T3EQ2, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-g-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 1%



Εικόνα Α. 75: Σύγκριση απόλυτων μέγιστων επιταχύνσεων για την περίπτωση T3EQ2, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-g-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 3%

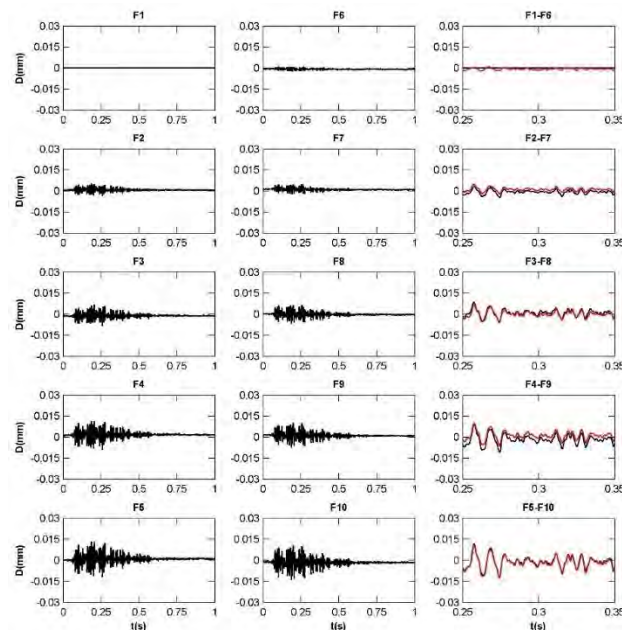


Εικόνα Α. 76: Σύγκριση απόλυτων μέγιστων επιταχύνσεων για την περίπτωση T3EQ2, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-g-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 1%

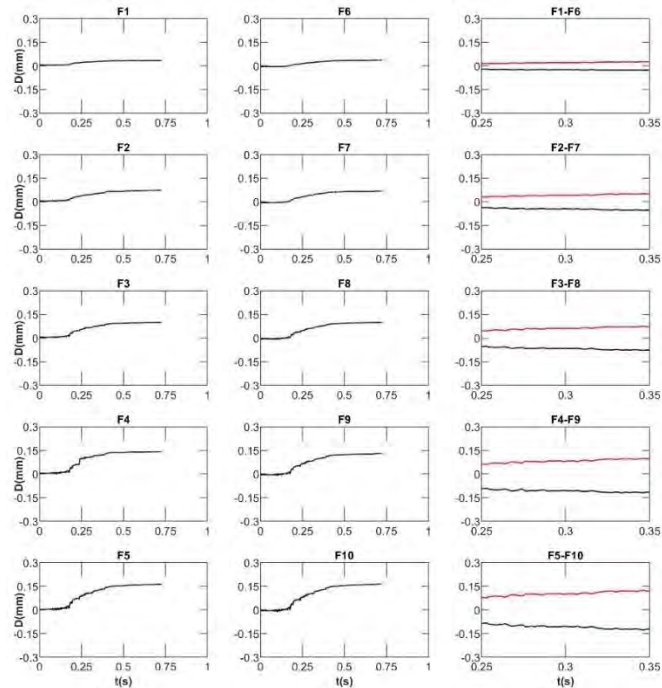


Εικόνα Α. 77: Σύγκριση απόλυτων μέγιστων επιταχύνσεων για την περίπτωση T3EQ2, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 3%

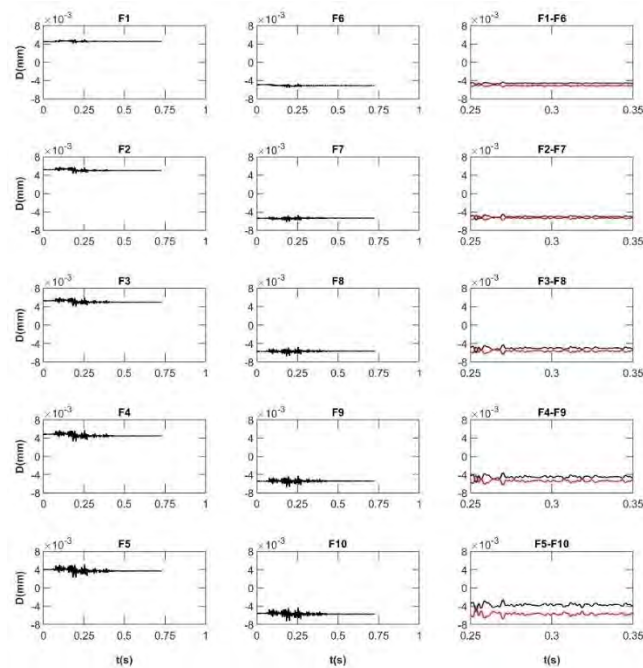
7.4.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΩΝ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΤΩΝ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ



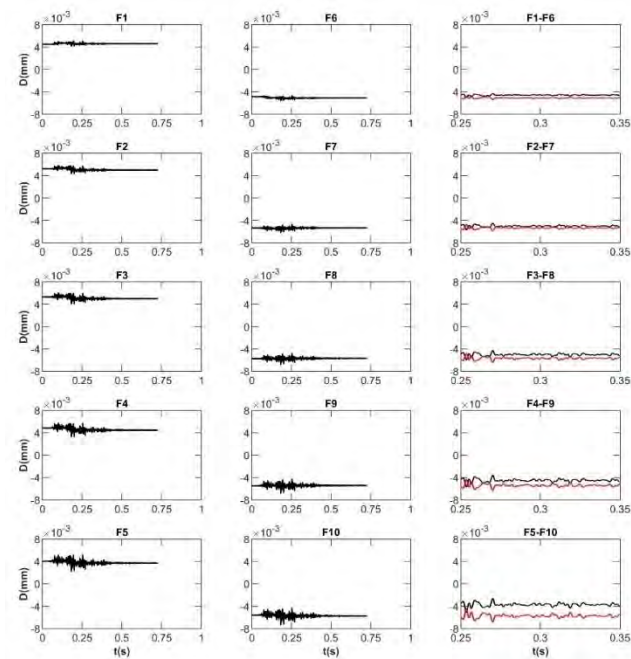
Εικόνα Α. 78: Πειραματικά αποτελέσματα χρονοϊστοριών μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T3EQ2



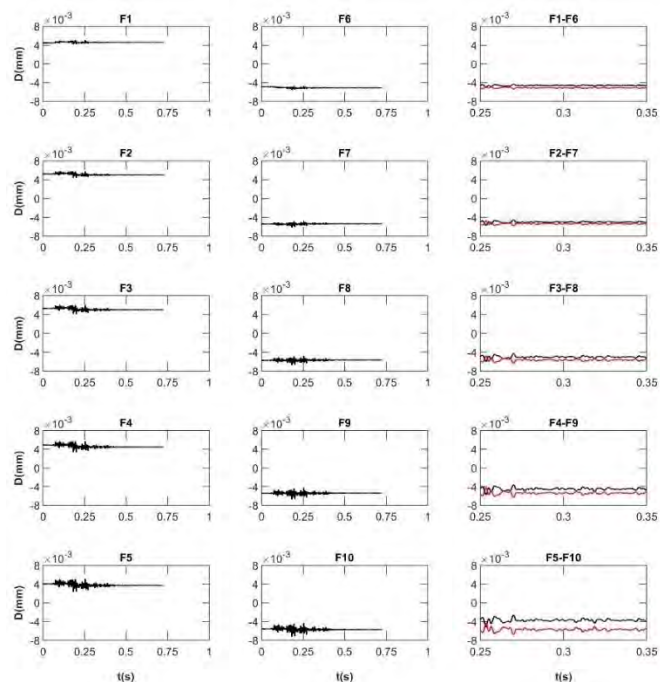
Εικόνα Α. 79: Αριθμητικά αποτελέσματα χρονοϊστοριών μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T3EQ2, με σταθερό αρχικό μέτρο διάτμησης και απόσβεση Rayleigh 1%



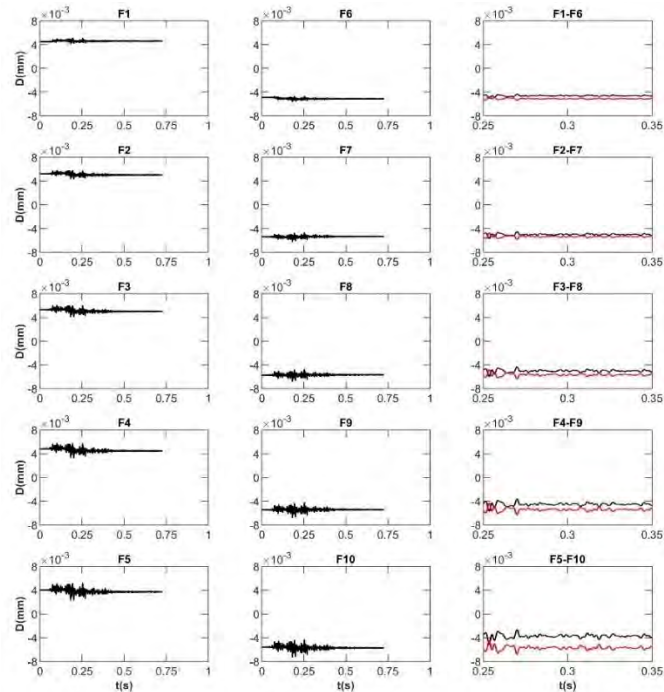
Εικόνα Α. 80: Αριθμητικά αποτελέσματα χρονοϊστοριών μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T3EQ2, με κατανεμημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 1%



Εικόνα Α. 81: Αριθμητικά αποτελέσματα χρονοϊστοριών μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση Τ3ΕQ2, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 3%

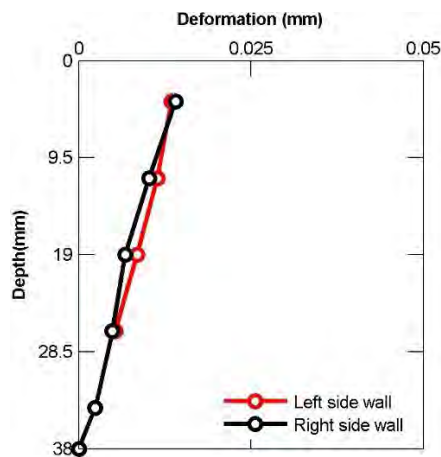


Εικόνα Α. 82: Αριθμητικά αποτελέσματα χρονοϊστοριών μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση Τ3ΕQ2, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 1%

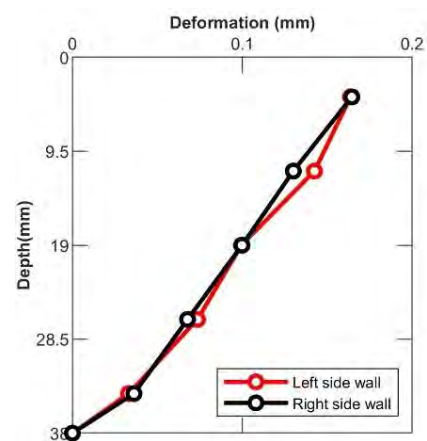


Εικόνα Α. 83: Αριθμητικά αποτελέσματα χρονοϊστοριών μετακινήσεων των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση Τ3ΕQ2, με κατανομημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 3%

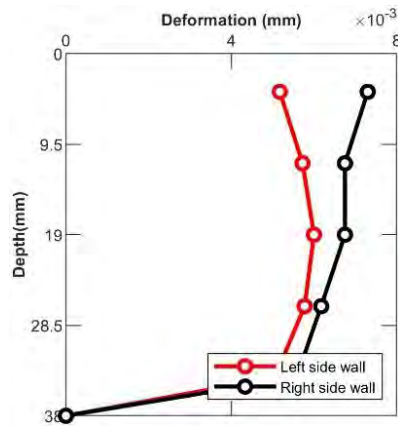
7.4.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΓΙΣΤΩΝ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΤΩΝ ΠΛΕΥΡΙΚΩΝ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ



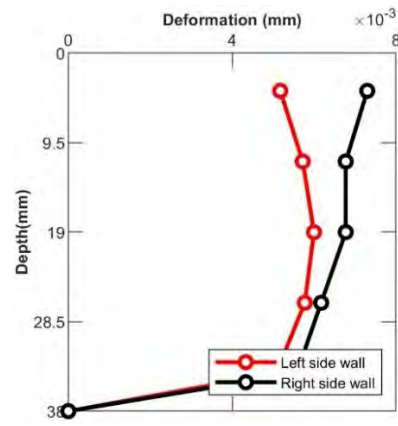
Εικόνα Α. 84: Πειραματικά αποτελέσματα για μέγιστη παραμόρφωση των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση Τ3ΕQ2



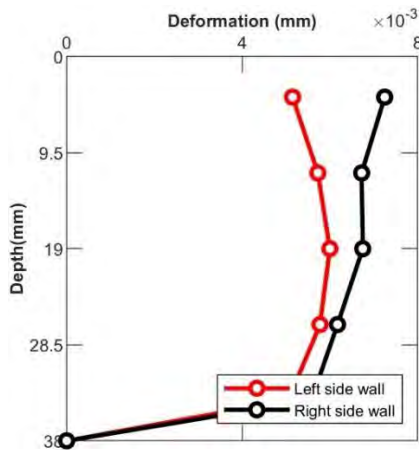
Εικόνα Α. 85: Αριθμητικά αποτελέσματα για μέγιστη παραμόρφωση των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση Τ3ΕQ2, με σταθερό αρχικό μέτρο διάτμησης και απόσβεση Rayleigh 1%



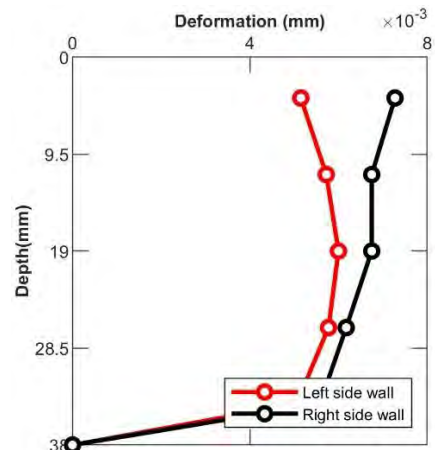
Εικόνα Α. 86: Αριθμητικά αποτελέσματα για μέγιστη παραμόρφωση των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T3EQ2, με κατανεμημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 1%



Εικόνα Α. 87: Αριθμητικά αποτελέσματα για μέγιστη παραμόρφωση των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T3EQ2, με κατανεμημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος εγκιβωτισμού της σήραγγας και απόσβεση Rayleigh 3%



Εικόνα Α. 88: Αριθμητικά αποτελέσματα για μέγιστη παραμόρφωση των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T3EQ2, με κατανεμημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 1%



Εικόνα Α. 89: Αριθμητικά αποτελέσματα για μέγιστη παραμόρφωση των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας για την περίπτωση T3EQ2, με κατανεμημένο αρχικό μέτρο διάτμησης, υιοθέτηση G-γ-D καμπυλών βαθμονομημένες για μέση τάση που αντιστοιχεί στο μέσο βάθος του κουτιού ESB και απόσβεση Rayleigh 3%