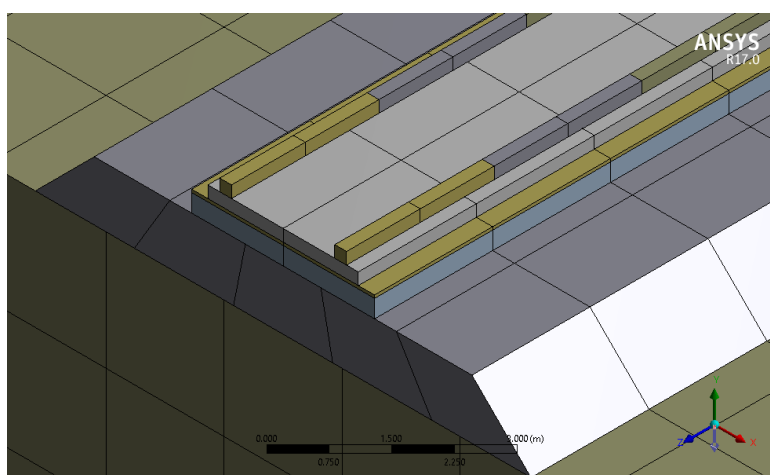




ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ:
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ: ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ, ΒΙΩΣΙΜΗ
ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ
ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΔΟΝΗΣΕΩΝ ΣΕ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΑ
ΕΠΙΧΩΜΑΤΑ



ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ ΜΠΙΡΙΚΑΚΗΣ

ΑΕΜ: 2014057353

Επιβλέπων: Αναπλ. Καθηγητής ΙΩΑΝΝΗΣ ΤΣΟΜΠΑΝΑΚΗΣ

ΧΑΝΙΑ, 2018

Πρόλογος

Ο κύριος στόχος της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής είναι να εξεταστεί μέσω εκτενούς αριθμητικής διερεύνησης η επίδραση των δονήσεων στα σιδηροδρομικά επιχώματα, οι οποίες προκαλούνται από τη διέλευση τραίνων υψηλής ταχύτητας. Η εξέταση του σύνθετου δυναμικού προβλήματος βασίστηκε στις πρόσφατες δημοσιευμένες επιστημονικές μελέτες της διεθνούς βιβλιογραφίας. Στη διερεύνηση δίνεται έμφαση στην απόδοση –όσον αφορά τον μετριασμό των δονήσεων- της χρήσης του γεωαφρού διογκωμένης πολυστερίνης (EPS) ως υλικού κατασκευής των σιδηροδρομικών επιχωμάτων.

Το ζήτημα των σιδηροδρομικών δονήσεων είναι ένα σημαντικό θέμα που απασχολεί τους μηχανικούς σε πολλές ανεπτυγμένες χώρες και αποτελεί ένα απαιτητικό πεδίο έρευνας της δυναμικής. Οι οικονομικές, κοινωνικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι αρκετά σοβαρές, παρόλο που είναι σχετικά δύσκολη η πρόκληση δονήσεων που να μπορούν να προκαλέσουν άμεσα σοβαρές αστοχίες στα έργα υποδομής ή/και στις παρακείμενες κατασκευές. Η μελέτη εγκατάστασης ή αναβάθμισης ενός σιδηρόδρομου σε αστικό περιβάλλον, πρέπει να λαμβάνει σοβαρά υπόψη αυτές τις επιπτώσεις. Παρά το γεγονός ότι στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν αναπτυχθεί αρκετές μεθοδολογίες για την ανάλυση της διάδοσης και της επίδρασης των σιδηροδρομικών δονήσεων, δεν υπάρχει κάποιος ενιαίος επίσημος κανονισμός (π.χ., Ευρωκώδικας), για την υιοθέτηση μιας συγκεκριμένης μεθοδολογίας. Επίσης, δεν υπάρχει εξειδικευμένη ελληνική βιβλιογραφία σχετικά με τις δονήσεις που προκαλούνται από τα τρένα υψηλών ταχυτήτων αφού ακόμα δεν έχουν επεκταθεί στη χώρα μας. Τέλος, η χρήση του EPS στην κατασκευή σιδηροδρομικών επιχωμάτων, ως μέτρο μείωσης των δονητικών επιπέδων, δεν έχει μελετηθεί εκτενώς σε επιστημονικό επίπεδο, ενώ και η πρακτική εφαρμογή είναι σχετικά περιορισμένη, ενώ αντιθέτως έχει χρησιμοποιηθεί –και στην Ελλάδα- εκτενώς και με επιτυχία σε οδικά επιχώματα.

Τα παραπάνω καταδεικνύουν τη σημασία του παρόντος εγχειρήματος, το οποίο στοχεύει στο να προσεγγίσει ρεαλιστικά αυτό το σημαντικό θέμα, να το διερευνήσει και να εξάγει σχετικά συμπεράσματα, έτσι ώστε να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο και εφαλτήριο για άλλες παρόμοιες εργασίες. Για τη σχεδίαση του τριδιάστατου προσομοιώματος του συστήματος σιδηρόδρομου-επιχώματος-

εδάφους χρησιμοποιήθηκε το σχεδιαστικό λογισμικό Autocad 2017, ενώ για τις δυναμικές αναλύσεις το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ANSYS 17.0.

Με την ολοκλήρωση της παρούσης εργασίας και παράλληλα του μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών, νιώθω την υποχρέωση να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου σε όσους συνέβαλαν. Συγκεκριμένα, ευχαριστώ τον επιβλέποντα, Αναπλ. Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης, κ. Ιωάννη Τσομπανάκη για το ενδιαφέρον, την ευγενική και άψογη συνεργασία, την επιστημονική καθοδήγηση και την ηθική συμπαράσταση. Επίσης, ευχαριστώ θερμά και τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Αλέξανδρο Λυρατζάκη για την τεράστια ανιδιοτελή βοήθεια που μου παρείχε. Ευχαριστώ, ακόμα και την κα. Ειρήνη Κουτσογιαννάκη, ΕΤΕΠ του Πολυτεχνείου Κρήτης, για την κριτική ανάγνωση του κειμένου της εργασίας

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω τον κ. Τρύφωνα Δάρα, Επίκ. Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης και τον κ. Νικόλαο Λαγαρό, Αναπλ. Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή της παρούσης διατριβής. Τέλος, ευχαριστώ το διδακτικό προσωπικό της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης για τις γνώσεις που μου προσέφεραν, καθώς και την οικογένεια μου για την αμέριστη υποστήριξη σε όλη τη διάρκεια του μεταπτυχιακού προγράμματος.

Πίνακας Περιεχομένων

Πρόλογος	i
Πίνακας Περιεχομένων	iii
Περίληψη.....	vi
Abstract.....	vii
Κεφάλαιο 1 ^ο Εισαγωγή	1
Κεφάλαιο 2 ^ο Μελέτη του φαινομένου των δονήσεων	5
2.1. Βασικές έννοιες σιδηροδρομικής	5
2.1.1. Σιδηροδρομική υποδομή	5
2.1.2. Σιδηρόδρομος υψηλών ταχυτήτων.....	6
2.1.3. Η σιδηροδρομική γραμμή.....	7
2.1.4. Το σιδηροδρομικό τροχαίο υλικό.....	12
2.2. Στοιχεία θεωρίας διάδοσης ελαστικών κυμάτων στο έδαφος	14
2.2.1. Οι τύποι των κυμάτων στο έδαφος και οι ιδιότητές τους	15
2.2.2. Αρχές και φαινόμενα διάδοσης των κυμάτων στο έδαφος	18
2.2.3. Εδαφικές ιδιότητες και μονάδες μέτρησης σχετικές με τις δονήσεις	22
2.3. Βασικοί παράγοντες δημιουργίας και διάδοσης σιδηροδρομικών δονήσεων	26
2.3.1. Ο μηχανισμός δημιουργίας των σιδηροδρομικών δονήσεων	26
2.3.2. Επίδραση του τρένου	29
2.3.3. Επίδραση της ταχύτητας του τρένου	33
2.3.4. Επίδραση της σιδηροδρομικής εσχάρας	38
2.3.5. Επίδραση υποκείμενου εδάφους	42
2.3.6. Επίδραση εδαφικής διατομής και θέσης στις δονήσεις	51
2.3.7 Ρόλος των παρακείμενων κτιριακών κατασκευών.....	60
Κεφάλαιο 3 ^ο Μέθοδοι προσομοίωσης	67
3.1. Διάκριση προσομοιωμάτων πρόβλεψης ISO 14837-1	69

3.2. Θεωρητική προσέγγιση με αναλυτικά ή ημι-αναλυτικά προσομοιώματα	71
3.3. Θεωρητική προσέγγιση με αριθμητικές μεθόδους	73
3.3.1. Μέθοδος Πεπερασμένων Διαφορών	74
3.3.2. Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων	76
3.3.3 Μέθοδος Συνοριακών Στοιχείων	78
3.3.4. Μέθοδος Φασματικών Στοιχείων και μέθοδος Betti–Rayleigh.....	79
3.3.5. Υβριδικές μέθοδοι –Υβριδικά προσομοιώματα.....	85
3.4. Ειδικά θέματα προσομοίωσης τρένου, σιδηρόδρομου και εδάφους	90
3.4.1. Προσομοιώματα τρένου ως κινητού φορτίου σταθερού μέτρου	92
3.4.2. Προσομοιώματα τρένου ως κινητού φορτίου μεταβλητού μέτρου	95
3.4.3. Λεπτομερή προσομοιώματα τρένου	96
3.4.4. Αναλυτική προσομοίωση της εσχάρας.....	102
3.4.5. Αριθμητική προσομοίωση της εσχάρας με πεπερασμένα στοιχεία ...	106
3.4.6. Προσομοίωση εδάφους.....	108
3.5. Εμπειρικά προσομοιώματα πρόβλεψης	109
3.6. Πρότυπες εμπειρικές μέθοδοι πρόβλεψης εδαφικών δονήσεων	111
3.6.1. Οδηγίες Διεύθυνσης Μεταφορών Η.Π.Α.	111
3.6.2. Οδηγίες Σουηδικής Διεύθυνσης Μεταφορών	111
Κεφάλαιο 4 ^ο Μέτρα περιορισμού δονήσεων	113
4.1. Τάφροι.....	113
4.2. Φράκτες υπόγειου τοίχου	116
4.3. Αύξηση δυσκαμψίας υποβάθρου	118
4.4. Μπλοκ παρεμπόδισης κύματος.....	121
4.5. Κυματικοί ανακλαστήρες	123
4.6. Διογκωμένη πολυστερίνη	123
4.6.1. Έννοια και γενικά χαρακτηριστικά	123

4.6.2. Πλεονεκτήματα χρήσης σε τεχνικά έργα και φυσικομηχανικές ιδιότητες	124
4.6.3. Εφαρμογή σε οδικά επιχώματα.....	127
4.6.4. Εφαρμογή σε σιδηροδρομικό επίχωμα	131
Κεφάλαιο 5 ^ο 137 Αριθμητική προσομοίωση επιχώματος	137
5.1. Τρένο και φορτία	140
5.2. Σιδηρόδρομος	141
5.3. Επίχωμα.....	143
5.4. Έδαφος	144
Κεφάλαιο 6 ^ο Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	147
6.1 Χρονική μεταβολή κατακόρυφων μετακινήσεων.....	147
6.2 Μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις ανά ταχύτητα	162
6.3 Μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις ανά θέση	170
Κεφάλαιο 7 ^ο Συμπεράσματα.....	177
Ευρετήριο Εικόνων.....	181
Βιβλιογραφία	189

Περίληψη

Το αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η αριθμητική διερεύνηση της επίδρασης των εδαφικών δονήσεων σε σιδηροδρομικό επίχωμα εξαιτίας της κίνησης τρένων υψηλής ταχύτητας. Αρχικά, γίνεται μια εισαγωγή στο θέμα παρουσιάζοντας τις βασικές έννοιες του κλάδου της σιδηροδρομικής καθώς και τα βασικά στοιχεία της θεωρίας της διάδοσης των ελαστικών κυμάτων στο έδαφος, που είναι απαραίτητα για τη μελέτη του θέματος. Επίσης, περιγράφεται ο μηχανισμός παραγωγής των δονήσεων και οι παράγοντες που επηρεάζουν τη διάδοσή τους.

Στη συνέχεια, περιγράφονται οι διαθέσιμες μέθοδοι προσομοίωσης του φαινομένου για τον υπολογισμό και την αξιολόγησή τους και παρουσιάζονται αρκετά υφιστάμενα προσομοιώματα για το τρένο, τη σιδηροδρομική γραμμή και το έδαφος. Ακολούθως, περιγράφονται συνοπτικά τα μέτρα περιορισμού των σιδηροδρομικών δονήσεων με ιδιαίτερη αναφορά στη χρήση του γεωαφρού διογκωμένης πολυστερίνης (EPS) ως υλικό κατασκευής τυπικού σιδηροδρομικού επιχώματος. Τέλος, ακολουθεί η αριθμητική διερεύνηση, η παρουσίαση και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων καθώς και η παράθεση χρήσιμων συμπερασμάτων και προτάσεων. Για τη σχεδίαση του τριδιάστατου προσομοιώματος του συστήματος σιδηρόδρομου - επιχώματος - εδάφους χρησιμοποιήθηκε το σχεδιαστικό λογισμικό Autocad 2017 και για τις δυναμικές αναλύσεις το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ANSYS 17.0.

Στη διεξαχθείσα διερεύνηση εξετάζονται οι βασικές παράμετροι που υπεισέρχονται στο πρόβλημα. Πιο συγκεκριμένα, μελετήθηκε η επίδραση της ταχύτητας διέλευσης του τρένου, της αντικατάστασης ενός συμβατικού γαιώδους επιχώματος με ένα επίχωμα κατασκευασμένο από EPS, καθώς και η επίδραση του εδάφους έδρασης του σιδηροδρομικού επιχώματος (γαιώδες ή βραχώδες). Ως μέτρο μεγέθους των παραγόμενων δονήσεων εξετάζονται οι μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις και εξάγονται, εκτός των άλλων, αξιόλογα αποτελέσματα σχετικά με τη χρήση του EPS ως μέτρου περιορισμού των δονήσεων στο επίχωμα.

Abstract

The main aim of this thesis is to investigate the important and multidisciplinary issue of ground vibrations caused by high-speed trains. For this purpose, the existing international literature has been studied, followed by a detailed numerical investigation of the impact of the vibrations on the railway embankment..

Firstly, a general overview of the subject is presented, focusing on the basic concepts of railways as well as the theoretical aspects of elastic waves propagation. The mechanism of the generation of these vibrations and the parameters that influence their propagation are also described. Subsequently, the available methods for simulating this complex phenomenon are presented. Moreover, several existing models that are used to simulate train, railway infrastructure and ground are presented. Then, mitigation measures for limiting train vibrations are briefly outlined, with particular reference on the implementation of expanded polystyrene geofoam (EPS) as basic construction material of the rail embankment.

Finally, the numerical analyses, the results and the related discussion, as well as the derived conclusions and suggestions for further research are presented. Autocad 2017 software was used to design the three-dimensional model of the railway-embankment-ground system, while the finite element software ANSYS 17.0 has been for utilized for the numerical analyses. In the performed analyses, several key factors are investigated: the impact of the train speed, the usage of EPS and the supporting ground type (soil or rock). The maximum vertical displacements are examined as a rational measure of the induced vibrations magnitude.

Κεφάλαιο 1^ο

Εισαγωγή

Οι σιδηρόδρομοι αποτελούν μια εναλλακτική μορφή μεταφοράς αγαθών και ανθρώπων η οποία παρουσιάζει ποικίλα πλεονεκτήματα έναντι της οδικής και της αεροπορικής για μικρές, μεσαίες, αλλά και μεγάλες αποστάσεις. Οι Σιδηρόδρομοι Υψηλών Ταχυτήτων (ΣΥΤ) (High Speed Lines – HSL) έχουν αναπτυχθεί σημαντικά σε παγκόσμιο επίπεδο. Το δίκτυο υψηλών ταχυτήτων αναπτύσσεται συνεχώς στα δυτικά της Ευρώπης μετά το 1981, όπου ο πρώτος ΣΥΤ εγκαταστάθηκε στη Γαλλία στο τμήμα μεταξύ Παρισιού και Λυών. Σήμερα, έχει δημιουργηθεί ένα μεγάλο σιδηροδρομικό δίκτυο που συνδέει τις μεγάλες πρωτεύουσες των ευρωπαϊκών κρατών, ενώ δαπανώνται δεκάδες δισεκατομμύρια ευρώ ετησίως στον τομέα των σιδηροδρομικών μεταφορών. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την έντονη τεχνολογική ανάπτυξη, είχε ως αποτέλεσμα να αυξηθούν εκθετικά οι ταχύτητες των τρένων. Η Ιαπωνία κατέχει το παγκόσμιο ρεκόρ για τη μεγαλύτερη ταχύτητα τρένου ΣΥΤ, το οποίο είναι 581 km/h, δηλαδή κοντά στην ταχύτητα ενός τζετ.

Αυτή η έντονη ανάπτυξη της ταχείας σιδηροδρομικής υποδομής έχει οδηγήσει σε μια ποικιλία περιβαλλοντικών προκλήσεων. Το μεγαλύτερο πρόβλημα έγκειται στον εναέριο θόρυβο (air-borne vibration/noise) και τις εδαφικές δονήσεις (ground-borne vibration/noise) που προκαλούνται από τους ΣΥΤ. Το μεγάλο μέρος του προβλήματος, που αποτελεί εδώ και πολλά χρόνια πεδίο έρευνας, εστιάζεται στις εδαφικές δονήσεις, οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν βλάβες στα έργα υποδομής αλλά και σε γειτονικές κατασκευές.

Το ζήτημα των σιδηροδρομικών δονήσεων είναι ένα σημαντικό θέμα επειδή η αυξημένη ταχύτητα των σύγχρονων τρένων έναντι αυτής των παραδοσιακών έχει τη δυνατότητα να προκαλέσει υψηλά επίπεδα εδαφικών δονήσεων, καθώς τα

κύματα εδάφους που παράγονται από τα φορτία που κινούνται σε τόσο υψηλές ταχύτητες έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά διάδοσης. Το πρόβλημα καθορίζεται συνήθως από τρία κύρια στοιχεία: την πηγή, τη διαδρομή διάδοσης και τις ιδιότητες του μέσου διάδοσης. Ιδιαίτερα σε περιοχές με μαλακό έδαφος, εάν η ταχύτητα του τρένου της σιδηροτροχιάς είναι κοντά ή υψηλότερη από τη φυσική ταχύτητα διάδοσης των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh στο υποκείμενο έδαφος ή εάν η συχνότητα της διέγερσης είναι κοντά σε μια φυσική συχνότητα του εδάφους διάδοσης, τότε οδηγούμαστε σε τεράστια αύξηση του πλάτους των εδαφικών δονήσεων.

Γενικά, παρόλο που είναι σχετικά δύσκολο να προκληθεί ικανό επίπεδο δονήσεων ώστε να προκαλέσει άμεσα σοβαρές βλάβες στις κατασκευές, οι οικονομικές, κοινωνικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι αρκετά σοβαρές. Το πρόβλημα μεγενθύνεται όταν μελετάται η εγκατάσταση ή η αναβάθμιση ενός σιδηρόδρομου σε αστικό περιβάλλον. Συνεπώς, η ενδελεχής μελέτη του φαινομένου αυτού καθίσταται απολύτως αναγκαία, ώστε να αναπτυχθεί μια αξιόπιστη και ενιαία μεθοδολογία πρόβλεψης των εδαφικών δονήσεων, να είναι δυνατή η εκπόνηση μιας μελέτης περιβαλλοντικών επιπτώσεων πριν από την κατασκευή ή την αναβάθμιση σιδηροδρομικών γραμμών και να λαμβάνονται τα κατάλληλα μέτρα περιορισμού του προβλήματος.

Το φαινόμενο έχει ερευνηθεί εκτενώς τα τελευταία τριάντα χρόνια. Οι θεωρητικές και πειραματικές μελέτες των σιδηροδρομικών δονήσεων πολλαπλασιάστηκαν, ειδικά στην Ευρώπη. Έχουν αναπτυχθεί διάφορα πρότυπα και νόμοι σχετικά με τα όρια της εκπομπής των εδαφικών και των εναέριων δονήσεων, όμως δεν υπάρχει κάποιος επίσημος κανονισμός που να συνιστά μια συγκεκριμένη μεθοδολογία που θα πρέπει να ακολουθείται κατά τη μελέτη των σιδηροδρομικών δονήσεων. Στη βιβλιογραφία έχουν αναπτυχθεί αρκετές μεθοδολογίες και υπάρχει η δυνατότητα χρήσης πολλών διαθέσιμων προηγμένων προσομοιώσεων του φαινομένου των δονήσεων. Σε αυτό συνέβαλλε η έντονη πρόοδος των υπολογιστικών συστημάτων και εργαλείων. Από την άλλη πλευρά, οι πειραματικές και οι επί τόπου μετρήσεις είναι σημαντικές, τόσο για την ίδια την έρευνα του φαινομένου όσο και για την επικύρωση των αριθμητικών προσομοιωμάτων. Πάρα τις εξελίξεις, το ενδιαφέρον απόκτησης περισσότερων

γνώσεων και ανάπτυξης νέων προσομοιωμάτων πρόβλεψης και ανάλυσης των σιδηροδρομικών δονήσεων, παραμένει αμείωτο.

Ένας από τους παράγοντες που επηρεάζουν το φαινόμενο είναι η εδαφική τομή του σιδηρόδρομου, δηλαδή εάν η σιδηροδρομική γραμμή βρίσκεται υπόγεια, σε όρυγμα, στη στάθμη του φυσικού εδάφους ή σε επίχωμα. Τόσο σε πειραματικό όσο και υπολογιστικό επίπεδο, η υφιστάμενη διερεύνηση της περίπτωσης του επιχώματος είναι ελάχιστη. Από τις υπάρχουσες μελέτες έχει διαπιστωθεί ότι η περίπτωση επιχώματος προκαλεί χαμηλότερες δονήσεις σε σχέση με τις διατομές ορύγματος και στάθμης φυσικού εδάφους, όπου οι τελευταίες παρουσιάζουν συγκρίσιμα επίπεδα δονήσεων. Ομοίως, έχει διαπιστωθεί ότι μεγάλη σημασία έχει η δυσκαμψία του επιχώματος σε σχέση με το υποκείμενο έδαφος, επειδή το επίχωμα υπό κάποιες συνθήκες λειτουργεί ως «κυματοδηγός», παγιδεύοντας την ενέργεια των κυματικών δονήσεων μέσα σε αυτό.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται το φαινόμενο των δονήσεων που προκαλούνται από τη κυκλοφορία τρένων σε τυπικά τραπεζοειδή επιχώματα. Επίσης, η παρούσα εργασία ασχολείται αποκλειστικά με υπέργειες και όχι με υπόγειες σιδηροδρομικές γραμμές, καθώς και μόνο με τις παραγόμενες εδαφικές δονήσεις (ground-borne vibration). Ο στόχος είναι εν μέρει να μελετηθεί και να καταγραφεί η υφιστάμενη εξειδικευμένη γνώση γύρω από το θέμα με την ανασκόπηση και σύγκριση της ερευνητικής βιβλιογραφίας, αλλά και να μελετηθεί περαιτέρω το φαινόμενο.

Η εργασία αποτελείται από έξι κεφάλαια, τα οποία περιλαμβάνουν τα εξής:

- Το κεφάλαιο 1 αποτελεί την παρούσα εισαγωγή στο θέμα των δονήσεων εξαιτίας της κυκλοφορίας των τρένων.
- Το κεφάλαιο 2 περιέχει τις βασικές έννοιες του κλάδου της σιδηροδρομικής, καθώς και βασικά στοιχεία της θεωρίας της διάδοσης των ελαστικών κυμάτων στο έδαφος που είναι απαραίτητα για τη μελέτη των σιδηροδρομικών δονήσεων. Περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο παράγονται και διαδίδονται οι δονήσεις, σύμφωνα με το τρίπτυχο: πηγή, διαδρομή διάδοσης και αποδέκτης δονήσεων. Παράλληλα, εξετάζονται οι παράγοντες που επηρεάζουν τη διάδοση. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη βιβλιογραφία που αφορά τη μελέτη της δυναμικής απόκρισης του

σιδηροδρομικού επιχώματος, καθώς εκεί επικεντρώνεται η παρούσα αριθμητική διερεύνηση.

- Στο κεφάλαιο 3 περιγράφονται συνοπτικά οι διαθέσιμες μέθοδοι προσομοίωσης του φαινομένου προκειμένου να υπολογιστούν και να αξιολογηθούν οι εδαφικές δονήσεις. Γίνεται βιβλιογραφική αναφορά στις αναλυτικές, αριθμητικές και εμπειρικές προσεγγίσεις του θέματος και του συνδυασμού αυτών. Επίσης, παρουσιάζονται τα υφιστάμενα προσομοιώματα για το τρένο, τον σιδηρόδρομο και το έδαφος.
- Το κεφάλαιο 4 περιγράφει μέτρα περιορισμού των σιδηροδρομικών δονήσεων. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται και γίνεται εκτενής αναφορά στη χρήση του γεωαφρού διογκωμένης πολυστερίνης στην κατασκευή επιχωμάτων, καθώς αφορά μια εξεταζόμενη παράμετρο στην αριθμητική διερεύνηση.
- Στο κεφάλαιο 5 γίνεται αριθμητική προσομοίωση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων της κίνησης ενός τρένου υψηλών ταχυτήτων στο λογισμικό ANSYS 17.0. Η ταχύτητά κυμαίνεται από 180 έως και 360 km/h. Οι προσομοιώσεις γίνονται στις περιπτώσεις που ο σιδηρόδρομος εδράζεται σε ένα συμβατικό επίχωμα και σε ένα επίχωμα που έχει κατασκευαστεί από γεωαφρό διογκωμένης πολυστερίνης (EPS). Επιπλέον, διερευνάται και στις δύο περιπτώσεις η αντικατάσταση του γαιώδους εδάφους έδρασης του επιχώματος σε βραχώδες.
- Το κεφάλαιο 6 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Αυτά αφορούν τις κατακόρυφες επιφανειακές μετακινήσεις σε χαρακτηριστικά σημεία, σε διάφορες αποστάσεις από την κεντρική γραμμή της σιδηροτροχιάς. Για όλες τις περιπτώσεις προσομοίωσης παρατίθενται διαγράμματα και πίνακες κατακόρυφων μετακινήσεων σχετικά με τις μεταβολές χρόνου, ταχύτητας και θέσης και σχολιάζονται τα αποτελέσματα εξάγοντας χρήσιμα συμπεράσματα ιδιαίτερα για την αποτελεσματικότητα της χρήσης του EPS στο επίχωμα.
- Το κεφάλαιο 7 επικεντρώνεται στη συνοπτική περιγραφή των συμπερασμάτων της αριθμητικής διερεύνησης της παρούσης εργασίας και καταλήγει σε προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Κεφάλαιο 2^ο

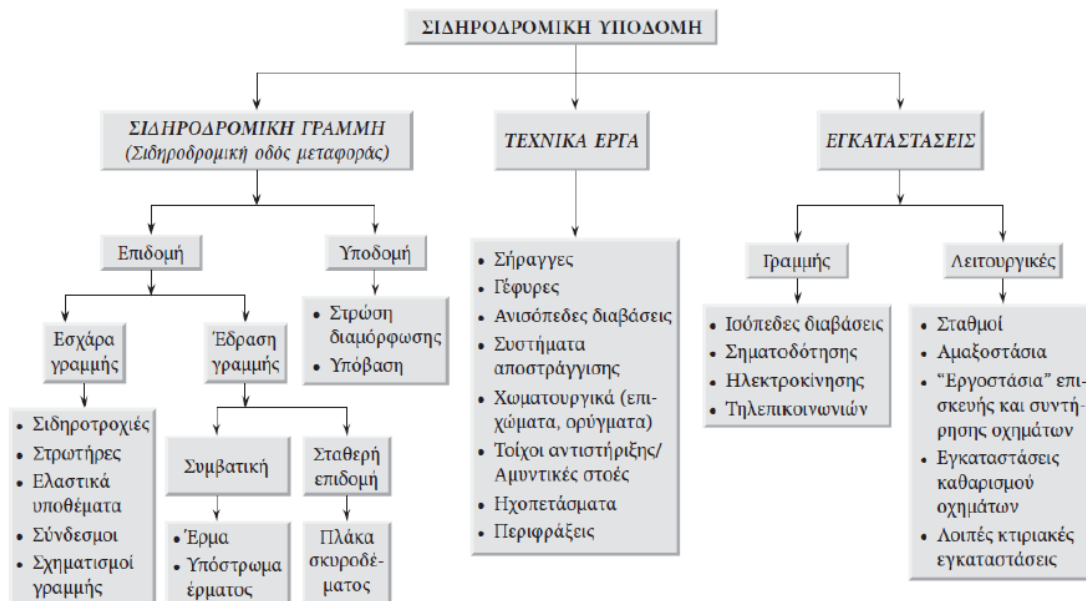
Μελέτη του φαινομένου των δονήσεων

2.1. Βασικές έννοιες σιδηροδρομικής

Η λειτουργία του σιδηρόδρομου βασίζεται στην αρχή ότι οι χαλύβδινοι τροχοί, κυλιόμενοι επί χαλύβδινων σιδηροτροχιών, έχουν πολύ μικρή τριβή κύλισης και απαιτούν σχετικά μικρή κινητήρια δύναμη για να μετακινήσουν ένα βαρύ φορτίο. Το χαρακτηριστικό αυτό της ελεύθερης κύλισης παρέχει στους σιδηρόδρομους σχέση ισχύος περίπου ενός ίππου ανά μικτό ελκόμενο τόνο. Τα αντίστοιχα οδικά μέσα μεταφοράς φορτίων (φορτηγά μετά ρυμουλκούμενου) απαιτούν ισχύ περίπου δέκα ίππων ανά μικτό ελκόμενο τόνο (Κουτσίδου, 2014).

2.1.1. Σιδηροδρομική υποδομή

Σιδηροδρομική υποδομή (βλ. Εικόνα 2.1) λέγεται η σιδηροδρομική οδός μεταφοράς (σιδηροδρομική γραμμή) μαζί με όλα τα τεχνικά έργα και τις εγκαταστάσεις διαμέσου των οποίων επιτυγχάνεται η ομαλή κυκλοφορία των συρμών (Πυργίδης, 2006). Για τις ανάγκες της παρούσης εργασίας δίνονται στοιχεία για συγκεκριμένα μόνο τμήματα αυτής της υποδομής.



Εικόνα 2.1 Οργανωτικό Σχήμα Σιδηροδρομικής Υποδομής (Πυργίδης, 2006).

2.1.2. Σιδηρόδρομος υψηλών ταχυτήτων

Βιβλιογραφικά δεν φαίνεται να υπάρχει συγκεκριμένος ορισμός για τον σιδηρόδρομο υψηλών ταχυτήτων (ΣΥΤ). Η Διεθνής Ένωση Σιδηρόδρομων (Union Internationale des Chemins de fer - International Union of Railways (UIC)), αναφέρει ότι: «ως ΣΥΤ ορίζεται ο σιδηρόδρομος που πληροί τις προϋποθέσεις υποδομής, τροχαίου υλικού και λειτουργίας, για υψηλές ταχύτητες (άνω των 250km/h)». Επίσης, σύμφωνα με τον UIC, ο όρος «κυκλοφορία υψηλών ταχυτήτων», συχνά νοείται ως κίνηση ειδικού τύπου τρένου στις συμβατικές γραμμές, αλλά με ταχύτητες χαμηλότερες από τις επιτρεπόμενες σε δίκτυα υψηλών ταχυτήτων. Αυτό γίνεται καθώς αρκετά τρένα υψηλών ταχυτήτων είναι συμβατά και με το συμβατικό δίκτυο. Για αυτόν τον λόγο υπάρχουν γραμμές που θεωρούνται υψηλών ταχυτήτων, παρόλο που η ταχύτητα σε αυτές περιορίζεται στα 110km/h για λόγους, π.χ., όχλησης εντός κατοικημένων περιοχών.

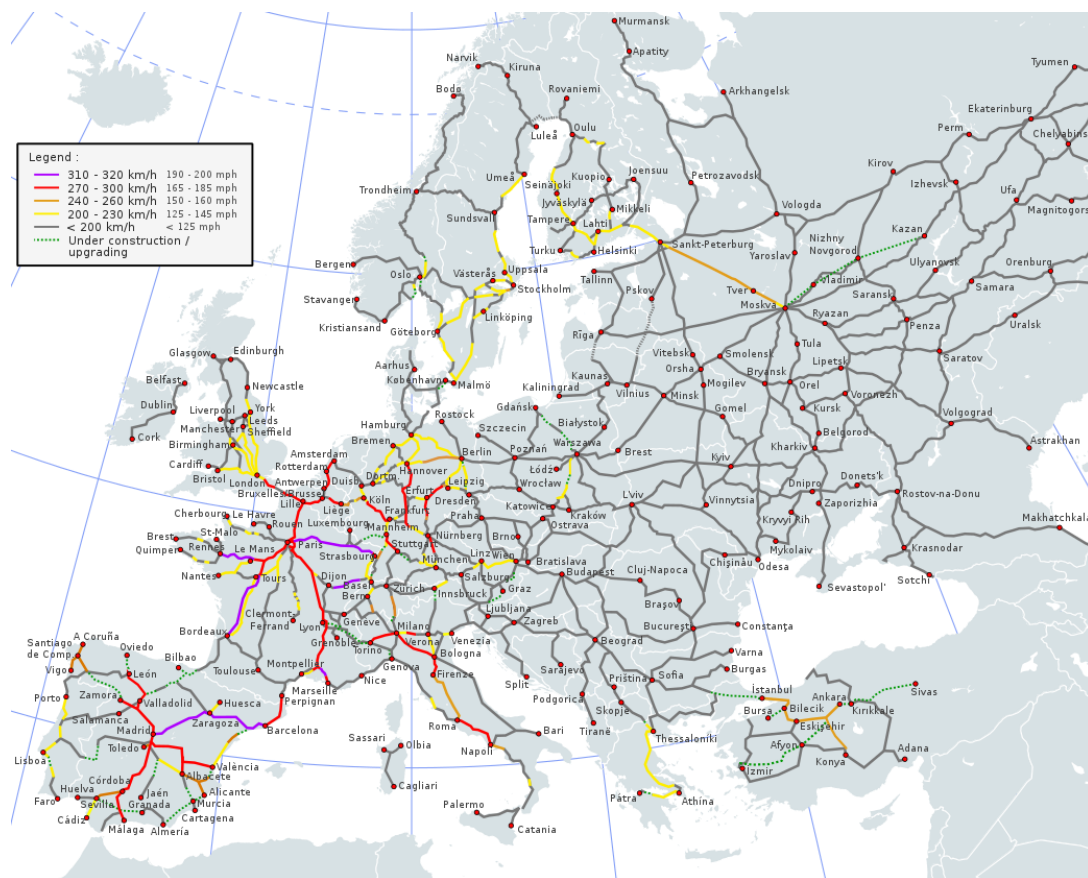
Επίσης, ο UIC αναφέρει ως τρένα υψηλών ταχυτήτων στην Ευρώπη τα ηλεκτροκίνητα τρένα με εμπορική ταχύτητα μεγαλύτερη από 300 km/h, όπως το Eurostar από Λονδίνο προς Παρίσι/Βρυξέλες, το TGV στη Γαλλία, το Thalys από Παρίσι/Βρυξέλλες προς Κολονία, το Ave στην Ισπανία και το Deutsche Bahn's Inter City Express στην Γερμανία και την Αυστρία, το Βέλγιο και την Ολλανδία. Ακόμη, η εισαγωγή κάποιων συρμών με ικανές ταχύτητες άνω των 160 km/h, σε

συμβατικούς σιδηρόδρομους οι οποίοι πρωτίτερα δεν είχαν επαρκή απόδοση, μπορεί να θεωρηθεί πλέον πως τους καθιστά ΣΥΤ (Στεργίου, 2009).

Για το διαχωρισμό ενός δικτύου συμβατικών ταχυτήτων από ένα δίκτυο υψηλών ταχυτήτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο κριτήρια, τα οποία πρέπει να πληρούνται ταυτόχρονα (Πυργίδης, 2006):

- Μέγιστη επιτεύξιμη ταχύτητα πορείας συρμού $V_{\max} \geq 200$ km/h.
- Ταχύτητα εκμετάλλευσης μεταξύ δύο τουλάχιστον ενδιάμεσων σταθμών $V_e \geq 150$ km/h.

Στην Εικόνα 2.2 φαίνεται το δίκτυο ΣΥΤ στην Ευρώπη το 2017.



Εικόνα 2.2: Σιδηρόδρομοι Υψηλών Ταχυτήτων στην Ευρώπη το 2017
(https://en.wikipedia.org/wiki/High-speed_rail_in_Europe#/media/File:High_Speed_Railroad_Map_of_Europe.svg, 2018).

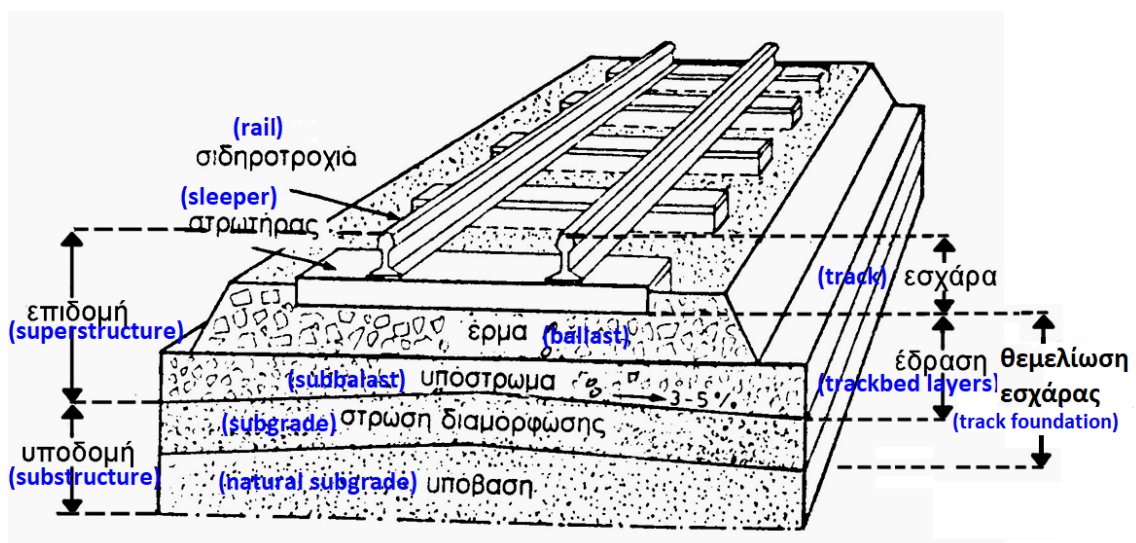
2.1.3. Η σιδηροδρομική γραμμή

Η σιδηροδρομική γραμμή (railway line/rail) αποτελείται από μια σειρά στοιχείων και υλικών διαφορετικών ιδιοτήτων και δυσκαμψιών που μεταφέρουν τα

στατικά και δυναμικά φορτία της κυκλοφορίας στο έδαφος θεμελίωσης. Για να εξασφαλισθεί η κύλιση και η οδήγηση των οχημάτων με ασφάλεια και άνεση πρέπει να υλοποιηθεί μια κατασκευή που να υποστηρίζει χωρίς να παραμορφώνεται τα φορτία που δημιουργούνται κατά την κυκλοφορία των συρμών. Συνεπώς, η σιδηροδρομική γραμμή πρέπει να παρέχει (Κουτσίδου, 2014):

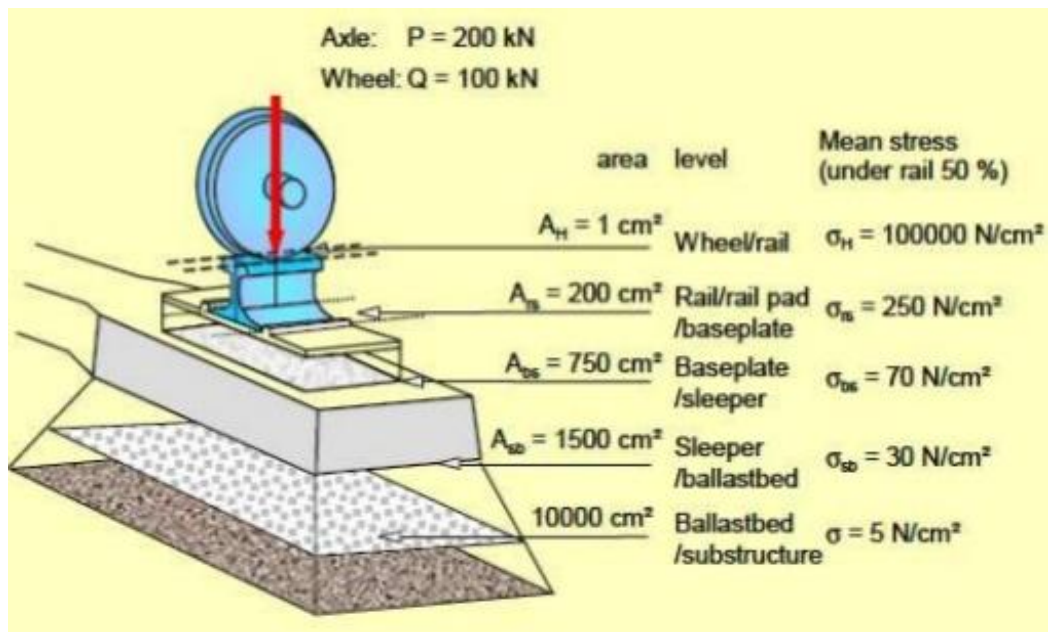
- Καλή διανομή των φορτίων κυκλοφορίας στο έδαφος θεμελίωσης.
- Αντοχή της επιδομής και υποδομής στα στατικά και δυναμικά φορτία.
- Ανάπτυξη υψηλών ταχυτήτων στις ευθυγραμμίες και στις καμπύλες.
- Δυναμική άνεση των επιβατών και ασφάλεια κυκλοφορίας του τρένου.
- Μικρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις.
- Μεγάλη διάρκεια ζωής με μικρό σχετικά κόστος συντήρησης.

Στην Εικόνα 2.3 φαίνεται η τυπική διατομή μιας σιδηροδρομικής γραμμής στη συνήθη περίπτωση της εύκαμπτης έδρασης με έρμα (κλασική σκυρογραμμή).



Εικόνα 2.3 Τυπική διατομή σιδηροδρομικής γραμμής για την κλασική σκυρογραμμή (Τροποποιημένη από: <http://docplayer.gr/3914364-l-ap-diadromoi-prosgeiosis-apogeiosis-aeroskafon.html>, 2018).

Η αλληλοδιαδοχή των διαφόρων στρώσεων χαρακτηρίζεται από διαρκώς αυξανόμενο εμβαδό έδρασης κάθε στρώσης και συνεπώς σημαντική μείωση της αναπτυσσόμενης τάσης. Συνεπώς, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.4, μεταξύ του σημείου που ασκείται το φορτίο τροχού και της υποδομής, η αναπτυσσόμενη τάση μειώνεται 1.000-5.000 φορές (Κουτσίδου, 2014).



Εικόνα 2.4: Αναπτυσσόμενες τάσεις στη σιδηροδρομική οδό μεταφοράς
(<https://www.slideshare.net/nkocet/unit-1-railway-engineering>, 2018).

Η σιδηροδρομική γραμμή αποτελείται από δυο συστατικά μέρη, τα οποία είναι η επιδομή και η υποδομή (από πάνω προς τα κάτω):

α) Επιδομή σιδηροδρομικής γραμμής

Η κλασική μορφή της επιδομής (superstructure) της σιδηροδρομικής γραμμής περιλαμβάνει διαδοχικά από πάνω προς τα κάτω τις δυο παράλληλες σιδηροτροχιές, τους στρωτήρες, το έρμα και το υπόστρωμα του έρματος. Το ανώτερο τμήμα της επιδομής που περιλαμβάνει τις σιδηροτροχιές, τους στρωτήρες, τους συνδέσμους και τα υλικά σύνδεσης σιδηροτροχιών – στρωτήρων λέγεται «εσχάρα γραμμής». Το κατώτερο τμήμα της επιδομής που περιλαμβάνει το έρμα και τις υποκείμενες στρώσεις του, λέγεται «έδραση» της γραμμής (Γιαννακός, 2012).

Ο ρόλος της επιδομής είναι να παραλαμβάνει το δυναμικό φορτίο των τροχών, να το μεταφέρει και να το διανέμει στην υποδομή με τάσεις που πρέπει να είναι συμβατές με την αντοχή και την αντίσταση του εδαφικού υλικού της υποδομής (Γιαννακός, 2012). Επίσης, εξασφαλίζει τη γρήγορη απομάκρυνση των νερών της βροχής και αμβλύνει τις δυσμενείς επιπτώσεις σε περίπτωση παγετού (Φώλας, 2009).

Οι σιδηροτροχιές υποστηρίζουν και κατευθύνουν όταν χρειάζεται τους τροχούς του συρμού και τοποθετούνται επί των στρωτήρων μέσω ελαστικών

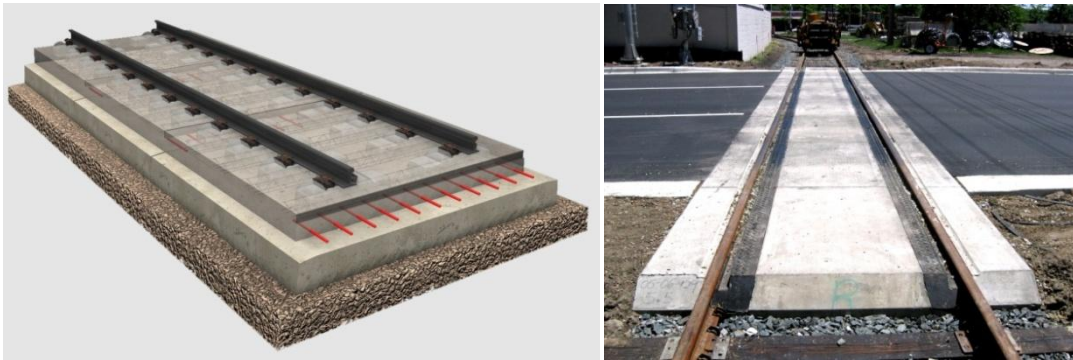
υποθεμάτων και συνδέονται με αυτούς με τη βοήθεια ειδικών διατάξεων (Κουτσίδου, 2014). Οι στρωτήρες, συνήθως είναι ξύλινοι ή από μπετόν και εδράζονται στα σκύρα της στρώσης του έρματος. Ο ρόλος τους (μαζί με τους συνδέσμους τους) είναι να διανέμουν τα φορτία που δέχονται από τις σιδηροτροχιές στην κατώτερη στρώση και να τις διατηρούν σε σταθερή απόσταση μεταξύ τους. Ο ρόλος των ελαστικών υποθεμάτων των σιδηροτροχιών είναι να απορροφούν ένα τμήμα των δονήσεων και να επιτρέπουν την κίνηση των σιδηροτροχιών χωρίς να καταστρέφονται οι στρωτήρες.

Το έρμα κατασκευάζεται από θραυστά υλικά (σκύρα) και το υπόστρωμα έρματος από κατάλληλα διαβαθμισμένο υλικό, σύμφωνα με διεθνή πρότυπα. Ο ρόλος του έρματος είναι να εξασφαλίσει τη σταθερότητα των στρωτήρων, να λειτουργεί σαν μέσο απόσβεσης των δονήσεων από τη διέλευση των συρμών (βύθιση και επαναφορά της γραμμής στην αρχική της θέση), να εμποδίζει τις διαφορικές καθιζήσεις, να επιτρέπει με τη βοήθεια των μηχανημάτων αντικατάστασης της υπόβασης τη γρήγορη επανόρθωση των σφαλμάτων και την αποκατάσταση της γεωμετρίας της γραμμής, να παρέχει επαρκή ηλεκτρική αντίσταση μεταξύ των σιδηροτροχιών, να εμποδίζει την ανάπτυξη βλάστησης επί της επιδομής και να απορροφά μέρος του θορύβου της κύλισης (Φώλας, 2009). Το υπόστρωμα του έρματος διαχωρίζει το στρώμα του έρματος από την υποδομή, εμποδίζοντας την εισχώρηση των λεπτόκοκκων υλικών της στο έρμα. Επίσης, εμποδίζει την τοπική θραύση της άνω επιφάνειας της υποδομής και επιτρέπει την αποστράγγιση τόσο των νερών που προέρχονται από το έρμα όσο και των υπόγειων νερών από την υποδομή (Φώλας, 2009).

Εκτός της έδρασης με έρμα (κλασική ή συμβατική ή εύκαμπτη έδραση) όπως περιγράφηκε (βλ. Εικόνα 2.5), εφαρμόζεται και η έδραση με πλάκα σκυροδέματος (σταθερή επιδομή ή δύσκαμπτη έδραση). Η λύση αυτή, που παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.6, προτιμάται κυρίως σε ειδικές περιπτώσεις και στα υπόγεια τμήματα της γραμμής καθώς περιορίζει σημαντικά τις ανάγκες συντήρησης (Κουτσίδου, 2014).



Εικόνα 2.5: Κλασική ή συμβατική ή εύκαμπτη έδραση (<https://www.plassertheurer.com/es/maquinas-sistemas/desguarnecido-balasto.html#&gid=1&pid=1>, 2018).



Εικόνα 2.6: Σταθερή επιδομή ή Δύσκαμπτη έδραση (<https://www.travertec.ro/track-to-the-future/products/railways-and-commuter-traffic/ballastless-track-systems/rheda-2000/ballastless-track-system-without-continuous-reinforcement/>, <https://www.vias-ferreas.com/examples?lightbox=image1z85>, 2018).

β) Υποδομή σιδηροδρομικής γραμμής

Η υποδομή (substructure) της γραμμής είναι το στρώμα του εδάφους πάνω στο οποίο κατασκευάζεται η επιδομή της γραμμής και περιλαμβάνει συνήθως δύο στρώσεις (Φώλας, 2009):

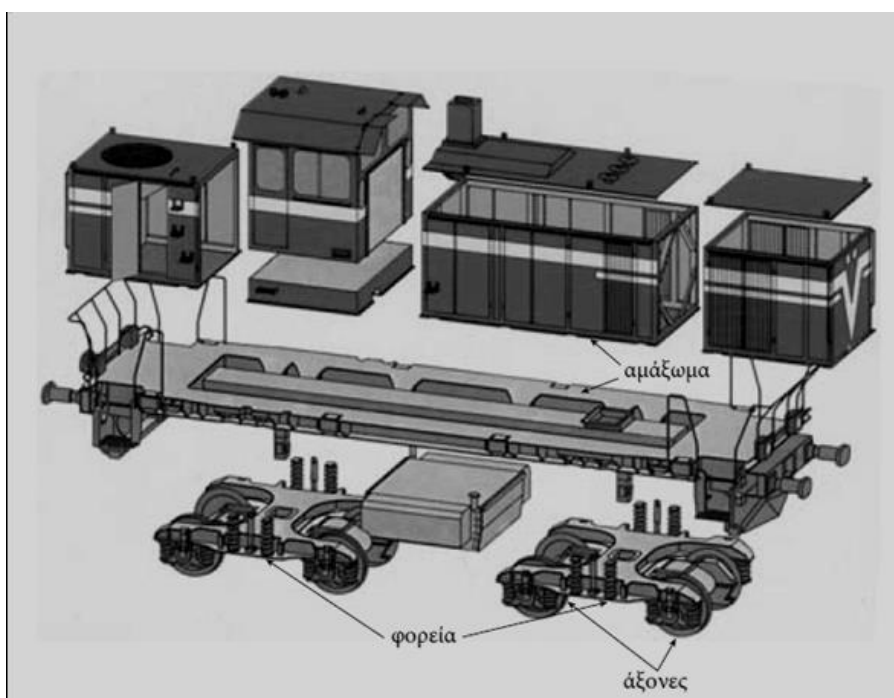
- Τη στρώση διαμόρφωσης, ως ανώτερη στρώση, που τοποθετείται εφόσον το εδαφικό υλικό δεν είναι καλής ποιότητας.
- Την υπόβαση ή έδαφος θεμελίωσης ως κατώτερη στρώση.

Η υποδομή εξασφαλίζει μια σταθερή θεμελίωση των στρώσεων της έδρασης και γενικότερα της επιδομής της σιδηροδρομικής γραμμής και για αυτό θα πρέπει να έχει ανθεκτικότητα στον παγετό, να μην υπόκειται σε σημαντικές μεταβολές όγκου

και να εξασφαλίζει τη γραμμή από τον κίνδυνο θραύσης λόγω διάτμησης (Φώλας, 2009).

2.1.4. Το σιδηροδρομικό τροχαίο υλικό

Ως σιδηροδρομικό τροχαίο υλικό ορίζονται όλα τα οχήματα που κινούνται πάνω στις σιδηροτροχιές. Αυτά διακρίνονται στα έλκοντα (κινητήρια) και στα ελκόμενα (φερόμενα) (Κουτσίδου, 2014). Τα έλκοντα οχήματα διαθέτουν αυτόνομη κίνηση, είναι δηλαδή εφοδιασμένα με κινητήρες. Τα οχήματα αυτά, όταν εξυπηρετούν αποκλειστικά την έλξη των ελκόμενων οχημάτων, ονομάζονται «κινητήρια οχήματα» (ή συρμοκινητήρες), ενώ όταν επιτρέπουν συγχρόνως και τη μεταφορά περιορισμένου σχετικά αριθμού επιβατών, ονομάζονται «αυτοκινητάμαξες». Ανάλογα με την πηγή ενέργειας με την οποία κινούνται κατατάσσονται σε τέσσερις κατηγορίες: ατμάμαξες, νηζελάμαξες, αεριοστροβιλάμαξες και ηλεκτράμαξες. Τα ελκόμενα οχήματα δε διαθέτουν αυτόνομη έλξη, εξυπηρετούν τη μεταφορά προσώπων ή αγαθών και έτσι διακρίνονται σε επιβατικά οχήματα, εμπορικά οχήματα γενικής χρήσης και φορτηγά οχήματα ειδικής χρήσης.



Εικόνα 2.7: Τα κύρια μέρη σιδηροδρομικού οχήματος: αμάξωμα – φορεία – άξονες (Κουτσίδου, 2014).

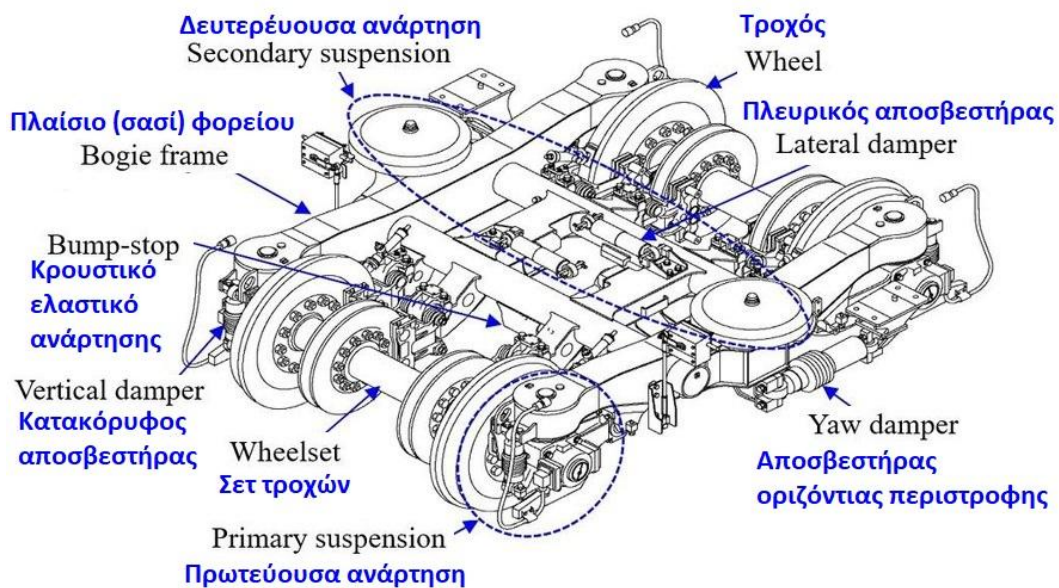
Τα τρία βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται κάθε σιδηροδρομικό όχημα, είτε είναι κινητήριο είτε είναι φερόμενο είναι τα εξής (Κουτσίδου, 2014):

- το αμάξωμα (ή κιβώτιο),
- τα φορεία,
- οι άξονες.

Η Εικόνα 2.7 δείχνει τα παραπάνω βασικά μέρη για ένα κινητήριο όχημα. Σημειώνεται ότι το αμάξωμα αναφέρεται πολλές φορές και ως βαγόνι.

Η σύνθεση των ελκόντων οχημάτων πορείας και των ελκόμενων οχημάτων δημιουργεί τους σιδηροδρομικούς συρμούς (ή αμαξοστοιχίες ή τρένα). Οι συρμοί χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες (Κουτσίδου, 2014):

- ελκόμενοι συρμοί,
- συρμοί τύπου push – pull, και
- αυτοκινητάμαξες.



Εικόνα 2.8: Τα συστατικά μέρη ενός φορείου αμαξώματος τρένου (Atamuradov et al., 2017).

Όπως θα συζητηθεί σε επόμενα κεφάλαια, οι σιδηροδρομικές δονήσεις δημιουργούνται στη διεπαφή τροχού/σιδηροτροχιάς. Ιδιαίτερο ρόλο διαδραματίζει η ανάρτηση του αμαξώματος η οποία χρησιμεύει για την απόσβεση των ταλαντώσεων και συμβάλλει στην ασφάλεια αλλά και στην άνεση του οχήματος. Η ανάρτηση στην περίπτωση των τρένων διακρίνεται σε πρωτεύουσα και

δευτερεύουσα. Στην Εικόνα 2.8 φαίνεται σχηματικά ένα φορείο αμαξώματος τρένου με τα συστατικά του μέρη και διακρίνονται τα προαναφερθέντα δυο είδη ανάρτησης.

Η πρωτεύουσα ανάρτηση αφορά τη σύνδεση των τροχών με το φορείο, ενώ η δευτερεύουσα αφορά τη σύνδεση του φορείου με το αμάξωμα. Η πρωτεύουσα ανάρτηση είναι αυτή που διαχωρίζει τις διάφορες σχετικές με αυτήν μάζες σε τρεις κατηγορίες, οι οποίες είναι οι ακόλουθες (Colaço et al., 2015):

- η αναρτημένη μάζα,
- η ημι-αναρτημένη μάζα,
- η μη αναρτημένη μάζα.

Γενικά, αυτές οι μάζες συνδέονται μεταξύ τους, επηρεάζουν η μία την άλλη και ταλαντώνονται η κάθε μία με διαφορετική συχνότητα.

Η αναρτημένη μάζα είναι αυτή που υποστηρίζεται από τα ελατήρια και τους αποσβεστήρες και προστατεύεται από τα κτυπήματα και τις δονήσεις που υφίστανται οι τροχοί σε κάθε ανωμαλία στη διεπιφάνεια κύλισης (<http://www.machinedesign.com/springs/what-are-differences-between-sprung-and-unsprung-weight>, 2018). Δηλαδή, πρόκειται για τη μάζα όλων των μερών του οχήματος, την οποία προστατεύει το πρωτεύον σύστημα ανάρτησης. Αυτή αποτελείται από τις μάζες του αμαξώματος, της δευτερεύουσας ανάρτησης, του πλαισίου του φορείου, ενός μέρους του ηλεκτρικού μοτέρ και της πρωτεύουσας ανάρτησης (Giannakos, 2013). Η μη αναρτημένη μάζα αποτελείται από τις μάζες του οχήματος που βρίσκονται κάτω από την πρωτεύουσα ανάρτηση (άξονες, τροχοί και ένα μέρος του ηλεκτρικού μοτέρ των κινητήριων αμαξωμάτων) και ενεργούν επάνω στην σιδηροδρομική εσχάρα χωρίς καθόλου απόσβεση (Giannakos, 2013). Τέλος, η ημι-αναρτημένη μάζα του τρένου αφορά στοιχεία που συνδέονται αφενός με την μη αναρτημένη μάζα και αφετέρου με την αναρτημένη μάζα.

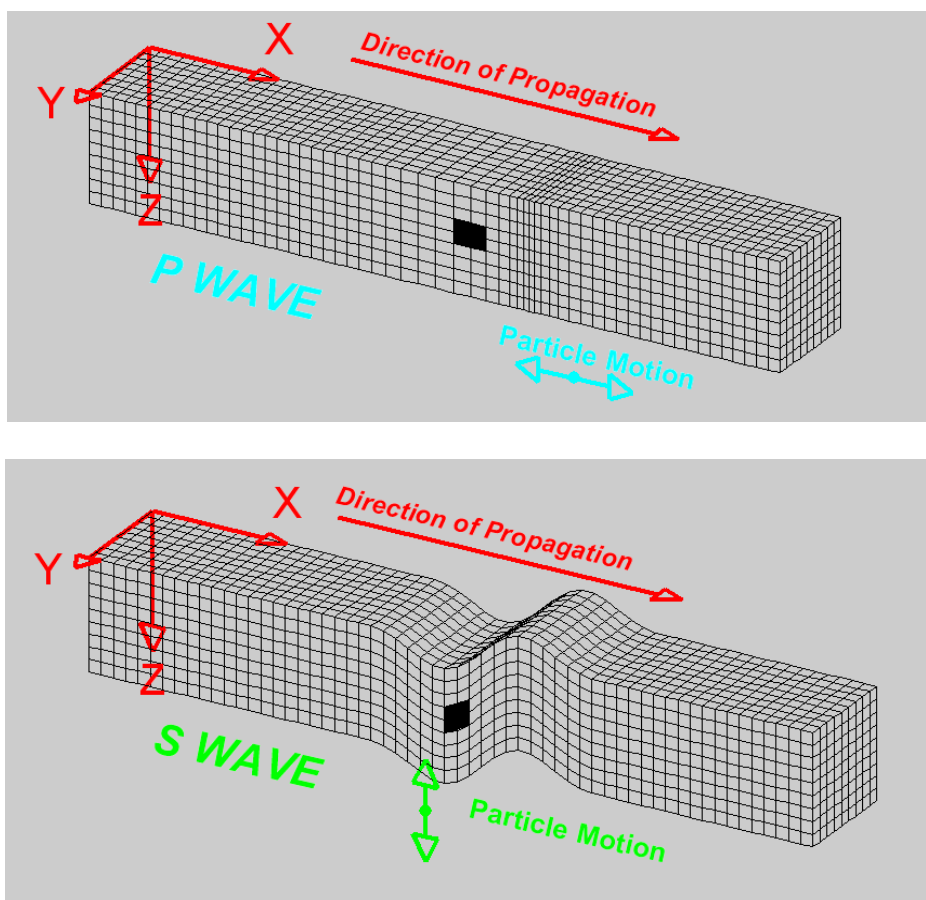
2.2. Στοιχεία θεωρίας διάδοσης ελαστικών κυμάτων στο έδαφος

Οι εδαφικές δονήσεις διαδίδονται στο έδαφος ως διάφοροι τύποι μηχανικών κυμάτων. Συνεπώς, κρίνεται απαραίτητη μια σύντομη αναφορά σε αυτά, στη

διάδοσή τους στο έδαφος, στις σχετικές εδαφικές ιδιότητες και στις δονητικές μονάδες μέτρησης.

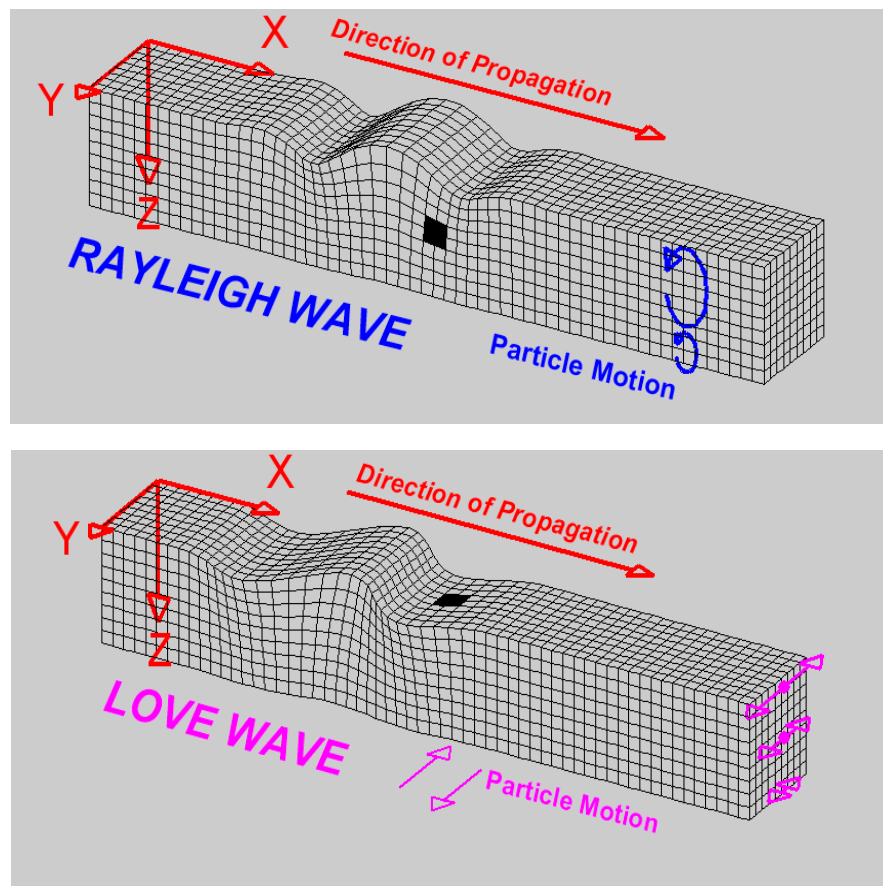
2.2.1. Οι τύποι των κυμάτων στο έδαφος και οι ιδιότητές τους

Οι δυο βασικοί τύποι κυμάτων σε ένα στερεό μέσο, όπως το έδαφος, είναι τα κύματα χώρου (Body Waves – BW) και τα επιφανειακά κύματα (Surface Waves – SW). Κύματα χώρου είναι τα διαμήκη ή επιμήκη ή συμπίεστικά κύματα ή κύματα P (Pressure Waves ή P – waves) και τα διατμητικά ή εγκάρσια κύματα ή κύματα S (Shear Waves ή S-waves). Στην τεχνική σεισμολογία αναφέρονται και ως πρωτεύοντα (Primary) και δευτερεύοντα (Secondary), αντίστοιχα. Η επιφανειακή αλληλεπίδραση μεταξύ των κυμάτων χώρου και μεταξύ της ίδιας της επιφάνειας μπορεί να παράγει επιφανειακά κύματα. Τα κύματα χώρου φαίνονται στην Εικόνα 2.9.



Εικόνα 2.9: Τα κύματα χώρου (Ραπτάκης, 2007).

Επιφανειακά κύματα είναι τα κύματα Rayleigh (Rayleigh waves ή R-waves), τα κύματα Love (Love waves ή L-waves) και άλλα είδη επιφανειακών κυμάτων. Είναι χαμηλότερης συχνότητας και πιο αργά από τα κύματα χώρου. Το πλάτος τους μειώνεται εκθετικά με το βάθος και είναι περισσότερο «αισθητά από τον άνθρωπο» από ότι τα κύματα χώρου σε μεγάλες αποστάσεις από την πηγή της εδαφικής διαταραχής. Τα επιφανειακά κύματα μιας σεισμικής διαταραχής φέρουν το 67% της συνολικής ενέργειας, ενώ τα κύματα P φέρουν το 7%, και τα κύματα S το 26% αυτής (Ραπτάκης, 2007; Connolly et al., 2014a). Τα κύματα Love και τα υπόλοιπα είδη επιφανειακών κυμάτων έχουν ελάχιστη σημασία αναφορικά με το θέμα των παραγομένων εδαφικών δονήσεων εξαιτίας των τρένων και δεν μας απασχολούν στη μελέτη του φαινομένου (Persson, 2016). Τα επιφανειακά κύματα φαίνονται στην Εικόνα 2.10.



Εικόνα 2.10: Τα επιφανειακά κύματα (Ραπτάκης, 2007).

Τα κύματα P (Pressure), ως διαμήκη, διαδίδονται στο μέσο με τη μορφή «πυκνωμάτων και αραιωμάτων» όπου κάθε σωματίδιο ταλαντώνεται παράλληλα στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Διαδίδονται στα στερεά, τα υγρά και τα

αέρια σώματα, άρα μπορούν να κινηθούν μέσω των συμπαγών πετρωμάτων αλλά και των υγρών τμημάτων στο εσωτερικό της γης. Είναι τα ταχύτερα είδη σεισμικών κυμάτων.

Τα κύματα S (Shear), ως εγκάρσια, διαδίδονται στο μέσο με τη μορφή «κοιλάδων και ορέων» όπου κάθε σωματίδιο του μέσου ταλαντώνεται κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος (κατά την οριζόντια (SH - Shear Horizontal) και κατά την κατακόρυφη (SV - Shear Vertical) έννοια). Διαδίδονται στα στερεά σώματα, ταξιδεύουν περίπου δύο φορές πιο αργά από τα διαμήκη κύματα και λόγω του μεγάλου τους πλάτους προκαλούν ισχυρές μετακινήσεις στο έδαφος διάδοσης.

Κύμα P	Κύμα S	Κύμα R
Υψηλότερη ταχύτητα διάδοσης	Μέση ταχύτητα διάδοσης	Χαμηλότερη ταχύτητα διάδοσης
Διαμήκης ταλάντωση	Εγκάρσια ταλάντωση	Κατακόρυφη ταλάντωση αλλά με την απόσταση αναπτύσσει ξαφνικά οριζόντια συνιστώσα.
Αυξημένη ταχύτητα διάδοσης κάτω από τη στάθμη του εδαφικού υδροφόρου ορίζοντα.	Η ταχύτητα διάδοσης μειώνεται από τον εδαφικό υδροφορέα.	Η ταχύτητα διάδοσης δεν επηρεάζεται από τον εδαφικό υδροφορέα αλλά γενικά είναι χαμηλή σε υγρό έδαφος.
Εμφανίζει διασπορά. Η ταχύτητα διάδοσης εξαρτάται από τη συχνότητα.	Εμφανίζει διασπορά. Η ταχύτητα διάδοσης εξαρτάται από τη συχνότητα.	Δεν εμφανίζει διασπορά. Η ταχύτητα διάδοσης είναι ανεξάρτητη της συχνότητας σε ομογενές υλικό.
Η αναλογική ενεργειακή διάδοση είναι χαμηλή.	Η αναλογική ενεργειακή διάδοση είναι μέση.	Η αναλογική ενεργειακή διάδοση είναι υψηλή.

Πίνακας 2.1: Συγκριτικά χαρακτηριστικά των τριών βασικών τύπων των εδαφικών κυμάτων (Avillez et al., 2012).

Τα κύματα Rayleigh είναι τα πιο αργά όλων των τύπων των σεισμικών κυμάτων και συνήθως τα πιο περίπλοκα. Σε ισοτροπικά στερεά τα σωματίδια ταλαντώνονται σε ελλειπτική τροχιά παράλληλα στη διεύθυνση διάδοσης. Τα κύματα Rayleigh λοιπόν, επειδή κυλούν, κινούν το έδαφος πάνω-κάτω, δεξιά-αριστερά στην ίδια κατεύθυνση που κινείται το κύμα. Μετακινούν το έδαφος, περίπου με τον ίδιο τρόπο, όπως ένα θαλάσσιο κύμα μετακινεί τα επιφανειακά

νερά. Στον Πίνακα 2.1 συγκρίνονται μερικά χαρακτηριστικά των τριών βασικών τύπων των εδαφικών κυμάτων.

Η ταχύτητα των κυμάτων χώρου P και S στο μέσο διάδοσης μπορεί να υπολογιστεί από τις σχέσεις (Persson, 2016):

$$c_P = \sqrt{(\lambda + 2\mu)/\rho} = \sqrt{(K + 4/3G)/\rho} \quad \text{και} \quad c_S = \sqrt{\mu/\rho} = \sqrt{G/\rho} \quad (2.1)$$

όπου:

$$\lambda = \nu E / [(1 + \nu)(1 - 2\nu)] \quad \text{και} \quad \mu = E / [2(1 + \nu)] \quad (2.2)$$

ενώ λ και μ είναι οι παράμετροι του Lamé που αφορούν το υλικό διάδοσης, E είναι το μέτρο ελαστικότητας ή μέτρο Young, ν είναι ο λόγος Poisson, ρ είναι η πυκνότητα του υλικού, K είναι το μέτρο διόγκωσης του υλικού και G είναι το μέτρο διάτμησης του υλικού.

Η ταχύτητα των κυμάτων Rayleigh στο μέσο διάδοσης μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση (Persson, 2016):

$$c_R = [(0.87 + 1.12\nu)/(1 + \nu)] c_S \quad (2.3)$$

η οποία έχει ακρίβεια για τιμές του λόγου Poisson $0 < \nu < 0,5$ του στερεού διάδοσης όπου τότε ισχύει ότι $0.87c_S \leq c_R \leq 0.95c_S$. Συνεπώς, η ταχύτητα των κυμάτων Rayleigh είναι λίγο χαμηλότερη της ταχύτητας των κυμάτων S.

2.2.2. Αρχές και φαινόμενα διάδοσης των κυμάτων στο έδαφος

Μετά τη διέγερση ενός συστήματος από τον εξωτερικό διεγέρτη, τα κύματα στο μέσο διάδοσης μπορούν να διαδοθούν σε πολλές κατευθύνσεις. Η διάδοση των κυμάτων στο έδαφος περιορίζεται από την εδαφική επιφάνεια. Στα μαθηματικά προσομοιώματα, αυτός ο τύπος γεωμετρίας αναφέρεται συνήθως ως ημιχώρος (half-space). Το γεγονός ότι το έδαφος έχει πεπερασμένες διαστάσεις και δεν είναι ομογενές έχει ως συνέπεια τη διάθλαση, ανάκλαση, περίθλαση, σκέδαση, απόσβεση, κ.λπ. των διαδιδόμενων σε αυτό κυμάτων.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται συνοπτικά οι αρχές, τα επακόλουθα φαινόμενα και οι μηχανισμοί που χαρακτηρίζουν τη διάδοση κυμάτων στον ημιχώρο:

α) Αρχή επαλληλίας ή υπέρθεσης

Σύμφωνα με την αρχή αυτή όταν σε ένα ελαστικό μέσο διαδίδονται δύο ή περισσότερα κύματα η απομάκρυνση ενός σημείου του μέσου είναι ίση με τη συνισταμένη των απομακρύνσεων που οφείλονται στα επί μέρους κύματα.

β) Αρχή του Fermat

Σύμφωνα με την αρχή αυτή το κύμα ακολουθεί τον συντομότερο δρόμο.

γ) Αρχή του Huygens

Σύμφωνα με την αρχή αυτή το κύμα αναπαράγεται σε κάθε «εμπόδιο». Πιο συγκεκριμένα, κάθε σημείο ενός μετώπου κύματος, μπορεί να θεωρηθεί σαν μια δευτερεύουσα πηγή σφαιρικού κύματος. Η νέα θέση του μετώπου κύματος θα είναι η κοινή περιβάλλουσα, όλων αυτών των σφαιρικών κυμάτων.

δ) Σκέδαση

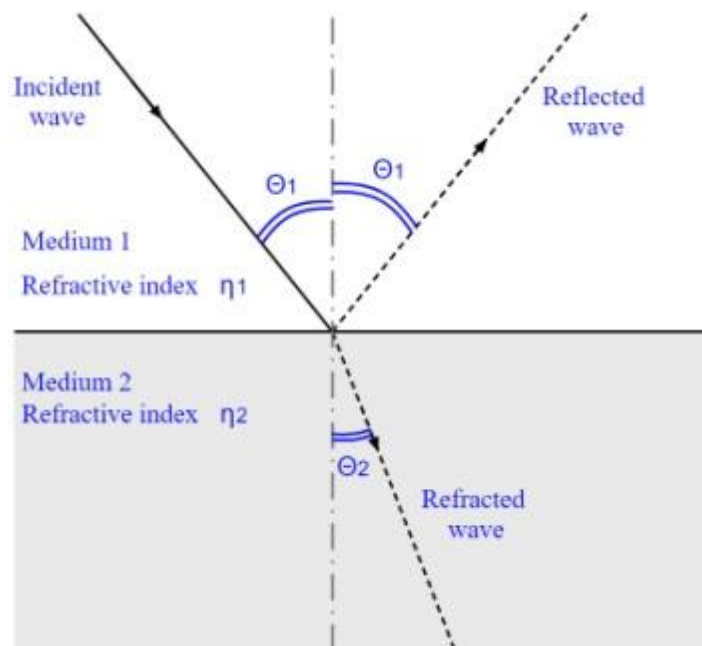
Η σκέδαση (scattering) είναι μια χαρακτηριστική ιδιότητα του σεισμικού κύματος και είναι η μεταβολή της ταχύτητας διάδοσης με τη συχνότητα (ή την περίοδο ή το μήκος κύματος). Αν η ταχύτητα διάδοσης ενός κύματος αυξάνεται ή μειώνεται με την αύξηση της περιόδου τότε η σκέδαση είναι κανονική ή ανάστροφη, αντίστοιχα. Τόσο τα κύματα Rayleigh όσο και τα κύματα Love σκεδάζονται.

ε) Ανάκλαση και διάθλαση

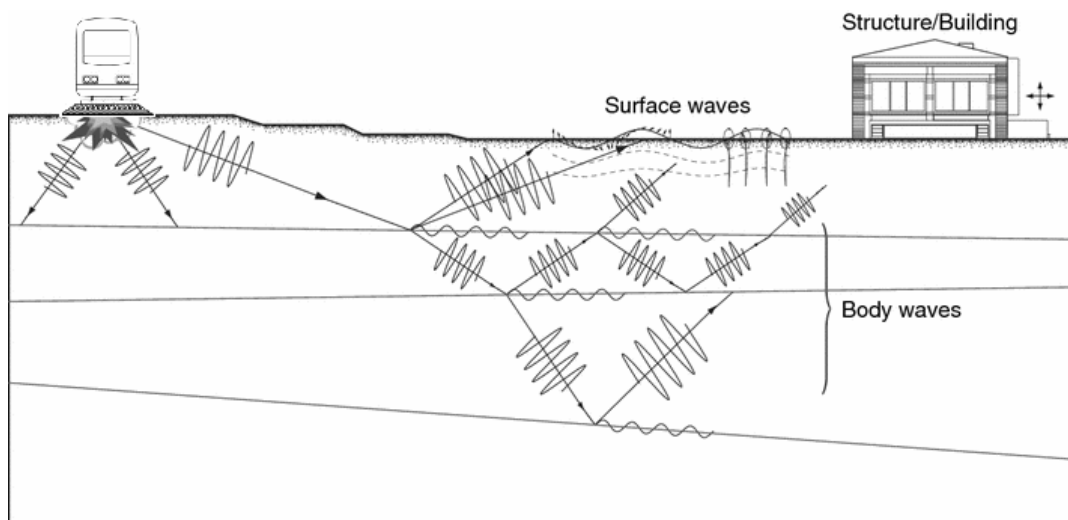
Η ανάκλαση (reflection) και η διάθλαση (refraction) είναι φαινόμενα που υπακούουν στον νόμο του Snell, σύμφωνα με τον οποίο, ο λόγος n_2/n_1 των δεικτών διάθλασης, που εξαρτάται από το μέσο διάδοσης, είναι αντιστρόφως ανάλογος με τον λόγο των ταχυτήτων στα δύο μέσα και αντιστρόφως ανάλογος του λόγου των ημιτόνων των γωνιών πρόσπτωσης (βλ. Εικόνα 2.11).

Το έδαφος, συνήθως συντίθεται από στρώσεις εδαφικών υλικών διαφόρων ιδιοτήτων. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.12, όταν το κύμα συνάντα τη διεπιφάνεια των εδαφικών στρώσεων υπόκειται σε ανάκλαση και διάθλαση. Τα πλάτη και οι γωνίες των ανακλώμενων και διαθλώμενων κυμάτων εξαρτώνται από τη γωνία πρόσπτωσης καθώς και από τις αντιστάσεις των εδαφικών στρώσεων (Persson, 2016). Τα κύματα SH παράγουν μονοδιαθλώμενα και ανακλώμενα SH, ενώ τα

κύματα P και SV παράγουν καθένα και τους δυο τύπους P και SV διαθλώμενα και ανακλώμενα (Ραπτάκης, 2007).



Εικόνα 2.11: Ανάκλαση και διάθλαση κυμάτων.



Εικόνα 2.12: Η ανάκλαση και η διάθλαση των σιδηροδρομικών δονήσεων.

στ) Περίθλαση

Όταν ένα κύμα συναντήσει ένα αντικείμενο στην τροχιά του, το κύμα το προσπερνάει αφήνοντας μια «σκιά» πίσω από το αντικείμενο, αυτό το φαινόμενο ονομάζεται περίθλαση (diffraction). Ο βαθμός περίθλασης εξαρτάται από το μέγεθος του εμποδίου (αντικειμένου) σε σχέση με το μήκος κύματος. Εάν το

αντικείμενο είναι πολύ μικρότερο από το μήκος κύματος, τότε το κύμα δεν επηρεάζεται. Όσο περισσότερο πλησιάζουν οι διαστάσεις του αντικειμένου στο μήκος κύματος, τόσο περισσότερο παρατηρείται το φαινόμενο της περίθλασης. Η περίθλαση έχει ως αποτέλεσμα να παράγονται και να παρατηρούνται μη αναμενόμενα κύματα σε διάφορες περιοχές του εδαφικού μέσου διάδοσης και να γίνεται ανακατανομή της ενέργειας λόγω των τοπικών ανωμαλιών.

ζ) Εξασθένηση ή Απόσβεση ή Απορρόφηση του κύματος

Η απόσβεση (attenuation) οδηγεί στη μείωση του πλάτους, καθώς αυξάνεται η απόσταση από την πηγή. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην γεωμετρική διάχυση λόγω της κυματικής διασποράς, στην υλική ή «εσωτερική» εξασθένηση (ποιότητα μικροσκοπικής δομής) και σε φαινόμενα περίθλασης.

Στην περίπτωση των σιδηροδρομικών δονήσεων η απόσβεση στο υποκείμενο έδαφος προκαλείται κυρίως από την απόσβεση του ίδιου του εδαφικού υλικού και τη γεωμετρική απόσβεση. Η γεωμετρική απόσβεση περιγράφει την εξάπλωση της ενέργειας των κυμάτων και εξαρτάται από τη γεωμετρία του εδάφους, ενώ η απόσβεση του υλικού περιγράφει την απορρόφηση ενέργειας μέσα στα σωματίδια του εδάφους (Persson, 2016). Επίσης, έχει αποδειχθεί ότι η απόσβεση εξαρτάται από τη συχνότητα της διέγερσης (Connolly et al., 2014b). Είναι μεγαλύτερη στα ανώτερα στρώματα και μειώνεται με το βάθος και αυτό οφείλεται στο ότι τα σωματίδια του εδάφους είναι λιγότερο συμπαγή στα ανώτερα στρώματα, οπότε το κύμα χάνει μεγαλύτερη ενέργεια καθώς «διαπερνά» τα κενά του αέρα. Επιπλέον, το κορεσμένο έδαφος μπορεί να εμφανίζει αυξημένη ιξώδη απόσβεση σε υψηλές συχνότητες (Connolly et al., 2014a).

Για την περιγραφή της απόσβεσης στο έδαφος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο δείκτης απώλειας (η), ο οποίος κατά τη διάρκεια ενός κύκλου μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με τον τύπο (Persson, 2016):

$$\eta = (1/2\pi)(E_D/E_S) \quad (2.4)$$

όπου E_D είναι η ενέργεια που χάνεται λόγω της ιξώδους απόσβεσης σε ένα κύκλο κίνησης και E_S είναι η ενέργεια που χάνεται λόγω παραμόρφωσης. Για ένα σύστημα ενός βαθμού ελευθερίας, που ταλαντώνεται με γωνιακή ταχύτητα ω , η ενέργεια που χάνεται ορίζεται ως:

$$E_D = \pi c \omega u^2 \quad (2.5)$$

όπου c είναι η σταθερά της ιξώδους απόσβεσης. Επίσης, η ενέργεια παραμόρφωσης δίνεται από τον τύπο:

$$E_S = k u^2 / 2 \quad (2.6)$$

όπου k είναι η στιβαρότητα (δυσκαμψία). Συνεπώς, η απώλεια στην περίπτωση αυτή είναι:

$$\eta = c \omega / k \quad (2.7)$$

Η απόσβεση στη δομή του σιδηρόδρομου προκαλείται είτε από το έρμα, είτε από έναν συνδυασμό συνδέσμων σιδηροτροχιάς, ειδικών υποστρωμάτων στρωτήρων και ειδικών υποστρωμάτων ερμάτων (Connolly et al., 2014a).

2.2.3. Εδαφικές ιδιότητες και μονάδες μέτρησης σχετικές με τις δονήσεις

Οι συνήθεις εδαφικές ιδιότητες που χρησιμεύουν στη μελέτη των σιδηροδρομικών εδαφικών δονήσεων και που επηρεάζουν κατά το μέτρο που θα αναλυθεί στη συνέχεια, το φαινόμενο της δημιουργίας και της διάδοσης αυτών συνοπτικά είναι:

α) Μέτρο ελαστικότητας

Το μέτρο ελαστικότητας E ή μέτρο του Young (Young's modulus), ως δείκτης της δυσκαμψίας του υλικού, είναι ένα από τα βασικά κριτήρια που χρησιμοποιούνται για τον ποιοτικό έλεγχο κατά τη διάρκεια της κατασκευής των σιδηρόδρομων. Σε ένα γραμμικά ελαστικό υλικό έχει σταθερή τιμή. Ωστόσο, το έδαφος στην πραγματικότητα δεν είναι γραμμικά ελαστικό υλικό και αν οι παραμορφώσεις είναι μεγάλες, συμπεριφέρεται μη-γραμμικά. Στην περίπτωση των ανθρωπογενών δονήσεων, όπου οι παραμορφώσεις είναι σχετικά μικρές, η προσομοίωση του εδάφους ως γραμμικά ελαστικό υλικό είναι αρκετά ικανοποιητική. Αντιθέτως, οι εδαφικές παραμορφώσεις που οφείλονται στις σιδηροδρομικές δονήσεις μπορεί σε ορισμένα σημεία να είναι μη-γραμμικές (π.χ., ακριβώς από κάτω ή πολύ κοντά

στην σιδηροτροχιά), αλλά αυτό δεν έχει αξιοσημείωτη σημασία σε αποστάσεις μακρινές από την πηγή (Lombaert et al., 2013).

β) Ομογένεια του εδάφους

Το έδαφος είναι ένα κοκκώδες υλικό, που αποτελείται από επιμέρους σωματίδια και στην πραγματικότητα δεν είναι ένα στερεό. Γενικά, ισχύει ότι με την αύξηση του βάθους αυτό γίνεται σταδιακά πιο ασυμπίεστο και πιο στιβαρό. Συνήθως αποτελείται από διάφορα εδαφικά στρώματα διαφόρων ιδιοτήτων και είναι ένα μη ομογενές υλικό. Πάρα ταύτα, το έδαφος θεωρείται ένα στερεό ομογενές υλικό, καθώς με αυτόν τον τρόπο τα αριθμητικά προσομοιώματα και οι υπολογισμοί απλουστεύονται σε μεγάλο βαθμό. Στην εδαφοδυναμική, αυτή η υπόθεση μπορεί να γίνει με τον όρο ότι οι εδαφικές ετερογένειες είναι μικρές σε σύγκριση με τα μήκη κύματος των διαδιδόμενων κυμάτων. Στις σιδηροδρομικές δονήσεις, παρατηρούνται κυρίως χαμηλές συχνότητες. Για παράδειγμα, οι ταχύτητες των S κυμάτων πολλών εδαφών είναι συχνά πάνω από 100 m/s. Σε μια συχνότητα 50Hz ενός εδαφικού κύματος αντιστοιχεί ένα μήκος κύματος 2m. Το μήκος κύματος αυτό είναι πολύ μεγαλύτερο από τη διάμετρο των κόκκων του εδάφους και συνεπώς η θεώρηση της ομογένειας καθίσταται ρεαλιστική (Persson, 2016).

γ) Λόγος Poisson

Όταν ένα υλικό συμπιέζεται χρησιμοποιώντας μια δύναμη σε μία μόνο κατεύθυνση, ο λόγος Poisson ν (Poisson's ratio) ορίζει τον βαθμό στον οποίο το υλικό επεκτείνεται στις άλλες δύο κατευθύνσεις. Αυτός είναι ο λόγος της επέκτασης προς τη συστολή που προκαλείται από τη συμπίεση. Ο λόγος Poisson για ένα τέλεια ισότροπο στερεό υλικό ισούται θεωρητικά με 0,25. Οι αιφνίδιες αυξήσεις του λόγου Poisson μέσα στο έδαφος οφείλονται συχνά στην παρουσία του υδροφόρου ορίζοντα. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για τα αργιλικά εδάφη τα οποία, όταν είναι πλήρως κορεσμένα, γίνονται ασυμπίεστα.

δ) Μέτρο διάτμησης G

Το μέτρο διάτμησης (shear modulus) εκφράζει την αντίσταση ενός υλικού σε ελαστική διάτμηση και είναι ανάλογο του μέτρου ελαστικότητας που αναφέρεται σε

ορθές τάσεις και παραμορφώσεις στην ελαστική περιοχή. Συνδέεται με το μέτρο ελαστικότητας και τον λόγο του Poisson με τη σχέση:

$$G = E/[2(\nu + 1)] \quad (2.8)$$

Τέλος, είναι χρήσιμο να αναφερθούν με συντομία οι συνηθέστερες μονάδες που χρησιμοποιούνται στη βιβλιογραφία κατά την πρόβλεψη και αξιολόγηση των σιδηροδρομικών εδαφικών δονήσεων οι οποίες είναι:

1) Ταχύτητα των δονήσεων

Η ταχύτητα των δονήσεων σε VdB (Velocity deciBell) ορίζει τις απόλυτες τιμές της ταχύτητας των δονήσεων σε σχέση με το επιλεγμένο επίπεδο αναφοράς, π.χ., μια δόνηση με ταχύτητα 0,1 in/sec (rms) αντιστοιχεί σε 108 VdB, μια δόνηση με ταχύτητα 0,04 in/sec (rms) αντιστοιχεί σε 100 VdB. Προτιμάται αυτή η μονάδα καθώς αλλαγές στις απόλυτες τιμές εκφράζονται ευκολότερα σε μονάδες VdB, π.χ., μια δόνηση με ταχύτητα 0.1 in/sec (rms) όταν αυξάνει σε 0.2 in/sec (rms) έχει αλλάξει κατά ένα συντελεστή 2. Τα αντίστοιχα επίπεδα VdB θα είναι 108 VdB που θα αυξηθούν στα 114 VdB. Πολλές φορές σε ανάλυση επιτόπου μετρήσεων των παραγομένων δονήσεων των τρένων υπολογίζεται ως εξής:

$$VdB = 20 \log_{10}(v_{rms}/v_0) \quad (2.9)$$

όπου:

$$v_{rms} = \sqrt{v_i^2} \quad (2.10)$$

είναι η ρίζα του μέσου τετραγώνου της ταχύτητας για μια συγκεκριμένη περίοδο και v_0 το επίπεδο αναφοράς της ταχύτητας της δόνησης.

2) Τιμή δόσης δόνησης

Η δόση δόνησης (Vibration Dose) σε VDV (Vibration Dose Value) είναι μια παράμετρος που συνδυάζει το μέγεθος της δόνησης και τον χρόνο για τον οποίο συμβαίνει. Η τιμή δόσης δόνησης (VDV) χρησιμοποιείται κατά την αξιολόγηση διακοπτόμενων κραδασμών για την σωρευτική μέτρηση του επιπέδου των δονήσεων σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους και είναι μια μέτρηση βασισμένη στην επιτάχυνση. Ο τύπος της τιμής δόσης δόνησης είναι:

$$VDV = (\int_0^T a^4(t)dt)^{1/4} \quad [m/s^{1.75}] \quad (2.11)$$

3) Μέγιστη Ταχύτητα Δόνησης Σωματιδίου

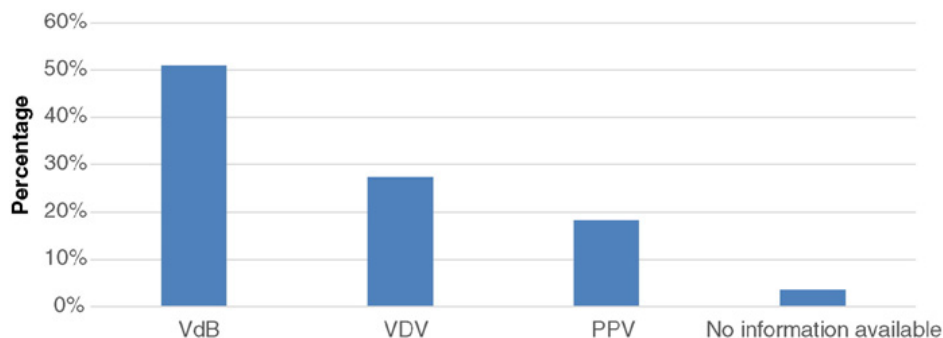
Η μέγιστη ταχύτητα δόνησης σωματιδίου (peak particle velocity - PPV) εκφράζεται σε mm/s και αναφέρεται στην μέγιστη ταχύτητα ταλάντωσης των σωματιδίων του εδάφους στο οποίο διαδίδεται η δόνηση. Πολλές φορές σε ανάλυση επιτόπου μετρήσεων των παραγομένων δονήσεων των τρένων υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$PPV = \max|v(t)| \quad (2.12)$$

όπου $v(t)$ είναι η χρονοϊστορία της ταχύτητας. Η έκφραση των δονήσεων σε PPV είναι κατάλληλη ιδιαίτερα για την αξιολόγηση των ρωγμών και των δομικών βλαβών σε κτήρια που γειτνιάζουν με τον σιδηρόδρομο (Olivier et al., 2016). Ο τύπος που χρησιμοποιείται και συμπεριλαμβάνει και τις τρεις συνιστώσες των σιδηροδρομικών δονήσεων είναι ο εξής:

$$PPV = \max(\sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}) \quad (2.13)$$

Στην Εικόνα 2.13 φαίνεται μια ποσοστιαία σύγκριση των ανωτέρω μονάδων μέτρησης που έχουν χρησιμοποιηθεί βιβλιογραφικά στην αξιολόγηση της έντασης των σιδηροδρομικών δονήσεων. Στο 51% των περιπτώσεων χρησιμοποιήθηκε η μονάδα VdB (Federal Rail Administration, 2012) και στο 27% των περιπτώσεων χρησιμοποιήθηκε η μονάδα VDV , που συνήθως συναντάται στα βρετανικά πρότυπα (British Standards Institution, 2007). Η τρίτη πιο δημοφιλής μονάδα που χρησιμοποιήθηκε ήταν η PPV (Deutsches Institut für Normung, 1999a; Connolly et al., 2015).



Εικόνα 2.13: Η χρήση των μετρητικών μονάδων των δονήσεων (Connolly et al., 2015).

4) Δείκτης $KB_{F,max}$

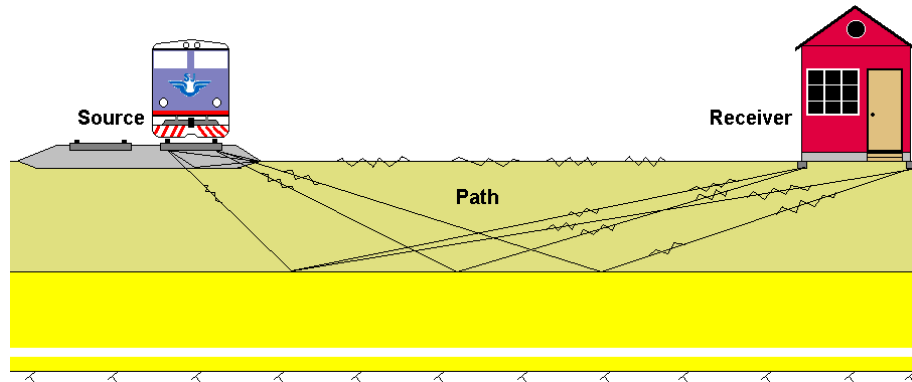
Ο δείκτης $KB_{F,max}$, νοείται ως η μέση τετραγωνική ρίζα της μέγιστης σταθμισμένης ταχύτητας δόνησης και είναι κατάλληλος για την αξιολόγηση της ανθρώπινης άνεσης, δηλαδή της ενδεχόμενης δυσφορίας των επιβατών εξαιτίας των δονήσεων (Olivier et al., 2016).

2.3. Βασικοί παράγοντες δημιουργίας και διάδοσης σιδηροδρομικών δονήσεων

2.3.1. Ο μηχανισμός δημιουργίας των σιδηροδρομικών δονήσεων

Το πρόβλημα των παραγόμενων εδαφικών δονήσεων από την κυκλοφορία των τρένων υψηλής ταχύτητας διακρίνεται σε τρεις περιοχές, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.14. Αυτό βοηθάει στη μελέτη του φαινομένου των δονήσεων, αλλά και στην πρόβλεψη των επιπτώσεων και στον καθορισμό των μέτρων αντιμετώπισης των προβλημάτων. Κάθε διακριτή περιοχή έχει τις δικές της ιδιότητες και παραμέτρους που επηρεάζουν τα επίπεδα των δονήσεων, οι οποίες είναι (Bahrekazemi, 2004):

- Η περιοχή της πηγής των δονήσεων, δηλαδή ο σιδηρόδρομος.
- Η περιοχή διάδοσης, δηλαδή το υποκείμενο και το γειτονικό έδαφος του σιδηρόδρομου.
- Η περιοχή του δέκτη των δονήσεων, δηλαδή η εκάστοτε εξεταζόμενη περιοχή, π.χ., ένα κτίριο.

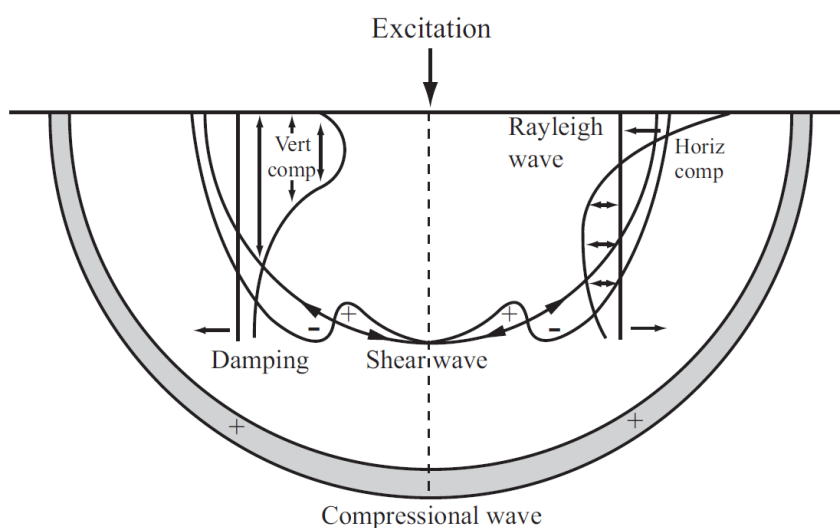


Εικόνα 2.14: Οι τρεις διακριτές περιοχές του προβλήματος των σιδηροδρομικών εδαφικών δονήσεων (Bahrekazemi, 2004).

Για τη δημιουργία των δονήσεων δεν υπάρχει μια μόνο αιτία και συνεπώς ο μηχανισμός παραγωγής τους είναι πολυδιάστατος (Connolly et al., 2014b). Οι δονήσεις δημιουργούνται στη διεπιφάνεια τροχού/σιδηροτροχιάς, προέρχονται από τις κατακόρυφες κινητές δυνάμεις του τρένου και έχουν ένα σχεδόν στατικό και ένα δυναμικό χαρακτήρα. Η σχεδόν στατική διέγερση προέρχεται από το βάρος του τρένου, είναι ανεξάρτητη της ταχύτητας και παίζει καθοριστικό ρόλο στην απόκριση του σιδηρόδρομου καθώς και στην απόκριση του εδάφους στο κοντινό πεδίο σε απόσταση μέχρι το ένα τέταρτο του μήκους κύματος της παραγόμενης δόνησης. Η δυναμική διέγερση, δηλαδή η ταλάντωση της μη αναρτώμενης μάζας των τροχών, προέρχεται από αλλαγές στη δυσκαμψία της σιδηροδρομικής εσχάρας εξαιτίας της θέσης των στρωτήρων, από ανωμαλίες στην διεπιφάνεια τροχού/σιδηροτροχιάς και από τις συνθήκες του υποκείμενου εδάφους (Connolly et al., 2014a).

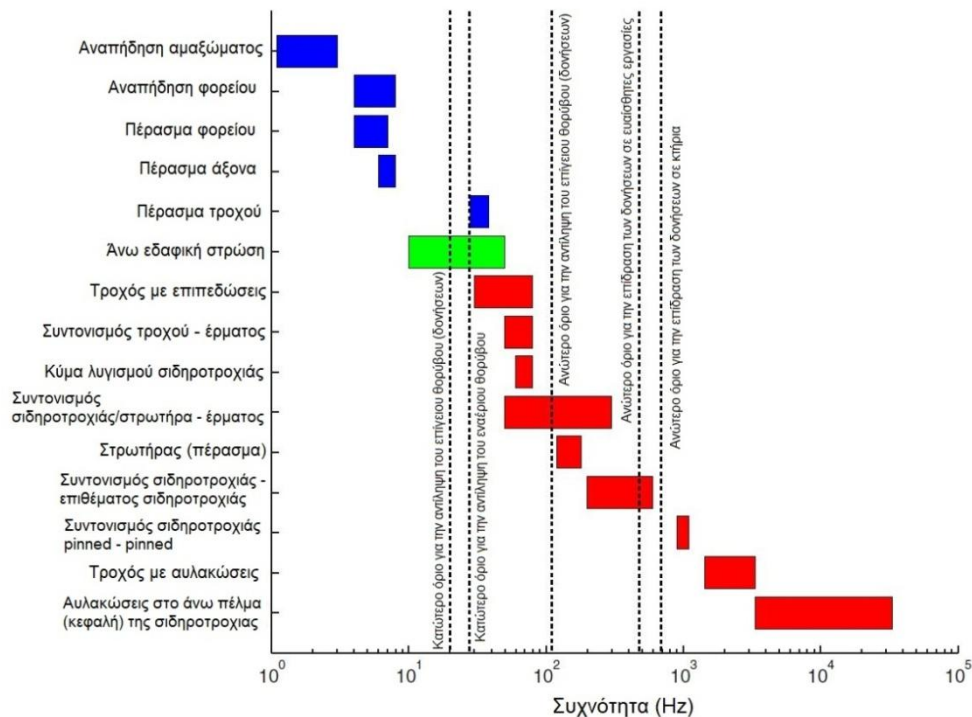
Επίσης, στον μηχανισμό των παραγόμενων εδαφικών δονήσεων συμβάλουν οι ενώσεις της σιδηροτροχιάς στις μη συνεχόμενες σιδηροτροχιές, οι μεταβολές στην επαφή στρωτήρα/εδάφους από στρωτήρα σε στρωτήρα και οι ανομοιογένειες στο παρακείμενο έδαφος (Krylon, 2017). Η συμβολή των ανωμαλιών και των συνδέσμων της σιδηροτροχιάς στη δυναμική διέγερση, με την πάροδο του χρόνου, έχει αποκτήσει μικρή επίδραση στον μηχανισμό της διέγερσης, εξαιτίας της ευρείας χρήσης των συνεχόμενων συγκολλημένων σιδηροτροχιών και της βελτιωμένης συντήρησης της σιδηροτροχιάς (Connolly et al., 2014a).

Το αποτέλεσμα των προαναφερθέντων διεγέρσεων στην εσχάρα του σιδηρόδρομου, σύμφωνα με τη θεωρία του ελαστικού ημιχώρου, είναι η παραγωγή και η διάδοση σεισμικών κυμάτων στο υποκείμενο έδαφος. Τα κύματα αυτά είναι κύματα χώρου (P και S) και επιφανειακά κύματα (R). Τα κύματα χώρου διαδίδονται ακτινικά απομακρυνόμενα από την πηγή της διέγερσης κατά μήκος ημισφαιρικών μετώπων κύματος, ενώ τα επιφανειακά κύματα διαδίδονται ακτινικά προς τα έξω σε κυλινδρικά μέτωπα. Η ενέργεια των κυμάτων R μειώνεται ραγδαία με το βάθος και εξαρτάται από τη συχνότητα της διέγερσης. Τα βασικά χαρακτηριστικά και η κατανομή των κυμάτων P, S και R στο έδαφος, το οποίο συμπεριφέρεται ως ένας ελαστικός ημιχώρος, περιγράφονται στην Εικόνα 2.15.



Εικόνα 2.15 : Η κατανομή των σεισμικών κυμάτων λόγω της διέγερσης εξαιτίας της κίνησης του τρένου (Connolly et al., 2013).

Οι δυναμικοί μηχανισμοί διέγερσης που συμβάλλουν στις σιδηροδρομικές δονήσεις, όπως προαναφέρθηκε, είναι πολυάριθμοι. Καθένας σχετίζεται με συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων δονήσεων (Connolly et al., 2014a). Στην Εικόνα 2.16 απεικονίζονται αρκετοί τέτοιοι μηχανισμοί και η αντίστοιχη περιοχή συχνοτήτων.



Εικόνα 2.16: Τυπικές περιοχές συχνοτήτων διέγερσης (Connolly et al., 2014a).

Οι υψηλότερες συχνότητες συχνά εκδηλώνονται με τη μορφή δονήσεων μέσω αέρα, δηλαδή θορύβου (air-borne noise), ενώ οι χαμηλότερες συχνότητες προκαλούν εδαφικές δονήσεις (ground-borne noise) (Connolly et al., 2014a). Τέλος, σχετικά με τον μηχανισμό δημιουργίας των δονήσεων, αξίζει να αναφερθεί το γεγονός ότι το πλάτος των παραγόμενων δονήσεων μπορεί να αυξηθεί όταν η ταχύτητα του τρένου γίνει συγκρίσιμη με τη φυσική ταχύτητα των κυμάτων Rayleigh του υποκείμενου εδάφους ή αν η συχνότητα της διέγερσης είναι κοντά σε μια ιδιοσυχνότητα του σιδηρόδρομου (Connolly et al., 2014b).

2.3.2. Επίδραση του τρένου

Οι δυναμικές διεγέρσεις των δονήσεων που συνδέονται με το αμάξωμα, το φορείο, ένα λειτουργικά άρτιο άξονα και τροχό του τρένου, όπως φαίνεται στο διάγραμμα της Εικόνας 2.18, βρίσκονται σε αρκετά χαμηλότερες συχνότητες από ότι οι διεγέρσεις που συνδέονται με έναν τροχό με αυλακώσεις και επιπεδώσεις (μεγάλες παραμορφώσεις). Ένας από τους βασικούς παράγοντες, λοιπόν, που

συμβάλλουν στη δημιουργία των εδαφικών δονήσεων είναι οι ανωμαλίες των τροχών του τρένου (Connolly et al., 2014a).



Εικόνα 2.17: Επιπεδώσεις στην κυκλική περιφέρεια των τροχών λόγω της πέδησης/επιβράδυνσης του τρένου (<http://cs.trains.com/trn/f/111/t/251253.aspx>, <http://www.trainboard.com/highball/index.php?threads/simple-project-gone-wrong.52720/> , 2018).

Οι τροχοί χάνουν το κυκλικό σχήμα τους και κάνουν αυλακώσεις, είτε λόγω ατελειών κατά τη διαδικασία της κατασκευής τους, είτε λόγω της επαναλαμβανόμενης φόρτισής τους υπό συνθήκες υψηλών συχνοτήτων. Επίσης, η πέδηση και η επιβράδυνση του τρένου συνήθως προκαλούν επιπεδώσεις στην κυκλική περιφέρεια των τροχών, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.17.

Το αποτέλεσμα των ανωμαλιών των τροχών είναι η δημιουργία κρουστικών δυνάμεων υψηλών συχνοτήτων καθώς χτυπούν τη σιδηροτροχιά σε κάθε περιστροφή τους (Connolly et al., 2014a). Αναφορικά με τον τρόπο που επιδρούν τα διάφορα συστατικά μέρη και η γεωμετρία του τρένου στην παραγωγή των εδαφικών δονήσεων προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα (Kouroussis et al., 2014):

- Όταν μεγαλώνει ο αριθμός των φορείων των αμαξωμάτων των τρένων προκαλούνται εντονότερες μέγιστες τιμές των δεσποζουσών συχνοτήτων των παραγόμενων δονήσεων και το αντίθετο.
- Όταν το μήκος του αμαξώματος είναι ίσο με την απόσταση μεταξύ των φορείων αυτού, οι δεσπόζουσες συχνότητες των παραγόμενων δονήσεων ακολουθούν το διαμορφωμένο μέγιστο πλάτος των δονήσεων.
- Τα κινητήρια αμαξώματα του τρένου, που έχουν διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά από τα μη κινητήρια, έχουν ένα σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του πλάτους των παραγόμενων δονήσεων. Ο τρόπος

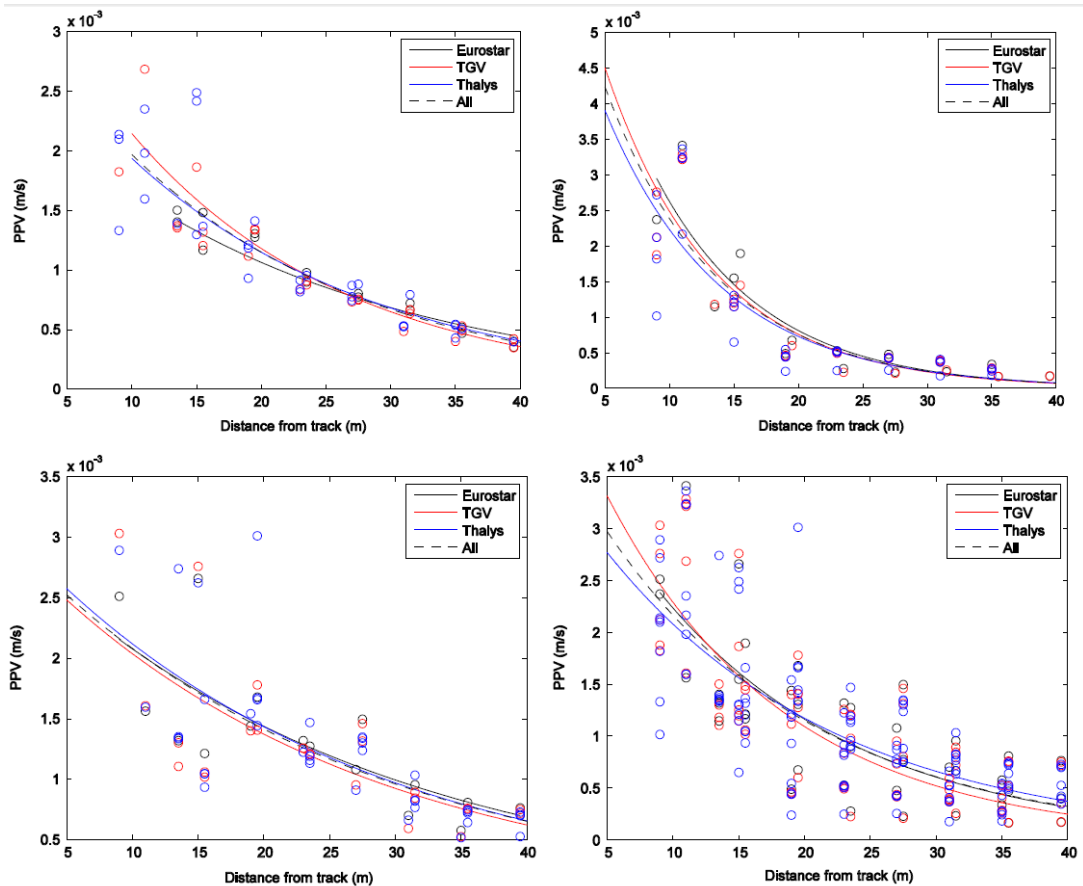
επίδρασής τους στις σιδηροδρομικές δονήσεις είναι πολυπλοκότερος από τον τρόπο επίδρασης των κοινών βαγονιών.

Τα ανωτέρω συμπεράσματα συμφωνούν με τα συμπεράσματα κι άλλων ερευνητών (Sheng et al., 2004; Auersch, 2006; Ju, 2009) που ακολούθησαν διαφορετικές προσεγγίσεις στο θέμα αυτό.

Επίσης, έχει αποδειχτεί ότι η μάζα του αμαξώματος δεν επηρεάζει τις κινηματικές δυνάμεις αλληλεπίδρασης, δηλαδή δεν συνεισφέρει στο δυναμικό χαρακτήρα του προβλήματος (Colaço et al., 2015). Αξιοσημείωτα είναι τα παρακάτω συμπεράσματα που έχουν σχέση με την ημι-αναρτημένη μάζα και την μη αναρτημένη μάζα του αμαξώματος, τη γεωμετρία του τρένου και τη διαφορετικότητα του τύπου του τρένου (Colaço et al., 2015):

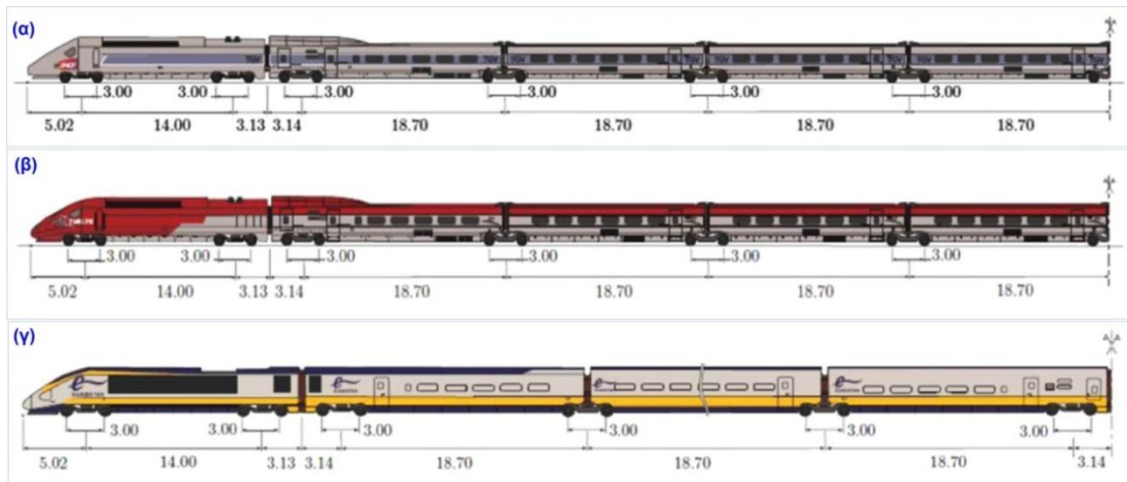
- Οι αλλαγές στην ημι-αναρτημένη μάζα του οχήματος δεν επηρεάζουν τα επίπεδα των παραγόμενων δονήσεων του τρένου και αυτό οφείλεται στο ότι για συχνότητες άνω των 15 - 20 Hertz είναι αμελητέα η επίδραση της ημι-αναρτημένης μάζας του οχήματος, λόγω της απομόνωσης που παρέχεται από την πρωτεύουσα ανάρτηση.
- Η μη αναρτημένη μάζα του τρένου είναι η πιο ουσιαστική παράμετρος επηρεασμού της παραγωγής των εδαφικών δονήσεων και αυτό γίνεται εντονότερο όσο αυξάνεται η απόσταση από τη σιδηροτροχιά. Η συσχέτιση μεταξύ του επιπέδου των δονήσεων και της μη αναρτημένης μάζας είναι σχεδόν γραμμική. Τρένα με υψηλότερες τιμές μη αναρτημένης μάζας, παράγουν αυξημένα επίπεδα δονήσεων στο ελεύθερο πεδίο.
- Η απόσταση μεταξύ τροχού-φορείου και η ημι-αναρτημένη μάζα έχουν αμελητέες επιδράσεις στην παραγωγή των εδαφικών δονήσεων.

Ο αριθμός των βαγονιών του τρένου, δηλαδή το μήκος του τρένου, επηρεάζει τη διάρκεια δόνησης. Τρένα με μεγάλο αριθμό βαγονιών, δημιουργούν δονήσεις μεγαλύτερης διάρκειας σε σχέση με άλλα με μικρότερο αριθμό (Connolly et al., 2014b). Επίσης, τα βαρύτερα τρένα παράγουν υψηλότερα επίπεδα δονήσεων σε σχέση με τα ελαφρύτερα (Takemiya, 2005).



Εικόνα 2.18: Επίπεδα της κατακόρυφης δόνησης για τους τρεις τύπους τρένου. Πάνω-Αριστερά: Διατομή Φυσικού εδάφους, Πάνω-δεξιά: Διατομή επιχώματος, Κάτω-αριστερά: Διατομή ορύγματος, Κάτω-δεξιά: όλες οι διατομές (Connolly et al., 2014b).

Στην Εικόνα 2.18 φαίνεται η σύγκριση των επιπέδων VdB μεταξύ τριών τύπων τρένου, τα οποία κατασκευάστηκαν από τον ίδιο κατασκευαστή και έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά βάρους και ανάρτησης. Αυτό πιθανόν να δικαιολογεί τα σχετικά κοντινά επίπεδα δονήσεων (Connolly et al., 2014b). Πάρα ταύτα, πρόκειται για τρία τρένα ευρέως χρησιμοποιούμενα στο ευρωπαϊκό δίκτυο των σιδηρόδρομων υψηλών ταχυτήτων και είναι αξιοσημείωτη η εποπτική σύγκρισή τους. Συγκεκριμένα, φαίνονται οι διακριτές τιμές PPV των δονήσεων για κάθε τύπο τρένου σε σχέση με την απόσταση από τον σιδηρόδρομο καθώς και η προσεγγιστική τους καμπύλη για κάθε τρένο ξεχωριστά και συνολικά. Οι διακριτές επί τόπου μετρήσεις που φαίνονται στα διαγράμματα της Εικόνας 2.20 αφορούν τρεις διαφορετικές τοποθεσίες με διαφορετική εδαφική διατομή (επίπεδο φυσικού εδάφους, επίχωμα, όρυγμα). Η Εικόνα 2.19 δείχνει τις σχηματικές διατάξεις των τριών τρένων των προαναφερθέντων μετρήσεων.



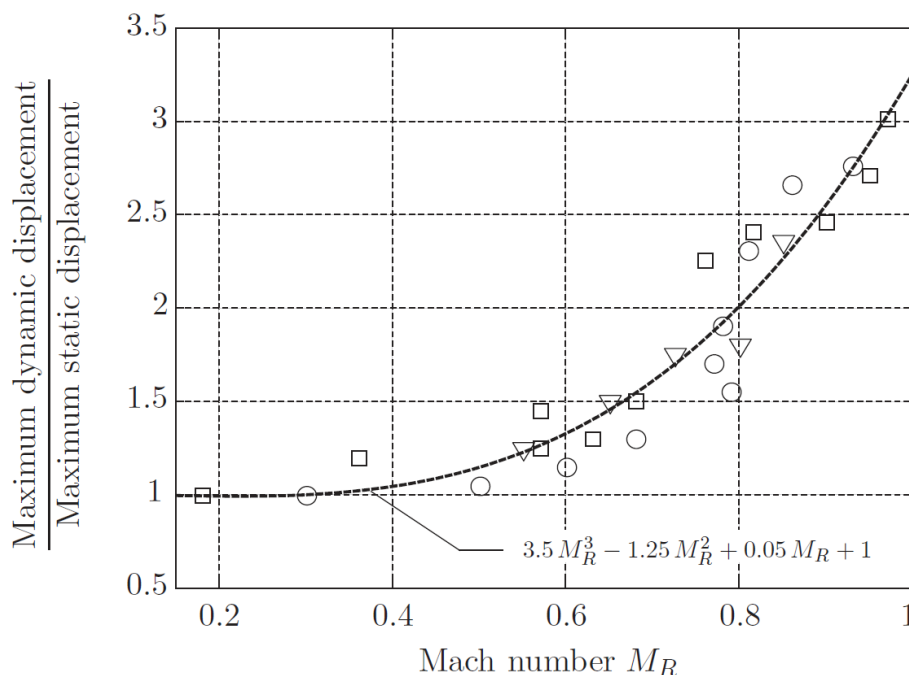
Εικόνα 2.19: Σχηματική διαταξη των τριων τυπων τρένου: (α) TGV, (β) Thalys, (γ) Eurostar (Connolly et al., 2014b).

2.3.3. Επίδραση της ταχύτητας του τρένου

Από τη μελέτη της σχετικής βιβλιογραφίας προκύπτει ότι υπάρχει μια αυξητική σχέση μεταξύ της ταχύτητας του τρένου και του επιπέδου των παραγόμενων δονήσεων. Το φαινόμενο αυτό αρχικά διερευνήθηκε αριθμητικά από τον Krylon το 1998 και έπειτα ακολούθησαν πολλές σχετικές πειραματικές και υπολογιστικές έρευνες. Η παρουσία της ελεύθερης επιφάνειας του εδάφους προκαλεί τη δημιουργία των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh και αποδεικνύεται θεωρητικά ότι όταν η ταχύτητα του κινούμενου φορτίου γίνει ίση με την ταχύτητα κύματος Rayleigh, τότε οι μετατοπίσεις γίνονται απεριόριστα μεγάλες. Συνεπώς, διακρίνονται οι εξής περιπτώσεις ανάλογα με την ταχύτητα του τρένου (Kouroussis et al., 2014):

1. Η υπό-Rayleigh (υποκρίσιμη) περίπτωση, όπου το φορτίο κινείται με ταχύτητα μικρότερη από την ταχύτητα κύματος Rayleigh ($v_0 < c_R$).
2. Η υπέρ-Rayleigh (υπερκρίσιμη) περίπτωση, όπου το φορτίο κινείται με ταχύτητα μεγαλύτερη από την ταχύτητα κύματος Rayleigh ($v_0 > c_R$).
3. Η υποηχητική περίπτωση, όπου το φορτίο κινείται με ταχύτητα μικρότερη από την ταχύτητα των κυμάτων S του υλικού που αποτελεί τον ημιχώρο ($v_0 < c_S$).

4. Η διηχητική περίπτωση, όπου το φορτίο κινείται με ταχύτητα μεγαλύτερη από την ταχύτητα των κυμάτων S, αλλά μικρότερη από την ταχύτητα των κυμάτων P ($c_S < v_0 < c_P$).
5. Η υπερηχητική περίπτωση, όπου το φορτίο κινείται με ταχύτητα μεγαλύτερη από την ταχύτητα των κυμάτων P ($v_0 > c_P$).



Εικόνα 2.20: Η επίδραση της ταχύτητας Rayleigh και της ταχύτητας του τρένου επάνω στα επίπεδα της δόνησης όπως καταγράφηκε σε διάφορα μέρη της Ευρώπης, όπου ○: Ledsgard (Sweden), ▼: Stilton Fen (UK), □: Amsterdam-Utrecht (Holland) (Kouroussis et al., 2014).

Αν η ταχύτητα ενός τρένου είναι κοντά στη φυσική ταχύτητα διάδοσης των ελαστικών κυμάτων του σιδηρόδρομου ή του υποκείμενου εδάφους, τότε ίσως συμβεί «υπερκρίσιμο φαινόμενο» (Olivier et al., 2016). Στο διάγραμμα της Εικόνας 2.20 φαίνεται η σχέση μεταξύ της ταχύτητας του τρένου, της ταχύτητας των κυμάτων Rayleigh και των επιπέδων των δονήσεων, όπως προέκυψε από έρευνα σε ευρωπαϊκές γραμμές υψηλής ταχύτητας, κατά την οποία η ταχύτητα του τρένου ήταν κοντά στην ταχύτητα των κυμάτων Rayleigh του εδάφους (Kouroussis et al., 2014).

Στον οριζόντιο άξονα της Εικόνας 2.20 απεικονίζεται ο αριθμός Mach, ο οποίος αποτελεί μια κανονικοποιημένη ταχύτητα τρένου, η οποία για το διάγραμμα

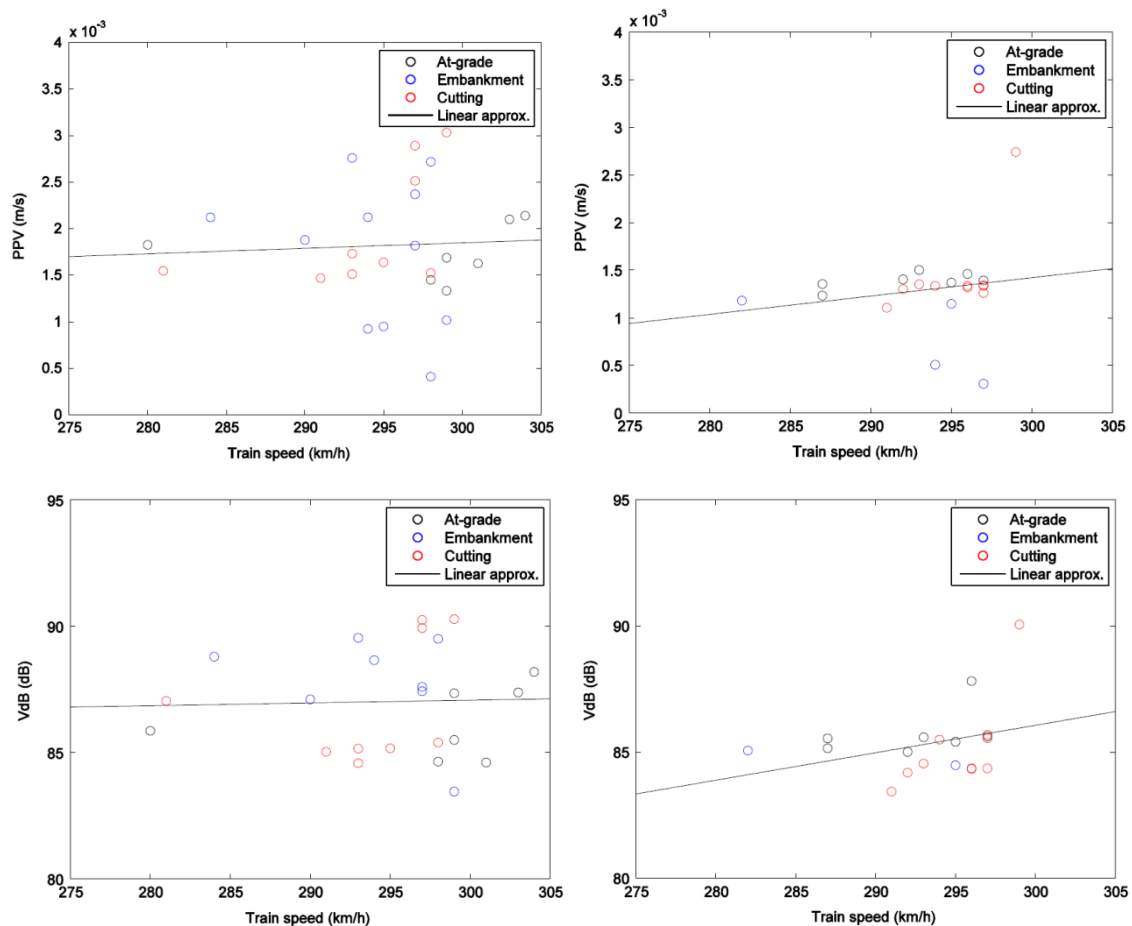
ισούται με την ταχύτητα v_0 του τρένου διαιρούμενη με την ταχύτητα των κυμάτων Rayleigh c_R . Ο αριθμός Mach γενικά ισούται με:

$$M_i = v_0/c_i \quad (2.14)$$

όπου i είναι το είδος του κύματος P,S ή R και χρησιμοποιείται για να ταξινομήσει την υπό μελέτη ταχύτητα του τρένου σε υποκρίσιμες ή υπερκρίσιμες περιπτώσεις. Συνεπώς, όταν $M_R = 1$ η ταχύτητα του τρένου είναι ίση με την ταχύτητα των κυμάτων Rayleigh του υποκείμενου εδάφους, η οποία ορίζεται ως «κρίσιμη ταχύτητα». Στον κατακόρυφο άξονα είναι ο λόγος της δυναμικής μετακίνησης προς τη στατική μετακίνηση, που αποτελεί ένα μέτρο των επιπέδων των σιδηροδρομικών δονήσεων. Παρατηρείται ότι, όταν ο δείκτης M_R υπερβαίνει την τιμή 0.5, τότε τα επίπεδα των δονήσεων αρχίζουν να αυξάνονται με έντονο ρυθμό.

Στην Εικόνα 2.20 παρουσιάζεται η μαθηματική σχέση της καμπύλης προσέγγισης για την έκφραση της αυξητικής σχέσης μεταξύ της ταχύτητας του τρένου και του επιπέδου των δονήσεων. Ουσιαστικά πρόκειται για μια έμμεση έκφραση, καθώς το διάγραμμα συσχετίζει τον δείκτη M_R και τον λόγο της δυναμικής μετακίνησης προς τη στατική μετακίνηση. Γενικά, όμως, η διασπορά των αποτελεσμάτων των επί τόπου μετρήσεων συνήθως είναι πολύ μεγάλη, ώστε να παραχθεί μια συγκεκριμένη συσχέτιση της ταχύτητας του τρένου με τις παραγόμενες εδαφικές δονήσεις (Connolly et al., 2014b; Degrande et al., 2001).

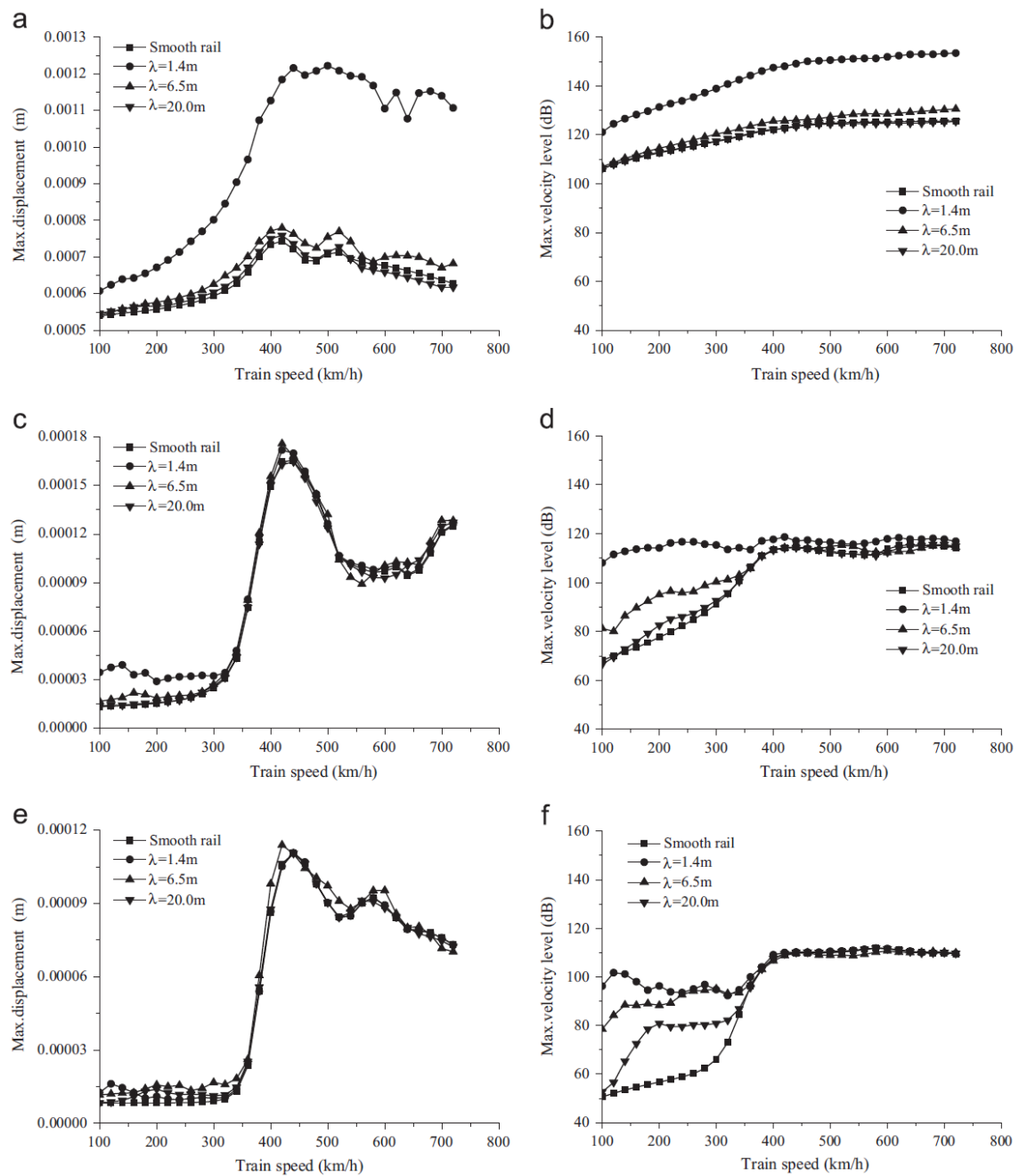
Για παράδειγμα, στην Εικόνα 2.21 φαίνεται γραφικά η σχέση μεταξύ της ταχύτητας του τρένου και του επιπέδου των παραγόμενων δονήσεων σε τιμές PPV και σε τιμές VdB, όπως πρόέκυψε από επί τόπου μετρήσεις. Συγκεκριμένα, φαίνονται οι διακριτές μετρήσεις για κάθε τύπο εδαφικής τομής της τοποθεσίας των μετρήσεων καθώς και οι καμπύλες προσέγγισής τους. Τα αριστερά διαγράμματα της Εικόνας 2.23 αφορούν το κοντινό πεδίο της εσχάρας, δηλαδή την περιοχή κάτω από τον σιδηρόδρομο, ενώ τα δεξιά διαγράμματα αφορούν το μακρινό πεδίο της εσχάρας, δηλαδή την περιοχή εκτός του σιδηρόδρομου.



Εικόνα 2.21: Η επίδραση της ταχύτητας του τρένου σε PPV (m/s) και VdB (dB). Αριστερά: Κοντινό πεδίο, Δεξιά: Μακρινό πεδίο (Connolly et al., 2014b).

Από τα ανωτέρω διαγράμματα διαπιστώνεται ότι υπάρχει μια αρκετά μεγάλη διασπορά, ιδιαίτερα για το κοντινό πεδίο (Connolly et al., 2014b). Το γεγονός ότι οι μετρήσεις των εικονιζόμενων αποτελεσμάτων αφορούν τρεις διαφορετικές τοποθεσίες με διαφορετική εδαφική διατομή και διαφορετικά τρένα, προσδίνει επιπλέον βαρύτητα στο συμπέρασμα ότι δεν μπορεί να εξαχθεί συγκεκριμένη συσχέτιση της ταχύτητας του τρένου με τις δονήσεις, καθώς η διασπορά είναι τεράστια για κάθε εδαφική διατομή.

Η επίδραση της ταχύτητας του τρένου υψηλών ταχυτήτων στις δονήσεις για την περίπτωση του δύσκαμπτου σιδηρόδρομου (χωρίς έρμα), όπου υπάρχουν συγκεκριμένες κατακόρυφες ανωμαλίες σιδηροτροχιάς, φαίνεται στα διαγράμματα της Εικόνας 2.22 (Bian et al., 2015). Αυτά αφορούν τρία σημεία παρατήρησης σε διαφορετικές αποστάσεις από τον κεντρικό άξονα της εσχάρας ($D=0\text{m}$, $D=20\text{m}$, $D=40\text{m}$).



Εικόνα 2.22: Μεταβολές της μετακίνησης και της ταχύτητας της δόνησης με την ταχύτητα του τρένου (a, b: $D=0$ m, c, d: $D=20$ m, e, f: $D=40$ m) για διάφορες κατακόρυφες ανωμαλίες σιδηροτροχιάς (Bian et al., 2015).

Αξιοσημείωτα είναι τα εξής βασικά συμπεράσματα σχετικά με την ταχύτητα (Bian et al., 2015):

- Η κρίσιμη ταχύτητα του συστήματος σιδηροδρομικής εσχάρας/εδάφους καθορίζεται όχι μόνο από τις ιδιότητες του εδάφους, αλλά και από τη δυσκαμψία της πλάκας σκυροδέματος του σιδηρόδρομου. Αυτό φαίνεται στο διάγραμμα (c) της Εικόνας 2.24, όπου ανεξάρτητα των ανωμαλιών της

σιδηροτροχιάς, όταν η ταχύτητα του τρένου πλησιάσει την ταχύτητα κύματος Rayleigh του υποκείμενου εδάφους (1^η κρίσιμη ταχύτητα), οι μετακινήσεις μεγιστοποιούνται. Στη συνέχεια όμως μειώνονται μέχρι η ταχύτητα του τρένου να φτάσει την ταχύτητα κύματος Rayleigh του δύσκαμπτου σιδηρόδρομου (2^η κρίσιμη ταχύτητα), όπου οι μετακινήσεις ξεκινούν και πάλι να αυξάνονται.

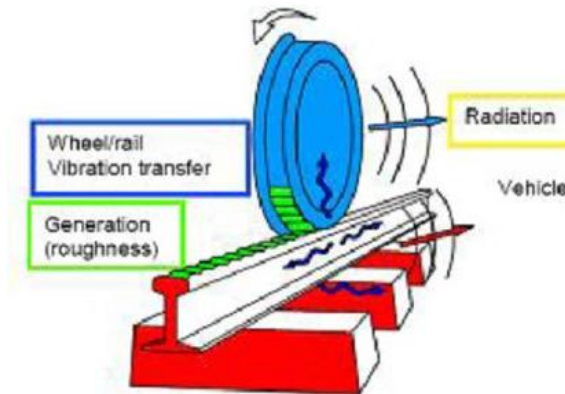
- Όταν η ταχύτητα του τρένου είναι μεγαλύτερη από την κρίσιμη ταχύτητα, οι δονήσεις του περιβάλλοντος εδάφους του σιδηρόδρομου καθορίζονται κυρίως από την κίνηση του βάρους των τροχών.
- Όταν η ταχύτητα του τρένου υπερβεί την κρίσιμη ταχύτητα, τότε από κάποια απόσταση από τη σιδηροτροχιά και μετά, οι εδαφικές δονήσεις είναι σχεδόν ίδιες για τις διαφορετικές ανωμαλίες της.

Συνεπώς, για την εξασφάλιση της ασφάλειας της λειτουργικότητας του τρένου και για τη μείωση των δονήσεων στο περιβάλλον έδαφος, η ταχύτητα του τρένου θα πρέπει να διατηρείται χαμηλότερη από την κρίσιμη ταχύτητα του συστήματος εσχάρας-υποκείμενου εδάφους. Διαφορετικά, θα πρέπει να αυξηθεί η κρίσιμη ταχύτητα του συστήματος αυτού με την αύξηση της δυσκαμψίας του στη φάση κατασκευής της σιδηροδρομικής γραμμής. Ένας τρόπος για να επιτευχθεί αυτό είναι, π.χ., η αντικατάσταση του υποκείμενου εδάφους με άλλο στιβαρότερο έδαφος ή η ενίσχυση του υποκείμενου εδάφους με πασσάλους (Xuecheng et al., 2015).

2.3.4. Επίδραση της σιδηροδρομικής εσχάρας

Οι διεγέρσεις που σχετίζονται με τη σιδηροτροχιά και την εσχάρα βρίσκονται σε υψηλότερες συχνότητες, όπως φαίνεται στο διάγραμμα της Εικόνας 2.16 (Τυπικές περιοχές συχνότητων διέγερσης), σε σχέση με αυτές που σχετίζονται με το αμάξωμα, το φορείο, τον άξονα και τον μη ελαττωματικό τροχό του τρένου. Η απόσβεση των δονήσεων της σιδηροδρομικής εσχάρας γίνεται είτε από το έρμα, είτε από έναν συνδυασμό συνδέσμων σιδηροτροχιάς, ειδικών υποστρωμάτων στρωτήρων και ειδικών υποστρωμάτων ερμάτων (Connolly et al., 2014a).

Ένας βασικός παράγοντας, που συμβάλλει στην παράγωγή των δονήσεων είναι οι ανωμαλίες της σιδηροτροχιάς, δηλαδή οι κατακόρυφες και οριζόντιες παραμορφώσεις της (βλ. Εικόνα 2.23). Αυτές μπορεί να οφείλονται σε πολλούς παράγοντες, όπως σε μεταβολές της δυσκαμψίας της εσχάρας, σε σημεία εναλλαγής της πορείας του τρένου, σε καθιζήσεις του σιδηρόδρομου ή της εσχάρας, σε αστοχίες στο έρμα ή στη ζώνη μετάβασης στην πλακά σκυροδέματος και σε υπερβολικές επιφανειακές φθορές ή συγκολλήσεις της σιδηροτροχιάς.



Εικόνα 2.23 : Οι ανωμαλίες στη σιδηροτροχιά ως αιτία δημιουργίας εδαφικών δονήσεων (https://lh3.googleusercontent.com/0WqnoKK9sKv8UsHpbK7gBXx4vke4R-ykVDVimTwsG74U-Vs_cOkXKW99r17u-qikl46gQ=s114, 2018).

Οι ανωμαλίες της σιδηροτροχιάς έχουν επίσης σημαντική επίδραση στην άνεση των επιβατών στην περίπτωση των τρένων υψηλών ταχυτήτων, όπως προέκυψε από αξιολόγηση αποτελεσμάτων αριθμητικού προσομοιώματος τρένου, χρησιμοποιώντας κριτήρια που αφορούν τη μέγιστη επιτάχυνση και τον δείκτη άνεσης (Connolly et al., 2014a). Επίσης, έχει βρεθεί από επτόπιες μετρήσεις ότι οι ανωμαλίες της σιδηροτροχιάς, μαζί την ταχύτητα του τρένου, τις αποστάσεις μεταξύ των φορέων και τις βάσεις των τροχών, έχουν μεγάλη συνεισφορά στις δεσπόζουσες συχνότητες του φάσματος συχνοτήτων των παραγομένων δονήσεων (Ling et al., 2009). Οι χαλαροί σύνδεσμοι της σιδηροτροχιάς και η παρουσία επιπεδώσεων στην κυκλική περιφέρεια των τροχών μπορούν να αυξήσουν τα επίπεδα των δονήσεων κατά 10 έως 20 dB (Avillez et al., 2012). Ακόμα, έχει παρατηρηθεί μια διαφορά 10 dB στις παραγόμενες δονήσεις μετά την αντικατάσταση εξαιτίας κανονικής φθοράς φθαρμένων σιδηροτροχιών και τροχών τρένων με αντίστοιχα καινούρια (Avillez et al., 2012).

Αναφορικά με τους αρμούς διακοπής της σιδηροτροχιάς, έχουν παρατηρηθεί, βάσει επιτόπου μετρήσεων, τα κάτωθι (Ling et al., 2009):

- Το διάκενο των αρμών διακοπής της σιδηροτροχιάς έχει πολύ μικρή επίδραση στην κατακόρυφη επιτάχυνση των δονήσεων αυτής.
- Η δονητική ενέργεια στους στρωτήρες κοντά στο διάκενο των αρμών διακοπής της σιδηροτροχιάς, είναι μεγαλύτερη σε σχέση με αυτή που έχουν άλλοι στρωτήρες σε άλλα σημεία.

Για τα trans-Rayleigh τρένα, δηλαδή τα τρένα που ταξιδεύουν με ταχύτητα μεγαλύτερη των φυσικών κυμάτων Rayleigh του υποκείμενου εδάφους, έχουν παρατηρηθεί τα εξής (Krylon, 1998):

- Εάν οι ταχύτητες των trans-Rayleigh τρένων πλησιάσουν την ελάχιστη ταχύτητα φάσης των καμπτικών κυμάτων της εσχάρας, τότε μπορεί να προκληθεί αύξηση των επιπέδων των παραγόμενων εδαφικών δονήσεων. Οι ελάχιστες ταχύτητες φάσης των καμπτικών κυμάτων που διαδίδονται στο σύστημα εσχάρας/εδάφους είναι συνήθως πολύ μεγαλύτερες από τις ταχύτητες που επιτυγχάνονται με τα σύγχρονα τρένα υψηλών ταχυτήτων. Ωστόσο, υπό ορισμένες συνθήκες, π.χ., για αμμώδη εδάφη, αυτές οι ταχύτητες γίνονται συγκρίσιμες με τις ταχύτητες του τρένου.
- Η μείωση του διαστήματος μεταξύ των στρωτήρων της σιδηροτροχιάς δεν επηρεάζει το επίπεδο των δονήσεων εδάφους που παράγονται από τα trans-Rayleigh τρένα αλλά επιφέρει αισθητή μείωση των παραγόμενων εδαφικών δονήσεων για τρένα που κινούνται σε ταχύτητες κάτω από τις ταχύτητες των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh. Το συμπέρασμα αυτό θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε συγκεκριμένα τμήματα σιδηροδρομικών γραμμών συμβατικών τρένων για την απομείωση των παραγόμενων εδαφικών δονήσεων.

Η δυσκαμψία της σιδηροδρομικής εσχάρας, που προαναφέρθηκε ως μια αιτία των ανωμαλιών της σιδηροτροχιάς, είναι μια πολύ σημαντική ιδιότητα των παραγόμενων δονήσεων και σχετίζεται άμεσα με τον σχεδιασμό ενός νέου σιδηρόδρομου. Αν είναι πολύ χαμηλή, τότε αυξάνονται οι παραμορφώσεις στο έρμα και στο υποκείμενο έδαφος και τα κινητήρια οχήματα απαιτούν πρόσθετη ισχύ για την κύλιση επί της σιδηροτροχιάς. Αν η δυσκαμψία της σιδηροτροχιάς είναι πολύ υψηλή, τότε οι αναπτυσσόμενες τάσεις των τροχών συγκεντρώνονται

σε μικρή επιφάνεια επάνω στις ράγες κι έτσι δημιουργούνται αυλακώσεις. Επιπρόσθετα, αν εμφανίζει σημαντικές μεταβολές σε διάφορα τμήματα της διαδρομής, τότε αυτό δυσχεραίνει την κατάσταση της σιδηροτροχιάς και ενισχύει τη δημιουργία δονήσεων (Connolly et al., 2014a).

Οι ιδανικές τιμές για τη δυσκαμψία της εσχάρας διαφέρουν από χώρα σε χώρα, καθώς συνήθως βασίζονται στον αναμενόμενο τύπο τρένου που θα την διασχίζει (π.χ., τρένο εμπορικού φορτίου ή επιβατικό τρένο υψηλής ταχύτητας). Συνεπώς, η ιδανική δυσκαμψία της εσχάρας είναι δύσκολο να καθοριστεί για σιδηροδρομικές γραμμές που εξυπηρετούν ταυτόχρονα τρένα διαφορετικού είδους. Σε αυτήν την περίπτωση, η εμφάνιση ανωμαλιών στη σιδηροτροχιά είναι πιθανότερη και κατά επέκταση και η δημιουργία σχετικών εδαφικών δονήσεων (Connolly et al., 2014a).

Συντελεστής ελαστικότητας στοιχείων σιδηροδρομικής γραμμής (t/mm)	
Σιδηροτροχιά	5.000 – 10.000
Ξύλινος στρωτήρας	50 – 80
Στρωτήρας σκυροδέματος	1.200 – 1.500
Μεταλλικός στρωτήρας	500 – 1.000
Έρμα (μετά την υπογόμωση)	10 – 30
Ελαστικό υπόθεμα	10 – 20
Υποδομή ιλώδης	0,5 – 1,5
Υποδομή αργιλώδης	1,5 – 2,0
Υποδομή χαλικώδης	2 – 8
Υποδομή και έρμα υπό παγετό	8 – 10
Τεχνικά έργα με σκύρα και ξύλινους στρωτήρες	12
Τεχνικά έργα με σκύρα και στρωτήρες σκυροδέματος	15

Πίνακας 2.2: Συντελεστές ελαστικότητας διαφόρων στοιχείων της σιδηροδρομικής γραμμής (Φώλας, 2009).

Είναι γνωστό ότι η ευκαμψία είναι καθοριστικός παράγοντας για την απόκριση ενός υλικού. Η σιδηροδρομική γραμμή αποτελείται από διαφορετικά υλικά, όπου κάθε επί μέρους υλικό έχει τη δική του ελαστικότητα και υπό την επίδραση των κατακόρυφων φορτίων υπόκειται σε διαφορετικές βυθίσεις. Η συνολική ελαστικότητα της επιδομής της γραμμής καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό

από το έρμα, καθώς αυτό παρουσιάζει τις μικρότερες τιμές συγκριτικά με τα άλλα στοιχεία της επιδομής, ενώ ο συνολικός συντελεστής ελαστικότητας όλης της γραμμής καθορίζεται από την υποδομή που έχει τον πιο μικρό συντελεστή από όλα τα στοιχεία της γραμμής (Φώλας, 2009). Οι τιμές των συντελεστών ελαστικότητας για τα διάφορα στοιχεία της γραμμής φαίνονται στον Πίνακα 2.2.

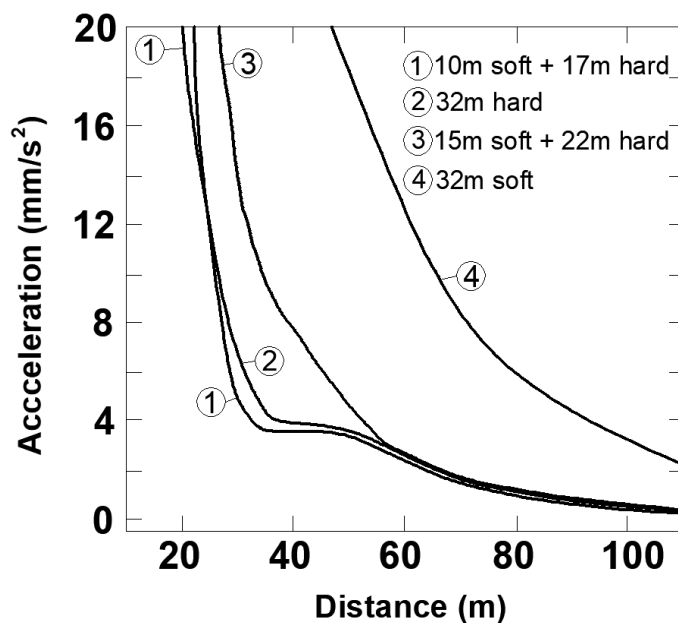
2.3.5. Επίδραση υποκείμενου εδάφους

Οι παράμετροι του υποκείμενου εδάφους του σιδηρόδρομου που εξετάζονται συχνά στη βιβλιογραφία για τη μελέτη της διάδοσης των σιδηροδρομικών δονήσεων είναι το μέτρο ελαστικότητας E , η απόσβεση των εδαφικών δονήσεων η , ο λόγος του Poisson ν και το μέτρο διάτμησης G , όπως περιγράφηκαν με συντομία σε προηγούμενη ενότητα. Σχετικά με τη στιβαρότητα (δυσκαμψία) του εδάφους και τη διαστρωμάτωση των εδαφικών στρώσεων, βιβλιογραφικά έχουν παρατηρηθεί τα εξής:

- Όταν αυξάνει η στιβαρότητα του υποκείμενου εδάφους του σιδηρόδρομου, τότε αυξάνονται και τα επίπεδα των εδαφικών δονήσεων (Takemiya, 2005).
- Η διαστρωμάτωση του εδάφους παίζει σημαντικό ρόλο στις παραγόμενες δονήσεις και δεν μπορεί να παραμεληθεί. Επίσης, οι δυσκαμψίες των στρωμάτων πλησίον της επιφάνειας παίζουν σημαντικό ρόλο. Αν η δυσκαμψία των κατώτερων εδαφικών στρωμάτων είναι μεγαλύτερη από αυτή των ανώτερων, τότε μειώνεται το επίπεδο των δονήσεων και ο ρυθμός της απόσβεσης γίνεται εντονότερος και το αντίθετο (Kouroussis et al., 2012).
- Όταν υπάρχει στρώση μαλακού εδάφους επάνω από στιβαρό έδαφος, τότε η καμπύλη των μέγιστων τιμών επιτάχυνσης των επιφανειακών δονήσεων είναι κοντά σε αυτή του μαλακού εδάφους κοντά στην εσχάρα (κοντινό πεδίο - κάτω από τον σιδηρόδρομο) και κοντά σε αυτήν του στιβαρού εδάφους μακριά από την εσχάρα (μακρινό πεδίο - εκτός σιδηρόδρομου). Όσο μεγαλύτερο είναι το πάχος της στρώσης του μαλακού εδάφους, τόσο μεγαλύτερη είναι η μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης της δόνησης (Takemiya, 2005).

- Ο συντονισμός της εδαφικής στρώσης του υποκείμενου εδάφους εξαρτάται από το πάχος της και από τα δυναμικά της χαρακτηριστικά (Kouroussis et al., 2012).
- Το εύρος κίνησης του υποκείμενου εδάφους εξαρτάται από το συχνотικό περιεχόμενο του επιφανειακού φορτίου και από το πάχος του εδαφικού στρώματος και μπορεί να επηρεαστεί από τα δυναμικά του χαρακτηριστικά σε περιοχές χαμηλών συχνοτήτων (Kouroussis et al., 2012).

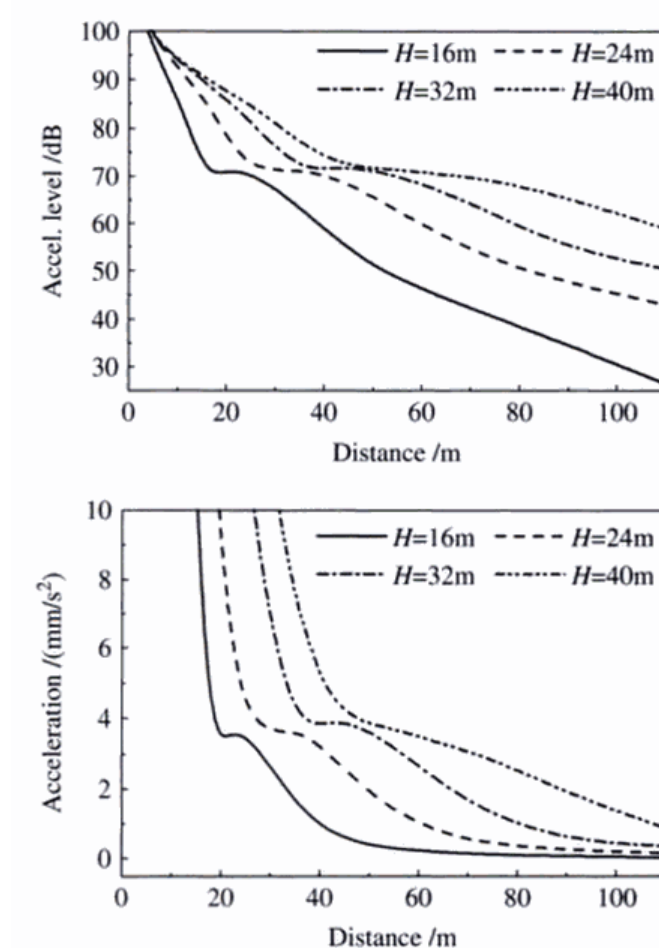
Αρκετά από τα ανωτέρω συμπεράσματα φαίνονται στο διάγραμμα της Εικόνας 2.24 που δείχνει τη μεταβολή της επιτάχυνσης της δόνησης με την απόσταση από την σιδηροδρομική εσχάρα για μαλακό και στιβαρό έδαφος, καθώς και συνδυασμό αυτών.



Εικόνα 2.24: Η επίδραση των ιδιοτήτων του υποκείμενου εδάφους στις δονήσεις (ανασχεδιασμένη από: Takemiya (2005)).

Συνακόλουθα, αξιοσημείωτη είναι η ειδική περίπτωση της παρουσίας υποστρώματος βράχου κάτω από την υποκείμενη - επιφανειακή εδαφική στρώση του σιδηρόδρομου. Η παρουσία αυτή μειώνει δραστικά το επίπεδο των δονήσεων και εξαιτίας του βραχύδους υπόβαθρου παρατηρείται μεγαλύτερος ρυθμός απόσβεσης (Kouroussis et al., 2012). Επίσης, το βάθος του υποστρώματος αυτού επηρεάζει σημαντικά τη θέση των ζωνών που παρατηρείται ενίσχυση των εδαφικών δονήσεων. Συγκεκριμένα, όταν αυξάνει το βάθος του βραχύδους

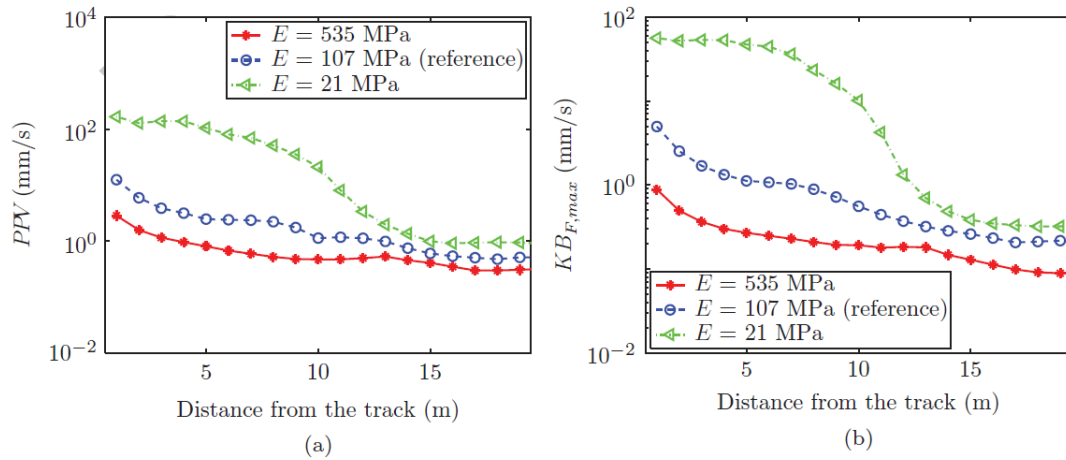
υποστρώματος, τότε αυξάνει η απόσταση των ζωνών ενίσχυσης των δονήσεων από την σιδηροδρομική εσχάρα (Takemiya, 2005). Το διάγραμμα της Εικόνας 2.25 δείχνει τις προαναφερθέντες επιδράσεις επάνω στα δονητικά επίπεδα συναρτήσει του βάθους του υποστρώματος και της απόστασης από την εσχάρα.



Εικόνα 2.25: Επίδραση του βάθους του βραχώδους υποστρώματος στις δονήσεις (Takemiya, 2005).

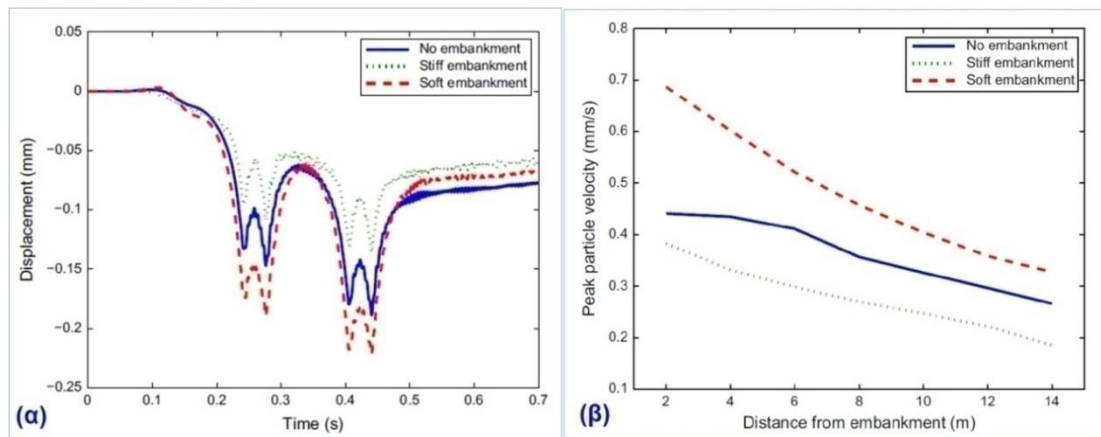
Στην περίπτωση που ο σιδηρόδρομος εδράζεται σε επιχώμα, τότε είναι πολύ μεγάλη η επιρροή του παράγοντα της δυσκαμψίας του επιχώματος στις δονήσεις. Έχει αποδειχθεί ότι τα δύσκαμπτα επιχώματα έχουν εξαιρετικές θετικές επιδόσεις στο θέμα των δονήσεων σε σχέση με τα εύκαμπτα (Connolly et al., 2013). Στα διαγράμματα της Εικόνας 2.26, φαίνεται η επίδραση του μέτρου ελαστικότητας E στα επίπεδα των παραγόμενων δονήσεων για την κατακόρυφη διεύθυνση σε μονάδες PPV και σε μονάδες του δείκτη $KB_{F,max}$, όπως προέκυψαν από προσέγγιση με τριδιάστατο προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων. Στην

περίπτωση αναφοράς, όπου $E=107$ MPa, το υλικό του επιχώματος είναι ίδιο με το υλικό της πρώτης στρώσης του φυσικού εδάφους στο οποίο εδράζεται.



Εικόνα 2.26: Τα δονητικά επίπεδα σε διαφορετικές αποστάσεις από τον σιδηρόδρομο για τρία επιχώματα διαφορετικής δυσκαμψίας. (α) Επίπεδα PPV κατακόρυφων δονήσεων και (β) Δείκτης $KB_{F,max}$ όπου $KB_{F,max} = \max(KB_{F,z})$ (Olivier et al., 2016).

Παρομοίως, η Εικόνα 2.27, δείχνει την επίδραση της στιβαρότητας του επιχώματος επάνω στις κατακόρυφες παραμορφώσεις του έρματος (κοντινό πεδίο) και τα δονητικά επίπεδα στο μακρινό πεδίο, όπως προέκυψαν από αριθμητική προσέγγιση.



Εικόνα 2.27: Η επίδραση της στιβαρότητας του επιχώματος. (α) Οι κατακόρυφες παραμορφώσεις του έρματος, (β) Τα δονητικά επίπεδα στο μακρινό πεδίο σε PPV σε διαφορετικές αποστάσεις από τη θεμελίωση του επιχώματος (Connolly et al., 2013).

Από τα προαναφερθέντα εξάγονται τα παρακάτω συμπεράσματα σχετικά με τη δυσκαμψία του σιδηροδρομικού επιχώματος:

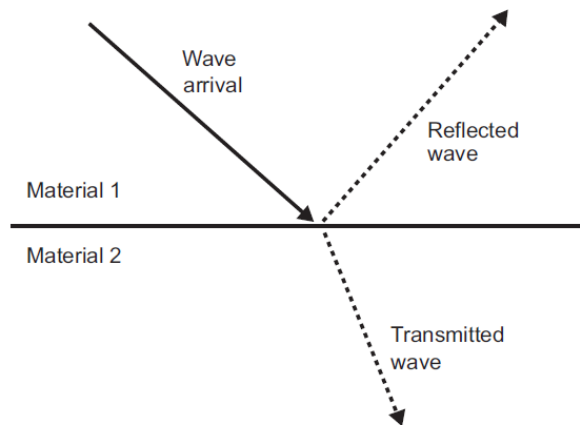
- Γενικά, οι δονήσεις στην περίπτωση του μαλακού επιχώματος είναι οι εντονότερες (Olivier et al., 2016).
- Για το κοντινό πεδίο: οι δονήσεις είναι μέχρι και 100 φορές εντονότερες, σε σύγκριση με την περίπτωση όπου το υλικό του επιχώματος είναι ίδιο με το υλικό της πρώτης στρώσης του φυσικού εδάφους στο οποίο εδράζεται. Φαίνεται ότι η στιβαρότητα του επιχώματος προκαλεί ένα «κρίσιμο φαινόμενο», όταν το τρένο υψηλής ταχύτητας τρέχει με ταχύτητα μεγαλύτερη από την κρίσιμη ταχύτητα του συστήματος σιδηρόδρομου/επιχώματος. Έτσι, παρατηρείται ένα «υπερκρίσιμο φαινόμενο», όπου οι δονήσεις με τα υψηλά πλάτη, περιορίζονται σε ένα συγκεκριμένο χώρο γύρω από το επίχωμα (Olivier et al., 2016). Οι κατακόρυφες παραμορφώσεις του έρματος, στην περίπτωση απουσίας επιχώματος, είναι μικρότερες από εκείνες του μαλακού επιχώματος και μεγαλύτερες από εκείνες του στιβαρού επιχώματος (Connolly et al., 2013). Η μέγιστη παραμόρφωση έρματος για το μαλακό επίχωμα είναι μεγαλύτερη (περίπου 60%) από την αντίστοιχη του στιβαρού (Connolly et al., 2013).
- Για το μακρινό πεδίο: στην περιοχή εκτός επιχώματος τα επίπεδα των δονήσεων μειώνονται σε τιμές μεγαλύτερες (αλλά της ίδιας τάξης μεγέθους) από τις αντίστοιχες περιπτώσεις έδρασης του σιδηρόδρομου σε όρυγμα ή στη στάθμη του φυσικού εδάφους. Επίσης, η περίπτωση του μαλακού επιχώματος με το χαμηλότερο μέτρο ελαστικότητας, βρέθηκε να έχει επίπεδα δονήσεων κοντινά με τα επίπεδα που δίνει η περίπτωση του σιδηρόδρομου στη στάθμη του φυσικού εδάφους (Olivier et al., 2016). Όταν αυξάνεται η δυσκαμψία του επιχώματος, παρατηρείται μέση μείωση των επιπέδων PPV κατά 72% στο περιβάλλον έδαφος, δηλαδή το δύσκαμπτο επίχωμα επιφέρει σημαντική μείωση στη διάδοση των δονήσεων (Connolly et al., 2013).

Τα αυξημένα επίπεδα δονήσεων που παρατηρούνται στην επιφάνεια του εδάφους έδρασης του σιδηροδρομικού επιχώματος και η έντονη διαφορά στα δονητικά επίπεδα εντός του μαλακού και του στιβαρού επιχώματος εξηγούνται με τη χρήση του συντελεστή σεισμικής ανάκλασης (Olivier et al., 2016; Connolly et

al., 2013). Ο συντελεστής σεισμικής ανάκλασης για μια διεπιφάνεια δίνεται από τον τύπο:

$$R_c = (\rho_1 * v_1 - \rho_2 * v_2) / (\rho_1 * v_1 + \rho_2 * v_2) \quad (2.15)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του υλικού, v η κυματική ταχύτητα του υλικού με δείκτες 1 για το άνω και 2 για το κάτω υλικό, όπως φαίνεται σχηματικά στην Εικόνα 2.28.



Εικόνα 2.28 : Σεισμική ανάκλαση/διάθλαση (Connolly et al., 2013).

Παρατηρούνται, λοιπόν, τα κάτωθι σχετικά με τις έντονες διαφορές μαλακού - στιβαρού επιχώματος και την ενίσχυση των δονητικών επιπέδων στην επιφάνεια έδρασης:

- Στην περίπτωση που το υλικό του επιχώματος είναι ίδιο με το υλικό της πρώτης στρώσης του φυσικού εδάφους έδρασης, τότε ισχύει ότι $R_c = 0$ όποτε μόνο η γεωμετρία του επιχώματος μπορεί να εξηγήσει τη μεγάλη ενίσχυση των δονήσεων στο επίχωμα και στην επιφάνεια του εδάφους έδρασης (Olivier et al., 2016).
- Για το μαλακό επίχωμα, ο συντελεστής σεισμικής ανάκλασης R_c είναι λίγο μεγαλύτερος του μηδενός. Συνεπώς, η διεπιφάνεια επιχώματος - εδάφους προκαλεί την ανάκλαση της κυματικής ενέργειας από τη διεπιφάνεια πίσω στο επίχωμα, με αποτέλεσμα να παγιδεύεται η ενέργεια μέσα σε αυτό και να δημιουργούνται υψηλά επίπεδα δονήσεων στην επιφάνεια του εδάφους (Olivier et al., 2016; Ditzel & Herman, 2003). Αυτό προκαλεί το φαινόμενο του «κυματοδηγού» (waveguide effect) (Connolly et al., 2013). Επίσης, το μαλακό επίχωμα έχει μικρότερη αντοχή συμπίεσης κι έτσι επιτρέπει στο

ίδιο φορτίο να συμπιέζει παραπάνω το εδαφικό του υλικό (Connolly et al., 2013).

- Για το στιβαρό επίχωμα, το R_c είναι λίγο μικρότερο του μηδενός και παρατηρείται το αντίθετο αποτέλεσμα σε σχέση με το μαλακό. Μεγάλα επίπεδα ενέργειας μεταδίδονται από το επίχωμα στο υποκείμενο έδαφος προκαλώντας μείωση των δονήσεων σε όλες τις αποστάσεις από τον σιδηρόδρομο (Olivier et al., 2016; Connolly et al., 2013).

Εκτός από τα ανωτέρω, έχει παρατηρηθεί ότι η στιβαρότητα του επιχώματος επηρεάζει μόνο τις δονητικές συχνότητες άνω των 10 Hz. Είναι ανάλογη με τα δονητικά επίπεδα στις χαμηλές συχνότητες (από 10 Hz έως 16 Hz) και αντιστρόφως ανάλογη στις υψηλές συχνότητες (άνω των 16 Hz) (Sheng et al., 2003).

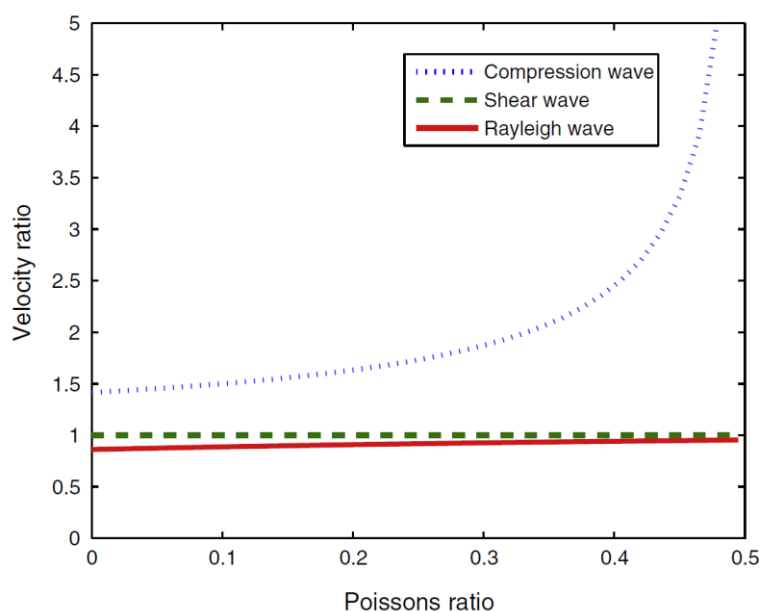
Σχετικά με την εδαφική κατηγορία στην οποία ανήκει το υποκείμενο έδαφος και την απόσβεση των δονήσεων έχουν παρατηρηθεί τα εξής:

- Η διέγερση των δονήσεων στο βραχώδες υπόβαθρο είναι ασθενέστερη σε σχέση με το αργιλικό. Ωστόσο, η απόσβεση κατά τη διάδοση των δονήσεων στο βραχώδες υπόβαθρο είναι λιγότερο έντονη από αυτή στο αμμώδες και αργιλικό έδαφος (Volberg, 1982).
- Η απόσβεση εξαρτάται από τη συχνότητα της διέγερσης, η οποία μπορεί να περιγραφεί με υστερική απόσβεση χρησιμοποιώντας γραμμικά πολύπλοκες παραμέτρους δυσκαμψίας (Connolly et al., 2014b).
- Η απόσβεση του εδαφικού υλικού, συνήθως είναι μεγαλύτερη στα ανώτερα στρώματα και μειώνεται με βάθος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα σωματίδια του εδάφους στα ανώτερα στρώματα είναι λιγότερο συμπυκνωμένα, πράγμα που σημαίνει ότι το κύμα χάνει μεγαλύτερη ενέργεια καθώς «περνά» μέσα από τα κενά του αέρα. Επιπλέον, εάν ένα έδαφος είναι κορεσμένο, τότε μπορεί να εμφανίζει αυξημένη ιξώδη απόσβεση σε υψηλές συχνότητες (Connolly et al., 2014a).

Ο Πίνακας 2.3 απεικονίζει τη συσχέτιση των εδαφικών υποβάθρων για ομογενές και στρωσιγενές έδαφος με τα επίπεδα της δόνησης και την εξασθένηση της δονητικής ενέργειας, όπως προέκυψαν βάσει αριθμητικής προσέγγισης.

Διάταξη	Δονητικό επίπεδο	Μείωση
Ομογενές έδαφος		
Ευαισθησία μέτρου διάτμησης	Ισχυρή διακύμανση με το προτεινόμενο εύρος των τιμών G . Το δονητικό επίπεδο μειώνεται με την αύξηση του G .	Όχι συγκεκριμένη διακύμανση ($d^{-0.6}$ σε όλες τις περιπτώσεις)
Ευαισθησία απόσβεσης υλικού	Σχετική διακύμανση. Το δονητικό επίπεδο μειώνεται με υψηλή τιμή του β .	Σχέση μείωσης μεταξύ $d^{-0.5}$ (χαμηλή απόσβεση) και d^{-1} (υψηλή απόσβεση)
Στρωσιγενές έδαφος		
Εδαφική στρώση πάνω από βραχώδες υπόβαθρο	Σημαντική μείωση όταν το πάχος της άνω στρώσης είναι σχετικά μικρό	Σχέση μείωσης που φτάνει μέχρι $d^{-1.3}$
Δυσκαμψία αυξανόμενη με το βάθος	Σχετική μείωση με τον αριθμό των στρωμάτων	Σημαντική διακύμανση της μείωσης μεταξύ $d^{-0.6}$ και d^{-1}
Δυσκαμψία μειούμενη με το βάθος	Σχετική μείωση με τον αριθμό των στρωμάτων	Μικρή διακύμανση της μείωσης μεταξύ $d^{-0.8}$ και $d^{-0.6}$

Πίνακας 2.3: Περιγραφικά αποτελέσματα επιπέδων δόνησης και εξασθένησης ενέργειας με την απόσταση σε σχέση με το εδαφικό υπόβαθρο (Kouroussis et al., 2012).



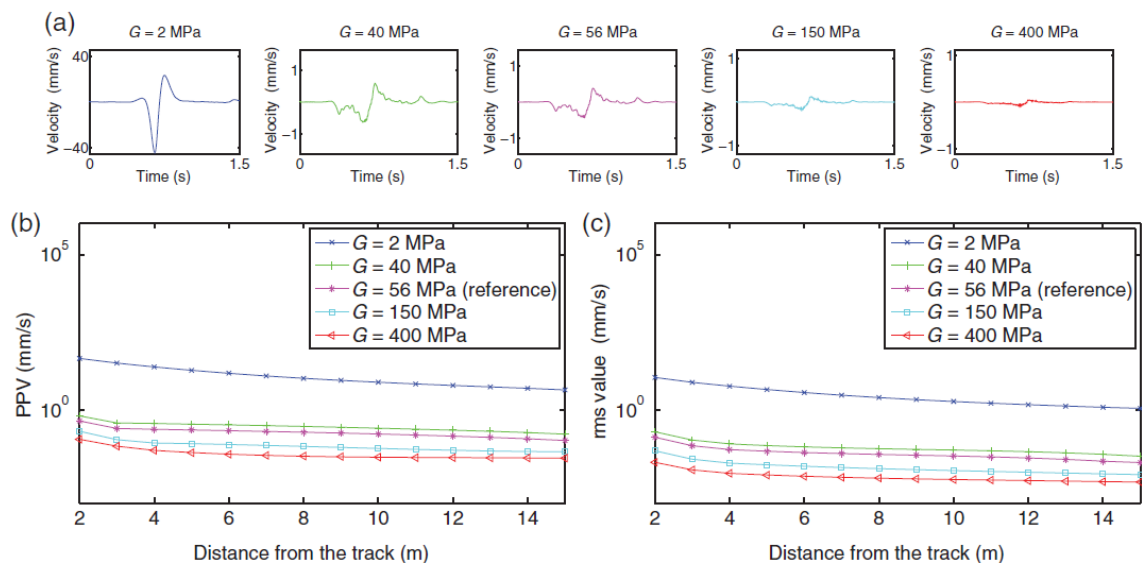
Εικόνα 2.29: Επίδραση του λόγου Poisson επάνω στην ταχύτητα των σεισμικών κυμάτων P , S και R (Connolly et al., 2014a).

Η τιμή του λόγου Poisson του υποκείμενου εδάφους φαίνεται να έχει αμελητέα επίδραση στη διάδοση των εδαφικών δονήσεων σε πρακτικό επίπεδο (Connolly et al., 2014a). Αυτό συμβαίνει γιατί η επίδραση του λόγου του Poisson

έχει μικρή επίδραση στην ταχύτητα του κύματος Rayleigh, καθώς η ταχύτητα του κύματος Rayleigh δεν μπορεί ποτέ να υπερβεί την ταχύτητα του διατμητικού κύματος S. Οι μεταβολές στην ταχύτητα των κυμάτων P, S και R σε σχέση με τον λόγο του Poisson φαίνονται στην Εικόνα 2.29.

Το μέτρο διάτμησης του υποκείμενου εδάφους, όπως και η απόσβεση, είναι κύρια παράμετρος επηρεασμού του επιπέδου των δονήσεων (Kouroussis et al., 2012). Τα διαγράμματα της Εικόνας 2.30 συνοψίζουν τα αποτελέσματα ανάλυσης αναφορικά με τα επίπεδα της δόνησης (*PPV* και *Vrms*) και την εξασθένηση (απόσβεση) της δονητικής ενέργειας με την απόσταση, όπου φαίνεται ένα ευρύ φάσμα τιμών για το μέτρο διάτμησης για την περίπτωση στρωσιγενούς εδάφους. Παρατηρείται ότι όσο μεγαλύτερο είναι το μέτρο διάτμησης, τόσο μειώνονται τα δονητικά επίπεδα (Kouroussis et al., 2012).

Τέλος, σχετικά με το υποκείμενο έδαφος, είναι χρήσιμο να αναφερθεί ότι οι υψίσυχνες δονήσεις που δημιουργούνται από τη σιδηροτροχιά αποσβένονται σχετικά γρήγορα κατά τη διάδοσή τους μέσω αυτού. Αυτό συμβαίνει επειδή τα συχνοτικά χαρακτηριστικά του εδάφους τυπικά εμποδίζουν τη διάδοση των υψίσυχνων δονήσεων (βλέπε Εικόνα 2.16: Τυπικές περιοχές συχνοτήτων διέγερσης). Αντίθετα, μόνο τα κύματα χαμηλότερης συχνότητας είναι ικανά να μεταδίδονται σε μεγαλύτερες αποστάσεις κι αυτό οφείλεται εν μέρει στο μεγαλύτερο μήκος κύματός τους (Connolly et al., 2014b).



Εικόνα 2.30: Επίδραση του μέτρου διάτμησης στα δονητικά επίπεδα PPV and Vrms: (a) Χρονοιστορία στα 2m από την εσχάρα, (b) PPV, (c) Vrms (Kouroussis et al., 2012).

2.3.6. Επίδραση εδαφικής διατομής και θέσης στις δονήσεις

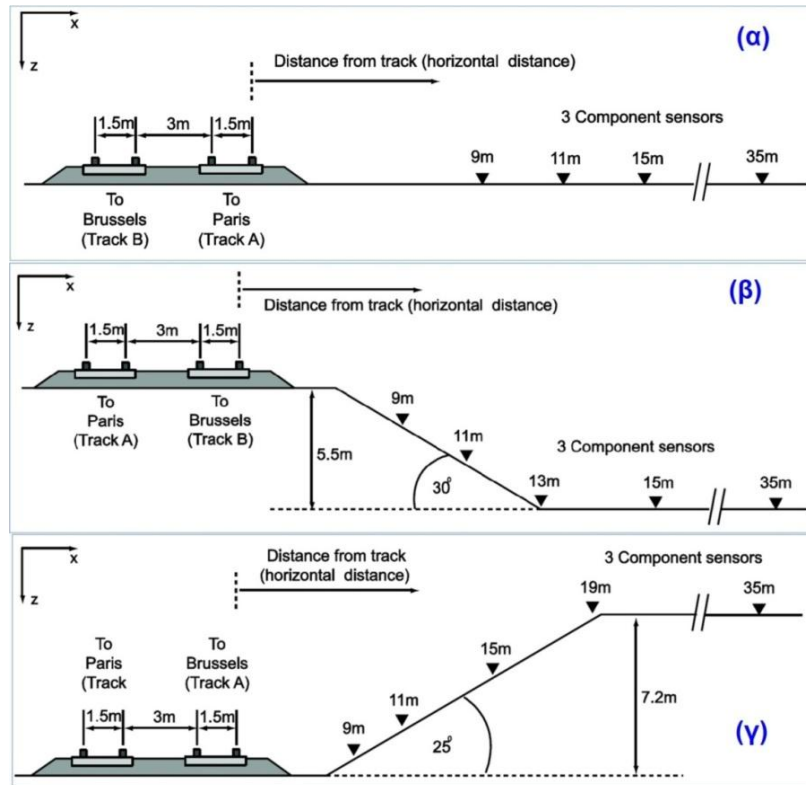
Στην περίπτωση των σιδηροδρομικών δονήσεων, όπως προαναφέρθηκε, η απόσβεση στο υποκείμενο έδαφος προκαλείται κυρίως από την απόσβεση του ίδιου του εδαφικού υλικού και τη γεωμετρική απόσβεση. Αυτό έχει ως συνέπεια τα επίπεδα των παραγόμενων δονήσεων να μειώνονται με την απόσταση από τον σιδηρόδρομο, που είναι η πηγή της διέγερσης. Αξιοσημείωτη, είναι η ειδικότερη διερεύνηση των μειωτικών μεταβολών και των τριών κατευθύνσεων (x , y , z) των δονήσεων. Έχει αποδειχθεί ότι οι κατακόρυφες δονήσεις παρουσιάζουν υψηλότερα πλάτη και αυξημένο βαθμό απόσβεσης. Ο βαθμός τους είναι περίπου ίσος με 0,4, ενώ οι οριζόντιες δονήσεις έχουν βαθμό απόσβεσης περίπου ίσο με 0,2.

Επίσης, η οριζόντια συνιστώσα της δόνησης δεν μπορεί να παραληφθεί στο μακρινό πεδίο (Olivier et al., 2016). Η έρευνα που έχει γίνει επάνω στην επίδραση της εδαφικής διατομής του σιδηρόδρομου στις παραγόμενες εδαφικές δονήσεις, είναι ελάχιστη, στην οποία η περίπτωση του σιδηροδρομικού επιχώματος έχει το μικρότερο ποσοστό (Connolly et al., 2014b). Για την περίπτωση του σιδηροδρομικού ορύγματος δεν υπήρξε καμιά πειραματική μελέτη μέχρι το 2014 (Connolly et al., 2014b).

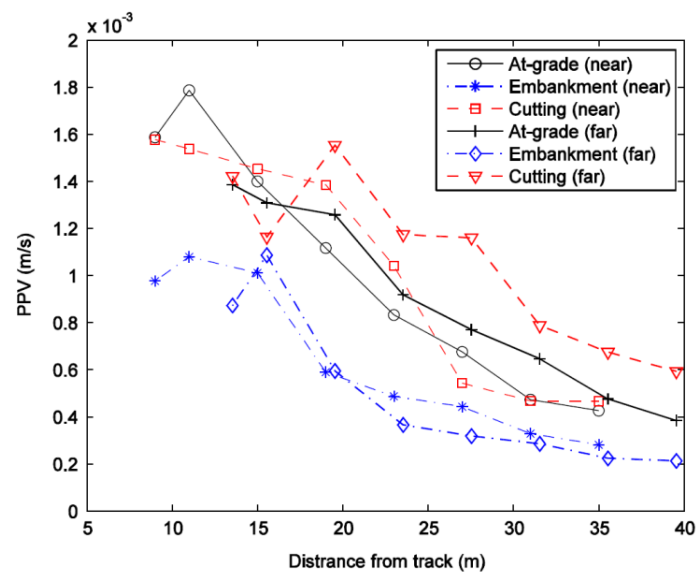
Γενικά, όπως θα συζητηθεί παρακάτω, υπάρχει μια θετική επίδραση του επιχώματος έναντι των άλλων εδαφικών διατομών σχετικά με τα επίπεδα της δόνησης. Συγκεκριμένα, η προσθήκη ενός επιχώματος το οποίο είναι πιο δύσκαμπτο από το υποκείμενο έδαφος μειώνει τις δονήσεις σε μεγάλη απόσταση από τον σιδηρόδρομο και αντίθετα (Connolly et al., 2013). Ένα σιδηροδρομικό επίχωμα μπορεί να χαρακτηριστεί από τις ταχύτητες των διαμήκων και διατμητικών κυμάτων του, οι οποίες καθορίζονται από την πυκνότητα του εδάφους και τις δύο παραμέτρους του Lamé. Σε ένα αμμώδες επίχωμα, η ταχύτητα του διαμήκους κύματος είναι περίπου 400-600 m/s και του διατμητικού κύματος περίπου 100-150 m/s (Ditzel & Herman, 2003).

Η περίπτωση σιδηρόδρομου με διπλή σιδηροδρομική εσχάρα σε τρεις διαφορετικές τοποθεσίες με διαφορετική εδαφική τομή (στάθμη φυσικού εδάφους, επίχωμα, όρυγμα) για τους τρεις τύπου τρένου Eurostar, TGV και Thalys μελετήθηκε με επιτόπιες μετρήσεις (Connolly et al., 2014b). Ανάλογα με την απόσταση της κάθε μιας εσχάρας από τις θέσεις μέτρησης και τους αισθητήρες,

διακρίνεται η «μακρινή εσχάρα» και η «κοντινή εσχάρα». Στην Εικόνα 2.31 φαίνεται ο σιδηρόδρομος με τις σιδηροδρομικές εσχάρες στις τρεις διαφορετικές εδαφικές διατομές του.

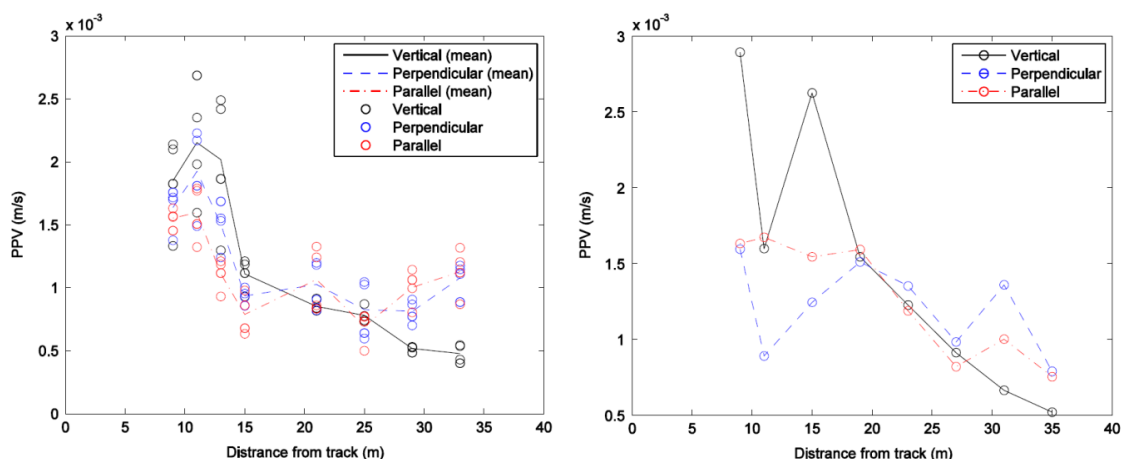


Εικόνα 2.31: Οι τρεις διαφορετικές εδαφικές διατομές του σιδηρόδρομου: (α) επίπεδο φυσικού εδάφους, (β) επίχωμα, (γ) όρυγμα (Connolly et al., 2014b).

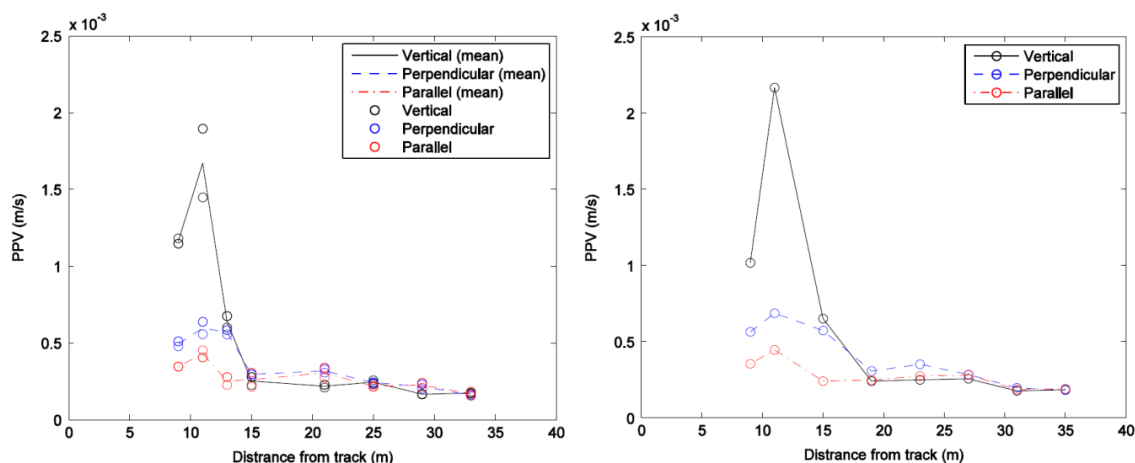


Εικόνα 2.32: Επίπεδα PPV της κατακόρυφης δόνησης εξαιτίας του περάσματος του τρένου στον κοντινό και στον μακρινό σιδηρόδρομο (Connolly et al., 2014b).

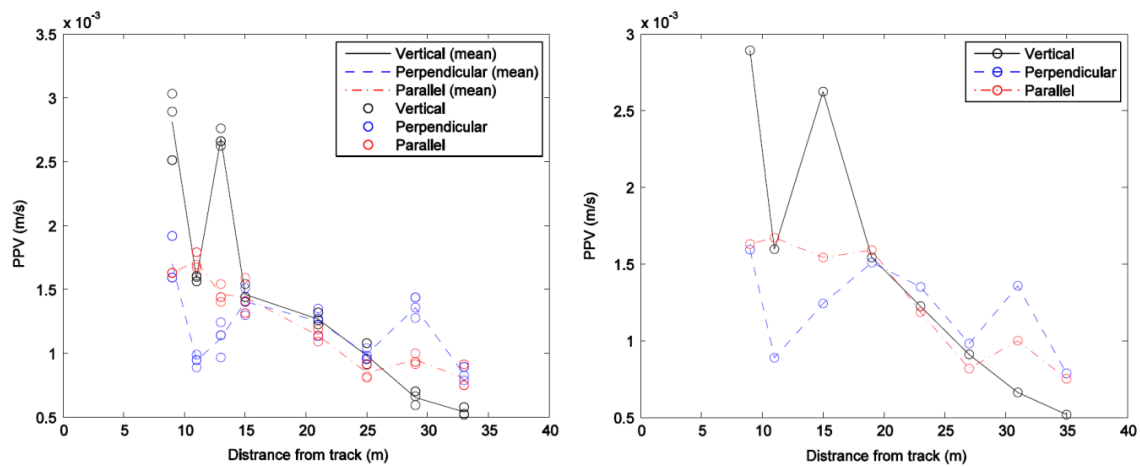
Συμπεράσματα για την ανωτέρω περίπτωση, που αφορούν τη σύγκριση των μέσων επιπέδων της κατακόρυφης δόνησης PPV και τη διέλευση των τρένων από τον κοντινό και τον μακρινό σιδηρόδρομο, φαίνονται στο διάγραμμα της Εικόνας 2.32. Επίσης, οι Εικόνες 2.33, 2.34 και 2.35 αφορούν τις εδαφικές διατομές της Εικόνας 2.31 και εστιάζουν στην επίδραση της απόστασης (κοντινό και μακρινό πεδίο) επάνω στις εδαφικές δονήσεις.



Εικόνα 2.33: Οι τρεις συνιστώσες των επιπέδων PPV για τον σιδηρόδρομο που βρίσκεται στο επίπεδο του φυσικού εδάφους. Αριστερά: Η μέση τιμή PPV για όλα τα τρένα στον κοντινό σιδηρόδρομο, Δεξιά: Η διέλευση αποκλειστικά του τρένου Thalys στα 299 km/h στον κοντινό σιδηρόδρομο (Connolly et al., 2014b).



Εικόνα 2.34: Οι τρεις συνιστώσες των επιπέδων PPV για τον σιδηρόδρομο που βρίσκεται στο επίχωμα. Αριστερά: Η μέση τιμή PPV για όλα τα τρένα στον μακρινό σιδηρόδρομο, Δεξιά: Η διέλευση αποκλειστικά του τρένου Thalys στα 299 km/h στον μακρινό σιδηρόδρομο (Connolly et al., 2014b).

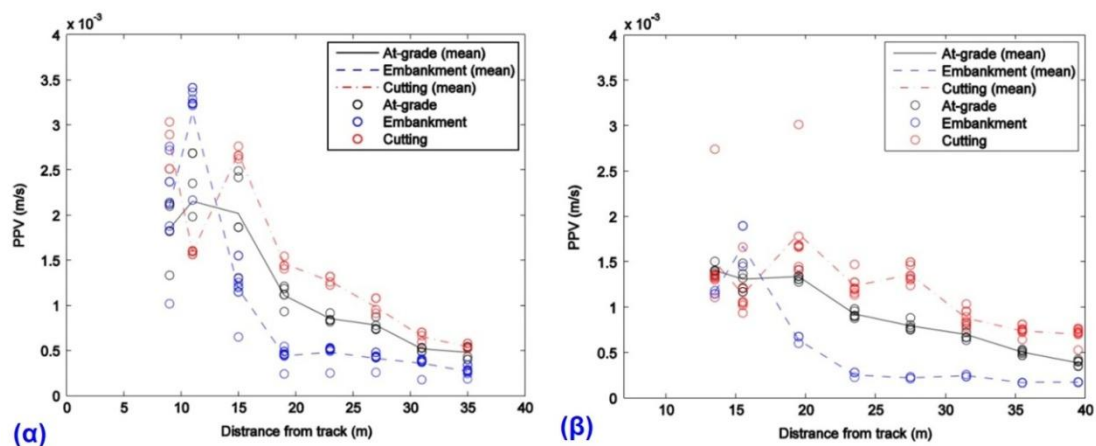


Εικόνα 2.35: Οι τρεις συνιστώσες των επιπέδων PPV για τον σιδηρόδρομο που βρίσκεται στο όρυγμα, Αριστερά: Η μέση τιμή PPV για όλα τα τρένα στον κοντινό σιδηρόδρομο, Δεξιά: Η διέλευση αποκλειστικά του τρένου Thalys στα 297 km/h στον μακρινό σιδηρόδρομο (Connolly et al., 2014b).

Τα γραφήματα δείχνουν τη μεταβολή των επιπέδων PPV των δονήσεων σε σχέση με την απόσταση από τον σιδηρόδρομο και για τις τρεις διευθύνσεις, δηλαδή κατακόρυφα, οριζόντια και κάθετα με την κίνηση του τρένου και οριζόντια και παράλληλα με την κίνησή του. Αυτό απεικονίζεται για κάθε είδος διατομής. Στα αριστερά, φαίνονται τα μέσα επίπεδα PPV και στα δεξιά φαίνονται τα επίπεδα PPV από τη διέλευση αποκλειστικά του τρένου Thalys.

Για όλα τα είδη των εδαφικών διατομών, σύμφωνα με τα διαγράμματα των Εικόνων 2.33, 2.34 και 2.35, έχουν παρατηρηθεί τα εξής (Connolly et al., 2014b):

- Στο κοντινό πεδίο (κοντά στην σιδηροτροχιά) κυριαρχούν τα κατακόρυφα επίπεδα δονήσεων, ιδιαίτερα για το επίχωμα και το όρυγμα.
- Στο μακρινό πεδίο (αυξημένη απόσταση από τη σιδηροτροχιά), τα επίπεδα PPV της κατακόρυφης δόνησης μειώνονται γρήγορα και γίνονται συγκρίσιμα με τα επίπεδα PPV της οριζόντιας δόνησης.
- Τα επίπεδα των μέσων δονήσεων εξαιτίας του περάσματος του τρένου στον κοντινό και στον μακρινό σιδηρόδρομο, είναι παρόμοια. Σε απόσταση μικρότερη των 15m από τον σιδηρόδρομο, η εδαφική δόνηση του κοντινού σιδηρόδρομου είναι εντονότερη από αυτήν του μακρινού σιδηρόδρομου, ενώ όταν αυξάνεται η απόσταση από τον σιδηρόδρομο, συμβαίνει το αντίθετο ιδιαίτερα στην περίπτωση του ορύγματος. Η αιτία της αύξησης αυτής είναι άγνωστη.



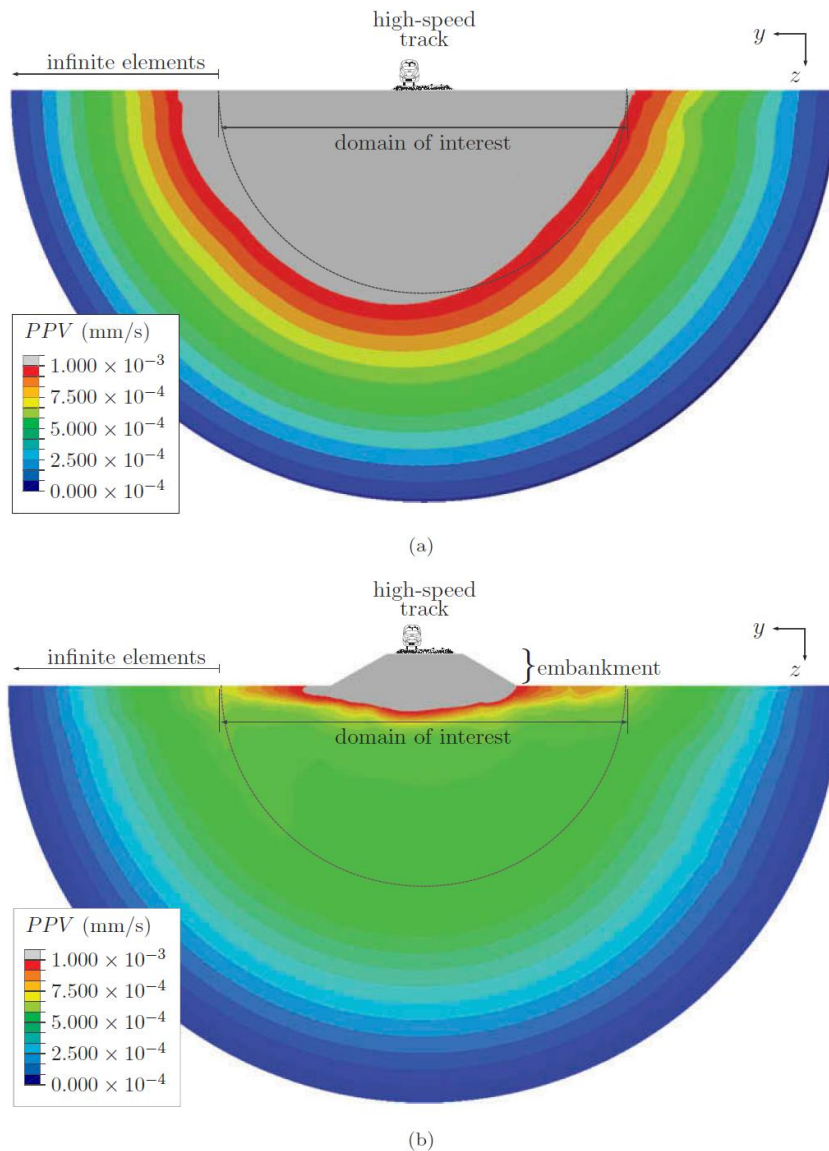
Εικόνα 2.36 : Η επίδραση της εδαφικής διατομής του σιδηρόδρομου επάνω στην κατακόρυφη συνιστώσα της παραγόμενης εδαφικής δόνησης, (α): Κοντινός σιδηρόδρομος, (β): Μακρινός σιδηρόδρομος (Connolly et al., 2014b).

Η επίδραση της εδαφικής διατομής του σιδηρόδρομου επάνω στις δονήσεις φαίνεται στα διαγράμματα των Εικόνων 2.32 έως 2.35 και συμπληρωματικά στα διαγράμματα της Εικόνας 2.36. Για τα διαφορετικά είδη διατομών συμπεραίνονται τα παρακάτω (Connolly et al., 2014b):

- Για τη διατομή του επιχώματος, τα οριζόντια επίπεδα PPV είναι πολύ χαμηλότερα από αυτά της διατομής στη στάθμη του φυσικού εδάφους, για την ίδια απόσταση από τον σιδηρόδρομο (Olivier et al., 2016). Επίσης, παρατηρούνται λίγο χαμηλότερα επίπεδα δονήσεων στις μεγάλες αποστάσεις από τον σιδηρόδρομο σε σχέση με την περίπτωση της διατομής στη στάθμη του φυσικού εδάφους, ειδικά για την κατακόρυφη συνιστώσα (Olivier et al., 2016; Kouroussis et al., 2013).
- Για τη διατομή του ορύγματος, δημιουργούνται δονήσεις μεγαλύτερου πλάτους από αυτές στις άλλες διατομές και για τις τρεις συνιστώσες. Με αυτό συμφωνούν καταγραφές στη Γαλλία που αναφέρουν ότι το όρυγμα δημιουργεί περισσότερα δονητικά προβλήματα σε σχέση με το επίχωμα, ενώ διαφωνεί η τεχνική αναφορά «High-speed ground transportation noise and vibration impact assessment» της Αμερικανικής Ομοσπονδιακής Διεύθυνσης Σιδηρόδρομων, στην οποία οι εμπειρικές σχέσεις δηλώνουν ότι το όρυγμα ίσως μειώνει ελαφρά τα επίπεδα των δονήσεων (Connolly et al., 2014b).
- Το όρυγμα και η στάθμη φυσικού εδάφους παρουσιάζουν σχετικά κοντινά επίπεδα δονήσεων (Kouroussis et al., 2013). Τα χαμηλότερα δονητικά

επίπεδα PPV παρατηρούνται για την διατομή του επιχώματος, ενώ τα υψηλότερα για την διατομή του ορύγματος (Olivier et al., 2016).

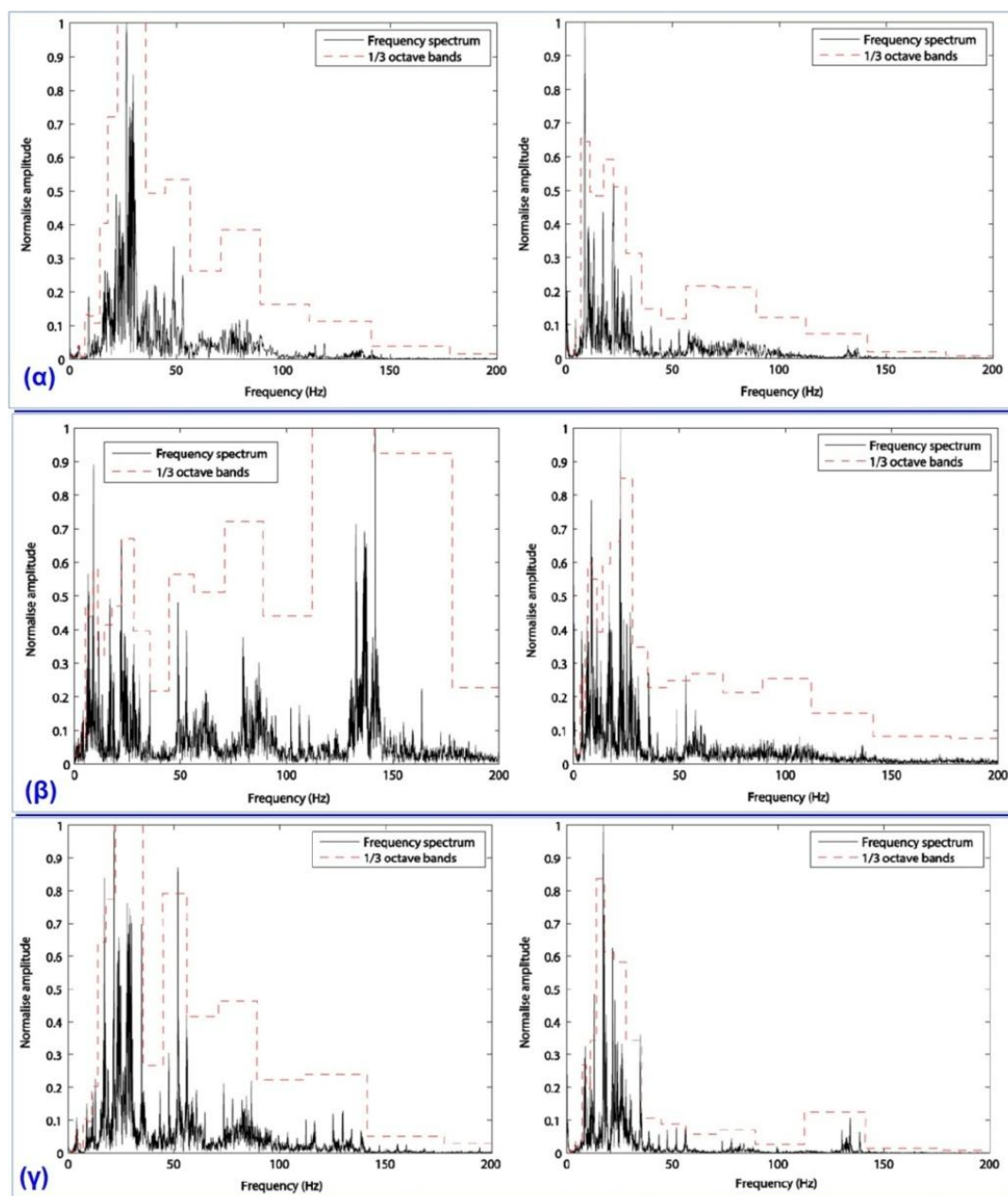
- Με την παρουσία του επιχώματος, ο βαθμός απόσβεσης αυξάνεται πάνω από 10% σε σχέση με την περίπτωση της στάθμης του φυσικού εδάφους και αυτό δείχνει τη θετική επίδραση του επιχώματος έναντι των άλλων εδαφικών διατομών σχετικά με τα επίπεδα της δόνησης (Olivier et al., 2016).



Εικόνα 2.37: Οπτική αριθμητική απεικόνιση (με τομή κάθετη στον x άξονα κίνησης του τρένου) των επιπέδων PPV των δονήσεων που παράγονται από τη διέλευση του τρένου υψηλής ταχύτητας Thalys: (a) σιδηρόδρομος στη στάθμη του φυσικού εδάφους, (b) σιδηρόδρομος σε επίχωμα (Olivier et al., 2016).

Η Εικόνα 2.37 συγκρίνει χαρακτηριστικά την περίπτωση της διατομής του επιχώματος με αυτή στη στάθμη του φυσικού εδάφους, όπως προέκυψε από

προσέγγιση πρόβλεψης με τριδιάστατο (3D) αριθμητικό προσομοίωμα σύζευξης MBS/FE (Olivier et al., 2016). Η όμοια κλίμακα χρώματος, παρουσιάζει μια σαφή διαφορά μεταξύ των δύο περιπτώσεων. Φαίνεται ξεκάθαρα ότι η ενέργεια των δονήσεων «παγιδεύεται» στο εσωτερικό του επιχώματος («waveguide effect») και ότι τότε τα μεγάλα επίπεδα δονήσεων βρίσκονται μέσα στον σιδηρόδρομο και το περιβάλλον του (Olivier et al., 2016; Ditzel & Herman, 2003).



Εικόνα 2.38: Κανονικοποιημένο φάσμα απόκρισης πλάτους των κατακόρυφων εδαφικών κατακόρυφων δονήσεων στο πεδίο των συχνοτήτων. (α): Διατομή στο επίπεδο του φυσικού εδάφους, (β) Διατομή επιχώματος, (γ) Διατομή ορύγματος (Αριστερά: Κοντινό πεδίο, Δεξιά: Μακρινό πεδίο) (Connolly et al., 2014b).

Οι μεταβολές στα πλάτη των κατακόρυφων δονήσεων με το συχνотικό περιεχόμενο για το κοντινό και το μακρινό πεδίο ανά εδαφική διατομή φαίνονται στα διαγράμματα της Εικόνας 2.38 όπου παρατηρούνται τα κάτωθι (Connolly et al., 2014b):

- Στη διατομή του επιπέδου του φυσικού εδάφους, η περιοχή συχνοτήτων των διαδιδόμενων κυμάτων στο κοντινό πεδίο είναι ίδια με αυτή του μακρινού πεδίου αλλά με πολύ πιο έντονες τιμές.
- Στην περίπτωση του επιχώματος στο κοντινό πεδίο, η περιοχή συχνοτήτων είναι πολύ ευρύτερη και γενικά εντονότερη από το μακρινό πεδίο. Στο μακρινό πεδίο, ένας μεγάλος αριθμός συχνοτήτων που εμφανιζόταν στο κοντινό πεδίο παύει να υπάρχει, μειώνεται η συχνότητα των διαδιδόμενων κυμάτων και αλλάζουν οι τιμές των μέγιστων συχνοτήτων. Οι υπερβολικά μεγάλες συχνότητες στο εσωτερικό του επιχώματος, εξηγούνται από το «waveguide effect» που προαναφέρθηκε. Οι δονήσεις στο κοντινό πεδίο είναι μεγαλύτερου συχνοτικού περιεχομένου σε σχέση με την περίπτωση της διατομής στο επίπεδο του φυσικού εδάφους.
- Όταν το όρυγμα βρίσκεται στο κοντινό πεδίο, το εύρος των συχνοτήτων είναι πολύ πιο πλούσιο από όταν βρίσκεται στο μακρινό πεδίο. Πιο συγκεκριμένα, στο μακρινό πεδίο, ένας μεγάλος αριθμός συχνοτήτων που υπήρχε στο κοντινό πεδίο δεν υφίσταται πλέον και εμφανίζεται μια περιοχή υψηλών συχνοτήτων με χαμηλό πλάτος. Οι δονήσεις στο κοντινό πεδίο είναι μεγαλύτερου συχνοτικού περιεχομένου σε σχέση με την περίπτωση που βρίσκεται στο επίπεδο του φυσικού εδάφους, αλλά χαμηλότερου σε σχέση με το επίχωμα.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι βάσει έρευνας που στηρίχτηκε σε επί τόπου μετρήσεις και καταγραφές στην ειδική περίπτωση σιδηροδρομικού επιχώματος κατασκευασμένου από συμπιεσμένο χαλίκι, έχει αποδειχτεί συμπληρωματικά για το επίχωμα ότι (Ling et al., 2009):

- Η απόκριση του επιχώματος επηρεάζεται κυρίως από την επίδραση της δόνησης του στρωτήρα, την ταχύτητα του τρένου, την απόσταση μεταξύ των συνδέσμων της σιδηροτροχιάς και την κατάσταση της στρώσης διαμόρφωσης.
- Ο ρυθμός εξασθένησης της δονητικής ενέργειας είναι μεγαλύτερος στην κατακόρυφη διεύθυνση z από εκείνον στην κατεύθυνση y (στο οριζόντιο επίπεδο και κάθετα στη σιδηροδρομική γραμμή) και η μείωση αυτή είναι συγκεκριμένης εκθετικής μορφής.

2.3.7 Ρόλος των παρακείμενων κτιριακών κατασκευών

Οι δονήσεις που δημιουργούνται στη διεπαφή του τρένου και της εσχάρας του σιδηρόδρομου διαδίδονται μέσω του εδάφους και φθάνουν στις γειτονικές κατασκευές. Η περιοχή υποδοχής δονήσεων ενός κτιρίου, περιλαμβάνει την ανωδομή και τη θεμελίωσή του καθώς και το άμεσο περιβάλλον έδαφος. Οι δονήσεις μεταφέρονται από το έδαφος στα θεμέλια και στη συνέχεια μεταδίδονται περαιτέρω στο κτίριο όπου μπορούν και να ενισχυθούν. Δονήσεις προκαλούνται στα δάπεδα και στους τοίχους και το γεγονός αυτό αποτελεί ένα αυξανόμενο πρόβλημα που παρατηρείται σε πολλές χώρες.

Η αλληλεπίδραση εδάφους – κτιρίου και η απόκριση του κτιρίου αναφορικά με τις ενδεχόμενες επιπτώσεις εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως (Persson, 2016; Bahrekazemi, 2004):

- Οι ιδιότητες του περιβάλλοντος εδάφους, π.χ., η στιβαρότητα.
- Ο τύπος της θεμελίωσης.
- Οι διαστάσεις της κάτοψης. Βασικό στοιχείο της αλληλεπίδρασης είναι η σχέση του μήκους κύματος της δόνησης με το μέγεθος της κάτοψης του κτιρίου. Εάν το μήκος κύματος είναι μεγάλο σε σχέση με το πλάτος του κτιρίου, τότε οι δονήσεις προκαλούν μόνο μεταφορική κίνηση σε αυτό. Αντίστροφα, εάν είναι μικρό σε σχέση με αυτό, τότε εισάγεται και κάμψη στο κτίριο.
- Ο τύπος και η κατάσταση του κτιρίου.
- Οι ιδιοσυχνότητες του κτιρίου και των στοιχείων του φέροντος οργανισμού του, π.χ., οι πλάκες δαπέδου. Για τη διέγερση του κτιρίου σε συχνότητα συντονισμού θα πρέπει η συγκεκριμένη συχνότητα να υπάρχει στο φάσμα των εισερχόμενων δονήσεων .
- Η απόσβεση του κτιρίου.
- Η γενική γεωμετρία του κτιρίου.
- Τα υλικά κατασκευής του κτιρίου.
- Η διάρκεια, η συχνότητα και το εύρος της έντασης της δυναμικής διέγερσης.

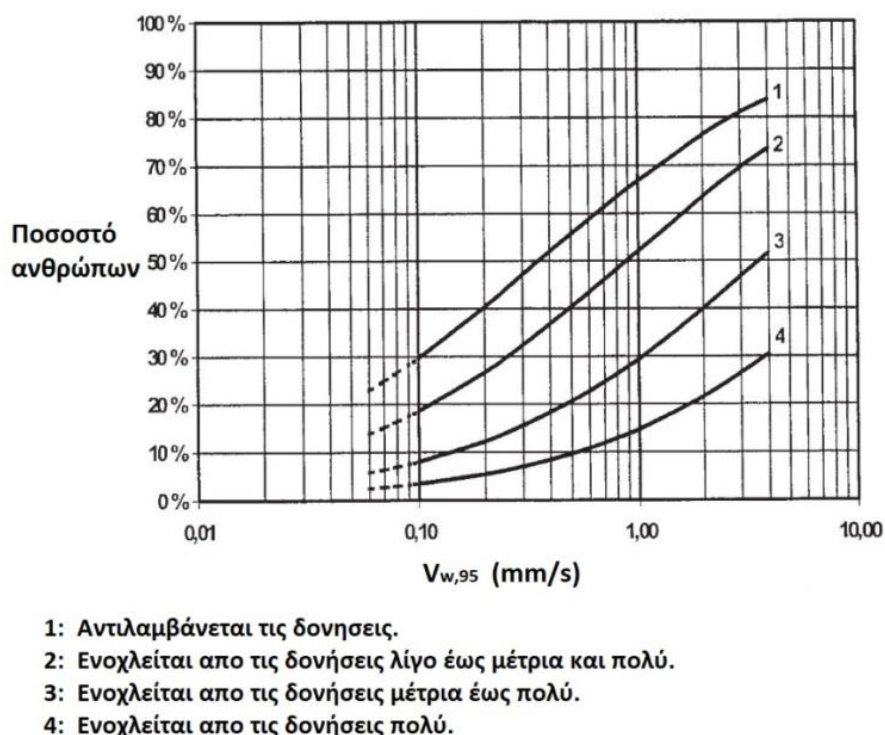
Επίδραση μπορεί να έχει ακόμη και η τοποθέτηση των επίπλων και του εξοπλισμού εντός του κτιρίου.

Γενικά, το ίδιο το έδαφος χρησιμεύει για την απόσβεση των δονήσεων στη διαδρομή από την πηγή δημιουργίας μέχρι τον αποδέκτη και ιδιαίτερα αυτών που έχουν υψηλές συχνότητες (Connolly et al., 2014a). Σημειώνεται ότι η περιοχή συχνοτήτων μέχρι 10 Hz περιέχει τις περισσότερες πληροφορίες σχετικά με πιθανές βλαβερές επιδράσεις των δονήσεων στα κτίρια και στους ανθρώπους (Paolucci et al., 2003). Το μεγαλύτερο μέρος του φάσματος των δονήσεων που φθάνει στις γειτονικές ανθρώπινες κατασκευές συνήθως είναι κάτω από 100 Hz, ενώ τα περισσότερα κτήρια έχουν ιδιοσυχνότητες κάτω από 10 Hz. Το έδαφος αλλάζει την περιοχή των συχνοτήτων των δονήσεων σε μια τέτοια περιοχή που ο συντονισμός με αυτά να γίνεται πιθανότερος (Connolly et al., 2014a).

Η διαδικασία των απαλλοτριώσεων πριν την κατασκευή του σιδηρόδρομου αφορά μια απόσταση 60m από αυτόν. Κατά τον χρόνο διεξαγωγής αυτής της διαδικασίας λίγα κτίρια βρίσκονται σε αυτήν την απόσταση και για αυτό συχνά παρατηρείται το γεγονός ότι ο εναέριος θόρυβος υπερσχύει του επίγειου θορύβου (εδafικές δονήσεις) για τα υπεραστικά (intercity) τρένα και τα τρένα υψηλών ταχυτήτων. Όσα κτίρια βρίσκονται σε απόσταση άνω των 60m, να μην υπόκεινται στον εναέριο θόρυβο του σιδηρόδρομου, αλλά οι εδαφικές δονήσεις έχουν αποσβεστεί επαρκώς και δεν αποτελούν πρόβλημα (Connolly et al., 2014a).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τις εδαφικές δονήσεις των επίγειων σιδηρόδρομων αποτελεί η περίπτωση των αστικών τραμ και των τρένων εμπορικού φορτίου. Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι πιο συνηθισμένο οι δονήσεις να φτάσουν σε κοντινές κατασκευές με τέτοια χαρακτηριστικά πλάτους και συχνότητας ώστε να μπορούν να προκαλέσουν αρνητικά αποτελέσματα. Τα τραμ, να μην κινούνται με χαμηλές ταχύτητες, αλλά πολλές φορές έχουν υψηλές μη ανηρητημένες μάζες. Επίσης, στην περίπτωση αυτή τα κτίρια βρίσκονται πολύ κοντά στην σιδηροδρομική εσχάρα. Παρόμοια είναι και η περίπτωση των τρένων εμπορικού φορτίου που κινούνται με χαμηλές ταχύτητες και συνήθως έχουν πολύ μεγάλη μη ανηρητημένη μάζα. Αυτό δημιουργεί δονήσεις μεγάλου πλάτους και χαμηλής συχνότητας (+20dB / 20Hz) που μπορούν να διαδοθούν σε μεγάλες αποστάσεις από τη σιδηροτροχιά. Οι δονήσεις αυτές είναι δύσκολο να περιοριστούν, εξαιτίας της διάδοσης βαθιά μέσα στο έδαφος των κυμάτων Rayleigh μεγάλου μήκους κύματος (Connolly et al., 2014a).

Η ανθρώπινη απόκριση στις δονήσεις επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες. Αυτοί μπορεί να είναι είτε φυσικοί, π.χ., το πλάτος, η διάρκεια και το συχνотικό περιεχόμενο των δονήσεων, είτε ψυχολογικοί, π.χ., ο τύπος του πληθυσμού, η ηλικία, το φύλο και η προσδοκία αντίληψης μιας δόνησης (Bahrekazemi, 2004). Συνεπώς, η ανθρώπινη απόκριση στις δονήσεις είναι υποκειμενική και διαφορετική για διαφορετικούς ανθρώπους και για αυτό εξετάζεται με στατιστικό τρόπο κάθε ορισμένο επίπεδο δόνησης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.39.



Εικόνα 2.39: Ποσοστό των ανθρώπων με διαφορετικούς βαθμούς ενόχλησης στις δονήσεις σε κατοικίες με την σταθμισμένη ταχύτητα $v_{w,95}$ (Bahrekazemi, 2004).

Στην περίπτωση συντονισμού, όπου οι συχνότητες των δονήσεων προσεγγίζουν τις ιδιοσυχνότητες του κτιρίου και συνεπώς οι δονήσεις του κτιρίου μεγαλώνουν αρκετά, οι βασικοί τρόποι αντίληψης της δόνησης από τους ανθρώπους που βρίσκονται εντός αυτού έγκειται στα εξής (Connolly et al., 2014a):

- Αίσθηση της δονητικής απόκρισης ολόκληρης της κατασκευής.
- Θόρυβος χαμηλής συχνότητας από τα δονούμενα πατώματα και τους τοίχους. Επίσης, εκτός από το συνηθισμένο δια αέρος θόρυβο που

ακούγεται κατά τη διάρκεια της διέλευσης του τρένου υπάρχει και ο ακουστικός θόρυβος από το χτύπημα των παραθύρων, των πιάτων και άλλων παρόμοιων εξαρτημάτων.

Υπάρχει αλληλεπίδραση της ανθρώπινης έκθεσης σε θόρυβο με την έκθεση σε δονήσεις. Οι άνθρωποι συνήθως ενοχλούνται περισσότερο από την ταυτόχρονη έκθεση σε θόρυβο και δόνηση σε σχέση με την έκθεση μόνο σε δόνηση. Σύμφωνα με το υπουργείο Μεταφορών των ΗΠΑ (1998), το όριο αντίληψης των ανθρώπων είναι περίπου 0.04 mm/s (Bahrekazemi, 2004).

Σχετικά με τα όρια των εδαφικών δονήσεων στα κτήρια αν η μέγιστη ταχύτητα εδάφους (*PGV*) μιας δόνησης (Bahrekazemi, 2004):

- Είναι κάτω των 50 mm/s, η πιθανότητα να συμβούν δομικές βλάβες είναι μόνο 5%.
- Είναι μικρότερη από 25 mm/s, δεν έχει αναφερθεί καμία περίπτωση δομικής βλάβης.
- Είναι μικρότερη από 15 mm/s, δεν υπάρχει κίνδυνος αρχιτεκτονικής ζημιάς για τα κανονικά κτίρια.

Τα κριτήρια επιπτώσεων των δονήσεων (ταχύτητες r.m.s.) για τα συνήθη κτίρια σύμφωνα με το τμήμα μεταφορών των Η.Π.Α. (DOT-293630-1, 1998) φαίνονται στον Πίνακα 2.4. Το κριτήριο περιβαλλοντικών επιπτώσεων των σιδηροδρομικών δονήσεων της Σουηδικής Διοίκησης Σιδηρόδρομων (Banverket) και της Σουηδικής Υπηρεσίας Περιβαλλοντικής Προστασίας (Naturv) φαίνεται στον Πίνακα 2.5.

Το ISO 4866 (1990) δίνει οδηγίες για τον υπολογισμό των δονήσεων και των αποτελεσμάτων τους στα κτήρια. Η εμπειρία έχει δείξει ότι δονήσεις εδάφους που μετρήθηκαν σε απόσταση 15m από τον κεντρικό άξονα του σιδηρόδρομου πολύ σπάνια υπερέβαιναν τα 4mm/s ή ακόμα και τα 2mm/s. Στην πραγματικότητα, οι δονήσεις που προκαλούνται από τη σιδηροδρομική κυκλοφορία, είναι πολύ απίθανο να προκαλέσουν δομικές βλάβες στα κτίρια. Εάν τα κτίρια είναι πολύ κοντά στον σιδηρόδρομο μπορεί να προκληθούν δευτερεύουσες αισθητικές βλάβες, στη δυσμενέστερη περίπτωση. Συνήθως, το πλάτος των δονήσεων στο οποίο ξεκινά η εμφάνιση των αισθητικών βλαβών των κτηρίων είναι τουλάχιστον τριπλάσιο από το πλάτος των δονήσεων σε απόσταση περίπου 15m από τον κεντρικό άξονα του σιδηρόδρομου (Bahrekazemi, 2004).

Κατηγορία Χρήσης Γης	Επίπεδα επιπτώσεων εδαφικών δονήσεων σε dB		Επίπεδα επιπτώσεων εδαφικών δονήσεων σε mm/s	
	Συχνά γεγονότα ^(α)	Σπάνια γεγονότα ^(β)	Συχνά γεγονότα	Σπάνια γεγονότα
Κατηγορία 1: Κτίριο όπου οι δονήσεις προκαλούν παρεμβολές σε εσωτερικές λειτουργίες.	65	65 ^(γ)	0.05	0.05
Κατηγορία 2: Κτίριο κατοικίας και κτίριο όπου οι άνθρωποι κοιμούνται κανονικά.	72	80	0.10	0.25
Κατηγορία 3: Θεσμικές χρήσεις γης με κύρια χρήση κατά τη διάρκεια της ημέρας.	75	83	0.14	0.36
Σημειώσεις: α) Συχνά γεγονότα: Πάνω από 70 δονήσεις ανά ημέρα. β) Σπάνια γεγονότα: Κάτω από 70 δονήσεις ανά ημέρα. γ) Το όριο των κριτηρίων βασίζεται σε επίπεδα που είναι αποδεκτά για τους περισσότερους μετρίως ευαίσθητους εξοπλισμούς, π.χ., οπτικά μικροσκόπια. Ένας εξοπλισμός ιδιαίτερα ευαίσθητος σε δονήσεις απαιτεί λεπτομερή αξιολόγηση για τον καθορισμό των αποδεκτών επιπέδων δόνησης. Ο καθορισμός χαμηλότερων επιπέδων δονήσεων σε ένα κτίριο συχνά απαιτεί ειδικό σχεδιασμό για τα συστήματα θέρμανσης/ψύξης/αερισμού και ενισχυμένα δάπεδα.				

Πίνακας 2.4: Κριτήρια επιπτώσεων των εδαφικών δονήσεων για τα συνήθη κτήρια (Bahrekazemi, 2004).

Επίπεδο δόνησης r.m.s. (1 - 80Hz)	Ταχύτητα σωματιδίου	Επιτάχυνση σωματιδίου
	0.4 mm/s	14 mm/s ²

Πίνακας 2.5: Κριτήρια επιπτώσεων των εδαφικών δονήσεων (Bahrekazemi, 2004).

Πάρα τα ανωτέρω, κτήρια ειδικής χρήσης είναι πιο ευαίσθητα στις περιβαλλοντικές δονήσεις, π.χ., θέατρα, τηλεοπτικά στούντιο, αίθουσες συναυλιών και εργαστήρια με ευαίσθητο εξοπλισμό. Αυτά θα πρέπει να μελετώνται ξεχωριστά σε περίπτωση γειτνίασης με μια νέα σιδηροδρομική γραμμή. Οι δονήσεις μπορεί να επηρεάσουν την απόδοση ευαίσθητου εξοπλισμού μέσα στα κτίρια, π.χ. τα ηλεκτρονικά μικροσκόπια. Τα πρότυπα ISO 10811-1 (2000) και ISO 10811-2 (2000) καλύπτουν τα θέματα υπολογισμού, αξιολόγησης και ταξινόμησης των δονήσεων στα κτίρια με ευαίσθητο εξοπλισμό. Συνήθως οι οδηγίες των κατασκευαστών παρέχουν τις απαραίτητες πληροφορίες σχετικά με το μέγιστο

επίπεδο δόνησης για ευαίσθητο εξοπλισμό (Bahrekazemi, 2004). Τα κριτήρια επιπτώσεων των δονήσεων (ταχύτητες r.m.s.) για τα ειδικά κτήρια σύμφωνα με το τμήμα μεταφορών των Η.Π.Α. (DOT-293630-1, 1998) φαίνονται στον Πίνακα 2.6.

Τύπος κτιρίου ή αίθουσας	Επίπεδα επιπτώσεων εδαφικών δονήσεων σε dB		Επίπεδα επιπτώσεων εδαφικών δονήσεων σε mm/s	
	Συχνά γεγονότα (α)	Σπάνια γεγονότα (β)	Συχνά γεγονότα (α)	Σπάνια γεγονότα (β)
Αίθουσες συναυλιών	65	65	0.05	0.05
Τηλεοπτικά στούντιο	65	65	0.05	0.05
Στούντιο ηχογράφησης	65	65	0.05	0.05
Αμφιθέατρα	72	80	0.10	0.25
Θέατρα	72	80	0.10	0.25
Σημειώσεις: α) Συχνά γεγονότα: Πάνω από 70 δονήσεις ανά ημέρα. β) Σπάνια γεγονότα: Κάτω από 70 δονήσεις ανά ημέρα.				

Πίνακας 2.6: Κριτήρια επιπτώσεων των εδαφικών δονήσεων για τα ειδικά κτήρια (Bahrekazemi, 2004).

Κεφάλαιο 3^ο

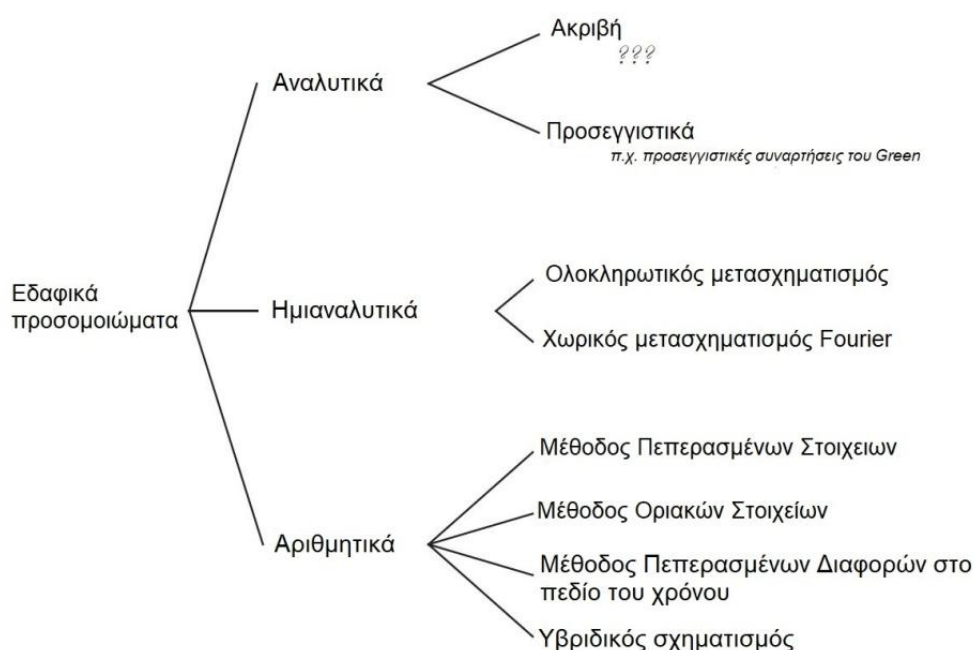
Μέθοδοι προσομοίωσης

Η ανάγκη ανάπτυξης κατάλληλης μεθοδολογίας και υπολογιστικών εργαλείων πρόβλεψης και αξιολόγησης των σιδηροδρομικών δονήσεων είναι η αυξανόμενη ζήτηση για την κατασκευή νέων σιδηροδρομικών γραμμών σε αστικό ή υπεραστικό περιβάλλον, η ανάγκη αναβάθμισης υφιστάμενων γραμμών, η ανάγκη δόμησης κοντά σε σιδηρόδρομους, η ασφάλεια της λειτουργίας των τρένων και η προστασία του περιβάλλοντος. Όπως έχει προαναφερθεί, η πρόβλεψη αυτή είναι πολύπλοκη και απαιτεί καλές γνώσεις για την πηγή δημιουργίας, το μέσο διάδοσης και τον αποδεκτή των δονήσεων. Η ανομοιογένεια του μέσου διάδοσης, δηλαδή του εδάφους, δυσκολεύει ιδιαίτερα τη διαδικασία. Δεν υπάρχει επίσημος κανονισμός, π.χ., Ευρωκώδικας, που να προτείνει μια συγκεκριμένη μεθοδολογία. Το θέμα έχει μελετηθεί εκτενώς επιστημονικά και υπάρχουν αρκετές τεχνικές για την πρόβλεψη των δονήσεων και των πιθανών προβλημάτων εξαιτίας τους. Έχουν αναπτυχθεί και είναι διαθέσιμα αρκετά αναλυτικά και αριθμητικά προσομοιώματα και στην ανάπτυξη αυτή συνέβαλλε καθοριστικά η ταυτόχρονη αλματώδης υπολογιστική πρόοδος.

Οι πιο γνωστές μέθοδοι πρόβλεψης των εδαφικών δονήσεων διακρίνονται στις εξής γενικές κατηγορίες (Davis, 2010):

- **Θεωρητικές**, δηλαδή αναλυτικές, ημιαναλυτικές, αριθμητικές ή συνδυασμός αυτών. Για παράδειγμα η Εικόνα 3.1 δείχνει την ταξινόμηση των προσομοιωμάτων εδάφους στις τρεις αυτές βασικές κατηγορίες, με τις διάφορες περαιτέρω λεπτομερέστερες ταξινομήσεις.
- **Εμπειρικές**, δηλαδή μέθοδοι που είτε προκύπτουν συνδυάζοντας επί τόπου δοκιμές - μετρήσεις της εξεταζόμενης περιοχής, είτε προκύπτουν βάση στατιστικής επεξεργασίας υφιστάμενων μετρήσεων (Modular Prediction Approaches, Direct Measurement Prediction Models (DMPM)).

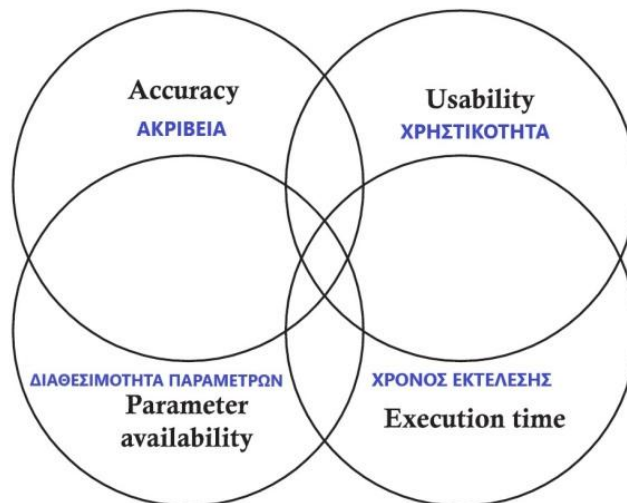
Κάθε μέθοδος έχει συγκεκριμένο πεδίο εφαρμογής και επίπεδο πολυπλοκότητας. Η επιλογή του καταλληλότερου εργαλείου για την πρόβλεψη των δονήσεων εξαρτάται από τις τρεις διακριτές περιοχές του φαινομένου (πηγή - μέσο - αποδέκτης) και τον σκοπό για τον οποίο απαιτείται η πρόβλεψη, π.χ., το στάδιο της μελετητικής διαδικασίας ενός κτιρίου. Σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορεί να είναι αποτελεσματικό και κατάλληλο να χρησιμοποιηθεί ένας συνδυασμός μεθόδων, ανάλογα με την απαιτούμενη ακρίβεια, ταχύτητα και όγκο υπολογισμών.



Εικόνα 3.1: Ταξινόμηση προσομοιωμάτων εδάφους (Kouroussis et al., 2014).

Αναφορικά με την επιλογή του προσομοιώματος πρόβλεψης, τα τέσσερα επιθυμητά χαρακτηριστικά είναι η ακρίβεια, η χρηστικότητα, η διαθεσιμότητα των παραμέτρων και ο χρόνος εκτέλεσης (Connolly et al., 2014a). Είναι διασυνδεδεμένα μεταξύ τους όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στην Εικόνα 3.2.

Για παράδειγμα, σε ένα απλό εμπειρικό προσομοίωμα ο χρόνος εκτέλεσης είναι αμελητέος, ενώ η χρηστικότητα είναι υψηλή, δηλαδή δεν απαιτείται εκτεταμένη εκπαίδευση για τη χρήση. Παράλληλα, οι απαιτήσεις σε διαθέσιμες παραμέτρους είναι χαμηλές, δηλαδή αρκούν λίγες παράμετροι εισαγωγής πριν από την εκτέλεση. Ωστόσο, το προσομοίωμα διαθέτει χαμηλή ακρίβεια, πράγμα το οποίο αντισταθμίζει τα παραπάνω πλεονεκτήματα.



Εικόνα 3.2: Τα τέσσερα επιθυμητά χαρακτηριστικά ενός προσομοιώματος πρόβλεψης δονήσεων (Connolly et al., 2014a).

Επίσης, πολύ σημαντικό για την επιλογή ενός εργαλείου πρόβλεψης είναι να λαμβάνεται υπόψη η επιθυμητή περιοχή συχνοτήτων. Σε περίπτωση που το ενδιαφέρον μελέτης εστιάζεται στον επανεκπεμπόμενο ακουστικό θόρυβο που προκαλείται από τις σιδηροδρομικές δονήσεις, τότε η επιθυμητή περιοχή συχνοτήτων πρέπει να είναι υψηλότερη από την περιοχή που λαμβάνεται για τις εδαφικές δονήσεις. Τέλος, αναφορικά με την αξιοπιστία του προσομοιώματος πρόβλεψης πρέπει να σημειωθεί ότι για να θεωρηθεί το εκάστοτε επιλεγμένο προσομοίωμα έγκυρο, πρέπει να επικυρωθεί με τη σύγκριση διάφορων πειραματικών αποτελεσμάτων (Connolly et al., 2014a; Kouroussis et al., 2014).

3.1. Διάκριση προσομοιωμάτων πρόβλεψης ISO 14837-1

Σύμφωνα με το ISO 14837-1, που αφορά τις σιδηροδρομικές δονήσεις, τα προσομοιώματα πρόβλεψης χωρίζονται σε τρεις γενικές διαφορετικές κατηγορίες ανάλογα με την επιδιωκόμενη ακρίβεια των παραγόμενων αποτελεσμάτων (Persson, 2016; Avillez et al., 2012):

- Προσομοιώματα σκοπιμότητας (Scoping models).
- Προσομοιώματα περιβαλλοντικής αξιολόγησης (Environmental assessment models).
- Προσομοιώματα λεπτομερούς σχεδιασμού (Detailed design models).

Επίσης, το ISO 14837-1 προτείνει τον διαχωρισμό της διαδικασίας στις τρεις βασικές συνιστώσες του προβλήματος, δηλαδή την πηγή, την πορεία της διάδοσης και τον αποδεκτή των δονήσεων. Αυτές θα πρέπει να αναλύονται επαρκώς κατά τη διαμόρφωση των προσομοιωμάτων και να λαμβάνονται υπόψη όλες οι παράμετροι επηρεασμού. Το πρόβλημα θα πρέπει να αντιμετωπίζεται ως πρόβλημα συχνотήτων, όπου το συχνοτικό δονητικό περιεχόμενο προκύπτει και από τις τρεις ανωτέρω συνιστώσες.

Ένα προσομοίωμα σκοπιμότητας εφαρμόζεται στα αρχικά στάδια σχεδιασμού μιας αναπτυξιακής μελέτης (π.χ. κατασκευή νέου ή αναβάθμιση υφιστάμενου σιδηρόδρομου, δόμηση κοντά σε υφιστάμενο σιδηρόδρομο), όπου το αρχικό ζητούμενο είναι εάν οι παραγόμενες εδαφικές δονήσεις αποτελούν πρόβλημα. Αυτό να είναι εύκολο και γρήγορο στη χρήση και να βασίζεται μόνο σε γενικές παραμέτρους που είναι διαθέσιμες σε πρώιμο μελετητικό στάδιο, π.χ. το είδος του τρένου (ελαφρύ, βαρύ, υψηλής ταχύτητας), τη θέση της σιδηροτροχιάς, τις γενικές συνθήκες εδάφους (μαλακό, στιβαρό) και τις απαιτήσεις των γειτονικών κτηρίων - κατασκευών. Το αποτέλεσμα μπορεί να αφορά την αναγκαιότητα ή μη λήψης μέτρων περιορισμού δονήσεων, τον προσδιορισμό μιας συγκεκριμένης τοποθεσίας δόμησης, τη θέση μιας νέας σιδηροδρομικής γραμμής εκτιμώντας τις αποστάσεις πέραν των οποίων οι δονήσεις δεν θεωρούνται πρόβλημα καθώς και την εύρεση προβληματικών ζωνών κατά μήκος μιας σιδηροδρομικής γραμμής.

Τα προσομοιώματα περιβαλλοντικής αξιολόγησης χρησιμοποιούνται στην αρχική φάση μιας μελέτης, όπου προτείνονται οι θέσεις ανοικοδόμησης των κτηρίων ή η θέση μιας σιδηροδρομικής γραμμής και υπάρχουν διαθέσιμα ειδικότερα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του εδάφους της περιοχής μελέτης. Είναι πιο σύνθετα από αυτά της σκοπιμότητας και παρέχουν μια πιο ακριβή και ποσοτική περιγραφή του προβλήματος των δονήσεων. Οι παράμετροι εισαγωγής πρέπει να είναι πιο εξειδικευμένοι από αυτές που απαιτεί ένα προσομοίωμα σκοπιμότητας (π.χ. μήκος τρένου, αξονικό φορτίο, τύπος σιδηρόδρομου, ταχύτητα μελέτης του τρένου, γεωλογικό υπόβαθρο, τύπος θεμελίωσης κτηρίων, κλπ.). Εκτιμούν χονδρικά τις επιπτώσεις των εδαφικών δονήσεων και στην περίπτωση αναγκαιότητας λήψης μέτρων περιορισμού δονήσεων, αναφέρουν τη γενική μορφή, τα οφέλη και την έκτασή τους. Οι ακολουθούμενες μέθοδοι μπορεί να είναι εμπειρικές ή θεωρητικές ή συνδυασμός αυτών.

Τα προσομοιώματα λεπτομερούς σχεδιασμού χρησιμοποιούνται σε φάση οριστικής μελέτης σχεδιασμού νέων κτηρίων ή νέων σιδηροδρομικών γραμμών στην οποία όλες οι ιδιότητες των υλικών που σχετίζονται με τον σιδηρόδρομο, το έδαφος και το υπόψη κτίριο είναι γνωστές. Καθορίζουν την ακριβή θέση του κτιρίου ή της σιδηροδρομικής γραμμής και εξετάζουν όλες τις σχετικές παραμέτρους. Παρέχουν λεπτομερή ανάλυση για ένα ή περισσότερα στοιχεία του συστήματος πηγή – μέσο διάδοσης – αποδέκτης δονήσεων και καθορίζουν απόλυτες τιμές δονήσεων για τον έλεγχο της συμμόρφωσης με τις καθορισμένες απαιτήσεις για τη συγκεκριμένη περίπτωση. Τέλος, καθορίζουν τις απαιτήσεις σχεδιασμού νέων κτηρίων και στην περίπτωση αναγκαιότητας λήψης μέτρων περιορισμού δονήσεων, παρέχουν μια πλήρη και λεπτομερή περιγραφή.

3.2. Θεωρητική προσέγγιση με αναλυτικά ή ημι-αναλυτικά προσομοιώματα

Τα θεωρητικά αναλυτικά ή ημι-αναλυτικά προσομοιώματα πρόβλεψης εδαφικών δονήσεων βασίζονται κυρίως σε αριθμητικές, αναλυτικές και ημιαναλυτικές μεθόδους, οι οποίες με τη σειρά τους στηρίζονται σε σύνθετους μαθηματικούς σχηματισμούς. Οι αναλυτικές προσεγγίσεις ενδείκνυνται μόνο για προβλήματα με πολύ απλές οριακές συνθήκες (Davis, 2010).

Τα αναλυτικά και ημιαναλυτικά προσομοιώματα τυπικά εκφράζονται ως συστήματα ελατηριακής μάζας και οι αλγεβρικοί τους σχηματισμοί αξιοποιούν το δυναμικό νόμο. Για τον υπολογισμό των σιδηροδρομικών δονήσεων, θεωρούνται υπολογιστικά πιο αποδοτικά προσομοιώματα σε σχέση με τα προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων (Avillez et al., 2012).

Για τις αναλυτικές εδαφικές προσομοιώσεις έχουν αναφερθεί τα παρακάτω:

- Απαιτούνται πολλές υποθέσεις για την περιγραφή της διάδοσης των κυμάτων και η φόρτιση διέγερσης πρέπει να παραμείνει ακίνητη (Kouroussis et al., 2014).
- Είναι δύσκολο να εισαχθεί στο εδαφικό προσομοίωμα μελέτης το προσομοίωμα του συστήματος του κινούμενου τρένου και της εσχάρας, το οποίο είναι αυτό που ουσιαστικά αναπαριστά το σιδηροδρομικό σύστημα.

Αυτός είναι ο λόγος που τα αναλυτικά προσομοιώματα συνήθως δεν χρησιμοποιούνται στην περίπτωση των σιδηροδρομικών δονήσεων, άλλα είναι πολύ χρήσιμα στην επικύρωση προηγμένων σύνθετων προσομοιωμάτων (Connolly et al., 2014a).

- Πρέπει να γίνουν πολλές υποθέσεις για τη μείωση της πολυπλοκότητας του προσομοιώματος για την αναλυτική προσομοίωση του συστήματος τρένου - εσχάρας, ιδιαίτερα αναφορικά με την γεωμετρία και τον μηχανισμό διέγερσης (Connolly et al., 2014a).

Για το ημιαναλυτικό προσομοίωμα εδάφους έχουν παρατηρηθεί τα εξής (Connolly et al., 2014a):

- Αποτελεί ένα προτεινόμενο τρόπο για την αντιμετώπιση του θέματος της απορρόφησης των ορίων του εδαφικού χωρίου της μεθόδου FDTD (Sheng et al., 2001; Timoshenko, 1953). Οι καθοριστικές εξισώσεις για το τρένο υπολογίζονται στο πεδίο των συχνοτήτων, ενώ οι εξισώσεις εσχάρας - εδάφους λύνονται στο πεδίο των συχνοτήτων – κυματαριθμών και δημιουργείται μια ενιαία συνάρτηση μεταφοράς για όλο το σύστημα.
- Είναι υπολογιστικά αποδοτικότερη από κάποιες εναλλακτικές αριθμητικές μεθόδους και μπορεί να προσομοιώνει αποτελεσματικά τα φαινόμενα που δημιουργούνται από τις ανωμαλίες της σιδηροτροχιάς και του τροχού (Sheng et al., 1998). Πάρα ταύτα, οι πολλές απαιτούμενες υποθέσεις για τον σχηματισμό των αναλυτικών εκφράσεων για τον υπολογισμό των συναρτήσεων μεταφοράς, καθιστά δύσκολη την εισαγωγή πολύπλοκων αλλαγών στη γεωμετρία του προσομοιώματος και τον υπολογισμό της δόνησης των γειτονικών κατασκευών.

Μια αξιοσημείωτη καθιερωμένη ημιαναλυτική μέθοδος είναι η *PiP* (Pipe-in-Pipe) που αφορά την περίπτωση των σιδηρόδρομων. Η μέθοδος εκτιμάει τις σιδηροδρομικές δονήσεις με την προσομοίωση του σκυροδέματος της σιδηροτροχιάς ως εσωτερικού σωλήνα και του εδάφους ως εξωτερικού σωλήνα και με τη σύζευξη των δυο σωλήνων υπολογίζεται η ισορροπία των τάσεων και η συνέχεια των μετακινήσεων (Davis, 2010).

Το *CIVET* (change in vibration emitted by track) είναι ένα καθιερωμένο ημιαναλυτικό προσομοίωμα για τον επιφανειακό σιδηρόδρομο. Αυτό (όπως το *PiP*) δεν επιδιώκει να δώσει απόλυτα επίπεδα δονήσεων, αλλά υπολογίζει τη

μεταβολής της απόκρισης των δονήσεων σε ένα σημείο παρατήρησης λόγω αλλαγών στις παραμέτρους του σιδηρόδρομου ή του τρένου. Λεπτομερέστερα στο CIVET (Avillez et al., 2012):

- Ο σιδηρόδρομος αντιπροσωπεύεται ως μια διδιάστατη, άπειρη, στρωσιγενής δοκός που στηρίζεται σε ένα τριδιάστατο (3D) ημιχώρο.
- Η υστερητική απόσβεση λαμβάνεται υπόψη μέσω μιας σύνθετης παραμέτρου δυσκαμψίας.
- Η επαφή της σιδηροτροχιάς με τη μη αναρτημένη μάζα (ζεύγη τροχών) εκφράζεται με μια συνάρτηση γραμμικής δυσκαμψίας.
- Η τραχύτητα του τροχού και της σιδηροτροχιάς συμπεριλαμβάνεται μέσω μιας συνάρτησης διαφορικής μετατόπισης κατά μήκος του ελατηρίου επαφής.
- Η ανάρτηση του οχήματος προσομοιώνεται ως ένα ολοκληρωμένο μονοδιάστατο σύστημα για κάθε ζεύγος τροχών, που περιλαμβάνει τα στοιχεία της πρωτεύουσας και δευτερεύουσας ανάρτησης, τις μάζες του φορείου και του βαγονιού του τρένου.
- Το έδαφος θεμελίωσης του σιδηρόδρομου θεωρείται ελαστικός ημιχώρος.
- Λαμβάνονται υπόψη μόνο τα δυναμικά φορτία που οφείλονται στη μη αναρτημένη μάζα του τρένου. Συνεπώς, αφού δεν λαμβάνονται υπόψη τα σχεδόν στατικά φορτία, δεν εξάγονται πλήρη αποτελέσματα για τις χαμηλές δονητικές συχνότητες στο κοντινό πεδίο.
- Παράμετροι που επηρεάζουν τα απόλυτα επίπεδα των δονήσεων (όπως το ανομοιογενές έδαφος) και δεν αφορούν την σχεδόν στατική διέγερση, δεν παίζουν σημαντικό ρόλο στα αποτελέσματα.

3.3. Θεωρητική προσέγγιση με αριθμητικές μεθόδους

Υπάρχουν αρκετές αριθμητικές μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη των εδαφικών δονήσεων (Davis, 2010):

- Μέθοδος Πεπερασμένων Διαφορών στο πεδίο του χρόνου (Finite Difference Time-Domain Method (FDTD ή FDM)).

- Μέθοδος ή Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Analysis ή Method (FEA ή FEM)).
- Μέθοδος Συνοριακών Στοιχείων (Boundary Element Method (BEM)).
- Στατιστική ανάλυση ενέργειας (Statistical Energy Analysis (SEA)).
- Υβριδικές μέθοδοι, δηλαδή συνδυασμός μεθόδων.

Επίσης, άλλες δύο αξιοσημείωτες αριθμητικές μέθοδοι που υπολογίζουν αποτελεσματικά την παραγόμενη εδαφική κίνηση εξαιτίας κινητών φορτίων σταθερής ταχύτητας είναι (Paolucci & Spinelli, 2005):

- Η δυναμική αμοιβαία θεωρία Betti – Rayleigh (BR).
- Η Μέθοδος Φασματικών Στοιχείων (Spectral Element Method (SEM)).
Γενικά, για τα αριθμητικά προσομοιώματα έχουν παρατηρηθεί τα εξής:
- Συνήθως είναι καταλληλότερα για λεπτομερή ανάλυση, καθώς απαιτούν πολλές γνωστές παραμέτρους εισαγωγής (π.χ., ιδιότητες των υλικών και γεωμετρικές ιδιότητες) και εξαιτίας της υπολογιστικής εξέλιξης διαθέτουν τη δυνατότητα διαμόρφωσης μεγαλύτερων και λεπτομερέστερων προσομοιωμάτων σε σχέση με το παρελθόν (Persson, 2016).
- Είναι αποδεδειγμένα ένα πολύ αποτελεσματικό εργαλείο για τη μελέτη του φαινομένου, άλλα η πολυπλοκότητα τόσο στην ανάπτυξη του προσομοιώματος όσο και στην απόκτηση των απαραίτητων παραμέτρων είναι μεγάλη. Συνεπώς, δεν γίνεται να χρησιμοποιηθούν ως αποκλειστικό εργαλείο πρόβλεψης (Avillez et al., 2012).
- Έχουν γεωμετρική ευελιξία και μπορούν να προσομοιάσουν πολύπλοκες κατασκευές (Avillez et al., 2012).
- Η μέγιστη συχνότητα που μπορεί να επιλυθεί με ακρίβεια σχετίζεται με τη διακριτοποίηση του στοιχείου. Οι υψηλότερες συχνότητες απαιτούν μικρότερες διαστάσεις στοιχείων, πράγμα που αυξάνει σημαντικά τις υπολογιστικές απαιτήσεις. Για αυτό οι αναλυτικές λύσεις καθίστανται ελκυστικές, καθώς είναι λιγότερο ευαίσθητες στις αλλαγές στις συχνότητες.

3.3.1. Μέθοδος Πεπερασμένων Διαφορών

Η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών στο πεδίο του χρόνου (Finite Difference Time-Domain Method (FDTD ή FDM)) είναι ουσιαστικά μια αριθμητική λύση της

εξίσωσης του κύματος (ISO 14837-1, 2005), εκτελεί βαθμιδωτούς υπολογισμούς των καταστάσεων κάθε διακριτού στοιχείου στο πεδίο του χρόνου, επιλύοντας τις μερικές διαφορικές εξισώσεις σε μικρά χρονικά διαστήματα. Για τη μέθοδο αυτή έχουν παρατηρηθεί τα εξής (Davis, 2010; Connolly et al., 2014a):

- Σημαντικό στοιχείο είναι η φύση του μέσου διάδοσης, το οποίο είναι συχνά πορώδες και σε μερικές περιπτώσεις κορεσμένο με νερό.
- Ενώ μπορεί εύκολα να λάβει υπόψη την στρωματοποίηση και την ανισοτροπία του εδάφους και του βράχου, η ακριβής προσομοίωση των απωλειών ενέργειας λόγω της απόσβεσης των υλικών ενέχει αβεβαιότητα. Αυτό συμβαίνει, όχι μόνο εξαιτίας της έλλειψης μετρήσεων για τους συντελεστές απόσβεσης του εδάφους αλλά και λόγω της δυσκολίας συνδυασμού των συντελεστών απόσβεσης που μπορούν να υπολογιστούν από γεωτεχνικούς νόμους με παρατηρούμενους συντελεστές απόσβεσης.
- Οι μηχανισμοί που εμπλέκονται στη διάδοση της δόνησης σε πορώδες μέσο, είναι κατανοητοί και μπορούν να συμπεριληφθούν σε έναν αλγόριθμο FDTD, έτσι ώστε να προβλεφθεί ο πρόσθετος τύπος κύματος που συμβαίνει και συγκεκριμένα οι απώλειες που σχετίζονται με την ταχεία εξασθένησή του.
- Ενώ είναι δυνητικά εξαιρετικά ισχυρή, απαιτεί υψηλό επίπεδο μαθηματικών ικανοτήτων και για αυτό συχνά δεν προτιμάται από αρκετούς. Ωστόσο, έχει γίνει χρήση της για την πρόβλεψη της διάδοσης σιδηροδρομικών δονήσεων για πολλά χρόνια με επιτυχία και αποτελεσματικότητα.
- Βασίζεται στη ρεαλιστική προσέγγιση της εξίσωσης του σεισμικού κύματος χρησιμοποιώντας ένα κεντρικό σχήμα διαφορικής ολοκλήρωσης.
- Ο εδαφικός ημίχωρος συνήθως διακριτοποιείται είτε διδιάστατα (2D) ή τριδιάστατα (3D) με κατάλληλα στοιχεία που κλιμακώνονται σε μέγεθος στην περιοχή ενδιαφέροντος.
- Πλεονεκτεί στο ότι απαιτεί σχετικά χαμηλή υπολογιστική προσπάθεια, συνεπώς οι υπολογισμοί εκτελούνται σχετικά γρήγορα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η διακριτοποίηση ταχύτητας/τάσης είναι καλά δομημένη και έτσι είναι εύκολο να χωριστεί ο φόρτος εργασίας μεταξύ πολλών επεξεργαστών υπολογιστών. Επίσης, οι συνθήκες απορρόφησης των ορίων είναι βελτιωμένες αρκετά. Παράδειγμα αποτελούν τα τέλεια προσαρμοσμένα

στρώματα (Perfectly Matched Layers (PML)). Τα PML είναι μια σειρά από στρώσεις που έχουν πανομοιότυπες ιδιότητες υλικών και προσαρμόζουν κατάλληλα τόσο τον πραγματικό όσο και τον φανταστικό χώρο συντεταγμένων. Αυτό χρησιμεύει στην απόσβεση του πλάτους των κυμάτων με τρόπο ανεξάρτητο από τις τιμές των συχνοτήτων. Οι βελτιώσεις αυτές στις συνθήκες απορρόφησης των ορίων, σε σχέση με την εφαρμογή άλλων αριθμητικών μεθόδων, είναι πιο απλές και εύκολες κατά την εφαρμογή της μεθόδου FDTD και συνεπώς μπορούν να μειωθούν τα μεγέθη των τομέων των προσομοιωμάτων και οι υπολογισμοί των προσομοιωμάτων.

- Μειονεκτεί στο ότι είναι δύσκολο να προσομοιωθούν πολύπλοκες γεωμετρίες, ιδιαίτερα κοντά σε ελεύθερες επιφάνειες. Συνεπώς, είναι δύσκολο να προσομοιωθούν τα συστατικά μέρη της εσχάρας ή η σύζευξη μεταξύ τροχού/σιδηροτροχιάς και η διέγερση εξαιτίας του τρένου.

3.3.2. Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων

Η μέθοδος ή ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Analysis ή Method (FEA ή FEM)) πρωτοεμφανίστηκε στις αρχές τις δεκαετίας του 1940 και σημείωσε εντυπωσιακή άνοδο που οφείλεται κυρίως στην ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών και των συστημάτων CAD. Θεμελιώδης αρχή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι ότι οποιαδήποτε συνεχής ποσότητα μπορεί να προσεγγιστεί από ένα διακριτό προσομοίωμα που αποτελείται από τμηματικά συνεχείς συναρτήσεις που ορίζονται σε έναν αριθμό πεπερασμένων στοιχείων. Συνεπώς, η διακριτοποίηση μιας οποιασδήποτε περίπλοκης γεωμετρίας σε μικρά γεωμετρικά σχήματα που ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία αποτελεί το κύριο γνώρισμα της FEM (Τσιμπούκης, 1994). Σήμερα, όπου υπάρχουν αρκετά λογισμικά πεπερασμένων στοιχείων γενικής χρήσης για θέματα κατασκευών με ιδιαίτερα φιλικό περιβάλλον χρήστη, η FEM εμφανίζει ραγδαία χρήση και διαρκή εξέλιξη. Η σχεδόν καθολική προσαρμοστικότητα και ευελιξία της, την καθιστούν μια πολύ δημοφιλή επιλογή.

Αναφορικά με την πρόβλεψη των σιδηροδρομικών δονήσεων παρατηρούνται τα κάτωθι σχετικά με τη FEM:

- Δεν είναι πάντα το καλύτερο εργαλείο σε κάθε περίπτωση (Davis, 2010).
- Η προσομοίωση μπορεί να γίνει και σε δύο διαστάσεις, όπως μπορεί να γίνει συνήθως για άπειρες και ημιάπειρες γραμμικές πηγές δονητικής διέγερσης (Davis, 2010).
- Υπάρχει δυσκολία στην προσομοίωση της πηγής της διέγερσης αλλά με τη συνεχή βελτίωση των υπολογιστών, τα προσομοιώματα FEM γίνονται όλο και πιο προηγμένα, π.χ. η προσέγγιση πολλαπλών σωμάτων, είναι ικανή να προσομοιώνει μερικούς από τους δυναμικούς μηχανισμούς διέγερσης, καθώς τότε η σύζευξη του τρένου με τη σιδηροτροχιά προσομοιάζεται χρησιμοποιώντας ειδικούς μηχανισμούς επαφής (Connolly et al., 2013; Kouroussis & Verlinden, 2013).
- Χρησιμοποιείται εναλλακτικά της μεθόδου FDTD για τη προσομοίωση του εδάφους (Connolly et al., 2014a).
- Χρησιμοποιεί μια αδύναμη μορφή της εξίσωσης του σεισμικού κύματος (Connolly et al., 2014a).
- Πλεονεκτεί στο ότι μπορεί να προσομοιάσει πολύπλοκες γεωμετρίες, ιδιαίτερα με τις φιλικές γραφικές διεπαφές χρήστη (graphical user interfaces (GUI)) που εμφανίζουν τα εμπορικά λογισμικά (π.χ. ABAQUS, LSDYNA, ANSYS). Συνεπώς, τα συστατικά μέρη της σιδηροδρομικής εσχάρας και οι μεταξύ τους συνδέσεις μπορούν να προσομοιωθούν με σαφήνεια (Connolly et al., 2014a).
- Επιτρέπει μια καλή διερεύνηση των ατελειών της σιδηροτροχιάς (π.χ. ανωμαλίες σιδηροτροχιών) και των αλλαγών στη δυσκαμψία της εσχάρας (π.χ., την μετάβαση από εύκαμπτο σιδηρόδρομο με έρμα σε δύσκαμπτο σιδηρόδρομο με πλάκα) για προσομοιώσεις στο πεδίο του χρόνου (Connolly et al., 2014a).
- Δεν είναι υπολογιστικά τόσο αποτελεσματική, όσο η μέθοδος FDTD. Όμοια με αυτήν, απαιτούνται ειδικές οριακές συνθήκες (absorbing boundary conditions - ABC)) για να αποτραπούν οι ανακλάσεις στα όρια του εδαφικού χωρίου. Είναι σημαντικό τα όρια του προσομοιώματος να αντιπροσωπεύουν σωστά την άπειρη διάδοση του κύματος πέρα από τα όριά του (Connolly et al., 2014a; Davis, 2010).

- Μειονεκτεί στην 3D προσομοίωση στο πεδίο του χρόνου, διότι καθώς αυξάνεται το μέγεθος του προσομοιώματος, το υπολογιστικό κόστος για τον υπολογισμό της λύσης σε κάθε χρονική στιγμή αυξάνεται κατακόρυφα. Οι υπολογιστικοί χρόνοι μπορεί να είναι διάρκειας ωρών ή ημερών. Συνεπώς, οι μεγάλοι εδαφικοί ημίχωροι μπορεί να είναι αδύνατον να επιλυθούν και για αυτόν τον λόγο, χρησιμοποιείται η ανάλυση στο πεδίο των συχνοτήτων και όχι στο πεδίο του χρόνου (Connolly et al., 2014a).
- Μειονεκτεί στην προσομοίωση στο πεδίο των συχνοτήτων διότι η πλειοψηφία των απορροφητικών οριακών συνθηκών στο πεδίο του χρόνου, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο πεδίο των συχνοτήτων. Συνεπώς, γίνεται δύσκολο να αποφευχθούν οι επιδράσεις στα όρια του προσομοιώματος (Connolly et al., 2014a).

3.3.3 Μέθοδος Συνοριακών Στοιχείων

Η Μέθοδος Συνοριακών Στοιχείων (Boundary Element Method (BEM)), όπως και η FEM και η FDM, είναι ουσιαστικά μέθοδος επίλυσης μερικών διαφορικών εξισώσεων και περιορίζεται σε καταστάσεις όπου το φυσικό πρόβλημα μπορεί να εκφραστεί με μερικές διαφορικές εξισώσεις. Μερικές αξιοσημείωτες παρατηρήσεις για τη μέθοδο αυτή είναι (Davis, 2010):

- Η BEM απαιτεί την επαναδιατύπωση της μερικής διαφορικής εξίσωσης διακριτοποιώντας μια εξίσωση ολοκληρωμάτων στο όριο του χωρίου και δεν είναι τόσο διαδεδομένη όσο οι FEM και FDM, καθώς μόνο ορισμένες τάξεις μερικών διαφορικών εξισώσεων μπορούν να αναδιαμορφωθούν.
- Οι δημοσιευμένες εργασίες στη βιβλιογραφία σχετικά με τη χρήση της BEM για την πρόβλεψη των εδαφικών δονήσεων είναι λιγότερες σε σύγκριση με αυτές σχετικά με τη χρήση της FEM η οποία εμφανίζει μεγάλη δημοτικότητα. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο ότι με την BEM ασχολήθηκαν και ασχολούνται λιγότεροι άνθρωποι συγκριτικά με τη FEM και συνεπώς η εξέλιξή της μειώνεται αισθητά. Επίσης, στο παρελθόν υπήρξε μια γενική παρανόηση ότι επειδή πρέπει να υπάρχει μια θεμελιώδης λύση του προβλήματος για να λειτουργήσει η BEM, η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε γραμμικά προβλήματα με ομοιογενές υλικό.

Εντούτοις, τα μη γραμμικά προβλήματα μπορούν σχεδόν εξίσου εύκολα να επιλυθούν με την BEM, με την επαναλαμβανόμενη λύση των γραμμικών προβλημάτων και με τη χρήση ειδικών μεθόδων για την επίλυση προβλημάτων που αφορούν τις ετερογενείς ιδιότητες των υλικών.

- Η BEM απαιτεί μια λύση της κυρίαρχης διαφορικής εξίσωσης, δεδομένου ότι οι ζητούμενες συναρτήσεις πρέπει να ικανοποιούν ακριβώς την κυρίαρχη διαφορική εξίσωση. Αυτή η λύση πρέπει να είναι όσο το δυνατόν απλούστερη, διότι αυτό είναι κρίσιμο για την αποτελεσματικότητα. Δυστυχώς, οι απλούστερες λύσεις που μπορούν να βρεθούν (θεμελιώδεις λύσεις) οφείλονται σε συγκεντρωμένα φορτία ή πηγές και είναι μοναδικές, δηλαδή έχουν άπειρες τιμές σε ορισμένα σημεία.

3.3.4. Μέθοδος Φασματικών Στοιχείων και μέθοδος Betti–Rayleigh

Οι φασματικές μέθοδοι (Μέθοδος Φασματικών Στοιχείων (Spectral Elements Method (SEM)) και μέθοδος Betti–Rayleigh (BR)) έχουν αναδειχθεί ως μια αποτελεσματική εναλλακτική λύση για τα προβλήματα διάδοσης των ελαστικών κυμάτων, σε σύγκριση με πιο παραδοσιακές αριθμητικές τεχνικές. Η SEM αποτελεί μια από τις ισχυρότερες μεθόδους υπολογισμού της εδαφικής κίνησης που προκαλείται από φορτία που κινούνται με σταθερή ταχύτητα (Paolucci & Spinelli, 2005). Για τη μέθοδο αυτή παρατηρούνται τα κάτωθι (Paolucci & Spinelli, 2005):

- Επιτρέπει την ενασχόληση με πολύπλοκους εδαφικούς σχηματισμούς και πολύπλοκες κατασκευές. Οι αριθμητικές προσεγγίσεις που ανήκουν στην οικογένεια των φασματικών μεθόδων προέρχονται από την κλασική προσέγγιση Galerkin. Η ιδιαιτερότητα της SEM είναι ότι οι συναρτήσεις σχήματος λαμβάνονται στην τάξη των ορθογωνικών πολυωνύμων. Αυτό επιτρέπει μια σημαντική αύξηση της αριθμητικής ακρίβειας σε σχέση με τις πολυωνυμικές συναρτήσεις σχήματος χαμηλής τάξης που παραδοσιακά χρησιμοποιούνται στη FEM. Η ακρίβεια λοιπόν είναι σημαντικά υψηλότερη από τις κλασικές μεθόδους όπως τη FEM, την FDM ή τη BEM. Τεχνικές όμως, που βασίζονται στον αριθμητικό υπολογισμό των συναρτήσεων του

Green για οριζόντια στρωματοποιημένα εδαφικά προφίλ, όπως η TLM, παραμένουν πολύ πιο αποτελεσματικές.

- Οι φασματικές μέθοδοι για τη διάδοση των ελαστικών κυμάτων αρχικά εξελίχθηκαν με την εισαγωγή των πολυωνύμων Chebyshev και ακολούθως με τα πολυώνυμα Lagrange συζευγμένα με τους τύπους τετραγωνισμού Legendre-Gauss-Lobatto.
- Η προσέγγιση SEM επιτρέπει να ληφθούν υπόψη οι πλευρικές μεταβολές των εδαφικών ιδιοτήτων.
- Εφαρμόζεται σε τρεις διαστάσεις. Στην πρόβλεψη της κίνησης της σιδηροτροχιάς, τόσο με προσομοιώματα SEM 2D όσο και 3D, υπάρχει καλή συμφωνία με πειραματικές επιτόπου μετρήσεις, τουλάχιστον στην περιοχή χαμηλών συχνοτήτων, όπου η δυναμική αλληλεπίδραση τρένου - εσχάρας μπορεί να αγνοηθεί.
- Η εξασθένιση της εδαφικής κίνησης με την απόσταση προβλέπεται σωστά από τα 3D αριθμητικά προσομοιώματα, ενώ η 2D προσέγγιση αποδεικνύεται ικανοποιητική μόνο δίπλα στην τροχιά και για υψηλές ταχύτητες τρένου.
- Για συχνότητες μέχρι περίπου 10 Hz, επιτρέπει την εκτέλεση 3D αριθμητικών υπολογισμών σε εύλογο χρονικό διάστημα (μερικές ώρες σε έναν υπολογιστή) το οποίο είναι ικανοποιητικό, καθώς η περιοχή συχνοτήτων μέχρι 10 Hz περιέχει τις περισσότερες πληροφορίες σχετικά με πιθανές βλαβερές επιδράσεις των δονήσεων στα κτήρια και στους ανθρώπους.

Επίσης, αριθμητικά αποτελέσματα της 2D προσομοίωσης SEM σε σύγκριση με καταγεγραμμένα αποτελέσματα επί τόπου μετρήσεων έδειξαν τα εξής (Paolucci et al., 2003):

- Η προσομοίωση της κίνησης της εσχάρας τείνει να υποβαθμιστεί με την αύξηση της ταχύτητας του τρένου.
- Για αυξημένες αποστάσεις από την εσχάρα, η 2D προσομοίωση γίνεται μη ικανοποιητική σε μεγάλο βαθμό.
- Η συμφωνία αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με καταγεγραμμένες μετρήσεις σε σημεία εκτός σιδηροτροχιάς, τείνει να βελτιωθεί με την

αύξηση της ταχύτητας του τρένου. Αυτό παύει να ισχύει σταδιακά καθώς μεγαλώνει η απόσταση από την σιδηροτροχιά.

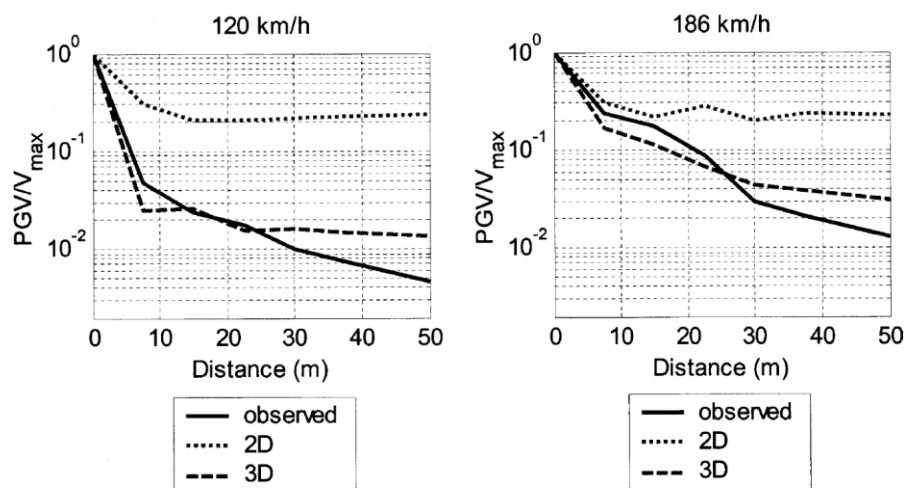
Αντίστοιχα ικανοποιητική είναι και η σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων 3D προσομοίωσης SEM για τις χρονοϊστορίες ταχύτητας και για τα αντίστοιχα φάσματα Fourier σε σχέση με αυτά καταγεγραμμένων μετρήσεων. Η συμφωνία των αριθμητικών αποτελεσμάτων βελτιώνεται με την αύξηση της ταχύτητας του τρένου (Paolucci et al., 2003).

Τα πλεονεκτήματα της SEM αφορούν τα παρακάτω (Paolucci et al., 2003):

- Γενικά, οι προσεγγίσεις στο πεδίο του χρόνου μπορούν να εφαρμοστούν ευκολότερα από αυτές στο πεδίο συχνοτήτων σε πλευρικά ετερογενή μέσα. Ωστόσο, τα όρια σταθερότητας στο χρονικό βήμα αποθαρρύνουν τους υπολογισμούς για συχνότητες υψηλότερες από περίπου 2-3 Hz, ειδικά για 3D υπολογισμούς. Η SEM επιτρέπει τη σημαντική διεύρυνση αυτού του εύρους συχνοτήτων, καθώς ο αριθμός των σημείων του πλέγματος διακριτοποίησης που απαιτούνται για την ορθή επίλυση του ελάχιστου μήκους κύματος, είναι σημαντικά χαμηλότερος από αυτόν που απαιτούνται από τις συνήθεις παραδοσιακές τεχνικές, όπως η FEM, η FDM ή η BEM.
- Η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον υπολογισμό των σιδηροδρομικών δονήσεων και για εδαφικούς σχηματισμούς όπου εμφανίζονται ισχυρές πλευρικές ετερογένειες, π.χ., στην περίπτωση σήραγγας ή στην ανάλυση μέτρων περιορισμού δονήσεων.
- Η ακρίβεια της φασματικής προσέγγισης, τουλάχιστον για ομοιογενή υλικά, προσεγγίζει, το όριο της χωρικής διακριτοποίησης κατά Nyquist των $G=2$ σημείων πλέγματος ανά ελάχιστο μήκος κύματος. Ακριβή αποτελέσματα μπορούν να ληφθούν με $G=2.5$, έναντι των ενδεικτικών τιμών των $G=5$ και $G=10$ για τις μεθόδους FEM και FDM, αντίστοιχα. Το γεγονός αυτό για τους 3D υπολογισμούς, οδηγεί σε τεράστια εξοικονόμηση αριθμού των σημείων πλέγματος και συνεπώς σε λιγότερες απαιτήσεις μνήμης.

Αξιοσημείωτα στοιχεία της διαδικασίας της αριθμητικής προσομοίωσης με τη μέθοδο SEM είναι τα εξής (Paolucci et al., 2003):

- Η απόξευση του τρένου από το σύστημα εσχάρας - εδάφους. Το τρένο αποσυνδέεται από το σύστημα εσχάρας - εδάφους για να ξεπεραστούν προβλήματα, όπως η πολυπλοκότητα της δυναμικής αλληλεπίδρασης μεταξύ τρένου - εσχάρας - εδάφους, η υψηλή συχνότητα της εδαφικής κίνησης και η ανεπάρκεια αξιόπιστων πειραματικών δεδομένων για τη βαθμονόμηση των αριθμητικών εργαλείων. Με την αναπαράσταση του τρένου από μια σειρά δυνάμεων που κινούνται με σταθερή ταχύτητα στη σιδηροτροχιά, παρέχεται το πλεονέκτημα της απλότητας και της διαθεσιμότητας των αναλυτικών λύσεων, όμως δεν εξετάζεται η δυναμική αλληλεπίδραση μεταξύ τρένου και εσχάρας.
- Για τη δυναμική απόκριση της εσχάρας και της θεμελίωσής της, το σύστημα εσχάρας – θεμελίωσης εσχάρας προσομοιάζεται ως δοκός σε ελαστική θεμελίωση (εξηγείται αναλυτικά παρακάτω) και υπολογίζονται οι κατακόρυφες παραμορφώσεις της.
- Η διάδοση του κύματος στο έδαφος αναπαρίσταται χρησιμοποιώντας μια φασματική μέθοδο. Οι αριθμητικές αναλύσεις μπορούν να εκτελεστούν με τον αριθμητικό κώδικα ELSE (Elastodynamics by Spectral Elements).



Εικόνα 3.3: Σύγκριση της παρατηρούμενης εξασθένησης της μέγιστης κατακόρυφης ταχύτητας εδάφους με την απόσταση με τα αποτελέσματα αριθμητικών προσομοιώσεων με προσομοιώματα SEM 2D και 3D (Paolucci et al., 2003).

Η ακρίβεια της SEM δοκιμάστηκε με επιτυχία στην πρόβλεψη των εδαφικών δονήσεων σε σχέση με αρχεία καταγεγραμμένων μετρήσεων δονήσεων που προκλήθηκαν από το HST X-2000 στο Ledsgaard της Σουηδίας (Paolucci et al.,

2003). Στα διαγράμματα της Εικόνας 3.3 φαίνεται μια σύγκριση της παρατηρούμενης εξασθένησης της μέγιστης κατακόρυφης ταχύτητας εδάφους με την απόσταση σε σχέση με τα αποτελέσματα των αριθμητικών προσομοιώσεων με προσομοιώματα 2D και 3D.

Η δυναμική αμοιβαία θεωρία Betti-Rayleigh (BR) έχει χρησιμοποιηθεί από τη δεκαετία του 1960 στην παραγωγή αναλυτικών λύσεων κλειστής μορφής για τον υπολογισμό των μετατοπίσεων ενός ελαστικού ημιχώρου που υπόκειται σε κινούμενα σημεία. Το θεώρημα BR γενικά ισχύει για ένα ιξωδοελαστικό μη ομογενές υλικό και μπορεί να γενικευτεί σε άπειρες ή ημιάπειρες περιοχές. Το υπολογιστικό πρόβλημα απλουστεύεται στον υπολογισμό της συνάρτησης του Green για ένα κατακόρυφο σημειακό φορτίο επιφανείας. Για ένα γενικό σχηματισμό που περιλαμβάνει ένα στρωσιγενή ημιχώρο με οριζόντια και κάθετη ετερογένεια, η συνάρτηση του Green θα πρέπει να υπολογιστεί αριθμητικά, π.χ., με μεθόδους πεπερασμένων ή συνοριακών στοιχείων. Αυτό μπορεί γενικά να σημαίνει ένα μεγάλο υπολογιστικό κόστος, ειδικά όταν το εξεταζόμενο φάσμα συχνοτήτων εκτείνεται από 50 έως 70 Hz (Paolucci & Spinelli, 2005).

Αναφορικά με τη μέθοδο Betti-Rayleigh (BR) παρατηρούνται τα παρακάτω:

- Αποτελεί και αυτή μια από τις ισχυρότερες μεθόδους υπολογισμού της εδαφικής κίνησης που προκαλείται από κινητά φορτία σταθερής ταχύτητας. Το δυναμικό αμοιβαίο θεώρημα Betti-Rayleigh (BR) επιτρέπει σε κάποιον να εκμεταλλευτεί πλήρως τη διαθεσιμότητα των συναρτήσεων του Green για έναν ομογενή ή οριζόντια στρωματοποιημένο ημιχώρο (Paolucci & Spinelli, 2005).
- Χρησιμεύει στην εφαρμογή των κινούμενων φορτίων επάνω στην δοκό προσομοίωσης. Όταν για τη διακριτοποίηση του εδάφους χρησιμοποιούνται παραδοσιακές αριθμητικές μέθοδοι, όπως η FE, είναι πιο φυσικό να εφαρμόζονται κομβικές δυνάμεις με κατάλληλη χρονική μετατόπιση ανάλογα με την ταχύτητα του τρένου (Paolucci et al., 2003).
- Εφαρμόζεται σε τρεις διαστάσεις και τα αποτελέσματα των 3D αριθμητικών προσομοιώσεων με τη μέθοδο αυτή βρέθηκαν να ικανοποιούν αρκετά τις καταγεγραμμένες μετρήσεις μέχρι περίπου 30-40 Hz. Η επίδραση της δυναμικής αλληλεπίδρασης μεταξύ σιδηροτροχιάς και

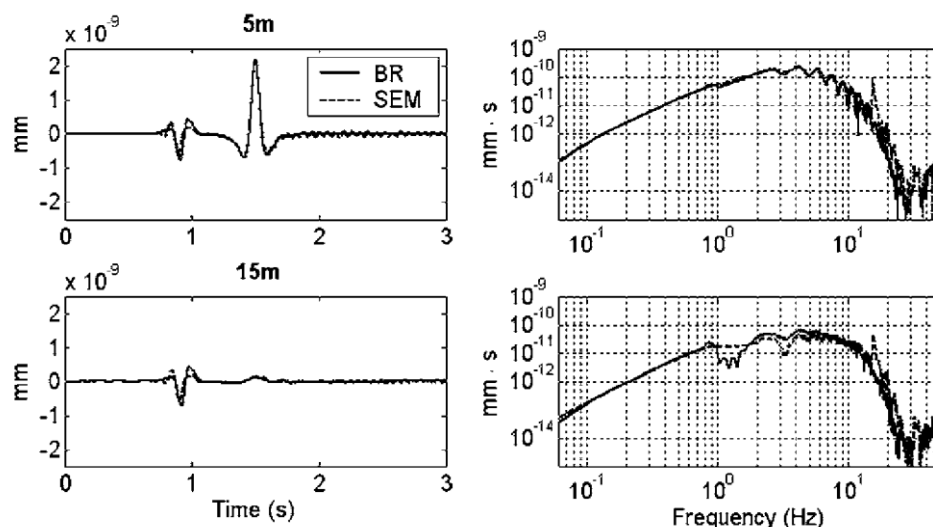
οχημάτων για μεγαλύτερες τιμές συχνοτήτων, γίνεται σημαντική (Paolucci & Spinelli, 2005).

- Κατά την εφαρμογή της μεθόδου BR, συνήθως γίνονται αρκετές απλουστευτικές παραδοχές που αφορούν την απόζευξη του τρένου από το σύστημα εσχάρας – θεμελίωσης εσχάρας, τη δυναμική απόκριση της εσχάρας και της θεμελίωσής της και τις εδαφικές ιδιότητες (Paolucci & Spinelli, 2005).

Κατά τη χρήση της μεθόδου BR για την προσομοίωση δονήσεων που καταγράφηκαν στη θέση Ath, στο Βέλγιο, κατά τη διέλευση του τρένου Thalys HST διερευνήθηκαν τα εξής αξιοσημείωτα θέματα (Paolucci & Spinelli, 2005):

- Η επέκταση της εσχάρας, η οποία μπορεί να επιδράσει σημαντικά στα αποτελέσματα των αριθμητικών προσομοιώσεων, ειδικά για χαμηλές τιμές απόσβεσης του εδάφους και για αποστάσεις από την σιδηροτροχιά μεγαλύτερες από το μήκος κύματος Rayleigh που αντιστοιχεί στη μέγιστη συχνότητα της διέγερσης.
- Η μείωση του πλάτους της εδαφικής κίνησης με την απόσταση, η οποία είναι πολύ πιο γρήγορη σε σχέση με αυτή ενός σταθερού φορτίου, για ταχύτητες κινητού φορτίου χαμηλότερες από την ταχύτητα κύματος Rayleigh στο έδαφος.

Τα αποτελέσματα των προσεγγίσεων BR και SEM για την ανωτέρω περίπτωση του τρένου Thalys στο Βέλγιο απεικονίζονται στην Εικόνα 3.4 σε χρονοϊστορίες μετατοπίσεων και σε φάσματα Fourier, για αποστάσεις από τη γραμμή φορτίσεως 5 και 15 m.



Εικόνα 3.4: Σύγκριση των αποτελεσμάτων της μεθόδου SEM και BR σε απόσταση 5 και 15m από τη γραμμή της φόρτισης. Αριστερά: Χρονοϊστορίες μετακινήσεων. Δεξιά: Φάσματα Fourier (Paolucci & Spinelli, 2005).

Συμπερασματικά παρατηρούνται τα εξής (Paolucci & Spinelli, 2005):

- Τα αποτελέσματα των μεθόδων συμφωνούν πάρα πολύ στην απόσταση των 5m μέχρι περίπου τα 15Hz, όπου τα αποτελέσματα της SEM επηρεάζονται από ανεπαρκή χωρική δειγματοληψία. Καθώς αυξάνεται η απόσταση, η συμφωνία των αποτελεσμάτων σταδιακά ακυρώνεται, κυρίως λόγω της αυξανόμενης επίδρασης της διαφορετικής συχνοτικής εξάρτησης από την απόσβεση.
- Για συχνότητες μέχρι τα 30 ή και 40 Hz έχει βρεθεί μια λογική συμφωνία των αποτελεσμάτων προσομοίωσης με αρχεία μετρήσεων. Σε υψηλότερες συχνότητες, αυτό παύει να ισχύει εξαιτίας του ότι η εδαφική απόκριση επηρεάζεται από τη δυναμική αλληλεπίδραση μεταξύ τρένου και εσχάρας.

3.3.5. Υβριδικές μέθοδοι –Υβριδικά προσομοιώματα

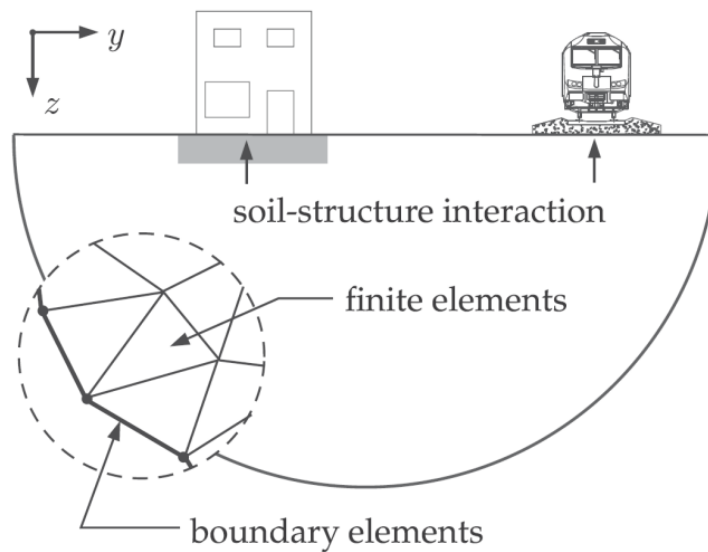
Σε ορισμένες περιπτώσεις, για λόγους δυσκολιών, περιορισμών, υπεροχής και αποδοτικότητας στη χρήση μεμονωμένων μεθόδων, γίνεται πρώτα προσομοίωση της πηγής που δημιουργεί την διέγερση και την εισάγει στο έδαφος διάδοσης, χρησιμοποιώντας την FEM ή την FDM και στη συνέχεια χρησιμοποιείται η BEM για τον υπολογισμό της διάδοσης της δόνησης από την πηγή στον αποδέκτη. Στη συνέχεια, τα επίπεδα των δονήσεων στον αποδέκτη, π.χ. ένα κτίριο, μπορούν να υπολογιστούν με αναλυτική, ημιαναλυτική, εμπειρική ή αριθμητική μέθοδο (Davis, 2010).

Τα αριθμητικά προσομοιώματα με συνδυασμό των μεθόδων FEM και BEM (συζευγμένη μέθοδος FE-BE) έχουν υψηλό επίπεδο ακρίβειας, το οποίο βασίζεται μόνο στην ακρίβεια των παραμέτρων εισαγωγής και στην υπολογιστική ισχύ. Συνιστώνται κυρίως όταν οι ιδιότητες των υλικών και οι γεωλογικές συνθήκες είναι πολύ περίπλοκες για τις αλγεβρικές προβλέψεις και δεν είναι διαθέσιμη η σύγκριση με δεδομένα μετρήσεων. Η FEM αναλύει ικανοποιητικά την διάδοση των κυμάτων σε μέσα με τοπικές ανομοιογένειες και σε υλικά με πολύπλοκη συμπεριφορά, ενώ η BEM μπορεί να εφαρμοστεί για την ανάλυση μεγάλων

ανοιχτών περιοχών. Έτσι, ολόκληρο το σύστημα «πηγή - έδαφος διάδοσης - αποδέκτης», μπορεί να προσομοιωθεί αποτελεσματικά.

Για τη σύζευξη της FEM με την BEM (FEM/BEM), η οποία φαίνεται εποπτικά στην Εικόνα 3.5, παρατηρούνται τα κάτωθι (Connolly et al., 2014a):

- Επιτρέπει την αποτροπή των κυματικών επιδράσεων στα όρια του προσομοιώματος, η οποία σχετίζεται με το ότι οι απορροφητικές οριακές συνθήκες στο πεδίο του χρόνου δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο πεδίο των συχνοτήτων.
- Επιτρέπει την προσομοίωση μεγάλων εδαφικών χωρίων.
- Η FEM χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της σύνθετης διάταξης της εσχάρας και των συστατικών της μέρων (δονήσεις κοντινού πεδίου), ενώ η BEM για την προσομοίωση του εδάφους στο μακρινό πεδίο (δονήσεις μακρινού πεδίου).
- Πάρα του ότι μπορεί να εφαρμοστεί στο πεδίο του χρόνου, έχει χρησιμοποιηθεί συχνότερα στο πεδίο των συχνοτήτων λόγω των μειωμένων χρόνων εκτέλεσης. Όταν οι εξισώσεις BEM διαμορφώνονται στο πεδίο των συχνοτήτων, η απόσβεση αναπαρίσταται με εύκολο τρόπο, ενώ όταν διαμορφώνονται στο πεδίο του χρόνου, η προσομοίωση δυσκολεύει.
- Μειονεκτεί στο γεγονός ότι μπορεί να προκύψει απαγορευτική απαιτούμενη υπολογιστική ισχύς, εξαιτίας του σχηματισμού των πολλών πινάκων (μητρώων) που σχετίζονται με τη BEM,
- Μειονεκτεί στο γεγονός ότι οι δονήσεις μιας κατασκευής σε περιοχές εντός της περιοχής της μεθόδου BEM, είναι δύσκολο να προσδιοριστούν λόγω της δυσκολίας σύζευξης της κατασκευής με την επιφάνεια ενός χωρίου BEM. Η εκτίμηση των δονήσεων των κατασκευών στο πλαίσιο αναπτυξιακών έργων, συνήθως έχει μεγαλύτερη σημασία από ότι αυτή εντός του προσομοιώματος της μεθόδου BEM. Συνεπώς, αν και η μέθοδος αυτή είναι πρωτοπόρα στην πρόβλεψη των δονητικών επιπέδων εντός του προσομοιώματος της μεθόδου BEM, δεν έχει εφαρμογή σε πολύ μεγάλους εδαφικούς τομείς, προκειμένου να εκτιμηθούν οι δονήσεις των κατασκευών. Συνεπώς, το έδαφος και το κτίριο συνήθως προσομοιάζονται ως δύο μη συζευγμένα συστήματα.



Εικόνα 3.5: Η συζευγμένη μέθοδος BEM/FEM (Connolly et al., 2014a).

Η σύγκριση των 2D με τα 3D προσομοιώματα BEM/FEM για τις σιδηροδρομικές δονήσεις, έχει δείξει τα εξής (Avillez et al., 2012):

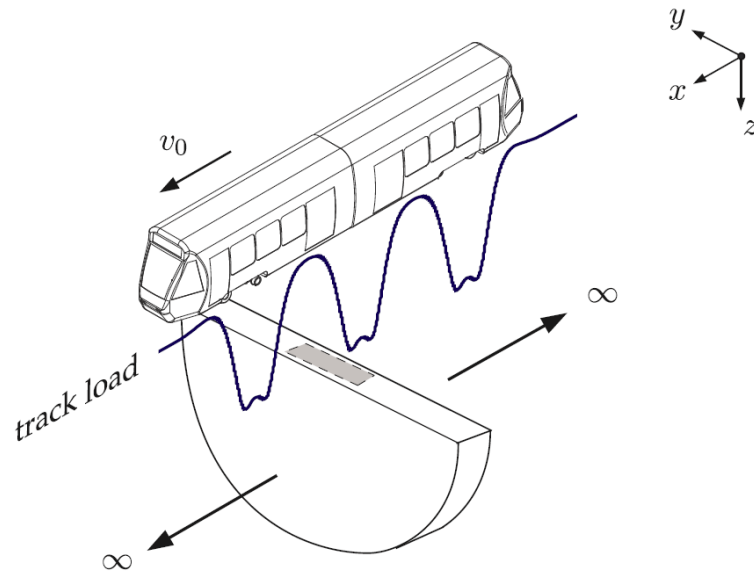
- Τα 2D προσομοιώματα δεν μπορούν να συμπεριλάβουν στους υπολογισμούς τη διάδοση των κυμάτων στην κατεύθυνση κίνησης του τρένου, ενώ τα 3D προσομοιώματα απαιτούν περισσότερη υπολογιστική ισχύ και περισσότερο όγκο υπολογισμών. Έχει αναφερθεί περίπτωση (Andersen & Jones, 2006), όπου το 3D προσομοίωμα απαίτησε 2000 φορές μεγαλύτερο χρόνο εκτέλεσης από αυτόν του 2D.
- Τα 2D προσομοιώματα είναι ικανά να δώσουν μόνο ποιοτικά αποτελέσματα, αποτελώντας έτσι ένα γρήγορο εργαλείο για την εκτίμηση των μέτρων μόνωσης των κατασκευών, ενώ τα 3D προσομοιώματα έχουν τη δυνατότητα να προβλέψουν απόλυτα επίπεδα εδαφικών δονήσεων.

Για την αντιμετώπιση του θέματος των μεγάλων απαιτήσεων υπολογιστικής ισχύος της 3D προσομοίωσης, έχει προταθεί μια αριθμητική λύση βασισμένη στο λεγόμενο 2.5D (σχεδόν διδιάστατο) (Aubry et al., 1994; Papageorgiou & Pei, 1998; Connolly et al., 2014a). Η Εικόνα 3.6 απεικονίζει αυτή την προσέγγιση. Τα παρακάτω σχόλια αφορούν τη μέθοδο 2.5D και τα προσομοιώματα 2.5D BEM/FEM:

- Η λύση υπολογίζεται στο πεδίο των συχνοτήτων - κυματαριθμών και έχει πολύ μειωμένο υπολογιστικό κόστος σε σύγκριση με τα 3D

προσομοιώματα, εκτός αν είναι μεγάλος ο αριθμός των κυματαριθμών. Για να γίνει αυτό, χρησιμοποιείται ένας μετασχηματισμός Fourier προς την κατεύθυνση κίνησης του τρένου. Για τον υπολογισμό της λύσης, γίνονται υπολογισμοί για ένα προσομοίωμα 2D για όλες τις επιθυμητές κυκλικές συχνότητες (ω) και τους κυματαριθμούς (k_y), και στη συνέχεια η 3D λύση προκύπτει μέσω του αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier σε σχέση με τον κυματαριθμό. Η γεωμετρία του σιδηρόδρομου και του υποκείμενου εδάφους είναι 2D ή περιοδική και η σιδηροδρομική εσχάρα συνήθως θεωρείται αμετάβλητη κατά την κατεύθυνση κίνησης του τρένου. Συνεπώς, επιτρέπεται η προσέγγιση του προβλήματος με τη χρήση της 2D γεωμετρίας, ενώ λαμβάνονται υπόψη οι 3D συνθήκες φορτίσεως (Avillez et al., 2012; Connolly et al., 2014a)

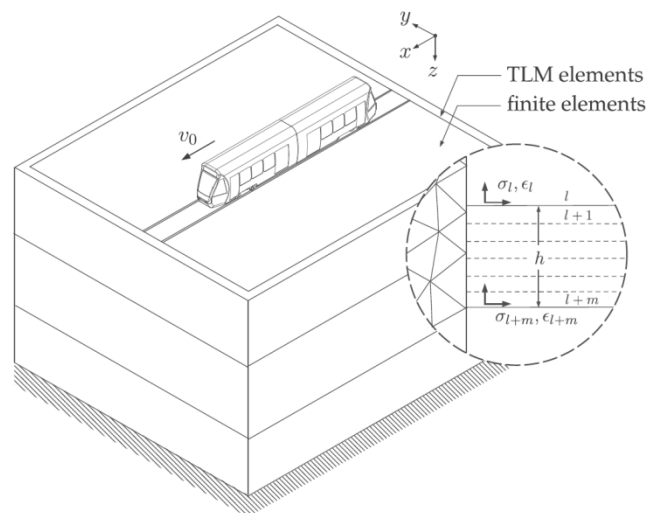
- Ένα κύριο μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι τα όρια των εδαφικών στρωμάτων πρέπει να είναι παράλληλα με την επιφάνεια του εδάφους κατά την κατεύθυνση του σιδηρόδρομου (Avillez et al., 2012).
- Τα 2.5D προσομοιώματα φαίνεται να είναι υπολογιστικά πιο αποδοτικά σε σχέση με τα συμβατικά 3D BEM/FEM προσομοιώματα, αφού η διακριτοποίηση γίνεται μόνο πάνω στο κάθετο - εγκάρσιο τμήμα του εδάφους και των κατασκευών (Avillez et al., 2012).
- Με τα προσομοιώματα αυτά είναι δυνατή η πρόβλεψη του πλήρους φάσματος των δονήσεων (Avillez et al., 2012).
- Παρόλο που η μέθοδος αυτή είναι αποτελεσματική για τον υπολογισμό της εδαφικής απόκρισης για αμετάβλητες γεωμετρίες εσχάρας (π.χ. δύσκαμπτος σιδηρόδρομος με πλακά σκυροδέματος), είναι κάπως δύσκολο να προσομοιωθεί η κατανομή των τάσεων των διακριτών στρωτήρων του συμβατικού εύκαμπτου σιδηρόδρομου με έρμα (Connolly et al., 2014a).



Εικόνα 3.6: Παράδειγμα μιας 2.5D προσέγγισης (Connolly et al., 2014a).

Τέλος, για την προσομοίωση με τη FEM στο πεδίο των συχνοτήτων, έχουν προταθεί λύσεις όπως (Connolly et al., 2014a):

- Η συζευγμένη μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων – λεπτών στρώσεων (Thin Layer) (FEM/TLM) όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.7.
- Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων κλιμακούμενου ορίου (Scaled Boundary Finite Element Method (SBFEM)).



Εικόνα 3.7: Η συζευγμένη μέθοδος FE/TLM (Connolly et al., 2014a).

Οι προσεγγίσεις FEM/TLM και SBFEM χρησιμοποιούν μια σειρά από οριζόντια λεπτά στρώματα για να αποτρέψουν τις αντανakλάσεις στα όρια του

εδαφικού χωρίου στην περίπτωση επιλύσεων στο πεδίο των συχνοτήτων. Αυτό επιτρέπει τον σχηματισμό των εξισώσεων των πεπερασμένων στοιχείων στο πεδίο του χρόνου, ώστε να μειωθεί το υπολογιστικό κόστος, ενώ παράλληλα διασφαλίζεται η απορρόφηση των κυμάτων στα όρια του εδαφικού χωρίου (Connolly et al., 2014a).

3.4. Ειδικά θέματα προσομοίωσης τρένου, σιδηρόδρομου και εδάφους

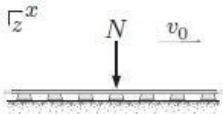
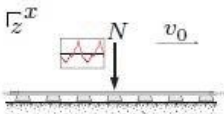
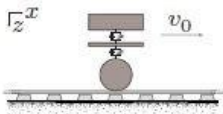


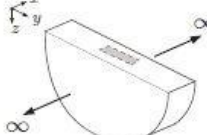
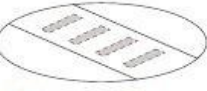
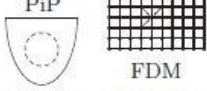
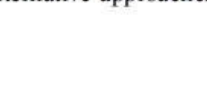
Μια επισκόπηση κάποιων σχετικά πρόσφατων προσομοιωμάτων πρόβλεψης που έχουν αναπτυχθεί στη βιβλιογραφία από διάφορους ερευνητές φαίνεται στην Εικόνα 3.8. Αυτά έχουν ταξινομηθεί ανάλογα με τον τρόπο προσομοίωσης του τρένου και του εδάφους.

Η επιλογή του προσομοιώματος του τρένου συνήθως επιβάλλει και την αντίστοιχη επιλογή για το έδαφος, καθώς είναι δύσκολο να συνδυαστούν δύο θεμελιωδώς διαφορετικές προσομοιώσεις. Για παράδειγμα, η BEM είναι ενώ είναι πολύ αποτελεσματική όταν το πρόβλημα διαμορφώνεται στο πεδίο των συχνοτήτων, καθίσταται ακατάλληλη όταν υπάρχουν πολύπλοκες γεωμετρίες και όταν το πεδίο των συχνοτήτων περιορίζεται από γραμμικά προβλήματα (Kouroussis et al., 2014).

Τύπος προσομοιώματος	Έννοια
Απλη δοκός (τυπικά Euler - Bernoulli) σε θεμελίωση Winkler	Αναλυτικό - 2D
Απλη δοκός (Timoshenko)	Αναλυτικό - 2D
Προσομοιώματα 2 στρώσεων	Αναλυτικό - 2D
Προσομοιώματα 3 στρώσεων - Προσομοιώματα διακριτής στήριξης	Αναλυτικό - 2D
Προσομοιώματα ελαστικού ημιχώρου	Αναλυτικό - 2D
Κινητό σημειακό φορτίο	Αναλυτικό - 2D
Διέγερση πολλαπλού σώματος	Αναλυτικό - 2D
Προσομοιώματα 2 στρώσεων	FEM - 2D
Προσομοιώματα 3 στρώσεων	FEM - 2D
Προσομοιώματα 3 στρώσεων	FEM - 3D

Πίνακας 3.1: Επισκόπηση υφιστάμενων προσεγγίσεων για την προσομοίωση της εσχάρας (Connolly et al., 2014a).

Η προσομοίωση της εσχάρας μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας αναλυτικά ή αριθμητικά προσομοιώματα και μπορεί να υπολογιστεί είτε στο πεδίο του χρόνου είτε στο πεδίο των συχνοτήτων, ενώ το τρένο μπορεί να προσομοιωθεί ως κινούμενο ή σταθερό φορτίο ανάλογα με τον εκάστοτε επιδιωκόμενο σκοπό. Ο Πίνακας 3.1 δίνει μια επισκόπηση υφιστάμενων προσεγγίσεων για την προσομοίωση της εσχάρας.

	Constant axle load	Random axle load	Detailed model
Vehicle modelling →			
Soil modelling ↓	Krylov Kaynia et al. Sheng et al. Degrande and Lombaert Karlström Takemiya and Bian Maldonado et al.	Lu et al. Sheng et al. Lombaert et al.	Datoussaïd et al. Sheng et al. Lai et al. Auersch Xia et al. Lombaert et al.
Analytical solution 	Paolucci et al. Wang et al. Fujii et al. Yang et al. Vogiatzis Çelebi and Kirtel	Yang et al. Pakbaz et al.	
2D FEM 	Hall Powrie et al. Anastasopoulos et al. Stupazzini and Paolucci		Gardien and Stuit Ju Zhai et al. Banimahd et al. Wang et al. Kouroussis et al. Connolly et al. El Kacimi et al. Galvín et al. Costa et al.
3D FEM 	Sheng et al. Yang et al. François et al. Costa et al. Gao et al.		
2.5D BEM and/or FEM 	O'Brien and Rizos Andersen and Jones Auersch Chebli et al. Galvín and Domínguez		Galvín et al. Romero et al.
3D BEM (surface) 	Thornely-Taylor Hussein and Hunt Jones and Hunt		
Alternative approaches 			

Εικόνα 3.8: Ταξινόμηση προσομοιωμάτων σιδηροδρομικών δονήσεων (Kouroussis et al., 2014).

Οι συνθήκες στήριξης της εσχάρας έχουν σημαντική επίδραση στη δυσκαμψία της εσχάρας και έχει βρεθεί ότι επηρεάζουν τη δονητική της απόκριση. Η θεώρηση άκαμπτης θεμελίωσης της εσχάρας είναι κατάλληλη για περιπτώσεις που το υλικό στήριξής της έχει συγκρίσιμη δυσκαμψία με αυτή. Πάρα ταύτα όταν το υλικό στήριξης είναι μαλακό, εμφανίζονται αποκλίσεις με αυτή τη θεώρηση (Connolly et al., 2014a). Τα προσομοιώματα ελαστικού ημιχώρου έχουν αποδειχθεί ότι προσφέρουν μεγαλύτερη ακρίβεια, λόγω της βελτιωμένης σύζευξης μεταξύ της εσχάρας και της θεμελίωσής της (υπόστρωμα και στρώση διαμόρφωσης). Επίσης, τα προσομοιώματα αυτά εξηγούν γιατί σχεδόν όλα τα προσομοιώματα πρόβλεψης συνδυάζουν υπο-προσομοιώματα εσχάρας και εδάφους σε ένα ενιαίο σύστημα (Kouroussis et al., 2014).

Στην προσομοίωση του έρματος έχει συχνή εφαρμογή η μέθοδος των διακριτών στοιχείων (Discrete Element Method (DEM)), η οποία έχει αποδειχτεί μια πολύ καλή προσέγγιση καθώς (Connolly et al., 2014a):

- Η κατανόηση της συμπεριφοράς του έρματος είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη διερεύνηση και τη βελτίωση της συντήρησης του έρματος.
- Τα σωματίδια του έρματος είναι σχετικά μεγάλα (διαμετρήματος περίπου 40 mm) και επομένως δεν μπορούν να προσομοιωθούν ρεαλιστικά ως συνεχές υλικό.

Η DEM επιτρέπει την προσομοίωση ενός μεγάλου σώματος που αποτελείται από τα μεμονωμένα σωματίδια του έρματος αλλά μειονεκτεί στο ότι οι σύνθετες γεωμετρίες και η μη γραμμική φύση των μεμονωμένων σωματιδίων του έρματος οδηγούν σε μεγάλο υπολογιστικό κόστος (Connolly et al., 2014a).

3.4.1. Προσομοιώματα τρένου ως κινητού φορτίου σταθερού μέτρου

Τα προσομοιώματα κινητού φορτίου σταθερού μέτρου επικεντρώνονται στη σχεδόν στατική διέγερση, όπου η ταχύτητα του τρένου είναι αρκετά χαμηλότερη από την κρίσιμη ταχύτητα της εσχάρας και του εδάφους. Όπως προαναφέρθηκε, η ακολουθία κινητών αξονικών φορτίων είναι ένας αρκετά απλός τρόπος

προσομοίωσης του τρένου και της επίδρασής του στην εσχάρα του σιδηρόδρομου, ώστε να εξαχθούν πληροφορίες για τη δημιουργία των εδαφικών δονήσεων (Kouroussis et al., 2014). Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να φανούν ξεκάθαρα οι παραμορφώσεις της εσχάρας και οι επιδράσεις που σχετίζονται με τις κρίσιμες ταχύτητες. Δεδομένου ότι η σιδηροτροχιά στηρίζεται διακριτά επάνω στους στρωτήρες, οι δυνάμεις που επενεργούν στον στρωτήρα μπορούν να θεωρηθούν ως μια ακολουθία δυνάμεων που δρουν με καθυστέρηση και μετατοπίζονται τακτικά στο επιφανειακό επίπεδο. Τα καμπτικά κύματα διαδίδονται στο σύστημα εσχάρας / εδάφους και τα εδαφικά κύματα χώρου και επιφάνειας που παράγονται σε όλα τα σημεία διέγερσης, φθάνουν στον αποδέκτη σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Για τις παραμορφώσεις της εσχάρας του σιδηρόδρομου λόγω του κινούμενου βάρους ενός οχήματος σε απλουστευμένους όρους, αρκεί ένα απλό προσομοίωμα σιδηροτροχιάς και θεμελίωσης. Το προσομοίωμα μιας εσχάρας που εδράζεται σε απλό ελαστικό υπόβαθρο είναι ικανοποιητικό για διεγέρσεις χαμηλής συχνότητας (έως 100 Hz).

Στη συνέχεια, περιγράφεται μια προτεινόμενη αναλυτική μέθοδος που υπολογίζει την παραμόρφωση $w(x,t)$ της εσχάρας εξαιτίας ενός φορτίου P που κινείται με σταθερή ταχύτητα v_0 (Kouroussis et al., 2014). Η εσχάρα του σιδηρόδρομου, ως δύο παράλληλες ράγες με περιοδικά στερεωμένους στρωτήρες, προσομοιώνεται ως μια ελαστική δοκός Euler - Bernoulli που στηρίζεται σε θεμελίωση τύπου Winkler. Η συμπεριφορά της εσχάρας αναπαρίσταται με τον παρακάτω σχηματισμό του Euler :

$$E_r I_r \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + K_f w = P \delta(x - v_0 t) \quad (3.1)$$

όπου E είναι το μέτρο ελαστικότητας της δοκού, I είναι η ροπή αδράνειας της διατομής της δοκού και K_f είναι η δυσκαμψία ανά μονάδα μήκους η οποία συμπεριλαμβάνει τις συνεισφορές των συνδέσμων, του έρματος και της υποκείμενης θεμελίωσης. Ο προσθετός $K_f w$ αντιπροσωπεύει τη θεμελίωση ελατηριακού τύπου Winkler και ο παράγοντας $\delta(x - v_0 t)$ είναι η συνάρτηση δέλτα του Dirac. Οι εδαφικές μετακινήσεις είναι ανάλογες της παραμόρφωσης της δοκού. Η λύση της παραπάνω εξίσωσης γράφεται ως:

$$w(x, t) = w(x - v_0 t) =$$

$$= (P/8E_r I_r \beta^3) * \exp(-\beta|x - v_0 t|) * [\cos(\beta|x - v_0 t|) + \sin(\beta|x - v_0 t|)] \quad (3.2)$$

όπου ο όρος:

$$\beta = \sqrt[4]{K_f/4E_r I_r} \quad (3.3)$$

εκφράζει την ευκαμψία μεταξύ της θεμελίωσης και της εσχάρας.

Οι κρίσιμες σιδηροδρομικές ταχύτητες μπορούν να μελετηθούν με την εισαγωγή της μάζας της εσχάρας, όποτε ο σχηματισμός του Euler που αναπαριστά τη συμπεριφορά της σιδηροτροχιάς μετατρέπεται ως εξής:

$$E_r I_r (\partial^4 w / \partial x^4) + m_r (\partial^2 w / \partial t^2) + K_f w = P \delta(x - v_0 t) \quad (3.4)$$

Η εσχάρα προσομοιώνεται ως μια δοκός με ομοιόμορφη μάζα m_r ανά μονάδα μήκους, η οποία αναπαριστά ταυτόχρονα τις μάζες των ράγων και των στρωτήρων και που στηρίζεται σε θεμελίωση τύπου Winkler. Η λύση της παραπάνω εξίσωσης στην περίπτωση αυτή γράφεται ως:

$$\begin{aligned} w(x - v_0 t) &= \\ &= (P/8E_r I_r \beta^3 \xi) * \exp(-\beta \xi |x - v_0 t|) * \\ &* [\cos(\beta \psi |x - v_0 t|) + (\xi/\psi) \sin(\beta \psi |x - v_0 t|)] \end{aligned} \quad (3.5)$$

όπου οι αδιάστατοι παράμετροι ξ και ψ είναι ίσοι με:

$$\xi = \sqrt{1 - (v_0/v_{min})^2} \quad \text{και} \quad \psi = \sqrt{1 + (v_0/v_{min})^2} \quad (3.6)$$

και χρησιμεύουν για τον υπολογισμό της ελάχιστης ταχύτητας φάσης των εγκάρσιων κυμάτων v_{min} η οποία δίνεται από τον τύπο:

$$v_{min} = \sqrt[4]{4K_f E_r I_r / m_r^2} \quad (3.7)$$

Εάν η ταχύτητα του τρένου προσεγγίσει αυτήν την ελάχιστη ταχύτητα φάσης και δημιουργηθεί συντονισμός του τρένου με την εσχάρα, τότε μπορεί να αναλυθεί η δυναμική επίδραση της σιδηροτροχιάς.

Η ανωτέρω αναλυτική προσέγγιση ναι μεν εισάγει την κρίσιμη ταχύτητα του τρένου, αλλά αγνοεί τη συμβολή της κρίσιμης ταχύτητας του εδάφους στο δυναμικό αποτέλεσμα. Από την άποψη του εδάφους, άλλες ταχύτητες ορίζονται ως κρίσιμες. Πρακτικά, η ελάχιστη ταχύτητα φάσης είναι μεγαλύτερη από την

ταχύτητα Rayleigh, έτσι αυτό επιτρέπει μεγαλύτερη εστίαση στο πρόβλημα των κυμάτων εδάφους (Kouroussis et al., 2014).

3.4.2. Προσομοιώματα τρένου ως κινητού φορτίου μεταβλητού μέτρου

Οι ατέλειες της επιφάνειας της εσχάρας και του τροχού παίζουν ρόλο στις δυνάμεις τροχού / εσχάρας, οι οποίες είναι σημαντικές για την εξέταση της δυναμικής διέγερσης κατά την εκτίμηση των σιδηροδρομικών δονήσεων. Το προσομοίωμα κινητού φορτίου σταθερού μέτρου βελτιώνεται σημαντικά με την συμπερίληψη μιας τυχαίας δυναμικής απόκρισης στην στατική απόκριση της εσχάρας σχετικής με την τραχύτητα του τροχού και της εσχάρας (Kouroussis et al., 2014):

$$w(t) = w_{st}(t) + w_{dyn}(t) \quad (3.8)$$

όπου $w_{st}(t)$ είναι η παραμόρφωση της εσχάρας λόγω των κατακόρυφων φορτίων και $w_{dyn}(t)$ η παραμόρφωση της εσχάρας που προκαλείται από την ακανόνιστη διεπαφή της επιφάνειας της εσχάρας και του τροχού. Παρά το γεγονός ότι αυτή η προσέγγιση δεν χρησιμοποιείται συχνά στη βιβλιογραφία, παρέχει αρκετά λεπτομερείς πληροφορίες υπό την προϋπόθεση ότι υπάρχει τέλεια επαφή μεταξύ του τρένου και της εσχάρας.

Στη βιβλιογραφία έχει μελετηθεί λίγο το θέμα που σχετίζεται με τις εδαφικές δονήσεις που οφείλονται στις ατέλειες της επιφάνειας της εσχάρας και του τροχού και η βασική πρόκληση με αυτή τη μεθοδολογία είναι να γίνει διάκριση μεταξύ των ανωμαλιών της σιδηροτροχιάς και των ανωμαλιών του τροχού. Κατά την συλλογή αυτών των πληροφοριών είναι σημαντικά τα εξής (Kouroussis et al., 2014):

- Για τις ανωμαλίες της σιδηροτροχιάς: Όταν οι ατέλειες στην επιφάνεια της σιδηροτροχιάς δεν μπορούν να καταγραφούν μέσω μετρητικού συστήματος, γίνεται συχνά αποδεκτή η χρήση της αναλυτικής αναπαράστασης που συνήθως βασίζεται σε υφιστάμενα δεδομένα και στην εμπειρία. Η γεωμετρία της εσχάρας ορίζεται από τέσσερις παράγοντες:

- α) Το εύρος (πλάτος) της σχάρας, δηλαδή η οριζόντια απόσταση μεταξύ των δύο σιδηροτροχιών.
- β) Την κατακόρυφη υψομετρική διαφορά της στάθμης των δύο σιδηροτροχιών.
- γ) Την οριζόντια πλευρική απόκλιση από την κεντρική αξονική γραμμή.
- δ) Την κατακόρυφη διατομή για τη μέση στάθμη των δύο σιδηροτροχιών.
- Για τις ανωμαλίες του τροχού και της επαφής τροχού / σιδηροτροχιάς: Άλλα είδη ατελειών εκτός των ανωμαλιών της σιδηροτροχιάς, όπως η τραχύτητα της επιφάνειας του τροχού, η τραχύτητα της επιφάνειας της σιδηροτροχιάς και οι επιπεδώσεις στην κυκλική περιφέρεια του τροχού μπορούν να ληφθούν υπόψη. Τα εύρη των συχνοτήτων των δονήσεων που συνδέονται με αυτές τις ατέλειες είναι:
 - α) Άνω των 10 Hz για τις επιπεδώσεις και την τραχύτητα στην κυκλική περιφέρεια του τροχού.
 - β) Άνω των 50 Hz για την τραχύτητα της σιδηροτροχιάς.

3.4.3. Λεπτομερή προσομοιώματα τρένου

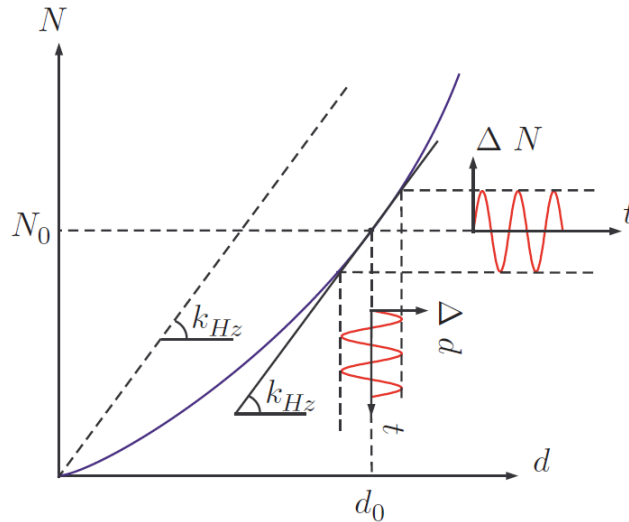
Τα λεπτομερή προσομοιώματα τρένου πλεονεκτούν στη μελέτη των σιδηροδρομικών δονήσεων για τους εξής λόγους (Kouroussis et al., 2014):

- Αξιοποιούν τα μέτρα περιορισμού των δονήσεων που αφορούν το ίδιο το όχημα. Για αυτό πρέπει να είναι γνωστή η δυναμική συμπεριφορά του οχήματος, της εσχάρας και του εδάφους.
- Χρησιμοποιούν σε ειδικές μελέτες, όπως για παράδειγμα την επίδραση και τη συνεισφορά που έχουν οι επιπεδώσεις της κυκλικής περιφέρειας των τροχών επάνω στις παραγόμενες δονήσεις.

Στη δυναμική των σιδηρόδρομων, η σχέση τροχού / σιδηροτροχιάς για κατακόρυφη φόρτιση ορίζεται από το μη γραμμικό νόμο του Hertz για επιφανειακές τάσεις επαφής (Kouroussis et al., 2014). Ο νόμος του Hertz (βλ. Εικόνα 3.9) περιλαμβάνει τη μη γραμμική σχέση μεταξύ του επιβαλλόμενου φορτίου N και της παραμόρφωσης του υλικού d που είναι η:

$$N = K_{Hz} * d^{3/2} \quad (3.9)$$

όπου ο συντελεστής K_{Hz} εξαρτάται από τις ακτίνες του τόξου μεταξύ του τροχού και της σιδηροτροχιάς και την ελαστικότητα του υλικού και των δύο σωμάτων. Για τις αναλύσεις σε πεδίο συχνοτήτων συνήθως χρησιμοποιείται ένα γραμμικό προσομοίωμα, θεωρώντας μικρές μεταβολές Δd γύρω από την ονομαστική τιμή d_0 .



Εικόνα 3.9: Η θεωρία του Hertz και η γραμμικοποίηση (Kouroussis et al., 2014).

Η μη γραμμική σχέση μεταξύ του επιβαλλόμενου φορτίου N και της παραμόρφωσης του υλικού d προσεγγίζεται γραμμικά από τη σχέση:

$$N = N_0 + k_{Hz} * \Delta d \quad (3.10)$$

όπου ο συντελεστής k_{Hz} συνήθως λαμβάνεται ίσος με 1 GN/m. Ο συντελεστής k_{Hz} προκύπτει από την ονομαστική δύναμη N_0 και τον συντελεστή K_{Hz} .

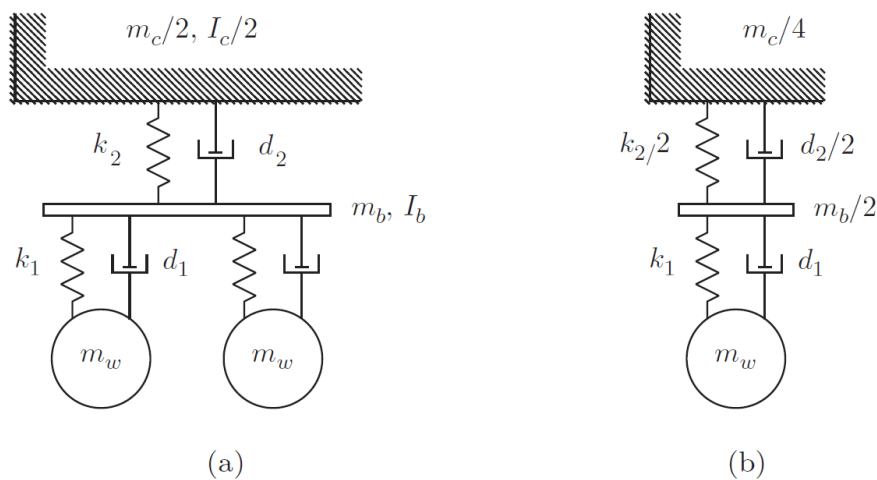
$$k_{Hz} = (\partial N / \partial d)|_{d_0, N_0} = (3/2)K_{Hz}d_0^{1/2} = (3/2)(N_0/d_0) \quad (3.11)$$

Βέβαια, τα περισσότερα λεπτομερή προσομοιώματα εδαφικών δονήσεων, προτείνουν την χρήση της γραμμικής σχέσης της επαφής τροχού -σιδηροτροχιάς για μια χρονική στιγμή, αγνοώντας τη δυναμική επαφή για μεγάλες διακυμάνσεις της δύναμης τροχού / σιδηροτροχιάς (Kouroussis et al., 2014).

Διακρίνονται δυο τύποι λεπτομερών προσομοιωμάτων τρένου (Kouroussis et al., 2014):

- Τα προσομοιώματα τρένου συγκεντρωμένης μάζας.
- Τα προσομοιώματα τρένου πολλαπλού σώματος.

Ένα προσομοίωμα τρένου συγκεντρωμένης μάζας είναι ένα προσομοίωμα που προσομοιώνει το πρωτεύον και το δευτερεύον σύστημα ανάρτησης συμπεριλαμβάνοντας τις μη ανηρτημένες, τις ημι-ανηρτημένες και τις ανηρτημένες μάζες του τρένου αλληλοσυνδεόμενες με ελατηριακά στοιχεία και στοιχεία απόσβεσης τα οποία λαμβάνονται από το εκάστοτε τρένο μελέτης. Μια λογική και ακριβής επιλογή για τη σύζευξη εσχάρας/θεμελίωσης εσχάρας, γίνεται με τη χρήση αυτού του προσομοιώματος μαζί με ιξωδοελαστικά στοιχεία, ειδικά όταν μελετάται η δυναμική αλληλεπίδραση μεταξύ της εσχάρας και του εδάφους Στην Εικόνα 3.10 φαίνονται τα προσομοιώματα «1/2 του οχήματος» και «1/4 του οχήματος».



Εικόνα 3.10: Απλά δυναμικά προσομοιώματα του κινούμενου οχήματος: (a): «1/2 του οχήματος» και (b): «1/4 του οχήματος» (Kouroussis et al., 2014).

Στην Εικόνα 3.10 χρησιμοποιούνται τα ακόλουθα σύμβολα: m_c είναι η μάζα του βαγονιού, m_b είναι η μάζα του φορείου, m_w είναι η μάζα του σιτ των τροχών, I_c είναι η ροπή αδράνειας του βαγονιού ως προς τον οριζόντιο άξονα που είναι κάθετος στην κίνηση (carbody pitch inertia), I_b είναι η ροπή αδράνειας του φορείου ως προς τον οριζόντιο άξονα που είναι κάθετος στην κίνηση (bogie pitch inertia), k_1 είναι η δυσκαμψία της πρωτεύουσας ανάρτησης, k_2 είναι η δυσκαμψία της δευτερεύουσας ανάρτησης, d_1 είναι η απόσβεση της πρωτεύουσας ανάρτησης και d_2 είναι η απόσβεση της δευτερεύουσας ανάρτησης. Υπάρχουν δύο περιορισμοί σε αυτήν την προσέγγιση:

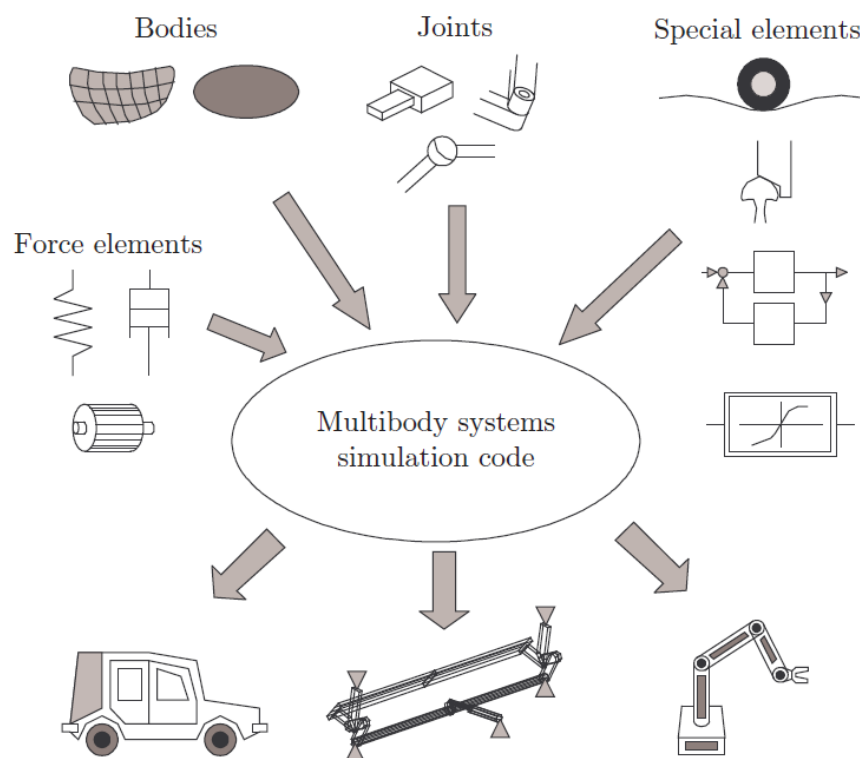
- Τα σύνθετα προσομοιώματα τρένων είναι δύσκολο να συζευχθούν με αυτά της εσχάρας / εδάφους για την πρόβλεψη των εδαφικών δονήσεων

- Οι τιμές των δυναμικών παραμέτρων του οχήματος είναι δύσκολο να ληφθούν από τους κατασκευαστές των τρένων. Βάση της προηγούμενης εικόνας για το «1/4 του οχήματος», το γραμμικό σύστημα εξισώσεων κίνησης ορίζεται ως:

$$[\mathbf{M}_v] \{\ddot{\mathbf{q}}_v\} + [\mathbf{C}_v] \{\dot{\mathbf{q}}_v\} + [\mathbf{K}_v] \{\mathbf{q}_v\} = \{\mathbf{f}_v\} \quad (3.12)$$

όπου \mathbf{M}_v , \mathbf{C}_v , \mathbf{K}_v είναι οι πίνακες μάζας, απόσβεσης και δυσκαμψίας αντίστοιχα. Οι εξωτερικές δυνάμεις (ουσιαστικά οι δυνάμεις βαρύτητας) υπολογίζονται στο διάνυσμα \mathbf{f}_v . Οι παράμετροι \mathbf{q}_v συνδέονται με αυτές της εσχάρας, μέσω της επαφής Hertz, όπως ορίστηκε σε παραπάνω σχέσεις. Συνεπώς, βάση της φύση της επαφής Hertz, ορίζονται δύο τύποι προσομοιωμάτων συγκεντρωμένης μάζας, ένας γραμμικός και ένας μη γραμμικός. Ο γραμμικός τύπος χρησιμοποιείται συνήθως όταν ολόκληρο το προσομοίωμα πρόβλεψης επικεντρώνεται στο πεδίο των συχνοτήτων, ενώ ο μη γραμμικός όταν επικεντρώνεται στο πεδίο του χρόνου.

Τα προσομοιώματα πολλαπλού σώματος, εκτός από τη μελέτη των σιδηροδρομικών δονήσεων, χρησιμοποιούνται και από τους κατασκευαστές των τρένων για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του τρένου. Ο κώδικας προσομοίωσης πολλαπλών σωμάτων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.11, επιτρέπει τη σύνδεση κλασσικών στοιχείων, όπως σωμάτων, κόμβων και στοιχείων δύναμης, για τη δημιουργία του προσομοιώματος του εξεταζόμενου μηχανικού συστήματος.



Εικόνα 3.11: Η αρχή των λογισμικών προσομοίωσης πολλαπλού σώματος (Kouroussis et al., 2014).

Ο κώδικας προσομοίωσης για την περίπτωση των στοιχείων επαφής τροχού / σιδηροτροχιάς θα μπορούσε να αναδιατυπωθεί ως εξής (Kouroussis et al., 2014): Τα στοιχεία των συστημάτων πολλαπλών σωμάτων για την προσομοίωση οχημάτων περιλαμβάνουν άκαμπτα σώματα, τα οποία μπορεί επίσης να διακρίνονται σε σωματίδια, να συνδέονται με στοιχεία, όπως ελατήρια ή αποσβεστήρες -ενεργοποιητές που ελέγχονται από δυνάμεις και πρότυπα, δηλαδή άκαμπτα, κινηματικά συνδεόμενα στοιχεία όπως σύνδεσμοι, έδρανα και ενεργοποιητές που ελέγχονται από κίνηση. Τα στοιχεία ζεύξης και σύνδεσης θεωρούνται στοιχεία χωρίς μάζα και παράγουν αντίστοιχα εσωτερικές δυνάμεις και ροπές μεταξύ των σωμάτων του συστήματος ή εξωτερικές δυνάμεις σε σχέση με το περιβάλλον και γενικά ορίζονται ως μη γραμμικά. Κάθε κίνηση σώματος μπορεί να αφορά μεγάλες μεταφορικές και περιστροφικές μετατοπίσεις. Η ανάλυση σε θέμα γραμμικής συμπεριφοράς δεν περιορίζεται, π.χ., επαφή τροχού – σιδηροτροχιάς. Παράλληλα φαίνεται ότι η προσέγγιση πολλαπλών σωμάτων επιτρέπει την προσομοίωση μεγάλων μετατοπίσεων και περιστροφών μεταξύ των επιμέρους σωμάτων, παρόλο που ο άκαμπτος ορισμός του σώματος εμποδίζει τις

παραμορφώσεις κάθε μάζας. Για τα στοιχεία επαφής τροχού - σιδηροτροχιάς το όριο μεταξύ της προσέγγισης των πολλαπλών σωμάτων και αυτής της συγκεντρωμένης μάζας, δεν είναι ακόμα σαφές.

Προκειμένου να αναλυθεί ένα σύστημα πολλαπλών σωμάτων, πρέπει να οριστεί ξεκάθαρα ο χωρικός σχηματισμός του κάθε σώματος. Μόλις γίνει αυτό γνωστό, οι ταχύτητες και οι επιταχύνσεις μπορούν να ληφθούν με την παραγωγή των δυνάμεων (όπου μπορούν να υπολογιστούν δυνάμεις αδράνειας), έτσι ώστε να σχηματιστούν οι εξισώσεις δυναμικής ισορροπίας. Γενικά, το πρώτο βήμα κατά τη δημιουργία του προσομοιώματος ενός συστήματος πολλαπλών σωμάτων, είναι η επιλογή ενός συνόλου ρυθμιστικών παραμέτρων \underline{q}_v στη λειτουργία των οποίων θα οριστεί καθένα σώμα. Η φύση των ρυθμιστικών παραμέτρων εξαρτάται συνήθως από τον τύπο των συντεταγμένων που χρησιμοποιούνται για την έκφραση της κινηματικής του συστήματος. Διακρίνονται τρεις κύριοι τύποι συντεταγμένων (Kouroussis et al., 2014):

- Οι ελάχιστες ή γενικευμένες συντεταγμένες.
- Οι σχετικές συντεταγμένες.
- Οι καρτεσιανές συντεταγμένες.

Σχετικά με το θέμα αυτό γενικά ισχύει ότι όσο μικρότερο είναι το μέγεθος του συστήματος, τόσο πιο γρήγορη είναι η επίλυσή του αλλά ο χρόνος διαμόρφωσής του είναι περισσότερος. Στην περίπτωση ενός σιδηροδρομικού οχήματος, η προσέγγιση των ελάχιστων συντεταγμένων οδηγεί σε έναν ελάχιστο αριθμό εξισώσεων, αλλά ο καθορισμός της τελικής προσέγγισης είναι μια χρονοβόρα διαδικασία, καθώς απαιτεί μια ειδική κινηματική επίλυση. Με καρτεσιανές συντεταγμένες, ναι μεν δημιουργείται μεγάλος αριθμός εξισώσεων αλλά με εύκολο τρόπο. Άρα, η καλύτερη επιλογή δεν εξαρτάται μόνο από το εξεταζόμενο σύστημα, αλλά και από το σχήμα ολοκλήρωσης Τα υφιστάμενα εξειδικευμένα πακέτα λογισμικού προσομοίωσης της σιδηροδρομικής βιομηχανίας, όπως τα Simpack, Vampire, ADAMS/rail, κλπ, έχουν επιλέξει τη λειτουργία με καρτεσιανές συντεταγμένες για λόγους φιλικότητας προς το χρήστη κατά τη δυναμική προσομοίωση (Kouroussis et al., 2014).

3.4.4. Αναλυτική προσομοίωση της εσχάρας

Κατά την προσομοίωση της δόνησης της εσχάρας, είναι δύσκολο να προσομοιωθούν τα διάφορα είδη των παραγόμενων κυμάτων, ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιείται μια αναλυτική προσέγγιση. Τα αναλυτικά προσομοιώματα είναι πιο αποτελεσματικά από άποψη υπολογισμών σε σχέση με τα αριθμητικά. Το συνολικό μήκος της αριθμητικά προσομοιωμένης εσχάρας πρέπει να είναι πολύ μεγαλύτερο από την περιοχή ενδιαφέροντος εξαιτίας του προβλήματος των ψευδών ανακλάσεων στα όρια των αριθμητικών προσομοιωμάτων (Kouroussis et al., 2014).

Το κλασσικό 2D αναλυτικό προσομοίωμα της σιδηροτροχιάς, όπως προαναφέρθηκε, είναι μια δοκός, συνήθως Euler-Bernoulli, που στηρίζεται σε ελατηριακή θεμελίωση τύπου Winkler. Η εσχάρα θεωρείται ως ένα ομοιογενές υλικό και τα κατακόρυφα φορτία κυριαρχούν στις παραγόμενες σιδηροδρομικές δονήσεις (Kouroussis et al., 2014; Connolly et al., 2014a). Η ακρίβεια βελτιώνεται με την αντικατάσταση της δοκού Euler με τη δοκό Timoshenko. Οι δοκοί Timoshenko λαμβάνουν υπόψη πρόσθετους βαθμούς ελευθερίας σε σύγκριση με τις δοκούς Euler (διατμητική παραμόρφωση και περιστροφική αδράνεια της σιδηροτροχιάς). Συνεπώς, προσομοιώνουν καλύτερα τη δυναμική της εσχάρας. Επίσης, το προσομοίωμα της δοκού του Euler-Bernoulli είναι ανεπαρκές για την περιοχή συχνοτήτων από 50 Hz έως 1500 Hz, όμως για συχνότητες κάτω από 500 Hz η διαφορά στα αποτελέσματα των δυο προσομοιωμάτων είναι αμελητέα (Connolly et al., 2014a).

Η εύκαμπτη δοκός που χρησιμοποιείται στην προσομοίωση της σιδηροτροχιάς για τη μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς της εσχάρας, μπορεί να θεωρηθεί ως άπειρη όταν το πρόβλημα λύνεται στο πεδίο των συχνοτήτων/κυματαριθμών ή ως πεπερασμένη όταν το ενδιαφέρον εστιάζεται στο πεδίο του χρόνου. Οι θεωρήσεις που υπάρχουν είναι η συνεχόμενη στήριξη της σιδηροτροχιάς και η διακριτή στήριξη της σιδηροτροχιάς εξαιτίας των στρωτήρων.

Τα προσομοιώματα της σιδηροτροχιάς με συνεχόμενη στήριξη (Kouroussis et al., 2014):

- Προσομοιάζουν ολόκληρη την εσχάρα. Δεν προσομοιάζουν σωστά την επίδραση των στρωτήρων καθώς θεωρούν ότι κατανέμονται ενιαία σε όλο

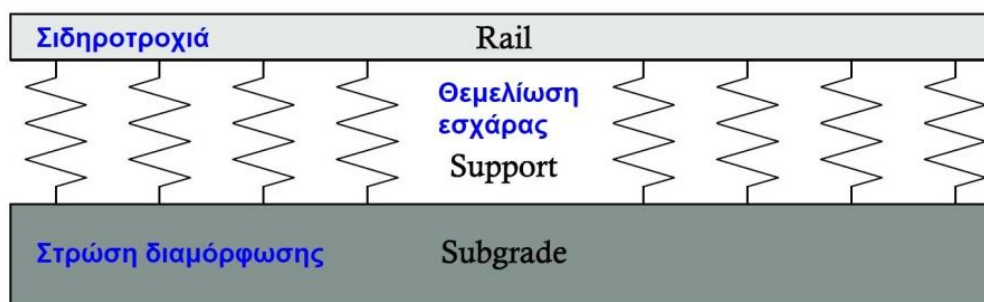
το μήκος της στρώσης. Συνεπώς, αγνοούν τις συχνότητες της δόνησης των στρωτήρων στην περίπτωση της συμβατικής (εύκαμπτης) έδρασης.

- Είναι κατάλληλα για κάποια συγκεκριμένα προβλήματα και ιδιαίτερα για την προσομοίωση σιδηρόδρομων με σταθερή επιδομή (δύσκαμπτη έδραση).

Τα προσομοιώματα της εσχάρας με διακριτή στήριξη της σιδηροτροχιάς (Kouroussis et al., 2014):

- Έχουν πολλαπλά στρώματα που αναπαριστούν τα ελαστικά πέλματα των σιδηροτροχιών, τους στρωτήρες, το έρμα, το υπόστρωμα και τη στρώση διαμόρφωσης.
- Δίνουν ακρίβεια σε υψηλές συχνότητες.
- Μπορούν να λυθούν στο πεδίο των συχνοτήτων και στο πεδίο του χρόνου, όμως οι λύσεις στο πεδίο των συχνοτήτων περιορίζονται σε γραμμικές συμπεριφορές εντός της δομής της εσχάρας.

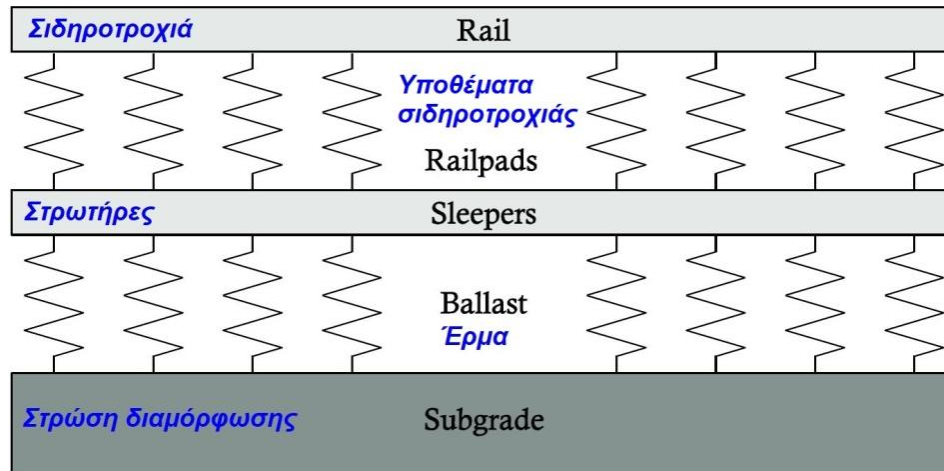
Τα προσομοιώματα του σιδηρόδρομου ανεξαρτήτως στήριξης ταξινομούνται ανάλογα με τον αριθμό των στρώσεων που χρησιμοποιούν για τις μάζες του κάθε στοιχείου (στρωτήρας, σιδηροτροχιά, έρμα) (Kouroussis et al., 2014). Τα προσομοιώματα μονής στρώσης χρησιμεύουν στη διερεύνηση των χαρακτηριστικών της εσχάρας που αφορούν χαμηλές συχνότητες. Στην Εικόνα 3.12 φαίνεται ένα προσομοίωμα εσχάρας μονής στρώσης συνεχόμενης στήριξης.



Εικόνα 3.12: Προσομοίωμα εσχάρας μονής στρώσης συνεχόμενης στήριξης (Connolly et al., 2014a).

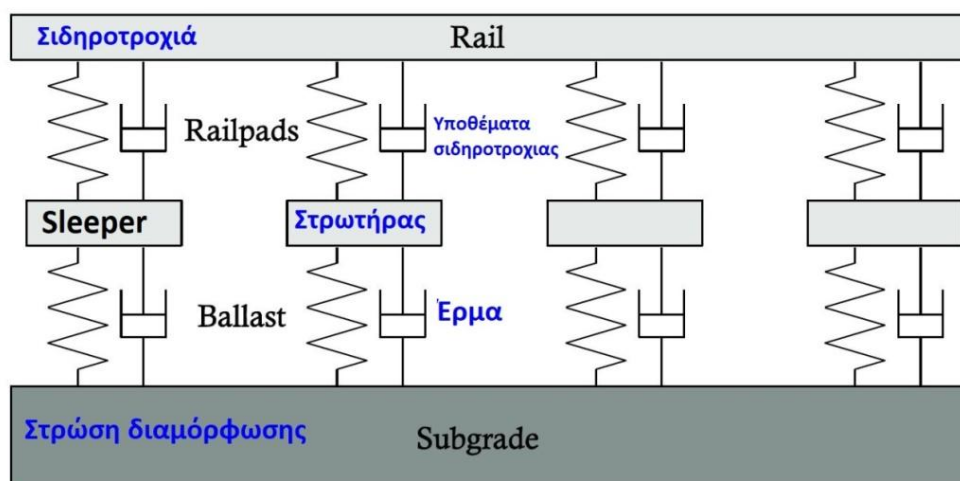
Τα προσομοιώματα δύο στρώσεων επιτρέπουν τη συμπερίληψη των υποθεμάτων της σιδηροτροχιάς, των στρωτήρων και του έρματος στη διαδικασία. Στην Εικόνα 3.13 φαίνεται ένα προσομοίωμα διπλής στρώσης συνεχόμενης

στήριξης, όπου το έρμα και τα υποθέματα της σιδηροτροχιάς θεωρούνται ότι είναι χωρίς μάζα. Αυτά μπορούν να συμπεριληφθούν στο προσομοίωμα της εσχάρας με την εισαγωγή πρόσθετων στρωμάτων (π.χ. προσομοιώματα τριών στρώσεων).



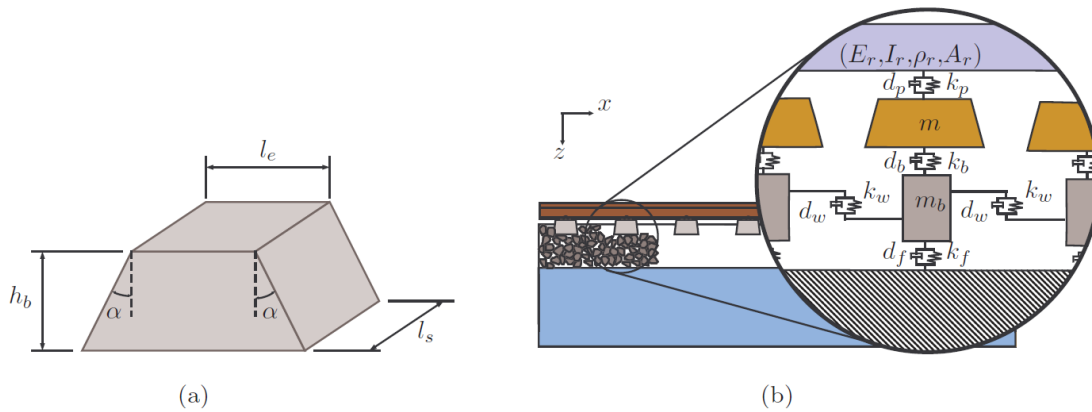
Εικόνα 3.13: Προσομοίωμα εσχάρας διπλής στρώσης συνεχόμενης στήριξης (Connolly et al., 2014a).

Η Εικόνα 3.14 δείχνει επίσης ένα προσομοίωμα εσχάρας διπλής στρώσης, το οποίο είναι μια δοκός Timoshenko με διακριτή στήριξη από μεμονωμένους στρωτήρες με ιξώδη απόσβεση.



Εικόνα 3.14: Προσομοίωμα εσχάρας διπλής στρώσης διακριτής στήριξης (Connolly et al., 2014a).

Για την σύζευξη μεταξύ της εσχάρας με το έρμα προτείνεται το προσομοίωμα του Zhai που φαίνεται στην Εικόνα 3.15 και είναι με διακριτή στήριξη σιδηροτροχιάς με πρόσθετα ελατήρια και στοιχεία απόσβεσης (k_w , d_w) που λειτουργούν σε κατακόρυφη κίνηση.



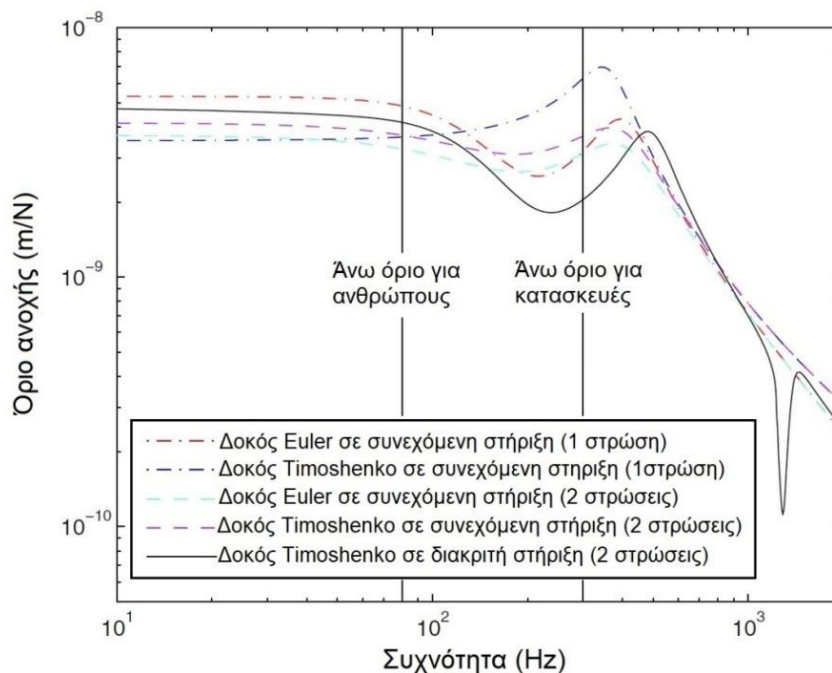
Εικόνα 3.15: Το προσομοίωμα του Zhai για τη δυναμική συμπεριφορά σιδηροδρομικής γραμμής με έρμα (a) Γεωμετρικού σχήμα του προσομοιώματος του έρματος, (b) Προσομοίωμα τριών στρωμάτων για την εσχάρα (Connolly et al., 2014a).

Το προσομοίωμα του Zhai για την εσχάρα και το έρμα (Connolly et al., 2014a):

- Έχει μια πρόσθετη μάζα που εκφράζει την αδρανειακή ιδιότητα του έρματος (προσομοίωμα τριών στρωμάτων για την εσχάρα). Κάθε μάζα έρματος ορίζει ένα εικονικό τμήμα του έρματος κάτω από κάθε στρωτήρα.
- Έχει μια πρόσθετη δυσκολία που αφορά την εύρεση νέων τιμών και προσομοιώνει την ευκαμψία της θεμελίωσης του έρματος μέσω στοιχείων ελατηρίου/αποσβεστήρα (k_f , d_f).

Μια κοινή μέθοδος για την ανάλυση των συχνοτικών χαρακτηριστικών των εσχάρων είναι ο υπολογισμός της ανοχής της σχάρας (η παραμόρφωση της εσχάρας ανά μονάδα στατικής δύναμης). Αυτή η συνάρτηση μεταφοράς περιγράφει τη διάδοση της ενέργειας μέσω ενός συστήματος για μια καθορισμένη περιοχή συχνοτήτων και χρησιμοποιείται επειδή παρέχει ένα χρήσιμο εργαλείο για τη διερεύνηση των ιδιοσυχνοτήτων της εσχάρας. Όταν οι ιδιοσυχνότητες είναι γνωστές, μπορούν να ελαττωθούν. Τα αποτελέσματα ανοχής των προαναφερομένων προσομοιωμάτων εσχάρας στο πεδίο των συχνοτήτων παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.16 όπου φαίνονται και τα τυπικά ανώτερα όρια

ανοχής των δονήσεων για τον άνθρωπο (5Hz - 80Hz) και για τις κατασκευές (30Hz - 250Hz).



Εικόνα 3.16: Χαρακτηριστικά ανοχής για αναλυτικά προσομοιώματα εσχάρας (Connolly et al., 2014a).

Από την Εικόνα 3.16 διαπιστώνεται ότι υπάρχουν αποκλίσεις μεταξύ των διάφορων προσεγγίσεων προσομοίωσης και για τις δύο περιοχές συχνοτήτων και αυτό δείχνει ότι η διακριτή στήριξη της σιδηροτροχιάς με πολλές στρώσεις οδηγεί γενικά σε μια ορθότερη προσομοίωση της εσχάρας.

3.4.5. Αριθμητική προσομοίωση της εσχάρας με πεπερασμένα στοιχεία

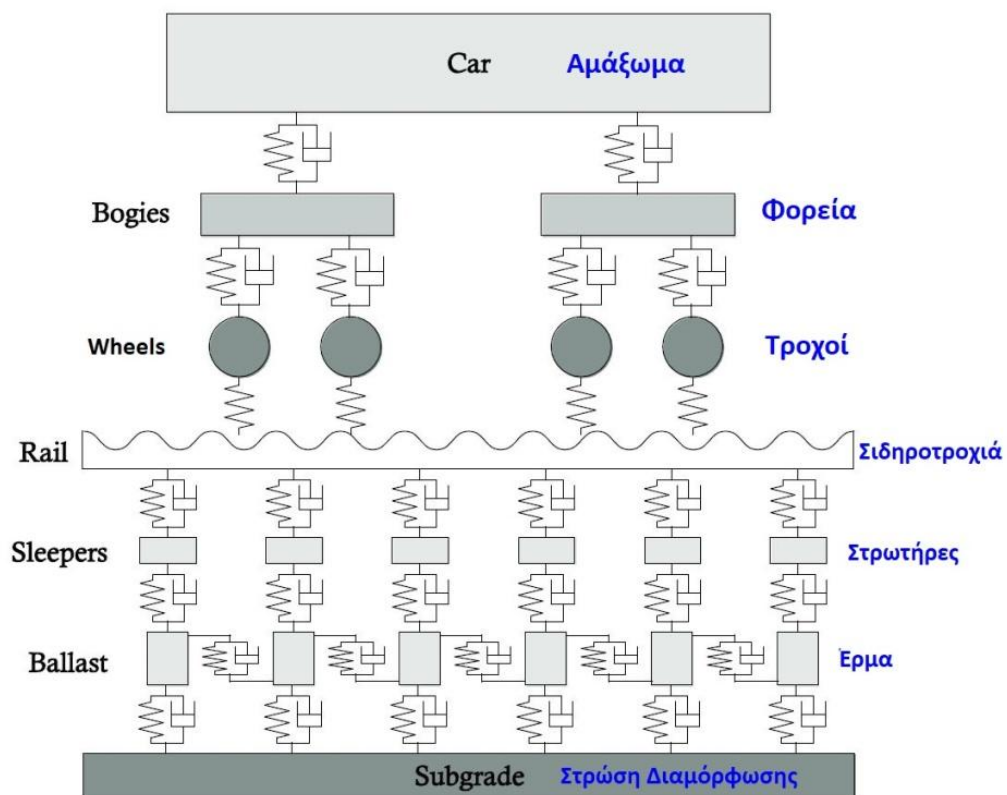
Για την προσομοίωση της εσχάρας με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ισχύουν τα εξής (Connolly et al., 2014a):

- Δεν υπάρχει η δυσκολία των αναλυτικών προσομοιωμάτων στο να ληφθούν υπόψη στους υπολογισμούς τα προσομοιώματα πολλαπλών σωμάτων του τρένου και οι ανωμαλίες εσχάρας - τροχού.
- Είναι δυνατή η διάκριση σε προσομοιώματα μόνης, διπλής, τριπλής στρώσης ή και παραπάνω στρώσεων για τις διδιάστατες προσομοιώσεις της εσχάρας.

- Η ακρίβεια βελτιώνεται σημαντικά σε σχέση με το προσομοίωμα μιας κινούμενης σημειακής δύναμης, όπως πρόέκυψε από μελέτη προσομοιωμάτων πολλαπλών σωμάτων για τη ρεαλιστική προσομοίωση της συχνότητας διέγερσης.
- Είναι δυνατή η διερεύνηση της απόκρισης των δονήσεων λόγω των επιπεδώσεων στην κυκλική περιφέρεια των τροχών, των ανωμαλιών των σιδηροτροχιών και άλλων παραγόντων.

Η Εικόνα 3.17 δείχνει την προσομοίωση ενός ενιαίου συστήματος τρένου – εσχάρας.

Η εισαγωγή της δυσκαμψίας της στρώσης διαμόρφωσης (εδάφους) στους υπολογισμούς των αποκρίσεων της εσχάρας στα αριθμητικά προσομοιώματα είναι εφικτή. Τα συστατικά στοιχεία της εσχάρας προσομοιώνονται σε τρεις διαστάσεις, εξαιτίας της μη ομοιόμορφης κατανομής των τάσεων από τις σιδηροτροχιές επάνω στο πλάτος των στρωτήρων. Πλέον διατίθενται εμπορικά πλήρη λογισμικά προσομοίωσης τρένου/εσχάρας όπως τα Vampire, το Simpack και το Adams/rail (Connolly et al., 2014a).



Εικόνα 3.17: Συζευγμένο προσομοίωμα τρένου - εσχάρας (Connolly et al., 2014a).

3.4.6. Προσομοίωση εδάφους

Η διαφορά των αριθμητικών προσομοιωμάτων εσχάρας με αυτά του εδάφους είναι ότι τα πρώτα εστιάζουν το ενδιαφέρον στην απόκριση της εσχάρας και όχι στις εδαφικές δονήσεις μακρινού πεδίου. Άρα, το προσομοίωμα του εδάφους εισάγεται αποκλειστικά για να αυξήσει την ακρίβεια του αντίστοιχου της εσχάρας (Kouroussis et al., 2014).

Έχουν αναπτυχθεί δύο θεωρήσεις που αφορούν την προσομοίωση του εδάφους (Avillez et al., 2012):

- Η θεώρηση του εδάφους ως ομογενή ημιχώρου. Στην περίπτωση αυτή, το πεδίο των κυμάτων καθορίζεται κυρίως από τα κύματα Rayleigh.
- Η θεώρηση του εδάφους ως στρωσιγενή ημιχώρου. Στην περίπτωση αυτή το εδαφικό υλικό που βρίσκεται μέσα στα επιμέρους εδαφικά στρώματα θεωρείται ομογενές. Εμφανίζεται διασπορά και το πεδίο κυμάτων καθορίζεται από τα διαφορά γενικά είδη κυμάτων που μπορούν να χαρακτηριστούν από διάφορες ταχύτητες κύματος για τις διάφορες συχνότητες. Σε στρωσιγενές έδαφος, χρησιμοποιούνται συνήθως τα «διαγράμματα διασποράς» που εκφράζουν το πεδίο των διαδιδόμενων κυμάτων. Η χαμηλότερη στρώση μπορεί να θεωρηθεί ως ένας ομογενής ημιχώρος, όταν βρίσκεται σε ικανοποιητικό βάθος. Αυτός ο τύπος προσομοίωσης εδάφους έχει φανεί να προσομοιώνει ικανοποιητικά τη συμπεριφορά πραγματικών εδαφικών περιοχών για τις εκάστοτε συχνότητες ενδιαφέροντος.

Επίσης, έχουν παρατηρηθεί τα εξής:

- Η θεώρηση του εδάφους ως ένα γραμμικά ελαστικό ημιχώρο ισχύει για σχετικά μικρά πλάτη δόνησης και είναι χρήσιμο ιδιαίτερα όταν διερευνάται η σχετική επίδραση των διαφόρων τύπων τρένου ή των δομικών συστατικών μερών της εσχάρας (Avillez et al., 2012).
- Ο υπολογιστικός χρόνος στην προσέγγιση του γραμμικά ελαστικού ημιχώρου αυξάνεται και απαιτούνται οριακές συνθήκες απορρόφησης για περιορίσουν τον χώρο του εδαφικού χωρίου (Connolly et al., 2014a).

- Για την πρόβλεψη απολύτων επιπέδων, το έδαφος πρέπει να προσομοιώνεται σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά της εκάστοτε περιοχής ενδιαφέροντος (Avillez et al., 2012).

Αρκετά αναλυτικά προσομοιώματα που θεωρούν το έδαφος ως ελαστικό ή ιξωδοελαστικό ημιχώρο έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς. Για παράδειγμα, εφαρμόστηκαν για την περίπτωση υπολογισμού δονήσεων στον σιδηρόδρομο στο Ledsgård της Σουηδίας, όπου συγκρίθηκαν με πειραματικές μετρήσεις και είχαν πολύ καλή ανταπόκριση (Persson, 2016). Στην ημιαναλυτική προσέγγιση του εδάφους, ένας γενικός τύπος της διάδοσης των δονήσεων που περιλαμβάνει και την επίδραση της απόσβεσης είναι:

$$A(r) = A(r_0) * e^{-\frac{\omega\eta}{2c} * r} \quad (3.13)$$

όπου A είναι το πλάτος δονήσεων, r είναι η απόσταση μεταξύ πηγής και δέκτη, ω είναι η κυκλική συχνότητα σε rad/sec, η είναι η απόσβεση λόγω εδάφους (που μπορεί να εξαρτάται από τη συχνότητα) και c είναι η ταχύτητα διάδοσης των διαμήκων κυμάτων (Davis, 2010).

3.5. Εμπειρικά προσομοιώματα πρόβλεψης

Τα εμπειρικά προσομοιώματα πρόβλεψης (Empirical Models or Direct Measurement Prediction Models - DMPM) σιδηροδρομικών δονήσεων βασίζονται σε λεπτομερή και αυστηρή ανάλυση των δεδομένων συλλογής επί τόπου μετρήσεων, παρέχουν αποκρίσεις που μπορούν να επεκταθούν και να εφαρμοστούν σε άλλες υπάρχουσες και μη υπάρχουσες περιπτώσεις. Τα περισσότερα αποτελούνται από διάφορους ανεξάρτητους τύπους (εμπειρικούς νόμους), κάθε ένας από τους οποίους λειτουργεί ως παράμετρος ελέγχου και μπορεί να επηρεάσει σε κάποιο βαθμό την τελική απόκριση. Μπορούν να χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη των σιδηροδρομικών δονήσεων σε πρώιμο μελετητικό στάδιο και το σύνηθες πλεονέκτημα τους είναι ότι είναι απλά στη χρήση.

Σχετικά με την εμπειρική μέθοδο υπάρχουν δύο προσεγγίσεις που πρέπει να ληφθούν υπόψη (Avillez et al., 2012):

- Ο καθορισμός της σχετικής συστατικής σταθεράς που μας ενδιαφέρει και η προσαρμογή του αποτελέσματος στις ειδικές ιδιότητες του τόπου ενδιαφέροντος, χρησιμοποιώντας συγκεκριμένα αποτελέσματα μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στη σχετική τοποθεσία,
- Η εύρεση αλγόριθμων πρόβλεψης από εμπειρικούς νόμους που προκύπτουν από τη στατιστική ανάλυση μιας εκτεταμένης βάσης δεδομένων που αποκτήθηκε από πολυάριθμες σημαντικές μετρήσεις πολλών επιτόπιων ερευνών.

Υπάρχουν και τα ημιεμπειρικά προσομοιώματα τα οποία χρησιμοποιούν μέρος των πειραματικών μετρήσεων. Ένα παράδειγμα είναι αυτό που ανέπτυξε το Νορβηγικό Γεωτεχνικό Ινστιτούτο (Norwegian Geotechnical Institute (NGI)) το οποίο βασιζόταν στα δεδομένα των μετρήσεων και στη στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων (Persson, 2016). Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη των επιπέδων δόνησης στα κτήρια και βασίζεται σε έξι γενικές παραμέτρους:

- Στις συνθήκες του εδάφους.
- Στον τύπο του τρένου.
- Στην ποιότητα της σιδηροτροχιάς και στο σχεδιασμό του επιχώματος.
- Στην ταχύτητα του τρένου.
- Στην απόσταση του κτιρίου από την σιδηροτροχιά.
- Στο κτίριο (τύπος θεμελίωσης και κατασκευής και αριθμός ορόφων).

Το προσομοίωμα δίδεται ως μαθηματική συνάρτηση και ρυθμίζεται χρησιμοποιώντας διάφορους συντελεστές σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$V = F_V * F_R * F_B = [V_T * F_S * F_D] * F_R * F_B \quad (3.14)$$

όπου: F_V είναι η βασική συνάρτηση των δονήσεων, η οποία συνίσταται σε ένα επίπεδο δόνησης V_T για την ταχύτητα αναφοράς και την απόσταση αναφοράς από την σιδηροτροχιά, F_S είναι ένας συντελεστής ταχύτητας, F_D είναι ένας συντελεστής της απόστασης, F_R είναι ένας συντελεστής της ποιότητας της σιδηροτροχιάς και F_B είναι ένας συντελεστής ενίσχυσης του κτιρίου.

3.6. Πρότυπες εμπειρικές μέθοδοι πρόβλεψης εδαφικών δονήσεων

3.6.1. Οδηγίες Διεύθυνσης Μεταφορών Η.Π.Α.

Η Αμερικανική Ομοσπονδιακή Διεύθυνση Μεταφορών (US Federal Transit Administration) παρέχει μια μεθοδολογία πρόβλεψης βασισμένη σε μετρήσεις πεδίου για τις εδαφικές σιδηροδρομικές δονήσεις (in-situ testing/field measurements – modular prediction approaches) η οποία χρησιμοποιείται από την Αμερικανική Ομοσπονδιακή Υπηρεσία Μεταφορών (US Federal Transit Authority) από τη δεκαετία του 1980 (Davis, 2010). Η μέθοδος είναι ένας συνδυασμός διακριτών στοιχείων για την πηγή των δονήσεων, τη διαδρομή διάδοσης και τον αποδέκτη. Η διαδρομή της διάδοσης και η απόκριση του αποδέκτη μπορούν να προσδιοριστούν εμπειρικά με δοκιμή πρόσκρουσης σε εδαφική οπή (Borehole Impact Test), η οποία είναι η μόνη διαθέσιμη μέθοδος που παρέχει αξιόλογη ασφάλεια στους υπολογισμούς της διάδοσης των δονήσεων μέσω του εδάφους στην περιοχή κοντά στο σημείο διεξαγωγής. Η γενική διατύπωση έχει ως εξής:

$$L_n = (EFL \text{ or } FDL) + (PSR \text{ or } LSR) + BCF + BVR + CTN + SAF \quad (3.15)$$

όπου το L_n είναι το προβλεπόμενο επίπεδο εδαφικής δόνησης, το *EFL or FDL* αφορά τη δύναμη διέγερσης, το *PSR or LSR* αφορά τη μετάδοση της κίνησης από την πηγή στον αποδέκτη, το *BCF* αφορά τις απώλειες στη σύζευξη της διεπιφάνειας εδάφους κτιρίου, το *BVR* αφορά την ενίσχυση ή τη μείωση της δόνησης από τη θεμελίωση του κτιρίου προς τα άνω μέρη του, το *CTN* αφορά τη μετατροπή των μονάδων της δόνησης από ταχύτητες σωματιδίων των ορόφων σε ηχητικές μονάδες και το *SAF* αφορά συντελεστή ασφαλείας για τις αβεβαιότητες στην πρόβλεψη.

3.6.2. Οδηγίες Σουηδικής Διεύθυνσης Μεταφορών

Το έγγραφο TK Geo 13 της Σουηδικής Διεύθυνσης Μεταφορών (Swedish Transport Administration (Trafikverket)) ασχολείται κυρίως με τις απαιτήσεις σχεδιασμού για διάφορες γεωτεχνικές κατασκευές και για τις σιδηροδρομικές

δονήσεις προτείνει μια απλή μεθοδολογία βήμα προς βήμα (Persson, 2016). Για όρια ταχύτητας σιδηροτροχιάς sth άνω των 160 km/h, πρέπει να ληφθούν υπόψη τα φαινόμενα που διέπουν τα τρένα υψηλών ταχυτήτων.

Η ανάλυση χωρίζεται σε δύο στάδια: αρχική δυναμική ανάλυση και λεπτομερή δυναμική ανάλυση. Στην αρχική δυναμική ανάλυση, η ταχύτητα του κύματος S προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας είτε εμπειρικές μεθόδους ($c_{s,empirical}$) είτε μετρήσεις ($c_{s,measured}$). Για να αποφευχθεί το φαινόμενο «Ground Vibration Boom (GVB)», δηλαδή το φαινόμενο που συμβαίνει όταν η ταχύτητα του τρένου υπερβεί την ταχύτητα διάδοσης κυμάτων Rayleigh του υποκείμενου εδάφους, επαληθεύεται η εξίσωση:

$$sth < \left\{ \frac{c_{s,empirical}}{1.5}, \frac{c_{s,measured}}{1.4} \right\} \quad (3.16)$$

Η ταχύτητα των κυμάτων S είναι τυπικά λίγο πάνω από την ταχύτητα των Rayleigh, πράγμα που σημαίνει ότι εάν ικανοποιηθεί η παραπάνω εξίσωση, δεν υπάρχουν κίνδυνοι που σχετίζονται με το φαινόμενο που προαναφέρθηκε. Αν η ταχύτητα του τρένου υπερβαίνει τα προαναφερθέντα όρια, απαιτείται λεπτομερής δυναμική ανάλυση. Η ανάλυση αυτή συνίσταται στον προσδιορισμό των δυναμικών ιδιοτήτων εδάφους στην περιοχή μελέτης μέσω εμπειρικών μεθόδων ή επιτόπιων μετρήσεων. Συνεπώς, έχοντας διαθέσιμες ακριβείς εδαφικές παραμέτρους, εκτελούνται υπολογισμοί με τη χρήση 2D και 3D προσομοιωμάτων, για τον προσδιορισμό της κρίσιμης ταχύτητας και των κατακόρυφων παραμορφώσεων κάτω από τους στρωτήρες.

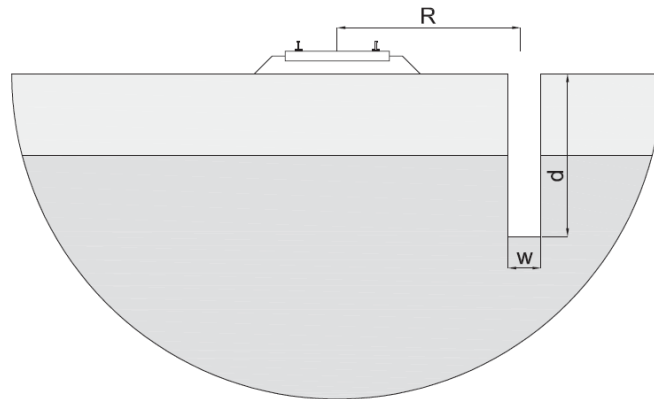
Κεφάλαιο 4^ο

Μέτρα περιορισμού δονήσεων

Μέτρα περιορισμού των παραγόμενων σιδηροδρομικών δονήσεων μπορούν να εφαρμοστούν και στις τρεις περιοχές μελέτης του φαινομένου, δηλαδή στην πηγή, στη διαδρομή διάδοσης και στον δέκτη των δονήσεων (βλ. ενότητα 2.3.1). Υπό αυτή την έννοια τα μέτρα αυτά διακρίνονται σε ενεργητικά και παθητικά. Τα ενεργητικά έχουν εφαρμογή στο κινούμενο όχημα ή στον σιδηρόδρομο, ενώ τα παθητικά στο υποκείμενο και το γειτονικό έδαφος του σιδηρόδρομου ή στον εκάστοτε εξεταζόμενο αποδέκτη των δονήσεων. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται συνοπτικά τα παθητικά μέτρα που αφορούν τη διαδρομή διάδοσης με ιδιαίτερη αναφορά στην εφαρμογή του γεωαφρού διογκωμένης πολυστερίνης (EPS (Expanded PolyStyrene)) στην κατασκευή του επιχώματος. Η αποτελεσματικότητα των μέτρων περιορισμού δονήσεων αξιολογείται μέσω του συντελεστή μείωσης πλάτους *AR* (Amplitude Reduction). Ο συντελεστής αυτός ισούται με το πηλίκο του πλάτους της κατακόρυφης μετατόπισης της δόνησης μετά την εφαρμογή του μέτρου περιορισμού προς το αντίστοιχο πλάτος χωρίς το μέτρο αυτό (RIVAS D4.1, 2011).

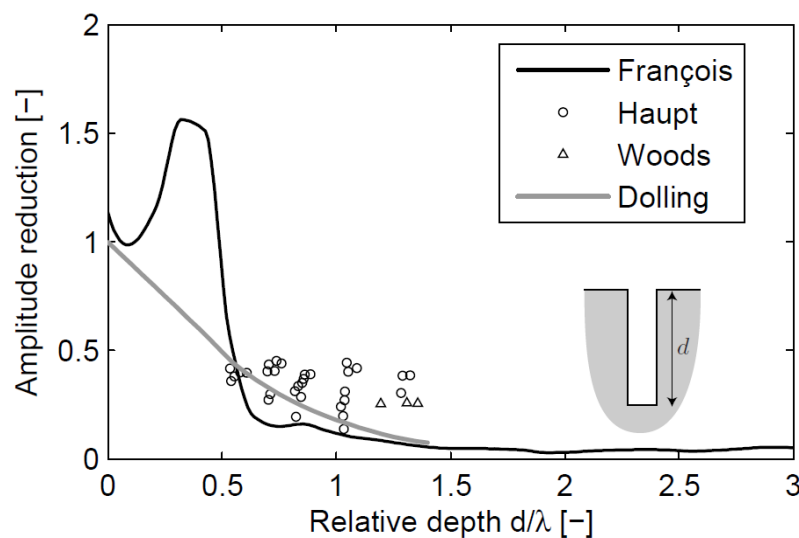
4.1. Τάφροι

Οι τάφροι (trenches) περιορίζουν τις σιδηροδρομικές δονήσεις πάνω από μια ορισμένη συχνότητα και βασίζονται στην ικανότητά τους να ανακλούν τα προσπίπτοντα κύματα (RIVAS D4.1, 2011). Η τέλεια ανάκλαση επιτυγχάνεται στην ανοικτή τάφρο η οποία σχηματικά φαίνεται στην Εικόνα 4.1.



Εικόνα 4.1: Ανοικτή τάφρος δίπλα σε σιδηροδρομική γραμμή (RIVAS D4.1, 2011).

Το βάθος της τάφρου θεωρείται ο σημαντικότερος παράγοντας αποτελεσματικότητας. Η Εικόνα 4.2 δείχνει τη μείωση πλάτους δόνησης ανοιχτής τάφρου με τη μεταβολή του σχετικού βάθους ελέγχου $\bar{d} = d/\lambda$, όπου d είναι το βάθος της τάφρου και όπου λ το μήκος κύματος Rayleigh του εδάφους. Τα αποτελέσματα έχουν προκύψει από πειραματικές μελέτες. Εκτός από το βάθος, η μείωση των δονήσεων εξαρτάται επίσης από τις εδαφικές συνθήκες και από το σχεδιασμό του σιδηρόδρομου και των οχημάτων (RIVAS D4.1, 2011).

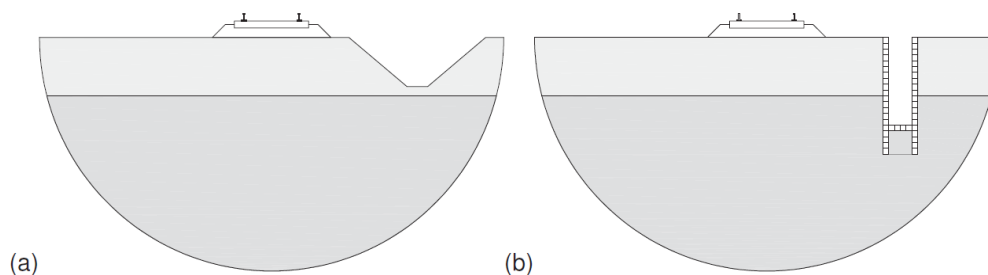


Εικόνα 4.2: Συντελεστής μείωσης πλάτους AR για ανοικτή τάφρο ως συνάρτηση του σχετικού βάθους d/λ . Μαύρη γραμμή: Francois et al., ▲: Woods, ο: Haupt, Γκρι γραμμή: Dolling (RIVAS D4.1, 2011).

Σύμφωνα λοιπόν με το μέτρο αυτό παρατηρούνται τα παρακάτω (RIVAS D4.1, 2011):

- Η τάφρος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.2, αρχίζει να είναι αποτελεσματική εάν το βάθος της τάφρου είναι τουλάχιστον το μισό του μήκους κύματος Rayleigh. Για το μήκος κύματος ισχύει $\lambda = C_R / f$, όπου C_R η ταχύτητα διάδοσης του κύματος R και f η συχνότητα του. Συνεπώς, για τη μόνωση των δονήσεων σε χαμηλές συχνότητες κάτω των 10 Hz, όπου αντιστοιχούν μεγάλα μήκη κύματος, απαιτούνται πολύ βαθιές τάφροι και αυτό μπορεί να είναι πρακτικά ανέφικτο.
- Για μια τάφρο, όταν ισχύει $\bar{d} > 0.8$ (ανοιχτή βαθιά τάφρος), η αποτελεσματικότητα είναι σχεδόν ανεξάρτητη από το πλάτος w της τάφρου και τότε η μείωση του πλάτους οφείλεται κυρίως στην ανάκλαση των προσπιπτόντων κυμάτων. Όταν $\bar{d} < 0.8$, η αποτελεσματικότητα της τάφρου αυξάνεται με την αύξηση του πλάτους της τάφρου.
- Η οριζόντια απόσταση από το κέντρο της σιδηροτροχιάς R θεωρείται πως δεν έχει μεγάλη επίδραση στην αποτελεσματικότητα. Πάρα ταύτα σε αρκετά μεγάλες αποστάσεις υπάρχει κάποια μείωση αποτελεσματικότητας.
- Αμέσως μετά την τάφρο εμφανίζεται μια ζώνη με καλή μείωση των δονήσεων σε όλες τις συχνότητες.
- Η αποτελεσματικότητα μιας τάφρου είναι μικρότερη σε ένα μη ομογενές έδαφος όπου η ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων αυξάνεται με το βάθος σε σχέση με ένα ομογενές.
- Όταν το βάθος της τάφρου σε σκληρό εδαφικό υλικό είναι μεγαλύτερο από το βάθος των επιφανειακών στρωμάτων του εδάφους, ο συντελεστής μείωσης πλάτους μπορεί να μειωθεί σημαντικά.

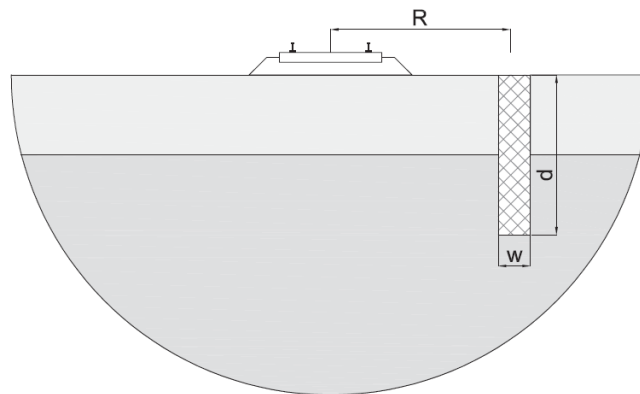
Στην Εικόνα 4.3 φαίνονται σχηματικά δυο παραδείγματα τάφρων.



Εικόνα 4.3: Ανοικτή τάφρος (a) Με επικλινή εδαφικά πρανή, (b) Με αντιστηρίξεις (RIVAS D4.1, 2011).

4.2. Φράκτες υπόγειου τοίχου

Η ανοιχτή τάφρος (buried wall) είναι ο πιο ιδανικός φράκτης προσπίπτοντων κυμάτων καθώς επιτυγχάνει τέλεια ανάκλαση. Πάρα ταύτα, έχει περιορισμούς πρακτικής εφαρμογής και αποτελεσματικότητας εξαιτίας της αμφίβολης σταθερότητας των πρανών. Η σταθερότητα αυτή επηρεάζεται από το βάθος της τάφρου και την παρουσία υπόγειων υδάτων. Για αυτό το λόγο γίνεται επιτακτική η πλήρωση της τάφρου με χρήση μαλακών ή στιβαρών υλικών πλήρωσης και με αυτόν τον τρόπο σχηματίζεται ένας φράκτης υπόγειου τοίχου. Αυτός αντανακλά τα προσπίπτοντα κύματα και λειτουργεί ως ένας κυματοθραύστης για την μόνωση των δονήσεων (RIVAS D4.1, 2011). Στην Εικόνα 4.4 απεικονίζεται σχηματικά το μέτρο αυτό.

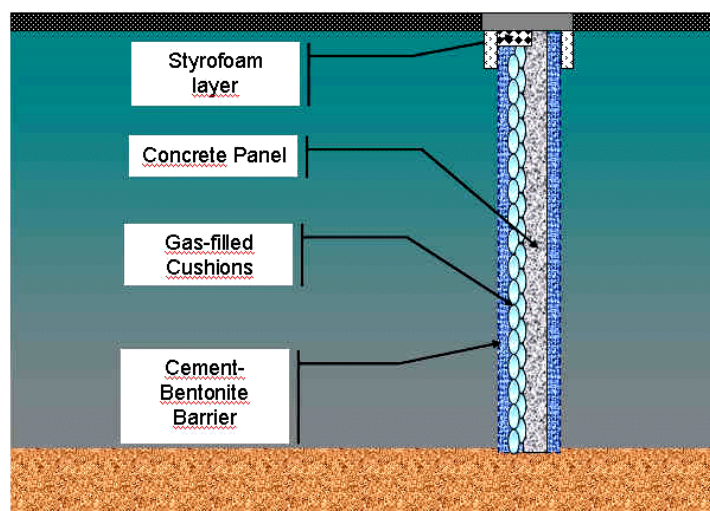


Εικόνα 4.4: Ένας φράκτης υπόγειου τοίχου δίπλα από έναν σιδηρόδρομο (RIVAS D4.1, 2011).

Αναφορικά με τον συντελεστής μείωσης πλάτους AR του μέτρου αυτού, ο οποίος καθορίζει την απόδοσή του, παρατηρούνται τα παρακάτω (RIVAS D4.1, 2011):

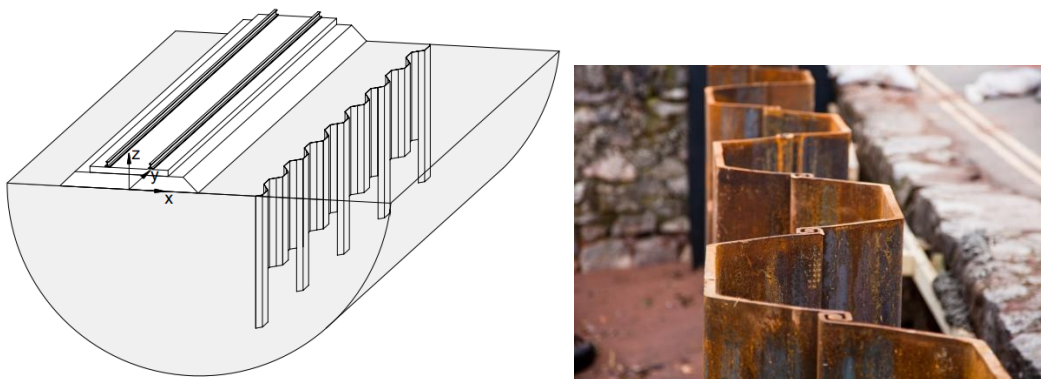
- Εξαρτάται από τις διαστάσεις του τοίχου (βάθος d και πλάτος w), από την απόσταση από το κέντρο της σιδηροτροχιάς R και από τα χαρακτηριστικά του εδάφους.

- Είναι μικρότερος από αυτόν μιας ανοιχτής τάφρου ίδιας διατομής, εξαιτίας της περιορισμένης αντίστασης και της αντίθεσης στιβαρότητας μεταξύ του υλικού πλήρωσης και του εδάφους.
- Θεωρείται ότι καθορίζεται μόνο από τη συνολική περιοχή $S=w*d$, όπως έχει προκύψει από αριθμητικές προσομοιώσεις. Δηλαδή, τόσο το βάθος όσο και το πλάτος έχει σημαντική επίδραση στη μείωση των δονήσεων (σε αντίθεση με τις ανοιχτές τάφρους).
- Για τους βαθείς φράκτες υπόγειου τοίχου, καθορίζεται κυρίως από την ανάκλαση των προσπιπτόντων κυμάτων.
- Για έναν πλατύ και ρηχό φράκτη υπόγειου τοίχου, καθορίζεται από τη μετατροπή της συχνότητας στον πάτο του τοίχου (διεπιφάνεια σκυροδέματος – εδάφους). Συνεπώς, επιτυγχάνεται μείωση των δονήσεων, καθώς το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας των κυμάτων Rayleigh περνάει κάτω από τον τοίχο.
- Δεν επηρεάζεται σημαντικά από την απόσβεση υλικού του υπόγειου τοίχου.
- Καθορίζεται από την αντίθεση της στιβαρότητας μεταξύ του υλικού πλήρωσης και του εδάφους. Οι φράκτες υπόγειου τοίχου με μαλακό υλικό πλήρωσης έχουν υψηλότερη αποτελεσματικότητα σε σύγκριση με αυτούς από σκυρόδεμα, σύμφωνα με απλουστευμένα μονοδιάστατα μοντέλα δονήσεων.



Εικόνα 4.5 : Σύστημα μαξιλαριών αερίου (gas cushion system) τρίτης γενιάς, με εύκαμπτα μαξιλάρια προσαρτημένα σε σκληρό, προκατασκευασμένο πάνελ σκυροδέματος (Massarsch, 2004).

Οι φράκτες υπόγειου τοίχου σύμφωνα με το υλικό πλήρωσης (μαλακό ή σκληρό) διακρίνονται σε στιβαρούς και μαλακούς. Το υλικό πλήρωσης για τους μαλακούς μπορεί να είναι από κομματάκια καουτσούκ/ελαστικών, κονίαμα μπετονίτη – τσιμέντου, πολυστυρένιο (π.χ. αφρός διογκωμένης πολυστερίνης, μεταλλικά πάνελ με πολυουρεθάνη (PolyUrethane (PUR) sandwich panels) ή τα μαξιλάρια αερίου (gas cushions). Οι στιβαροί φράκτες υπόγειου τοίχου μπορεί να αποτελούνται από σκυρόδεμα, αδρανή υλικά, συστοιχίες μεταλλικών πασσάλων ή πασσάλων σκυροδέματος. Στις Εικόνες 4.5 και 4.6 φαίνονται δυο παραδείγματα φρακτών υπόγειου τοίχου.



Εικόνα 4.6: Φράκτης Υπόγειου τοίχου από συστοιχία πασσάλων κυματοειδούς λαμαρίνας (sheet pile wall) (Dijkmans et al., 2016).

4.3. Αύξηση δυσκαμψίας υποβάθρου

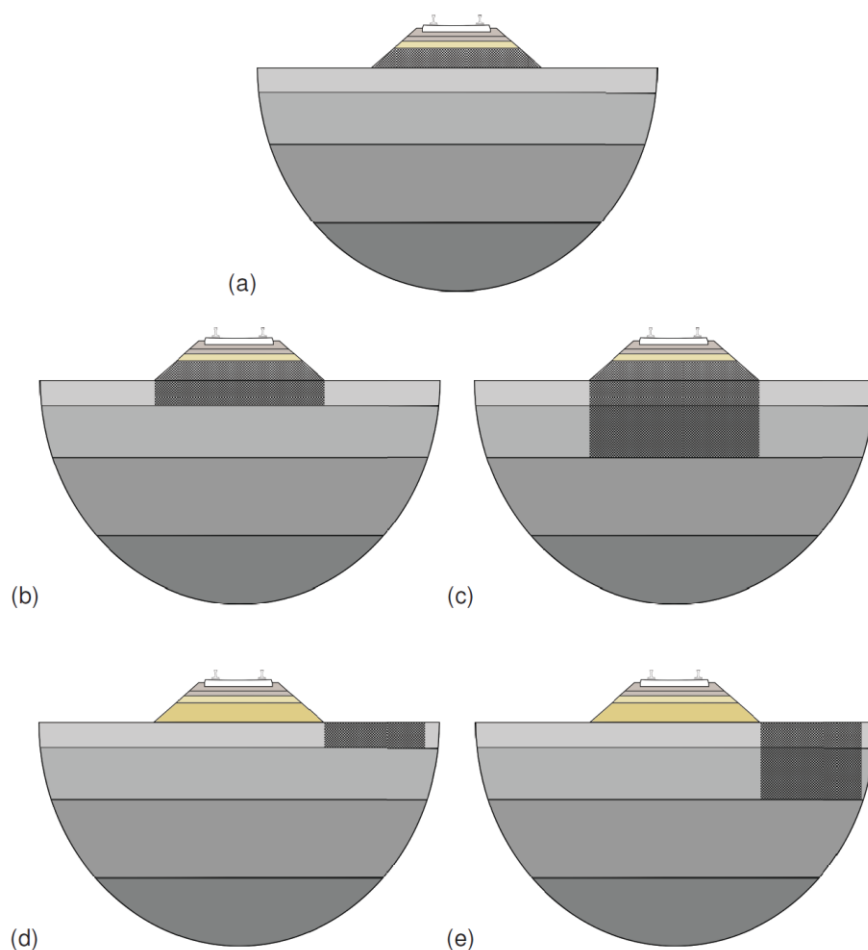
Η αύξηση της δυσκαμψίας/στιβαρότητας (subgrade stiffening) του υποβάθρου του σιδηρόδρομου εφαρμόζεται συνήθως στα μαλακά εδάφη προκειμένου να μειωθούν οι μετατοπίσεις της εσχάρας. Εκτός από αυτό, χρησιμοποιείται και για να μειωθούν τα επίπεδα των δονήσεων τα οποία μειώνονται για την περιοχή των χαμηλών συχνοτήτων για όλες τις ταχύτητες τρένου και για όλες τις αποστάσεις από τη σιδηροτροχιά. Η αποτελεσματικότητα του μέτρου αυτού χρειάζεται περισσότερη τεκμηρίωση με την εκπόνηση αριθμητικών προσομοιωμάτων και πειραματικών δοκίμων.

Για να επιτευχθεί η επιθυμητή στιβαρότητα υποβάθρου μπορούν να εφαρμοσθούν αρκετές τεχνικές βελτίωσης του εδάφους, όπως (RIVAS D4.1, 2011):

- Δυνατή βαθιά δονητική συμπίκνωση (deep vibro compaction). Με αυτόν τον τρόπο μειώνονται οι πόροι του εδάφους και συνεπώς αυξάνεται η πυκνότητα και η στιβαρότητα. Η τεχνική αυτή είναι κατάλληλη για τα κοκκώδη (μη συνεκτικά) εδάφη, ενώ η παρουσία ιλύος και αργίλου μπορεί να εμποδίσει σοβαρά την επί τόπου συμπίκνωση.
- Αντικατάσταση δόνησης (vibro replacement). Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται στην περίπτωση χαλαρού αμμώδους εδάφους ή συνεκτικού μαλακού εδάφους, προκειμένου να μην προκαλούνται σημαντικές δονήσεις στις παρακείμενες κατασκευές σε σχέση με άλλες τεχνικές. Είναι μια τεχνική βαθιάς συμπίκνωσης, όπου στήλες χονδρού υλικού επιχωμάτωσης εγκαθίστανται στο έδαφος με ειδικούς δονητές. Οι στήλες αυτές μικραίνουν τη συμπιεστότητα, αυξάνουν την αντοχή σε διάτμηση, συμβάλλουν στην γρήγορη αποτόνωση της πίεσης του νερού των πόρων και επιταχύνουν τη στερεοποίηση του αργιλικού εδάφους.
- Βαθιά ανάμιξη εδάφους (deep soil mixing). Πρόκειται για μια διαδικασία βελτίωσης όπου μια στήλη του εδάφους κόβεται και αναμιγνύεται μηχανικά με τσιμέντο ή ασβέστη, μέσω ενός ειδικού περιστρεφόμενου εργαλείου ανάμιξης. Εφαρμόζεται σε συνεκτικά εδάφη, διογκούμενες αργίλους, χαλαρά αμμώδη εδάφη και τεχνητά επιχώματα. Χρησιμοποιείται πρωτίστως για τη μείωση των καθιζήσεων, την αύξηση της διατμητικής αντοχής και την αύξηση της φέρουσας και δευτερευόντως για τον μετριασμό των σιδηροδρομικών δονήσεων.
- Ένεμα από πέτρες, χαλίκια ή στήλες τσιμέντου (grouted stone, gravel, or cement columns). Χρησιμοποιείται στην περίπτωση που το έδαφος δεν παρέχει επαρκή πλευρική στήριξη για την κατασκευή στηλών από αδρανή υλικά, π.χ., οργανικά εδάφη. Συνεπώς, οι στήλες μπορούν να τσιμεντοποιηθούν με τη χρήση τσιμεντενέματος.
- Δονητικές στήλες τσιμέντου / ασβέστη (vibro concrete/lime columns). Στην περίπτωση αυτή το σκυρόδεμα αντλείται κατευθείαν στον πυθμένα μέσω της άκρης της μηχανικής διάταξης που σχηματίζει τη στήλη και ασκεί

δόνηση στο έδαφος. Χρησιμοποιείται σε αδύναμες αλλουβιακές αποθέσεις εδάφη, όπως τύρφη και μαλακές άργιλοι.

- Ενεμάτωση συμπίκνωσης (compaction grouting). Στην τεχνική αυτή ένα χαλύβδινος σωλήνας εισχωρεί στη βελτιστοποιούμενη ζώνη και εισάγεται ένα στιβαρό ασβεστοκονίαμα σε υψηλή πίεση που μετατοπίζει και συμπυκνώνει το περιβάλλον έδαφος. Η έγχυση συνεχίζεται καθώς ο σωλήνας εισαγωγής ενέματος εξάγεται από το έδαφος, σχηματίζοντας έτσι μια μεγαλύτερης διαμέτρου στήλη από διασυνδεδεμένους βολβούς ενέματος.
- Ενεμάτωση υψηλής πίεσης (jet grouting). Πρόκειται για μια διαδικασία βελτίωσης του εδάφους όπου το έδαφος κόβεται με υψηλή πίεση, αναμιγνύεται με τσιμεντένεμα και σταδιακά αντικαθιστά το έδαφος.
- Στερεοποίηση με κενό αέρος (vacuum consolidation). Πρόκειται για ένα σύστημα επιτάχυνσης της διαδικασίας της στερεοποίησης των συνεκτικών εδαφών υψηλής συμπιεστότητας. Βασίζεται στη δημιουργία κενού στην εδαφική μάζα που πρόκειται να στερεοποιηθεί και μειώνει το μήκος της διαδρομής αποστράγγισης του νερού των πόρων με την εγκατάσταση κατακόρυφων αποχετεύσεων.



Εικόνα 4.7: Ορισμένες πιθανές διατάξεις για την αύξηση της στιβαρότητας του υποβάθρου: (a): παρέμβαση στο επίχωμα, (b) - (c): παρέμβαση στο επίχωμα και στην άνω εδαφική στρώση και (d) - (e): παρέμβαση στο παρακείμενο έδαφος (RIVAS D4.1, 2011).

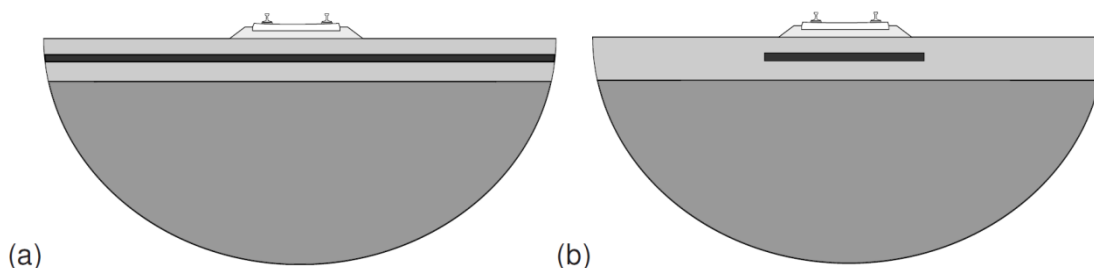
Η αύξηση της στιβαρότητας είναι δυνατό να εφαρμοστεί σε αρκετές διατάξεις, όπως στο επίχωμα ή/και στην ανώτερη μαλακή εδαφική στρώση. Στην Εικόνα 4.7 φαίνονται μερικές τέτοιες διατάξεις. Οι παρεμβάσεις κάτω από την εσχάρα θεωρούνται οι πιο αποτελεσματικές (RIVAS D4.1, 2011).

4.4. Μπλοκ παρεμπόδισης κύματος

Τα επιφανειακά κύματα υφίστανται έντονη σκέδαση κατά τη διάδοσή τους σε ένα οριζόντια στρωματοποιημένο εδάφους με το βάθος λόγω της μεταβολής των ιδιοτήτων του. Υπάρχουν «συχνότητες αποκοπής» (cut-on) όπου κάτω από αυτές τα κύματα παραμένουν φανερά. Με βάση την ύπαρξη συχνοτήτων αποκοπής στο έδαφος, μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύσκαμπτες προσθήκες

(wave impeding blocks - WIB) κάτω ή δίπλα από έναν σιδηρόδρομο για το μετριασμό των δονήσεων. Μέσω του ανωτέρω μηχανισμού, τα μπλοκ παρεμπόδισης κύματος (WIB) μπορούν να τροποποιήσουν τη διάδοση των κυμάτων στο έδαφος (RIVAS D4.1, 2011).

Η αποτελεσματικότητα του μέτρου αυτού εξαρτάται από το μέγεθος του WIB σε σχέση με το μήκος κύματος του προσπίπτοντος κύματος. Συγκεκριμένα, το πλάτος του μπλοκ θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο σε σύγκριση με το κυρίαρχο μήκος κύματος που εμφανίζεται στο έδαφος. Ένα άκαμπτο υπόστρωμα με άπειρες πλευρικές διαστάσεις που οδηγεί στη δημιουργία μιας συχνότητας αποκοπής ή στην αύξηση της υπάρχουσας συχνότητας αποκοπής λόγω της υψηλότερης στιβαρότητας του υποστρώματος είναι η θεωρητικά βέλτιστη λύση. (βλέπε Εικόνα 4.8 (a)). Συνεπώς, θα μειώνονταν σημαντικά τα επίπεδα των δονήσεων στην περιοχή χαμηλών συχνοτήτων. Πάρα ταύτα, πρακτικά μπορούν να δημιουργηθούν μόνο μπλοκ με συγκεκριμένες τελικές διαστάσεις (βλέπε Εικόνα 4.8(b)). Αριθμητικές προσομοιώσεις έχουν δείξει ότι στην περιοχή συχνοτήτων κάτω από 30 Hz μπορεί να επιτευχθεί μια σημαντική μείωση. Ωστόσο μειώσεις εμφανίζονται και για συχνότητες μέχρι 40 - 50 Hz. (RIVAS D4.1, 2011).

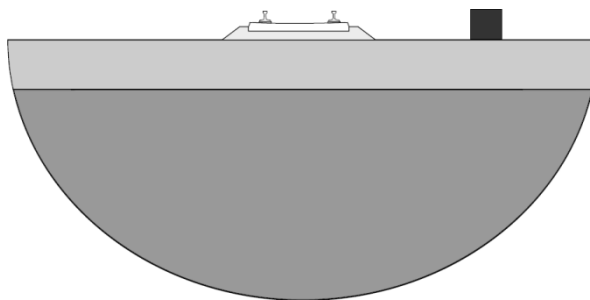


Εικόνα 4.8: Μπλοκ παρεμπόδισης κύματος ακριβώς κάτω από τον σιδηρόδρομο (a): Με άπειρες πλευρικές διαστάσεις, (b): Με συγκεκριμένες διαστάσεις (RIVAS D4.1, 2011).

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να λαμβάνεται αναφορικά με την ακριβή θέση εγκατάστασης του μπλοκ, καθώς το επίπεδο των δονήσεων ενισχύεται σε συχνότητες υψηλότερες από τη συχνότητα αποκοπής. Επίσης, η κατασκευή των WIB πρέπει να γίνεται από υλικό πιο στιβαρό από αυτό της εδαφικής στρώσης, το οποίο ως συνήθως είναι σκυρόδεμα (RIVAS D4.1, 2011).

4.5. Κυματικοί ανακλαστήρες

Αυτό το μέτρο μετριασμού δονήσεων μέσω κυματικών ανακλαστήρων (wave reflectors), όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.9, συνίσταται στην τοποθέτηση βαρέων μαζών στην επιφάνεια του εδάφους δίπλα στη σιδηροδρομική γραμμή, π.χ., μεγάλες πέτρες ή μπλοκ σκυροδέματος. Η διατάραξη αυτή του μέσου διάδοσης των δονήσεων προκαλεί τη σκέδαση των προσπιπτόντων κυμάτων σε επιφανειακά κύματα και κύματα χώρου. Συνεπώς, μειώνεται το διαδιδόμενο φάσμα κυμάτων κατάντη της θέσης παρέμβασης. Η τεκμηρίωση της αποτελεσματικότητας του μέτρου αυτού απαιτεί την εκπόνηση περισσότερων αριθμητικών και πειραματικών δοκιμών (RIVAS D4.1, 2011).



Εικόνα 4.9: Κυματικός ανακλαστήρας δίπλα σε σιδηρόδρομο (RIVAS D4.1, 2011).

4.6. Διογκωμένη πολυστερίνη

4.6.1. Έννοια και γενικά χαρακτηριστικά

Ο γεωαφρός διογκωμένης πολυστερίνης (EPS (Expanded PolyStyrene)) είναι ένα βιομηχανικό γεωσυνθετικό προϊόν που αποτελείται από θερμικά συγκολλημένες κυψέλες διογκωμένου πολυστυρενίου. Είναι πλαστικό (πολυμερές) υλικό με κορυφαίες ιδιότητες το χαμηλό βάρος συνδυαστικά με την σχετικά μεγάλη συμπιεστότητα και δυσκαμψία. Παράγεται από συμπαγείς κόκκους του πολυμερούς στυρενίου, μετά από θέρμανση με ατμό (<https://www.styropan.gr/proionta/domisi>). Για τη χρήση στα γεωτεχνικά έργα τοποθετείται σε ειδικές φόρμες (καλούπια) κατά την παραγωγή και παράγονται ορθογώνια παραλληλεπίπεδα τεμάχια (μπλοκ) πάχους $\geq 0,5\text{m}$ και πλάτους $\geq 1,0\text{m}$

(Παπαχαλαράμπους κ.α., 2010). Στην Εικόνα 4.10 φαίνονται τα ορθογωνικά αυτά μπλοκ μετά την παραγωγή.



Εικόνα 4.10: Μπλοκ EPS.

4.6.2. Πλεονεκτήματα χρήσης σε τεχνικά έργα και φυσικομηχανικές ιδιότητες

Τα κύρια χαρακτηριστικά του γεωαφρού EPS είναι τα εξής (ΠΕΤΕΠ 02-07-07-00 , 2017):

- Έχει πολύ μικρή πυκνότητα ρ , η οποία κυμαίνεται από 12 έως 60 kg/m³ και αυτό το καθιστά το ελαφρύτερο από τα συνήθη ελαφροβαρή υλικά.
- Η συμπιεστότητα του υλικού είναι πολύ μικρή σε σύγκριση με άλλα υλικά, ενώ παράλληλα μπορεί να μειωθεί ακόμα περισσότερο με πρόσθετη επεξεργασία κατά την παραγωγή του.

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης του στα τεχνικά έργα είναι (ΠΕΤΕΠ 02-07-07-00, 2017; <http://www.epshellas.com/index.php/faq>, 2018; Παπαχαλαράμπους και άλλοι, 2010):

- Είναι διαθέσιμο σε μεγάλη ποικιλία τύπων και διαστάσεων.
- Υπάρχει ευρεία παραγωγή και διαθεσιμότητα.
- Αποτελεί άριστο θερμομονωτικό υλικό, καθώς αποτελείται από 98% αέρα και επίσης οικονομικά συμφέρον καθώς έχει την καλύτερη αναλογία τιμής/απόδοσης συγκρινόμενο με οποιοδήποτε άλλο μονωτικό υλικό.
- Έχει καλή ακουστική μόνωση, είτε για ήχο μεταδιδόμενο δια στερεών υλικών είτε δια αέρος.
- Είναι ανθεκτικό στην υγρασία.

- Έχει διάρκεια εφ' όρου ζωής καθώς δεν αποσυντίθεται.
- Έχει πολλαπλή χρησιμότητα σε οποιοδήποτε σχήμα ή μέγεθος.
- Έχει εύκολη μεταφορά και εγκατάσταση στον τόπο του έργου, λόγω του μικρού ειδικού βάρους του.
- Διαθέτει «αυτοσβενύμενο» τύπο που περιέχει επιβραδυντικά στοιχεία σε περίπτωση πυρκαγιάς.
- Είναι μη τοξικό και συνεπώς πολύ ασφαλές τόσο περιβαλλοντολογικά όσο και για την ανθρώπινη υγεία. Δεν περιέχει χλωροφλοράνθρακες (CFCs) ή υδροφλοράνθρακες (HCFCs) για όλη τη διάρκεια της ζωής του.
- Δεν έχει κίνδυνο εμφάνισης μυκητιάσεων ή μικροοργανισμών, καθώς δεν περιέχει καμία διατροφική αξία εντός της μάζας του. Το EPS δεν φθείρεται, δεν χαλαρώνει λόγω διαποτισμού, δεν αποτελεί τροφή για παράσιτα ή τρωκτικά και δεν υπόκειται σε αλλοιώσεις από την πανίδα και χλωρίδα του άμεσου περιβάλλοντος.
- Είναι ανακυκλώσιμο.
- Πολλές φορές επιταχύνει τη διαδικασία κατασκευής των έργων, καθώς αντικαθιστά κλασικές κοστοβόρες κατασκευαστικές τεχνικές.
- Συνήθως, μειώνει τις απαιτήσεις συντήρησης κατά τη διάρκεια ζωής του έργου.

Τα χαρακτηριστικά που αφορούν τη φέρουσα ικανότητα του EPS είναι από τα πιο σημαντικά για τις περισσότερες γεωτεχνικές εφαρμογές. Οι διάφοροι τύποι EPS βασίζονται στην ονομαστική θλιπτική αντοχή σ_{10} ή CS(10), η οποία αντιστοιχεί σε παραμόρφωση $\varepsilon=10\%$, ενώ σε ειδικές περιπτώσεις προβλέπεται κατηγοριοποίηση με βάση τη θλιπτική αντοχή σ_2 (CS(2)) ή σ_5 (CS(5)), που αντιστοιχούν σε παραμόρφωση $\varepsilon=2\%$ ή $\varepsilon=5\%$, αντίστοιχα. Στον Πίνακα 4.1 φαίνονται οι τιμές της θλιπτικής αντοχής για διάφορα επίπεδα παραμόρφωσης σε συνδυασμό με την πυκνότητα του υλικού. Το μέτρο ελαστικής συμπίεσης υπολογίζεται σε MPa βάση της σχέσης:

$$E_t = 0,45 \cdot \rho - 3 \quad (4.1)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του υλικού σε kg/m^3 . Αναφορικά με την ονομαστική μόνιμη θλιπτική αντοχή $\sigma_{10;perm}$, ο γεωαφρός EPS αναμένεται να παρουσιάσει ερπυστικές θλιπτικές παραμορφώσεις έως 2% μετά από 50 έτη όταν υποβάλλεται σε μόνιμη θλιπτική τάση μικρότερη από το 30% της σ_{10} και δίνεται από τον τύπο:

$$\sigma_{10;perm} = 0,30 \cdot \sigma_{10} \quad (4.2)$$

Η ονομαστική θλιπτική αντοχή υπό ανακυκλική φόρτιση είναι:

$$\sigma_{10;cycl} = 0,35 \cdot \sigma_{10} \quad (4.3)$$

Παραμόρφωση	10%	5%	2%	1%	Πυκνότητα
ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ				(kg/m ³)
EPS 40	40	35	30	15	11.0
EPS 50	50	40	35	20	12.0
EPS 60	60	50	45	23	14.0
EPS 70	70	60	50	25	15.0
EPS 80	80	70	60	30	16.0
EPS 90	90	80	65	33	17.5
EPS 100	100	90	75	37	19.0
EPS 110	110	95	80	40	20.0
EPS 120	120	100	90	45	21.0
EPS 130	130	110	95	48	22.0
EPS 140	140	120	105	52	23.5
EPS 150	150	130	110	55	25.0
EPS 200	200	170	150	75	29.0
EPS 250	250	215	190	95	33.0
EPS 270	270	230	200	100	35.0
EPS 280	280	240	205	105	36.0

Πίνακας 4.1: Τιμές θλιπτικής αντοχής του EPS για διάφορα επίπεδα παραμόρφωσης ε και πυκνότητας ρ (ΠΕΤΕΠ 02-07-07-00, 2017).

Ο Πίνακας 4.2 παρουσιάζει τις βασικές μηχανικές ιδιότητες γεωαφρού EPS. Για το σχεδιασμό χρησιμοποιείται ένας προτεινόμενος μειωτικός επιμέρους συντελεστής υλικού γ_m ίσος 1.25 (ΠΕΤΕΠ 02-07-07-00 , 2017).

ΙΔΙΟΤΗΤΑ			ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ EPS				
Περιγραφή	Σύμβολο	Μονάδα	EPS 60	EPS 100	EPS 150	EPS 200	EPS 250
Θλιπτική αντοχή (ονομαστική τιμή)	σ_{10}	kPa	60	100	150	200	250
Θλιπτική αντοχή (τιμή σχεδιασμού)	$\sigma_{10;d}$	kPa	48	80	120	160	200
Μέτρο ελαστικής συμπίεσης	E_t, E_{dyn}	MPa	4	5	8	10	12
Μόνιμη θλιπτική αντοχή (ονομαστική τιμή)	$\sigma_{10;perm}$	kPa	18	30	45	60	75
Μόνιμη θλιπτική αντοχή (τιμή σχεδιασμού)	$\sigma_{10;perm;d}$	kPa	14,4	24	36	48	60
Θλιπτική αντοχή υπό ανακυκλική φόρτιση	$\sigma_{10;cycl}$	kPa	21	35	52,5	70	87,5

(ονομαστική τιμή)							
Θλιπτική αντοχή υπό ανακυκλική φόρτιση (τιμή σχεδιασμού)	$\sigma_{10;cycl;d}$	kPa	17	28	42	56	70

Πίνακας 4.2: Βασικές μηχανικές ιδιότητες γεωαφρού EPS (ΠΕΤΕΠ 02-07-07-00, 2017).

4.6.3. Εφαρμογή σε οδικά επιχώματα

Η ιδιότητα του EPS που το καθιστά ιδανικό στη χρήση για την κατασκευή ελαφροβαρών επιχωμάτων είναι ότι το βάρος του είναι περίπου το 1% του βάρους του εδάφους και λιγότερο από το 10% του βάρους άλλων εναλλακτικών προϊόντων πλήρωσης, ανακουφίζοντας από τα επιβαλλόμενα φορτία, εδάφη και κατασκευές (<https://www.styropan.gr/proionta/domisi>, 2018). Σε πολλές περιπτώσεις η κατασκευή του επιχώματος και η τοποθέτηση του οδοστρώματος πάνω σε αυτό αντιμετωπίζει τον κίνδυνο καθολικής εδαφικής αστοχίας λόγω υπέρβασης της φέρουσας ικανότητας του υποκείμενου εδάφους και την εμφάνιση σημαντικών άμεσων και δευτερογενών καθιζήσεων. Η κατασκευή του επιχώματος με γεωαφρό EPS και η τοποθέτηση του οδοστρώματος πάνω στον γεωαφρό αποτελεί μία ασφαλή και άμεση λύση (ΠΕΤΕΠ 02-07-07-00, 2017). Για την εφαρμογή σε οδικά επιχώματα χρησιμοποιείται υλικό με φαινόμενη πυκνότητα $\gamma=15-30 \text{ kg/m}^3$, θλιπτική αντοχή $\sigma_{10}= 60\div 200\text{kPa}$ και μέτρο ελαστικής συμπίεσης $E=4-10 \text{ MPa}$. Το EPS μπορεί να αντικαθιστά το σύνολο ή μέρος του γαιώδους επιχώματος και να τοποθετείται σε συναρμογή με προϋπάρχον επίχωμα ή άλλες κατασκευές (Παπαχαράλαμπους κ.α., 2010).

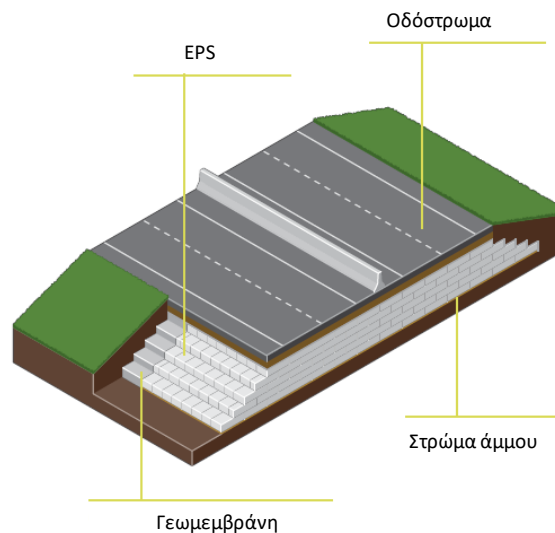
Η χρήση του EPS στην κατασκευή οδικών επιχωμάτων σε μαλακά και συμπιεστά εδάφη έχει τα εξής σημαντικά πλεονεκτήματα (Παπαχαράλαμπους κ.α., 2010; <http://www.madel.gr/el/EPS/metavatika-epihomata>):

- Μείωση των επιβαλλόμενων φορτίων στο έδαφος σε ποσοστά μεγαλύτερα του 20% σε σχέση με το συμβατικό επίχωμα.
- Συντόμευση του χρόνου κατασκευής.
- Βελτίωση της σεισμικής συμπεριφοράς με μείωση της δυναμικής επιφόρτισης (σεισμικής) σε ποσοστά μεγαλύτερα του 50%.
- Μηδενική επιβάρυνση γειτονικών κατασκευών.

- Αποφυγή μέτρων βελτίωσης του υπεδάφους και ελαχιστοποίηση των αβεβαιοτήτων λόγω της συμπεριφοράς του.
- Μείωση χρήσης δάνειων και λατομικών υλικών.
- Μακροχρόνια σταθερότητα του υλικού στο επίχωμα.
- Δυνατότητα ακριβούς ελέγχου του βιομηχανικά παραγόμενου προϊόντος.
- Απλοποίηση του σχεδιασμού, καθώς υπάρχει υποστήριξη βάσει διεθνούς εμπειρίας, συστάσεων και κανονισμών.

Η πρώτη κατασκευή επιχώματος από EPS έγινε στη Νορβηγία το 1972. Έκτοτε η εφαρμογή του επεκτάθηκε σε πολλές χώρες και σε πλήθος έργων, υποστηριζόμενη από επιτόπου μετρήσεις της συμπεριφοράς, εργαστηριακό έλεγχο και διαμόρφωση συστάσεων και κανονισμών. Η πρώτη εφαρμογή στην Ελλάδα έγινε στον αυτοκινητόδρομο ΠΑΘΕ (περιοχή Θερμοπυλών), όπου επικρατούν εξαιρετικά δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες και κατά την αρχική κατασκευή συμβατικού επιχώματος έλαβε χώρα αστοχία. Ένα ελαφρύ επίχωμα ύψους από 7,5 έως 8,5m εφαρμόστηκε σε μήκος περίπου 820m στον αυτοκινητόδρομο ΠΑΘΕ και σε μήκος περίπου 210m στον Κλάδο Θερμοπυλών. Με τη χρήση υλικών EPS οι καθιζήσεις και ο χρόνος κατασκευής του έργου περιορίστηκαν δραστικά (Παπαχαλαράμπους κ.α., 2010; <http://www.epshellas.com/index.php/eps/geoafros/elafra-epichomata>, 2018).

Το επίχωμα από γεωαφρό EPS (βλέπε Εικόνα 4.11) πρέπει να σχεδιάζεται ώστε να αποτρέπεται η αστοχία και να εξασφαλίζεται η λειτουργικότητα στο σύνολό του, καθώς και σε καθένα από τα τμήματά του ξεχωριστά. Διακρίνονται τα εξής τρία κύρια μέρη: το εδαφικό υπόστρωμα, η επίχωση με πρίσματα EPS μαζί με την εδαφική επικάλυψη και το οδόστρωμα.



Εικόνα 4.11: Κατασκευή επιχώματος με χρήση γεωαφρού EPS (ΠΕΤΕΠ 02-07-07-00, 2017).

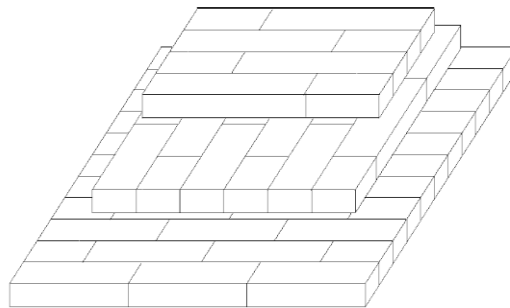
Οι κυριότεροι κανόνες σχεδιασμού είναι οι εξής (Παπαχαραλάμπους κ.α., 2010; ΠΕΤΕΠ 02-07-07-00, 2017):

- Το υλικό καλύπτεται περιμετρικά με στεγανωτικά υλικά και επιχωμάτωση, ώστε να προστατεύεται έναντι εκχύσεων πετρελαιοειδών, πυρκαγιάς και ανύψωσης λόγω άνωσης.
- Στη στέψη του η προστασία γίνεται συχνά με πλάκα ελαφρά οπλισμένου σκυροδέματος, που συνεισφέρει επιπλέον στην αύξηση της φέρουσας ικανότητας έδρασης του υπερκείμενου οδοστρώματος.
- Για την αντιμετώπιση του φαινομένου απώλειας ισορροπίας έναντι άνωσης λαμβάνονται μέτρα αποστράγγισης και συλλογής με δίκτυο πλευρικών τάφρων και γίνονται οι σχετικοί υπολογιστικοί έλεγχοι.
- Ο σχεδιασμός βασίζεται σε τρεις κατηγορίες ελέγχων. Αυτές είναι: οι έλεγχοι εξωτερικής ευστάθειας που αφορούν τη γεωμετρία του επιχώματος και τις πλευρικές επιφάνειες, οι έλεγχοι εσωτερικής ευστάθειας και ο έλεγχος του συστήματος του οδοστρώματος.
- Η ζώνη μετάβασης ανάμεσα στον γεωαφρό και το έδαφος του επιχώματος θα πρέπει να είναι σταδιακή για να ελαχιστοποιούνται οι διαφορικές καθιζήσεις.
- Συνιστάται η κατασκευή τουλάχιστον δύο στρώσεων από πρίσματα για να ελαχιστοποιείται η πιθανότητα μετατόπισής τους υπό την επίδραση των φορτίων κυκλοφορίας.

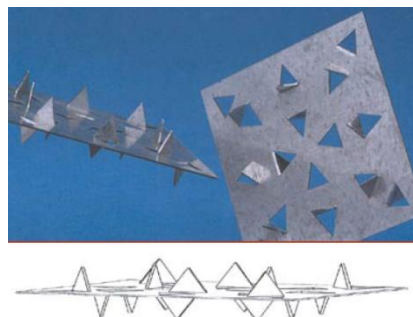
- Οι πλευρικές επιφάνειες των πρισμάτων EPS πρέπει πάντα να καλύπτονται τόσο για λόγους προστασίας, όσο και για αισθητικούς λόγους.
- Τα μεμονωμένα πρίσματα EPS θα πρέπει να έχουν επαρκή αλληλεμπλοκή, τόσο κατακορύφως, όσο και οριζοντίως, για να αποκρίνονται ομαδικά σαν μία ενιαία συνεκτική μάζα όταν υποβάλλονται σε εξωτερική φόρτιση και για να ελαχιστοποιούνται οι ενδεχόμενες διαφορικές καθιζήσεις (βλέπε Εικόνα 4.12).
- Απαιτείται η κατασκευή κατάλληλης γεωμεμβράνης, έτσι ώστε το σύστημα του οδοστρώματος να μην ολισθαίνει οριζόντια πάνω στην ανώτερη επιφάνεια του EPS όταν το επίχωμα υποβάλλεται σε σεισμική φόρτιση.
- Οι αναπτυσσόμενες διατμητικές δυνάμεις κατά μήκος των οριζόντιων διεπιφανειών μεταξύ των στρωμάτων από πρίσματα EPS είναι αυτές που τα συγκρατούν στη θέση τους έναντι των οριζόντιων φορτίων. Η γωνία τριβής κατά Mohr-Coulomb για ολίσθηση διεπιφάνειας EPS-EPS είναι περίπου 30° (συγκρίσιμη με αυτή της άμμου), όμως η διατμητική αντοχή είναι γενικά σχετικά μικρή σε μέγεθος επειδή οι κατακόρυφες ορθές τάσεις είναι μικρές. Εάν η διατμητική αντοχή δεν επαρκεί έναντι των οριζόντιων σεισμικών δυνάμεων, απαιτείται οριζόντια αγκύρωση μεταξύ των πρισμάτων EPS για να ενισχυθεί η συνοχή μεταξύ τους η οποία επιτυγχάνεται με την προσθήκη μηχανικών συνδετήρων μεταξύ των πρισμάτων (βλέπε Εικόνα 4.13) .
- Η επιλογή του τύπου του EPS πρέπει να είναι τέτοια ώστε έτσι ώστε οι μέγιστες κατακόρυφες τάσεις να είναι μικρότερες από τις τιμές που δίνονται στον Πίνακα 4.1.
- Η σωστή προετοιμασία της τοποθεσίας του έργου πριν την τοποθέτηση των πρισμάτων EPS είναι πολύ σημαντικός παράγοντας ευστάθειας. Δεν θα πρέπει να υπάρχει στάσιμο νερό ή συσσωρευμένος πάγος ή χιόνι μέσα στην περιοχή όπου θα τοποθετηθούν τα πρίσματα EPS λόγω της πιθανότητα ανύψωσης των πρισμάτων λόγω άνωσης κατά τη διάρκεια της κατασκευής. Επίσης, πρέπει να εξασφαλίζεται η διατήρηση της επαρκούς απορροής των ομβρίων στην περιοχή του έργου. Ακόμη, δεν θα πρέπει να υπάρχουν μπάζα ή μεγάλα τμήματα βλάστησης που προεξέχουν από

το υπόστρωμα πάνω στο οποίο θα τοποθετηθούν τα πρίσματα EPS για την αποτροπή ζημιών στα πρίσματα EPS του πρώτου στρώματος. Η τοποθέτηση ενός στρώματος άμμου στην επιφάνεια του υπάρχοντος εδάφους θεμελίωσης λύνει το θέμα και εξασφαλίζει την απαραίτητη επιπεδοποίηση του πρώτου στρώματος των πρισμάτων. Η επιφάνεια πρέπει να είναι επαρκώς επίπεδη πριν την τοποθέτηση του πρώτου στρώματος από πρίσματα. Η μέγιστη κλίση δεν πρέπει να ξεπερνά τα $\pm 10\text{mm}$ (κατακόρυφα) σε αποστάσεις των 3m.

- Όταν η επιφάνεια της στρώσης γίνει ανώμαλη κατά την τοποθέτηση, η πιο κοινή λύση είναι η έγχυση ενός λεπτού στρώματος άοπλου σκυροδέματος, για την τοποθέτηση των ανώτερων στρώσεων.



Εικόνα 4.12: Διάταξη ορθής τοποθέτησης πρισμάτων EPS στο επίχωμα (ΠΕΤΕΠ 02-07-07-00, 2017).



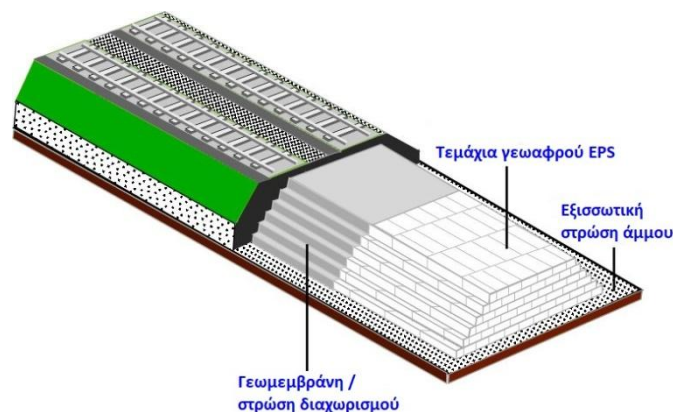
Εικόνα 4.13: Οδοντωτή μεταλλική πλάκα για την ενίσχυση της συνοχής μεταξύ πρισμάτων EPS (ΠΕΤΕΠ 02-07-07-00, 2017).

4.6.4. Εφαρμογή σε σιδηροδρομικό επίχωμα

Το EPS, όπως αναφέρθηκε, έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε οδικά επιχώματα με στόχο την αντιμετώπιση ζητημάτων σταθερότητας. Η εμπειρία αυτή

έχει αποδείξει ότι το EPS δημιουργεί σταθερά οδικά επιχώματα, αλλά το ζήτημα που έχει ενδιαφέρον είναι η απόδοση ενός σιδηροδρομικού αναχώματος από EPS ως μέτρο μείωσης των παραμορφώσεων και των δονήσεων. Αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη εφαρμογή η οποία διερευνάται από κάθε τεχνοοικονομική πτυχή σε όλα τα επίπεδα, ενώ αναλύσεις κόστους - οφέλους έχουν δείξει ότι υπάρχει μείωση του συνολικού κόστους κατασκευής. Η γεωμετρία του επιχώματος καθώς και οι μηχανικές ιδιότητες του EPS και του υπεδάφους θα πρέπει να συνδυαστούν σωστά κατά το βέλτιστο τρόπο σε σχέση με την ταχύτητα του τρένου. Το μέτρο αυτό μπορεί να εφαρμοστεί και ως παρέμβαση σε υφιστάμενες σιδηροδρομικές γραμμές για βελτιστοποίηση της συμπεριφοράς τους (<http://www.epshellas.com/index.php/eps/geoafros/trena-epsilon-taxutiton>).

Παρά τα ανωτέρω, η χρήση του γεωαφρού EPS στα σιδηροδρομικά επιχώματα δεν έχει μελετηθεί επιστημονικά σε μεγάλο βαθμό. Οι λιγοστές υφιστάμενες μελέτες εστιάζουν αποκλειστικά στην παρακολούθηση της κατακόρυφης παραμόρφωσης, ενώ άλλες δείχνουν ότι η παρουσία του EPS μειώνει τις παραμορφώσεις (Neurane, 2015). Το γεγονός αυτό συνεπάγεται και ταυτόχρονη μείωση των εδαφικών δονήσεων. Στην Εικόνα 4.14 απεικονίζεται ένα σιδηροδρομικό EPS επίχωμα αντίστοιχο του οδικού, ενώ στην Εικόνα 4.15 ένα παράδειγμα εφαρμογής σε κατασκευαστικό στάδιο.



Εικόνα 4.14: Σιδηροδρομικό EPS επίχωμα (<http://www.alliedfoamtech.com/Appgeotechfoam.htm>, 2018).

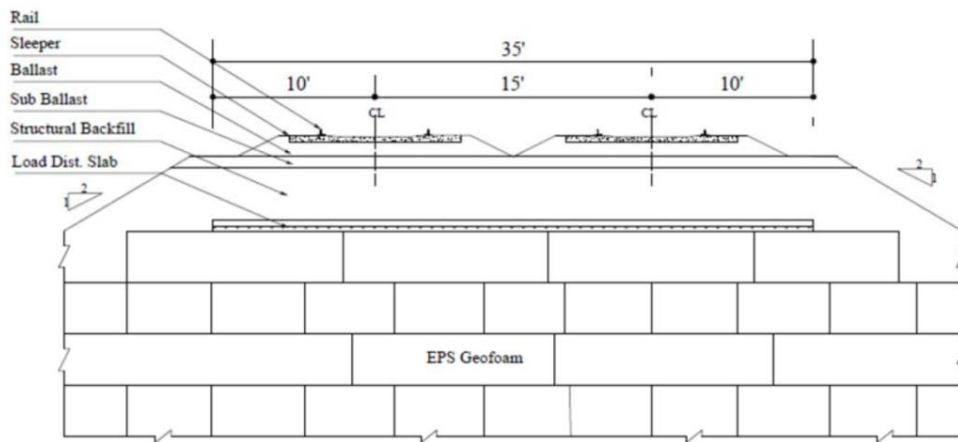


Εικόνα 4.15: Σιδηροδρομικό EPS επίχωμα στην κατασκευή
(https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/The_use_of_Stylite_EPS_Geofill_in_rail_embankments, 2018).

Το EPS επίχωμα έχει εφαρμοστεί σε σιδηρόδρομο στο Salt Lake City της Γιούτα των Η.Π.Α. Χρησιμοποιήθηκε στη γραμμή FrontRunner στο Corner Canyon στην Draper City, για την ελαχιστοποίηση των φορτίων πάνω από έναν οχετό οπλισμένου σκυροδέματος. Το επίχωμα αυτό φαίνεται στην Εικόνα 4.16, ενώ η Εικόνα 4.17 δείχνει τη σχηματική τομή του.



Εικόνα 4.16: EPS επίχωμα στο Draper City της Γιούτα των Η.Π.Α. (Neupane, 2015).



Εικόνα 4.17: Σχηματική τομή του EPS επίχωματος στο Draper City της Γιούτα των Η.Π.Α. (Neupane, 2015).

Οι δυναμικές παραμορφώσεις του EPS επιχώματος και των παρακείμενων συμβατικών επιχωμάτων μετρήθηκαν με επί τόπου μετρήσεις και υπολογίστηκαν και αριθμητικά (Neupane, 2015). Το συμβατικό εδαφικό επίχωμα εμφάνισε μέση κατακόρυφη μετακίνηση 7,5mm και μέγιστη 22mm, ενώ το EPS επίχωμα 2mm και 6mm αντίστοιχα. Συνεπώς, η ποσοστιαία διαφορά των δυο ειδών επιχωμάτων ήταν περίπου 75% για τη μέση και 72% για τη μέγιστη μετακίνηση. Οι τόσο μεγάλες μετακινήσεις στην περίπτωση του συμβατικού επιχώματος ίσως να οφείλονται στις πλευρικές ωθήσεις του εδάφους εξαιτίας του συνδυασμού των κατακόρυφων μόνιμων και κινητών φορτίων. Το παραπάνω δεν συμβαίνει στην περίπτωση του EPS επιχώματος, λόγω της σχετικής ιδιότητας του υλικού EPS (Neupane, 2015).

Ένα άλλο παράδειγμα εφαρμογής EPS σιδηροδρομικού επιχώματος αποτελεί η κατασκευή νέας σιδηροδρομικής γραμμής στο Nuneaton Station στα Δυτικά Μίντλαντς της Αγγλίας στα πλαίσια ανακαίνισης της κύριας γραμμής της δυτικής ακτής (West Coast Main Line (WCML)) κατά τα έτη 2002-2004. Υπήρχαν πολλαπλοί λόγοι για την επιλογή της τεχνικής αυτής. Μια από αυτές ήταν το ιδιαίτερα μαλακό έδαφος που ήταν πρόσφίλο σε καθιζήσεις. Επίσης, η εφαρμογή άλλων μεθόδων σταθεροποίησης, όπως οι στήλες από πέτρες, ενείχε τον κίνδυνο της αστοχίας μιας υπόγειας τοιχοποιίας της γέφυρας του ποταμού Anker. Η κατασκευή ξεκίνησε με στρώσεις πορώδους σκυροδέματος, με στρώση άμμου

75mm και με μια προστατευτική μεμβράνη πάνω από το κατάστρωμα της υφιστάμενης θαμμένης γέφυρας. Το ύψος του EPS έφτασε τις 4,5 στρώσεις μπλοκ στο κέντρο. Στη συνέχεια το σύνολο των EPS καλύφθηκε με κοκκώδες υλικό για την δημιουργία της κλίσης του σιδηρόδρομου και τη διαμόρφωση της κλίσης των πλευρικών πρανών. Ακολούθως, καλύφθηκε με αντιολισθητικό πλέγμα και επιφανειακό έδαφος. Τέλος, πάνω το επίχωμα, κατασκευάστηκε πλάκα σκυροδέματος πάχους 250mm για να στηρίξει τον σιδηρόδρομο και τους στύλους του συστήματος των εναέριων γραμμών (<https://www.newcivilengineer.com/polystyrene-makes-light-work-of-new-railway-embankment/743787.article>, 2018).

Κεφάλαιο 5^ο

Αριθμητική προσομοίωση επιχώματος

Στο πλαίσιο της παρούσης εργασίας μελετήθηκε η δονητική απόκριση του εδάφους εξαιτίας της διέλευσης του τρένου σε διάφορες ταχύτητες επάνω σε σιδηρόδρομο υψηλών ταχυτήτων με πλάκα σκυροδέματος (σταθερή επιδομή ή δύσκαμπτη έδραση), ο οποίος εδράζεται σε εδαφικό επίχωμα. Εξετάζεται το μέτρο περιορισμού δονήσεων που έγκειται στην παρέμβαση στη διαδρομή της διάδοσης αυτών και συγκεκριμένα στην παρέμβαση στις φυσικομηχανικές ιδιότητες του επιχώματος. Το συμβατικό (εδαφικό) σιδηροδρομικό επίχωμα αντικαθίσταται με επίχωμα κατασκευασμένο με τη χρήση γεωαφρού διογκωμένης πολυστερίνης.

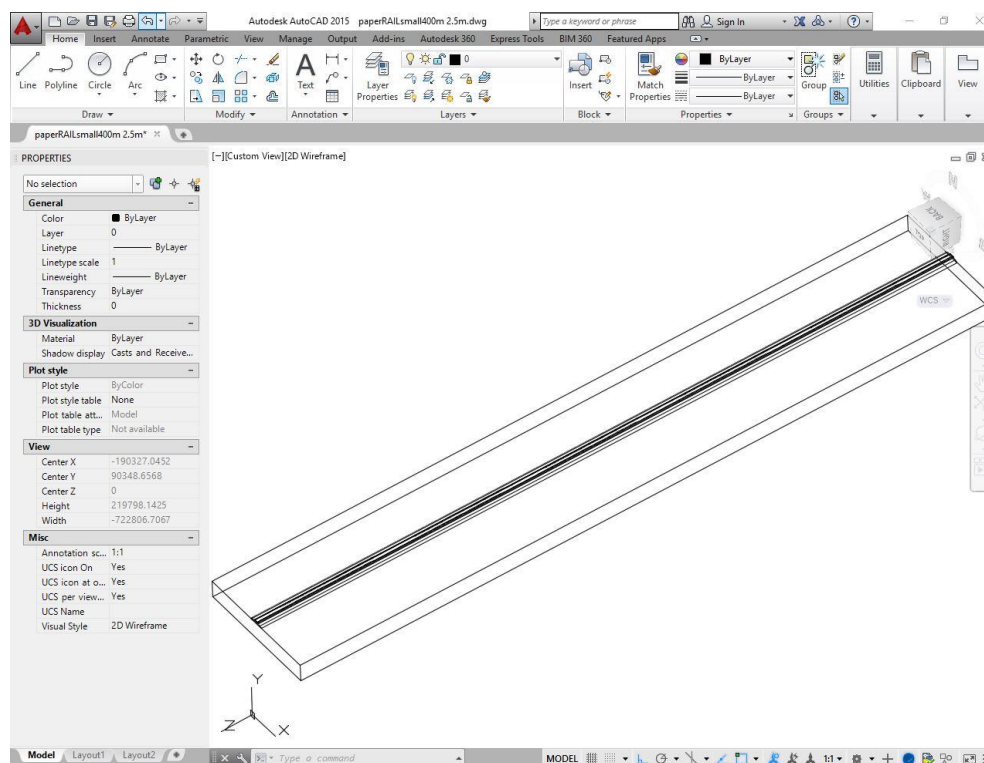
Διερευνώνται οι θεμελιώδεις αποκρίσεις των δονήσεων της επιφάνειας εδάφους κατά μήκος της εγκάρσιας κατεύθυνσης κίνησης του τρένου και συγκεκριμένα οι κατακόρυφες μετακινήσεις σε διαφορετικές αποστάσεις από τη σιδηροτροχιά. Ο σκοπός της συγκεκριμένης προσομοίωσης είναι αφενός η εύρεση των χρονοϊστοριών εδαφικών μετατοπίσεων στις διαφορές θέσεις ανάλογα με την ταχύτητα του τρένου για την περίπτωση του εδαφικού επιχώματος και αφετέρου η σύγκριση με την περίπτωση του «EPS επιχώματος» ώστε να αξιολογηθεί η απόδοση της επέμβασης αυτής. Επίσης, διερευνώνται οι μετακινήσεις στην περίπτωση που το υποκείμενο έδαφος είναι συμπαγής βράχος και για τα δυο είδη επιχώματος.

Η επιλογή των φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών των στοιχείων του συστήματος προσομοίωσης υιοθετήθηκε από την εργασία με τίτλο «Simulation and mitigation analysis of ground vibrations induced by high-speed train with three dimensional FEM» (Feng et al., 2017). Για την προσομοίωση και την ανάλυση επιλέχθηκε η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEM). Το προσομοίωμα σιδηρόδρομος – επίχωμα – έδαφος σχεδιάσθηκε στο Autocad 3D 2017 από solid επιφάνειες (βλέπε Εικόνα 5.1) και στη συνέχεια εξήχθη σε μορφή Acis (.sat) για να

μπορεί να αναγνωριστεί από το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ANSYS 17.0. Κατόπιν έγινε εισαγωγή στο ANSYS 17.0 και κατά τη διακριτοποίηση χρησιμοποιήθηκαν 3D solid τετράεδρα στοιχεία (βλ. Εικόνα 5.2).

Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί ότι δεν έγινε επαλήθευση (validation) του προσομοιώματος μέσω υφιστάμενων πραγματικών επί τόπου μετρήσεων και σχετικά με το υπολογιστικό κόστος (χρόνος επίλυσης) ότι οι επιλύσεις έγιναν σε υπολογιστή με τα εξής χαρακτηριστικά:

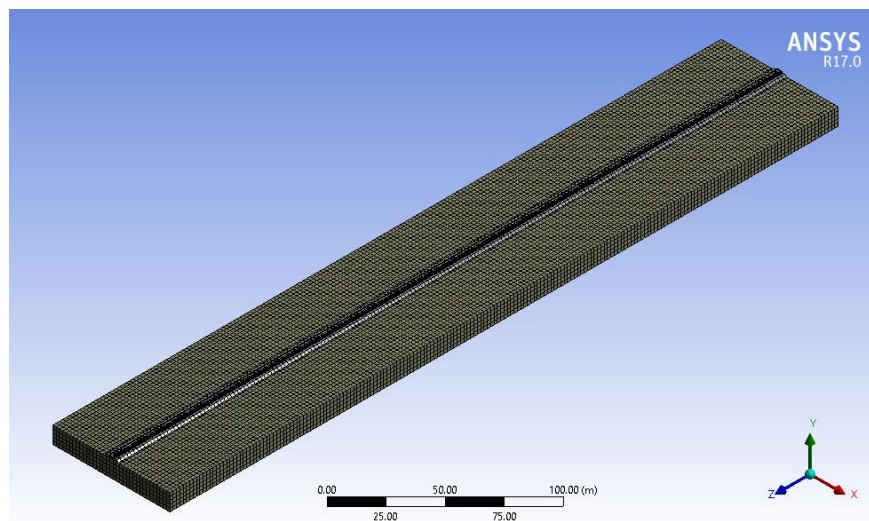
- Επεξεργαστής: Intel® Core™ i7 CPU 2.80GHz (8 CPUs).
- Λειτουργικό σύστημα: Windows 10 Pro 64-bit (10.0, Build 17134).
- Κάρτα μνήμης RAM: 12 GB (DDR3).
- Κάρτα γραφικών NVIDIA GeForce 9600 GT.



Εικόνα 5.1: Σχεδιασμός 3D προσομοιώματος σιδηρόδρομου – επιχώματος – εδάφους στο Autocad 2017.

Η επίλυση κάθε φορά διαρκούσε κατά μέσο όρο περίπου 11 hrs, δηλαδή η συνολική διάρκεια επίλυσης των προσομοιώσεων της παρούσης εργασίας ήταν περίπου 308 hrs ή 12.83 days ($280/24 \cong 12.83$ days). Συνεπώς, μπορεί να ειπωθεί ότι ο χρόνος αυτός θεωρείται σχετικά μεγάλος, ακόμα και για αυτό το σχετικά απλό προσομοίωμα. Αυτή η παρατήρηση καταδεικνύει το μεγάλο υπολογιστικό κόστος

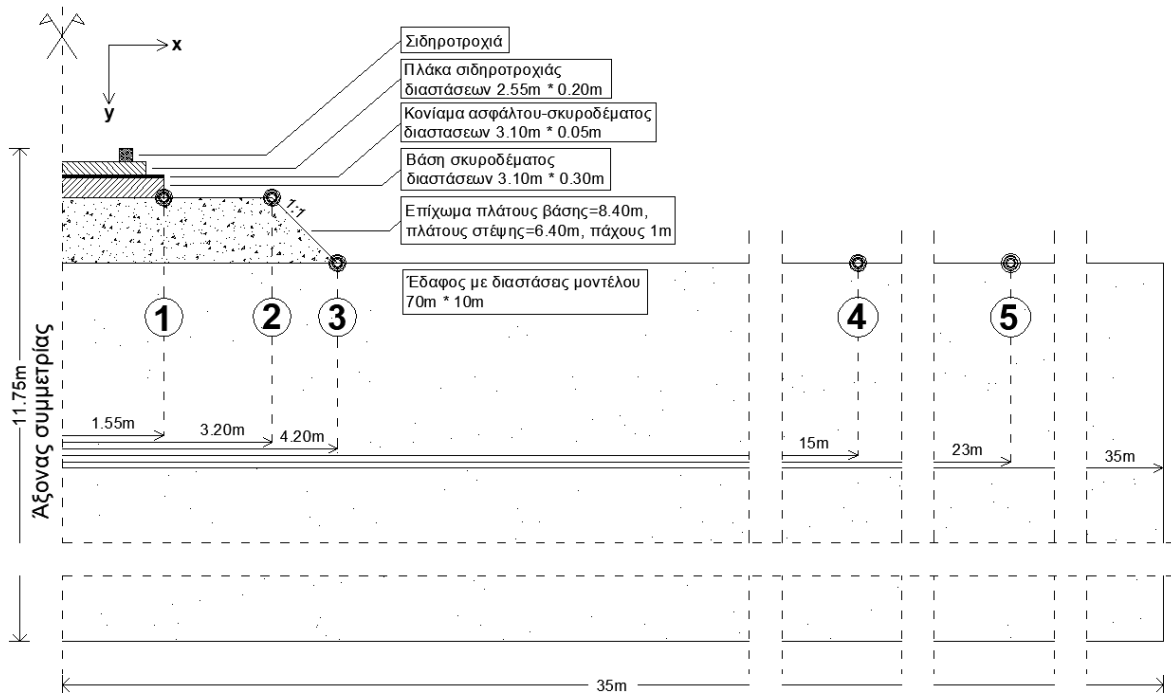
τέτοιου είδους αναλύσεων για μεγάλα και σύνθετα προβλήματα δυναμικής των κατασκευών.



Εικόνα 5.2: Εισαγωγή 3D προσομοιώματος σιδηρόδρομου – επιχώματος – εδάφους στο ANSYS 17.0.

Στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ANSYS 17.0 διαμορφώθηκε ένα τριδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα εδάφους - επιχώματος - σιδηρόδρομου - σιδηροτροχιών, αποτελούμενο συνολικά από 37.840 στοιχεία (elements), 194.713 κόμβους (nodes), 325 φορείς (bodies) με μέγεθος τετράεδρου στοιχείου (element size) 2m. Ο συνολικός όγκος του εκτείνεται 400m μέτρα στην κατεύθυνση της σιδηροδρομικής γραμμής (Length z), 70m στην εγκάρσια διεύθυνση (Length x) και 11,75m στην κατακόρυφη διεύθυνση (Length y). Το 3D αριθμητικό προσομοίωμα που δημιουργήθηκε έλαβε υπόψη τη συμμετρία του συστήματος σιδηρόδρομου – επιχώματος – εδάφους στην κατακόρυφη κατεύθυνση (y).

Για τη διερεύνηση των κατακόρυφων επιφανειακών μετακινήσεων επιλέχθηκαν πέντε συννευθιακά χαρακτηριστικά σημεία ελέγχου των κατακόρυφων μετακινήσεων, εγκάρσια της κίνησης του τρένου. Η Εικόνα 5.3 δείχνει τη συμμετρία του συστήματος σε σχηματική τομή εγκάρσια της σιδηροτροχιάς όπου φαίνονται τα συστατικά του στοιχεία και τα προεπιλεγμένα χαρακτηριστικά σημεία για τον έλεγχο των μετακινήσεων. Ο Πίνακας 5.1 δίνει τις οριζόντιες αποστάσεις των σημείων ελέγχου από την κεντρική γραμμή του σιδηρόδρομου και τα περιγράφει ποιοτικά.



Εικόνα 5.3: Σχηματική απεικόνιση του συμμετρικού προσομοιώματος και σημεία ελέγχου.

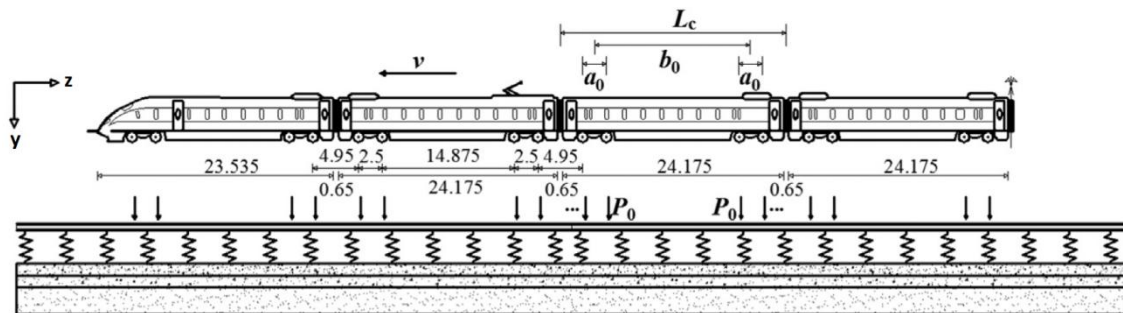
α/α σημείου	Οριζόντια απόσταση από κεντρική γραμμή σιδηρόδρομου (m)	Περιγραφή Σημείου
1	1.55	Επιφάνεια επιχώματος - πόδας σιδηρόδρομου - άκρη βάσης σκυροδέματος
2	3.20	Επιφάνεια επιχώματος - φρύδι πρανούς
3	4.20	Επιφάνεια εδάφους - πόδας πρανούς
4	15.00	Επιφάνεια εδάφους
5	23.00	Επιφάνεια εδάφους

Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά σημεία ελέγχου κατακόρυφων μετακινήσεων.

5.1. Τρένο και φορτία

Η ευθεία σιδηροδρομική γραμμή θεωρείται σε μεγάλο βαθμό αντιπροσωπευτική (Feng et al., 2017). Για αυτό η γραμμή του προσομοιώματος είναι μόνο ευθεία γραμμή και λαμβάνει υπόψη μόνο τα κατακόρυφα φορτία τρένου για τις δονήσεις μεταξύ σιδηροτροχιάς και τρένου. Το τρένο υψηλών ταχυτήτων του προσομοιώματος είναι το CRH3 που χρησιμοποιείται ευρέως στην Κίνα και

στην παρούσα περίπτωση αποτελείται από τέσσερα βαγόνια μαζί με το κινητήριο. Η γεωμετρία ενός τυπικού τρένου CRH3 φαίνεται στην Εικόνα 5.4.



Εικόνα 5.4: Σχηματική πλάϊνή όψη του τρένου CRH3 (Feng et al., 2017).

Το προσομοίωμα αυτό υποθέτει συμμετρική κατανομή των φορτίων του τρένου. Οι κατακόρυφες δυνάμεις που αντιπροσωπεύουν το φορτίο του τρένου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.4, αποτελούν μια σειρά δυνάμεων που ασκούνται στα σημεία επαφής τροχών-σιδηροτροχιάς. Η σειρά αυτή των κομβικών δυνάμεων κινείται με σταθερή ταχύτητα v στη σιδηροτροχιά. Η ταχύτητα αυτή καθορίζεται με κατάλληλες χρονικές υστερήσεις στην εφαρμογή των δυνάμεων ανάλογα με την ταχύτητα διέλευσης. Λόγω της συμμετρίας στο επίπεδο yz , το φορτίο αποτελείται συνολικά από 8 ζεύγη κατακόρυφων δυνάμεων σε κάθε σιδηροτροχιά, δηλαδή ένα ζεύγος δυνάμεων για κάθε ζεύγος τροχών. Το ισοδύναμο φορτίο άξονα P_0 καθορίστηκε να είναι 70 kN που είναι η τυπική τιμή για την αμαξοστοιχία CRH3. Το L_c (Length of Carriage) είναι το μήκος του βαγονιού, το a_0 είναι η απόσταση μεταξύ των δυο αξόνων του φορείου του βαγονιού και το b_0 είναι η κεντρική απόσταση μεταξύ δύο φορείων του ίδιου βαγονιού.

5.2. Σιδηρόδρομος

Στο προσομοίωμα αυτό η σιδηροδρομική γραμμή είναι της κατηγορίας των 60 kg/m και ο τύπος της είναι ο CRSII. Αυτός ο τύπος γραμμής χρησιμοποιείται ευρέως στην Κίνα (Feng et al., 2017). Είναι σιδηρόδρομος σταθερής επιδομής. Η προσομοιωμένη σιδηροτροχιά αποτελείται από 160 κόμβους επάνω στους οποίους εφαρμόζονται οι δυνάμεις του τρένου. Η σειρά εφαρμογής των δυνάμεων των 70 kN στους 160 κόμβους εισάχθηκε στις δυνάμεις του προσομοιώματος στην

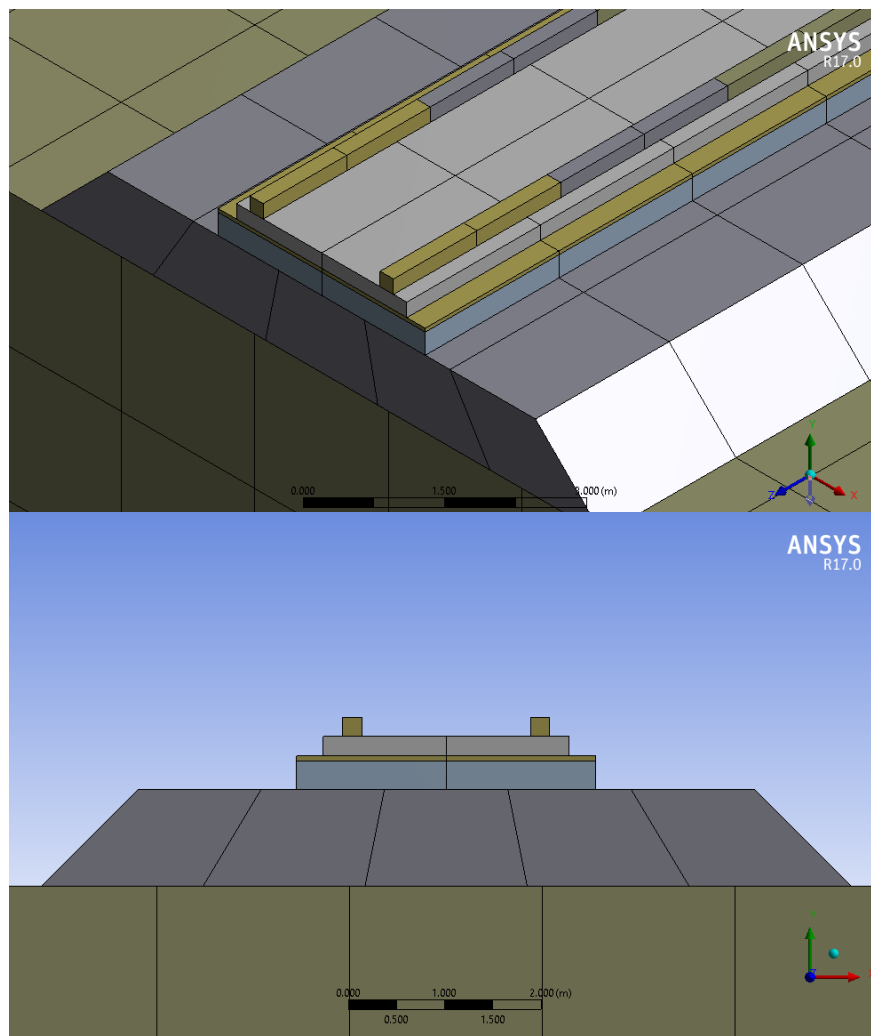
υποεφαρμογή Mechanical του ANSYS, όπως και οι χρόνοι εφαρμογής αυτών που καθορίζουν την ταχύτητα κίνησης του τρένου.

Οι σιδηροτροχιές εδράζονται σε πλάκα σκυροδέματος (Track Slab) διαστάσεων διατομής 2,55m×0,20m. Ακολουθεί μια υποκείμενη στρώση κονιάματος ασφάλτου – σκυροδέματος (Concrete – Asphalt (CA) mortar) διαστάσεων διατομής 3,10m×0,05m, η οποία στηρίζεται σε μια βάση σκυροδέματος (Concrete Base) διαστάσεων διατομής 3,10m×0,30m. Οι ελαστικές ιδιότητες των συστατικών στοιχείων του σιδηρόδρομου παρατίθενται στον Πίνακα 5.2.

Τμήμα σιδηρόδρομου \ ιδιότητες	Πυκνότητα (kg/m ³)	Μέτρο ελαστικότητας E (MPa)	Λόγος Poisson ν	Συντελεστής απόσβεσης ξ (%)
Σιδηροτροχιά	7800	$2.10 \cdot 10^5$	0.3	-
Πλάκα σκυροδέματος	2500	$3.50 \cdot 10^4$	0.22	5
Κονίαμα ασφάλτου- σκυροδέματος	2000	$1.00 \cdot 10^4$	0.3	20
Βάση σκυροδέματος	2500	$3.00 \cdot 10^4$	0.2	5

Πίνακας 5.2: Οι ελαστικές ιδιότητες των συστατικών στοιχείων του σιδηρόδρομου (τροποποιημένο από Feng et al., 2017).

Ο σιδηρόδρομος εδράζεται σε ένα τυπικό επίχωμα ύψους 1m . Τα στοιχεία που εισάγονται στο προσομοίωμα αφορούν το ήμισυ του συστήματος σιδηρόδρομου – επιχώματος – εδάφους, αφού το προσομοίωμα είναι συμμετρικό στη διεύθυνση κίνησης του τρένου. Το σκυρόδεμα των σιδηροτροχιών αποτελείται από 3.813 nodes και 400 elements, το κονίαμα σκυροδέματος – ασφάλτου από 3.813 nodes και 400 elements και η πλάκα σκυροδέματος από 3.813 nodes και 400 elements. Στην Εικόνα 5.5 φαίνεται η διαμόρφωση του σιδηρόδρομου του 3D προσομοιώματος στο ANSYS 17.0, όπου φαίνεται το μέγεθος της διακριτοποίησης των συστατικών μερών του καθώς και το σιδηροδρομικό επίχωμα.



Εικόνα 5.5: Ο σιδηρόδρομος και το επίχωμα του 3D προσομοιώματος στο ANSYS 17.0.

5.3. Επίχωμα

Το συμβατικό σιδηροδρομικό επίχωμα του προσομοιώματος έχει πλάτος βάσης 8,40m, πλάτος στέψης 6,40m, βάθος 1m (συνεπώς κλίσεις πρανών 1:1) και αποτελείται από τα συνήθη εδαφικά υλικά κατασκευής επιχωμάτων. Για την προσομοίωση θεωρείται ότι το επίχωμα που κατασκευάζεται με τη χρήση EPS έχει τις ίδιες ακριβώς διαστάσεις με το εδαφικό αλλά με άλλες ελαστικές ιδιότητες. Το επίχωμα του προσομοιώματος έχει 8.028 nodes και 1.000 elements. Οι ελαστικές ιδιότητες και των δύο επιχωμάτων παρατίθενται στον Πίνακα 5.3.

Στοιχείο \ Ιδιότητες	Πυκνότητα (kg/m ³)	Μέτρο ελαστικότητας E (MPa)	Λόγος Poisson ν	Συντελεστής απόσβεσης ξ (%)
Συμβατικό επίχωμα	2000	400	0.3	5
EPS επίχωμα	20.39	10	0.17	5

Πίνακας 5.3: Οι ελαστικές ιδιότητες των δύο επιχωμάτων (τροποποιημένο από Feng et al., 2017).

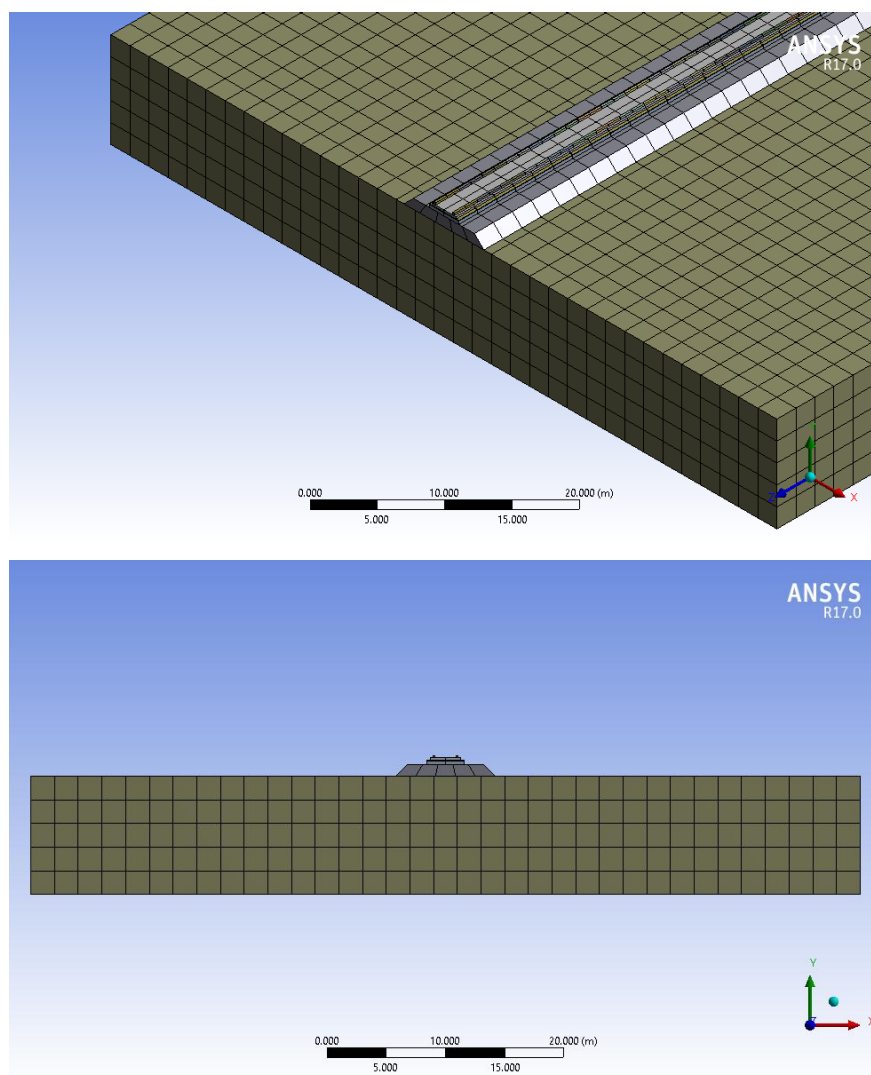
5.4. Έδαφος

Στην πρώτη περίπτωση προσομοίωσης υιοθετείται ένα τυπικό είδος στρωσιγενούς εδάφους μεταξύ της Shanghai και του Anhui της Κίνας και οι ταχύτητες του τρένου μεταβάλλονται κλιμακωτά ανά 20 km/h από 180 έως 360 km/h. Στη δεύτερη εξεταζόμενη περίπτωση το ανωτέρω υποκείμενο έδαφος αντικαθίσταται από συμπαγή βράχο και διερευνώνται μονό οι υψηλές ταχύτητες τρένου από 300 έως 360 km/h με βήμα αύξησης πάλι τα 20 km/h. Εξετάστηκαν και τα δυο είδη επιχώματος και για τις δυο διαφορετικές περιπτώσεις. Οι ελαστικές ιδιότητες των δυο ειδών εδαφικού υποβάθρου παρατίθενται στον Πίνακα 5.4.

Στοιχείο \ Ιδιότητες	Πυκνότητα (kg/m ³)	Μέτρο ελαστικότητας E (MPa)	Λόγος Poisson ν	Συντελεστής απόσβεσης ξ (%)
Έδαφος μεταξύ Shanghai και Anhui Κίνας	1850	39.1	0.32	5
Συμπαγής βράχος	2300	500	0.33	5

Πίνακας 5.4: Οι ελαστικές ιδιότητες του υποκείμενου εδάφους (τροποποιημένο από Feng et al., 2017).

Το έδαφος προσομοιώνεται ως ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο διαστάσεων 400m (μήκος) × 70 m (πλάτος) × 10 m (βάθος). Το μέγεθος του πεπερασμένου στοιχείου του εδάφους (element size) ορίστηκε σε 2m. Οι συνοριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν είναι πακτώσεις για λόγους μείωσης του υπολογιστικού χρόνου. Η Εικόνα 5.6 δείχνει το προσομοίωμα του εδαφικού χωρίου στο ANSYS 17.0.



Εικόνα 5.6: Το υποκείμενο έδαφος του 3D προσομοιώματος στο ANSYS 17.0.

Κεφάλαιο 6^ο

Αποτελέσματα προσομοίωσης

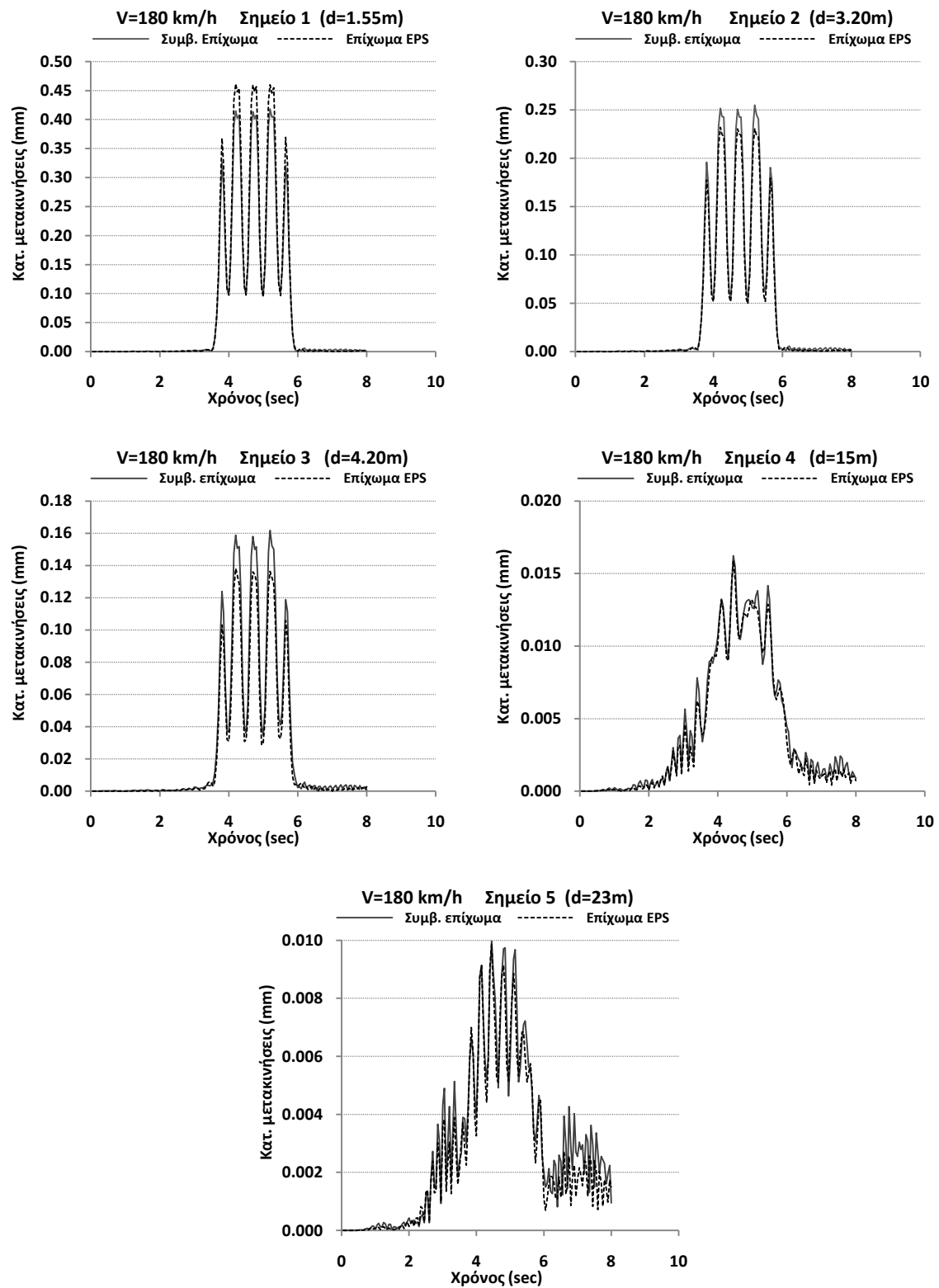
Η ενότητα αυτή παρουσιάζει τα αποτελέσματα των κατακόρυφων μετακινήσεων για τα πέντε χαρακτηριστικά σημεία ελέγχου των επιφανειακών μετακινήσεων που βρίσκονται εγκάρσια της κεντρικής γραμμής του σιδηρόδρομου, περίπου στο μέσο του προσομοιώματος κατά τη διεύθυνση κίνησης του τρένου. Οι παράμετροι που αλλάζουν, όπως προαναφέρθηκε, αφορούν το είδος του επιχώματος, του εδαφικού υποβάθρου και την ταχύτητα διέλευσης του τρένου. Παράλληλα επιχειρείται αξιολόγηση και σύγκριση των δονητικών επιπέδων των περιπτώσεων με στόχο την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας της χρήσης του γεωαφρού EPS στο σιδηροδρομικό επίχωμα.

6.1 Χρονική μεταβολή κατακόρυφων μετακινήσεων

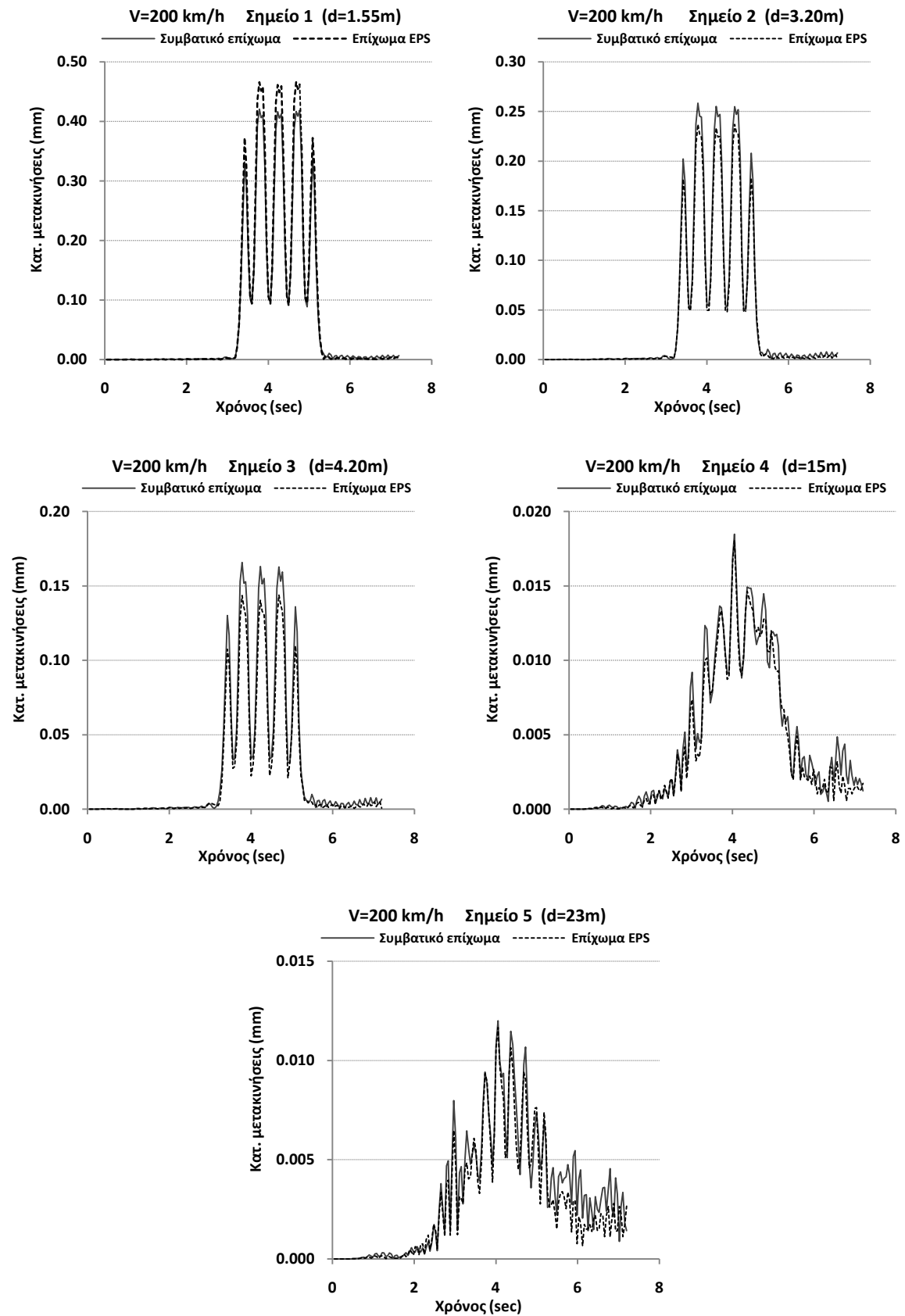
Στις Εικόνες 6.1 έως 6.10 παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες των κατακόρυφων μετακινήσεων για ταχύτητες τρένου από 180 έως 360 km/h και για τις δύο περιπτώσεις επιχώματος για το εδαφικό υπόβαθρο με $E=39.1$ MPa, ενώ στις Εικόνες 6.11 έως 6.14 φαίνονται τα ίδια αποτελέσματα για τις υψηλές ταχύτητες από 300 έως 360 km/h για το υπόβαθρο του βράχου με $E=500$ MPa.

Στην περίπτωση του γαιώδους υποβάθρου, οι καμπύλες των χρονοϊστοριών όλων των μετακινήσεων για το EPS επίχωμα, βρίσκονται χαμηλότερα από αυτές του συμβατικού επιχώματος και είναι παρόμοιας μορφής

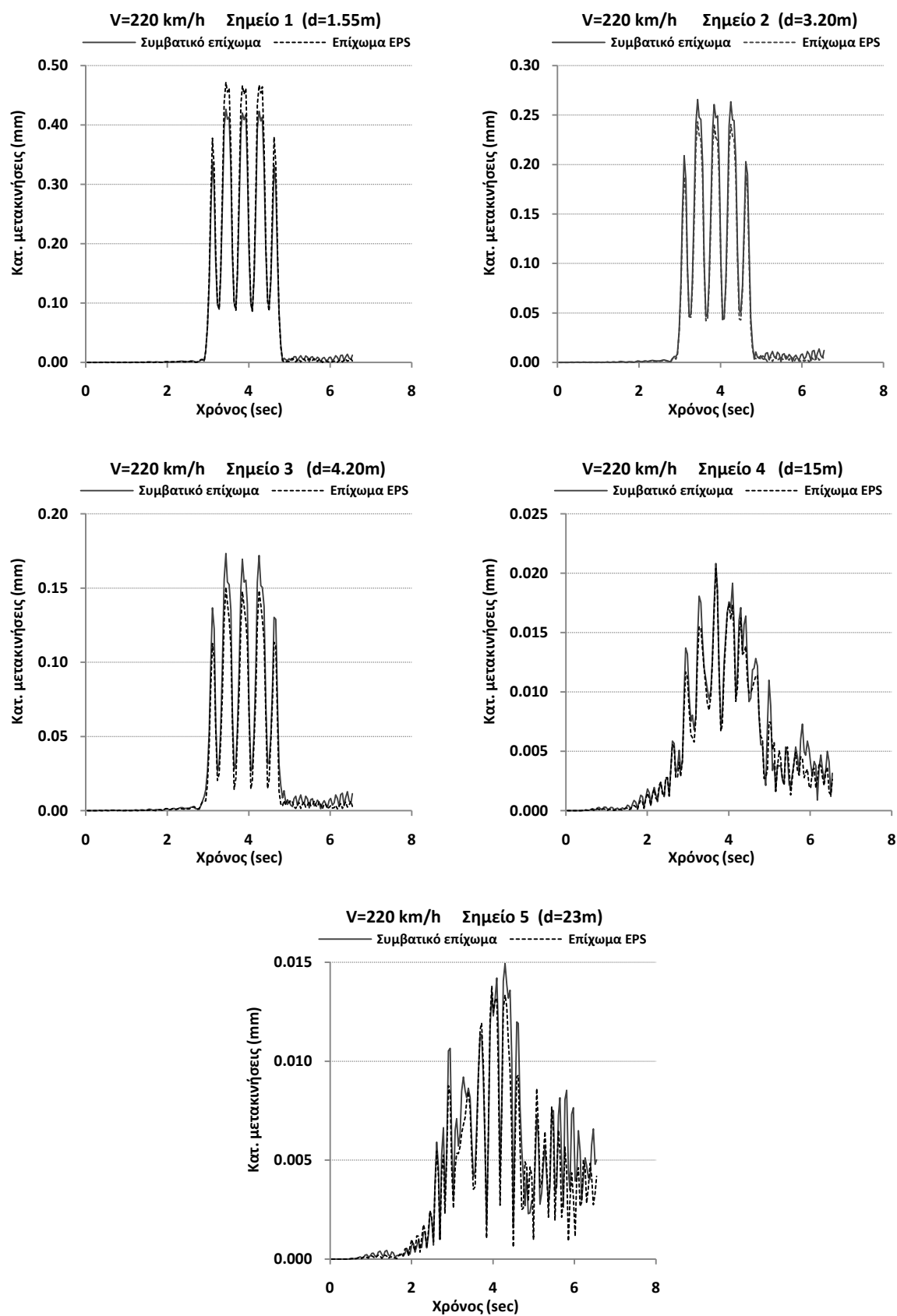
για όλα τα σημεία με εξαίρεση το σημείο 1 ($d=1.55\text{m}$) που βρίσκεται στο επίχωμα στην άκρη της βάσης του σκυροδέματος.



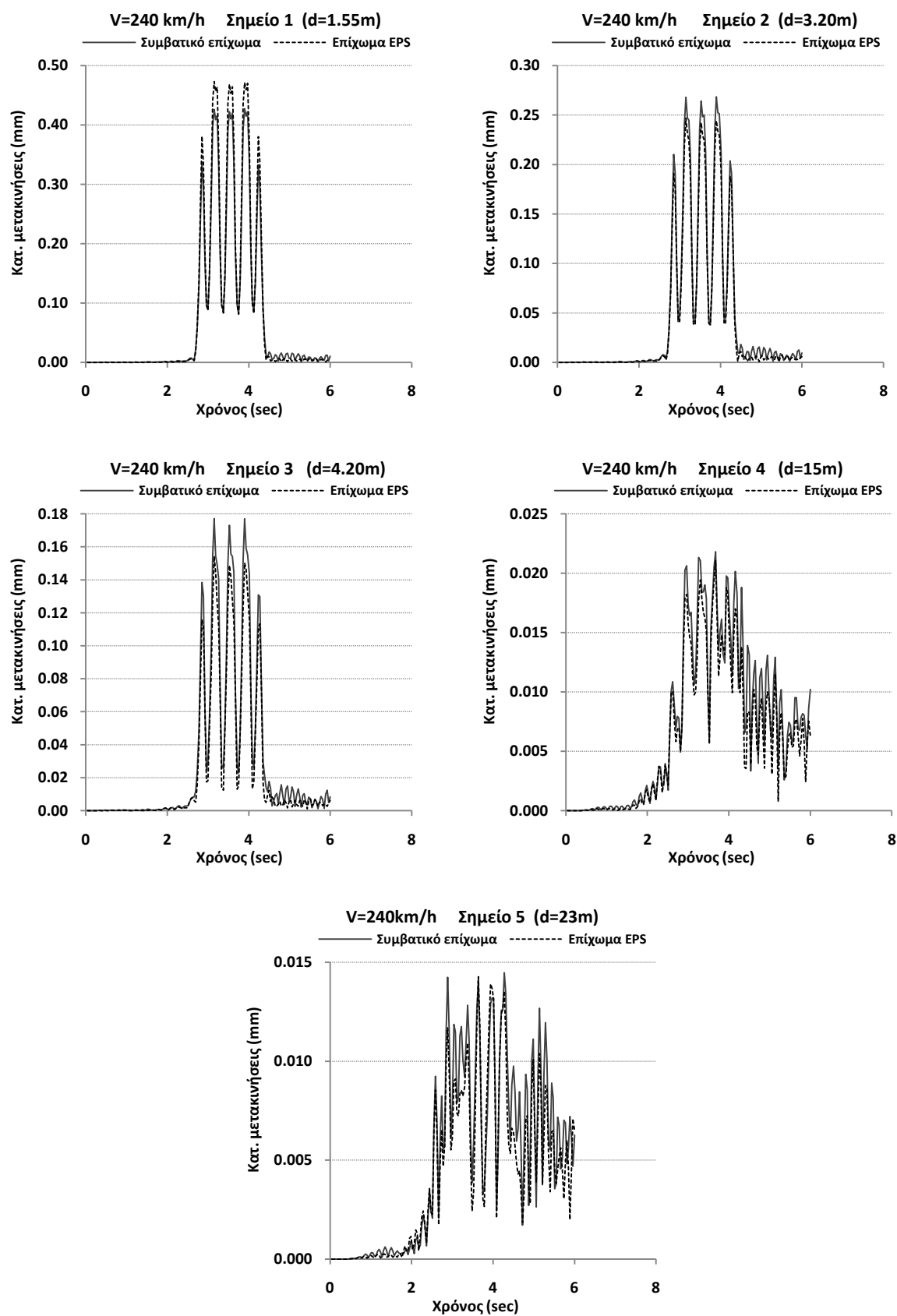
Εικόνα 6.1: Χρονοϊστορίες κατακόρυφων μετακινήσεων για ταχύτητα τρένου 180 km/h για τις δυο περιπτώσεις επιχώματος σε έδαφος με $E=39.1\text{ MPa}$.



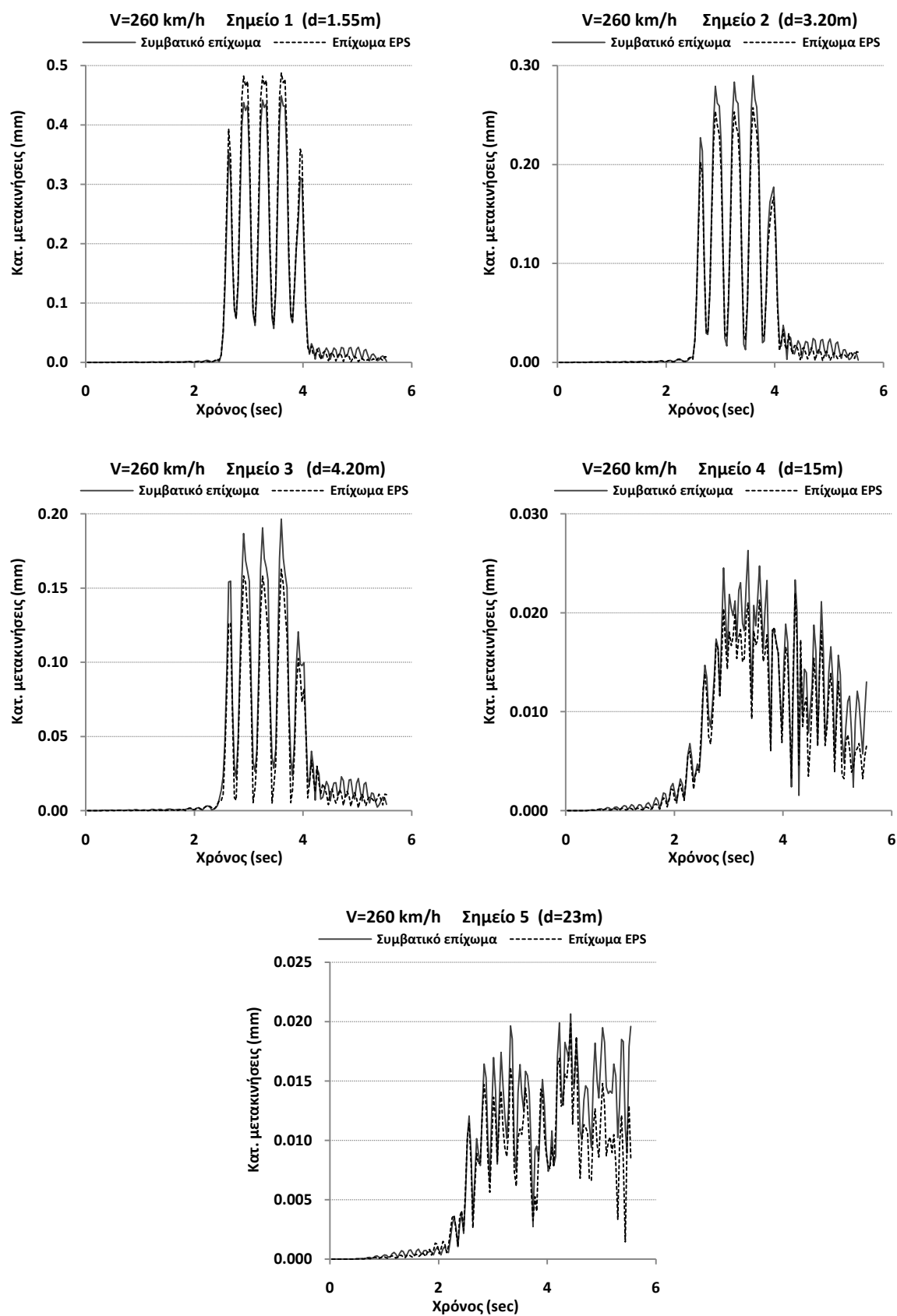
Εικόνα 6.2: Χρονοϊστορίες κατακόρυφων μετακινήσεων για ταχύτητα τρένου 200 km/h για τις δυο περιπτώσεις επιχώματος σε έδαφος με $E=39.1$ MPa.



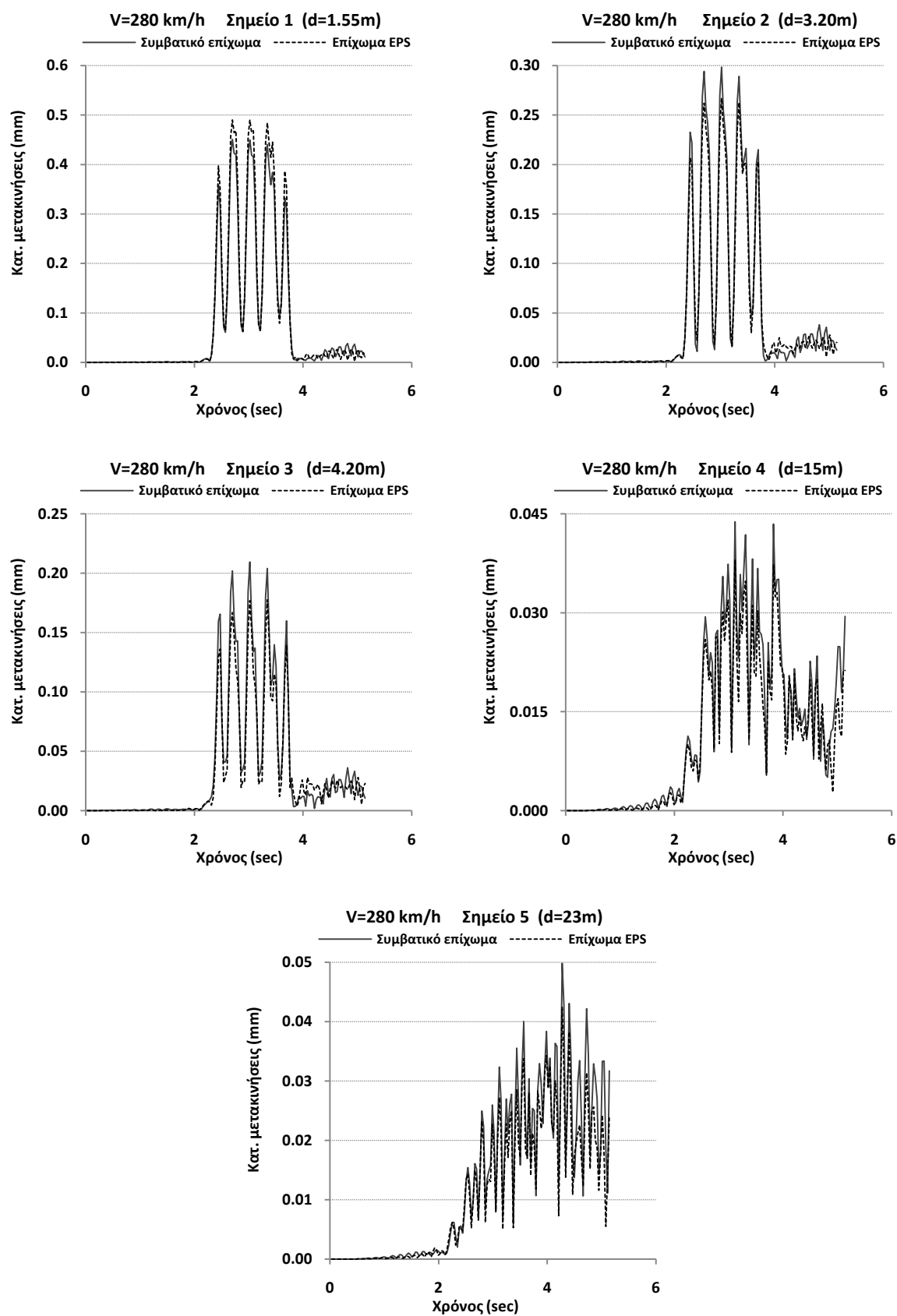
Εικόνα 6.3: Χρονοιστορίες κατακόρυφων μετακινήσεων για ταχύτητα τρένου 220km/h για τις δυο περιπτώσεις επιχώματος σε έδαφος με $E=39.1\text{MPa}$.



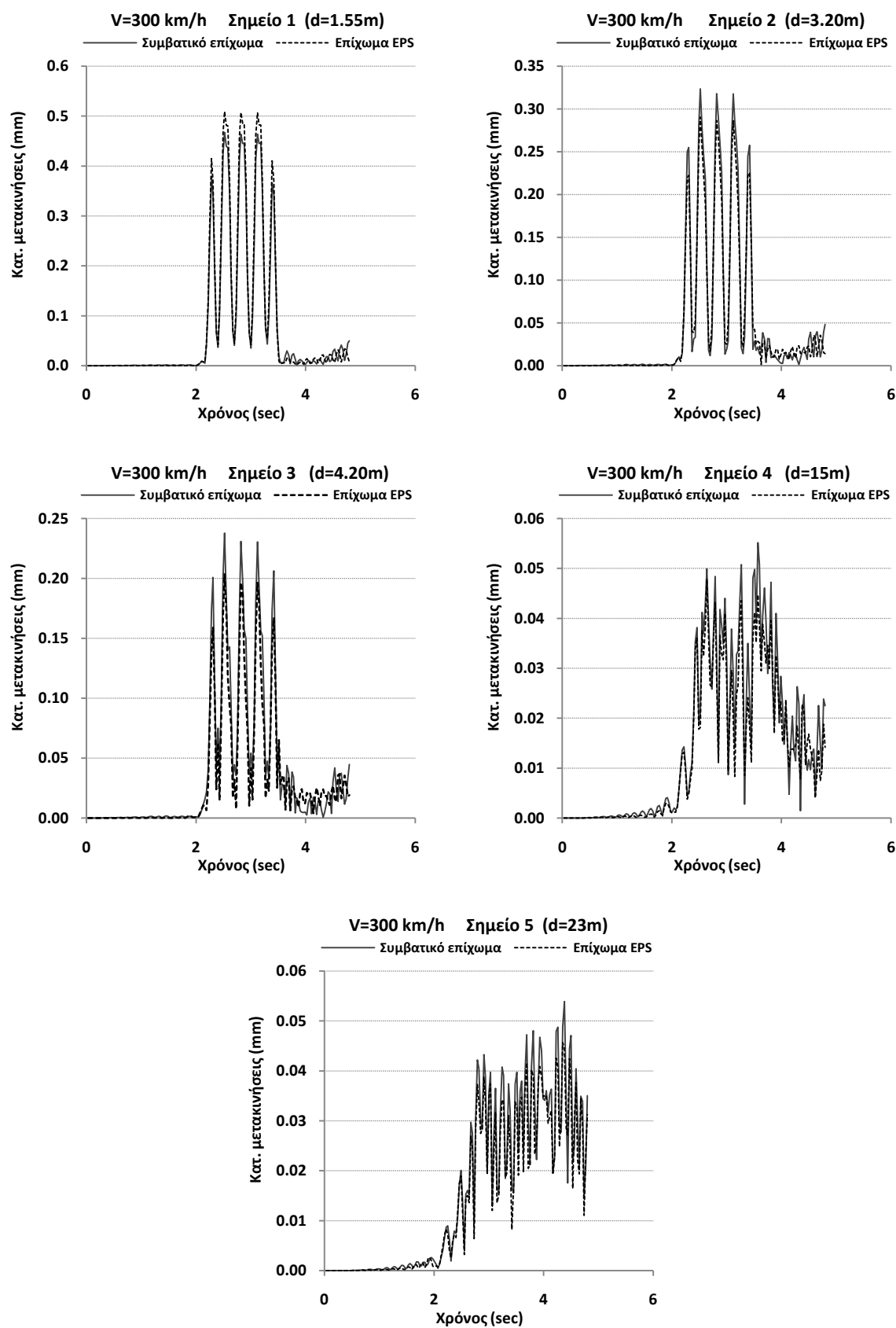
Εικόνα 6.4: Χρονοϊστορίες κατακόρυφων μετακινήσεων για ταχύτητα τρένου 240 km/h για τις δυο περιπτώσεις επιχώματος σε έδαφος με $E=39.1 \text{ MPa}$.



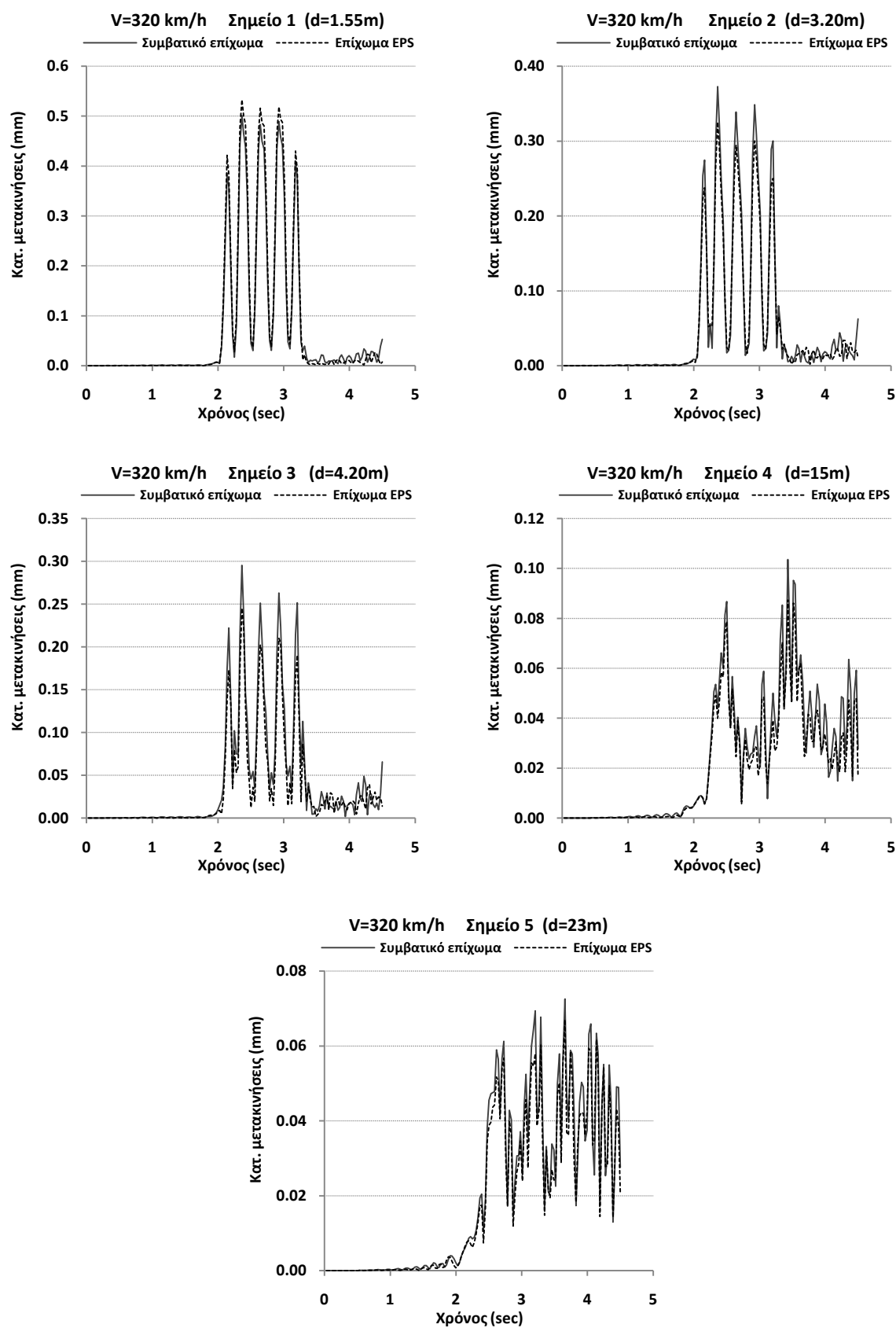
Εικόνα 6.5: Χρονοϊστορίες κατακόρυφων μετακινήσεων για ταχύτητα τρένου 260 km/h για τις δυο περιπτώσεις επιχώματος σε έδαφος με $E=39.1$ MPa.



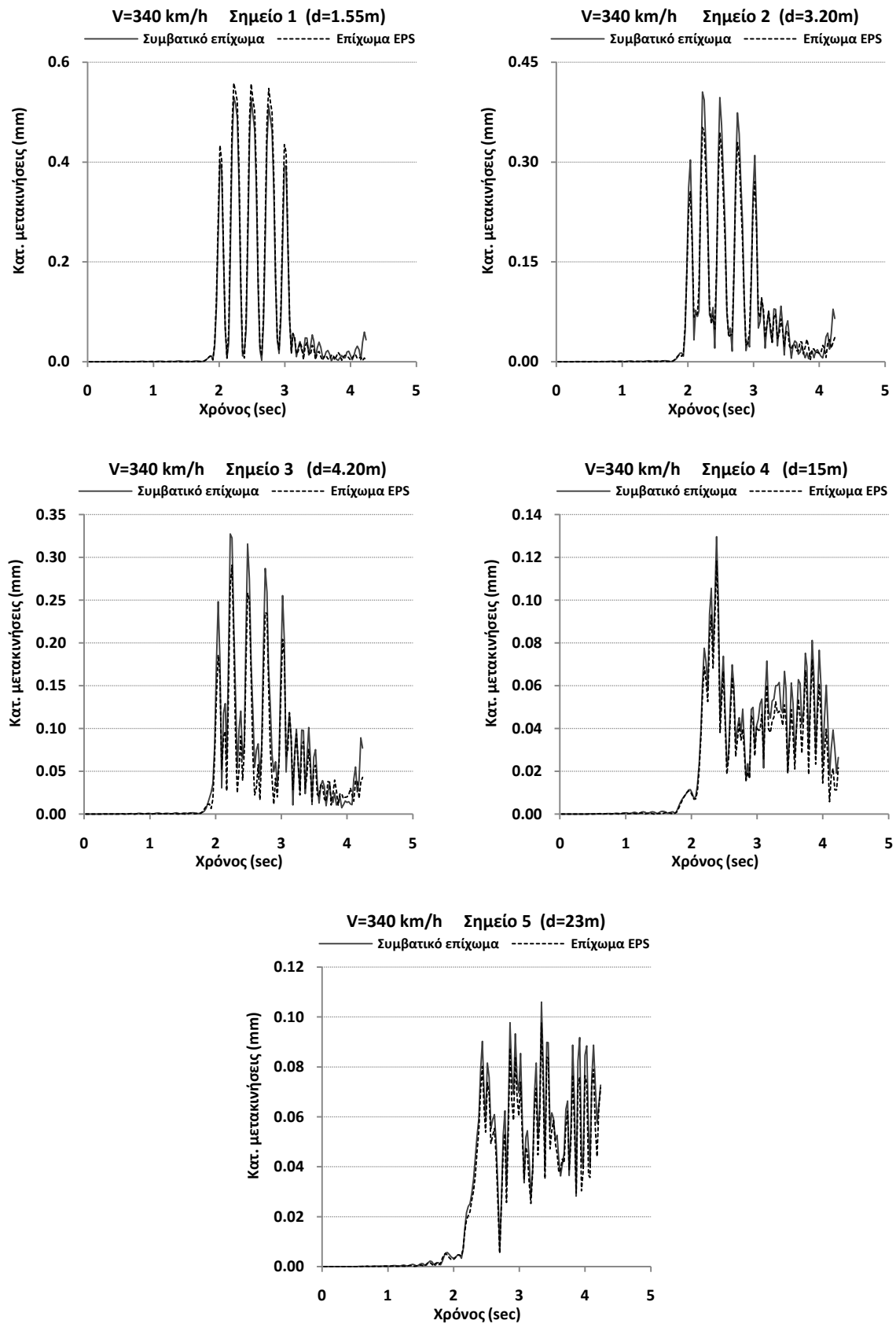
Εικόνα 6.6: Χρονοϊστορίες κατακόρυφων μετακινήσεων για ταχύτητα τρένου 280 km/h για τις δυο περιπτώσεις επιχώματος σε έδαφος με $E=39.1$ MPa.



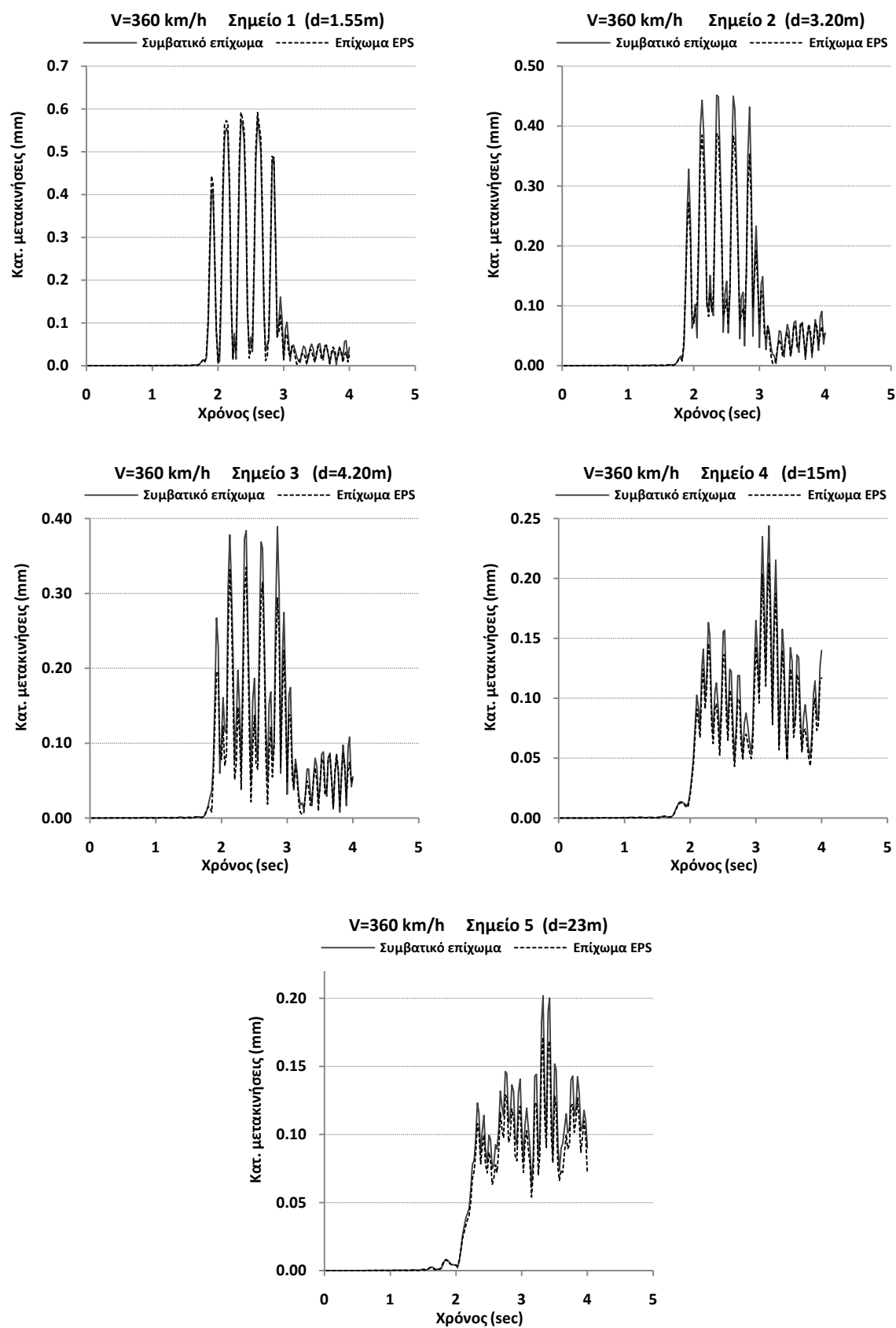
Εικόνα 6.7: Χρονοϊστορίες κατακόρυφων μετακινήσεων για ταχύτητα τρένου 300 km/h για τις δυο περιπτώσεις επιχώματος σε έδαφος με $E=39.1$ MPa.



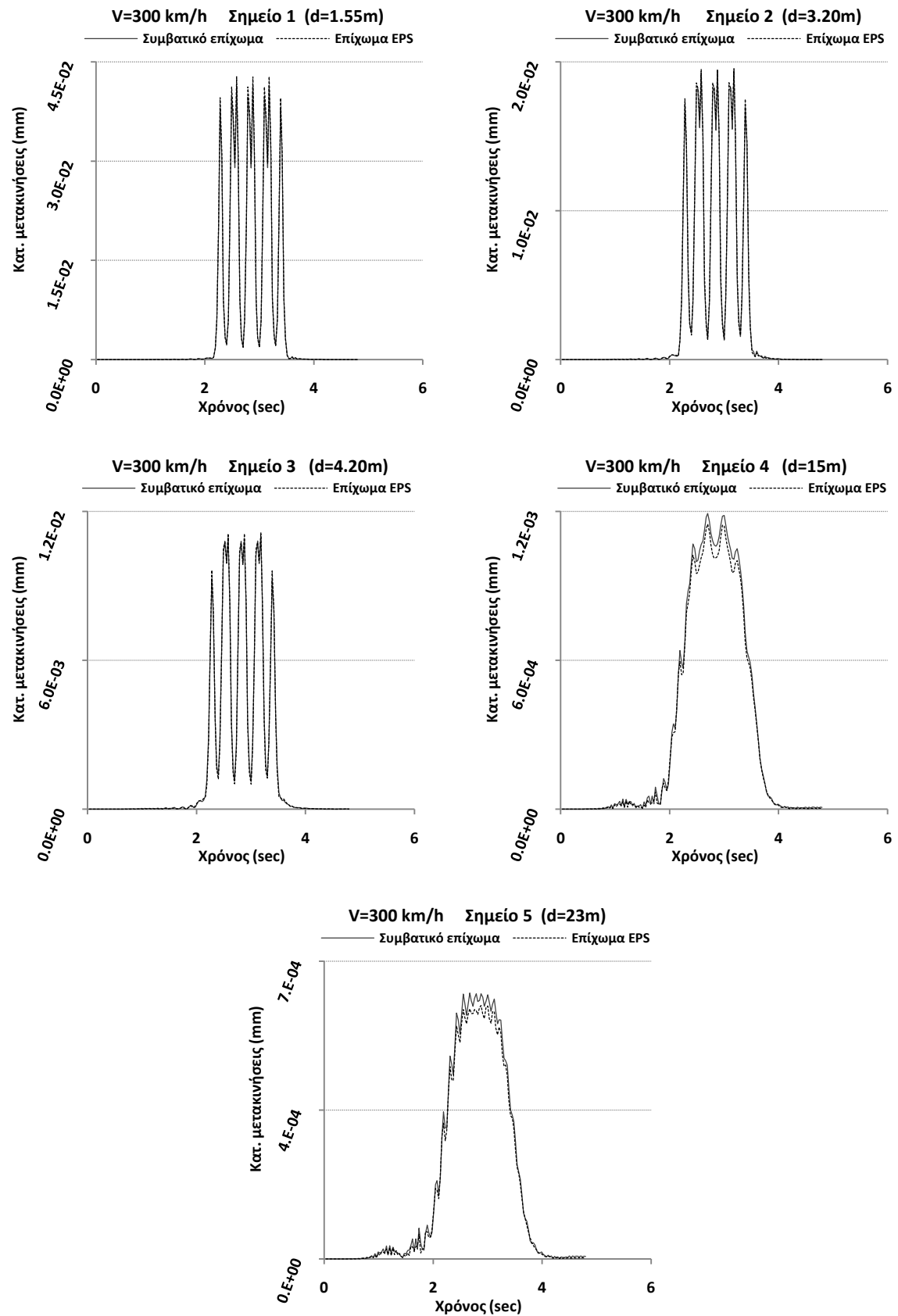
Εικόνα 6.8: Χρονοϊστορίες κατακόρυφων μετακινήσεων για ταχύτητα τρένου 320 km/h για τις δυο περιπτώσεις επιχώματος σε έδαφος με $E=39.1$ MPa.



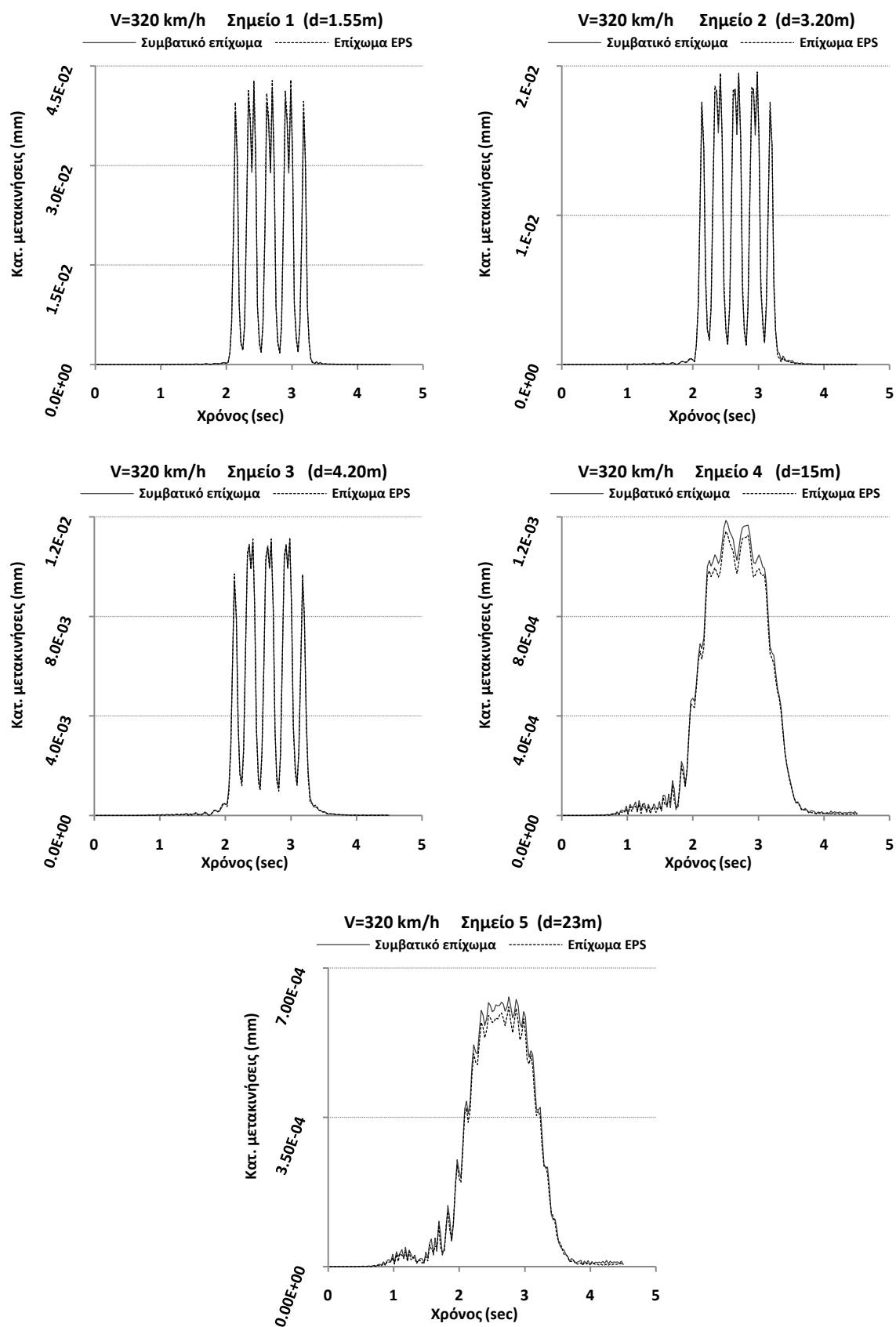
Εικόνα 6.9: Χρονοϊστορίες κατακόρυφων μετακινήσεων για ταχύτητα τρένου 340 km/h για τις δυο περιπτώσεις επιχώματος σε έδαφος με $E=39.1$ MPa.



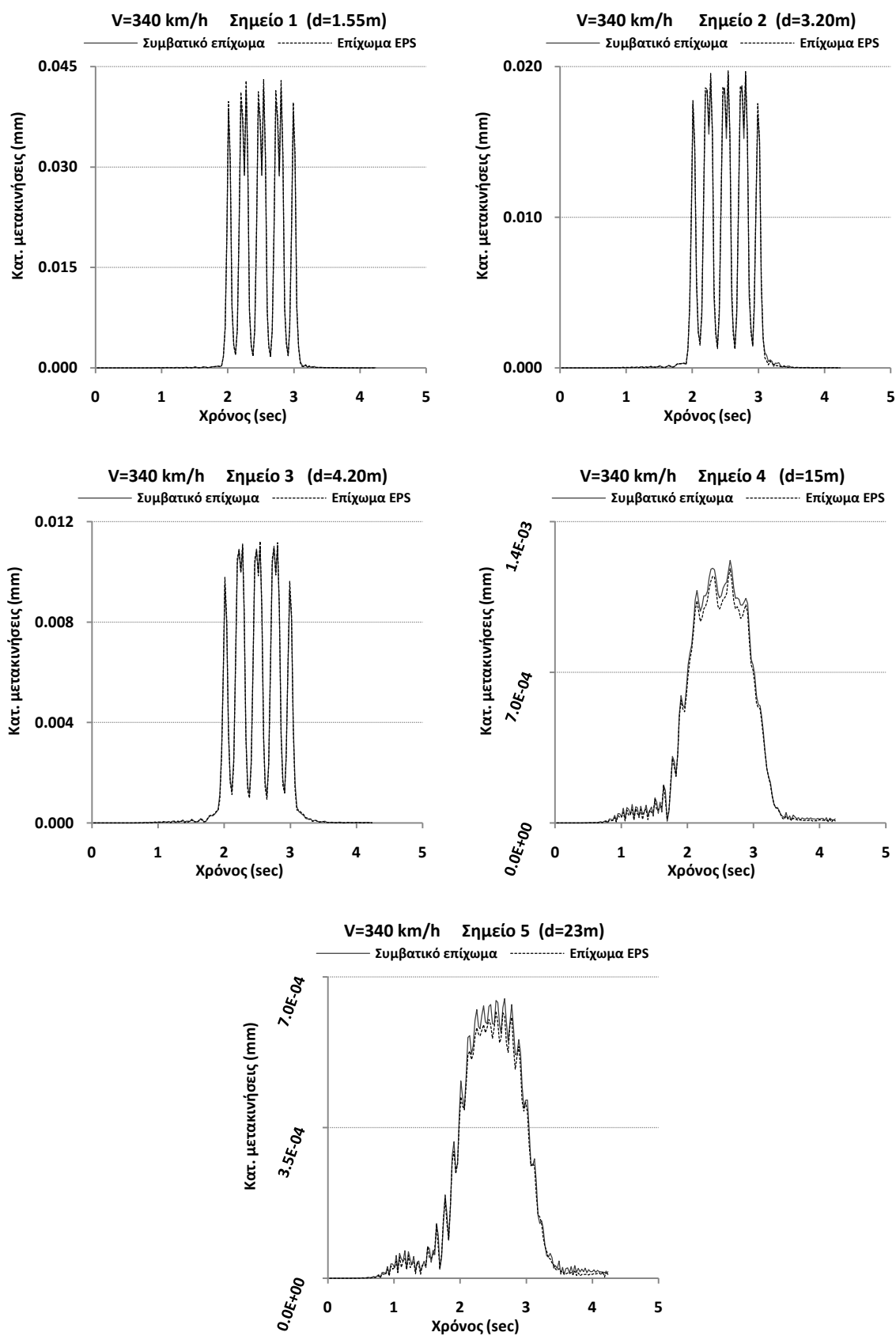
Εικόνα 6.10: Χρονοϊστορίες κατακόρυφων μετακινήσεων για ταχύτητα τρένου 360 km/h για τις δυο περιπτώσεις επίχωματος σε έδαφος με $E=39.1 \text{ MPa}$.



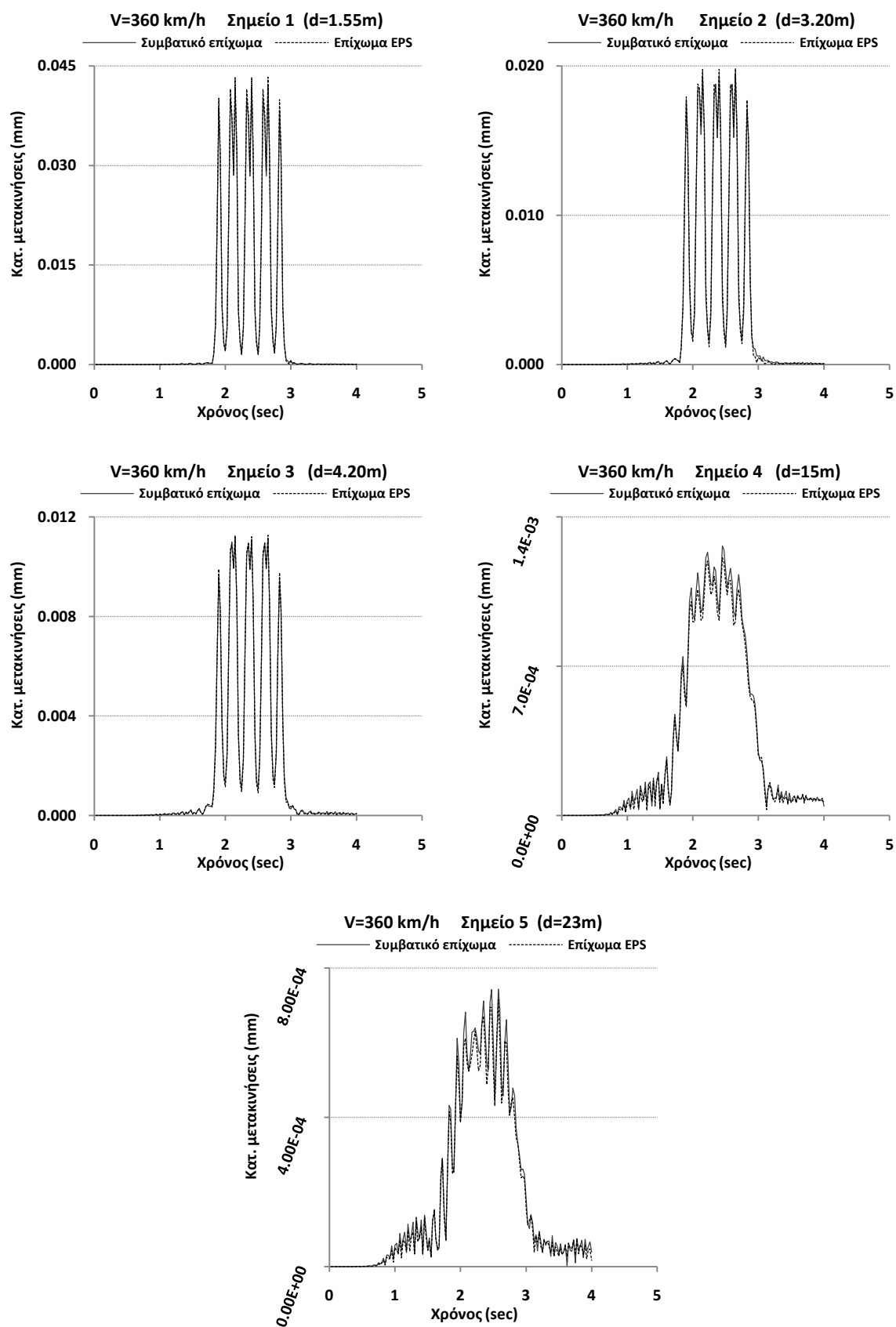
Εικόνα 6.11: Χρονοϊστορίες κατακόρυφων μετακινήσεων για ταχύτητα τρένου 300 km/h για τις δυο περιπτώσεις επιχώματος σε βράχο με $E=500$ MPa.



Εικόνα 6.12: Χρονοϊστορίες κατακόρυφων μετακινήσεων για ταχύτητα τρένου 320 km/h για τις δυο περιπτώσεις επιχώματος σε βράχο με $E=500$ MPa.



Εικόνα 6.13: Χρονοϊστορίες κατακόρυφων μετακινήσεων για ταχύτητα τρένου 340 km/h για τις δυο περιπτώσεις επιχώματος σε βράχο με $E=500$ MPa.



Εικόνα 6.14: Χρονοϊστορίες κατακόρυφων μετακινήσεων για ταχύτητα τρένου 360 km/h για τις δυο περιπτώσεις επιχώματος σε βράχο με $E=500 \text{ MPa}$.

Το ίδιο ισχύει και για την περίπτωση του βραχώδους υποβάθρου μόνο που οι μετακινήσεις έχουν πέσει αισθητά και τα δυο είδη καμπυλών έχουν έρθει αρκετά πιο κοντά μεταξύ τους. Θα πρέπει να σημειωθεί για τις μέγιστες μετακινήσεις ανά σημείο, όπως φαίνεται από όλες τις χρονοϊστορίες, ότι φυσικά αυτές δεν εμφανίζονται σε όλα τα σημεία την ίδια χρονική στιγμή για κάθε συγκεκριμένη ταχύτητα.

6.2 Μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις ανά ταχύτητα

Στο διάγραμμα της Εικόνας 6.15 (Εεδ.=39.1 MPa) φαίνεται ξεκάθαρα πως καθώς αυξάνεται η ταχύτητα του τρένου, αυξάνονται οι μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις για όλες τις αποστάσεις από την κεντρική γραμμή του σιδηρόδρομου και για τα δυο είδη επιχώματος. Το γεγονός αυτό ήταν αναμενόμενο και ακολουθεί τα συμπεράσματα της βιβλιογραφίας. Σαφώς, οι μετακινήσεις είναι μικρότερες σε όλα τα σημεία για την περίπτωση του EPS επιχώματος με εξαίρεση το σημείο 1 (1.55m) της βάσης σκυροδέματος του σιδηρόδρομου. Οι Πίνακες 6.1 και 6.2 δείχνουν τις μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις (mm) για το συμβατικό και το EPS επίχωμα ανά ταχύτητα και σημείο.

V(km/h)/ Σημείο	1 (1.55m)	2 (3.20m)	3 (4.20m)	4 (15.00m)	5 (23.00m)
180	0.418	0.255	0.162	0.016	0.010
200	0.421	0.259	0.166	0.018	0.012
220	0.427	0.266	0.173	0.021	0.015
240	0.427	0.269	0.177	0.022	0.014
260	0.449	0.290	0.196	0.026	0.021
280	0.451	0.299	0.210	0.044	0.050
300	0.468	0.324	0.238	0.055	0.054
320	0.501	0.373	0.295	0.104	0.073
340	0.530	0.405	0.327	0.130	0.106
360	0.575	0.452	0.389	0.244	0.202

Πίνακας 6.1: Μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις (mm) για Εεδ.=39.1 MPa για το συμβατικό επίχωμα.

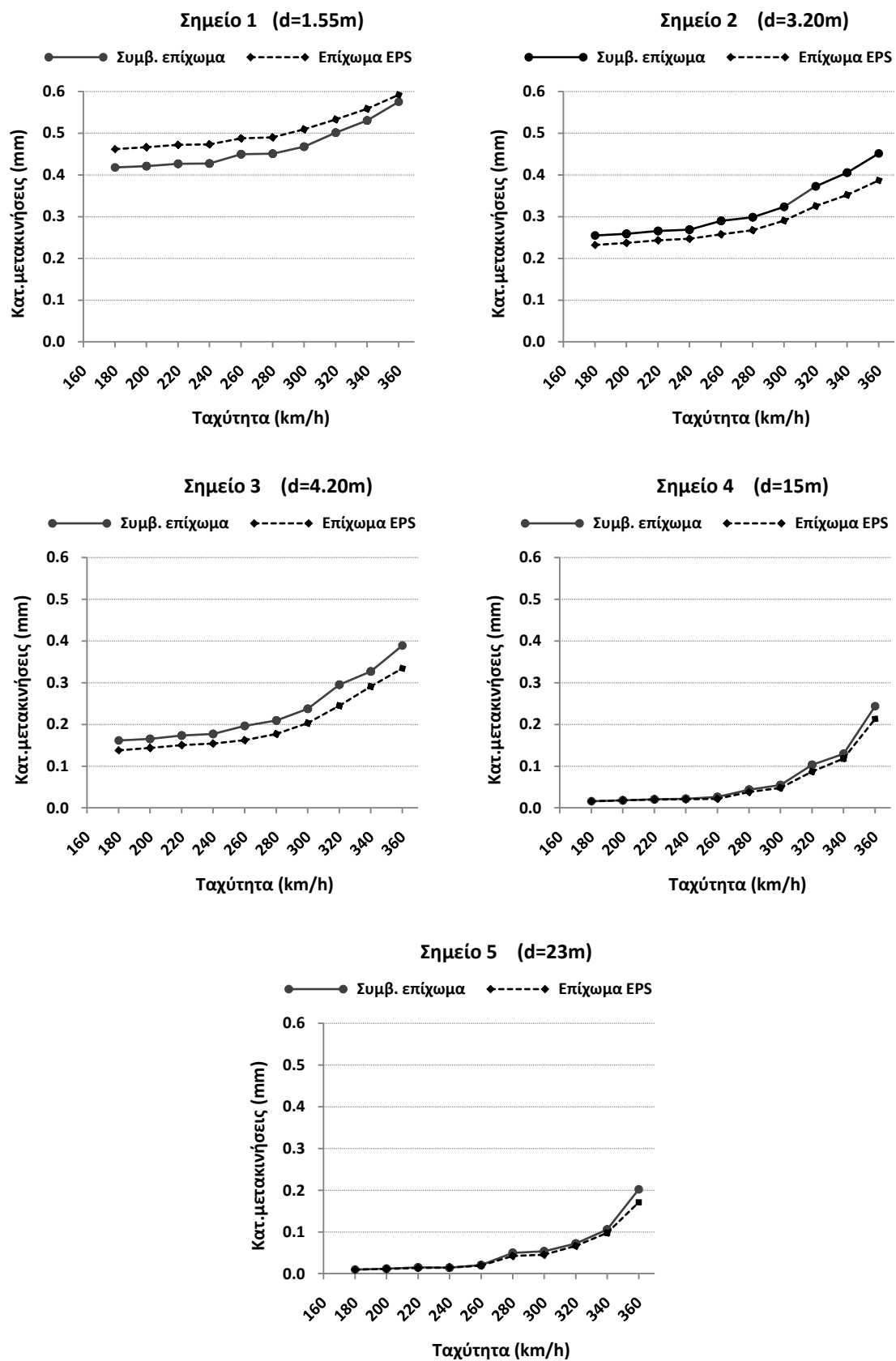
V(km/h)/ Σημείο	1 (1.55m)	2 (3.20m)	3 (4.20m)	4 (15.00m)	5 (23.00m)
180	0.462	0.232	0.138	0.016	0.010
200	0.466	0.237	0.144	0.018	0.012
220	0.472	0.243	0.151	0.020	0.014
240	0.473	0.247	0.154	0.021	0.014
260	0.488	0.258	0.163	0.022	0.020
280	0.490	0.267	0.177	0.038	0.043
300	0.510	0.291	0.204	0.048	0.046
320	0.533	0.326	0.245	0.087	0.067
340	0.558	0.352	0.291	0.118	0.098
360	0.592	0.387	0.335	0.213	0.171

Πίνακας 6.2: Μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις (mm) για Εεδ.=39.1 MPa για το EPS επίχωμα.

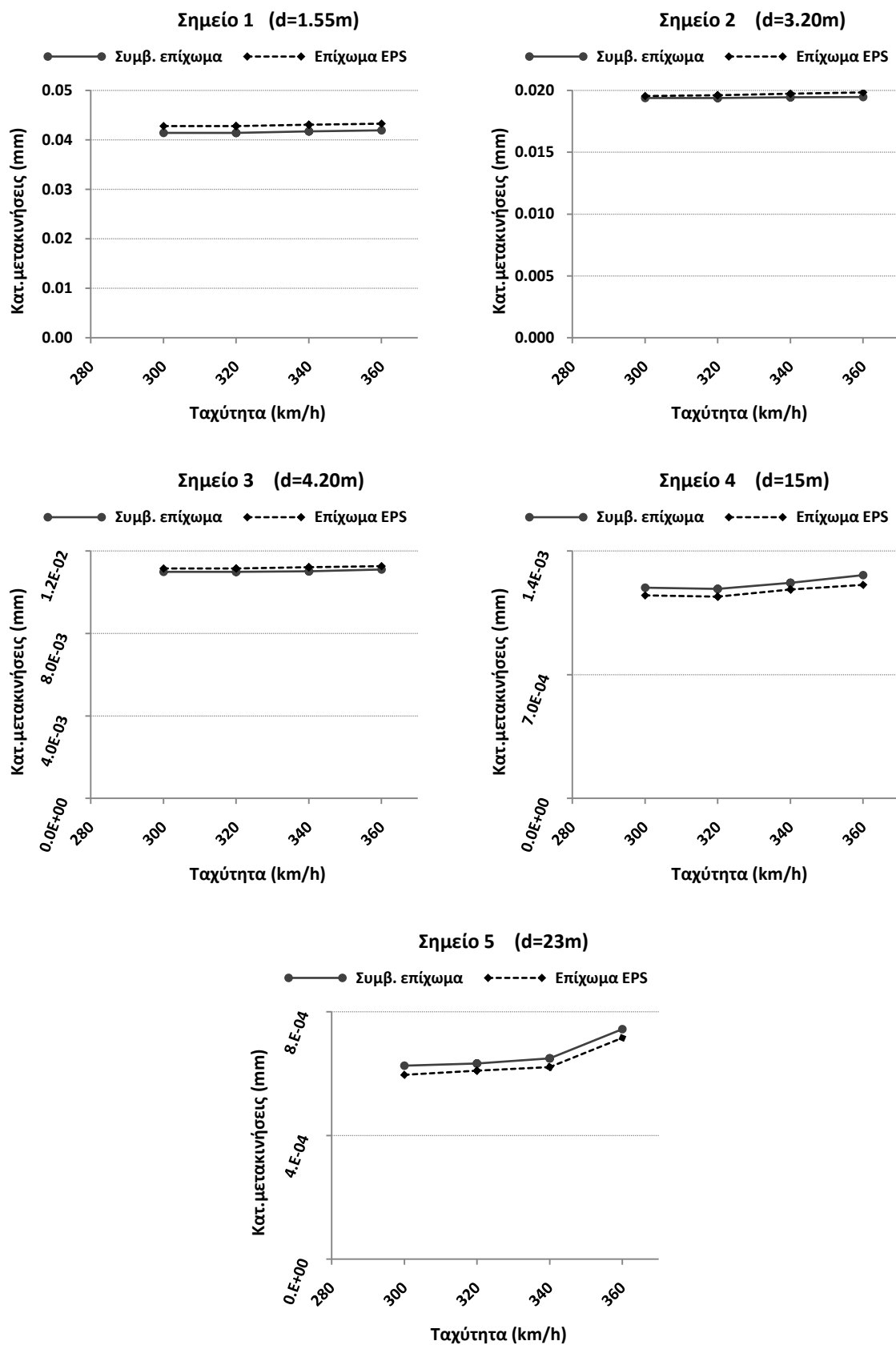
Ο Πίνακας 6.3 παρουσιάζει τις αυξήσεις ή μειώσεις για όλα τα σημεία. Το EPS επίχωμα στο σημείο 1 αυξάνει τις μετακινήσεις κατά μέσο (Μ.Ο.) όρο για όλες τις ταχύτητες κατά 8,3%, τις μειώνει αντίστοιχα κατά 10,6% στο φρύδι του επιχώματος και τις μειώνει εκτός επιχώματος ξεκινώντας από Μ.Ο. 14,3%, ποσοστό το οποίο μειώνεται καθώς μεγαλώνει η απόσταση. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει τη χρήση του EPS ως μέτρο περιορισμού δονήσεων.

V(km/h)/ Σημείο	1 (1.55m)	2 (3.20m)	3 (4.20m)	4 (15.00m)	5 (23.00m)
180	10.5%	-8.9%	-14.6%	-2.0%	-1.0%
200	10.8%	-8.3%	-13.1%	-2.3%	-2.9%
220	10.6%	-8.4%	-13.2%	-2.0%	-7.7%
240	10.7%	-8.1%	-12.9%	-3.3%	-1.4%
260	8.5%	-11.2%	-17.2%	-16.4%	-4.0%
280	8.7%	-10.5%	-15.3%	-13.1%	-14.7%
300	9.0%	-10.2%	-14.4%	-13.2%	-15.3%
320	6.3%	-12.7%	-16.9%	-15.7%	-7.5%
340	5.3%	-13.1%	-11.2%	-8.8%	-7.9%
360	3.0%	-14.4%	-14.0%	-12.6%	-15.1%
Μ.Ο.	8.3%	-10.6%	-14.3%	-8.9%	-7.8%
Μεγ.	10.8%	-8.1%	-11.2%	-2.0%	-1.0%
Ελαχ.	3.0%	-14.4%	-17.2%	-16.4%	-15.3%

Πίνακας 6.3: Ποσοστιαίες διαφορές μέγιστων κατακόρυφων μετακινήσεων του EPS επιχώματος από το συμβατικό επίχωμα για Εεδ.=39.1 MPa.



Εικόνα 6.15: Μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις με την ταχύτητα ($V=180 - 360$ km/h) για τις δυο περιπτώσεις επιχώματος σε έδαφος με $E=39.1$ MPa.



Εικόνα 6.16: Μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις με την ταχύτητα ($V=300 - 360$ km/h) για τις δυο περιπτώσεις επιχώματος σε έδαφος με $E=500$ MPa.

Η αύξηση που παρατηρείται ακριβώς κάτω από τον σιδηρόδρομο δικαιολογείται από τον μικρό συντελεστή ελαστικότητας του EPS. Δεν φαίνεται να υπάρχει ξεκάθαρη σχέση της μεταβολής των μετακινήσεων με την αύξηση της ταχύτητας, π.χ., όσο αυξάνεται η ταχύτητα τότε οι μετακινήσεις λόγω EPS πέφτουν περισσότερο ή ότι υπάρχει σταθερό ποσοστό μείωσης/αύξησης ανά σημείο. Ίσως, θα μπορούσε να ειπωθεί πως για τις ταχύτητες 180-240 km/h, το EPS έχει σχεδόν σταθερή συμπεριφορά σε όλα τα σημεία ελέγχου.

Επίσης, το μέσο εύρος των μετακινήσεων για το συμβατικό επίχωμα για όλες τις ταχύτητες είναι κατά μέσο όρο 0,200mm, ενώ για το EPS επίχωμα το μέσο εύρος αυτό μειώνεται από 0,168mm. Αυτό φαίνεται και στα διαγράμματα καθώς οι καμπύλες του EPS επιχώματος δεν είναι άπλα χαμηλότερα (ή ψηλότερα) από αυτές του συμβατικού, αλλά είναι και ελαφρά ηπιότερης κλίσης.

Στα διαγράμματα της Εικόνας 6.16, όπου το γαιώδες υπόβαθρο έχει αντικατασταθεί με βραχώδες, οι καμπύλες είναι σχεδόν ευθείες ή πολύ ήπιας ανοδικής κλίσης για όλα τα σημεία. Συνεπώς, παρατηρείται και πάλι αύξηση των μετακινήσεων με την αύξηση της ταχύτητας για όλα τα σημεία, αλλά πολύ μικρή και με πολύ αργό ρυθμό. Σαφώς, οι μετακινήσεις για την περίπτωση του EPS επιχώματος είναι ελαφρά μικρότερες από αυτές του συμβατικού για τα σημεία 4 και 5 (εκτός επιχώματος) ενώ για τα σημεία 1,2,3 είναι ίδιες ή ελαφρά μεγαλύτερες.

V (km/h) / Σημείο	1 (1.55m)	2 (3.20m)	3 (4.20m)	4 (15.00m)	5 (23.00m)
300	0.0414	0.0194	0.0110	0.0012	0.0006
320	0.0415	0.0194	0.0110	0.0012	0.0006
340	0.0417	0.0194	0.0110	0.0012	0.0006
360	0.0419	0.0195	0.0111	0.0013	0.0007

Πίνακας 6.4: Μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις (mm) για $E_{εδ}=500$ MPa για το συμβατικό επίχωμα.

V (km/h) / Σημείο	1 (1.55m)	2 (3.20m)	3 (4.20m)	4 (15.00m)	5 (23.00m)
300	0.0428	0.0195	0.0112	0.0011	0.0006
320	0.0429	0.0196	0.0112	0.0011	0.0006
340	0.0431	0.0197	0.0112	0.0012	0.0006
360	0.0433	0.0198	0.0113	0.0012	0.0007

Πίνακας 6.5: Μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις (mm) για $E_{εδ}=500$ MPa για το EPS επίχωμα.

Οι Πίνακες 6.4 και 6.5 απεικονίζουν τις μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις (mm) για το συμβατικό και το EPS επίχωμα ανά ταχύτητα και σημείο. Ο Πίνακας 6.6 παρουσιάζει τις αυξήσεις ή μειώσεις για όλα τα σημεία. Το EPS επίχωμα αυξάνει τις μετακινήσεις στα σημεία 1, 2, 3 για όλες τις ταχύτητες κατά Μ.Ο. 3,3%, 1,3% και 1,5% αντίστοιχα. Παράλληλα, στα σημεία 4, 5 τις μειώνει αντίστοιχα κατά 3,7% και 4,1%. Το EPS επίχωμα λοιπόν, στην περίπτωση που εδράζεται σε βραχώδες υπόβαθρο, δε φαίνεται να έχει ισχυρή επίδραση στις παραγόμενες δονήσεις, αλλά μάλλον αμελητέα.

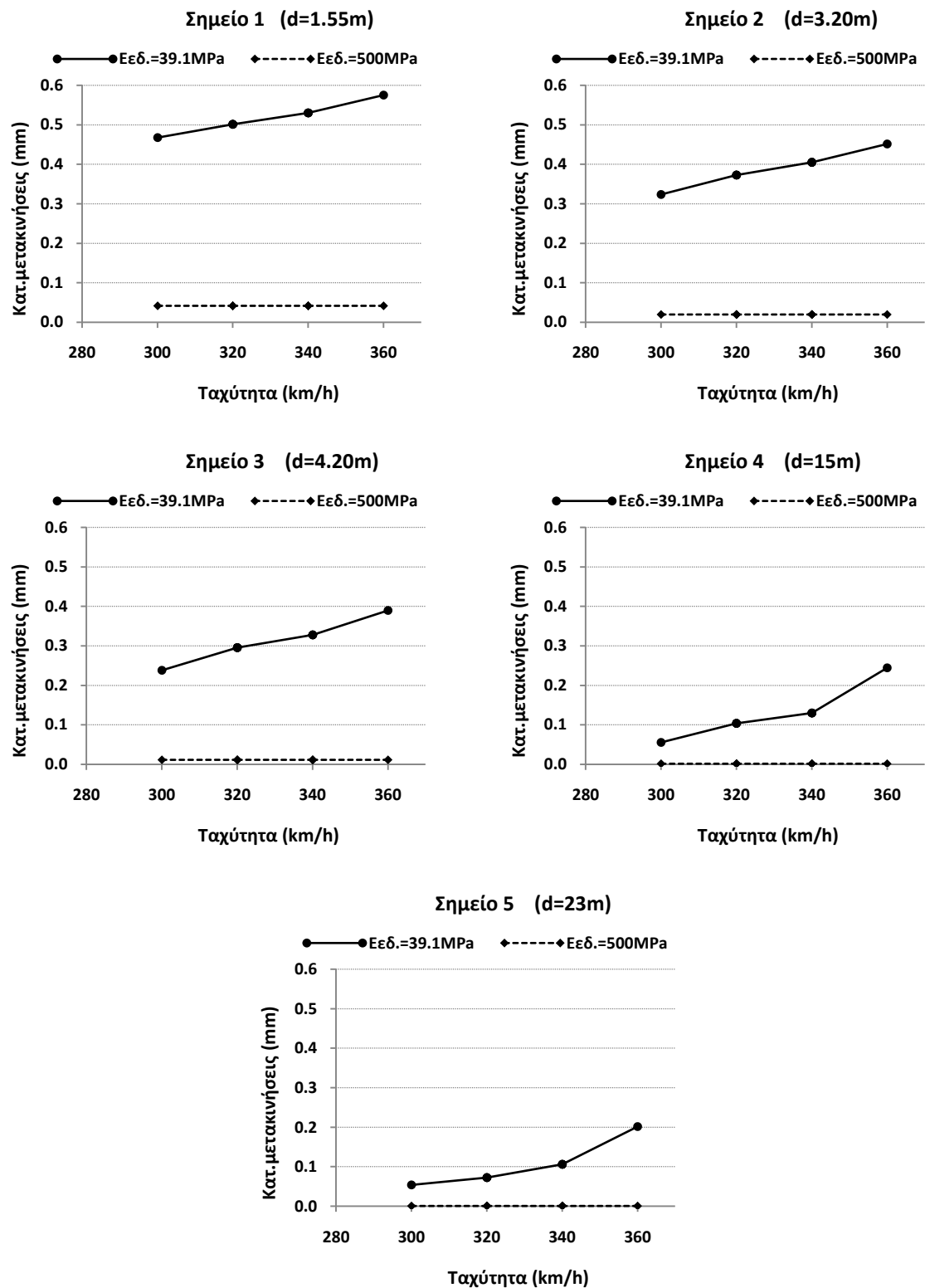
V (km/h) / Σημείο	1 (1.55m)	2 (3.20m)	3 (4.20m)	4 (15.00m)	5 (23.00m)
300	3.3%	0.8%	1.5%	-3.7%	-4.7%
320	3.3%	1.1%	1.5%	-3.7%	-3.7%
340	3.3%	1.5%	1.7%	-3.1%	-4.4%
360	3.3%	1.9%	1.4%	-4.3%	-3.8%
Μ.Ο.	3.3%	1.3%	1.5%	-3.7%	-4.1%
Μεγ.	3.3%	1.9%	1.7%	-3.1%	-3.7%
Ελαχ.	3.3%	0.8%	1.4%	-4.3%	-4.7%

Πίνακας 6.6: Ποσοστιαίες διαφορές μέγιστων κατακόρυφων μετακινήσεων του EPS επιχώματος από το συμβατικό επίχωμα για Εεδ.=500 MPa.

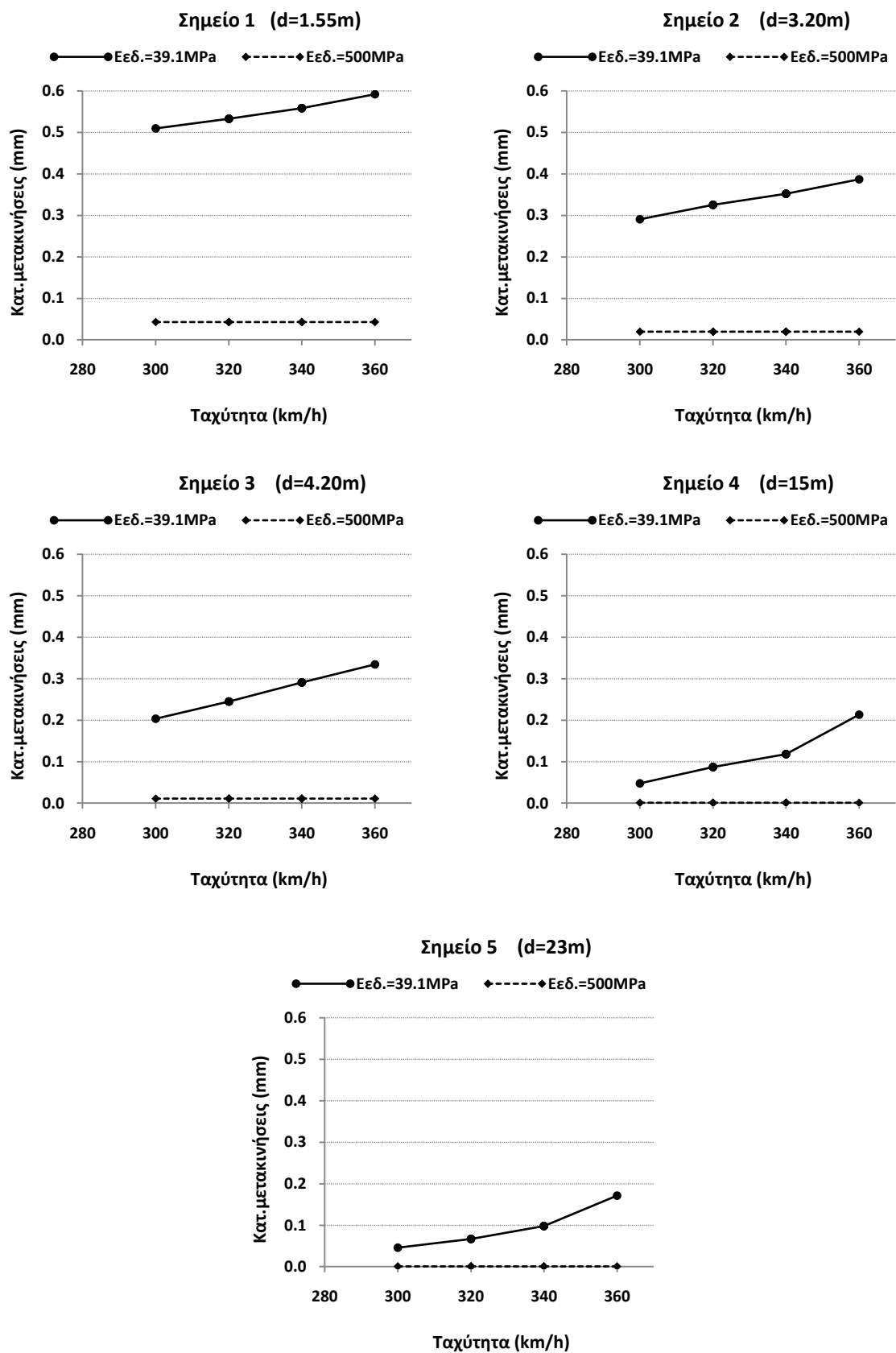
Για την περίπτωση σύγκρισης των δυο διαφορετικών εδαφικών υποβάθρων, τα διαγράμματα των Εικόνων 6.17 και 6.18 παρουσιάζουν συγκριτικά τις μετακινήσεις της περίπτωσης του γαιώδους με αυτές του βραχώδους εδάφους για το συμβατικό και για το EPS επίχωμα, αντίστοιχα.

Το προσομοίωμα, στην περίπτωση του βραχώδους υπόβαθρου, επιλύθηκε μόνο για τις ταχύτητες που κυμαίνονται από 300 έως 360 km/h και για αυτό περιέχονται μόνο αυτές ως κοινές στη σύγκριση. Φαίνεται ξεκάθαρα ότι οι μετακινήσεις μειώνονται για όλες τις ταχύτητες και για όλα τα σημεία, όταν το εδαφικό υπόβαθρο του προσομοιώματος αντικατασταθεί με βράχο και για τις δυο περιπτώσεις επιχώματος. Στη βιβλιογραφία αναφέρθηκε η ειδική περίπτωση της παρουσίας υποστρώματος βράχου κάτω από την επιφανειακή εδαφική στρώση του σιδηρόδρομου και ότι η παρουσία αυτή μειώνει δραστικά το επίπεδο των δονήσεων και παρατηρείται μεγαλύτερος ρυθμός απόσβεσης (Kouroussis et al., 2012). Θεωρώντας το επίχωμα ως μια εδαφική στρώση κάτω από την οποία υπάρχει το βραχώδες υπόστρωμα και λαμβάνοντας υπόψη την τόσο μεγάλη

διαφορά στα μέτρα ελαστικότητας, τότε δικαιολογείται και είναι λογική αυτή η τόσο μεγάλη παρατηρούμενη μείωση.



Εικόνα 6.17: Μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις με την ταχύτητα ($V=300 - 360$ km/h) για τα δύο εδαφικά υπόβαθρα (γαιώδες - βραχώδες) για το συμβατικό επίχωμα.



Εικόνα 6.18: Μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις με την ταχύτητα ($V=300 - 360$ km/h) για τα δύο εδαφικά υπόβαθρα (γαιώδες - βραχώδες) για το EPS επίχωμα.

Το ποσοστό των μειώσεων είναι πάνω από 90% και αυτό φαίνεται καλύτερα στους Πίνακες 6.7 και 6.8, που παρουσιάζουν τις ποσοστιαίες διαφορές των μέγιστων κατακόρυφων μετακινήσεων του γαιώδους εδάφους με $E=39.1$ MPa από το βραχώδες έδαφος με $E=500$ MPa για το συμβατικό και για το EPS επίχωμα, αντίστοιχα.

V(km/h)/ Σημείο	1 (1.55m)	2 (3.20m)	3 (4.20m)	4 (15.00m)	5 (23.00m)
300	-91%	-94%	-95%	-98%	-99%
320	-92%	-95%	-96%	-99%	-99%
340	-92%	-95%	-97%	-99%	-99%
360	-93%	-96%	-97%	-99%	-100%
M.O.	-92%	-95%	-96%	-99%	-99%
Μεγ.	-91%	-94%	-95%	-98%	-99%
Ελαχ.	-93%	-96%	-97%	-99%	-100%

Πίνακας 6.7: Ποσοστιαίες διαφορές μέγιστων κατακόρυφων μετακινήσεων του εδάφους με $E=39.1$ MPa από το έδαφος με $E=500$ MPa για το συμβατικό επίχωμα.

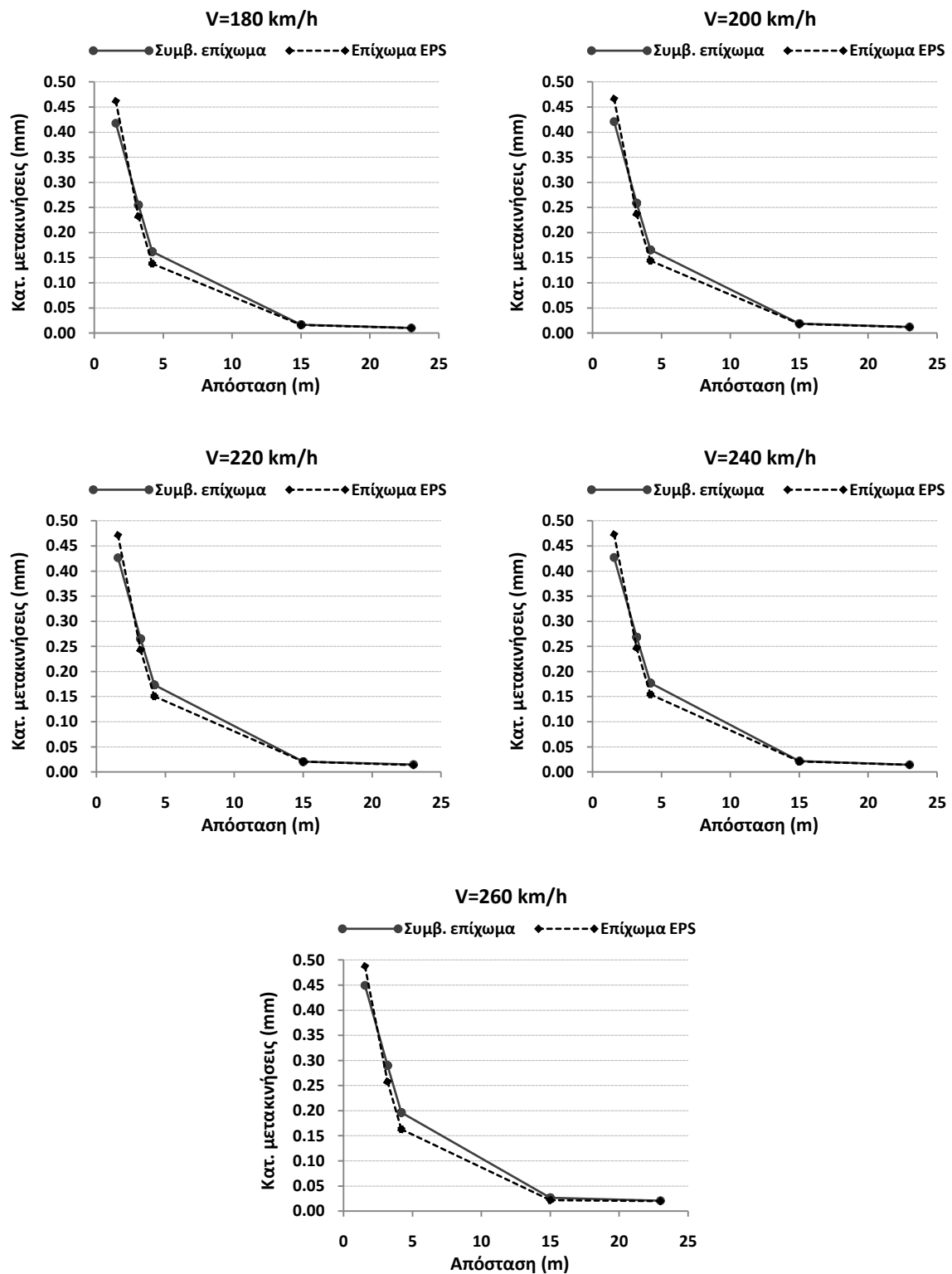
V(km/h)/ Σημείο	1 (1.55m)	2 (3.20m)	3 (4.20m)	4 (15.00m)	5 (23.00m)
300	-92%	-93%	-95%	-98%	-99%
320	-92%	-94%	-95%	-99%	-99%
340	-92%	-94%	-96%	-99%	-99%
360	-93%	-95%	-97%	-99%	-100%
M.O.	-92%	-94%	-96%	-99%	-99%
Μεγ.	-92%	-93%	-95%	-98%	-99%
Ελαχ.	-93%	-95%	-97%	-99%	-100%

Πίνακας 6.8: Ποσοστιαίες διαφορές μέγιστων κατακόρυφων μετακινήσεων του εδάφους με $E=39.1$ MPa από το έδαφος με $E=500$ MPa για το EPS επίχωμα.

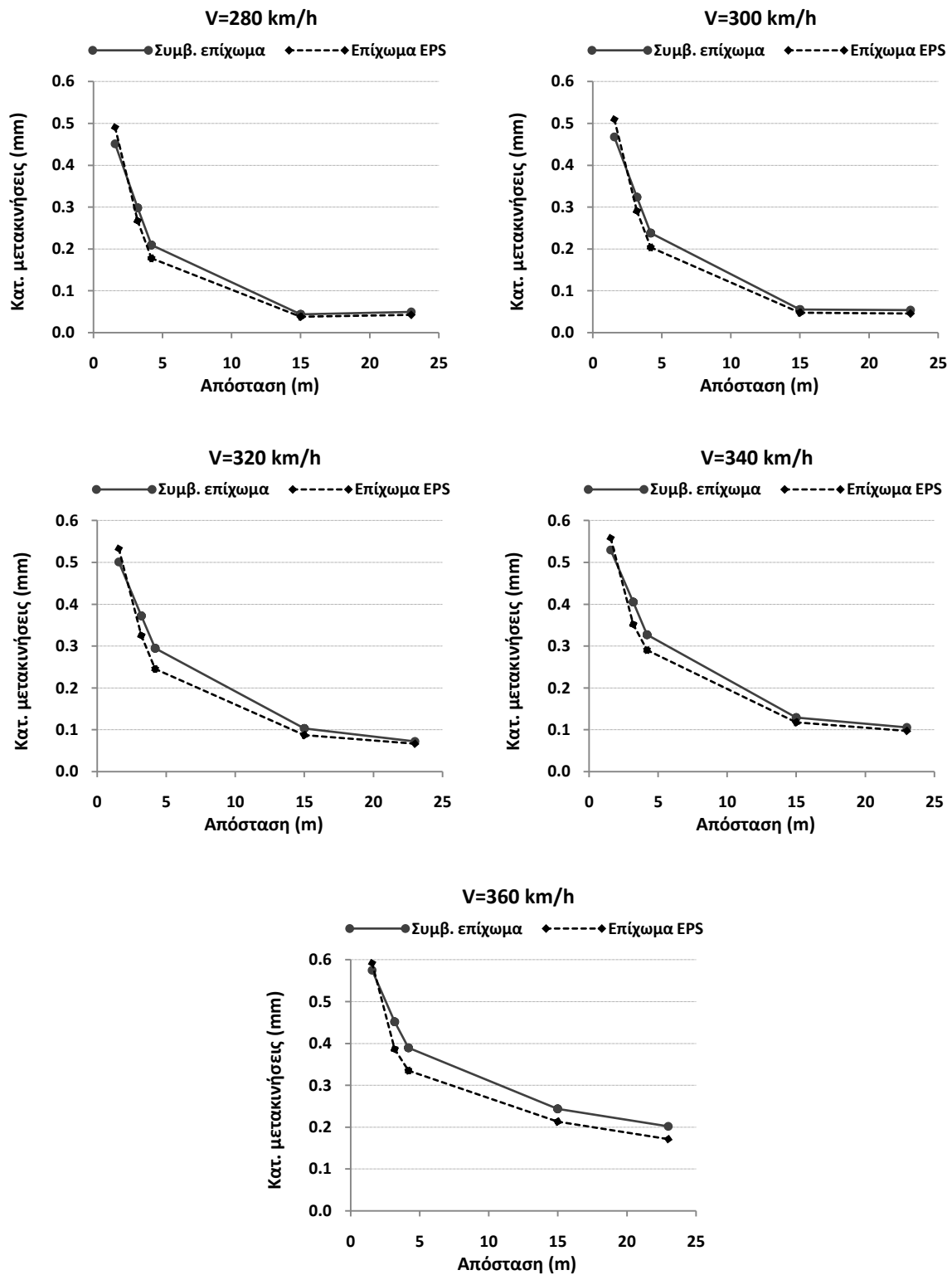
6.3 Μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις ανά θέση

Τα διαγράμματα των Εικόνων 6.19 και 6.20 δείχνουν τις μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις για διάφορες θέσεις, για τις δυο περιπτώσεις επιχώματος σε έδαφος με $E=39.1$ MPa για ταχύτητες διέλευσης από 180 έως 360 km/h. Για όλες τις ταχύτητες και για τα δυο είδη επιχώματος φαίνεται ξεκάθαρα ότι οι μετακινήσεις μειώνονται με την απόσταση, όπως είναι αναμενόμενο σύμφωνα και με τη θεωρητική προσέγγιση του φαινομένου. Η μείωση αυτή είναι εντονότερη στα πρώτα 15m (ως το σημείο 4) από την κεντρική γραμμή της σιδηροτροχιάς, ενώ έπειτα έχει μικρότερο ρυθμό. Επίσης, διακρίνεται και πάλι η βελτίωση -λόγω

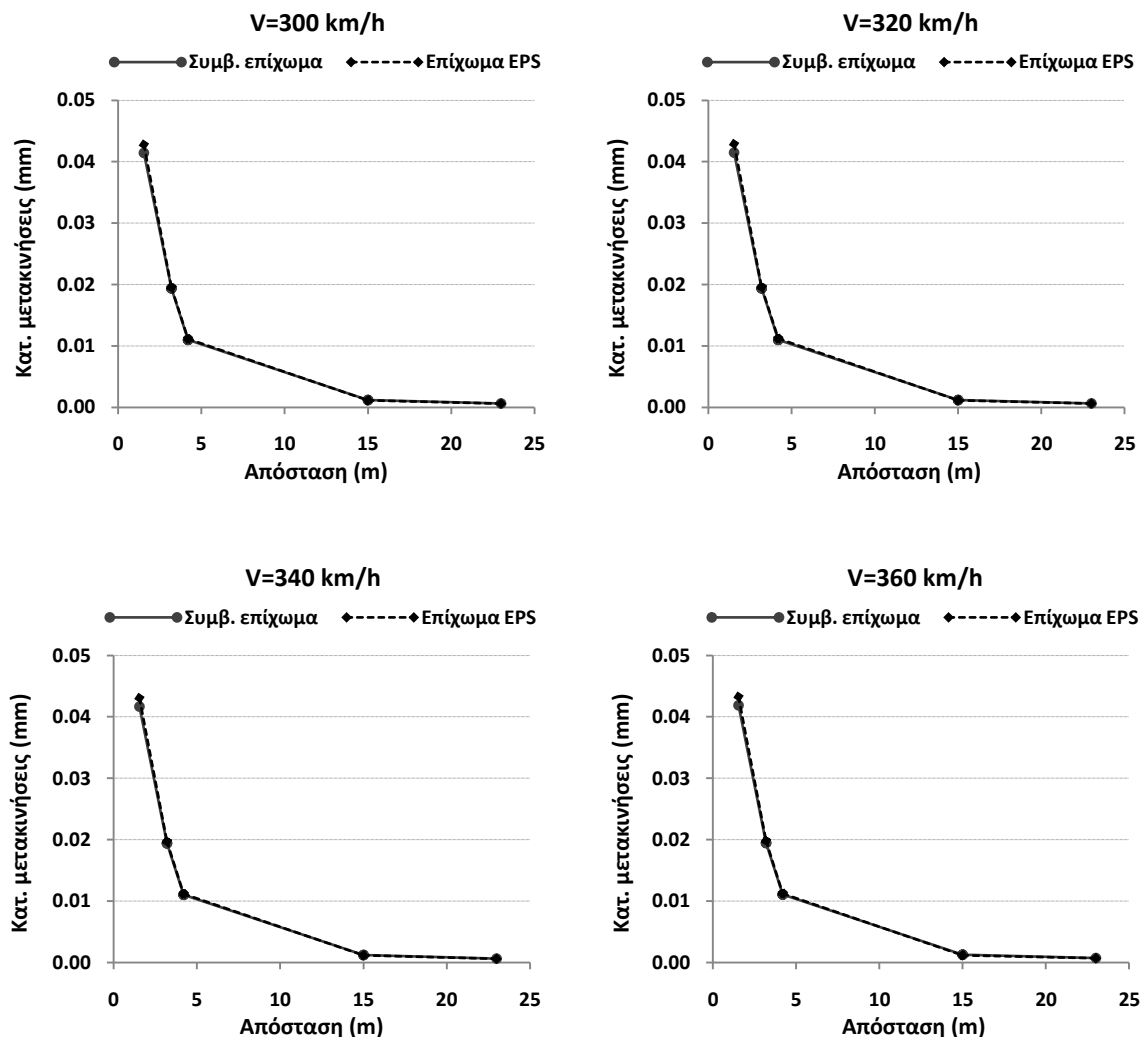
του EPS- στις μετακινήσεις επιχώματος, οι οποίες είναι παντού μικρότερες, εκτός από το σημείο 1 που είναι μεγαλύτερες.



Εικόνα 6.19: Μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις με την απόσταση για τις δυο περιπτώσεις επιχώματος σε εδαφικό υπόβαθρο με $E=39.1$ MPa για ταχύτητες διέλευσης 180 - 260 km/h.



Εικόνα 6.20: Μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις με την απόσταση για τις δυο περιπτώσεις επιχώματος σε εδαφικό υπόβαθρο με $E=39.1 \text{ MPa}$ για ταχύτητες διέλευσης 280 – 360 km/h.

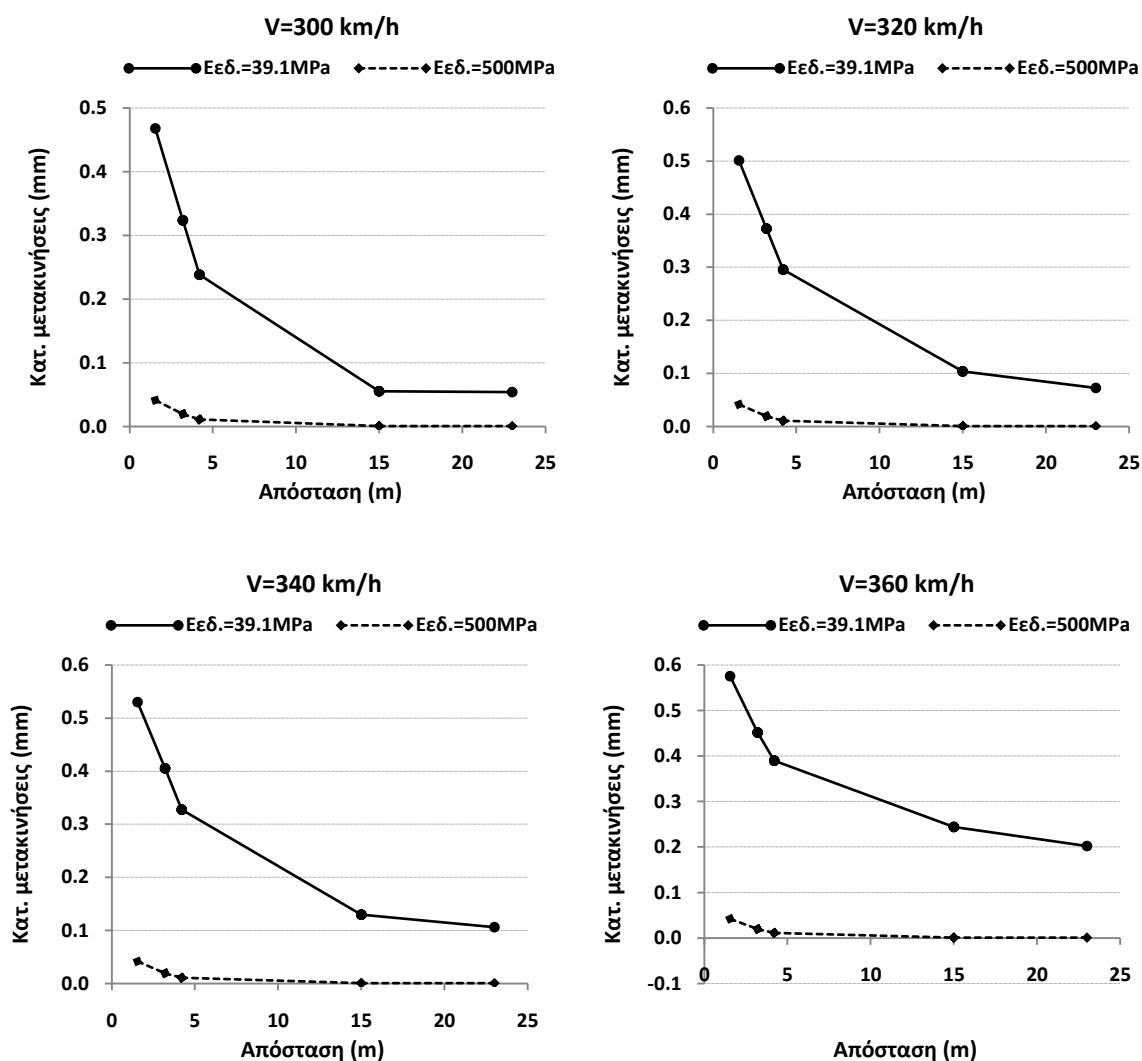


Εικόνα 6.21: Μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις με την απόσταση για τις δυο περιπτώσεις επιχώματος σε εδαφικό υποβάθρο με $E=500 \text{ MPa}$ για ταχύτητες διέλευσης 300 – 360 km/h.

Τα διαγράμματα της Εικόνας 6.21 είναι αντίστοιχα με αυτά των Εικόνων 6.19 και 6.20, αλλά για την περίπτωση του βραχώδους στρώματος και για ταχύτητες διέλευσης τρένου 300 - 360 km/h. Η μείωση των μετακινήσεων έχει τα ίδια χαρακτηριστικά και για τα δυο επιχώματα και στο σημείο 1 η μετακίνηση παραμένει μεγαλύτερη για το EPS επίχωμα σε όλες τις ταχύτητες. Οι μετακινήσεις έχουν αισθητά μειωθεί πολύ και για τα δυο επιχώματα, ενώ το EPS επίχωμα φαίνεται να μην τις μειώνει ιδιαίτερα σε σχέση με το συμβατικό.

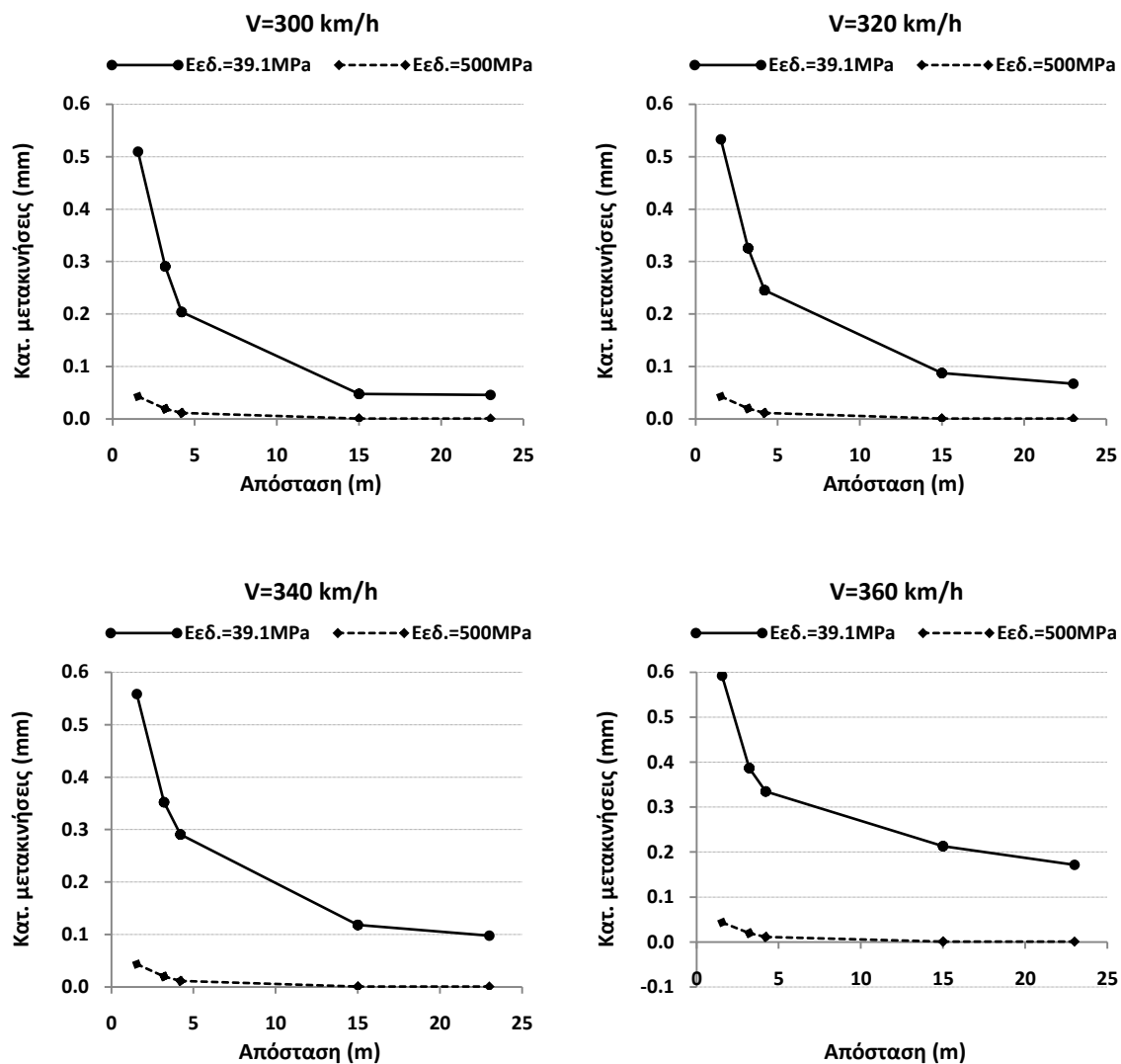
Στα διαγράμματα των Εικόνων 6.22 και 6.23 παρουσιάζεται μια ειδικότερη σύγκριση των δυο διαφορετικών εδαφικών υποβάθρων παρουσιάζοντας τη χωρική μεταβολή των μετακινήσεων για το συμβατικό και για το κατασκευασμένο

από EPS επίχωμα, αντίστοιχα, για τις ταχύτητες διέλευσης τρένου από 300 έως 360 km/h.



Εικόνα 6.22: Μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις με την απόσταση για τα δύο εδαφικά υπόβαθρα (γαιώδες - βραχώδες) για το συμβατικό επίχωμα (V=300 - 360 km/h).

Είναι φανερή η μεγάλη διαφορά των μετακινήσεων για τα δυο εδαφικά υπόβαθρα, η οποία όπως προαναφέρθηκε έχει αποτυπωθεί στους Πίνακες 6.7 και 6.8. Επίσης, φαίνεται η ηπιότερη μείωση αυτών, για την περίπτωση του βραχώδους υπόβαθρου, όπου πρακτικά μηδενίζονται σταδιακά από το σημείο 3 (πόδας του επιχώματος) και έπειτα.



Εικόνα 6.23: Μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις με την απόσταση για τα δύο εδαφικά υπόβαθρα (γαιώδες - βραχώδες) για το EPS επίχωμα ($V=300 - 360\text{ km/h}$).

Κεφάλαιο 7^ο

Συμπεράσματα

Με τη διαδικασία προσομοίωσης που παρουσιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια έγινε μια προσπάθεια αριθμητικής διερεύνησης της επίδρασης των δυναμικών δονήσεων στα σιδηροδρομικά επιχώματα. Γενικά, πρόκειται για ένα σύνθετο και πολυδιάστατο ζήτημα, εξαιτίας των πολλών παραγόντων που επηρεάζουν το φαινόμενο της παραγωγής και διάδοσης των δονήσεων, αλλά και τη ρεαλιστική προσομοίωση του συστήματος. Οι βασικές παράμετροι της παρούσας, σχετικά απλουστευμένης για να μειωθεί τουψηλό υπολογιστικό κόστος, αριθμητικής διερεύνησης ήταν η ταχύτητα διέλευσης του τρένου, το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους έδρασης του σιδηροδρομικού επιχώματος (γαιώδες ή βραχώδες) και το υλικό κατασκευής του επιχώματος (συμβατικό γαιώδες ή EPS). Τα αποτελέσματα επικεντρώθηκαν στον έλεγχο των κατακόρυφων μετακινήσεων.

Συνοπτικά, προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα τα οποία γενικά συμφωνούν με την υφιστάμενη γνώση για το εξετασθέν πρόβλημα, όπως παρουσιάζεται στη σχετική διεθνή βιβλιογραφία:

- Η αύξηση της ταχύτητα διέλευσης του τρένου οδηγεί σε αύξηση των παραγόμενων εδαφικών μετακινήσεων σε όλες τις αποστάσεις από τη σιδηροτροχιά. Πιο συγκεκριμένα, για τα σημεία ελέγχου του συμβατικού επιχώματος και για τις ταχύτητες 180 και 360 km/h του προσομοιώματος της εργασίας, η συνολική μικρότερη αύξηση μετακίνησης εμφανίστηκε ακριβώς κάτω από τον σιδηρόδρομο στο σημείο 1 σε απόσταση 1,55m από τον κεντρικό άξονα και η μεγαλύτερη στο σημείο 4 σε απόσταση 15m από αυτόν. Ομοίως, και για την περίπτωση του επιχώματος από EPS, ισχύει η ίδια τάση αύξησης των μετακινήσεων με την ταχύτητα, με την αντίστοιχη συνολική μεταβολή των μετακινήσεων να είναι ελαφρά

μικρότερη σε σχέση με το συμβατικό επίχωμα. Στο βραχύδες υπόβαθρο ($E=500\text{MPa}$), η αύξηση της ταχύτητας από 300 σε 360 km/h δεν επηρέασε ιδιαίτερα τις μετακινήσεις, οι οποίες έχουν σχεδόν μηδενιστεί, αλλά όπου υπήρξε μεταβολή, αυτή ήταν αυξητική.

- Η αύξηση της απόστασης από τη σιδηροτροχιά οδηγεί σε μείωση των δονητικών επιπέδων για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις και παραμέτρους λόγω της απόσβεσης.
- Η χρήση του EPS στο σιδηροδρομικό επίχωμα έχει καλή αποτελεσματικότητα στον περιορισμό των παραγόμενων δονητικών επιπέδων σε σχέση με το συμβατικό επίχωμα για όλες τις ταχύτητες διέλευσης τρένου. Πιο συγκεκριμένα, για το συμβατικό γαιώδες επίχωμα ($E=39.1\text{ MPa}$), οι μετακινήσεις αυξάνονται ελαφρά στην επιφάνεια του επιχώματος ακριβώς κάτω από τον σιδηρόδρομο. Στη συνέχεια, από ένα σημείο μεταξύ του πόδα του σιδηρόδρομου και του φρυδιού του πρανούς του επιχώματος, ξεκινάει η ευεργετική επίδραση του EPS, η οποία γίνεται εντονότερη μετά τον πόδα του επιχώματος. Σε μεγαλύτερες αποστάσεις, η διαφορά των μετακινήσεων μεταξύ των δυο περιπτώσεων επιχώματος γενικά μειώνεται και για κάποιες ταχύτητες σχεδόν μηδενίζεται. Στην περίπτωση που το επίχωμα εδράζεται στο βραχύδες υπόβαθρο ($E=500\text{ MPa}$), το επίχωμα από EPS φαίνεται να έχει ελάχιστη επίδραση στις μετακινήσεις, αλλά με όμοιο τρόπο.
- Το βραχύδες υπόβαθρο ($E=500\text{ MPa}$) ως έδραση του επιχώματος μελέτης έναντι του γαιώδους ($E=39.1\text{ MPa}$), οδηγεί στη δημιουργία πολύ μικρότερων μετακινήσεων (άνω του 90%) για όλα τα σημεία ελέγχου, για όλες τις ταχύτητες και για τα δυο είδη επιχώματος.

Μια διπλωματική εργασία οπωσδήποτε δεν μπορεί να καλύψει πλήρως ένα τόσο πολύπλοκο θέμα. Αναφορικά με την αποτελεσματικότητα της χρήσης του EPS στο σιδηροδρομικό επίχωμα αυτό παραμένει ακόμη ένα ανοικτό θέμα το οποίο χρειάζεται εκτενέστερη διερεύνηση, σύγκριση και συσχέτιση των εξαχθέντων συμπερασμάτων συναφών εργασιών με άλλα μέτρα μετριασμού των δονήσεων. Σαφώς παραμένει ανοικτό το ενδεχόμενο περαιτέρω διερεύνησης με εφαρμογή της ίδιας ή άλλης μεθοδολογίας απομείωσης εξετάζοντας κι άλλες σχετικές παραμέτρους. Συμπληρωματική σημαντική ενέργεια θα πρέπει να είναι η

επικύρωση του προσομοιώματος με πραγματικές μετρήσεις και η εξαγωγή αποτελεσμάτων πέραν των κατακόρυφων επιφανειακών μετακινήσεων, π.χ., μέγιστες ταχύτητες, φάσματα συχνοτήτων, κλπ. Τα ευρήματα της παρούσας εργασίας δείχνουν τη σημασία της χρήσης του EPS σε σιδηροδρομικά επιχώματα ως μέτρο περιορισμού των σιδηροδρομικών δονήσεων και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μελλοντικές έρευνες.

Ένα παράδειγμα επέκτασης αποτελεί η εξέταση περισσότερων εδαφικών υποβάθρων έδρασης του EPS επιχώματος, ώστε να εξαχθούν αποτελέσματα μεγαλύτερου εύρους σχετικά με τον περιορισμό των εδαφικών δονήσεων. Παράλληλα θα μπορούσαν να διερευνηθούν αριθμητικά οι δονήσεις σε ένα γειτονικό κτίριο ή γέφυρα. Η σημασία τέτοιων μελετών είναι ότι συμβάλλουν στην υιοθέτηση μιας συγκεκριμένης μεθοδολογίας για την αξιολόγηση των σιδηροδρομικών δονήσεων και καταδεικνύουν την υποχρέωση των αρμόδιων φορέων, που είναι υπεύθυνοι για τον σχεδιασμό, την κατασκευή και τη λειτουργία των σιδηροδρομικών γραμμών τρένων υψηλών ταχυτήτων, να διαμορφώσουν ένα πλήρες κανονιστικό πλαίσιο.

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 2.1 Οργανωτικό Σχήμα Σιδηροδρομικής Υποδομής (Πυργίδης, 2006).	6
Εικόνα 2.2: Σιδηρόδρομοι Υψηλών Ταχυτήτων στην Ευρώπη το 2017 (https://en.wikipedia.org/wiki/High-speed_rail_in_Europe#/media/File:High_Speed7_Railroad_Map_of_Europe.svg , 2018).....	7
Εικόνα 2.3 Τυπική διατομή σιδηροδρομικής γραμμής για την κλασσική σκυρογραμμή (Τροποποιημένη από: http://docplayer.gr/3914364-l-ap-diadromoi-prosgeiosis-apogeiosis-aeroskafon.html , 2018).	8
Εικόνα 2.4: Αναπτυσσόμενες τάσεις στη σιδηροδρομική οδό μεταφοράς (https://www.slideshare.net/nkocet/unit-1-railway-engineering , 2018).....	9
Εικόνα 2.5: Κλασσική ή συμβατική ή εύκαμπτη έδραση (https://www.plassertheurer.com/es/maquinas-sistemas/desguarnecido-balasto.html#&gid=1&pid=1 , 2018).	11
Εικόνα 2.6: Σταθερή επιδομή ή Δύσκαμπτη έδραση (https://www.travertec.ro/track-to-the-future/products/railways-and-commuter-traffic/ballastless-track-systems/rheda-2000/ballastless-track-system-without-continuous-reinforcement/ , https://www.vias-ferreas.com/examples?lightbox=1&image=1z85 , 2018).....	11
Εικόνα 2.7: Τα κύρια μέρη σιδηροδρομικού οχήματος: αμάξωμα – φορεία – άξονες (Κουτσίδου, 2014).....	12
Εικόνα 2.8: Τα συστατικά μέρη ενός φορείου αμαξώματος τρένου (Atamuradon et al, 2017).	13
Εικόνα 2.9: Τα κύματα χώρου (Ραπτάκης, 2007).	15
Εικόνα 2.10: Τα επιφανειακά κύματα (Ραπτάκης, 2007).	16
Εικόνα 2.11: Ανάκλαση και διάθλαση κυμάτων.	20
Εικόνα 2.12: Η ανάκλαση και η διάθλαση των σιδηροδρομικών δονήσεων.	20
Εικόνα 2.13: Η χρήση των μετρητικών μονάδων των δονήσεων (Connolly et al., 2015).	26
Εικόνα 2.14: Οι τρεις διακριτές περιοχές του προβλήματος των σιδηροδρομικών εδαφικών δονήσεων (Bahrekazemi, 2004).....	27
Εικόνα 2.15 : Η κατανομή των σεισμικών κυμάτων λόγω της διέγερσης εξαιτίας της κίνησης του τρένου (Connolly et al., 2013).....	28
Εικόνα 2.16: Τυπικές περιοχές συχνότητας διέγερσης (Connolly et al., 2014a). ..	29
Εικόνα 2.17: Επιπεδώσεις στην κυκλική περιφέρεια των τροχών λόγω της πέδησης/επιβράδυνσης του τρένου (http://cs.trains.com/trn/f/111/t/251253.aspx , http://www.trainboard.com/highball/index.php?threads/simple-project-gone-wrong.52720/ , 2018).	30
Εικόνα 2.18: Επίπεδα της κατακόρυφης δόνησης για τους τρεις τύπους τρένου. Πάνω-Αριστερά: Διατομή Φυσικού εδάφους, Πάνω-δεξιά: Διατομή	

επιχώματος, Κάτω-αριστερά: Διατομή ορύγματος, Κάτω-δεξιά: όλες οι διατομές (Connolly et al., 2014b).....	32
Εικόνα 2.19: Σχηματική διαταξη των τριών τύπων τρένου (α) TGV, (β) Thalys, (γ) Eurostar (Connolly et al., 2014b).....	33
Εικόνα 2.20: Η επίδραση της ταχύτητας Rayleigh και της ταχύτητας του τρένου επάνω στα επίπεδα της δόνησης όπως καταγράφηκε σε μέρη της Ευρώπης, όπου : Ledsgard (Sweden), ▼: Stilton Fen (UK), : Amsterdam–Utrecht (Holland) (Kouroussis et al., 2014).....	34
Εικόνα 2.21: Η επίδραση της ταχύτητας του τρένου σε PPV (m/s) και VdB (dB). Αριστερά: Κοντινό πεδίο, Δεξιά: Μακρινό πεδίο (Connolly et al., 2014b).	36
Εικόνα 2.22: Μεταβολές της μετακίνησης και της ταχύτητας της δόνησης με την ταχύτητα του τρένου (a,b: D=0m, c,d: D=20 m, e,f: D=40 m) για διάφορες κατακόρυφες ανωμαλίες σιδηροτροχιάς (Bian et al., 2015).	37
Εικόνα 2.23 : Οι ανωμαλίες στη σιδηροτροχιά ως αιτία δημιουργίας εδαφικών δονήσεων (https://lh3.googleusercontent.com/0WqnoKK9sKv8UsHpbK7gBXx4vke4R-ykVDVimTwsG74U-Vs_cOkXKW99r17u-qikll46gQ=s114 , 2018).	39
Εικόνα 2.24: Η επίδραση των ιδιοτήτων του υποκείμενου εδάφους στις δονήσεις (Ανασχεδιασμένη από: Takemiya, 2005).....	43
Εικόνα 2.25: Επίδραση του βάθους του βραχώδους υποστρώματος επάνω στις δονήσεις (Takemiya, 2005).	44
Εικόνα 2.26: Τα δονητικά επίπεδα σε διαφορετικές αποστάσεις από τον σιδηρόδρομο για τρία επιχώματα διαφορετικής δυσκαμψίας. (α) Επίπεδα PPV κατακόρυφων δονήσεων και (β) Δείκτης KBF,max όπου $KB_{F,max} = \max(KB_{F,z})$ (Olivier et al., 2016).	45
Εικόνα 2.27: Η επίδραση της στιβαρότητας του επιχώματος. (α) Οι κατακόρυφες παραμορφώσεις του έρματος, (β) Τα δονητικά επίπεδα στο μακρινό πεδίο σε PPV σε διαφορετικές αποστάσεις από τη θεμελίωση του επιχώματος (Connolly et al., 2013).....	45
Εικόνα 2.28 : Σεισμική ανάκλαση / διάθλαση (Connolly et al., 2013).....	47
Εικόνα 2.29: Επίδραση του λόγου Poisson επάνω στην ταχύτητα των σεισμικών κυμάτων P, S και R (Connolly et al., 2014a).	49
Εικόνα 2.30: Επίδραση του μέτρου διάτμησης στα δονητικά επίπεδα PPV and Vrms: (a) Χρονοιστορία στα 2m από την εσχάρα, (b) PPV, (c) Vrms (Kouroussis et al., 2012).	50
Εικόνα 2.31: Οι τρεις διαφορετικές εδαφικές διατομές του σιδηρόδρομου: (α) Επίπεδο φυσικού εδάφους, (β) Επίχωμα, (γ) Όρυγμα (Connolly et al., 2014b). ...	52
Εικόνα 2.32: Επίπεδα PPV της κατακόρυφης δόνησης εξαιτίας του περάσματος του τρένου στον κοντινό και στον μακρινό σιδηρόδρομο (Connolly et al., 2014b).	52
Εικόνα 2.33: Οι τρεις συνιστώσες των επιπέδων PPV για τον σιδηρόδρομο που βρίσκεται στο επίπεδο του φυσικού εδάφους, Αριστερά: Η μέση τιμή PPV για όλα τα τρένα στον κοντινό σιδηρόδρομο, Δεξιά: Η διέλευση αποκλειστικά	

του τρένου Thalys στα 299 km/h στον κοντινό σιδηρόδρομο (Connolly et al., 2014b).	53
Εικόνα 2.34: Οι τρεις συνιστώσες των επιπέδων PPV για τον σιδηρόδρομο που βρίσκεται στο επίχωμα. Αριστερά: Η μέση τιμή PPV για όλα τα τρένα στον μακρινό σιδηρόδρομο, Δεξιά: Η διέλευση αποκλειστικά του τρένου Thalys στα 299 km/h στον μακρινό σιδηρόδρομο (Connolly et al., 2014b).	53
Εικόνα 2.35: Οι τρεις συνιστώσες των επιπέδων PPV για τον σιδηρόδρομο που βρίσκεται στο όρυγμα, Αριστερά: Η μέση τιμή PPV για όλα τα τρένα στον κοντινό σιδηρόδρομο, Δεξιά: Η διέλευση αποκλειστικά του τρένου Thalys στα 297 km/h στον μακρινό σιδηρόδρομο (Connolly et al., 2014b).	54
Εικόνα 2.36 : Η επίδραση της εδαφικής διατομής του σιδηρόδρομου επάνω στην κατακόρυφη συνιστώσα της παραγόμενης εδαφικής δόνησης, (α): Κοντινός σιδηρόδρομος, (β): Μακρινός σιδηρόδρομος (Connolly et al., 2014b). ..	55
Εικόνα 2.37: Οπτική αριθμητική απεικόνιση (με τομή κάθετη στον x άξονα κίνησης του τρένου) των επιπέδων PPV των δονήσεων που παράγονται από τη διέλευση του τρένου υψηλής ταχύτητας Thalys: (a) σιδηρόδρομος στη στάθμη του φυσικού εδάφους, (b) σιδηρόδρομος σε επίχωμα (Olivier et al., 2016)	56
Εικόνα 2.38: Κανονικοποιημένο φάσμα απόκρισης πλάτους των κατακόρυφων εδαφικών κατακόρυφων δονήσεων με την συχνότητα. (α): Διατομή στο επίπεδο του φυσικού εδάφους, (β) Διατομή επιχώματος, (γ) Διατομή ορύγματος (Αριστερά: Κοντινό πεδίο, Δεξιά: Μακρινό πεδίο) (Connolly et al., 2014b).	58
Εικόνα 2.39: Ποσοστό των ανθρώπων με διαφορετικούς βαθμούς ενόχλησης στις δονήσεις σε κατοικίες με την σταθμισμένη ταχύτητα $v_{w,95}$ (Bahrekazemi, 2004).	62
Εικόνα 3.1: Ταξινόμηση προσομοιωμάτων εδάφους (Kouroussis et al., 2014).	68
Εικόνα 3.2: Τα τέσσερα επιθυμητά χαρακτηριστικά ενός προσομοιώματος πρόβλεψης δονήσεων (Connolly et al., 2014a).	69
Εικόνα 3.3: Σύγκριση της παρατηρούμενης εξασθένησης της μέγιστης κατακόρυφης ταχύτητας εδάφους με την απόσταση με τα αποτελέσματα αριθμητικών προσομοιώσεων με προσομοιώματα SEM 2D και 3D (Paolucci et al., 2003).	82
Εικόνα 3.4: Σύγκριση των αποτελεσμάτων της μεθόδου SEM και BR σε απόσταση 5 και 15m από τη γραμμή της φόρτισης. Αριστερά: Χρονοϊστορίες μετακινήσεων. Δεξιά: Φάσματα Fourier (Paolucci & Spinelli, 2005).	85
Εικόνα 3.5: Η συζευγμένη μέθοδος BE/FE (Connolly et al., 2014a).	87
Εικόνα 3.6: Παράδειγμα μιας 2.5D προσέγγισης (Connolly et al., 2014a).	89
Εικόνα 3.7: Η συζευγμένη μέθοδος FE/TLM (Connolly et al., 2014a).	89
Εικόνα 3.8: Ταξινόμηση προσομοιωμάτων σιδηροδρομικών δονήσεων (Kouroussis et al., 2014).	92
Εικόνα 3.9: Η θεωρία του Hertz και η γραμμικοποίηση (Kouroussis et al., 2014).	97

Εικόνα 3.10: Απλά δυναμικά προσομοιώματα του κινούμενου οχήματος: (a): «1/2 του οχήματος» και (b): «1/4 του οχήματος» (Kouroussis et al., 2014).....	98
Εικόνα 3.11: Η αρχή των λογισμικών προσομοίωσης πολλαπλού σώματος (Kouroussis et al., 2014).	100
Εικόνα 3.12: Προσομοίωμα εσχάρας μονής στρώσης συνεχόμενης στήριξης (Connolly et al., 2014a).	103
Εικόνα 3.13: Προσομοίωμα εσχάρας διπλής στρώσης συνεχόμενης στήριξης (Connolly et al., 2014a).	104
Εικόνα 3.14: Προσομοίωμα εσχάρας διπλής στρώσης διακριτής στήριξης (Connolly et al., 2014a).	104
Εικόνα 3.15: Το προσομοίωμα του Zhai για τη δυναμική συμπεριφορά σιδηροδρομικής γραμμής με έρμα (a) Γεωμετρικό σχήμα του προσομοιώματος του έρματος, (b) Προσομοίωμα τριών στρωμάτων για την εσχάρα (Connolly et al., 2014a).	105
Εικόνα 3.16: Χαρακτηριστικά ανοχής για αναλυτικά προσομοιώματα εσχάρας (Connolly et al., 2014a).	106
Εικόνα 3.17: Συζευγμένο προσομοίωμα τρένου - εσχάρας (Connolly et al., 2014a).	107
Εικόνα 4.1: Ανοικτή τάφρος δίπλα σε σιδηροδρομική γραμμή (RIVAS D4.1, 2011).	114
Εικόνα 4.2: Συντελεστής μείωσης πλάτους AR για ανοικτή τάφρο ως συνάρτηση του σχετικού βάθους d/λ. Μαύρη γραμμή: François et al. , ▲:Woods, ο: Haupt, Γκρι γραμμή: Dolling (RIVAS D4.1, 2011).	114
Εικόνα 4.3: Ανοικτή τάφρος (a) Με επικλινή εδαφικά πρανή, (b) Με αντιστηρίξεις (RIVAS D4.1, 2011).	116
Εικόνα 4.4: Ένας φράκτης υπόγειου τοίχου δίπλα από έναν σιδηρόδρομο (RIVAS D4.1, 2011).....	116
Εικόνα 4.5 : Σύστημα μαξιλαριών αερίου (gas cushion system) τρίτης γενιάς, με εύκαμπτα μαξιλάρια προσαρτημένα σε σκληρό, προκατασκευασμένο πάνελ σκυροδέματος (Massarsch, 2004).	118
Εικόνα 4.6: Φράκτης Υπόγειου τοίχου από συστοιχία πασσάλων κυματοειδούς λαμαρίνας (sheet pile wall) (Dijckmans et al., 2016).....	118
Εικόνα 4.7: Ορισμένες πιθανές διατάξεις για την αύξηση της στιβαρότητας του υποβάθρου: (a): παρέμβαση στο επίχωμα, (b) - (c): παρέμβαση στο επίχωμα και στην άνω εδαφική στρώση και (d) - (e): παρέμβαση στο παρακείμενο έδαφος (RIVAS D4.1, 2011).	121
Εικόνα 4.8: Μπλοκ παρεμπόδισης κύματος ακριβώς κάτω από τον σιδηρόδρομο (a): Με άπειρες πλευρικές διαστάσεις, (b): Με συγκεκριμένες διαστάσεις (RIVAS D4.1, 2011).	122
Εικόνα 4.9: Κυματικός ανακλαστήρας δίπλα σε σιδηρόδρομο (RIVAS D4.1, 2011).	123
Εικόνα 4.10: Μπλοκ EPS.	124

Εικόνα 4.11: Κατασκευή επιχώματος με χρήση γεωαφρού EPS (ΠΕΤΕΠ 02-07-07-00, 2017).....	129
Εικόνα 4.12: Διάταξη ορθής τοποθέτησης πρισμάτων EPS στο επίχωμα (ΠΕΤΕΠ 02-07-07-00, 2017).	131
Εικόνα 4.13: Οδοντωτή μεταλλική πλάκα για την ενίσχυση της συνοχής μεταξύ πρισμάτων EPS (ΠΕΤΕΠ 02-07-07-00, 2017).....	131
Εικόνα 4.14: Σιδηροδρομικό EPS επίχωμα (http://www.alliedfoamtech.com/ Appgeotechfoam.htm, 2018).....	132
Εικόνα 4.15: Σιδηροδρομικό EPS επίχωμα στην κατασκευή (https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/The_use_of_Stylite_EPS_Geofill_in_rail_embankments , 2018).....	133
Εικόνα 4.16: EPS επίχωμα στο Draper City της Γιούτα των Η.Π.Α. (Neupane, 2015).	134
Εικόνα 4.17: Σχηματική τομή του EPS επίχωματος στο Draper City της Γιούτα των Η.Π.Α. (Neupane, 2015).....	134
Εικόνα 5.1: Σχεδιασμός 3D προσομοιώματος σιδηρόδρομου – επιχώματος – εδάφους στο Autocad 2017.	138
Εικόνα 5.2: Εισαγωγή 3D προσομοιώματος σιδηρόδρομου – επιχώματος – εδάφους στο ANSYS 17.0.....	139
Εικόνα 5.3: Σχηματική απεικόνιση του συμμετρικού προσομοιώματος και σημεία ελέγχου.....	140
Εικόνα 5.4: Σχηματική πλαϊνή όψη του τρένου CRH3 (Feng et al., 2017).....	141
Εικόνα 5.5: Ο σιδηρόδρομος και το επίχωμα του 3D προσομοιώματος στο ANSYS 17.0.	143
Εικόνα 5.6: Το υποκείμενο έδαφος του 3D προσομοιώματος στο ANSYS 17.0..	145
Εικόνα 6.1: Χρονοϊστορίες κατακόρυφων μετακινήσεων για ταχύτητα τρένου 180 km/h για τις δυο περιπτώσεις επιχώματος σε έδαφος με $E=39.1 \text{ MPa}$	148
Εικόνα 6.2: Χρονοϊστορίες κατακόρυφων μετακινήσεων για ταχύτητα τρένου 200 km/h για τις δυο περιπτώσεις επιχώματος σε έδαφος με $E=39.1 \text{ MPa}$	149
Εικόνα 6.3: Χρονοϊστορίες κατακόρυφων μετακινήσεων για ταχύτητα τρένου 220 km/h για τις δυο περιπτώσεις επιχώματος σε έδαφος με $E=39.1 \text{ MPa}$	150
Εικόνα 6.4: Χρονοϊστορίες κατακόρυφων μετακινήσεων για ταχύτητα τρένου 240 km/h για τις δυο περιπτώσεις επιχώματος σε έδαφος με $E=39.1 \text{ MPa}$	151
Εικόνα 6.5: Χρονοϊστορίες κατακόρυφων μετακινήσεων για ταχύτητα τρένου 260 km/h για τις δυο περιπτώσεις επιχώματος σε έδαφος με $E=39.1 \text{ MPa}$	152
Εικόνα 6.6: Χρονοϊστορίες κατακόρυφων μετακινήσεων για ταχύτητα τρένου 280 km/h για τις δυο περιπτώσεις επιχώματος σε έδαφος με $E=39.1 \text{ MPa}$	153
Εικόνα 6.7: Χρονοϊστορίες κατακόρυφων μετακινήσεων για ταχύτητα τρένου 300 km/h για τις δυο περιπτώσεις επιχώματος σε έδαφος με $E=39.1 \text{ MPa}$	154
Εικόνα 6.8: Χρονοϊστορίες κατακόρυφων μετακινήσεων για ταχύτητα τρένου 320 km/h για τις δυο περιπτώσεις επιχώματος σε έδαφος με $E=39.1 \text{ MPa}$	155

Εικόνα 6.9: Χρονοϊστορίες κατακόρυφων μετακινήσεων για ταχύτητα τρένου 340 km/h για τις δυο περιπτώσεις επιχώματος σε έδαφος με $E=39.1$ MPa.....	156
Εικόνα 6.10: Χρονοϊστορίες κατακόρυφων μετακινήσεων για ταχύτητα τρένου 360 km/h για τις δυο περιπτώσεις επιχώματος σε έδαφος με $E=39.1$ MPa.....	157
Εικόνα 6.11: Χρονοϊστορίες κατακόρυφων μετακινήσεων για ταχύτητα τρένου 300 km/h για τις δυο περιπτώσεις επιχώματος σε βράχο με $E=500$ MPa.	158
Εικόνα 6.12: Χρονοϊστορίες κατακόρυφων μετακινήσεων για ταχύτητα τρένου 320 km/h για τις δυο περιπτώσεις επιχώματος σε βράχο με $E=500$ MPa.	159
Εικόνα 6.13: Χρονοϊστορίες κατακόρυφων μετακινήσεων για ταχύτητα τρένου 340 km/h για τις δυο περιπτώσεις επιχώματος σε βράχο με $E=500$ MPa.	160
Εικόνα 6.14: Χρονοϊστορίες κατακόρυφων μετακινήσεων για ταχύτητα τρένου 360 km/h για τις δυο περιπτώσεις επιχώματος σε βράχο με $E=500$ MPa.	161
Εικόνα 6.15: Μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις με την ταχύτητα ($V=180 - 360$ km/h) για τις δυο περιπτώσεις επιχώματος σε έδαφος με $E=39.1$ MPa.	164
Εικόνα 6.16: Μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις με την ταχύτητα ($V=300 - 360$ km/h) για τις δυο περιπτώσεις επιχώματος σε έδαφος με $E=500$ MPa.	165
Εικόνα 6.17: Μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις με την ταχύτητα ($V=300 - 360$ km/h) για τα δύο εδαφικά υπόβαθρα (γαιώδες - βραχώδες) για το συμβατικό επίχωμα.	168
Εικόνα 6.18: Μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις με την ταχύτητα ($V=300 - 360$ km/h) για τα δύο εδαφικά υπόβαθρα (γαιώδες - βραχώδες) για το EPS επίχωμα.....	169
Εικόνα 6.19: Μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις με την απόσταση για τις δυο περιπτώσεις επιχώματος σε έδαφος με $E=39.1$ MPa για ταχύτητες διέλευσης 180 - 260 km/h.	171
Εικόνα 6.20: Μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις με την απόσταση για τις δυο περιπτώσεις επιχώματος σε έδαφος με $E=39.1$ MPa για ταχύτητες διέλευσης 280 - 360 km/h.	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
Εικόνα 6.21: Μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις με την απόσταση για τις δυο περιπτώσεις επιχώματος σε έδαφος με $E=500$ MPa για ταχύτητες διέλευσης 300 - 360 km/h.	173
Εικόνα 6.22: Μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις με την απόσταση για τα δύο εδαφικά υπόβαθρα (γαιώδες - βραχώδες) για το συμβατικό επίχωμα ($V=300 - 360$ km/h).	174
Εικόνα 6.23: Μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις με την απόσταση για τα δύο εδαφικά υπόβαθρα (γαιώδες - βραχώδες) για το EPS επίχωμα ($V=300 - 360$ km/h).	175

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 2.1: Συγκριτικά χαρακτηριστικά των τριών βασικών τύπων των εδαφικών κυμάτων (Avillez et al., 2012).	17
Πίνακας 2.2: Συντελεστές ελαστικότητας διαφόρων στοιχείων της σιδηροδρομικής γραμμής (Φώλας, 2009).	41
Πίνακας 2.3: Περιγραφικά αποτελέσματα επίπεδων δόνησης και εξασθένησης ενέργειας με την απόσταση σε σχέση με το εδαφικό υπόβαθρο (Kouroussis et al., 2012).	49
Πίνακας 2.4: Κριτήρια επιπτώσεων των εδαφικών δονήσεων για τα συνήθη κτήρια (Bahrekazemi, 2004).	64
Πίνακας 2.5: Κριτήρια επιπτώσεων των εδαφικών δονήσεων (Bahrekazemi, 2004).	64
Πίνακας 2.6: Κριτήρια επιπτώσεων των εδαφικών δονήσεων για τα ειδικά κτήρια (Bahrekazemi, 2004).	65
Πίνακας 3.1: Επισκόπηση υφιστάμενων προσεγγίσεων για την προσομοίωση της εσχάρας (Connolly et al., 2014a).	90
Πίνακας 4.1: Τιμές θλιπτικής αντοχής του EPS για διάφορα επίπεδα παραμόρφωσης ϵ και πυκνότητας ρ (ΠΕΤΕΠ 02-07-07-00, 2017).	126
Πίνακας 4.2: Βασικές μηχανικές ιδιότητες γεωαφρού EPS (ΠΕΤΕΠ 02-07-07-00, 2017).	127
Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά σημεία ελέγχου κατακόρυφων μετακινήσεων.	140
Πίνακας 6.1: Μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις (mm) για $E_{εδ}=39.1$ MPa για το συμβατικό επίχωμα.	162
Πίνακας 6.2: Μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις (mm) για $E_{εδ}=39.1$ MPa για το EPS επίχωμα.	163
Πίνακας 6.3: Ποσοστιαίες διαφορές μέγιστων κατακόρυφων μετακινήσεων του EPS επιχώματος από το συμβατικό επίχωμα για $E_{εδ}=39.1$ MPa.	163
Πίνακας 6.4: Μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις (mm) για $E_{εδ}=500$ MPa για το συμβατικό επίχωμα.	166
Πίνακας 6.5: Μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις (mm) για $E_{εδ}=500$ MPa για το EPS επίχωμα.	166
Πίνακας 6.6: Ποσοστιαίες διαφορές μέγιστων κατακόρυφων μετακινήσεων του EPS επιχώματος από το συμβατικό επίχωμα για $E_{εδ}=500$ MPa.	167
Πίνακας 6.7: Ποσοστιαίες διαφορές μέγιστων κατακόρυφων μετακινήσεων του εδάφους με $E=39.1$ MPa από το έδαφος με $E=500$ MPa για το συμβατικό επίχωμα.	170
Πίνακας 6.8: Ποσοστιαίες διαφορές μέγιστων κατακόρυφων μετακινήσεων του εδάφους με $E=39.1$ MPa από το έδαφος με $E=500$ MPa για το EPS επίχωμα.	170

Βιβλιογραφία

Διεθνής βιβλιογραφία

- Andersen L., Jones C.J.C. (2006), Coupled boundary and finite element analysis of vibration from railway tunnels - a comparison of two and three - dimensional models, *Journal of Sound and Vibration*, 293, 611–625, DOI:10.1016/j.jsv.2005.08.044.
- Aubry D., Clouteau D., Bonnet G. (1994), Modelling of wave propagation due to fixed or mobile dynamic sources, In N.Chouw and G.Schmid (Eds), *Workshop Wave '94, Wave propagation and Reduction of Vibrations*, Ruhr University, Bochum, Germany, pp. 109-121.
- Auersch L. (2006), Ground vibration due to railway traffic - the calculation of the effects of moving static loads and their experimental verification, *Journal of Sound and Vibration*, 293, 599-610, DOI: 10.1016/j.jsv.2005.08.059.
- Avillez J., Frost M., Cawser S., Skinner C., El-Hamalawi A., Fleming P., Shields P. (2012, August), Procedures for estimating environmental impact from railway induced vibration: a review, Paper presented at the meeting of ASME, Noise Control and Acoustics Division Conference at InterNoise 2012, New York City, New York, USA, DOI: 10.1115/NCAD2012-1083.
- Bahrekazemi M. (2004), Train induced ground vibration and its prediction, (Unpublished thesis of the ENVIB project). Division of Soil and Rock Mechanics, Dept. of Civil and Architectural Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Bian X., Jiang H., Chang C., Hu J., Chen Y. (2015), Track and ground vibrations generated by high-speed train running on ballastless railway with excitation of vertical track irregularities, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 76, 29-43, DOI: 10.1016/j.soildyn.2015.02.009.
- Colaço A., Costa P. A., Connolly D. (2015), The influence of train properties on railway ground vibrations, *Structure and Infrastructure Engineering*, 12(5), 1-18, DOI: 10.1080/15732479.2015.1025291.
- Connolly D., Giannopoulos A., Forde M.C. (2013), Numerical modelling of ground borne vibrations from high speed rail lines on embankments, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 46, 13-19, DOI: 10.1016/j.soildyn.2012.12.003.

- Connolly D.P., Kouroussis G., Laghrouche O., Ho C.L., Forde M.C. (2014)(a), Benchmarking railway vibrations – Track, vehicle, ground and building effects, *Construction and Building Materials*, 92, 64-81, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.07.042.
- Connolly D.P., Kouroussis G., Woodward P.K., Costa P. A., Verlinden O. (2014)(b), Field testing and analysis of high speed rail vibrations, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 67, 102-118, DOI: 10.1016/j.soildyn.2014.08.013.
- Connolly D.P., Marecki G. P., Kouroussis G., Thalassinakis I, Woodward P. K. (2015), The growth of railway ground vibration problems - A review, *Science of The Total Environment*, 568, 1276-1282, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.09.101.
- Davis D. (2010), A Review of Prediction Methods for Ground - Borne Noise due to Construction Activities, Paper presented at the meeting of International Congress on Acoustics, ICA 2010, Sydney, Australia.
- Degrande G., Schillemans L. (2001), Free field vibrations during the passage of a Thalys high-speed train at variable speed, *Journal of Sound and Vibration*, 247, 131-144, DOI: 10.1006/jsvi.2001.3718.
- Dijckmans A., Ekblad A., Smekal A., Degrande G., Lombaert G. (2016), Efficacy of a sheet pile wall as a wave barrier for railway induced ground vibration, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 84, 55-69, DOI: 10.1016/j.soildyn.2016.02.001.
- Ditzel A., Herman G.C. (2003), The influence of a rail embankment on the vibrations generated by moving trains, *Journal of Sound and Vibration*, 271, 937-957, DOI: 10.1016/S0022-460X(03)00772-7.
- Feng S., Zhang X., Zheng Q., Wang L. (2017), Simulation and mitigation analysis of ground vibrations induced by high-speed train with three dimensional FEM, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 94, 204-214, DOI: 10.1016/j.soildyn.2017.01.022.
- Giannakos K. (2013), Track Defects and the Dynamic Loads due to Non-Suspended Masses of Railway Vehicles, *International Journal of Mechanics*, 7, 180-191.

- Ju S.H., Lin H.T., Huang J.Y. (2009), Dominant frequencies of train - induced vibrations, *Journal of Sound and Vibration*, 319, 247-259, DOI: 10.1016/j.jsv.2008.05.029.
- Kouroussis G., Connolly D., Forde M., Verlinden O. (2013), An experimental study of embankment conditions on high - speed railway ground vibrations, Paper presented at the meeting of 20th International Congress on Sound and Vibration (ICSV20), Bangkok, Thailand.
- Kouroussis G., Connolly D.P., Verlinden O. (2014), Railway-induced ground vibrations - a review of vehicle effects, *International Journal of Rail Transportation*, 2, 69-110, DOI: 10.1080/23248378.2014.897791.
- Kouroussis G., Conti C., Verlinden O. (2012), Investigating the influence of soil properties on railway traffic vibration using a numerical model, *Vehicle System Dynamics, International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, 51, 421-442, DOI: 10.1080/00423114.2012.734627.
- Kouroussis G., Verlinden O. (2013), Prediction of railway induced ground vibration through multibody and finite element modeling, *Mech. Sci.*, 4, 167–183, DOI: 10.5194/ms-4-167-2013.
- Krylov V.V. (2017), Focusing of ground vibrations generated by high-speed trains travelling at trans-Rayleigh speeds, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 100, 389-395, DOI: 10.1016/j.soildyn.2017.06.015.
- Krylov V.V. (1998), Effects of track properties on ground vibrations generated by high-speed trains, *Acustica*, 84, 78-90.
- Ling X., Chen S., Zhu Z., Zhang F., Wang L, Zou Z. (2009), Field monitoring on the train-induced vibration response of track structure in the Beiluhe permafrost region along Qinghai–Tibet railway in China, *Cold Regions Science and Technology*, 60, 75-83, DOI: 10.1016/j.coldregions.2009.08.005.
- Lombaert G., Degrande G., François S., Thompson D. J. (2013), Ground-borne vibration due to railway traffic: a review of excitation mechanisms, prediction methods and mitigation measures, *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*, 126, 253-287, DOI: 10.1007/978-3-662-44832-8_33.
- Massarsch K. R. (2004), Mitigation of Traffic-induced Ground Vibrations, Paper presented at the meeting of 11th International Conference on Soil

Dynamics and Earthquake Engineering and 3rd on Earthquake Geotechnical Engineering, Berkeley, California, USA.

- Neupane R. (2015), Expanded polystyrene geofoam embankment for support of railways and bridges (Unpublished doctoral dissertation). Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Utah, Salt Lake City, Utah, USA.
- Olivier B., Connolly D.P., Costa P.A., Kouroussis G. (2016), The effect of embankment on high speed rail ground vibrations, *International Journal of Rail Transportation*, 4, 229-246, DOI: 10.1080/23248378.2016.1220844.
- Paolucci R., Maffei A., Scandella L., Stupazzini M., Vanini M. (2003), Numerical prediction of low-frequency ground vibrations induced by high-speed trains at Ledsgaard, Sweden, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 23, 425-433, DOI: 10.1016/S0267-7261(03)00061-7.
- Paolucci R., Spinelli D. (2005), Ground Motion Induced by Train Passage, *Journal of Engineering Mechanics*, 132 (2), DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(2006)132:2(201).
- Papageorgiou A.S., Pei D.A. (1998), Discrete wavenumber boundary element method for study of the 3d response 2D scatterers, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 27, 619-638, DOI: 10.1002/(SICI)1096-9845(199806)27:6<619::AID-EQE746>3.0.CO;2-I.
- Persson N. (2016), Predicting railway-induced ground vibrations (Unpublished master's thesis). Lund University, Sweden.
- RIVAS D4.1 (2011), Scope of the parametric study on mitigation measures on the transmission path, International Union of Railways (UIC), Railway Induced Vibration Abatement Solutions Collaborative project.
- Sheng X., Jones C.J.C., Petyt M. (1998), Ground vibration generated by a harmonic load acting on a railway track, *Journal of Sound and Vibration*, 225, 3-28, DOI: 10.1006/jsvi.1999.2232.
- Sheng X., Jones C.J.C., Thompson D.J. (2004), A theoretical study on the influence of the track on train induced ground vibration, *Journal of Sound and Vibration*, 272, 909-936, DOI: 10.1016/S0022-460X(03)00781-8.

- Sheng X., Jones C.J.C., Thompson D.J. (2001), A theoretical model for ground vibration from trains generated by vertical track irregularities, *Journal of Sound and Vibration*, 272, 937-965, DOI: 10.1016/S0022-460X(03)00782-X.
- Sheng X., Jones C.J.C., Thompson D.J. (2003), A comparison of a theoretical model for quasi-statically and dynamically induced environmental vibration from trains with measurements, *Journal of Sound and Vibration*, 267, 621-635, DOI: 10.1016/S0022-460X(03)00728-4.
- Takemiya H. (2005), Paper presented at the Proceedings of the International Symposium on Environmental Vibrations 2005 (ISEV2005), Environmental vibrations: Prediction, monitoring, mitigation and evaluation, Propagation of ground vibrations induced by moving trains, pp. 311-316, Okayama, Japan.
- Timoshenko S.P. (1953), The collected papers of Stepan Prokopovitch Timoshenko, pp. 1878-1972, New York, London , McGraw-Hill.
- Volberg G. (1982), Propagation of ground vibrations near railway tracks, *Journal of Sound and Vibration*, 87, 371-376, DOI: 10.1016/0022-460X(83)90576-X.

Ελληνική βιβλιογραφία

- Γιαννακός Κ. (2012), Επιλεγμένα θέματα σιδηροδρομικής, Διδακτικές σημειώσεις, Πολυτεχνική σχολή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
- Κουτσίδου Χ. (2014), Ο σιδηρόδρομος και οι διεπαφές του με το φυσικό περιβάλλον, Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Α.Π.Θ.
- Πυργίδης Χ. (2006), Συστήματα σιδηροδρομικών μεταφορών, Εκδόσεις Ζήτη.
- Ραπτάκης Δ. (2007), Σημειώσεις μαθήματος «Τεχνική σεισμολογία και σεισμική μηχανική». Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Πολιτικών μηχανικών Α.Π.Θ.
- Στεργίου Τ. (2009), Ο Σιδηρόδρομος Υψηλών Ταχυτήτων στον Ευρωπαϊκό χώρο και οι χωρικές επιδράσεις του μέσου, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Χωροταξίας & Ανάπτυξης, Α.Π.Θ.
- Τσιμπούκης Θ. (1994), Εισαγωγή στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, Θεσσαλονίκη.
- Φώλας Α. (2009), Έδραση σιδηροδρομικής γραμμής σε πλάκα σκυροδέματος, Μεταπτυχιακή εργασία, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Πολιτικών μηχανικών Α.Π.Θ.

Διαδικτυακή βιβλιογραφία

<http://www.machinedesign.com/springs/what-are-differences-between-sprung-and-unsprung-weight>, (2018) Stephen Mraz, What are the differences between sprung and unsprung weight.