



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

*Διπλωματική Εργασία*

**ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΙ  
ΤΡΩΤΟΤΗΤΑ ΣΗΡΑΓΓΩΝ - ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΗΝ  
ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΕΝΝΟΙΑ**

**ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ ΧΡΙΣΤΙΝΑ ΛΑΜΠΡΟΥ**

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

Βόλος, 2023

© 2021 Ευαγγελία Χριστίνα Λάμπρου

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

## **Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:**

Πρώτος Εξεταστής	Δρ. Γρηγόριος Τσινίδης Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Δεύτερος Εξεταστής	Δρ. Πολυξένη Καλλιόγλου Επίκουρη Καθηγήτρια, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Τρίτος Εξεταστής	Δρ. Γεώργιος Εφραιμίδης Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

# ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΙ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑ ΣΗΡΑΓΓΩΝ - ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΗΝ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΕΝΝΟΙΑ

Ευαγγελία Χριστίνα Λάμπρου

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2023

Επιβλέπων: Γρηγόριος Τσινίδης, Επίκουρος Καθηγητής

## Περίληψη

Κατά γενική ομολογία, οι σήραγγες θεωρούνται κατασκευές με καλή σεισμική συμπεριφορά. Ωστόσο περιπτώσεις του πρόσφατου παρελθόντος έχουν αποδείξει πως οι υπόγειες αυτές κατασκευές μπορούν να εμφανίσουν βλάβες όταν υποβληθούν σε σεισμική ταλάντωση. Η εργασία αυτή εστιάζει στη μελέτη της σεισμικής απόκρισης και τρωτότητας σήραγγων που υπόκεινται σε σεισμική ταλάντωση στην εγκάρσια έννοια. Για το σκοπό αυτό, επιλέγονται συστήματα σήραγγας-εδάφους, τα οποία προσομοιώνονται και αναλύονται για πραγματικές σεισμικές καταγραφές, στον κώδικα πεπερασμένων διαφορών FLAC2D. Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων προκύπτουν χρονοϊστορίες επιτάχυνσης, ταχύτητας, μετακίνησης και εντατικών μεγεθών της επένδυσης της σήραγγας, με τις τελευταίες να επιβεβαιώνουν την ύπαρξη μόνιμων μετακινήσεων και εντατικών μεγεθών στην επένδυση της σήραγγας, άμεσα εξαρτώμενων της σεισμικής έντασης και του τύπου του περιβάλλοντος εδάφους. Τα αποτελέσματα των δυναμικών αναλύσεων χρησιμοποιούνται για τη χάραξη αναλυτικών καμπυλών τρωτότητας της σήραγγας, επιλέγοντας ως δείκτη βλάβης τη μέγιστη διαμετρική παραμόρφωση της διατομής και μέτρα έντασης τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (PGA) και τη μέγιστη εδαφική ταχύτητα (PGV). Οι καμπύλες τρωτότητας υποδηλώνουν ότι οι πιθανότητες βλάβης της εξεταζόμενης σήραγγας αυξάνονται με την αύξηση της έντασης της σεισμικής ταλάντωσης και είναι μεγαλύτερες σε μαλακότερα εδάφη. Από τη σύγκριση των προτεινόμενων αναλυτικών καμπυλών τρωτότητας με εμπειρικές καμπύλες της βιβλιογραφίας, διαπιστώνεται εξαιρετική ομοιότητα των εξαγόμενων από τις αναλύσεις καμπυλών για ένα από τα εξεταζόμενα εδάφη, με τις αντίστοιχες από το εγχειρίδιο HAZUS, αλλά και διαφορές για τις άλλες περιπτώσεις, κάτι που έχει να κάνει

μεταξύ άλλων και με τις παραδοχές που γίνονται κατά περίπτωση.

**Λέξεις Κλειδιά:** Σήραγγες, Σεισμοί, Σεισμική Απόκριση, Τρωτότητα, Δυναμική Ανάλυση, Καμπύλες Τρωτότητας

# SEISMIC BEHAVIOUR AND VULNERABILITY OF TUNNELS - ANALYSIS IN THE TRANSVERSE DIRECTION

Evangelia Christina Lamprou

University of Thessaly, Department of Civil Engineering, 2023

Supervisor: Grigorios Tsinidis, Assistant Professor

## Abstract

There is a general perception that tunnels exhibit a good seismic behaviour. However, cases in the recent past have shown that underground structures can suffer significant damage when subjected to ground seismic shaking. This diploma thesis focuses on the study of the response and vulnerability of tunnels when subjected to ground seismic shaking in the transverse direction. For this purpose, two tunnel-ground configurations are selected, simulated and analysed for a series of real seismic recordings, by employing the finite difference code FLAC2D. The analyses result in time histories of acceleration, velocity, displacement and internal lining forces, which are obtained at various locations in the ground and on the tunnel liner. The latter confirm the existence of permanent displacements and liner forces on the tunnel lining, after the completion of shaking, with values being directly dependent on the seismic intensity and the characteristics of the surrounding soil. Results of dynamic analyses are selected for the derivation of fragility curves for the examined tunnels, using as damage index the maximum diagonal distortion of the cross section of the tunnel and as intensity measure either the peak ground acceleration (PGA) or the peak ground velocity (PGV). The proposed fragility curves indicate that the probability of tunnel damage increases for higher earthquake intensity and in the case of softer soils. The comparison of the proposed analytical vulnerability curves with empirical curves from the literature, reveals that for one of the examined soils and the HAZUS manual, the similarities between their fragility curves are exceptional, but there

are also differences for the other cases, which has to do, among other things, with the assumptions made in each case.

**Keywords:** Tunnels, Earthquakes, Seismic Response, Vulnerability, Dynamic Analysis, Fragility Curves

## Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Επίκουρο Καθηγητή κ. Γρηγόριο Τσινίδη για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του καθόλη τη διάρκεια της διπλωματικής μου, καθώς και τις εξαιρετικές συμβουλές του σε επιστημονικό και ερευνητικό επίπεδο. Επιπλέον, τον ευχαριστώ για τις γνώσεις που μου έδωσε κατά τη διάρκεια της φοίτησης μου, οι οποίες συντέλεσαν καθοριστικά στο αποτέλεσμα της διπλωματικής μου. Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητές κα. Πολυξένη Καλλιόγλου και κ. Γεώργιο Εφραιμίδη για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου, για τις πολύτιμες υποδείξεις τους, καθώς και τις γνώσεις που μου παρείχαν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου. Ευχαριστώ τους γονείς μου για την πολύπλευρη υποστήριξη και αγάπη τους όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου. Επιπλέον, είμαι ευγνώμων για την καθημερινή υποστήριξη και βοήθεια του συντρόφου μου, Νίκο, και για την έμπνευση και δύναμη που μου έδωσε. Τέλος, ευχαριστώ τους φίλους μου για την στήριξη τους και τις όμορφες αναμνήσεις των φοιτητικών μας χρόνων.



# Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
1.1	Κίνητρο και υπόβαθρο . . . . .	1
1.2	Σκοπός της διπλωματικής εργασίας . . . . .	2
1.3	Οργάνωση της διπλωματικής εργασίας . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Βιβλιογραφική ανασκόπηση</b>	<b>4</b>
2.1	Συμπεριφορά σηράγγων σε σεισμούς - Παρατηρηθείσες βλάβες . . . . .	4
2.2	Συμπεριφορά έναντι σεισμικής ταλάντωσης . . . . .	8
2.3	Μέθοδοι ανάλυσης και σχεδιασμού . . . . .	10
2.3.1	Μέθοδοι ανάλυσης στη διαμήκη έννοια . . . . .	11
2.3.2	Μέθοδοι ανάλυσης στην εγκάρσια έννοια . . . . .	12
2.3.2.1	Αναλυτικές λύσεις . . . . .	12
2.3.2.2	Απλοποιημένη ισοδύναμη στατική ανάλυση . . . . .	15
2.3.2.3	Λεπτομερής ισοδύναμη στατική ανάλυση . . . . .	16
2.3.2.4	Πλήρης δυναμική ανάλυση στο πεδίο του χρόνου . . . . .	16
2.3.2.5	Σύγκριση μεθόδων ανάλυσης και σχεδιασμού . . . . .	17
2.4	Εισαγωγή στην έννοια της τρωτότητας . . . . .	18
2.4.1	Σεισμικός κίνδυνος . . . . .	19
2.4.2	Εκτίμηση της τρωτότητας . . . . .	22
<b>3</b>	<b>Εξεταζόμενο σύστημα - Αριθμητική προσομοίωση</b>	<b>25</b>
3.1	Γενικά χαρακτηριστικά εξεταζόμενων συστημάτων . . . . .	25
3.2	Παραδοχές ανάλυσης και διαδικασίας προσομοίωσης . . . . .	28
3.2.1	Εισαγωγή στον κώδικα FLAC2D . . . . .	29

## Περιεχόμενα

3.2.2	Βήματα ανάλυσης . . . . .	31
3.2.3	Επιλογή κανάβου . . . . .	33
3.2.4	Ιδιότητες υλικού . . . . .	34
3.2.5	Ανακλάσεις στα όρια του προσομοιώματος . . . . .	38
3.3	Επιλογή σεισμικών διεγέρσεων και δυναμική ανάλυση . . . . .	39
<b>4</b>	<b>Παραμετρική αριθμητική διερεύνηση και εκτίμηση της τρωτότητας</b>	<b>42</b>
4.1	Ενδεικτικά αποτελέσματα . . . . .	42
4.1.1	Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης . . . . .	44
4.1.2	Χρονοϊστορίες ταχύτητας . . . . .	45
4.1.3	Χρονοϊστορίες οριζόντιας μετακίνησης . . . . .	46
4.1.4	Χρονοϊστορίες κατακόρυφης μετακίνησης . . . . .	47
4.1.5	Έντατικά μεγέθη . . . . .	48
4.1.5.1	Αξονικό φορτίο . . . . .	48
4.1.5.2	Ροπή . . . . .	50
4.2	Προσδιορισμός δεικτών βλάβης και επιλογή μέτρων έντασης . . . . .	51
4.3	Χάραξη καμπυλών τρωτότητας . . . . .	52
4.4	Σύγκριση των δύο εδαφικών στρώσεων . . . . .	58
4.5	Σύγκριση με διαθέσιμες καμπύλες τρωτότητας . . . . .	59
<b>5</b>	<b>Συμπεράσματα</b>	<b>62</b>

# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Κίνητρο και υπόβαθρο

Οι σήραγγες αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι του οδικού δικτύου, διευκολύνοντας τη μεταφορά ανθρώπων και αγαθών, τόσο στον αστικό όσο και στον υπεραστικό ιστό. Λόγω του υπόγειου χαρακτήρα τους, διευκολύνουν τη διέλευση από ορεινές περιοχές, μειώνοντας τον χρόνο και αυξάνοντας την ασφάλεια, ως τμήμα αυτοκινητοδρόμων, καθώς επίσης αποσυμφορούν το αστικό περιβάλλον και δεν εντείνουν το ήδη υπάρχον χωρικό πρόβλημα των πυκνά δομημένων μεγάλων πόλεων, όταν χρησιμοποιούνται για τη διέλευση μητροπολιτικού σιδηρόδρομου. Η κατασκευή τους αποτελεί ένα μεγάλο, υψηλού κόστους και εκτεταμένου χρόνου, έργο, με διάρκεια ζωής μεγαλύτερη των 100 χρόνων. Επομένως, η διασφάλιση της σωστής και συνεχούς λειτουργίας τους είναι εξαιρετικά σημαντική για ολόκληρο το σύστημα μεταφορών.

Γενικότερα, οι υπόγειες κατασκευές θεωρούνται προστατευμένες από φυσικούς κινδύνους, λόγω του γεγονότος ότι περικλείονται από έδαφος. Ωστόσο, οι σεισμοί αποτελούν έναν από τους βασικότερους παράγοντες που δύνανται να προκαλέσει βλάβες, όπως έχει δειχθεί σε διάφορες περιπτώσεις, με μία από της χαρακτηριστικότερες, αυτή του σεισμού Wenchuan στην Κίνα το 2008. Γενικότερα, μία πληθώρα περιπτώσεων βλαβών σηράγγων, αποδεικνύει πως οι κατασκευές αυτές δεν είναι άπρωτες έναντι σεισμικών διεγέρσεων, αλλά αντιθέτως μπορούν να εμφανίσουν σοβαρές βλάβες. Σε τέτοιες περιπτώσεις, κύριο μέλημα αποτελεί η συντομότερη αποκατάσταση των βλαβών, ώστε να τεθεί όσο το δυνατόν γρηγορότερα σε λειτουργία το εκάστοτε σύστημα μεταφορών. Συνεπώς, είναι απαραίτητη η ανάπτυξη μεθόδων πρόβλεψης της πιθανότητας εμφάνισης συγκεκριμένων ασθενέστερων και σοβαρότερων βλαβών, για δεδομένες σεισμικές δράσεις. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται ευρέως είναι αυτή της εκτίμησης της τρωτότητας μέσω των καμπυλών τρωτότητας,

## Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

η οποία συσχετίζει ένα χαρακτηριστικό μέγεθος της σεισμικής δόνησης, όπως τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (PGA), με επίπεδα βλάβης και την πιθανότητα εμφάνισής τους, και αποτελεί σημαντικό εργαλείο εκτίμησης της συμπεριφοράς των σηράγγων.

### 1.2 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Η εργασία αυτή επικεντρώνεται στην εκτίμηση της απόκρισης και της τρωτότητας εξεταζόμενων συστημάτων εδάφους-σήραγγας, που ομοιάζουν με συστήματα που εντοπίζονται σε δίκτυα μεταφορών στην Ελλάδα (αυτοκινητόδρομοι, ΜΕΤΡΟ), έναντι σεισμικής ταλάντωσης στην εγκάρσια έννοια. Στο πλαίσιο της ανάλυσης προκύπτουν αναλυτικές καμπύλες τρωτότητας για περιπτώσεις που επιλέγεται να αναλυθούν. Για το σκοπό αυτό, χρειάζεται να ακολουθηθεί μία εκτενής διαδικασία αναλύσεων, αρχικά στατικών, για την προσομοίωση της αρχικής κατάστασης του συστήματος έδαφος-σήραγγα, και στη συνέχεια δυναμικών, ώστε να προσομοιωθεί η κατάσταση του σεισμού σε αυτό. Ο αριθμός των αναλύσεων εξαρτάται από τον αριθμό των εξεταζόμενων σεισμών. Για τις αναλύσεις που απαιτούνται γίνεται χρήση του αριθμητικού κώδικα FLAC2D. Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων, προκύπτουν τα απαραίτητα δεδομένα για τη χάραξη των καμπυλών τρωτότητας, από όπου εκτιμάται τελικά η απόκριση και η τρωτότητα της σήραγγας μελέτης ως προς τις σεισμικές διεγέρσεις.

### 1.3 Οργάνωση της διπλωματικής εργασίας

Η διπλωματική εργασία χωρίζεται σε τέσσερις ενότητες και συγκεκριμένα τις ενότητες 2 - 5.

Στην ενότητα 2 παρουσιάζεται συνοπτικά η βιβλιογραφία. Πιο συγκεκριμένα, οι υποενότητες αυτής εστιάζουν στις πιο γνωστές περιπτώσεις βλαβών σηράγγων λόγω σεισμών, στη συμπεριφορά έναντι σεισμικής ταλάντωσης που έχει προκύψει ερευνητικά και από παρατηρήσεις, στις βασικές μεθόδους ανάλυσης και σχεδιασμού που έχουν αναπτυχθεί για το σκοπό αυτό, καθώς και σε μία περιληπτική εισαγωγή στην έννοια της τρωτότητας και την εκτίμηση της.

Η ενότητα 3 εστιάζει στα χαρακτηριστικά και στη διαδικασία της προσομοίωσης των ε-

## Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

ξεταζόμενων συστημάτων που επιλέχθηκαν για ανάλυση έναντι σεισμικών διεγέρσεων. Σε αυτή παρουσιάζεται το προσομοίωμα εδάφους-σήραγγας, γίνεται αναφορά στον αριθμητικό κώδικα FLAC2D που επιλέχθηκε για τις αναλύσεις, περιγράφονται αναλυτικά τα βήματα των αναλύσεων καθώς και οι παραδοχές που έγιναν σε κάθε ένα από τα βήματα αυτά. Τέλος παραθέτονται οι σεισμικές καταγραφές που επιλέχθηκαν για τις δυναμικές αναλύσεις.

Η ενότητα 4 αφορά τα αποτελέσματα του συνόλου των αναλύσεων που έγιναν. Αρχικά παρουσιάζονται και συγκρίνονται μεταξύ τους κάποια ενδεικτικά αποτελέσματα χρονοϊστοριών επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετατόπισης καθώς και εντατικών μεγεθών, δηλαδή αξονικού φορτίου και ροπής, σε σημεία πάνω στη διατομή της σήραγγας. Επίσης, στην ενότητα αυτή γίνεται η χάραξη των καμπυλών τρωτότητας για τα εξεταζόμενα εδαφικά προφίλ, με τη χρήση αποτελεσμάτων των αναλύσεων ως δεδομένα για τη διαδικασία αυτή. Τέλος, συγκρίνονται τα δύο διαφορετικά εδάφη ως προς την απόκρισή τους στη σεισμική διέγερση και τέλος γίνεται και η σύγκριση των εξαγόμενων από τις αναλύσεις καμπυλών τρωτότητας με αντίστοιχες από τη βιβλιογραφία.

Η ενότητα 5 συνοψίζει τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν από την εργασία αυτή, ενώ προτείνεται και περαιτέρω έρευνα στο μέλλον για το αντικείμενο.

## 2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

### 2.1 Συμπεριφορά σηράγγων σε σεισμούς - Παρατηρηθείσες βλάβες

Κατά γενική ομολογία, οι υπόγειες κατασκευές συμπεριφέρονται καλύτερα υπό σεισμική φόρτιση σε σχέση με τις υπέργειες. Η δυσκαμψία του εδάφους ή βράχου, που περιβάλλει την κατασκευή, συμβάλει στην υποστήριξη της φυσικά, λόγω του τρόπου που την περικλείει, και εμποδίζει τις μεγάλες παραμορφώσεις σε αυτή (Towhata, 2008). Έχειδειχθεί πως η ελαστικότητα της επένδυση σε σχέση με το έδαφος επηρεάζει σημαντικά τη σεισμική συμπεριφορά και αυτό εκφράζεται μέσα από τον λόγο σχετικής δυσκαμψίας (flexibility ratio). Η αναλογία αυτή αποδίδεται ως η καμπτική δυσκαμψία του εδάφους διαιρεμένη με αυτή της επένδυσης, και για τιμές μεγαλύτερες της μονάδας δείχνει ότι η επένδυση είναι πιο εύκαμπτη σε σχέση με το περιβάλλον έδαφος (Owen and Scholl, 1981), όπως παρουσιάζεται εκτενέστερα στην ενότητα 2.3. Ωστόσο, μια πληθώρα σεισμών του πρόσφατου παρελθόντος, όπως αυτός του Wenchuan το 2008 στην Κίνα (Li, 2011), έδειξε πως οι κατασκευές αυτές μπορούν να υποστούν σοβαρές βλάβες, οι οποίες να δυσχεράνουν ή ακόμα και να ανακόψουν τη χρήση τους. Το εύρημα αυτό δεν αναιρεί την καλή τους σεισμική συμπεριφορά αλλά επιδεικνύει πως η σεισμική τους απόκριση είναι περισσότερο πολύπλοκη της αρχικής εκτίμησης που είχε επικρατήσει. Συμπερασματικά, η μελέτη της συμπεριφοράς σηράγγων υπό σεισμική φόρτιση και η πρόβλεψη πιθανών βλαβών σε αυτές αποτελεί επιτακτική ανάγκη για τη διασφάλιση της συνεχούς λειτουργίας του δικτύου μεταφορών.

Δύο είναι οι κύριες δράσεις που προκαλούν βλάβες στις σήραγγες, αρχικά η ίδια η σεισμική δόνηση που διαδίδεται μέσω του εδάφους, και δεύτερον η αστοχία του περιβάλλοντος εδάφους λόγω της σεισμικής δράσης. Στην πρώτη περίπτωση, έχουμε άμεσα αποτελέσματα από τη σεισμική δόνηση, η οποία απελευθερώνει ενέργεια στην κατασκευή

## Κεφάλαιο 2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

θέτοντας την σε κίνηση, προκαλώντας ρωγμές ή ακόμα και θραύση ανάλογα με την ένταση του σεισμού και άλλα γενικά χαρακτηριστικά. Στην δεύτερη περίπτωση, οι ζημιές στη σήραγγα προέρχονται έμμεσα από την εκάστοτε εδαφική αστοχία που προκλήθηκε από τη σεισμική δόνηση, με παραδείγματα όπως η ενεργοποίηση ρήγματος, η ρευστοποίηση του εδάφους, η κατολίσθηση κάποιου πρανού 2.1 κ.ο.κ. (J. N. Wang, 1993).

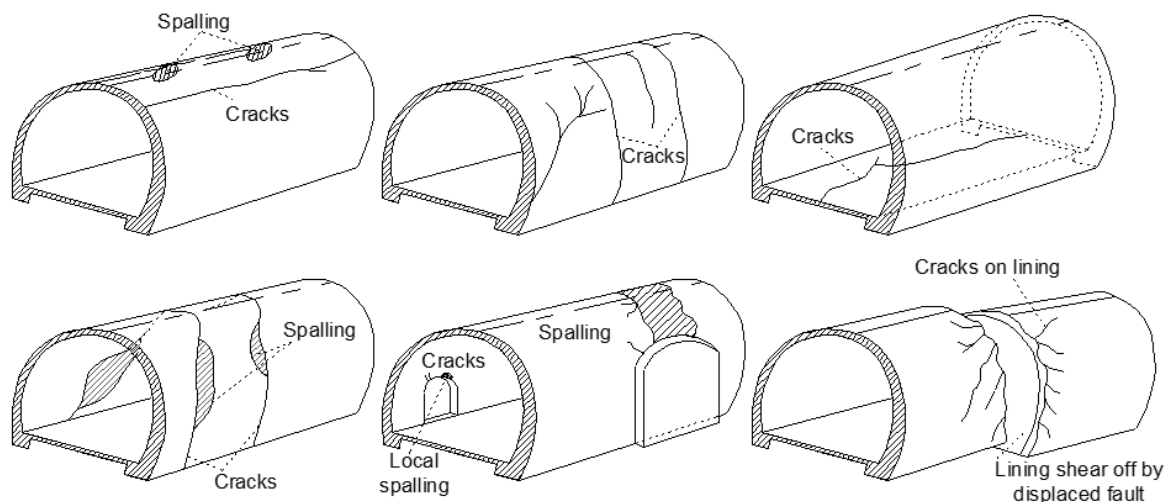


*Εικόνα 2.1: Κατολίσθηση στην είσοδο της σήραγγας Longdongzi μετά το σεισμό Wenchuan (Li, 2011)*

Μελετήθηκε πληθώρα σεισμών που επηρέασαν τη λειτουργία σηράγγων οδικού και σιδηροδρομικού δικτύου σε διάφορες τεκτονικά ενεργές χώρες, όπως η Ιαπωνία, η Κίνα, η Ταϊβάν και άλλες, ώστε να βρεθούν οι συνηθέστερες βλάβες που προκαλούνται. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία των ακόλουθων σεισμών: Hyogoken-Nanbu (Kobe) στην Ιαπωνία το 1995 (Huo et al., 2005), Chi-Chi στην Ταϊβάν το 1999 (W. L. Wang et al., 2001), Düzce στην Τουρκία το 1999 (O' Rourke et al., 2001), Mid Niigata στην Ιαπωνία το 2004 (Konagai et al., 2009), Wenchuan στην Κίνα το 2008 (Li, 2011), Maule στη Χιλή το 2010 (Cartes et al., 2021), Kumamoto στην Ιαπωνία το 2016 (Zhang et al., 2018). Η πιο συνήθης αστοχία, που παρατηρήθηκε σε όλες τις περιπτώσεις επενδυμένων σηράγγων, ήταν η δημιουργία ρωγμών καθώς και η αποφλοίωση τμημάτων 2.3, οι οποίες σε μεγάλες εντάσεις σεισμών οδήγησαν με προοδευτικό ρυθμό σε αποκόλληση, θραύση ή ακόμα και κατάρρευση της επένδυσης 2.4. Σε περιοχές όπου ο υδροφόρος ορίζοντας ξεπερνούσε το βάθος της σήραγγας με χαρακτηριστικά παραδείγματα τους σεισμούς Chi-Chi και Kumamoto, η διάνοιξη ρωγμών επέτρεψε τη διαρροή υπογείου νερού στο εσωτερικό 2.5. Επίσης, εντοπίστηκε και έκθεση και λυγισμός του οπλισμού

## Κεφάλαιο 2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.6. Οι ρωγμές ταυτοποιήθηκαν ως εγκάρσιες 2.7, διαμήκεις, πλάγιες και ακτινικές κατά μήκος της στέψης 2.8, ανάλογα με τον προσανατολισμό τους ως προς τη σήραγγα ενώ ο μηχανισμός δημιουργίας τους οφειλόταν σε εφελκυστικές, διατμητικές και άλλες δυνάμεις. Στην περίπτωση μη επενδυμένων σηράγγων, η υποχώρηση τμημάτων έδειξε τη σημαντικότητα ύπαρξης της επένδυσης κατά τον αντισεισμικό σχεδιασμό, λόγω της αυξημένης αντοχής που προσδίδει. Μία επόμενη συχνά εμφανιζόμενη αστοχία ήταν αυτή της θραύσης του δαπέδου της σήραγγας λόγω ανύψωσης πέραν της αντοχής του. Οι παραπάνω αστοχίες προκλήθηκαν άμεσα από τη σεισμική δόνηση. Ωστόσο, δεν ήταν σπάνια και η δημιουργία βλαβών από εδαφικές αστοχίες, με κύρια παραδείγματα την μετακίνηση τμήματος της σήραγγας λόγω ενεργού εδαφικού ρήγματος 2.7, καθώς και τη μερική ή και ολική καταστροφή των στομιών λόγω κατολίσθησης υψηλά αποσαθρωμένης βραχώμαζας και πτώσεων βράχων από βραχώμαζες που θραύστηκαν κατά τη σεισμική διέγερση ενώ βρίσκονταν σε απότομη κλίση (Wenchuan, Chi-Chi κ.α.). Μία γενική όψη των βλαβών δίνεται στην εικόνα 2.2



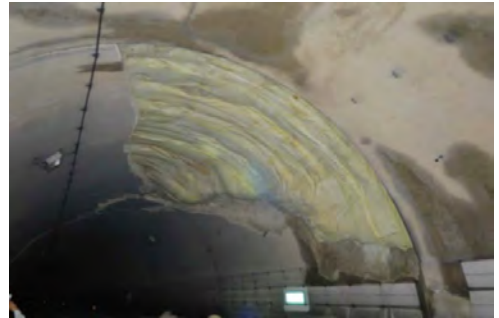
Εικόνα 2.2: Βλάβες που παρατηρήθηκαν κατά το σεισμό Chi-Chi (W. L. Wang et al., 2001)



## Κεφάλαιο 2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση



Εικόνα 2.3: Ρωγμές και αποφλοίωση της επένδυσης στη σήραγγα Kizawa μετά το σεισμό Mid-Niigata (Jiang et al., 2010)



Εικόνα 2.4: Κατάρρευση της επένδυσης στη στέψη της σήραγγας Tawarayama μετά το σεισμό Kumamoto (Zhang et al., 2018)



Εικόνα 2.5: Διαρροή υπόγειου νερού μέσω ρωγμών της επένδυσης μετά το σεισμό Kumamoto (Zhang et al., 2018)



Εικόνα 2.6: Έκθεση του οπλισμού λόγω δόγκωσης και θραύσης της επένδυσης μετά το σεισμό Wenchuan (Li, 2011)



Εικόνα 2.7: Εγκάρσιες ρωγμές και μετατόπιση λόγω ρήγματος στη σήραγγα Longxi μετά το σεισμό Wenchuan (Li, 2011)



Εικόνα 2.8: Ακτινικές Ρωγμές κατά μήκος του δακτυλίου της στέψης στη σήραγγα Longxi μετά το σεισμό Wenchuan (Li, 2011)

## 2.2 Συμπεριφορά έναντι σεισμικής ταλάντωσης

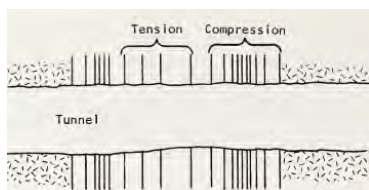
Η παρατήρηση των διαφόρων περιπτώσεων βλαβών, που παρουσιάστηκαν περιληπτικά παραπάνω, προσφέρει χρήσιμες πληροφορίες για την κατανόηση της συμπεριφοράς των υπόγειων κατασκευών. Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά της σήραγγας σε σεισμό ποικίλουν και συνδέονται τόσο με την ίδια τη σεισμική δόνηση, όσο και με τις ιδιότητες του εδάφους και τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά της σήραγγας. Πιο συγκεκριμένα, αναφορικά με τη σεισμική διέγερση, επηρεάζουν σημαντικά, το βάθος του επικέντρου και η απόσταση του από τις εξεταζόμενες σήραγγες, η ένταση καθώς και η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (PGA) στην περιοχή της σήραγγας, η οποία αποτελεί σημαντικότερη παράμετρο για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς της κατασκευής. Εξίσου σημαντικά είναι και τα δομικά χαρακτηριστικά της σήραγγας, όπως το είδος της επένδυσης και ο οπλισμός της, το σχήμα της διατομής, το μήκος και το βάθος εκσκαφής της και η ηλικία της. Σύμφωνα με τους J. M. Wang and Litehiser, 1985, με την αύξηση του βάθους αυξάνεται η αντοχή του βράχου ενώ εξασθενεί η ένταση του σεισμικού κύματος. Επιπρόσθετα, η ηλικία της σήραγγας είναι μείζονος σημασίας, αφού προκαλούνται φαινόμενα γήρανσης, με κύριο την πτώση της αρχικής αντοχής, όπως φαίνεται και από τις καμπύλες τρωτότητας των Argyroudis et al., 2017. Μία άλλη παράμετρο αποτελούν οι γεωλογικές συνθήκες της περιοχής, όπως ο τύπος του εδάφους, που μπορεί να είναι λεπτόκοκκος, χονδρόκοκκος ή βραχώδης διαφόρων προελεύσεων, ο βαθμός αποσάθρωσης, το στάδιο στερεοποίησής κ.ο.κ.(Sharma and Judd, 1991). Τα σεισμικά κύματα έχουν την τάση να κινούνται γρηγορότερα, απελευθερώνοντας λιγότερη ενέργεια στην περιοχή της σήραγγας, όταν ο περιβάλλον βράχος είναι πυκνός και με μεγαλύτερη δυσκαμψία έναντι αυτής της κατασκευής, συγκριτικά με πιο αδύναμους και με περισσότερες ασυνέχειες βράχους. Επομένως, λόγω μεγαλύτερης απορρόφησης ενέργειας στην δεύτερη περίπτωση, έχουμε και πιο εκτεταμένες βλάβες (W. L. Wang et al., 2001). Επίσης, έχει δειχθεί πως κατασκευές υπόγειου χαρακτήρα που έχουν κατασκευαστεί σε χαλαρά εδαφικά υλικά πλήττονται περισσότερο από αυτές σε μεγάλης αντοχής βράχους. Επιπρόσθετα, η ύπαρξη ρηγμάτων στην περιοχή, κυρίως εάν αυτά διασταυρώνονται με την κατασκευή σε ένα ή περισσότερα σημεία, μπορεί να προκαλέσει έντονες βλάβες, αφού η ενεργοποίησή τους συνεπάγεται κίνδυνο αποκοπής στο σημείο αυτό και ύπαρξη σημα-

## Κεφάλαιο 2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

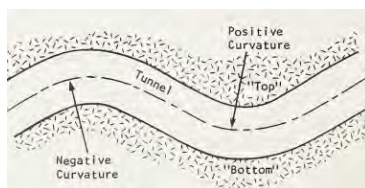
ντικής μετακίνησης. Τέλος, ένα ασθενές έδαφος με προϋπάρχουσες ζώνες διάτμησης ή ένα ασταθές πρανές με πιθανές επιφάνειες ολίσθησης, καθιστά το έδαφος επιρρεπές σε φαινόμενα κατολίσθησης (Καλλιόγλου, 2022) που επηρεάζουν κατά κόρον τα στόμια της σήραγγας.

Η συμπεριφορά των υπόγειων κατασκευών υπό σεισμική φόρτιση διαφέρει από αυτή των υπέργειων. Ένα βασικό χαρακτηριστικό της είναι πως οι αδρανειακές δυνάμεις λόγω της ταλάντωσης της σήραγγας είναι πολύ μικρές επειδή περιορίζονται σημαντικά από τη συνθήκη ότι περικλείεται από έδαφος, ενώ ο βασικότερος μηχανισμός που οδηγεί τελικά στην αστοχία είναι ο κινηματικός, με φορτία που προκαλούνται από το περιβάλλον έδαφος, είτε λόγω εδαφικής ταλάντωσης είτε λόγω μόνιμων εδαφικών μετακινήσεων, γνωστά και ως φορτία καταναγκασμού μετακινήσεων (J. N. Wang, 1993, Hashash et al., 2001). Τα σεισμικά φορτία, τα οποία δημιουργούνται λόγω των σχετικών μετατοπίσεων που προκαλούνται από τη διάδοση των σεισμικών κυμάτων στην κατασκευή, μπορούν να αναλυθούν είτε κατά το διαμήκες επίπεδο είτε κατά το εγκάρσιο επίπεδο ως προς τον άξονα της σήραγγας (Amberg and Russo, 2005). Τρεις είναι οι βασικοί τρόποι παραμόρφωσης της σήραγγας λόγω σεισμικής δράσης σύμφωνα με τους Owen and Scholl, 1981, η αξονική παραμόρφωση με τη μορφή του διαμήκουσ εφελκυσμού ή σύνθλιψης 2.9, η κύρτωση ή αλλιώς διαμήκης κάμψη 2.10 και η διαμετρική παραμόρφωση 2.11 (φαινόμενο ovalling για ωοειδούς και κυκλικής διατομής σήραγγες). Τα διαμήκη φορτία που προκαλούν τους δύο πρώτους τρόπους παραμόρφωσης, δεν θεωρούνται τόσο επικίνδυνα όταν στην επένδυση της κατασκευής έχουν τοποθετηθεί αξονικοί σύνδεσμοι, διότι απορροφούν σε μεγάλο βαθμό τα φορτία αυτά. Κρισιμότερα θεωρούνται τα εγκάρσια σεισμικά φορτία, διότι θέτοντας σε λίκνισμα τη διατομή, είναι πιθανό η επένδυση να οδηγηθεί σε αστοχία. Το φαινόμενο της διαμετρικής παραμόρφωσης της διατομής της σήραγγας έγκειται στην μετάδοση διατμητικών κυμάτων από το βραχώδες υπόβαθρο προς την επιφάνεια του εδάφους. Οι διατμητικές παραμορφώσεις που αυτά προκαλούν συσσωρεύονται σε διάφορα επίπεδα ενδιάμεσα, τα οποία εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη στρωματογραφία του εδάφους και τις παραμέτρους του κάθε μέσου, με βασικότερες το μέτρο διάτμησης, την πυκνότητα και τον συντελεστή απόσβεσης. Αυτό συμβαίνει λόγω των φαινομένων της ανάκλασης και της διάθλασης που συμβαίνουν μεταξύ των διαφόρων στρώσεων (Amberg and Russo, 2005).

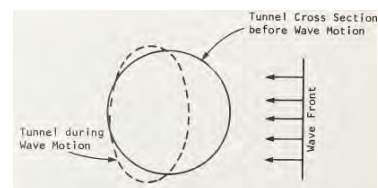
## Κεφάλαιο 2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση



Εικόνα 2.9: Αξονική παραμόρφωση (εφελκυσμός και σύνθλιψη) (Owen and Scholl, 1981)



Εικόνα 2.10: Διαμήκης κάμψη (Owen and Scholl, 1981)



Εικόνα 2.11: Λίκνισμα (ovaling) (Owen and Scholl, 1981)

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό πως η ανάλυση της αλληλεπίδρασης του εδάφους με την κατασκευή είναι εξαιρετικά σημαντική για την κατανόηση της συμπεριφοράς των υπόγειων κατασκευών έναντι σεισμικής δόνησης. Επομένως, μεγάλης σημασίας είναι και η παράμετρος της σχετικής δυσκαμψίας των δύο μέσων καθώς και τα χαρακτηριστικά της διεπιφάνειας που αυτά δημιουργούν.

### 2.3 Μέθοδοι ανάλυσης και σχεδιασμού

Η σεισμική ανάλυση διαφέρει σε πολλά επίπεδα από την ανάλυση σε στατικές συνθήκες. Ο υπολογισμός των σεισμικών φορτίων δεν μπορεί να γίνει με απόλυτη ακρίβεια, αφού συγκρινόμενος με των στατικών φορτίων, εμπεριέχει μεγαλύτερες αβεβαιότητες ως προς το μέγεθός τους. Επιπλέον, ο χαρακτήρας της σεισμικής δόνησης είναι αυτός μίας ανακυκλικής φόρτισης με σχετικά μεγάλη συχνότητα, επομένως η μελέτη και ο σχεδιασμός έναντι αυτού διαφέρουν εξ ορισμού από αυτούς για στατικές φορτίσεις. Η ανάλυση και ο σχεδιασμός για σεισμική δράση προσεγγίζεται κυρίως μέσω της εύρεσης των πιθανών μετακινήσεων και παραμορφώσεων του εδάφους και της κατασκευής (J. N. Wang, 1993). Αυτό συμβαίνει διότι αναπτύσσονται στην υπόγεια κατασκευή ανελαστικές μετατοπίσεις, οι οποίες βάσει της φυσικής του προβλήματος, δεν μπορούν να προσεγγιστούν με μεθόδους δυνάμεων αλλά υπολογίζονται ορθότερα με μεθόδους βασισμένες στις μετακινήσεις (Pitilakis and Tsiniadis, 2013). Οι μέθοδοι ανάλυσης διαφοροποιούνται ανάλογα με το αν ο τρόπος αστοχίας είναι άμεσος, δηλαδή οφείλεται στην ίδια τη σεισμική δράση, ή έμμεσος, δηλαδή προκαλείται ως απόρροια εδαφικής αστοχίας. Ωστόσο, στη συγκεκριμένη εργασία θα γίνει εκτενής αναφορά στην απόκριση σπράγγων έναντι

## Κεφάλαιο 2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

καθαρής σεισμικής δράσης, ενώ οι δευτερεύοντες παράγοντες θα αγνοηθούν.

Για τη σεισμική ανάλυση μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία πληθώρα μεθόδων, από απλοποιημένες διαδικασίες με χρήση κλειστών λύσεων μέχρι και υπολογιστικές αναλύσεις σε Η/Υ με χρήση αριθμητικών κωδίκων βασισμένων σε πεπερασμένα στοιχεία ή πεπερασμένες διαφορές. Επιπλέον, η ανάλυση διαφοροποιείται ανάλογα με τη θεώρηση για τη διεύθυνση διάδοσης των σεισμικών κυμάτων σε σχέση με τη σήραγγα, σε εγκάρσια και διαμήκη. Σε ορισμένες περιπτώσεις κατασκευών επιλέγονται και πειραματικές μέθοδοι ώστε να προσδιοριστεί η επί τόπου απόκριση του εδάφους έναντι της σεισμικής ταλάντωσης. Οι Tsinidis et al., 2020 παρουσίασαν τα πιο συνήθη πειράματα για το σκοπό αυτό, όπου συμπεριλήφθηκαν οι δοκιμές δυναμικών φορτίσεων σε δοκίμια σηράγγων υπό μικρή κλίμακά σε γεωτεχνικούς φυγοκεντριστές (centrifuge tests), που επικεντρώνονται στην σεισμική απόκριση της υπόγειας κατασκευής κατά την εγκάρσια διεύθυνσή της, τα πειράματα σεισμικής τράπεζας (shaking table tests), που λαμβάνουν υπόψιν τόσο την εγκάρσια όσο και τη διαμήκη διεύθυνση, και τα στατικά πειράματα, που αφορούν την εύρεση της απόκρισης των συνδέσμων καθώς και των διατμητικών κλειδών (shear keys).

Η συγκεκριμένη εργασία εστιάζει στη χρήση μεθόδων ανάλυσης σε Η/Υ και συγκεκριμένα στη συμπεριφορά κατά την εγκάρσια διεύθυνση σε σεισμική ταλάντωση, επομένως και οι αναλύσεις που θα ακολουθήσουν σε επόμενα κεφάλαια θα έχουν αυτή τη μορφή. Ωστόσο, θα γίνει μία περιληπτική αναφορά και των υπόλοιπων μεθόδων για μία περισσότερο ολοκληρωμένη εικόνα των πληροφοριών που παρουσιάζονται.

### 2.3.1 Μέθοδοι ανάλυσης στη διαμήκη έννοια

Όσον αφορά την ανάλυση έναντι σεισμικής ταλάντωσης στη διαμήκη έννοια της σήραγγας, τέσσερις είναι οι κυριότερες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται, οι οποίες διαφέρουν κυρίως ως προς την πολυπλοκότητά τους και ανάλογα τις παραδοχές που γίνονται σε αυτές. Αρχικά, μία πρώτη προσέγγιση της εντατικής κατάστασης της σήραγγας μπορεί να γίνει με τη χρήση αναλυτικών λύσεων, είτε δίνοντας ακριβέστερα αποτελέσματα, έχοντας λάβει υπόψιν την αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής, είτε έχοντας απλοϊκότερη μορφή. Μία δεύτερη μέθοδος είναι αυτή της απλοποιημένης ισοδύναμης

## Κεφάλαιο 2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

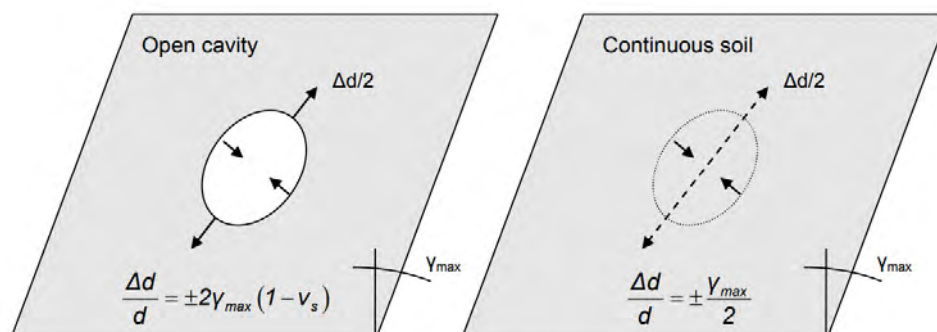
στατικής ανάλυσης, όπου η σεισμική δράση προσεγγίζεται με στατικά φορτία με τέτοιο τρόπο ώστε να αποδίδεται λογικά. Για την καλύτερη προσομοίωση της πραγματικής κατάστασης χρησιμοποιούνται δυναμικές αναλύσεις, τόσο απλοποιημένης μορφής όσο και λεπτομερέστερες με πλήρη ανάλυση στο πεδίο του χρόνου. Οι τελευταίες, αποτυπώνουν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο την κατάσταση που βρίσκεται το σύνολο εδάφους-κατασκευής υπό τη σεισμική διέγερση και γι αυτό το λόγο δίνουν και τα πιο έγκυρα αποτελέσματα, ωστόσο συνοδεύονται από μεγαλύτερους χρόνους ανάλυσης.

Οι μέθοδοι ανάλυσης στην εγκάρσια έννοια εμφανίζουν ομοιότητες με αυτές στη διαμήκη. Ωστόσο, αυτό που μελετάται διεξοδικά στις αναλύσεις αυτές είναι το φαινόμενο της διαμετρικής παραμόρφωσης, γνωστό και ως ovaling. Οι μέθοδοι αυτές παρουσιάζονται παρακάτω.

### 2.3.2 Μέθοδοι ανάλυσης στην εγκάρσια έννοια

#### 2.3.2.1 Αναλυτικές λύσεις

Υπάρχουν δύο κατηγορίες αναλυτικών σχέσεων, αυτές που αγνοούν την αλληλεπίδραση του εδάφους με την κατασκευή και αυτές που λαμβάνουν υπόψιν αυτήν την παραδοχή. Οι πρώτες, 2.12, χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της διαμετρικής παραμόρφωσης ( $\Delta d$ ), μέσω της αρχικής διαμέτρου ( $d$ ) της σήραγγας, της μέγιστης παραμόρφωσης ( $\gamma_{max}$ ), από την οποία και εκφράζεται η σεισμική δράση με στατικό τρόπο, και τέλος, του λόγου Poisson του εδάφους ( $\nu_s$ ). Η λύση που προκύπτει αφορά τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή κατά την οποία επιβάλλεται η μέγιστη παραμόρφωση.



Εικόνα 2.12: Αναλυτικές λύσεις ανάλυσης στην εγκάρσια έννοια αγνοώντας την αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής (Tsinidis, 2015, J. N. Wang, 1993)

## Κεφάλαιο 2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Λαμβάνοντας υπόψιν την αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής, οι αναλυτικές σχέσεις γίνονται αυτομάτως πολυπλοκότερες (2.13), διότι εντάσσονται δύο εξαιρετικά σημαντικές παράμετροι, η σχετική δυσκαμψία των δύο μέσων και οι ιδιότητες της διεπιφάνειας που δημιουργείται μεταξύ σήραγγας-εδάφους/βράχου. Ο συντελεστής σχετικής δυσκαμψίας ( $F$ ) των δύο μέσων, όπως ορίστηκε στην αρχή του κεφαλαίου 2.1, χαρακτηρίζει πόσο δύσκαμπτη ή εύκαμπτη είναι η σήραγγα σε σχέση με το έδαφος όπου είναι εγκιβωτισμένη (2.1). Για σήραγγες κυκλικής διατομής ισχύει

$$F = \frac{E_s \cdot (1 - (\nu_l)^2) \cdot R^3}{6 \cdot E_l \cdot l \cdot (1 + \nu_s)} \quad (2.1)$$

,όπου  $E$ : το μέτρο ελαστικότητας,  $\nu$ : ο λόγος του Poisson,  $R$ : η ακτίνα της διατομής,  $l$ : η ροπή αδράνειας,  $s$ : ο δείκτης του εδάφους,  $l$ : ο δείκτης της επένδυσης (Høeg, 1968, J. N. Wang, 1993).

Σχετικά με τη διεπιφάνεια, είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί ο τρόπος σύνδεσης των δύο μέσων, βάσει του υλικού της επένδυσης, του σχήματος της σήραγγας και των χαρακτηριστικών του περιβάλλοντος εδάφους, ως πλήρης ολίσθηση (full-slip), μερική ολίσθηση ή πλήρης σύνδεση (no-slip).

*Πίνακας 2.1: Ο τρόπος έκφρασης της σχετικής δυσκαμψίας εδάφους-κατασκευής ανάλογα με το εύρος τιμών του λόγου σχετικής δυσκαμψίας*

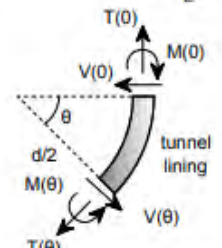
$F=0$	Η σήραγγα είναι άκαμπτη και δεν θα παραμορφωθεί
$F<1$	Η σήραγγα είναι πιο δύσκαμπτη από το έδαφος/βράχο και θα εμφανίσει μικρότερες παραμορφώσεις από αυτό
$F=1$	Η σήραγγα και το έδαφος/βράχος έχουν την ίδια δυσκαμψία και θα εμφανίσουν και την ίδια παραμόρφωση
$F>1$	Η σήραγγα είναι πιο εύκαμπτη από το έδαφος/βράχο και θα εμφανίσει μεγαλύτερες παραμορφώσεις από αυτό

Για την ανάλυση ορθογωνικών σηράγγων, βάσει της μεθοδολογίας του Wang, χρησιμοποιείται ο λόγος σχετικής δυσκαμψίας για σήραγγες ορθογωνικής διατομής

$$F = \frac{(G_s \cdot W)}{(S \cdot H)} \quad (2.2)$$

,όπου  $G_s$ : το μέτρο διάτμησης του εδάφους,  $W$ : το μήκος της βάσης,  $S$ : η δύναμη που

## Κεφάλαιο 2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Reference	Full slip conditions without normal separation	No slip conditions
	$\frac{\Delta d}{d} = \pm \frac{1}{3} K_f F \gamma_{max}$ $T_{max} = \pm \frac{1}{6} K_f \frac{E_s}{(1+\nu_s)} R \gamma_{max}$ $M_{max} = \pm \frac{1}{6} K_f \frac{E_s}{(1+\nu_s)} R^2 \gamma_{max}$ $K_f = \frac{12(1-\nu_s)}{2F+5-6\nu_s}$ $R_c = \frac{\Delta d_{sur}}{\Delta d_{free-field}} = \frac{2}{3} K_f F = \frac{4(1-\nu_s)F}{2.5-3\nu_s+F}$	$T_{max} = \pm K_2 \tau_{max} r = \pm K_2 \frac{E_s}{2(1+\nu_s)} R \gamma_{max}$ $K_2 = 1 + \frac{F[(1-2\nu_s) - (1-2\nu_s)C] - \frac{1}{2}(1-2\nu_s)^2 + 2}{F[(3-2\nu_s) + (1-2\nu_s)C] + C \left[ \frac{5}{2} - 8\nu_s + 6\nu_s^2 \right] + 6 - 8\nu_s}$  <p>Sign convention for internal force components</p>
	$\pm \Delta d_{sur}^n = \pm R^n \Delta d_{ff}^n, R^n = \frac{\Delta d_{sur}^n}{\Delta d_{ff}^n} = \pm \frac{4(1-\nu_s)}{(1+a_s^n)}$ $T(\theta) = -\frac{12E_l I_l \Delta d_{sur}^n}{D^3 (1-\nu_l^2)} \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right)$ $M(\theta) = -\frac{6E_l I_l \Delta d_{sur}^n}{D^2 (1-\nu_l^2)} \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right)$ $V(\theta) = -\frac{24E_l I_l \Delta d_{sur}^n}{D^3 (1-\nu_l^2)} \sin 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right)$ $a_s^n = \frac{12(5-6\nu_s) E_l I_l}{D^3 G_s (1-\nu_l^2)}$	$\pm \Delta d_{sur} = \pm R \Delta d_{ff}, R = \frac{\Delta d_{sur}}{\Delta d_{ff}} = \pm \frac{4(1-\nu_s)}{(1+a_s)}$ $T(\theta) = -\frac{24E_l I_l \Delta d_{sur}}{D^3 (1-\nu_l^2)} \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right)$ $M(\theta) = -\frac{6E_l I_l \Delta d_{sur}}{D^2 (1-\nu_l^2)} \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right)$ $V(\theta) = -\frac{24E_l I_l \Delta d_{sur}}{D^3 (1-\nu_l^2)} \sin 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right)$ $a_s = \frac{24(3-4\nu_s) E_l I_l}{D^3 G_s (1-\nu_l^2)}$
	<p><math>G_s</math> : shear modulus of the soil, <math>E_s</math> : modulus of elasticity of the soil, <math>\nu_s</math> : Poisson ratio of the soil, <math>E_l</math> : modulus of elasticity of the lining, <math>\nu_l</math> : Poisson ratio of the lining, <math>I_l</math> : moment of inertia of the tunnel lining (per unit width), <math>R</math> : tunnel radius, <math>t</math> : lining thickness, <math>D</math> : diameter of the tunnel</p>	

Εικόνα 2.13: Αναλυτικές λύσεις ανάλυσης στην εγκάρσια έννοια θεωρώντας αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής (Tsinidis, 2015, J. N. Wang, 1993, Penzien and Wu, 1998, Penzien, 2000)

απαιτείται για να προκαλέσει λικνισμό στη διατομή, Η: το ύψος της διατομής, και ο συντελεστής διατμητικής παραμόρφωσης

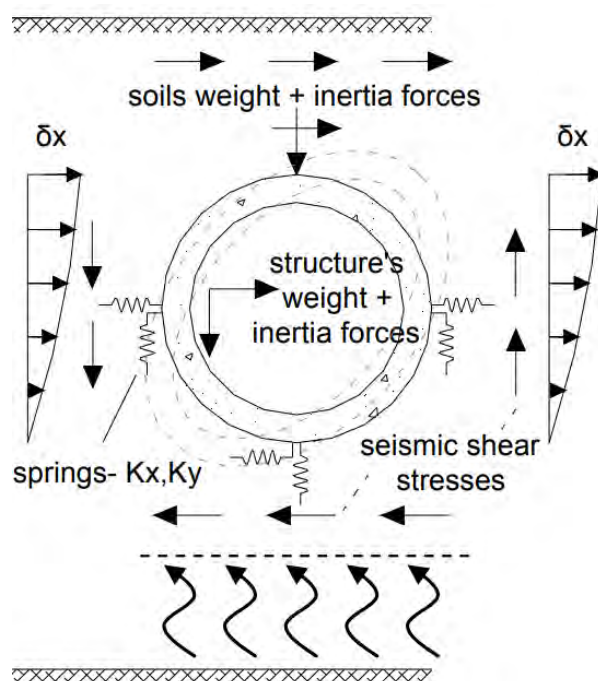
$$R = \frac{\Delta_s}{\Delta_{free-field}} \quad (2.3)$$

,όπου  $\Delta_s$ : η πλευρική παραμόρφωση της κατασκευής λόγω διάτμησης λικνισμού και  $\Delta_{free-field}$ : η πλευρική παραμόρφωση ελεύθερου πεδίου λόγω διάτμησης (J. N. Wang, 1993).



### 2.3.2.2 Απλοποιημένη ισοδύναμη στατική ανάλυση

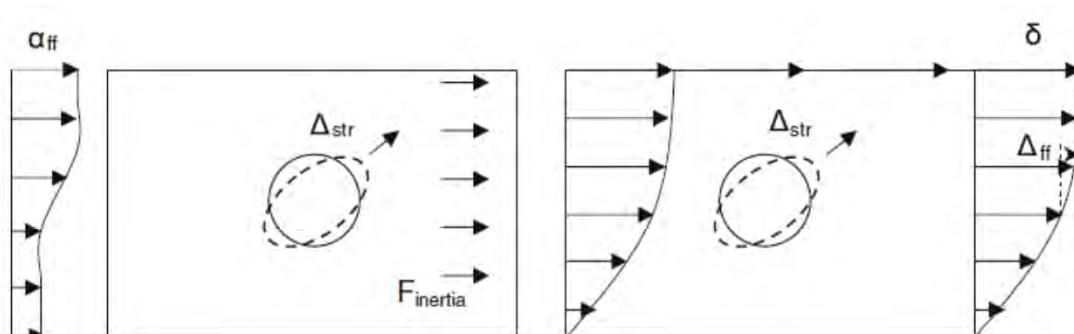
Κύριο χαρακτηριστικό αυτού του τρόπου ανάλυσης είναι ότι η σήραγγα προσομοιώνεται με στοιχεία δοκού και το έδαφος με ελατήρια, ενώ γίνεται επίσης η παραδοχή της επίπεδης παραμόρφωσης στο μοντέλο. Στις αναλύσεις αυτές, για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς του εδάφους υπό σεισμική ταλάντωση, η σεισμική δόνηση αποδίδεται με μονοδιάστατο χαρακτήρα, διαδιδόμενη από το βραχώδες υπόβαθρο προς την επιφάνεια του μοντέλου. Από την προκύπτουσα εδαφική απόκριση μπορούν να προσδιοριστούν οι επιταχύνσεις, οι μετατοπίσεις, οι μέγιστες διατμητικές παραμορφώσεις, η απόσβεση με το βάθος κ.ο.κ. Συνήθως, αριθμητικοί κώδικες τέτοιου χαρακτήρα χρησιμοποιούν εδαφικές στήλες (όπως ο αριθμητικός κώδικας μονοδιάστατης ισοδύναμης στατικής φόρτισης με γραφικό περιβάλλον deepsoil), όπου και εφαρμόζονται τα σεισμικά φορτία με τη μορφή ισοδύναμων στατικών, μέσω αδρανειακών δυνάμεων λόγω της βαρύτητας, διατμητικών δυνάμεων που προκλήθηκαν από τη σεισμική δράση, ωθήσεων και μετακινήσεων (“Bases for design of structures—Seismic actions for designing geotechnical works (ISO 23469)”, 2005). Μία λεπτομερής απεικόνιση αυτής της μεθόδου δίνεται στην εικόνα 2.14.



Εικόνα 2.14: Ανάπτυξη του μοντέλου, μαζί με τα φορτία που δέχεται, κατά την απλοποιημένη ισοδύναμη στατική ανάλυση (Tsinidis, 2015)

### 2.3.2.3 Λεπτομερής ισοδύναμη στατική ανάλυση

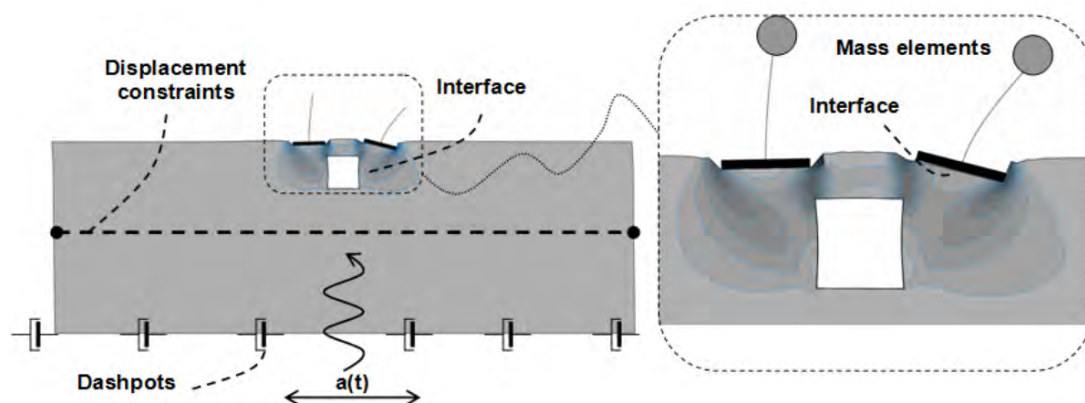
Σε αντίθεση με την απλοποιημένη ισοδύναμη στατική ανάλυση, στη λεπτομερή, το έδαφος και η εγκιβωτισμένη σε αυτό σήραγγα αναπαρίστανται με διδιάστατα αριθμητικά στοιχεία. Επιπρόσθετα, σε αυτού του είδους την ανάλυση, τα ισοδύναμα στατικά φορτία προστίθενται είτε στο σύνολο του προσομοιώματος έχοντας τη μορφή αδρανειακών δυνάμεων είτε αποκλειστικά στο όρια του ως μετακινήσεις (“Bases for design of structures—Seismic actions for designing geotechnical works (ISO 23469)”, 2005), όπως φαίνεται στο σχήμα 2.15.



Εικόνα 2.15: Μορφή προσομοιώματος στη λεπτομερή ισοδύναμη στατική ανάλυση με τα δύο σενάρια φόρτισης (προτότυπο από J. N. Wang, 1993)

### 2.3.2.4 Πλήρης δυναμική ανάλυση στο πεδίο του χρόνου

Η δυναμική ανάλυση διαφοροποιείται από τις στατικές, κυρίως λόγω του τρόπου εισαγωγής του σεισμικού φορτίου, αυτού καθαυτού ως δυναμική φόρτιση (“Bases for design of structures—Seismic actions for designing geotechnical works (ISO 23469)”, 2005). Ωστόσο, η συνθήκη αυτή δυσχεραίνει την ανάλυση σε άλλες πτυχές της, όπως στις συνοριακές συνθήκες (boundary conditions), δημιουργώντας, πιο συγκεκριμένα, την ανάγκη αύξησης της απόστασης των ορίων του μοντέλου από τη σήραγγα, ώστε να περιοριστούν όσο το δυνατόν περισσότερο οι ανακλάσεις που δημιουργούνται. Η προσομοίωση του εδάφους με την κατασκευή γίνεται με διδιάστατα αριθμητικά προσομοιώματα και έχει τη μορφή που φαίνεται στην εικόνα 2.16. Η μόρφωση του μοντέλου έχει αρκετές ομοιότητες με αυτή της λεπτομερούς ισοδύναμης στατικής ανάλυσης. Αυτός ο τρόπος



Εικόνα 2.16: Μορφή προσομοιώματος υπό πλήρη δυναμική ανάλυση στο πεδίο του χρόνου (Tsinidis, 2015)

ανάλυσης θα χρησιμοποιηθεί και παρακάτω για την προσομοίωση συγκεκριμένων περιπτώσεων, ώστε να βρεθεί η απόκρισή του σε επιλεγμένες σεισμικές δονήσεις.

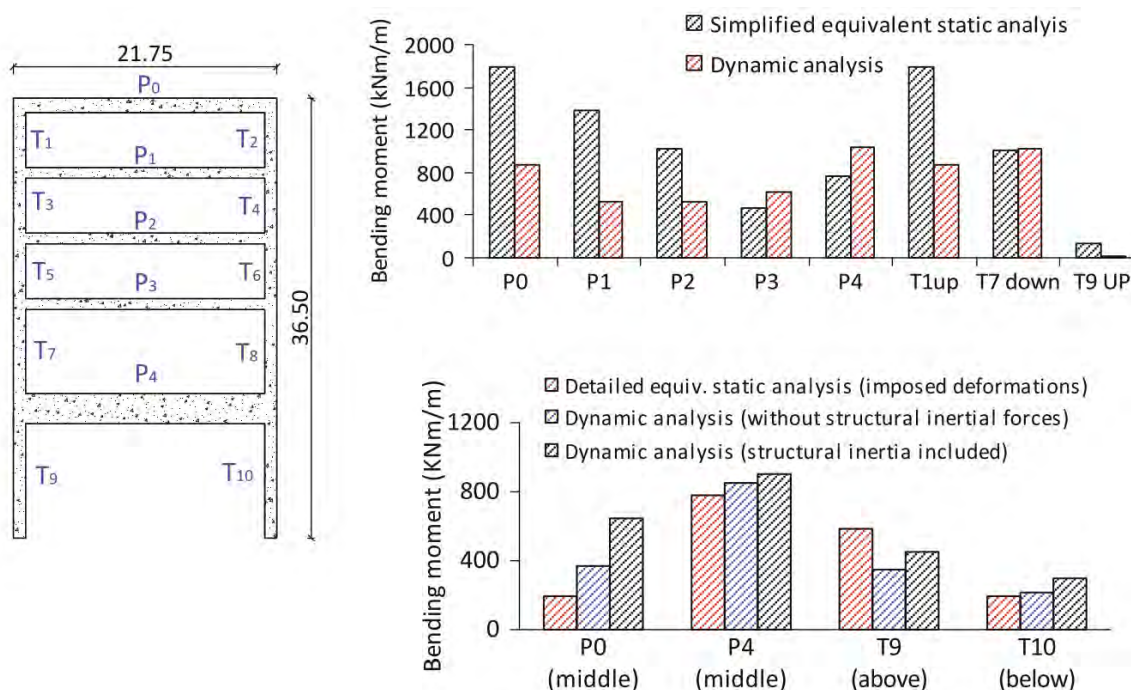
### 2.3.2.5 Σύγκριση μεθόδων ανάλυσης και σχεδιασμού

Από τα παραπάνω, γίνεται κατανοητό πως με τη χρήση των αναλυτικών - εμπειρικών λύσεων τα αποτελέσματα εμπεριέχουν μεγάλη πιθανότητα σφαλμάτων και ανακρίβειών, αφού δεν λαμβάνονται λεπτομερώς υπόψιν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της εκάστοτε σήραγγας και του εκάστοτε εδάφους. Οι αριθμητικές αναλύσεις είτε με τη μορφή ισοδύναμων στατικών είτε με αυτή των δυναμικών, υπερτερούν στην ακρίβεια, διότι εμπεριέχουν το κομμάτι της ολοκληρωμένης προσομοίωσης της εξεταζόμενης περίπτωσης, κάτι που δεν υπάρχει στις προηγούμενες μεθόδους. Ωστόσο, συγκρίνοντας τις τελευταίες μεταξύ τους, οι ισοδύναμες στατικές μέθοδοι ανάλυσης, συνήθως υποτιμούν το μέγεθος των δυνάμεων και ροπών που δέχεται η επένδυση της σήραγγας, σε σχέση με τις δυναμικές αναλύσεις, όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα των Tsinidis et al., 2015. Η προηγούμενη παρατήρηση ενισχύεται και από τα συμπεράσματα των Pitilakis and Tsinidis, 2013, οι οποίοι συγκρίνουν τις ροπές κάμψης για μια διατομή σταθμού μετρό (σταθμός Βενιζέλου - Μέτρο Θεσσαλονίκης), όπως υπολογίζονται από τη λεπτομερή ισοδύναμη στατική ανάλυση και τη δυναμική ανάλυση. Ως αποτέλεσμα προκύπτει πως οι ροπές κάμψης που υπολογίζονται από την ισοδύναμη στατική ανάλυση είναι πολύ

## Κεφάλαιο 2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

μικρότερες από τις αντίστοιχες της δυναμικής ανάλυσης (εικόνα 2.17).

Συμπερασματικά, αυτό που παρατηρούμε, τόσο στις αναλύσεις στη διαμήκη όσο και στις



Εικόνα 2.17: Σκαρίφημα της διατομής του σταθμού 'Βενιζέλος' του μετρό (Θεσσαλονίκη, Ελλάδα) και σύγκριση αποτελεσμάτων των διαφόρων αναλύσεων που έγιναν για τα μέλη της υπόγειας αυτής κατασκευής (Pitilakis and Tsinidis, 2013).

αναλύσεις στην εγκάρσια έννοια, είναι πως με την αύξηση της πολυπλοκότητας της μεθόδου, αυξάνεται και η ακρίβεια της λύσης. Ωστόσο, όσο πιο σύνθετη είναι η ανάλυση, τόσο μεγαλύτερο θα είναι και το υπολογιστικό κόστος που θα προκύψει. Επομένως, ανάλογα τη σημαντικότητα της υπόγειας κατασκευής, επιλέγεται και η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί για τη σεισμική της ανάλυση, ώστε να ανταποκρίνεται στην επιθυμητή ακρίβεια της λύσης με το χαμηλότερο δυνατό υπολογιστικό κόστος που να αντιστοιχεί σε αυτή.

### 2.4 Εισαγωγή στην έννοια της τρωτότητας

Για τη σωστή διαχείριση μιας κατασκευής ή γενικότερα ενός συστήματος σε περιπτώσεις διακοπής της λειτουργίας του, λόγω κάποιου φυσικού κινδύνου, είναι απαραίτητη η γνώση των αναμενόμενων απωλειών λόγω του κινδύνου αυτού, δηλαδή της διακινδύνευσης.

Η εύρεση αυτής βασίζεται σε τρεις βασικούς παράγοντες, την πιθανότητα εμφάνισης του

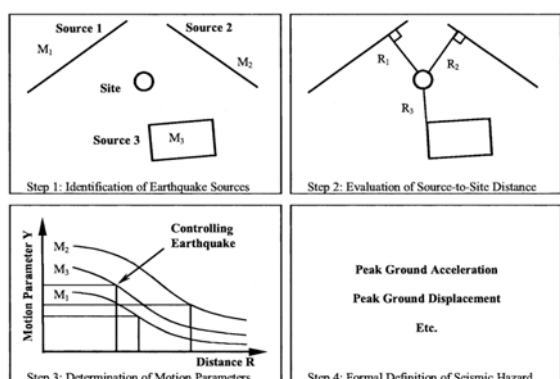
## Κεφάλαιο 2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

φυσικού κινδύνου, την έκθεση της κατασκευής και την τρωτότητα της κατασκευής στον φυσικό κίνδυνο. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, οι σεισμοί αποτελούν τον γεωκίνδυνο που μελετάται. Το φυσικό αυτό φαινόμενο, που προκαλείται λόγω συγκλινόντων, αποκλινόντων ή παράλληλα κινούμενων τεκτονικών πλακών, έχει τη δυνατότητα να προκαλέσει βλάβες σε πολλά επίπεδα στο φυσικό και το ανθρωπογενές περιβάλλον. Η σεισμική δόνηση, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά που έχει, μπορεί ακόμα και να καταστρέψει επιφανειακές υποδομές (π.χ. κτίρια, γέφυρες), και πιο σπάνια υπόγειες, κυρίως όταν αυτές δεν έχουν κατασκευαστεί σύμφωνα με τους εκάστοτε αντισεισμικούς κανονισμούς που τους προσφέρουν ανθεκτικότητα έναντι του σεισμικού κινδύνου. Επομένως, πέραν των χαρακτηριστικών του φυσικού κινδύνου, πρέπει να υπάρχει γνώση και των χαρακτηριστικών της κατασκευής, ώστε να προσδιοριστεί η έκθεση τους. Τέλος, από τον συνδυασμό των δύο παραπάνω εννοιών και ακολουθώντας μία συγκεκριμένη διαδικασία που θα αναλυθεί παρακάτω, προκύπτει η τρωτότητα της κατασκευής έναντι του γεωκινδύνου, δηλαδή εκφράζεται πόσο επιρρεπές είναι το σύστημα σε βλάβες για συγκεκριμένο κίνδυνο.

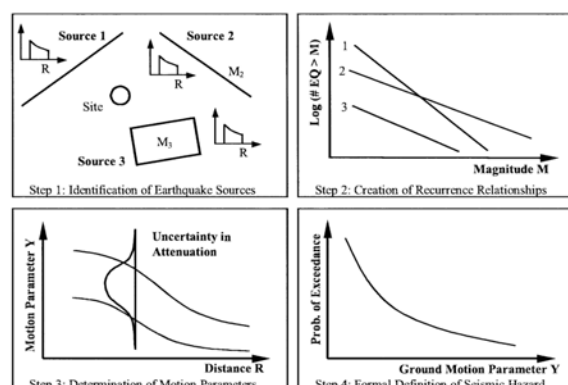
### 2.4.1 Σεισμικός κίνδυνος

Η εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου (seismic hazard) για την περιοχή μελέτης αποτελεί το πρώτο βήμα για οποιαδήποτε περαιτέρω ανάλυση. Μεταξύ άλλων, περιγράφει ποιας έντασης σεισμικές δονήσεις αναμένονται από πιθανούς μελλοντικούς σεισμούς. Η διαδικασία της εκτίμησης του σεισμικού κινδύνου βασίζεται στον συνδυασμό ιστορικών στοιχείων από παλαιότερους σεισμούς καθώς και γεωλογικών και τεκτονικών χαρακτηριστικών της περιοχής μελέτης. Έχοντας γνώση αυτών, και λαμβάνοντας υπόψιν άλλους παράγοντες που επηρεάζουν τη σεισμική δόνηση, δημιουργούνται τα μοντέλα σεισμικής επικινδυνότητας. Σε αυτά εκτιμάται η έντασή του σεισμού ανάλογα με το επίκεντρό του, η πιθανότητα εμφάνισής του και ποια είναι τα πιθανά επίπεδα των σεισμικών δονήσεων που θα προκύψουν. Υπάρχουν δύο κύριες μέθοδοι προσδιορισμού του σεισμικού κινδύνου, η Αιτιοκρατική (2.18) και η Πιθανοτική (2.19). Στην Αιτιοκρατική ανάλυση σεισμικού κινδύνου (Deterministic seismic hazard analysis - DSHA) εντοπίζονται τα ρήγματα στην περιοχή μελέτης και γίνεται η θεώρηση πως θα προκληθεί σει-

## Κεφάλαιο 2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση



Εικόνα 2.18: Τα βήματα εφαρμογής της Ντετερμινιστικής ανάλυσης σεισμικού κινδύνου (Reiter, 1990)



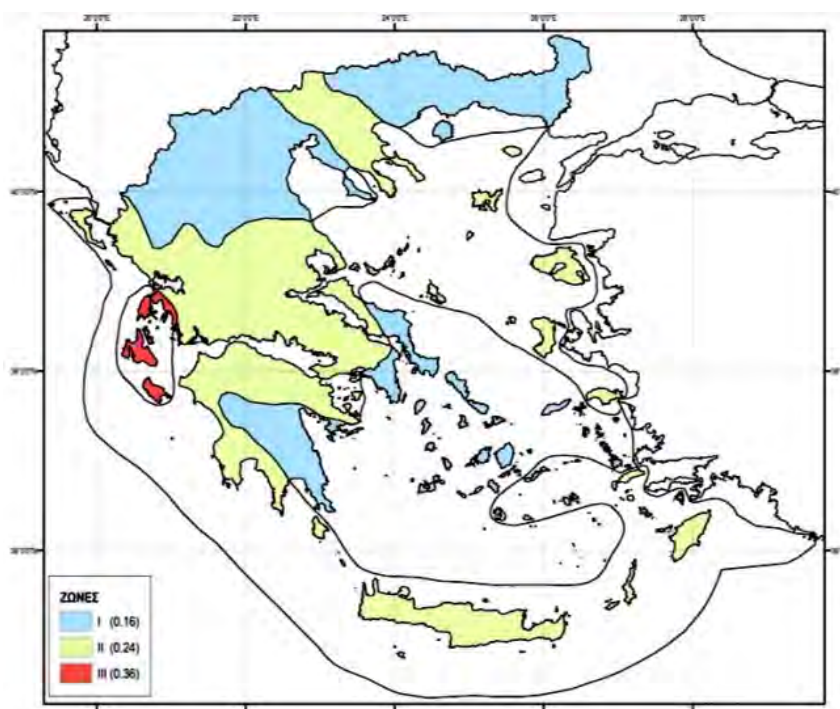
Εικόνα 2.19: Τα βήματα εφαρμογής της Πιθανοτικής ανάλυσης σεισμικού κινδύνου (Reiter, 1990)

σμός σε μία ή περισσότερες από αυτές τις θέσεις ταυτόχρονα. Επομένως, οι πηγές, καθώς και οι χρονικές περίοδοι ενεργοποίησής τους, είναι καθορισμένες. Στην πιθανοτική ανάλυση σεισμικού κινδύνου (Probabilistic seismic hazard analysis - PSHA) προσδιορίζονται τα πιθανά σενάρια ενεργοποίησης ρηγμάτων, με κύρια διαφορά από την προηγούμενη μέθοδο, πως ποσοτικοποιούνται οι υπάρχουσες αβεβαιότητες ανά περίπτωση, με αποτέλεσμα να εντάσσεται στην ανάλυση η πιθανότητα εμφάνισης των σεισμικών δονήσεων που αναμένονται από κάθε πηγή.

Για την κατασκευή έργων σε περιοχές όπου υπάρχουν ρήγματα, είναι απαραίτητη η ανάλυση με κάποια από τις προηγούμενες μεθόδους. Ωστόσο, στις περισσότερες περιπτώσεις, για πρακτικούς λόγους αποφυγής χρονοβόρων και υψηλού κόστους αναλύσεων τέτοιου τύπου, έχουν ήδη δημιουργηθεί, βάσει των παραπάνω μεθόδων (κατά κύριο λόγο της Πιθανοτικής ανάλυσης σεισμικού κινδύνου), χάρτες σεισμικής επικινδυνότητας, διαθέσιμοι για χρήση. Οι πλέον γνωστοί χάρτες μεγάλης κλίμακας, είναι αυτός του Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού - ΕΑΚ 2000 (2.20), καθώς και αυτός του εθνικού προσαρτήματος του Ευρωκώδικα 8 EN1998-1:2004. Εξίσου χρήσιμος θεωρείται και ο χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας της Ευρώπης - ESHM20(2.21), όπως αναπτύχθηκε από το αντίστοιχο ερευνητικό πρόγραμμα, βάσει ιστορικών δεδομένων σε συνδυασμό με κάποια πιθανοτικά μοντέλα που αναπτύχθηκαν. Υπάρχουν ακόμα διαθέσιμοι και τοπικοί χάρτες μικρής κλίμακας, οι οποίοι αφορούν συγκεκριμένες περιοχές (π.χ. νομούς, δήμους) και χρησιμοποιούνται για έργα που αφορούν την εκάστοτε περιοχή. Ο ισχύων

## Κεφάλαιο 2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

χάρτης του Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού (ΕΑΚ 2000), όπως απεικονίζεται στην εικόνα 2.20, χωρίζει τη χώρα σε τρεις ζώνες διαφορετικής σεισμικής επικινδυνότητας (I, II, III), ταξινομημένες κατά αύξοντα σεισμικό κίνδυνο. Βάσει αυτών, επιλέγεται για την περιοχή μελέτης, από το υπόμνημα, η αντίστοιχη, για την περιοχή αυτή, τιμή εδαφικής επιτάχυνσης, ως η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση σχεδιασμού για την εκάστοτε κατασκευή. Οι τιμές της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA) της κάθε ζώνης στο υπόμνημα, είναι εκφρασμένες σε τιμές επιτάχυνσης της βαρύτητας (g). Στον χάρτη της εικόνας

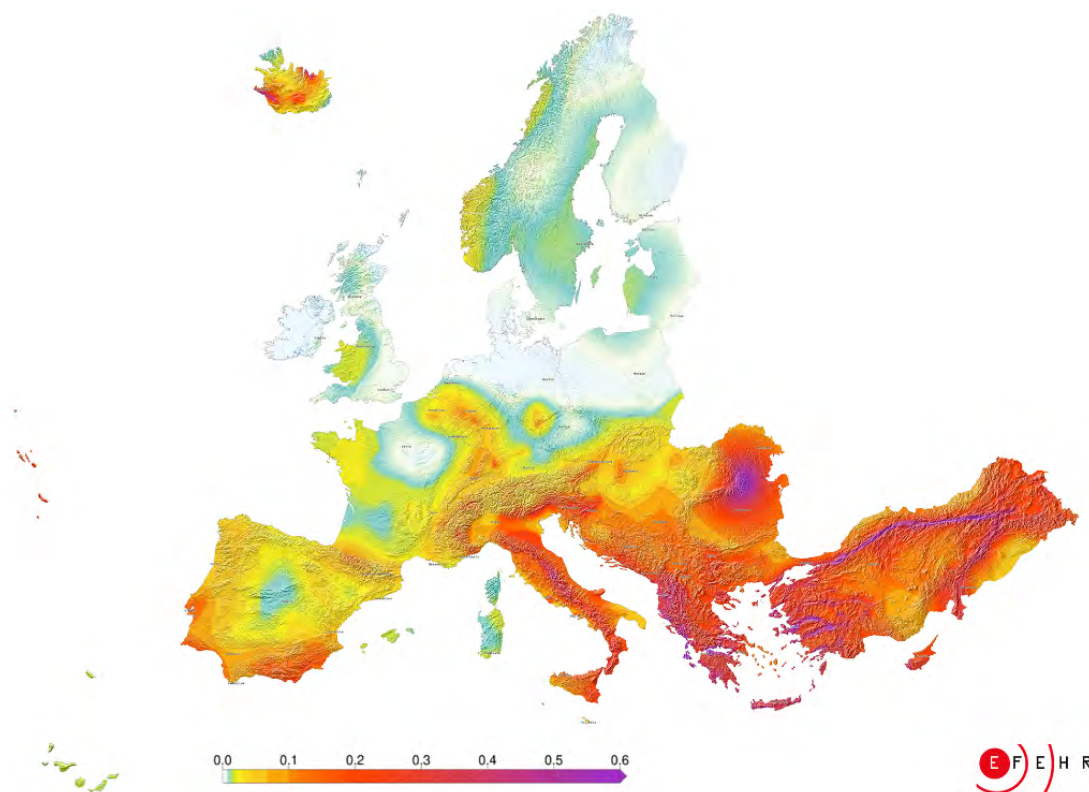


*Εικόνα 2.20: Νέος Χάρτης Σεισμικής Επικινδυνότητας Ελλάδας (Ν.Χ.Σ.Ε.Ε.), όπου απεικονίζονται οι τρεις κατηγορίες ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας στον Ελλαδικό χώρο, σύμφωνα με την τελευταία τροποποίηση του Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού (ΕΑΚ 2000) (“Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας-Υπουργείο Κλιματικής Κρίσης και Πολιτικής Προστασίας”, 2003)*

2.21, απεικονίζονται αποτελέσματα του ερευνητικού προγράμματος European Facilities for Earthquake Hazard and Risk (EFEHR). Πιο συγκεκριμένα, εκφράζονται χρωματικά οι εντάσεις σεισμικών δονήσεων που αναμένονται, με χαμηλού κινδύνου περιοχές ως λευκές και πράσινες, μέτριου κινδύνου ως κίτρινες και πορτοκαλί και τέλος υψηλού κινδύνου ως κόκκινες και μοβ. Ο κίνδυνος είναι εκφρασμένος μέσω της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA), η οποία αποδίδεται ως ποσοστό της επιτάχυνσης της βαρύτητας (g), με τιμές που φαίνονται στο υπόμνημα. Η περίοδος επαναφοράς του απεικονιζόμενου κινδύνου

## Κεφάλαιο 2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

είναι τα 475 χρόνια.



Εικόνα 2.21: Χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας της Ευρώπης του έτους 2020 (2020 European Seismic Hazard Model - ESHM20), όπου εκφράζεται ποιας έντασης σεισμοί αναμένονται στις διάφορες περιοχές που απεικονίζονται (“European Facilities for Earthquake Hazard and Risk (EFEHR)”, 2020)

### 2.4.2 Εκτίμηση της τρωτότητας

Η εκτίμηση της τρωτότητας, η οποία εισήχθη παραπάνω ως έννοια, καθώς και η απόδοσή της για τυπικά παραδείγματα σηράγγων μέσω των συναρτήσεων τρωτότητας, αποτελούν το βασικό σκοπό αυτής της εργασίας. Για την αποτίμηση της χρησιμοποιούνται οι έννοιες των σταθμών βλάβης (Damage States (DS)) και του μέτρου έντασης (Intensity Measure (IM)), δύο παράμετροι που μπορούν να εκφραστούν με ποικίλους τρόπους, ανάλογα το είδος της κατασκευής, τον τρόπο της ανάλυσης που χρησιμοποιείται κ.α. Οι στάθμες βλάβης ορίζουν το επίπεδο της βλάβης της κατασκευής μετά την έκθεσή της σε σεισμικό κίνδυνο, χρησιμοποιώντας ως κριτήριο διαχωρισμού ένα σύνολο διακριτών καταστάσεων, όπως η απόκριση των κύριων μελών της, παραδείγματος χάριν αστοχίες



## Κεφάλαιο 2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

στην επένδυση. Έτσι δημιουργούνται οριοθετημένες οριακές καταστάσεις (Limit States (LS)) που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένης σοβαρότητας φθορές. Συνήθως διακρίνονται σε κατηγορίες αύξουσας σημαντικότητας βλαβών, με την μικρότερη να χαρακτηρίζει καθόλου έως ανεπαίσθητες βλάβες και την μεγαλύτερη σημαντικές βλάβες έως κατάρρευση ολόκληρων τμημάτων (2.22). Όσον αφορά την ένταση του σεισμικού κινδύνου, αυτή με τη σειρά της αποδίδεται από το μέτρο έντασης και εκφράζει τον αντίκτυπο των σεισμικών κυμάτων στην κατασκευή. Συνήθως αποδίδεται μέσω της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA) ή της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας (PGV). Οι καμπύλες τρωτότητας συσχετίζουν τις δύο αυτές παραμέτρους, ορίζοντας την πιθανότητα προσέγγισης ή υπέρβασης μίας συγκεκριμένης στάθμης βλάβης για ένα συγκεκριμένο μέτρο έντασης. Ο πιο συνήθης τύπος για την εξαγωγή τους ακολουθεί λογαριθμοκανονική κατανομή και εκφράζεται ως:

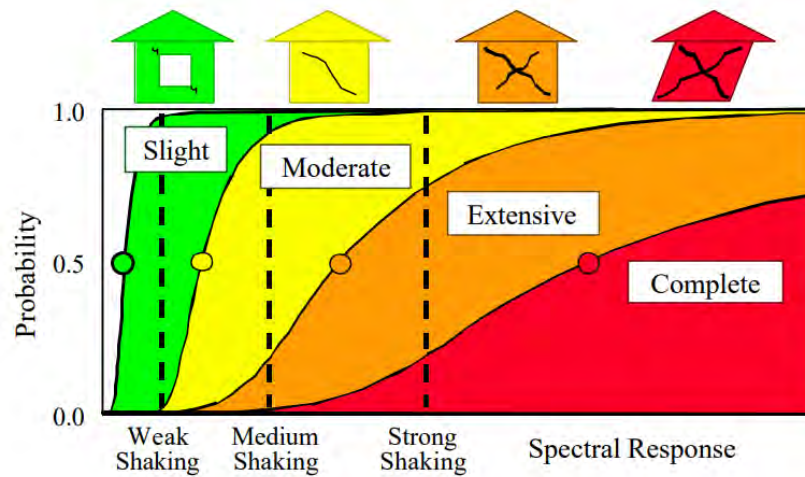
$$P_f(LS_i \geq LS_i | IM) = \Phi \left[ \frac{1}{\beta_{tot}} \cdot \ln \left( \frac{IM}{IM_{mi}} \right) \right] \quad (2.4)$$

,όπου  $P_f()$ : η πιθανότητα η κατασκευή να προσεγγίζει ή να υπερβαίνει την εξεταζόμενη οριακή κατάσταση (LS) υπό συγκεκριμένο μέτρο έντασης (IM),  $\Phi$ : η λογαριθμοκανονική συνάρτηση πιθανότητας,  $IM_{mi}$ : η μέση τιμή κατωφλίου του μέτρου έντασης (IM) που απαιτείται για να προκληθεί η στάθμη βλάβης  $i$ ,  $\beta_{tot}$ : η συνολική τυπική απόκλιση, η οποία αντικατοπτρίζει το σύνολο των αβεβαιοτήτων και υπολογίζεται ως εξής:

$$\beta_{tot} = \sqrt{(\beta_c)^2 + (\beta_d)^2 + (\beta_{DS})^2} \quad (2.5)$$

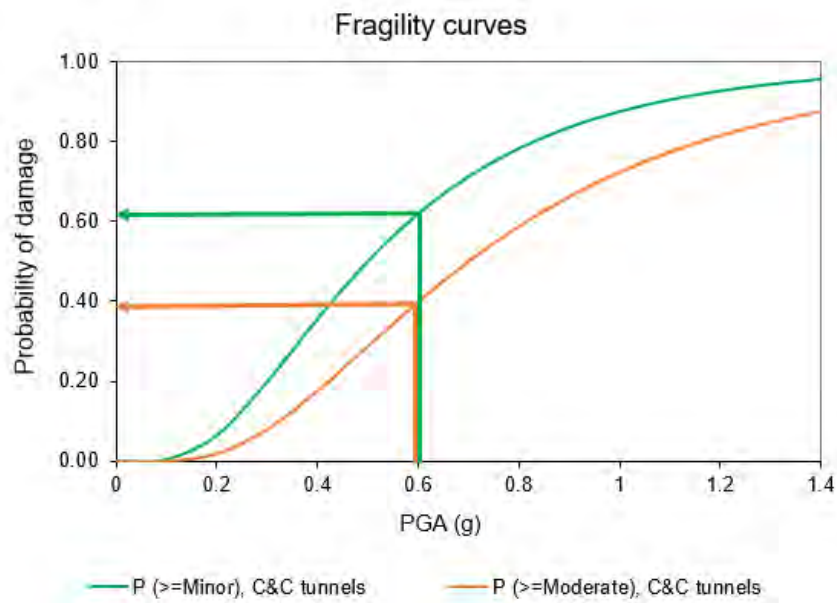
,όπου  $\beta_c$ : η αβεβαιότητα που εμπεριέχεται στην απόκριση της κατασκευής,  $\beta_d$ : η αβεβαιότητα ως προς τη σεισμική απαίτηση,  $\beta_{DS}$ : η αβεβαιότητα στον προσδιορισμό των σταθμών βλάβης (Tsinidis et al., 2022, Argyroudis et al., 2014, Argyroudis et al., 2019). Σε ένα διάγραμμα καμπυλών τρωτότητας, όπως αυτό στο σχήμα 2.23, ο οριζόντιος άξονας εκφράζει το μέτρο έντασης, οι καμπύλες εκφράζουν τις στάθμες βλάβης και ο κατακόρυφος άξονας την πιθανότητα εμφάνισής τους. Αυτή είναι και η σειρά που ακολουθείται για να βρεθεί, για συγκεκριμένο μέτρο έντασης, η πιθανότητα εμφάνισης βλαβών συγκεκριμένης στάθμης. Για παράδειγμα, στη συγκεκριμένη περίπτωση συστήματος σήραγγα-έδαφος, από το εγχειρίδιο HAZUS, για μέτρο έντασης 0.6 g, σχεδιάζοντας προσεγγιστικά ευ-

## Κεφάλαιο 2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση



Εικόνα 2.22: Καμπύλες τρωτότητας για τέσσερις στάθμες βλάβης HAZUS, 2022

θείες στο διάγραμμα για όλες τις δύο εικονιζόμενες στάθμες βλάβης, καταλήγουμε στο συμπέρασμά πως η πιθανότητα η κατασκευή να εμφανίσει μικρές φθορές είναι λίγο μεγαλύτερη του 60%, ενώ για μέτριες φθορές η πιθανότητα προσεγγίζει το 40%.



Εικόνα 2.23: Καμπύλες τρωτότητας για δύο στάθμες βλάβης (ελάχιστη, μέση) καθώς και η πιθανότητα εμφάνισης κάθε μίας για μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (PGA) τα 0.6g (πρωτότυπες από το εγχειρίδιο HAZUS, για κυκλική σήραγγα κατασκευασμένη με τη μέθοδο της εκσκαφής και επανεπίχωσης)

## 3 Εξεταζόμενο σύστημα - Αριθμητική προσομοίωση

### 3.1 Γενικά χαρακτηριστικά εξεταζόμενων συστημάτων

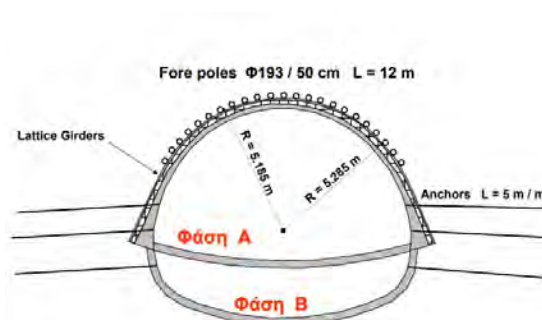
Τα εξεταζόμενα συστήματα επιλέχθηκαν με γνώμονα κάποια από τα τυπικά χαρακτηριστικά σηράγγων που εντοπίζονται σε συστήματα μεταφοράς στην Ελλάδα. Η διατομή της σήραγγας αποφασίστηκε να έχει ωσειδές σχήμα, ενώ θεωρείται ότι κατασκευάζεται με την νέα αυστριακή μέθοδο διάτρησης σηράγγων (NATM - New Austrian Tunnelling Method). Η επιλογή αυτή βασίστηκε κυρίως στην ομοιότητα με διάφορες διατομές του μετρό της Αθήνας, οι οποίες αποτέλεσαν γενικό οδηγό για τα βασικά χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων συστημάτων. Όσον αφορά το μετρό της Αθήνας, τα βάθη εγκιβωτισμού της κατασκευής ξεπερνούν κατά μέσο όρο τα 15 μέτρα μέσα στο έδαφος, με σκοπό την αποφυγή συνάντησης αρχαιολογικών ευρημάτων. Το γεωλογικό υπόβαθρο του εδάφους εγκιβωτισμού της πλειονότητας της κατασκευής αποτελείται από σειρά γεωλογικών σχηματισμών που ονομάζονται ως σύνολο Αθηναϊκός Σχιστόλιθος (εικόνα 3.1). Η βραχώμαζα αυτού του σχηματισμού έχει υποστεί εκτεταμένη αποσάθρωση λόγω παραμόρφωσης με το χρόνο και τεκτονικής δράσης, με αποτέλεσμα να είναι εξαιρετικά ανομοιογενής και ανισότροπη, δυσχεραίνοντας τον ακριβή σχεδιασμό γεωλογικών τομών για το έργο. Πάνω από το στρώμα του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου έχουν αποτεθεί αργιλικά, αμμώδη και κροκαλοπαγή υλικά που προέρχονται από αποθέσεις ποταμών και το πάχος τους κυμαίνεται από 1 έως 6 μέτρα, ενώ στο ανώτερο στρώμα εντοπίζονται σύγχρονες αποθέσεις και τεχνητές επιχώσεις. Για την κατασκευή του μετρό χρησιμοποιήθηκαν οι μέθοδοι ανοιχτού ορύγματος, επικάλυψης-εκσκαφής και η Νέα Αυστριακή Μέθοδος Εκσκαφής Σηράγγων (NATM). Πιο συγκεκριμένα, η διατομή που επιλέχθηκε εμφανίζει πολλές ομοιότητες με τη σήραγγα του μετρό στην περιοχή Δουκίσσης Πλακεντίας, όπως φαίνεται την εικόνα 3.3(“ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.”, 2021).



Εικόνα 3.1: Γεωλογικός χάρτης της Αττικής, όπου διακρίνεται η εδαφική της πολυπλοκότητα (“Ελληνική Αρχή Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών - Ε.Α.Γ.Μ.Ε.”, 2019)



Εικόνα 3.2: Διατομή υπό κατασκευής σήραγγας του μετρό της Αθήνας (“ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.”, 2021)



Εικόνα 3.3: Διατομή του μετρό της Αθήνας στην περιοχή Δουκίσσης Πλακεντίας

Όπως αναφέρθηκε και στο δεύτερο κεφάλαιο, οι κατασκευές σε μαλακότερους σχηματισμούς είναι επιρρεπέστερες σε βλάβες, λόγω σεισμικού κινδύνου, συγκριτικά με αυτές σε βράχο. Στο πλαίσιο αυτό, αποφασίστηκε να μελετηθούν δύο τύποι εδάφους με εγκλιβωτισμένη την ίδια διατομή σήραγγας. Τα εδάφη που επιλέχθηκαν για το σκοπό αυτό, αναφέρονται ως σχετικά μαλακοί εδαφικοί σχηματισμοί, ενώ διαφέρουν σε μικρό βαθμό. Τα χαρακτηριστικά τους απεικονίζονται στον πίνακα 3.1, όπου γίνεται αναφορά σε αυ-

τούς ως εδαφική στρώση 1, για τον σχηματισμό με τη μικρότερη δυσκαμψία και εδαφική στρώση 2 για αυτόν με τη λίγο μεγαλύτερη. Τα αργιλικά αυτά υλικά έχουν μεγάλη πλαστικότητα, αποτρέποντας τη δημιουργία δευτερευόντων βλαβών στη σήραγγα από έμμεσους παράγοντες, όπως φαινόμενα ρευστοποίησης. Το υλικό που χρησιμοποιείται ως βάση και παραμένει ίδιο και για τα δύο αργιλικά εδάφη είναι βραχώδες και προσομοιώνεται με τη μορφή ελαστικού υπόβαθρου, όπου στην ανάλυση χρησιμοποιείται για την ομαλή εισαγωγή της σεισμικής δράσης στο ανώτερο έδαφος μέσω αυτού. Τα χαρακτηριστικά του απεικονίζονται εξίσου στον πίνακα 3.1. Συγκεκριμένα, δίνονται τα βάθη ( $z$ ) των δύο στρώσεων εδάφους και βράχου, το ειδικό βάρος ( $\gamma$ ), τα μέτρα ελαστικότητας ( $E$ ), διάτμησης ( $G$ ) και διόγκωσης ( $K$ ), ο λόγος του poisson ( $\nu$ ), η ταχύτητα διατμητικών κυμάτων ( $V_s$ ), η συνοχή του εδάφους ( $c'$ ), καθώς και οι γωνίες εσωτερικής τριβής ( $\varphi'$ ) και διαστολής ( $\psi'$ ). Όσον αφορά τα χαρακτηριστικά της σήραγγας, έχουν επιλεγεί βάσει των ισχυόντων κανονισμών αλλά και πραγματικών δεδομένων ως προς τον τρόπο κατασκευής τους στο ελληνικό δίκτυο μεταφορών. Αυτά απεικονίζονται στον πίνακα 3.2, όπου παρουσιάζεται το πάχος της διατομής ( $t$ ) και τα μηχανικά χαρακτηριστικά μεγέθη αντοχής και δυσκαμψίας του σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκε.

*Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά των δύο διαφορετικών εδαφών που επιλέχθηκαν καθώς και του βραχώδους υποβάθρου*

	Εδαφική στρώση 1	Εδαφική στρώση 2	Βραχώδες υπόβαθρο
$z(\text{m})$	0 / -44.5	0 / -44.5	-44.5 / -52
$\gamma(\text{kN}/\text{m}^3)$	17	18	21
$E(\text{MPa})$	1192.7	1717.4	3562.1
$G(\text{MPa})$	458.7	660.6	1370.0
$K(\text{MPa})$	993.9	1431.2	2968.4
$\nu$	0.3	0.3	0.3
$V_s(\text{m}/\text{s})$	500	600	800
$c'(\text{kPa})$	5	10	-
$\varphi'(^{\circ})$	30	35	-
$\psi'(^{\circ})$	0	5	-

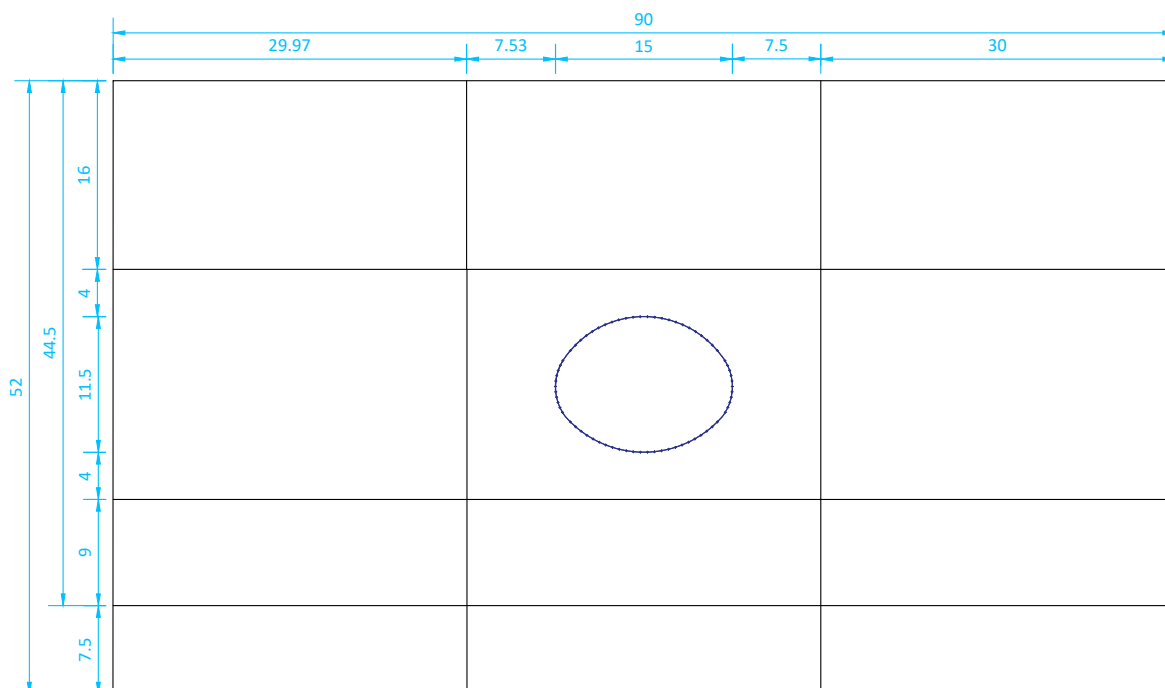
Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά της σήραγγας από σκυρόδεμα

Διατομή σήραγγας	Σκυρόδεμα
t(m)	1
$\gamma(kN/m^3)$	25
E(MPa)	30000.0
$\nu$	0.2

### 3.2 Παραδοχές ανάλυσης και διαδικασίας προσομοίωσης

Το σύστημα σήραγγα-έδαφος που εξετάζεται στο πλαίσιο της εργασίας, παρουσιάζεται στην εικόνα 3.4. Οι διαστάσεις του προσομοιώματος επιλέχθηκαν έτσι ώστε η διάδοση των σεισμικών κυμάτων να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στην πραγματικότητα, περιορίζοντας ωστόσο το χρόνο της ανάλυσης σε λογικά πλαίσια. Στο πεδίο, οι διαστάσεις του χώρου, όπου διαδίδεται η σεισμική δόνηση, είναι "άπειρες". Η κατάσταση αυτή δεν μπορεί να αποτυπωθεί επακριβώς στις δυναμικές αναλύσεις σε Η/Υ σε αυτή την περίπτωση, λόγω του μεγάλου υπολογιστικού κόστους που θα προέκυπτε. Επομένως, οι διαστάσεις του περιβάλλοντος της σήραγγας εδάφους επιλέχθηκαν να είναι 90 μέτρα πλάτος και 52 μέτρα βάθος, ορίζοντας μία αρκετά μεγάλη περιοχή, ώστε να αποφεύγονται όσο το δυνατόν καλύτερα οι ανακλάσεις των σεισμικών κυμάτων στα όρια, να υπάρχει αρκετός χώρος για να αποτυπωθεί καλύτερα η αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής, αλλά και να είναι δυνατή η περάτωση της ανάλυσης στα συγκεκριμένα χρονικά πλαίσια που ορίστηκαν. Όσον αφορά τις διαστάσεις της σήραγγας, το ύψος της προσδιορίστηκε στα 11.5 μέτρα, ενώ το πλάτος της στα 15 μέτρα. Το μήκος της σήραγγας δεν επιλέχθηκε επακριβώς, διότι η ανάλυση γίνεται στην εγκάρσια έννοια και λαμβάνει υπόψιν την παραδοχή της επίπεδης παραμόρφωσης, δηλαδή ότι το μήκος της σήραγγας είναι αρκετά μεγαλύτερο των δύο άλλων διαστάσεών της, οπότε ορίζεται για τις αναλύσεις ένα πάχος σε αυτή τη διάσταση ενός μέτρου.

Η προσομοίωση του γεωμετρικού μοντέλου στον αριθμητικό κώδικα FLAC2D μπορεί να επιτευχθεί είτε με το σχεδιασμό του σε αυτόν, κάνοντας χρήση του γραφικού του περιβάλλοντος, είτε με την εισαγωγή της γεωμετρίας που έχει ήδη σχεδιαστεί σε κάποιο λογισμικό σχεδιασμού, π.χ. autocad, και μετατραπεί σε αρχείο εικόνας dxf. Λόγω της πολυπλοκότητας της διατομής της σήραγγας που επιλέχθηκε, δηλαδή του ωειδούς σχή-



Εικόνα 3.4: Σκαρίφημα του εξεταζόμενου συστήματος, σχεδιασμένο στο πρόγραμμα autocad με τις αντίστοιχες διαστάσεις, όπως σχεδιάστηκε για τις ανάγκες της προσομοίωσης

ματος της, στις αναλύσεις που ακολουθούν, το μοντέλο σχεδιάστηκε με την πρώτη μέθοδο, αφού αποδείχθηκε καταλληλότερη για το ζητούμενο αποτέλεσμα.

Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στη διεπιφάνεια σήραγγας-εδάφους. Οι σχετικές κινήσεις που μπορούν να αναπτυχθούν σε αυτή είναι η αποκόλληση καθώς και η διατμητική μετακίνηση. Ως προς αυτές επιλέχθηκαν οι δύο δυσκαμψίες  $K_n$ , όπου n: normal και  $K_s$ , όπου s: shear. Επιπλέον ο συντελεστής τριβής επιλέχθηκε να έχει την τιμή 0.7.

### 3.2.1 Εισαγωγή στον κώδικα FLAC2D

Ο αριθμητικός κώδικας FLAC2D (Fast Lagrangian Analysis of Continua) αποτελεί ένα λογισμικό διδιάστατης αριθμητικής προσομοίωσης, το οποίο χρησιμοποιεί πεπερασμένες διαφορές, ώστε να προσομοιώσει σύνθετες συμπεριφορές. Αποσκοπεί στην επίλυση

γεωτεχνικών προβλημάτων, όπως αναλύσεις εδαφών και βράχων έναντι φορτίσεων, ροής υπόγειων υδάτων, καθώς και προβλημάτων αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής ενώ χρησιμοποιείται και για σχεδιασμό και δοκιμές διαφόρων έργων μεγάλης κλίμακας και σημασίας, όπως φράγματα, σήραγγες, τοίχους αντιστήριξης κ.ο.κ. Ο κώδικας έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να προσομοιώνει διαφόρων τύπων γεωμετρίες, προβλήματα που αναπτύσσονται σε πολλαπλά στάδια, προβλήματα με μεγάλες μετατοπίσεις και παραμορφώσεις, έντονα μη γραμμικές συμπεριφορές υλικών κ.α. ενώ η ανάλυση μπορεί να φτάσει στα όρια της αστοχίας ή ακόμα και στην ολική κατάρρευση της υπό μελέτη κατασκευής. Η ιδιότητα προσομοίωσης μεγάλων παραμορφώσεων έγκειται στο σχήμα υπολογισμού Lagrangian που υιοθετείται από τον κώδικα (Τσινίδης, 2022, “Soil Models-FLAC”, 2018). Τέλος, χρησιμοποιείται τόσο για στατικές, όσο και για δυναμικές αναλύσεις.

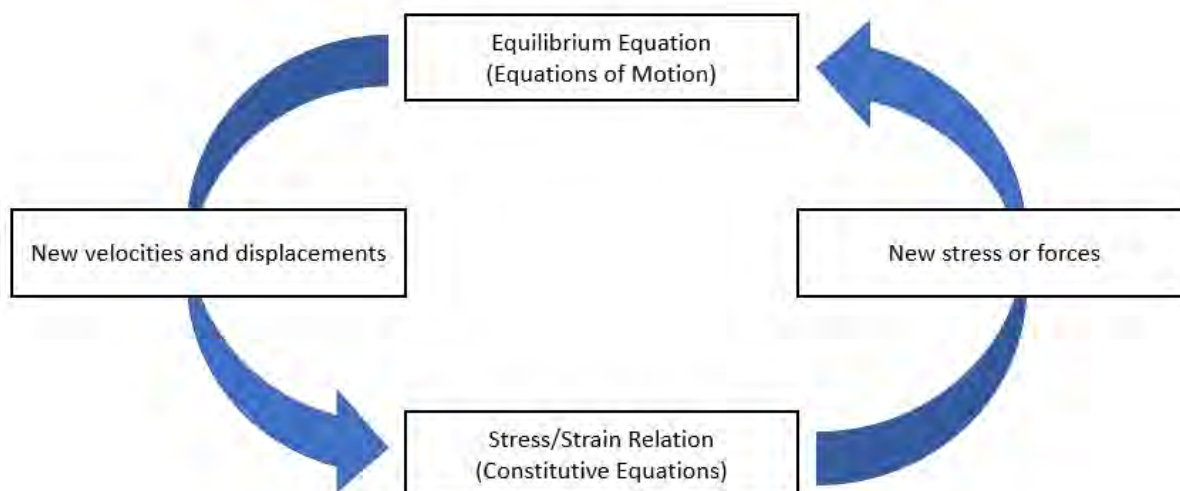
Ο κώδικας βασίζεται στην επίλυση εξισώσεων κίνησης, γνωστές και ως εξισώσεις δυναμικής ισορροπίας, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της απευθείας αριθμητικής ολοκλήρωσης στο χρόνο, κατά την οποία γίνεται η ολοκλήρωση βήμα προς βήμα, κάνοντας παράλληλα χρήση ρητού αλγόριθμου (explicit), βάσει του οποίου οι τιμές ενός μεγέθους σε κάθε βήμα προκύπτουν με βάση το προηγούμενο. Οι ρητοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται για αναλύσεις έντονα μη γραμμικών προβλημάτων, αφού έχουν αποδειχθεί αποδοτικότεροι σε σχέση με τους πεπλεγμένους αλγόριθμους (implicit), οι οποίοι χρησιμοποιούνται κυρίως σε γραμμικά-ελαστικά προβλήματα.

Για την επίλυση κάθε προβλήματος, ακολουθείται από τον κώδικα μια καθορισμένη ακολουθία ανάλυσης με τη μορφή βημάτων, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.5. Πρώτο βήμα αποτελεί η σύνταξη των εξισώσεων δυναμικής ισορροπίας για το εκάστοτε πρόβλημα και βήμα, από τη λύση των οποίων, προκύπτουν στη συνέχεια οι νέες ταχύτητες και μετατοπίσεις. Η μορφή των εξισώσεων ακολουθεί τη γενική εξίσωση δυναμικής ισορροπίας στο χρόνο:

$$M \cdot \ddot{u}(t) + C \cdot \dot{u}(t) + K \cdot u(t) = P(t) \quad (3.1)$$

Από τις μεταβολές των μετατοπίσεων που προκύπτουν από την παραπάνω επίλυση, μπορούν να υπολογιστούν οι ρυθμοί παραμόρφωσης, οι οποίοι με τη σειρά τους, μέσω των καταστατικών νόμων των υλικών που χρησιμοποιούνται, οδηγούν στον υπολογισμό των νέων δυνάμεων και τάσεων. Όλα τα υπολογιζόμενα μεγέθη παραμένουν σταθερά





Εικόνα 3.5: Η γενική ακολουθία ανάλυσης που χρησιμοποιείται από τον κώδικα *FLAC2D*

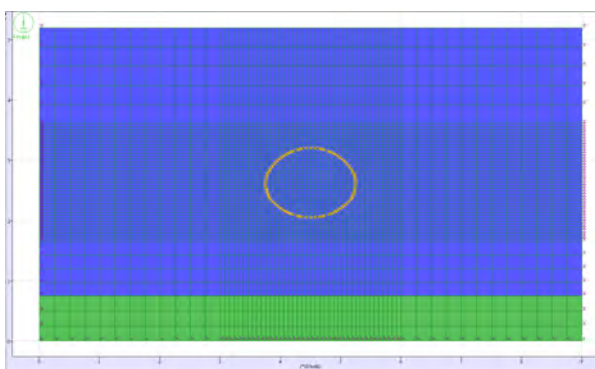
κατά τη διάρκεια ενός βήματος ανάλυσης. Η διαδικασία που περιγράφηκε επαναλαμβάνεται σε κάθε βήμα ανάλυσης, δημιουργώντας αυτόν τον υπολογιστικό βρόγχο, ενώ για την ομαλή ροή της, το χρονικό βήμα επιλέγεται να έχει μικρή τιμή, τέτοια που να μην επηρεάζει την υπολογιζόμενη απόκριση.

Για την προσομοίωση του εξεταζόμενου προβλήματος, μπορεί είτε να γραφεί σειρά εντολών, χρησιμοποιώντας τη γλώσσα προγραμματισμού που ονομάζεται FISH, είτε να επιλεγούν οι κατάλληλες εντολές στο γραφικό περιβάλλον που διαθέτει (Graphical Interface, GUI).

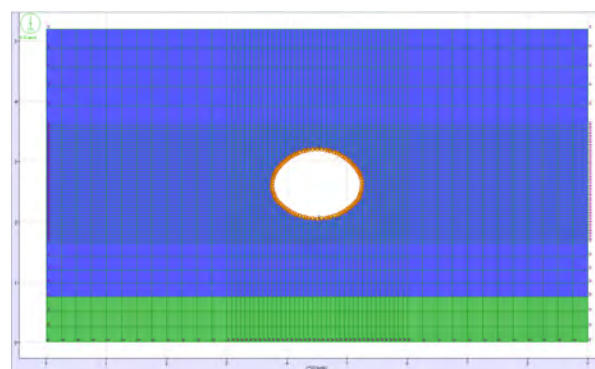
### 3.2.2 Βήματα ανάλυσης

Μετά την εισαγωγή της γεωμετρίας στον κώδικα, η διαδικασία που ακολουθείται χωρίζεται σε βήματα ανάλυσης ως εξής:

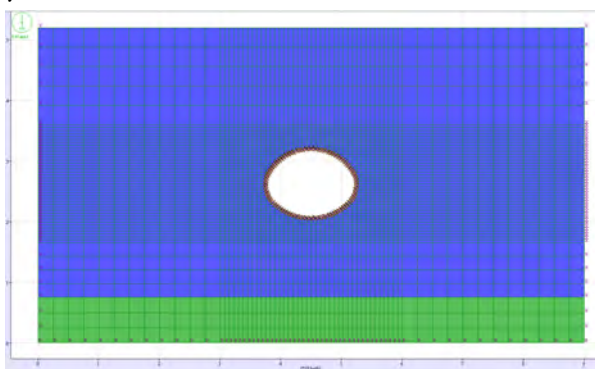
- Στο πρώτο βήμα το προσομοίωμα αποτελείται αμιγώς από έδαφος και η ανάλυση γίνεται υπό στατικές συνθήκες με μοναδική εξωτερική δύναμη τη βαρύτητα, αποσκοπώντας στην εύρεση του αρχικού τασικού πεδίου που επικρατεί (κατακόρυφες και οριζόντιες γεωστατικές τάσεις).
- Αφού βρεθούν οι γεωστατικές τάσεις, επόμενο βήμα αποτελεί η έναρξη της εκσκαφής της σήραγγας, λαμβάνοντας υπόψιν έναν αρχικό συντελεστή χαλάρωσης



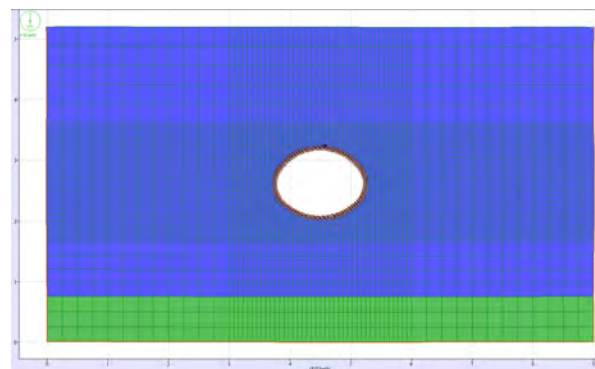
Εικόνα 3.6: Πρώτο στάδιο προσομοίωσης- Στατική ανάλυση υπό το καθεστώς της βαρύτητας και υπολογισμός των αρχικών γεωστατικών τάσεων



Εικόνα 3.7: Δεύτερο στάδιο προσομοίωσης- Έναρξη της εκσκαφής της σήραγγας με 30% χαλάρωση του εδάφους



Εικόνα 3.8: Τρίτο στάδιο προσομοίωσης- Ολοκλήρωση της εκσκαφής με 100% χαλάρωση και εισαγωγή της επένδυσης



Εικόνα 3.9: Τέταρτο στάδιο προσομοίωσης - Δυναμική ανάλυση

του εδάφους, ο οποίος απομειώνει τις δρώσες, κατά μήκος της περιφέρειας της οπής, δυνάμεις κατά 30% της αρχικής τους τιμής, αφήνοντας το υπόλοιπο 70% τους να αντιστηρίζει τη δημιουργηθείσα οπή έως ότου τοποθετηθεί η επένδυση, ώστε να μην επέλθει η κατάρρευσή της.

- Στο τρίτο βήμα ανάλυσης, η εκσκαφή της σήραγγας ολοκληρώνεται, αφήνοντας το έδαφος να χαλαρώσει στο 100%, δηλαδή μηδενίζοντας τις δυνάμεις αντίδρασης του εδάφους που αντιστήριζαν την οπή, ενώ παράλληλα ενεργοποιούνται τα στοιχεία της επένδυσης της σήραγγας. Τα δύο αυτά βήματα εκσκαφής της σήραγγας γίνονται μέσω στατικών αναλύσεων.
- Το τελικό βήμα είναι αυτό της δυναμικής ανάλυσης, όπου εισάγεται η σεισμική δράση που επιλέγεται κάθε φορά, με τη μορφή τάσεων, στο κάτω όριο του προσο-

μοιώματος. Η διαδικασία αυτή θα αναλυθεί εκτενώς στην επόμενη υποενότητα.

### 3.2.3 Επιλογή κανάβου

Η διαδικασία διακριτοποίησης του προσομοιώματος αποτελεί ένα σημαντικότερο βήμα ώστε να αποδοθεί σωστά τόσο η ίδια η γεωμετρία, όσο και να διαδοθούν κανονικά τα σεισμικά κύματα. Κατά κανόνα, η πολυπλοκότητα της γεωμετρίας οδηγεί σε πυκνό κάναβο πεπερασμένων διαφορών, ώστε να αποδοθούν με τον πιστότερο δυνατό τρόπο τα διάφορα στοιχεία που προσομοιώνονται. Στην περίπτωση της ωοειδούς διατομής σήραγγας, η διακριτοποίηση πρέπει να είναι αρκετά πυκνή ώστε να εμπεριέχει τα σημεία που συντελούν στη δημιουργία αυτού του σχήματος. Επίσης, για λόγους απομείωσης του υπολογιστικού κόστους, παρόλο που ο κάναβος στην περιοχή της σήραγγας καθώς και σε κοντινή απόσταση γύρω από αυτή είναι πυκνός, στο υπόλοιπο μοντέλο, όπου υπάρχει έδαφος, η διακριτοποίηση γίνεται πιο αραιή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η σήραγγα αποτελεί το βασικό στοιχείο της ανάλυσης και επομένως η εύρεση της συμπεριφοράς των στοιχείων κατά μήκος της διατομής της αποτελεί τον κύριο στόχο του συγκεκριμένου προβλήματος. Το περιβάλλον αυτής έδαφος είναι εξίσου σημαντικό, αφού οι μετακινήσεις που θα δημιουργηθούν σε αυτό λόγω της σεισμικής δόνησης θα μεταφερθούν στη σήραγγα. Ωστόσο, το έδαφος εκτός αυτής της περιοχής λειτουργεί πρωτίστως ως μέσο διάδοσης, άρα δεν υπάρχει η ανάγκη προσομοίωσής του με μεγάλη λεπτομέρεια.

Ένα δεύτερο ζήτημα που προκύπτει, είναι ο κάναβος να είναι αρκετά πυκνός ώστε να επιτρέπεται μέσα από αυτόν να αναπαραχθεί το μέγιστο μήκος κύματος της σεισμικής δράσης (Τσινίδης and Πιτιλάκης, 2011, FLAC Version, 2011). Κάθε σεισμός αποτελείται από πολλά μήκη κύματος. Για τα έργα πολιτικού μηχανικού, η μέγιστη συχνότητα που επιλέγεται έχει οριστεί στα 10 Hz. Η συχνότητα αυτή, σε συνδυασμό με την ταχύτητα διατμητικών κυμάτων, μέσω της παρακάτω σχέσης, δίνουν το ελάχιστο μήκος κύματος που διαδίδεται στην εδαφική στρώση μελέτης, το οποίο για την πρώτη εδαφική στρώση είναι τα 50 m.

$$L_u = V_s \cdot T_u \quad (3.2)$$

,όπου  $L_u$ : το μήκος κύματος,  $V_s$  η ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων για την εδαφική στρώση αναφοράς και  $T_u$  η περίοδος που αναφέρεται στη μέγιστη συχνότητα.

Όπως προτάθηκε από τους Kuhlemeyer and Lysmer, 1973, η μέγιστη απόσταση μεταξύ διαδοχικών κόμβων δίνεται από τη σχέση:

$$L_{max} = \frac{L_u}{10} \quad (3.3)$$

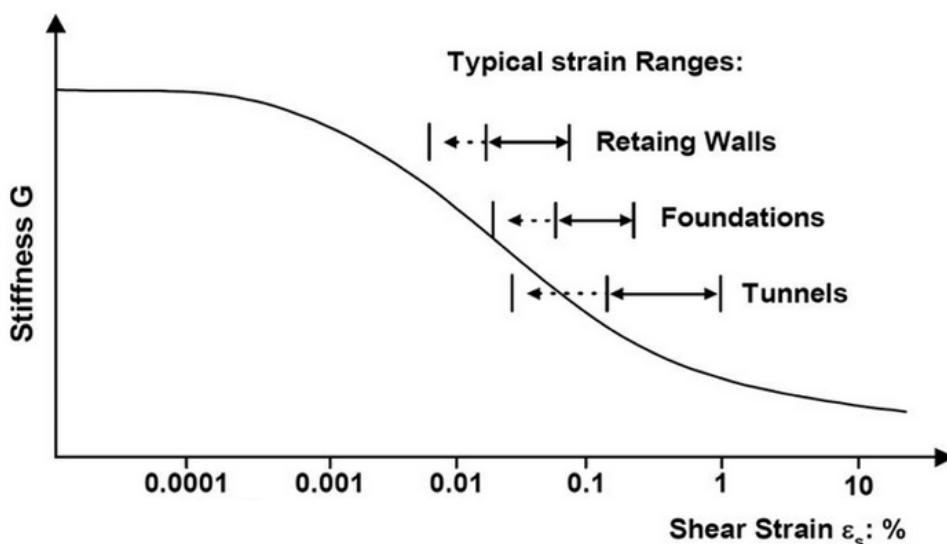
,δηλαδή απαιτούνται τουλάχιστον 10 ζώνες για να γίνει η διάδοση του επιθυμητού μήκους κύματος.

Για την Εδαφική Στρώση 1, στην οποία η ταχύτητα διατμητικών κυμάτων ορίστηκε στα 500 m/sec, το μέγιστο μήκος της επιφανειακής ζώνης υπολογίστηκε στα 5 m, ενώ για το Βραχώδες Υπόβαθρο, όπου η ταχύτητα διατμητικών κυμάτων είναι 800 m/sec, υπολογίστηκε στα 8m (οι τιμές των διατμητικών ταχυτήτων πάρθηκαν από τον πίνακα 3.1). Για το δεύτερο εδαφικό προφίλ, όπου η ταχύτητα διατμητικών κυμάτων έχει οριστεί να είναι τα 600 m/sec, άρα και το μήκος της επιφανειακής ζώνης μεγαλύτερο αυτού της πρώτης εδαφικής στρώσης, αποφασίστηκε ο κλίμακος να παραμείνει σταθερός.

### 3.2.4 Ιδιότητες υλικού

Το έδαφος, ως προς τη μηχανική συμπεριφορά του, είναι ένα υλικό ανελαστικό, ανισότροπο ενώ η συμπεριφορά του εξαρτάται από την προϊστορία φόρτισής του. Συγκριτικά με άλλα υλικά, όπως το σκυρόδεμα, φτάνει στα όρια της μετελαστικής του συμπεριφοράς πολύ πιο γρήγορα. Για πολύ μικρές παραμορφώσεις (της τάξης του  $10^{-5}$ ), που αντιστοιχούν σε μικρής έντασης σεισμικές διεγέρσεις, μπορεί να γίνει η παραδοχή πως προσεγγίζει τη γραμμικά ελαστική συμπεριφορά. Όταν ξεπεραστεί αυτό το όριο τιμών παραμόρφωσης, η συμπεριφορά του εδάφους αρχίζει να γίνεται μη γραμμικά ελαστική, ενώ για ακόμα μεγαλύτερες τιμές παραμόρφωσης αρχίζουν να εμφανίζονται, παράλληλα με τις ελαστικές, και πλαστικές παραμορφώσεις (έννοια γνωστή και ως πλαστικοποίηση του εδάφους). Επομένως, η μηχανική συμπεριφορά του εδάφους, κατά κύριο λόγο, δεν ανταποκρίνεται στη θεωρία της γραμμικής ισότροπης ελαστικότητας, γεγονός που αποτυπώνεται και στο διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης, όπου για πραγματικά εδάφη, δημιουργείται καμπύλη γραμμής, επιδεικνύοντας πως όσο μεγαλώνει η παραμόρφωση, τόσο μεταβάλλεται το μέτρο ελαστικότητας, που υπολογίζεται από την κλίση της καμπύλης αυτής. Έτσι, γίνεται κατανοητό πως τα μέτρα ελαστικότητας και διάτμησης αλ-

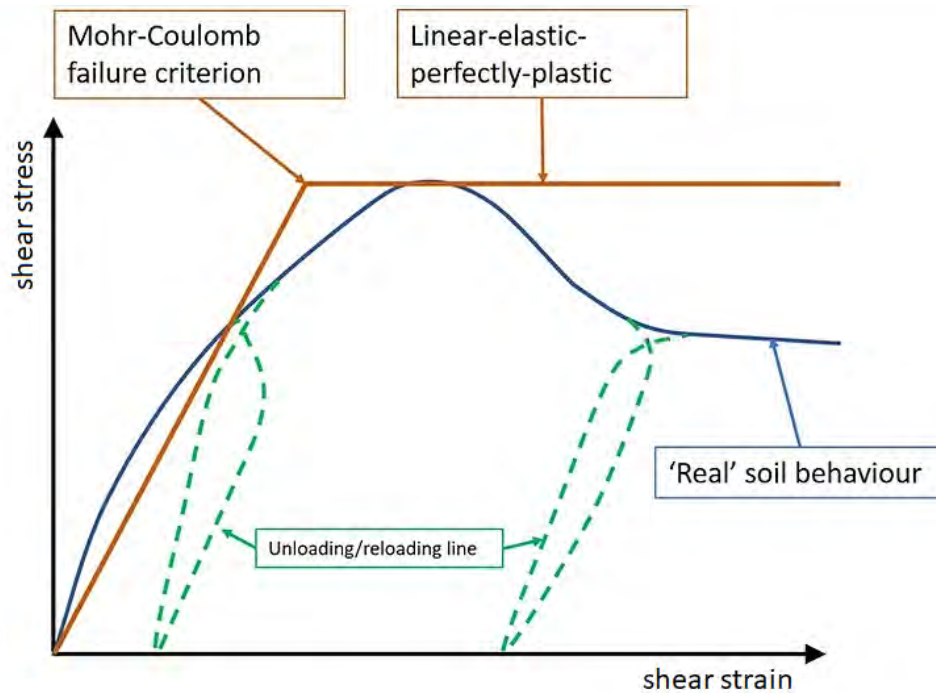
λάζουν τιμή βάσει της παραμόρφωσης που υφίστανται. Η μετελαστική αυτή συμπεριφορά μπορεί να εκφραστεί μέσω των καμπυλών G-γ-D, οι οποίες περιγράφουν τη μεταβολή του μέτρου διάτμησης (G) και της απόσβεσης (D), συναρτήσει των τιμών διατμητικής παραμόρφωσης (γ).



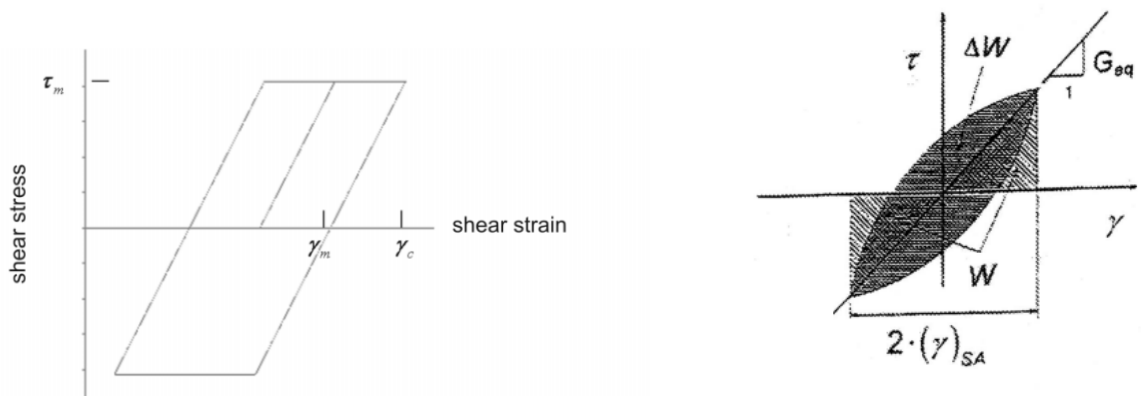
Εικόνα 3.10: Εύρος παραμορφώσεων συγκεκριμένων κατασκευών, καθώς και πτώση της δυσκαμψίας για παραμορφώσεις μεγαλύτερες του  $10^{-5}$ , Mair, 1993

Βάσει των παραπάνω, το έδαφος, όπου είναι εγκιβωτισμένη η σήραγγα, επιλέγεται να προσομοιωθεί προσεγγιστικά ως ελαστοπλαστικό υλικό που ακολουθεί το κριτήριο αστοχίας Mohr Coulomb. Το μοντέλο αυτό χαρακτηρίζεται ως γραμμικά ελαστικό-τέλεια πλαστικό, όπου η σχέση τάσης-παραμόρφωσης αναπτύσσεται αρχικά γραμμικά μέχρι ένα σημείο διαρροής, ενώ από εκεί και πέρα, παρόλο που η τάση παραμένει σταθερή, η παραμόρφωση αυξάνεται, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.11.

Το έδαφος κατά τη δυναμική του φόρτιση παρουσιάζει απώλεια ενέργειας, αφού η αύξηση της παραμόρφωσης συνεπάγεται την μείωση της τιμής του αρχικού μέτρου διάτμησης ( $G_{max}$ ) και επομένως και της ταχύτητας διάδοσης των διατμητικών κυμάτων ( $V_s$ ). Αυτή η απώλεια ενέργειας εκφράζεται από την επιφάνεια που περικλείει ο βρόγχος υστέρησης, σε ένα διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης, όπου για το μοντέλο Mohr-Coulomb ακολουθεί τα στάδια φόρτισης, αποφόρτισης, επαναφόρτισης κ.ο.κ., όπως απεικονίζεται στην εικόνα 3.12. Ωστόσο, με το παραπάνω μοντέλο, δεν είναι δυνατή η προσομοίωση της πραγματικής απόσβεσης του εδάφους υπό το καθεστώς δυναμικής φόρτισης



Εικόνα 3.11: Η σχέση τάσης-παραμόρφωσης σύμφωνα με το μοντέλο Mohr-Coulomb και με την πραγματική συμπεριφορά του εδάφους, “The Si-Eng”, 2021

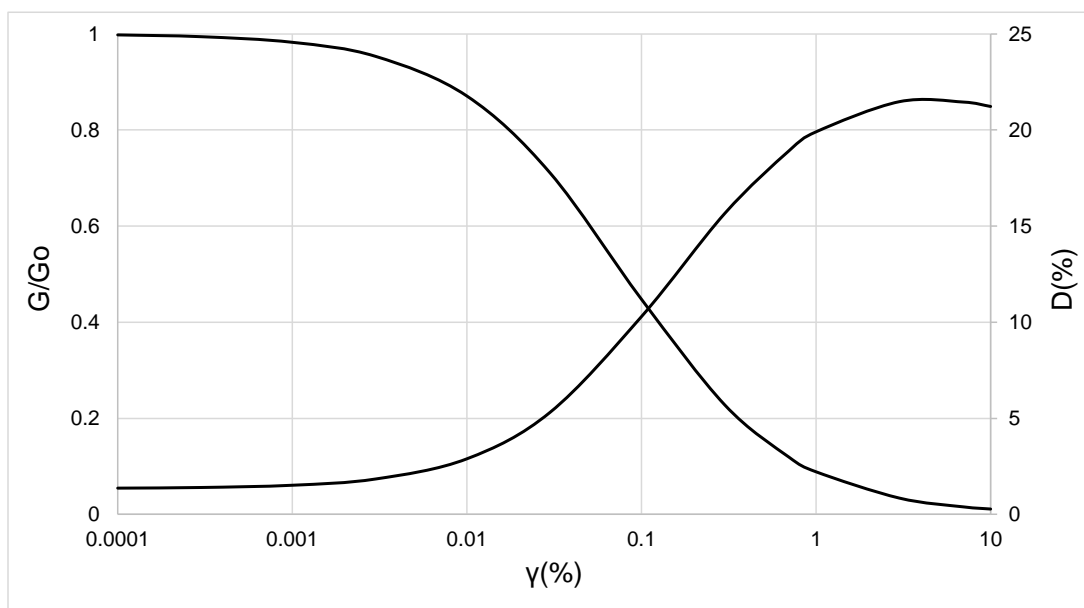


Εικόνα 3.12: Βρόγχος υστέρησης σύμφωνα με το μοντέλο Mohr-Coulomb, όπου περιγράφεται μία διαδικασία συνεχούς φόρτισης-αποφόρτισης-επαναφόρτισης, σύμφωνα με τον γραμμικά ελαστικό-τέλεια πλαστικό χαρακτήρα του μοντέλου, FLAC Version, 2011

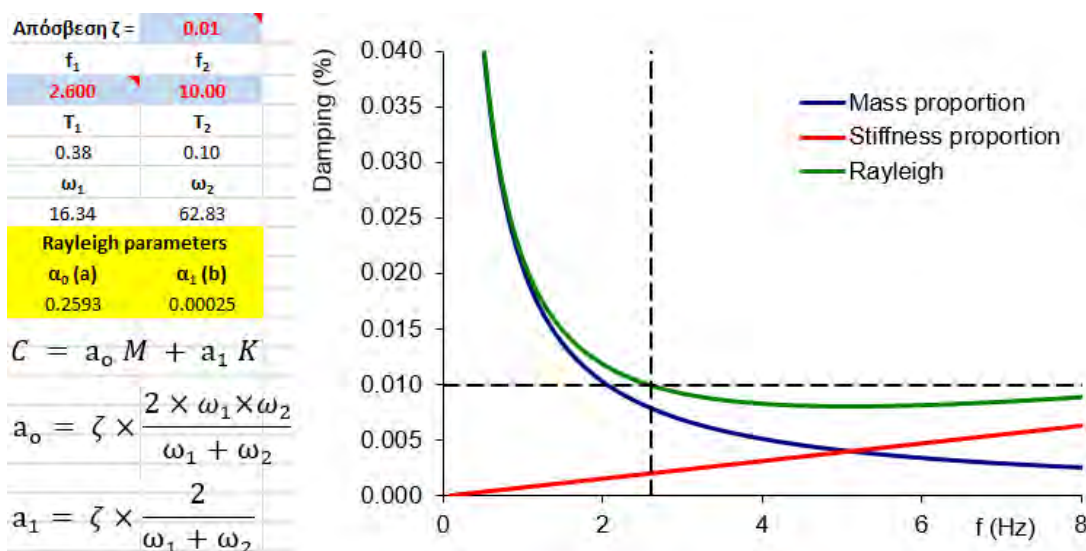
Εικόνα 3.13: Βρόγχος υστέρησης χωρίς περιοχές πλαστικοποίησης, το εμβαδόν του οποίου εκφράζει την απώλεια ενέργειας, ενώ η κλίση του το μέτρο διάτμησης, Καλλιόγλου, 2022

(εικόνα 3.13). Για παράδειγμα, οι απομακρυσμένες από τη σήραγγα περιοχές δίνουν ως αποτέλεσμα της φόρτισης σχεδόν μηδενική πλαστικοποίηση άρα και μηδενικό βρόγχο, με αποτέλεσμα αυτή η συμπεριφορά να μην ανταποκρίνεται στο φυσικό πρόβλημα. Αυτό συμβαίνει διότι το καταστατικό μοντέλο με κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb εμπεριέχει απόσβεση αλλά όχι αρκετή για να προσομοιώσει επαρκώς την υστερητική συμπεριφορά του εδάφους για μικρές παραμορφώσεις, σε ανακυκλική φόρτιση. Επομένως, για τη δυναμική ανάλυση, το μοντέλο αυτό συνδυάζεται με δύο ειδών αποσβέσεις, την υστερητική και την Rayleigh, ώστε να εκφράσει την απώλεια ενέργειας σε όλα τα σημεία του εδάφους, λόγω της δυναμικής φόρτισης που προκαλείται από το σεισμό. Η απόσβεση αυτή οφείλεται σε τριβές, αντιστάσεις του αέρα, ανελαστικές παραμορφώσεις κ.ο.κ. Σε φυσικούς σχηματισμούς, όπως το έδαφος και ο βράχος, η απόσβεση που επικρατεί είναι κατά κύριο λόγο η υστερητική. Για την εισαγωγή της στο προσομοίωμα, τα χαρακτηριστικά της επιλέγονται μέσω του μοντέλου sig3 που είναι ενσωματωμένο στον κώδικα FLAC2D και βαθμονομούνται βάσει καμπυλών-στόχο, τύπου G-γ-D (εικόνα 3.14), που βρέθηκαν εργαστηριακά από τον Darendeli, 2001 για παρόμοια άργιλο με αυτή που μελετάται, με δείκτη πλαστικότητας  $PI=40\%$ . Στον κώδικα, ωστόσο, η απόσβεση αυτή οδηγεί σε πάρα πολύ μικρά ποσά ενέργειας για χαμηλά επίπεδα παραμόρφωσης λόγω ανακυκλικής φόρτισης, και επομένως η εισαγωγή πρόσθετης ποσότητας απόσβεσης Rayleigh, της τάξης του 1%, καθιστά την ανάλυση πιο ρεαλιστική. Επιπλέον, η χρήση της βελτιώνει τα αποτελέσματα των χρονοϊστοριών των επιταχύνσεων μειώνοντας τον υψίσυχο "θόρυβο" που δημιουργεί η υστερητική απόσβεση. Η απόσβεση Rayleigh υπολογίζεται συναρτήσει των μητρώων μάζας και δυσκαμψίας, ενώ το κάτω όριο συχνοτήτων που χρησιμοποιείται ορίζεται από την πρώτη συχνότητα συντονισμού της εδαφικής στήλης και είναι τα 2.6 Hz, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.15.

Παρόλο που το ανώτερο στρώμα εδάφους προσομοιώνεται ως ελαστοπλαστικό, το βραχώδες υπόβαθρο θεωρείται ότι συμπεριφέρεται ελαστικά. Εξίσου ελαστική θεωρείται και η συμπεριφορά της σήραγγας, με την επένδυσή της να προσομοιώνεται έχοντας ιδιότητες σκυροδέματος.



Εικόνα 3.14: Καμπύλες  $G$ - $\gamma$ - $D$  όπου απεικονίζεται η πτώση της δυσκαμψίας και η αύξηση της απόσβεσης όσο προχωράει η παραμόρφωση, όπως σχεδιάστηκαν από τον Darendeli, 2001



Εικόνα 3.15: Καμπύλες έκφρασης της απόσβεσης Rayleigh, όπως σχεδιάστηκαν σε υπολογιστικό φύλλο excel

### 3.2.5 Ανακλάσεις στα όρια του προσομοιώματος

Για τα τρία πρώτα στατικά βήματα ανάλυσης, τα όρια του προσομοιώματος εμπεριέχουν μόνο δεσμεύσεις μεταφορικών βαθμών ελευθερίας, τα πλευρικά όρια ως προς την  $x$ -διεύθυνση και το κάτω όριο ως προς τις  $x$  και  $y$ -διευθύνσεις. Στη δυναμική ανάλυση,



τα όρια αυτά προκαλούν σε κάποιο βαθμό, ανάλογα με το μέγεθος του προσομοιώματος, ανακλάσεις σεισμικών κυμάτων που στην πραγματικότητα δεν υπάρχουν. Δηλαδή, όταν τα σεισμικά κύματα φτάνουν στα τεχνητά όρια, ανακλώνται πίσω προς τη σήραγγα, δημιουργώντας ένα φαινόμενο το οποίο δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα, όπου τα όρια δεν υπάρχουν. Για την αποφυγή αυτού του προβλήματος, χρησιμοποιούνται ειδικά όρια τα οποία απορροφούν το μεγαλύτερο μέρος των σεισμικών κυμάτων και μειώνουν στο ελάχιστο τις ανακλάσεις αυτές. Στα πλευρικά σύνορα του προσομοιώματος τοποθετούνται τα όρια "ελεύθερου πεδίου" (free-field boundaries), ενώ στη βάση του προσομοιώματος χρησιμοποιείται το απορροφητικό όριο (quiet boundary), το οποίο αποτελεί ένα ελαστικό βραχώδες υπόβαθρο (compliant-base), απορροφώντας μέρος της σεισμικής ενέργειας. Η διαφοροποίηση αυτή έγκειται στο γεγονός ότι στη βάση του αριθμητικού προσομοιώματος εισάγεται η σεισμική δόνηση, και επομένως είναι αναγκαίο το όριο που θα επιλεγεί να επιτρέπει τη διαδικασία αυτή. Ωστόσο, λόγω της χρήσης του ορίου αυτού, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι εξαγόμενες του σεισμού επιταχύνσεις, αλλά πρέπει πρώτα να μετατραπούν σε χρονοϊστορίες ταχυτήτων και στη συνέχεια μέσω του παρακάτω τύπου σε χρονοϊστορίες τάσεων, οι οποίες θα εισαχθούν τελικά στο μοντέλο.

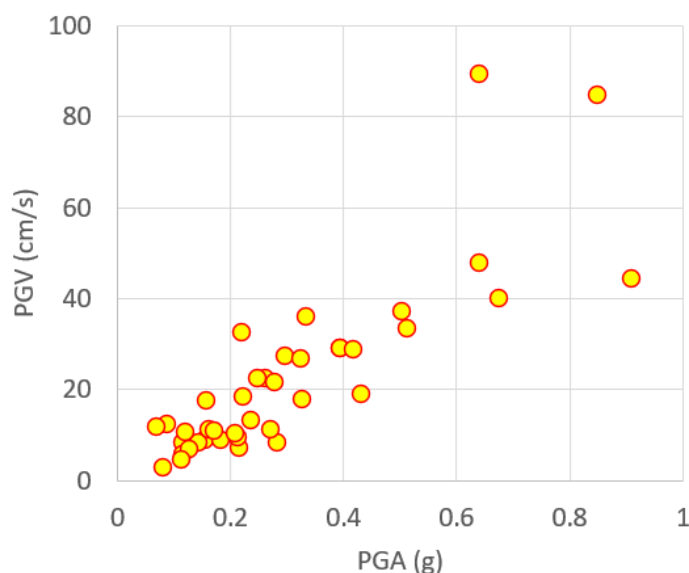
$$\sigma_s = 2 \cdot (\rho \cdot C_s) \cdot V_s \quad (3.4)$$

,όπου  $\rho$ : η πυκνότητα,  $C_s$ : η ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων στο βραχώδες υπόβαθρο και  $V_s$ : η χρονοϊστορία ταχύτητας της σεισμικής διέγερσης που επιλέγεται.

### 3.3 Επιλογή σεισμικών διεγέρσεων και δυναμική ανάλυση

Για τη σεισμική ανάλυση των εξεταζόμενων συστημάτων είναι αναγκαία η επιλογή μιας ομάδας σεισμικών διεγέρσεων. Η εύρεση της τρωτότητας προϋποθέτει την ύπαρξη μεγάλου αριθμού σεισμών, διαφόρων εντάσεων και συχνοτήτων, που είναι πιθανό να συμβούν στην περιοχή μελέτης. Επομένως, επιλέχθηκε ο αριθμός τους να φτάνει τους 40 ενώ τα χαρακτηριστικά τους να δημιουργούν ένα ευρύ φάσμα ως προς τη σχέση μέγιστων εδαφικών επιταχύνσεων και μέγιστων εδαφικών ταχυτήτων, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.16. Οι τιμές του διαγράμματος αυτού, είναι αυτές των δύο τελευταίων στηλών του πίνακα 3.3. Οι σεισμοί ποιοτικά προέρχονται από διάφορες σειсмоγενείς περιοχές εντός

και εκτός του ελλαδικού χώρου, ωστόσο επιλέχθηκαν με γνώμονα να είναι συμβατές με καταγραφές που αφορούν σε σκληρούς εδαφικούς σχηματισμούς - βράχο. Στον πίνακα 3.3, φαίνονται τα βασικά γνωρίσματα των σεισμικών αυτών δονήσεων, όπως η ημερομηνία καταγραφής, η επίσημη ονομασία της καταγραφής, η χώρα της καταγραφής, η σεισμική ένταση, η επικεντρική απόσταση, το είδος του ρήγματος από όπου προκλήθηκαν οι σεισμικές διεγέρσεις (κανονικό, ανάστροφο, οριζόντιας μετατόπισης, πλάγιο), η μέση ταχύτητα διατμητικών κυμάτων των πρώτων 30 μέτρων βάρους από την επιφάνεια του εδάφους, το όνομα της δόνησης στη βάση δεδομένων από όπου πάρθηκε, καθώς και οι μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις και ταχύτητες που καταγράφηκαν στην επιφάνεια του εδάφους κατά τη διάρκεια των σεισμικών διεγέρσεων. Κάθε σεισμός εισήχθη ως μεμο-



Εικόνα 3.16: Διάγραμμα μέγιστων εδαφικών επιταχύνσεων  $PGA$  και μέγιστων εδαφικών ταχυτήτων  $PGV$  των σεισμών που επιλέχθηκαν για τις δυναμικές αναλύσεις

νωμένο γεγονός σε κάθε μια από τις αναλύσεις που έγιναν. Η κάθε δυναμική ανάλυση ακολούθησε τις στατικές αναλύσεις που προπορεύτηκαν ώστε να προσομοιωθούν οι συνθήκες που επικρατούν στο έδαφος πριν, κατά τη διάρκεια και μετά την εκσκαφή όσο το δυνατόν καλύτερα.

Πίνακας 3.3: Οι σεισμικές διεγέρσεις που επιλέχθηκαν

Date	Earthquake name	Country	Mw	R(km)	Preferred FS	$V_{s30}(m/s)$	Database Code	PGA	PGV
25/07/2003	N Miyagi Prefecture	Japan	6.1	32.00	Reverse	1432.7	C&F 277	0.284	8.388
23/10/2004	Mid Niigata Prefecture	Japan	6.6	36.00	Reverse	626	C&F 324	0.396	29.163
12/06/2005	Anza	USA	5.2	11.50	Strike-Slip	724.9	C&F 1008	0.216	7.266
22/12/2003	San Simeon	USA	6.4	61.50	Reverse	712.8	C&F 1017	0.157	8.904
16/09/1978	Tabas	Iran	7.35	57.00	Oblique	712	ESMD 60	0.848	84.795
10/06/1987	Kalamata(Aftershock)	Greece	5.36	17.00	Oblique	778	ESMD 126	0.082	2.740
13/05/1995	Kozani	Greece	6.61	17.00	Normal	1000	ESMD 171	0.183	8.999
07/09/1999	Ano Liosia	Greece	6.04	17.00	Normal	934	ESMD 335	0.115	8.330
15/04/1979	Montenegro	Serbia	6.9	65.00	Thrust	875	ISESD 225	0.236	13.096
25/10/1984	Kremidia(Aftershock)	Greece	5.0	17.00		1530	ISESD 576	0.143	8.228
17/05/1995	Kozani(Aftershock)	Greece	5.3	16.00	Normal	623	ISESD 1210	0.396	29.163
13/10/1997	Kalamata	Greece	6.4	48.00	Thrust	1530	ISESD 1579	0.116	5.689
06/05/1976	Fruili	Italy	6.4	21.70	Reverse	1029.6	ITACA 16	0.129	6.756
15/09/1976	Fruili(Aftershock)	Italy	5.9	8.50	Reverse	901.0	ITACA 116	0.263	22.367
23/11/1980	Irpinia	Italy	6.9	28.30	Normal	976.2	ITACA 180	0.114	4.660
14/10/1997	Umbria Marche (Aftershock)	Italy	5.6	20.00	Normal	681.2	ITACA 491	0.088	12.235
09/09/1998	App.Lucano	Italy	5.6	6.60	Normal	603.2	ITACA 613	0.164	11.095
06/04/2009	L Aquila Mainshock	Italy	6.3	4.40	Normal	684.8	ITACA 857	0.213	9.527
09/02/1971	San Fernando	USA	6.61	20.04	Reverse	602.1	NGA 71	0.417	28.781
28/11/1974	Hollister-03	USA	5.14	11.08	Strike-Slip	1428.1	NGA 98	0.272	11.085
06/08/1979	Coyote Lake	USA	5.74	4.37	Strike-Slip	663.3	NGA 150	0.278	21.439
02/05/1983	Coalinga-01		6.36	33.52	Reverse	684.94	NGA 369	0.224	18.389
24/04/1984	Morgan Hill	USA	6.19	36.34	Strike-Slip	663.3	NGA 459	0.334	36.029
23/12/1985	Nahanni	Canada	6.76	6.8	Reverse	659.6	NGA 495	0.676	40.038
14/11/1986	Taiwan Smart1(45)	Taiwan	7.3	71.35	Reverse	659.6	NGA 572	0.172	10.892
07/02/1987	Baja California		5.5	3.69	Strike-Slip	659.6	NGA 585	0.911	44.331
18/10/1989	Loma Prieta	USA	6.93	35.47	Reverse-Oblique	663.3	NGA 769	0.121	10.720
18/10/1989	Loma Prieta	USA	6.93	16.34	Reverse-Oblique	659.6	NGA 810	0.432	18.902
25/04/1992	Cape Mendocino		7.01	4.51	Reverse	712.82	NGA 828	0.641	89.204
28/06/1992	Landers		7.28	44.02	Strike-Slip	684.94	NGA 879	0.513	33.245
17/01/1994	Northridge-01	USA	6.69	25.42	Reverse	971.4	NGA 994	0.297	27.184
17/01/1994	Northridge-01	USA	6.69	20.36	Reverse	2016.13	NGA 1050	0.325	26.704
16/01/1995	Kobe	Japan	6.9	8.7	Strike-Slip	609.0	NGA 1111	0.503	31.164
20/09/1999	Chi-Chi	Taiwan	7.62	15.42	Reverse-Oblique	624.85	NGA 1507	0.641	47.657
28/06/1991	Sierra Madre		5.61	6.46	Reverse	821.69	NGA 1645	0.209	10.287
16//10/1999	Hector Mine		7.13	26.53	Strike-Slip	684.94	NGA 1787	0.248	22.350
20/09/1999	Chi-Chi, Taiwan-03	Taiwan	6.2	18.5	Reverse	664.43	NGA 2658	0.326	17.706
17/08/1999	Izmit	Turkey	7.6	42.77	Strike-Slip	700.9	T-NSMP 1105	0.158	17.573
17/08/1999	Izmit	Turkey	7.6	3.40	Strike-Slip	827.3	T-NSMP 1109	0.221	32.377
12/11/1999	Duzce 1	Turkey	7.1	15.60	Strike-Slip	718.9	T-NSMP_1583	0.069	11.653

## 4 Παραμετρική αριθμητική διερεύνηση και εκτίμηση της τρωτότητας

### 4.1 Ενδεικτικά αποτελέσματα

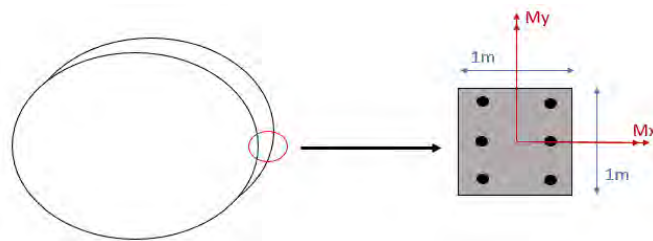
Από τις αναλύσεις που έγιναν προέκυψαν αποτελέσματα χρονοϊστοριών επιταχύνσεων, ταχυτήτων καθώς και οριζόντων και κατακόρυφων μετακινήσεων, σε διάφορα σημεία του προσομοιώματος, όπως πάνω στη διατομή της σήραγγας, στο έδαφος στο ίδιο βάθος με τη σήραγγα και μακρινή απόσταση από αυτή καθώς και στην επιφάνεια του εδάφους και μακριά της. Επίσης, υπολογίστηκαν τα εντατικά μεγέθη και πιο συγκεκριμένα τα αξονικά φορτία και οι ροπές σε διάφορες θέσεις πάνω στην επένδυση της σήραγγας, ώστε να δοθεί μία καλύτερη εικόνα της συμπεριφοράς της. Ως γενική παρατήρηση για την πλειοψηφία των αναλύσεων, παρόλο που η επένδυση της σήραγγας, η οποία είναι κατασκευασμένη από σκυρόδεμα, έχει θεωρηθεί απλοποιητικά, για τη διευκόλυνση των αναλύσεων, ότι συμπεριφέρεται γραμμικά και ελαστικά στο προσομοίωμα, στα αποτελέσματα παρατηρούνται και μόνιμες παραμορφώσεις και μετακινήσεις σε αυτή. Η παραδοχή για τη συμπεριφορά της σήραγγας ενδέχεται να επηρεάσει τα αποτελέσματα σε κάποιο βαθμό, διότι δεν περιγράφει επακριβώς την πραγματική συμπεριφορά της, η οποία είναι μη γραμμική και εμφανίζει ελαστοπλαστική συμπεριφορά από κάποιο βαθμό παραμόρφωσης και άνω. Όσον αφορά τις μόνιμες παραμορφώσεις και μετακινήσεις που εμφανίζονται, αυτές οφείλονται κυρίως σε πλαστικοποίηση του εδάφους γύρω από τη διατομή, η οποία προκύπτει από την ελαστοπλαστική συμπεριφορά του εδάφους κατά τη δυναμική φόρτιση. Οι πλαστικοποιήσεις αυτές μεταβάλλουν το τασικό φορτίο που επικρατεί γύρω από τη διατομή, διαφοροποιώντας τη στήριξη που παρέχει το έδαφος στη σήραγγα. Επιπρόσθετα παρατηρείται πως οι μόνιμες παραμορφώσεις είναι σχετικά

μεγάλες, γεγονός που οφείλεται στο μεγάλο μέγεθος καθώς και στον εύκαμπτο χαρακτήρα της σήραγγας.

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια ενδεικτικά αποτελέσματα από δύο αναλύσεις με σεισμικές διεγέρσεις διαφορετικών εντάσεων. Συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα αφορούν την ανάλυση με την καταγραφή N Miyagi Prefecture και την ανάλυση με την καταγραφή Tabas. Τα αποτελέσματα του κάθε σεισμού παρουσιάζονται για καθεμία από τις δύο εδαφικές στρώσεις που επιλέχθηκαν. Η σεισμική διέγερση N Miyagi Prefecture είναι μέσης έντασης με τιμή μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA) τα 0.28 g, ενώ η σεισμική δόνηση Tabas αποτελεί μια από τις ισχυρότερες που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις, με τιμή μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης τα 0.85 g. Τα χαρακτηριστικά των παραπάνω σεισμών δίνονται αναλυτικότερα στον πίνακα 3.3. Τα αποτελέσματα αφορούν χρονοϊστορίες επιτάχυνσης, ταχύτητας, οριζόντιας και κατακόρυφης μετατόπισης στη στέψη της σήραγγας (εικόνα 4.1) καθώς και εντατικών μεγεθών, δηλαδή αξονικού φορτίου και ροπών στην διεύθυνση που αφορά το είδος της ανάλυσης (εικόνα 4.2), σε τυχαίο σημείο πάνω στη διατομή της σήραγγας (εικόνα 4.1).



Εικόνα 4.1: Σημεία υπολογισμού των χρονοϊστοριών από τις δυναμικές αναλύσεις

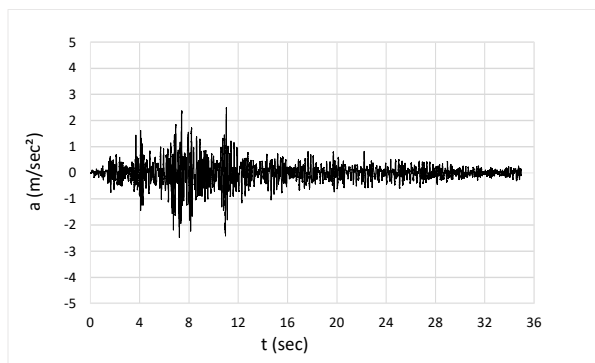


Εικόνα 4.2: Απεικόνιση της τρισδιάστατης μορφής του τμήματος της σήραγγας καθώς και τμήματος της διατομής με τις διευθύνσεις των ροπών που προκύπτουν στα αποτελέσματα.

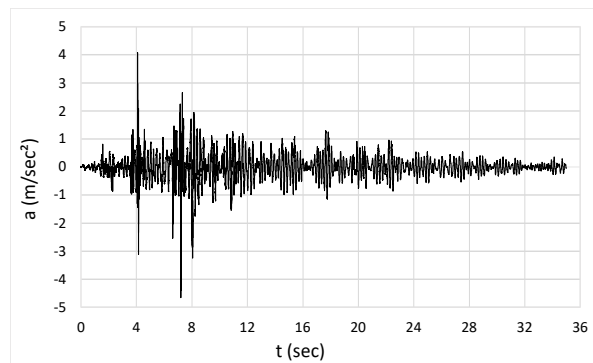
Στην εικόνα 4.2 αποτυπώνεται ένα τριδιάστατο σκαρίφημα της διατομής που αναλύεται καθώς και ένα διδιάστατο τμήμα της διατομής με τις δύο ροπές στις δύο διαφορετικές διευθύνσεις που ασκούνται. Η ροπή που είναι σημαντική για τις αναλύσεις που έγιναν είναι η οριζόντια  $M_x$ .

### 4.1.1 Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης

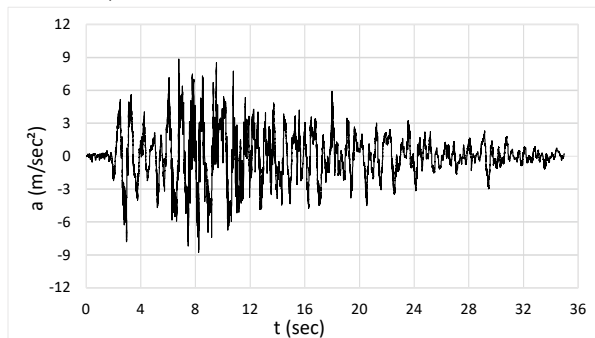
Αρχικά, στις εικόνες 4.3, 4.4, 4.5 και 4.6 παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες επιτάχυνσης για τους δύο σεισμούς σε κάθε ένα από τα δύο εξεταζόμενα εδάφη, όπως προέκυψαν από τις δυναμικές αναλύσεις. Όσον αφορά τις χρονοϊστορίες αυτές, παρατηρείται ότι



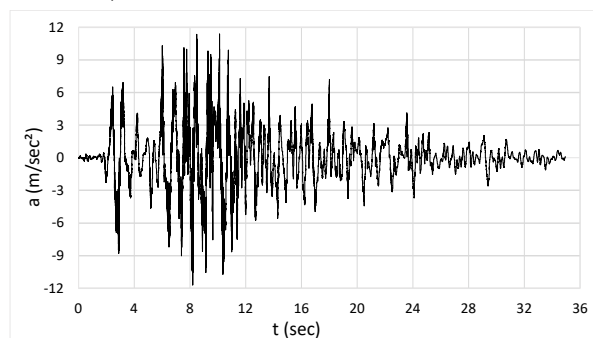
Εικόνα 4.3: Χρονοϊστορία επιτάχυνσης σημείου πάνω στη στέψη της σήραγγας (σεισμός N Miyagi Prefecture - 1η εδαφική στρώση)



Εικόνα 4.4: Χρονοϊστορία επιτάχυνσης σημείου πάνω στη στέψη της σήραγγας (σεισμός N Miyagi Prefecture - 2η εδαφική στρώση)



Εικόνα 4.5: Χρονοϊστορία επιτάχυνσης σημείου πάνω στη στέψη της σήραγγας (σεισμός Tabas - 1η εδαφική στρώση)



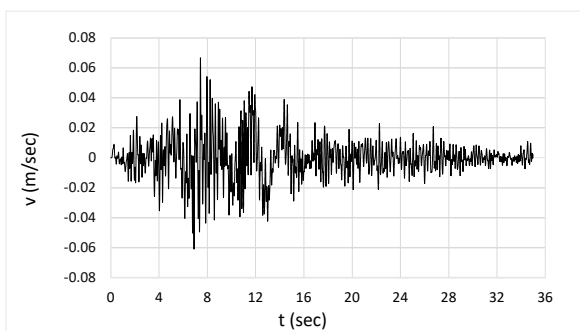
Εικόνα 4.6: Χρονοϊστορία επιτάχυνσης σημείου πάνω στη στέψη της σήραγγας (σεισμός Tabas - 2η εδαφική στρώση)

η μέγιστη τιμή επιτάχυνσης που εμφανίζεται στο σημείο της στέψης της σήραγγας για τον σεισμό N Miyagi Prefecture στο 1ο έδαφος είναι περίπου τα  $2.6 \text{ m/sec}^2$  (εικόνα 4.3), για τον ίδιο σεισμό στο έδαφος 2 είναι τα  $4.7 \text{ m/sec}^2$  (εικόνα 4.4), για το σεισμό Tabas στο 1ο έδαφος είναι τα  $9 \text{ m/sec}^2$ , ενώ για τον ίδιο σεισμό στο 2ο έδαφος είναι τα σχεδόν  $12 \text{ m/sec}^2$ . Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα αρχικά μεταξύ των δύο διαφορετικών σεισμικών δονήσεων, οι μέγιστες επιταχύνσεις για τον σεισμό Tabas είναι πολύ μεγαλύτερες των αντίστοιχων του σεισμού N Miyagi Prefecture, όπως αναμένεται λόγω

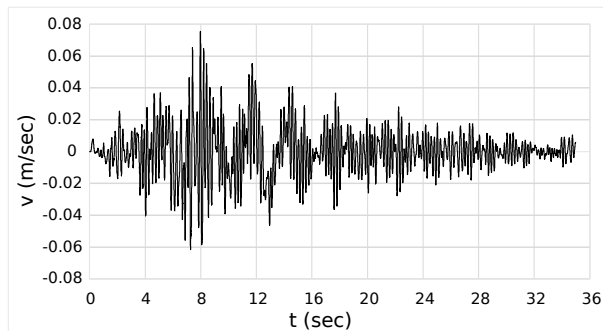
της πολύ μεγαλύτερης ισχύος του. Σε ότι αφορά την επιρροή του εδάφους στην υπολογιζόμενη επιτάχυνση, παρατηρείται ότι οι μέγιστες τιμές στο 2ο έδαφος είναι μεγαλύτερες αυτών του 1ου και στις δύο περιπτώσεις.

#### 4.1.2 Χρονοϊστορίες ταχύτητας

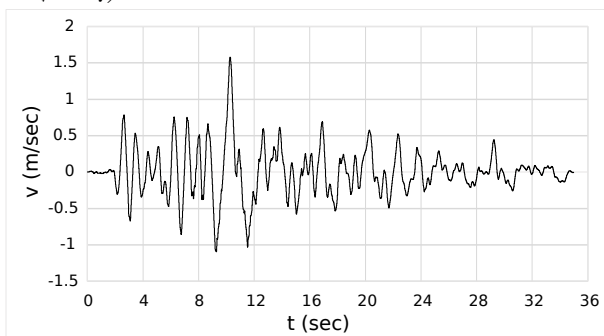
Στις εικόνες 4.7, 4.8, 4.9, 4.10 απεικονίζονται οι χρονοϊστορίες ταχυτήτων στη στέψη της σήραγγας για τις 4 περιπτώσεις που μελετώνται. Στην εικόνα 4.7 διακρίνεται πως η



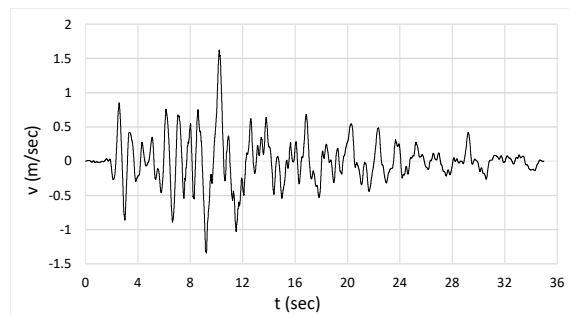
Εικόνα 4.7: Χρονοϊστορία ταχύτητας σημείου πάνω στη στέψη της σήραγγας (σεισμός N Miyagi Prefecture - 1η εδαφική στρώση)



Εικόνα 4.8: Χρονοϊστορία ταχύτητας σημείου πάνω στη στέψη της σήραγγας (σεισμός N Miyagi Prefecture - 2η εδαφική στρώση)



Εικόνα 4.9: Χρονοϊστορία ταχύτητας σημείου πάνω στη στέψη της σήραγγας (σεισμός Tabas - 1η εδαφική στρώση)



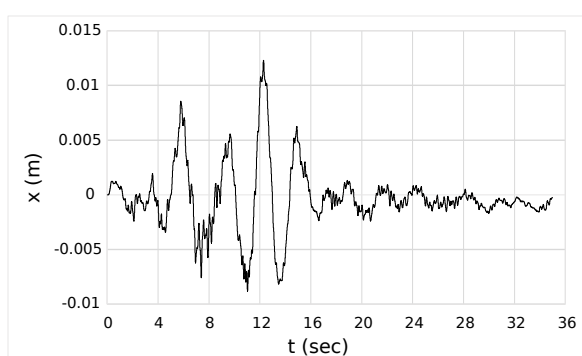
Εικόνα 4.10: Χρονοϊστορία ταχύτητας σημείου πάνω στη στέψη της σήραγγας (σεισμός Tabas - 2η εδαφική στρώση)

μέγιστη τιμή ταχύτητας κατά τον σεισμό N Miyagi Prefecture στην 1η εδαφική στρώση είναι τα 0.07 m/sec, ενώ παρόμοια είναι και η τιμή για τον ίδιο σεισμό στη 2η εδαφική στρώση, η οποία φτάνει σχεδόν τα 0.078 m/sec, (εικόνα 4.8). Όσον αφορά το σεισμό Tabas, στην 1η εδαφική στρώση καταγράφεται η μέγιστη τιμή ταχύτητας στη στέψη ίση με 1.6 m/sec (εικόνα 4.9), ενώ στη 2η εδαφική στρώση φτάνει τα 1.7 m/sec (εικόνα 4.10).

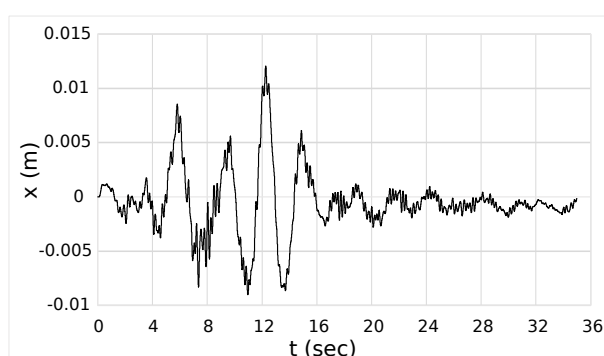
Η διαφοροποίηση των μεγίστων τιμών των ταχυτήτων στη στέψη της σήραγγας για τους δύο σεισμούς είναι εξαιρετικά μεγάλη. Ωστόσο, οι τιμές αυτές αλλάζουν ελάχιστα από το ένα έδαφος στο άλλο, με αυτές στο 2ο έδαφος να τείνουν να είναι λίγο μεγαλύτερες αυτών στο 1ο έδαφος.

### 4.1.3 Χρονοϊστορίες οριζόντιας μετακίνησης

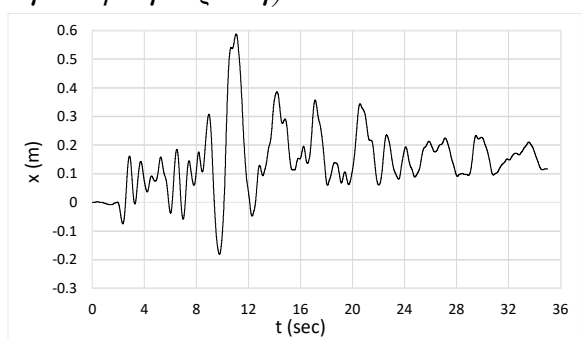
Στις εικόνες 4.11, 4.12, 4.13, 4.14 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των χρονοϊστοριών οριζόντιας μετακίνησης για τις εξεταζόμενες περιπτώσεις. Ο σεισμός N



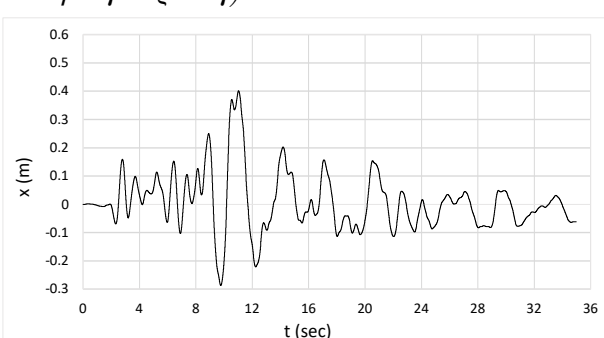
Εικόνα 4.11: Χρονοϊστορία οριζόντιας μετακίνησης σημείου πάνω στη στέψη της σήραγγας (σεισμός N Miyagi Prefecture - 1η εδαφική στρώση)



Εικόνα 4.12: Χρονοϊστορία οριζόντιας μετακίνησης σημείου πάνω στη στέψη της σήραγγας (σεισμός N Miyagi Prefecture - 2η εδαφική στρώση)



Εικόνα 4.13: Χρονοϊστορία οριζόντιας μετακίνησης σημείου πάνω στη στέψη της σήραγγας (σεισμός Tabas - 1η εδαφική στρώση)



Εικόνα 4.14: Χρονοϊστορία οριζόντιας μετακίνησης σημείου πάνω στη στέψη της σήραγγας (σεισμός Tabas - 2η εδαφική στρώση)

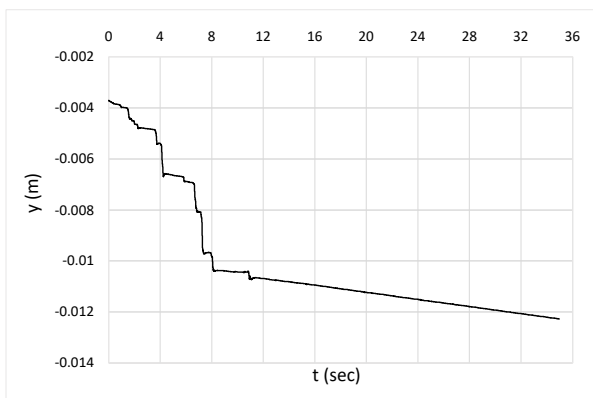
Miyagi Prefecture προκάλεσε μηδενική μόνιμη οριζόντια μετακίνηση, τόσο στην ανάλυση για το πρώτο έδαφος, όσο και στην ανάλυση για το δεύτερο, ενώ η μέγιστη μετακίνηση που παρατηρήθηκε καθόλη τη διάρκειά του ήταν τα 0.012 m και για τις δύο περιπτώσεις



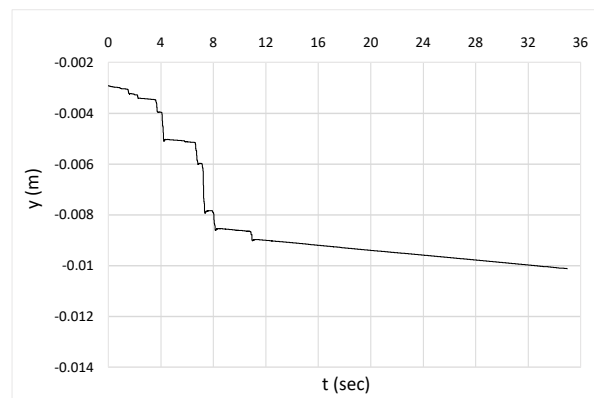
(εικόνες 4.11, 4.12). Αντίθετα, στον σεισμό Tabas υπήρξε μόνιμη οριζόντια μετακίνηση του σημείου στην στέψη της σήραγγας, η οποία στο πρώτο έδαφος υπολογίστηκε 0.11 m προς τα δεξιά ενώ στο δεύτερο 0.08 m προς τα αριστερά. Ωστόσο, η μέγιστη οριζόντια μετακίνηση κατά τη διάρκεια της ανάλυσης στο πρώτο έδαφος έφτασε τα 0.6 m και στο δεύτερο έδαφος τα 0.4 m (εικόνες 4.13, 4.14), τιμές πολύ μεγαλύτερες των μόνιμων. Η μόνιμη μετακίνηση στην επένδυση της σήραγγας εμφανίζεται για ισχυρές σεισμικές δονήσεις, όπως στην Tabas, ενώ στις ασθενείς είναι αμελητέα, όπως στη N Miyagi Prefecture. Επίσης, παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας μετακίνησης είναι μεγαλύτερο στον ισχυρότερο σεισμό καθώς και στο πρώτο έδαφος, τουλάχιστον για τον ισχυρό σεισμό, ενώ για τον πιο ασθενή το εύρος της δεν επηρεάζεται τόσο από μικρή διαφοροποίηση του είδους του εδάφους (πανομοιότυπες χρονοϊστορίες στις εικόνες 4.11, 4.12).

#### 4.1.4 Χρονοϊστορίες κατακόρυφης μετακίνησης

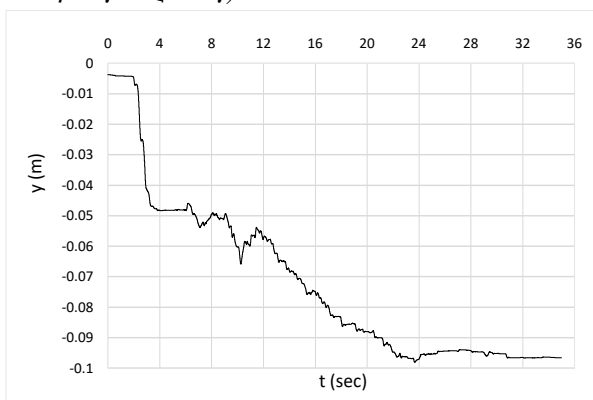
Οι χρονοϊστορίες κατακόρυφης μετακίνησης, που προέκυψαν από τις δυναμικές αναλύσεις, αποτυπώνονται στις εικόνες 4.15, 4.16, 4.17, 4.18. Όσον αφορά τον σεισμό N Miyagi Prefecture, στην πρώτη εδαφική στρώση υπάρχει μόνιμη κατακόρυφη μετακίνηση λίγο μεγαλύτερη των 0.012 m, ενώ για τον ίδιο σεισμό στην δεύτερη εδαφική στρώση, η μόνιμη κατακόρυφη μετακίνηση είναι σχεδόν 0.010 m. Στον σεισμό Tabas παρατηρείται εξίσου μόνιμη κατακόρυφη μετακίνηση, η οποία είναι 0.097 m στο πρώτο έδαφος και 0.042m στο δεύτερο έδαφος. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δύο σεισμών, η μόνιμη κατακόρυφη μετακίνηση είναι πολύ μεγαλύτερη για τον δεύτερο σεισμό, ο οποίος είναι πολύ ισχυρότερος του πρώτου. Όσον αφορά τα δύο εδάφη, είναι φανερό πως η κατακόρυφη μετακίνηση είναι πολύ μεγαλύτερη, έως και διπλάσια, για τον ισχυρό σεισμό Tabas, στο πρώτο έδαφος σε σχέση με το δεύτερο, ενώ για τον ασθενέστερο σεισμό, η μεταβολή στα δύο εδάφη είναι παρόμοια.



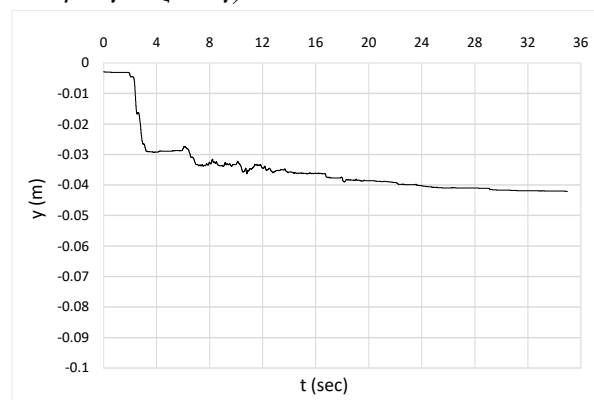
Εικόνα 4.15: Χρονοϊστορία κατακόρυφης μετακίνησης σημείου πάνω στη στέψη της σήραγγας (σεισμός N Miyagi Prefecture - 1η εδαφική στρώση)



Εικόνα 4.16: Χρονοϊστορία κατακόρυφης μετακίνησης σημείου πάνω στη στέψη της σήραγγας (σεισμός N Miyagi Prefecture - 2η εδαφική στρώση)



Εικόνα 4.17: Χρονοϊστορία κατακόρυφης μετακίνησης σημείου πάνω στη στέψη της σήραγγας (σεισμός Tabas - 1η εδαφική στρώση)

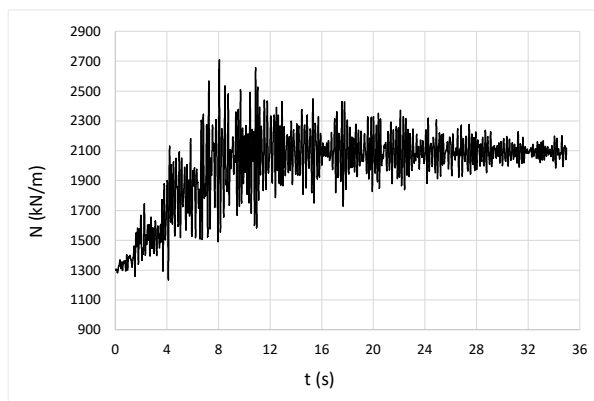


Εικόνα 4.18: Χρονοϊστορία κατακόρυφης μετακίνησης σημείου πάνω στη στέψη της σήραγγας (σεισμός Tabas - 2η εδαφική στρώση)

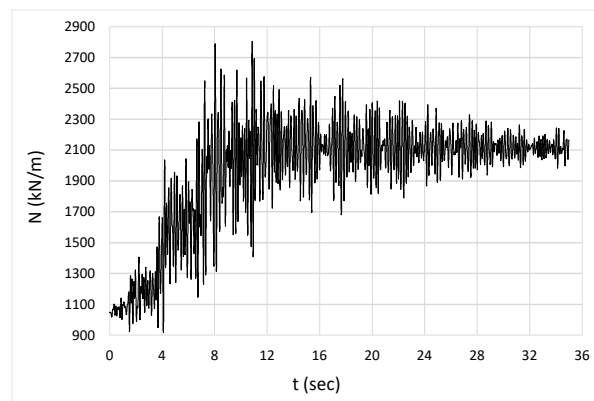
## 4.1.5 Εντατικά μεγέθη

### 4.1.5.1 Αξονικό φορτίο

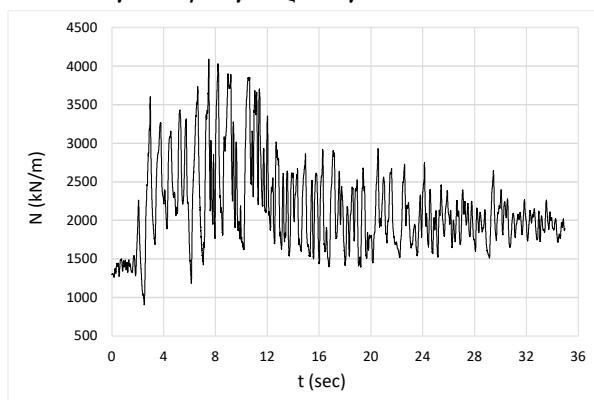
Τα διαγράμματα όπου απεικονίζεται η μεταβολή του αξονικού φορτίου αποτυπώνονται στις εικόνες 4.19, 4.20, 4.21, 4.22. Στον σεισμό N Miyagi Prefecture, για τον πρώτο τύπο εδάφους, η μόνιμη τιμή του αξονικού φορτίου αυξάνεται από τα 1300 kN/m, που είναι η αρχική, στα 2100 kN/m, που είναι η τελική, δηλαδή κατά 800 kN/m. Για τον ίδιο σεισμό στη δεύτερη εδαφική στρώση, υπάρχει αύξηση από την αρχική τιμή των 1050 kN/m στην τελική τιμή των 2100 kN/m, δηλαδή άνοδος του αξονικού φορτίου κατά 1050



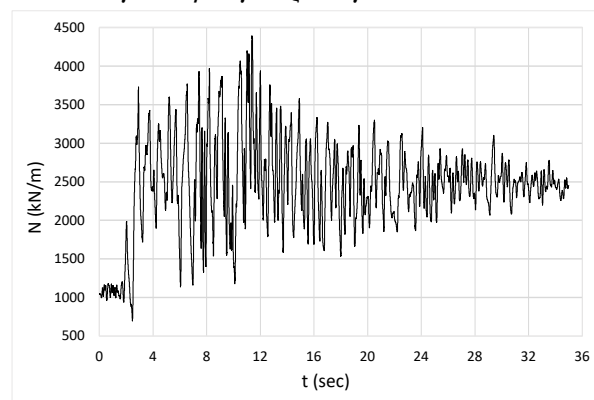
Εικόνα 4.19: Χρονοϊστορία του αξονικού φορτίου σε σημείο πάνω στη διατομή της σήραγγας για το σεισμό N Miyagi Prefecture - 1η εδαφική στρώση



Εικόνα 4.20: Χρονοϊστορία του αξονικού φορτίου σε σημείο πάνω στη διατομή της σήραγγας για το σεισμό N Miyagi Prefecture - 2η εδαφική στρώση



Εικόνα 4.21: Χρονοϊστορία του αξονικού φορτίου σε σημείο πάνω στη διατομή της σήραγγας για το σεισμό Tabas - 1η εδαφική στρώση

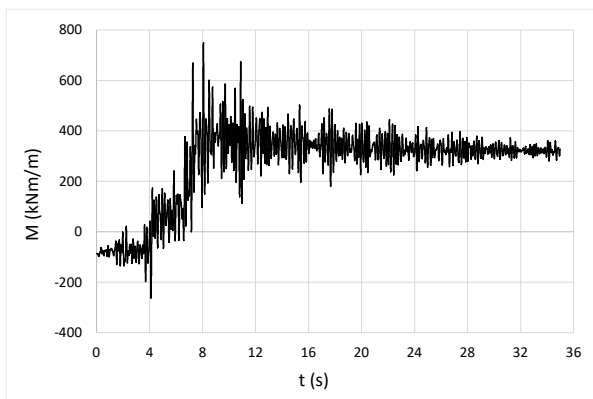


Εικόνα 4.22: Χρονοϊστορία του αξονικού φορτίου σε σημείο πάνω στη διατομή της σήραγγας για το σεισμό Tabas - 2η εδαφική στρώση

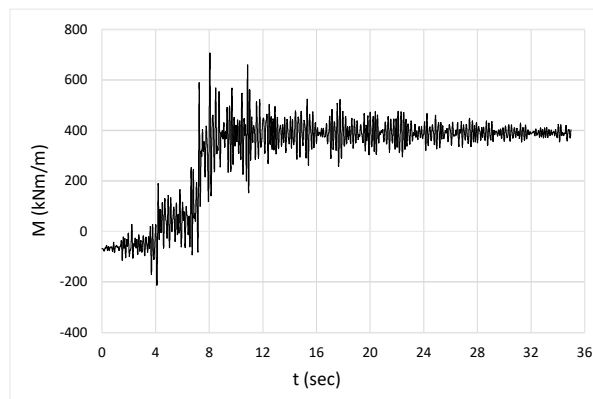
kN/m. Στον σεισμό Tabas στο πρώτο έδαφος παρατηρείται αύξηση του αξονικού φορτίου από την αρχική τιμή των 1300 kN/m στην τελική τιμή των 2000 kN/m, δηλαδή συνολική μόνιμη αύξηση κατά 600 kN/m. Στο δεύτερο έδαφος το αξονικό φορτίο ξεκινάει από τα 1050 kN/m και αυξάνεται έως τα 2500 kN/m, δηλαδή κατά 1450 kN/m. Μία γενική παρατήρηση είναι ότι η μεταβολή του αξονικού φορτίου είναι μεγαλύτερη στο δεύτερο έδαφος συγκριτικά με το πρώτο και για τις δύο σεισμικές καταγραφές. Ωστόσο, δεν είναι σίγουρο ότι με την αύξηση της σεισμικής έντασης θα αυξηθούν και οι παραμορφώσεις και πλαστικοποιήσεις άρα και η μεταβολή του αξονικού φορτίου. Αυτό οφείλεται στις διαφορετικές ανακατανομές των τάσεων λόγω του σεισμού καθώς και στο πόσο καλά προσομοιώνεται, με το καταστατικό μοντέλο που επιλέχθηκε, η εκάστοτε συμπεριφορά.

#### 4.1.5.2 Ροπή

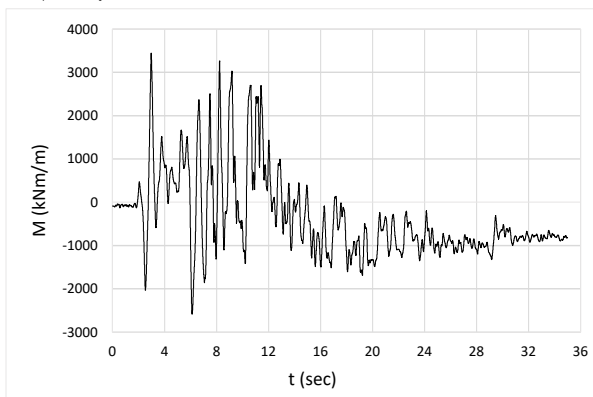
Στις εικόνες 4.23, 4.24, 4.25, 4.26 απεικονίζεται η μεταβολή της ροπής για τις περιπτώσεις αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται. Για την καταγραφή N Miyagi Prefecture στο πρώτο



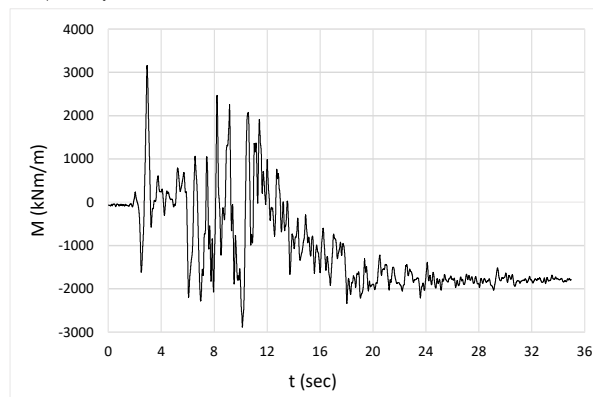
Εικόνα 4.23: Χρονοϊστορία της ροπής σε σημείο πάνω στη διατομή της σήραγγας για το σεισμό N Miyagi Prefecture - 1η εδαφική στρώση



Εικόνα 4.24: Χρονοϊστορία της ροπής σε σημείο πάνω στη διατομή της σήραγγας για το σεισμό N Miyagi Prefecture - 2η εδαφική στρώση



Εικόνα 4.25: Χρονοϊστορία της ροπής σε σημείο πάνω στη διατομή της σήραγγας για το σεισμό Tabas - 1η εδαφική στρώση



Εικόνα 4.26: Χρονοϊστορία της ροπής σε σημείο πάνω στη διατομή της σήραγγας για το σεισμό Tabas - 2η εδαφική στρώση

έδαφος, η ροπή αυξάνεται κατά 400 kNm/m, ενώ για την ίδια καταγραφή στο δεύτερο έδαφος, η ροπή αυξάνεται κατά 450 kNm/m. Για την καταγραφή Tabas, στο πρώτο έδαφος η ροπή μειώνεται κατά 800 kNm/m, ενώ στο δεύτερο έδαφος η ροπή μειώνεται κατά 1800 kNm/m. Σε σύγκριση των δύο καταγραφών, η δεύτερη που είναι ισχυρότερη, προκαλεί μεγαλύτερη μεταβολή στην δρώσα ροπή στη διατομή της σήραγγας. Όσον αφορά τα δύο διαφορετικά εδάφη εγκιβωτισμού, η μεταβολή της ροπής στη δεύτερη εδαφική στρώση είναι μεγαλύτερη της πρώτης. Οι τελικές μόνιμες τιμές της ροπής στη

διατομή μετά το πέρας της διέγερσης είναι πολύ μικρότερες των μεγίστων τιμών κατά τη διάρκεια του σεισμού.

## 4.2 Προσδιορισμός δεικτών βλάβης και επιλογή μέτρων έντασης

Για τη διαδικασία εκτίμησης της τρωτότητας, οι δύο βασικότερες παράμετροι που πρέπει να προσδιοριστούν είναι το μέτρο έντασης και ο δείκτης βλάβης. Το μέτρο έντασης εκφράζει την ένταση του σεισμικού κινδύνου και επιλέχθηκε να προσεγγιστεί με τιμές μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης, PGA, και μέγιστης εδαφικής ταχύτητας, PGV. Οι τιμές αυτές επιλέχθηκαν από τις χρονοϊστορίες επιτάχυνσης και ταχύτητας σε σημείο του μοντέλου στην επιφάνεια του εδάφους και σε μακρινή απόσταση από τη σήραγγα, για κάθε μία από τις αναλύσεις που έγιναν, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.27. Ο δείκτης βλάβης που θεωρήθηκε ότι εκφράζει καλύτερα τη σεισμική απόκριση της σήραγγας, λόγω κυρίως του σχήματος της διατομής, είναι η διαμετρική παραμόρφωση, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.28. Για την εύρεση αυτού του μεγέθους, αρχικά υπολογίστηκε μια μέση διάμετρος  $D_{eq}$ , η οποία αντιστοιχεί σε ισοδύναμη κυκλική σήραγγα. Επιπλέον, επιλέχθηκαν τέσσερα σημεία πάνω στη διατομή, τα οποία δημιουργούν τις δύο βασικές διαγώνιους-διαμέτρους της, ώστε να υπολογιστούν σε αυτά οι οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις. Από τα αποτελέσματα των χρονοϊστοριών οριζόντιας και κατακόρυφης μετατόπισης για τα σημεία που προ ειπώθηκαν, υπολογίστηκαν οι χρονοϊστορίες των διαμετρικών παραμορφώσεων, από όπου στη συνέχεια επιλέχθηκαν οι μέγιστες τιμές των διαγραμμάτων αυτών και αποτέλεσαν τη μέγιστη διαμετρική παραμόρφωση για κάθε περίπτωση σεισμού και εδάφους. Οι επιλεγμένες αυτές τιμές εισήχθησαν στην παρακάτω σχέση, ορίζοντας τελικά το δείκτη βλάβης για καθεμία από τις αναλύσεις.

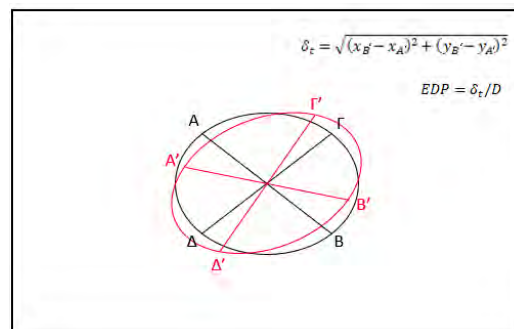
$$EDP = \frac{\delta_{\tau}}{D_{eq}} \quad (4.1)$$

,όπου  $\delta_{\tau}$ : η τελική διαμετρική παραμόρφωση και  $D_{eq}$ : η μέση διάμετρος της διατομής (διάμετρος ισοδύναμης κυκλικής σήραγγας). Η μέση διάμετρος της διατομής υπολογίστηκε ως η μέση τιμή της οριζόντιας και κατακόρυφης διαμέτρου.

Παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικά χρονοϊστορίες διαμετρικών παραμορφώσεων



Εικόνα 4.27: Το σημείο στην επιφάνεια του εδάφους όπου έγινε ο υπολογισμός των μέτρων έντασης



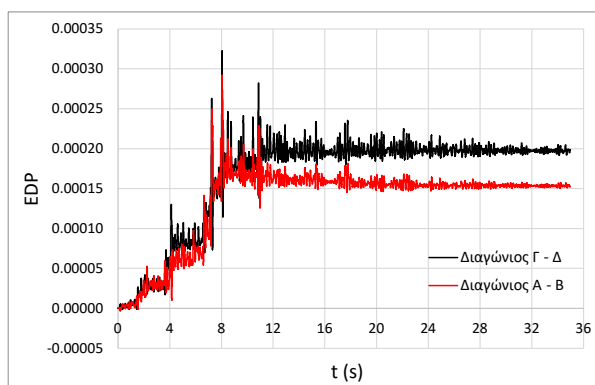
Εικόνα 4.28: Τα σημεία ελέγχου της διαμετρικής παραμόρφωσης στη διατομή της σήραγγας

ανηγμένων ως προς την διάμετρο  $D_{eq}$ , (EDP), που δημιουργήθηκαν για να βρεθούν οι δείκτες βλάβης. Για τον σεισμό N Miyagi Prefecture η μέγιστη τιμή διαμετρικής παραμόρφωσης που παρατηρείται στην εικόνα 4.29 είναι τα 0.000325 m για το πρώτο έδαφος και τα 0.000300 m για το δεύτερο έδαφος. Στον σεισμό Tabas, όπως αναμένεται λόγω της μεγαλύτερης ισχύος του, οι τιμές των διαμετρικών παραμορφώσεων είναι μεγαλύτερες σχεδόν κατά μία τάξη μεγέθους, με αυτή για τον πρώτο εδαφικό σχηματισμό να φτάνει τα 0.004 m και αυτή για τον δεύτερο εδαφικό σχηματισμό να προσεγγίζει τα 0.0035 m. Και στις δύο παραπάνω περιπτώσεις, όπως και στις υπόλοιπες που μελετήθηκαν, η διαμετρική παραμόρφωση είναι μεγαλύτερη στο πρώτο έδαφος, το οποίο είναι μαλακότερο σε σχέση με το δεύτερο. Αυτή η συμπεριφορά εξηγείται εν μέρη από το γεγονός ότι σε περισσότερο μαλακούς εδαφικούς σχηματισμούς αναμένεται μεγαλύτερος βαθμός πλαστικοποίησης συγκριτικά με σκληρότερους, άρα και οι μετα-κινήσεις της ελαστικής επένδυσης της σήραγγας, που προκαλούνται από το περιβάλλον έδαφος, είναι μεγαλύτερες στην πρώτη περίπτωση. Ωστόσο, χρειάζεται να μελετηθεί περαιτέρω η σχετική δυσκαμψία των δύο συστημάτων σήραγγας-εδάφους, ώστε να βασιστεί καλύτερα η παραπάνω παρατήρηση.

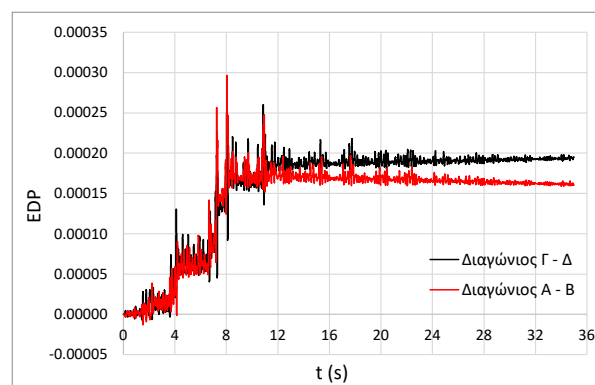
### 4.3 Χάραξη καμπυλών τρωτότητας

Εν συνεχεία της ενότητας 2.4, όπου εισήχθη η έννοια της τρωτότητας και έγινε μια περιληπτική αναφορά της βασικής μεθόδου για την εύρεση των αντίστοιχων καμπυλών,

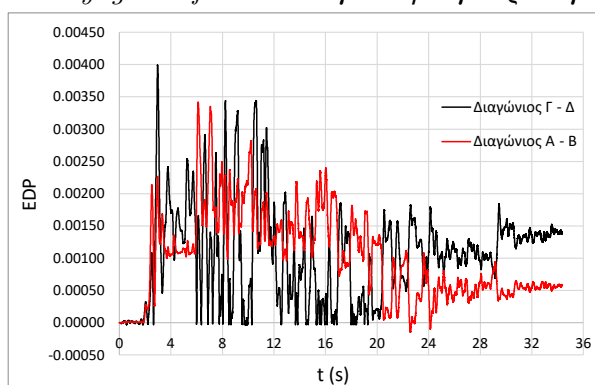
#### Chapter 4. Παραμετρική αριθμητική διερεύνηση και εκτίμηση της τρωτότητας



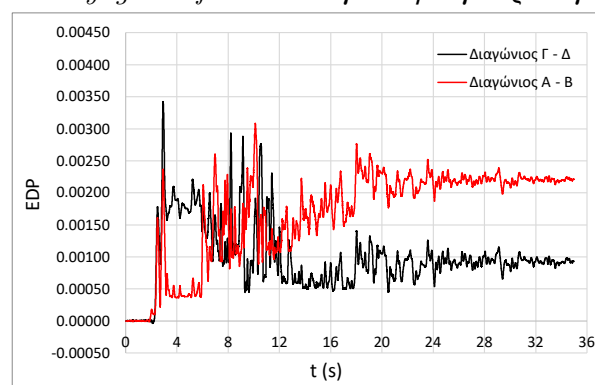
Εικόνα 4.29: Χρονοϊστορία διαμετρικής παραμόρφωσης στα σημεία ελέγχου πάνω στη διατομή της σήραγγας για τον σεισμό N Miyagi Prefecture - 1η εδαφική στρώση



Εικόνα 4.30: Χρονοϊστορία διαμετρικής παραμόρφωσης στα σημεία ελέγχου πάνω στη διατομή της σήραγγας για τον σεισμό N Miyagi Prefecture - 2η εδαφική στρώση



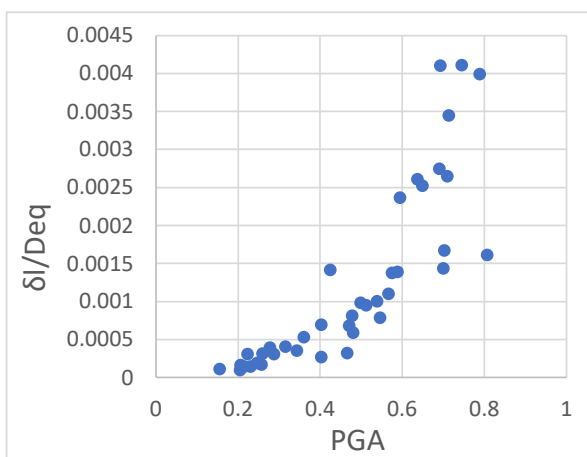
Εικόνα 4.31: Χρονοϊστορία διαμετρικής παραμόρφωσης στα σημεία ελέγχου πάνω στη διατομή της σήραγγας για τον σεισμό Tabas - 1η εδαφική στρώση



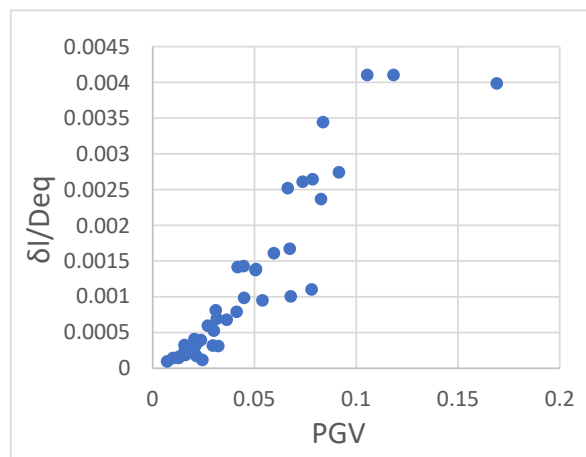
Εικόνα 4.32: Χρονοϊστορία διαμετρικής παραμόρφωσης στα σημεία ελέγχου πάνω στη διατομή της σήραγγας για τον σεισμό Tabas - 2η εδαφική στρώση

στην ενότητα αυτή γίνεται εφαρμογή της μεθόδου, χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα των αναλύσεων ως βασικά δεδομένα για τη χάραξη των καμπυλών τρωτότητας.

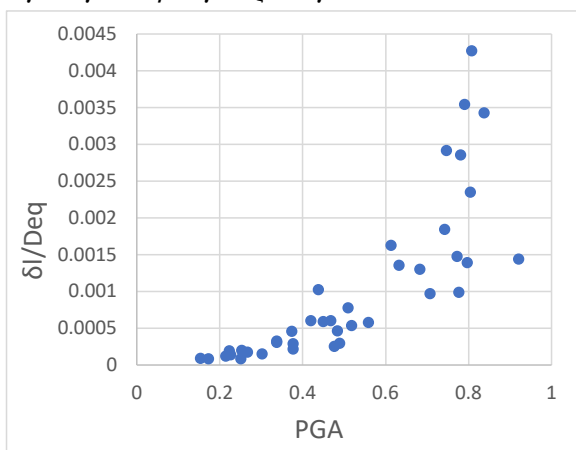
Από τη διαδικασία που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα, συλλέγεται το σύνολο των μέτρων έντασης και δεικτών βλάβης. Οι τιμές που προέκυψαν αποτελούν τα βασικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία εύρεσης των καμπυλών τρωτότητας. Οι τιμές του συνόλου αυτών και για τα δύο εδάφη μελέτης απεικονίζονται στις εικόνες 4.33, 4.34, 4.35, 4.36. Στη συνέχεια γίνεται η εύρεση των λογαρίθμων του δείκτη βλάβης, δηλαδή της διαμετρικής παραμόρφωσης, καθώς και των δεικτών έντασης, δηλαδή της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης και της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας αντίστοιχα. Οι τιμές των λογαρίθμων είναι αναγκαίες για τη δημιουργία του πιθανοτικού μοντέλου σει-



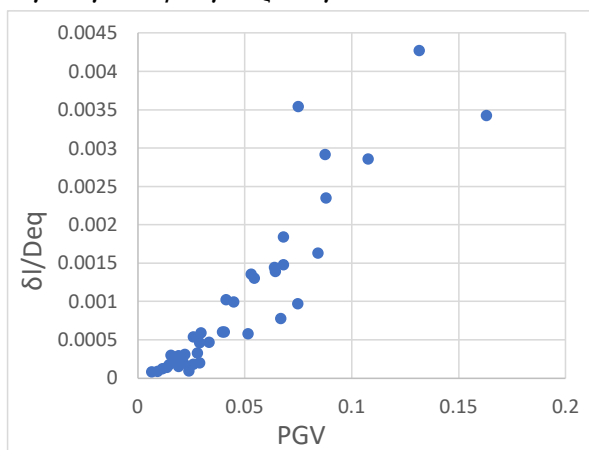
Εικόνα 4.33: Διάγραμμα του δείκτη βλάβης συναρτήσει του μέτρου έντασης PGA για την 1η εδαφική στρώση



Εικόνα 4.34: Διάγραμμα του δείκτη βλάβης συναρτήσει του μέτρου έντασης PGV για την 1η εδαφική στρώση



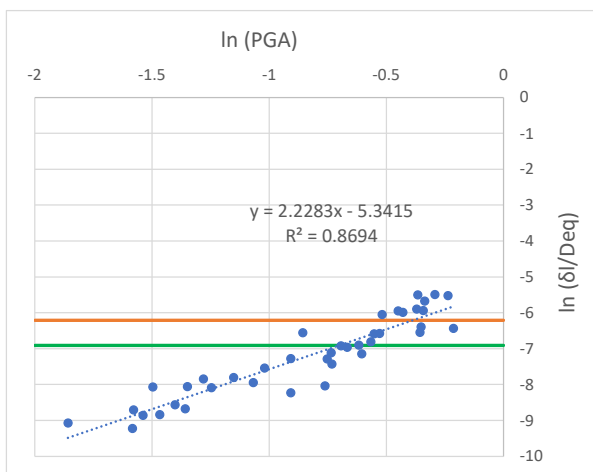
Εικόνα 4.35: Διάγραμμα του δείκτη βλάβης συναρτήσει του μέτρου έντασης PGA για τη 2η εδαφική στρώση



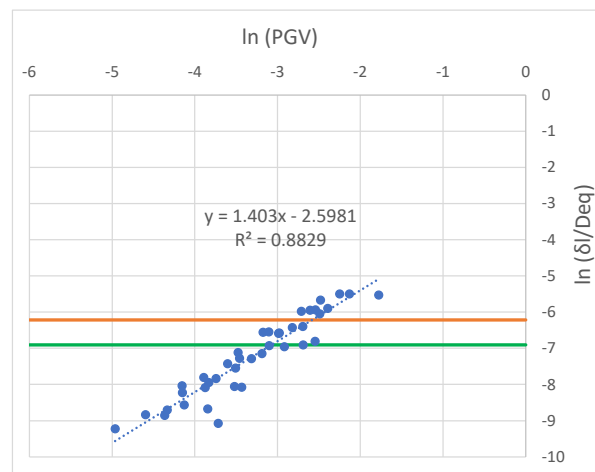
Εικόνα 4.36: Διάγραμμα του δείκτη βλάβης συναρτήσει του μέτρου έντασης PGA για τη 2η εδαφική στρώση

σμικής απαίτησης, όπου εκφράζεται η σχέση του μέτρου έντασης με τον δείκτη βλάβης που θα χρησιμοποιηθεί για τις συναρτήσεις τρωτότητας. Τα πιθανοτικά μοντέλα σεισμικής απαίτησης για τις τέσσερις εξεταζόμενες περιπτώσεις παρουσιάζονται στις εικόνες 4.37, 4.38, 4.39, 4.40. Σε αυτά σχεδιάζεται η γραμμή τάσης και αποτυπώνεται η εξίσωση που τη διέπει, η οποία καθορίζει την τυπική απόκλιση που θα προκύψει. Οι δύο οριζόντιες ευθείες αποτελούν τις στάθμες βλάβης, οι οποίες ορίστηκαν μέσω έμπειρης κρίσης βασιζόμενη στον τύπο του εδάφους, το είδος της διατομής και τον βαθμό παραμόρφωσης. Στον πίνακα 4.1 εκφράζονται οι στάθμες βλάβης που ορίστηκαν για την ανάλυση. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν δύο στάθμες, μια για μικρές βλάβες και μια για μέσες

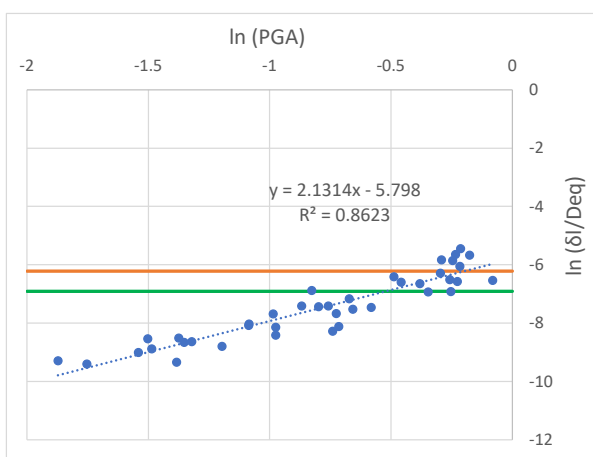




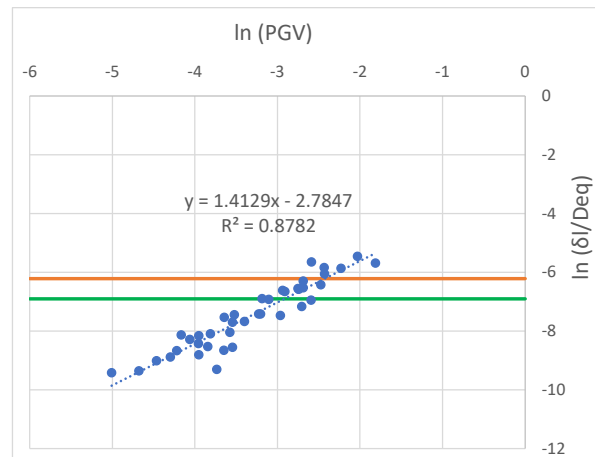
Εικόνα 4.37: Πιθανοτικό μοντέλο σεισμικής απαίτησης βασισμένο στην PGA και τη διαμετρική παραμόρφωση για την 1η εδαφική στρώση



Εικόνα 4.38: Πιθανοτικό μοντέλο σεισμικής απαίτησης βασισμένο στην PGV και τη διαμετρική παραμόρφωση για την 1η εδαφική στρώση



Εικόνα 4.39: Πιθανοτικό μοντέλο σεισμικής απαίτησης βασισμένο στην PGA και τη διαμετρική παραμόρφωση για τη 2η εδαφική στρώση



Εικόνα 4.40: Πιθανοτικό μοντέλο σεισμικής απαίτησης βασισμένο στην PGV και τη διαμετρική παραμόρφωση για τη 2η εδαφική στρώση

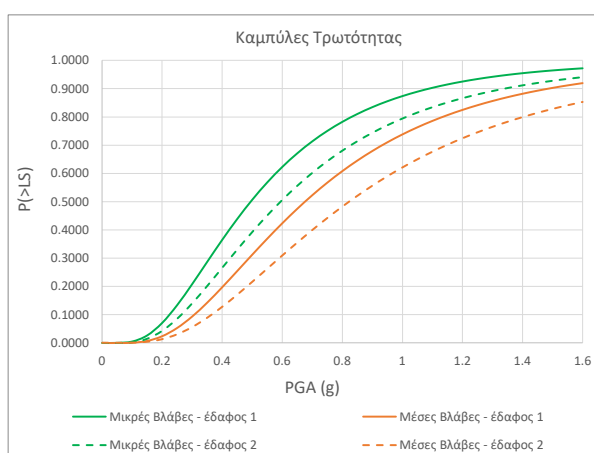
βλάβες, οι οποίες βασίζονται στο εύρος των παραμορφώσεων που προέκυψαν από τις αναλύσεις. Η μέγιστη τιμή διαμετρικής παραμόρφωσης που συναντάται στην ανάλυση είναι μικρότερη των 0.003m και γι αυτό το λόγο δεν κρίθηκε αναγκαία η ύπαρξη τρίτης στάθμης βλάβης για μεγάλες βλάβες. Στην στάθμη με τις μικρές βλάβες συμπεριλαμβάνονται μόνιμες μετακινήσεις, ρηγματώσεις μικρής κλίμακας καθώς και αποφλοιώσεις τμημάτων τις επένδυσης. Όλα τα παραπάνω εμφανίζονται τόσο στην εγκάρσια όσο και στη διαμήκη διεύθυνση. Λόγω της πτώσης της επικάλυψης, σε κάποιες περιπτώσεις

Πίνακας 4.1: Ορισμός των σταθμών βλάβης που επιλέχθηκαν

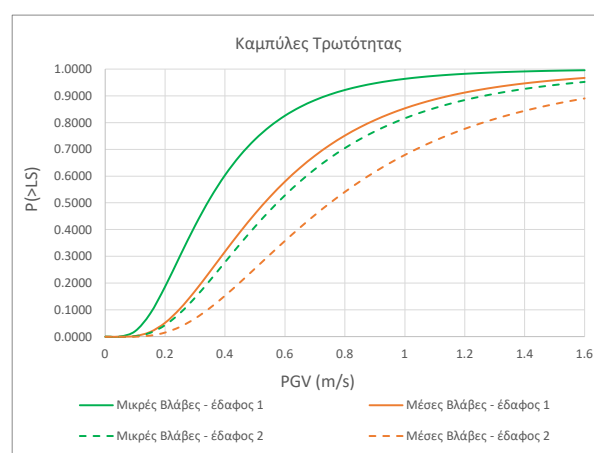
Στάθμη Βλάβης	Εύρος δείκτη βλάβης	Τιμή Κατωφλίου
LS1:μικρές βλάβες	$0.002 \leq \delta_{\tau}/D_{eq} \leq 0.001$	0.001
LS2:μέσες βλάβες	$0.003 \leq \delta_{\tau}/D_{eq} \leq 0.002$	0.002

υπάρχει και έκθεση του οπλισμού. Επιπλέον, υπάρχει σε ελάχιστα σημεία υπέρβαση του ορίου διαρροής του χάλυβα άρα και της αντοχής του που οδηγεί στην μετάβαση στην ελαστοπλαστική συμπεριφορά. Στην στάθμη με τις μέσες βλάβες, οι παραπάνω περιπτώσεις εντείνονται και εμφανίζονται σε μεγαλύτερη κλίμακα.

Αφού οριστούν τα παραπάνω, αναγκαία για την εύρεση της τρωτότητας, μέσω λογαριθμοκανονικής κατανομής (εξίσωση 2.4), είναι η συνολική τυπική απόκλιση, που έχει οριστεί από την εξίσωση 2.5. Βάσει αυτής, υπολογίζεται ως άθροισμα τριών παραμέτρων που αφορούν τις αβεβαιότητες της διαδικασίας που ακολουθείται και συγκεκριμένα των  $\beta_c$ ,  $\beta_d$  και  $\beta_{DS}$ . Η  $\beta_c$ , που αφορά την αβεβαιότητα ως προς την απόκριση της κατασκευής, επιλέγεται ίση με 0.25, ενώ η  $\beta_{DS}$ , που εκφράζει την αβεβαιότητα του προσδιορισμού των σταθμών βλάβης, επιλέγεται ίση με 0.4. Οι δύο αυτές τιμές ορίζονται βάσει της προσέγγισης HAZUS, 2003 για καμπύλες τρωτότητας κτιρίων, από τους αντίστοιχους πίνακες. Η  $\beta_d$  συνδέεται με την αβεβαιότητα ως προς τη σεισμική απαίτηση και υπολογίζεται από τις τιμές που προκύπτουν από τη δυναμική ανάλυση, μέσω διασποράς των αποτελεσμάτων στα διαγράμματα των πιθανοτικών μοντέλων σεισμικής απαίτησης. Έτσι υπολογίζεται η συνολική τυπική απόκλιση  $\beta_{tot}$ , που χρησιμοποιείται τελικά στην εξίσωση 2.4 για την εξαγωγή των καμπυλών τρωτότητας. Στις εικόνες 4.41 και 4.42 παρουσιάζεται η τελική μορφή των καμπυλών τρωτότητας, όπως υπολογίστηκαν βάσει όλης της παραπάνω διαδικασίας. Στην εικόνα 4.41, απεικονίζονται οι καμπύλες τρωτότητας χρησιμοποιώντας ως μέτρο έντασης τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση, ενώ στην εικόνα 4.42, το μέτρο έντασης είναι η μέγιστη εδαφική ταχύτητα. Οι συνεχόμενες καμπύλες αφορούν την απόκριση της εξεταζόμενης σήραγγας στον 1ο εδαφικό σχηματισμό ενώ οι διακεκομμένες στον 2ο. Τέλος, με πράσινο χρώμα εκφράζεται η πρώτη στάθμη βλάβης, που αφορά την πιθανότητα εμφάνισης μικρών βλαβών στην κατασκευή, ενώ με πορτοκαλί χρώμα παρουσιάζεται η δεύτερη στάθμη βλάβης, όπου ορίζονται οι μέσες βλάβες στην κατασκευή. Όσον αφορά τις διαφορές των καμπυλών τρωτότητας



Εικόνα 4.41: Καμπύλες Τρωτότητας βασισμένες στην PGA ως μέτρο έντασης και τη διαμετρική παραμόρφωση ως δείκτη βλάβης, όπως προέκυψαν από το σύνολο των αποτελεσμάτων των δυναμικών αναλύσεων



Εικόνα 4.42: Καμπύλες Τρωτότητας βασισμένες στην PGV ως μέτρο έντασης και τη διαμετρική παραμόρφωση ως δείκτη βλάβης, όπως προέκυψαν από το σύνολο των αποτελεσμάτων των δυναμικών αναλύσεων

μεταξύ των δύο διαφορετικών εδαφών, αυτό που παρατηρείται κατά βάση είναι ότι οι καμπύλες τρωτότητας για το πρώτο έδαφος βρίσκονται υψηλότερα από τις αντίστοιχες για το 2ο. Αυτό, ως επακόλουθο, εκφράζει πως η πιθανότητα βλάβης για την ίδια σεισμική ένταση είναι μεγαλύτερη σε έναν μαλακό εδαφικό σχηματισμό, όπως ο πρώτος, συγκριτικά με έναν σκληρότερο, όπως ο δεύτερος.

Αναφορικά της μορφής των καμπυλών τρωτότητας για τη σήραγγα μελέτης έναντι σεισμικής διέγερσης, μπορούν να γίνουν κάποιες γενικές παρατηρήσεις ως προς την εξαγόμενη απόκριση της. Αρχικά, παρατηρείται ότι για τιμές μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης μικρότερες του 0.2 g, οι πιθανότητες εμφάνισης οποιασδήποτε βλάβης στη σήραγγα είναι εξαιρετικά μικρές (<10%), γεγονός που συγκλίνει με τη βιβλιογραφία. Η πιθανότητα βλάβης αυξάνεται προοδευτικά με την άνοδο της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης της σεισμικής διέγερσης, φτάνοντας το 50% ως προς την εμφάνιση μικρών βλαβών για τιμή μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης 0.48 g, ενώ για τη συγκεκριμένη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση, η πιθανότητα μέσης βλάβης στη σήραγγα είναι 35%. Για τιμές μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης μεγαλύτερες του 1.5 g, η πιθανότητα οποιασδήποτε μορφής βλάβης προσεγγίζει τη μονάδα.

#### 4.4 Σύγκριση των δύο εδαφικών στρώσεων

Βάσει των αποτελεσμάτων των διαγραμμάτων της διαμετρικής παραμόρφωσης της σήραγγας καθώς και των εξαγόμενων καμπυλών τρωτότητας για τα δύο εδάφη, παρατηρείται ότι η παραμόρφωση της διατομής λόγω πλαστικοποίησης του περιβάλλοντος εδάφους είναι μεγαλύτερη στην πρώτη εδαφική στρώση συγκριτικά με τη δεύτερη. Επομένως, και η πιθανότητα μικρής ή μέσης βλάβης στην πρώτη περίπτωση θα είναι μεγαλύτερη της δεύτερης, όπως επιβεβαιώνεται από τις εξαγόμενες καμπύλες τρωτότητας. Ωστόσο, για τη μεγαλύτερη εγκυρότητα των αποτελεσμάτων, επιλέχθηκαν δύο περαιτέρω συγκρίσεις, με την πρώτη να αφορά την χρήση της σχετικής δυσκαμψίας και τη δεύτερη να σχετίζεται με καμπύλες από τη βιβλιογραφία. Η σύγκριση με καμπύλες από τη βιβλιογραφία θα γίνει στην επόμενη υποενότητα.

Αρχικά, επιλέχθηκε να υπολογιστεί ο συντελεστής σχετικής δυσκαμψίας για τις δύο περιπτώσεις εδάφους-σήραγγας, ώστε να χαρακτηριστεί πόσο εύκαμπτη είναι η σήραγγα σε σχέση με το έδαφος. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι τα χαρακτηριστικά της σήραγγας παραμένουν σταθερά και στις δύο περιπτώσεις αναλύσεων, ωστόσο τα χαρακτηριστικά του εδάφους αλλάζουν. Επομένως, η αλλαγή της σχετικής δυσκαμψίας μεταξύ των δύο μέσων, για τις δύο περιπτώσεις που μελετώνται, αποτυπώνει την αλλαγή της δυσκαμψίας του εδάφους, με την αύξηση του συντελεστή να συνεπάγεται αύξηση της δυσκαμψίας του, άρα και την ύπαρξη πιο σκληρού εδάφους, με μικρότερο βαθμό πλαστικοποίησης έναντι δυναμικής φόρτισης, συγκριτικά με αυτόν για ένα μαλακότερο έδαφος, για τον ίδιο βαθμό παραμόρφωσης. Για το σκοπό αυτό, υπολογίζεται ο συντελεστής σχετικής δυσκαμψίας των δύο μέσων κάνοντας χρήση της εξίσωσης 2.1, εισάγοντας στον τύπο τα χαρακτηριστικά των δύο εδαφών, ένα κατά περίπτωση, και της σήραγγας, από τους πίνακες 3.1 και 3.2 αντίστοιχα. Το αποτέλεσμα που προκύπτει απεικονίζεται στον πίνακα 4.2. Αυτό επιβεβαιώνει πως η δεύτερη εδαφική στρώση έχει μεγαλύτερη δυσκαμψία από

*Πίνακας 4.2: Λόγος Σχετικής Δυσκαμψίας για τις δύο περιπτώσεις ανάλυσης όπως προέκυψε βάσει του Wang*

	Λόγος Σχετικής Δυσκαμψίας F
1η εδαφική στρώση	17.1
2η εδαφική στρώση	23.2

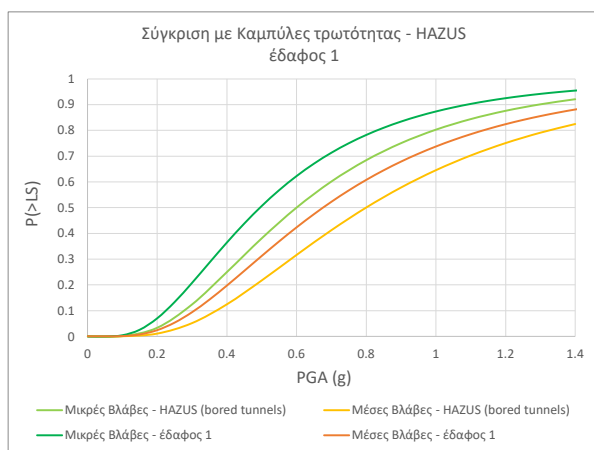
την πρώτη. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται πως το πρώτο έδαφος θα εμφανίσει μεγαλύτερη πλαστικοποίηση στην περιοχή γύρω από τη σήραγγα, οδηγώντας σε μεγαλύτερες μετακινήσεις στην επένδυσή της συγκριτικά με το δεύτερο έδαφος. Αυτό διακρίνεται και στις χρονοϊστορίες των μετακινήσεων στη στέψη της σήραγγας και στις διαμετρικές παραμορφώσεις, όπως μελετήθηκαν στις ενότητες 4.1 και 4.2. Εξίσου μεγαλύτερη για το πρώτο έδαφος θα είναι η απόσβεση καθώς και η απομείωση της επιτάχυνσης και της ταχύτητας. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται και στις αντίστοιχες χρονοϊστορίες επιτάχυνσης και ταχύτητας, όπου για το δεύτερο έδαφος, οι μέγιστες τιμές είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες του πρώτου.

#### 4.5 Σύγκριση με διαθέσιμες καμπύλες τρωτότητας

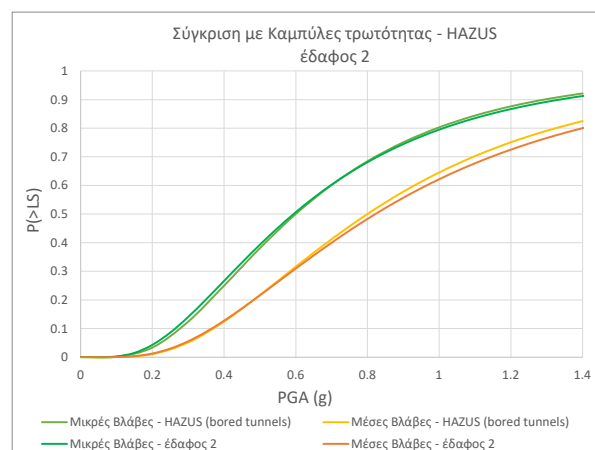
Στην ενότητα αυτή γίνεται η σύγκριση των εξαγόμενων από τις δυναμικές αναλύσεις καμπυλών, με διαθέσιμες καμπύλες τρωτότητας από τη βιβλιογραφία. Η σύγκριση αφορά κατά το δυνατόν παρόμοια συστήματα σήραγγας-εδάφους, καθώς και παρόμοιες μεθόδους κατασκευής με αυτά της ανάλυσης που έγινε. Πιο συγκεκριμένα, για τη σύγκριση χρησιμοποιήθηκαν τρεις περιπτώσεις καμπυλών τρωτότητας, αρχικά αυτές από το εγχειρίδιο HAZUS 5.1 (HAZUS, 2022) που αφορούν σήραγγες κατασκευασμένες με τη μέθοδο της διάτρησης (bored/drilled tunnels), στη συνέχεια η δεύτερη ομάδα καμπυλών προέρχεται από την ALA (American Lifelines Alliance) και έχει προταθεί για αγωγούς που αφορούν συστήματα μεταφοράς νερού (Eidinger et al., 2001) και τέλος, η τρίτη σύγκριση έγινε με αναλυτικές καμπύλες τρωτότητας των Argyroudis and Pitilakis, 2012, όπως υπολογίστηκαν για σήραγγες METPO που εγκιβωτίζονται σε μικρό βάθος σε αλλούβια.

Στις εικόνες 4.43, 4.44 απεικονίζονται οι καμπύλες τρωτότητας από το εγχειρίδιο HAZUS σε σύγκριση με τις εξαγόμενες από τις δυναμικές αναλύσεις καμπύλες της παρούσας εργασίας. Με σκούρο πράσινο απεικονίζεται η εξαγόμενη καμπύλη τρωτότητας για μικρή βλάβη ενώ με πορτοκαλί η εξαγόμενη καμπύλη για μέση βλάβη. Αντίστοιχα, η καμπύλη με ανοιχτό πράσινο χρώμα χαρακτηρίζει αυτή του HAZUS για μικρή βλάβη ενώ αυτή με κίτρινο χρώμα την καμπύλη από το ίδιο εγχειρίδιο για μέση βλάβη. Στην εικόνα 4.43 γίνεται η σύγκριση των καμπυλών HAZUS με το πρώτο έδαφος ενώ στην εικόνα 4.44 η

## Chapter 4. Παραμετρική αριθμητική διερεύνηση και εκτίμηση της τρωτότητας



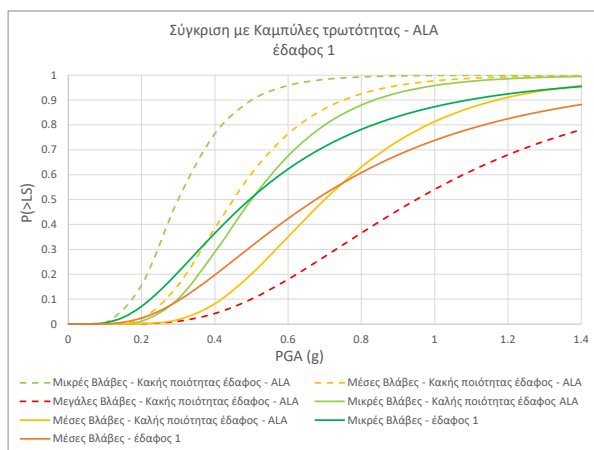
Εικόνα 4.43: Συγκεντρωτικά οι Καμπύλες Τρωτότητας της ανάλυσης που έγινε για την πρώτη εδαφική στρώση καθώς και του μοντέλου HAZUS



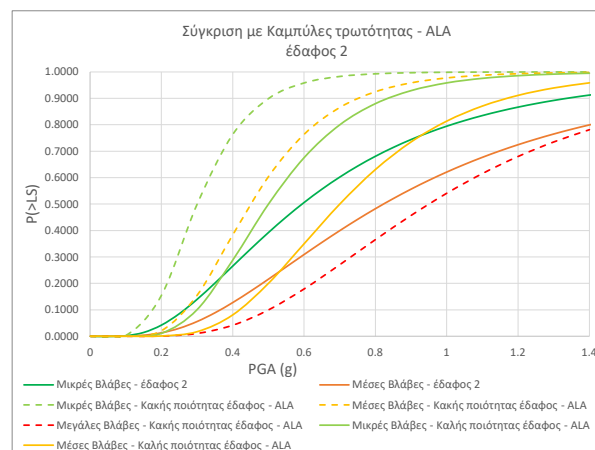
Εικόνα 4.44: Συγκεντρωτικά οι Καμπύλες Τρωτότητας της ανάλυσης που έγινε για τη δεύτερη εδαφική στρώση καθώς και του μοντέλου HAZUS

σύγκριση αφορά το δεύτερο έδαφος. Αναφορικά με το πρώτο έδαφος, οι πιθανότητες βλάβης σε αυτό είναι μεγαλύτερο από αυτές που προβλέπουν οι καμπύλες του HAZUS. Όσον αφορά το δεύτερο έδαφος, οι καμπύλες από τις δύο αναλύσεις φαίνεται να συγκλίνουν εξαιρετικά.

Αναφορικά με τις εικόνες 4.45, 4.46, γίνεται σύγκριση των εξαγόμενων καμπυλών τρωτότητας με αυτές του που προέκυψαν από το μοντέλο της ALA για υπόγειους αγωγούς μεγάλης διαμέτρου. Τα χρώματα των καμπυλών παραμένουν τα ίδια με αυτά της πρώτης



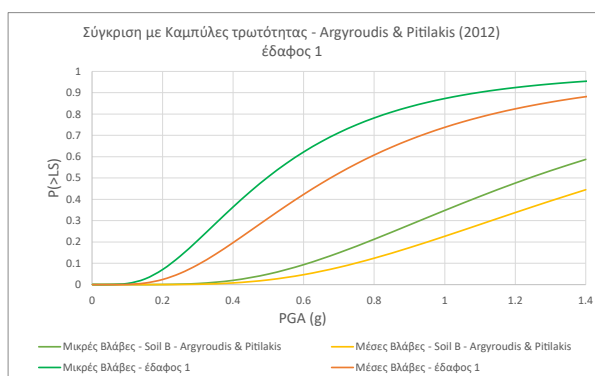
Εικόνα 4.45: Συγκεντρωτικά οι Καμπύλες Τρωτότητας της ανάλυσης που έγινε για την πρώτη εδαφική στρώση καθώς και του μοντέλου ALA (2001)



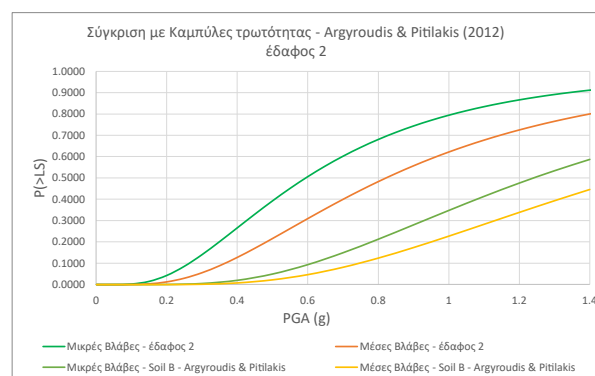
Εικόνα 4.46: Συγκεντρωτικά οι Καμπύλες Τρωτότητας της ανάλυσης που έγινε για τη δεύτερη εδαφική στρώση καθώς και του μοντέλου ALA (2001)

σύγκρισης. Ωστόσο, προστίθενται, τρεις διακεκομμένες γραμμές, μία ανοιχτή πράσινη, μία κίτρινη και μία κόκκινη, που αντιστοιχούν σε μικρή, μέση και μεγάλη βλάβη, και αναφέρονται σε κακής ποιότητας έδαφος για το μοντέλο ALA. Οι καμπύλες του πρώτου εδάφους, που προέκυψαν από τη δυναμική ανάλυση, φαίνεται να συγκλίνουν καλύτερα με τις συνεχόμενες καμπύλες, δηλαδή το πρώτο έδαφος μοιάζει περισσότερο ως προς τα χαρακτηριστικά του με το ισχυρότερο και καλύτερης ποιότητας έδαφος της ανάλυσης ALA (εικόνα 4.45). Το δεύτερο έδαφος, παρουσιάζει ακόμα καλύτερα χαρακτηριστικά σε σχέση και με το πρώτο έδαφος από την ανάλυση και με το καλής ποιότητας έδαφος του μοντέλου ALA (εικόνα 4.46). Επίσης διακρίνεται πως η καμπύλη για μέση βλάβη σε αυτό συγκλίνει αρκετά με την καμπύλη για μεγάλη βλάβη στο ασθενές έδαφος ALA.

Η τελευταία σύγκριση αφορά τις εικόνες 4.47 και 4.48, στις οποίες απεικονίζονται οι καμπύλες τρωτότητας των Argyroudis and Pitilakis, 2012. Οι εξαγόμενες καμπύλες από την ανάλυση είναι αρκετά υψηλότερα από αυτές των Argyroudis & Pitilakis. Οι καμπύλες των Argyroudis & Pitilakis αφορούν το έδαφος B του ευρωκώδικα 8 (EN1998-1), το οποίο καλύπτει ένα μεγάλο εύρος εδαφών, στο οποίο συμπεριλαμβάνονται και τα εδάφη που επιλέχθηκαν για τις δυναμικές αναλύσεις. Επομένως, η μεγάλη διαφορά των καμπυλών οφείλεται εν μέρη στη γενικότητα της σύγκρισης. Επιπλέον, οι καμπύλες τρωτότητας των Argyroudis & Pitilakis αφορούν σήραγγες εγκιβωτισμένες σε μικρά βάθη σε αλλουβιακές αποθέσεις, ενώ στην ανάλυση που έγινε, το βάθος εγκιβωτισμού είναι τα 20 m.



Εικόνα 4.47: Συγκεντρωτικά οι Καμπύλες Τρωτότητας της ανάλυσης που έγινε για την πρώτη εδαφική στρώση καθώς και του μοντέλου των Argyroudis & Pitilakis (2012)



Εικόνα 4.48: Συγκεντρωτικά οι Καμπύλες Τρωτότητας της ανάλυσης που έγινε για τη δεύτερη εδαφική στρώση καθώς και του μοντέλου των Argyroudis & Pitilakis (2012)

## 5 Συμπεράσματα

Η εκτίμηση της σεισμικής απόκρισης και της τρωτότητας σηράγγων, αποτελεί ένα εξαιρετικά σημαντικό και πολύπλευρο πρόβλημα, που διαφοροποιείται έντονα ανάλογα την κάθε περίπτωση συστήματος εδάφους-κατασκευής. Τις τελευταίες δεκαετίες έγιναν πολλές προσπάθειες καταγραφής, διερεύνησης και κατηγοριοποίησης της συμπεριφοράς σηράγγων έναντι σεισμικών δονήσεων, ωστόσο η πρόβλεψη της δεν μπορεί να γίνει ακόμα με απόλυτη ακρίβεια.

Στην εργασία αυτή επιλέχθηκε να μελετηθούν δύο συστήματα εδάφους-σήραγγας, θεωρώντας δύο διαφορετικά εδαφικά προφίλ όπου είναι εγκιβωτισμένη η ίδια σήραγγα. Τα συστήματα αυτά προσομοιώθηκαν και αναλύθηκαν μέσω του αριθμητικού κώδικα FLAC2D. Οι δυναμικές αναλύσεις που έγιναν στον κώδικα, χρησιμοποιώντας ένα σύνολο πραγματικών σεισμικών καταγραφών, είχαν ως στόχο την εξαγωγή αποτελεσμάτων μέγιστων τιμών επιταχύνσεων, ταχυτήτων, μετακινήσεων και εντατικών μεγεθών της σήραγγας. Οι μόνιμες τιμές σε μετακινήσεις και εντατικά μεγέθη που προκλήθηκαν στη σήραγγα, οφείλονται στις πλαστικοποιήσεις που υπέστη το περιβάλλον αυτής έδαφος, λόγω της δυναμικής φόρτισης. Μέρος των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε για την χάραξη καμπυλών τρωτότητας, οι οποίες αποτελούν ένα εξαιρετικά χρήσιμο και εύχρηστο εργαλείο για την απεικόνιση, της αναμενόμενης από την ανάλυση, απόκρισης της σήραγγας. Οι καμπύλες τρωτότητας που προέκυψαν από τις αναλύσεις συγκρίθηκαν με αντίστοιχες από τη βιβλιογραφία.

Τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται παρακάτω:

- Από τις χρονοϊστορίες μετακίνησης προέκυψαν μόνιμες μετακινήσεις στην επένδυση της σήραγγας, οριζόντιες και κατακόρυφες, συμφωνώντας με τα πειραματικά αποτελέσματα της βιβλιογραφίας (Tsinidis et al., 2020). Το μέγεθός τους είναι άμεσα εξαρτώμενο της σεισμικής έντασης, με ισχυρότερους σεισμούς να προκαλούν



μεγαλύτερες μόνιμες μετακινήσεις. Οι μόνιμες μετακινήσεις φάνηκε να επηρεάζονται, σε μικρότερο βαθμό, και από τον τύπο του εδάφους και τις σχετικές πλαστικοποιήσεις.

- Στις καμπύλες τρωτότητας που προτάθηκαν από τις αναλύσεις, το πρώτο έδαφος (πιο μαλακό) εμφάνισε πιθανότητες μικρής και μέσης βλάβης μεγαλύτερες των αντίστοιχων του δεύτερου εδάφους (πιο σκληρό), για τις ίδιες τιμές δεικτών σεισμικής έντασης, γεγονός που συνάδει με το φυσικό φαινόμενο και τη βιβλιογραφία. Το συμπέρασμα αυτό ενισχύεται και από τα αποτελέσματα των λόγων σχετικής δυσκαμψίας για τα δύο συστήματα εδάφους-σήραγγας, όπου η τιμή του λόγου για το πρώτο έδαφος είναι μικρότερη αυτής του δεύτερου.
- Κατά τη σύγκριση των εξαγόμενων καμπυλών τρωτότητας με καμπύλες από τη βιβλιογραφία, διαπιστώνεται εξαιρετική ομοιότητα των καμπυλών της δεύτερης εδαφικής στρώσης με τις αντίστοιχες από το εγχειρίδιο HAZUS. Οι υπόλοιπες συγκρίσεις οδηγούν στο συμπέρασμα ότι παρόμοια συστήματα εδάφους-σήραγγας διαφέρουν αρκετά ως προς την τρωτότητά τους λόγω μικρών διαφοροποιήσεων των χαρακτηριστικών τους και των παραδοχών που έγιναν.

Τα παραπάνω αποτελέσματα προέκυψαν βάσει της παραδοχής γραμμικής ελαστικότητας ως προς τη συμπεριφορά της σήραγγας, γεγονός που ενδέχεται να επηρεάζει σε κάποιο βαθμό τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

Σε μελλοντικές αναλύσεις, θα ήταν επιθυμητό να προσομοιωθεί η μη γραμμική συμπεριφορά της σήραγγας, καθώς και η ελαστοπλαστική της συμπεριφορά σε μεγάλες παραμορφώσεις, ώστε τα αποτελέσματα να εμπεριέχουν και αυτή την παράμετρο.

## Βιβλιογραφία

- Amberg, W., & Russo, M. (2005). Seismic design of underground structures the bolu tunnel.
- Argyroudis, S. A., Mitoulis, S. A., Winter, M. G., & Kaynia, A. M. (2019). Fragility of transport assets exposed to multiple hazards: State-of-the-art review toward infrastructural resilience. *Reliability Engineering and System Safety*, *191*, 106567.
- Argyroudis, S. A., & Pitilakis, K. D. (2012). Seismic fragility curves of shallow tunnels in alluvial deposits. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *35*, 1–12.
- Argyroudis, S. A., Tsinidis, G., Gatti, F., & Pitilakis, K. (2014). Effect of soil-structure interaction on the seismic vulnerability of shallow tunnels. *Conference: 7th Hellenic Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Athens, Greece*.
- Argyroudis, S. A., Tsinidis, G., Gatti, F., & Pitilakis, K. (2017). Effects of ssi and lining corrosion on the seismic vulnerability of shallow circular tunnels. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *98*, 244–256.
- Bases for design of structures—seismic actions for designing geotechnical works (iso 23469). (2005). Retrieved April 2023, from <https://www.iso.org/standard/36873.html>
- Cartes, P., Chamorro, A., & Echaveguren, T. (2021). Seismic risk evaluation of highway tunnel groups. *Natural Hazards*, *108*, 2101–2121.
- Darendeli, M. B. (2001). *Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves* (PhD thesis). University of Texas at Austin.
- Eidinger, J., Avila, E. A., Ballantyne, D., Cheng, L., der Kiureghian, A., Maison, F. B., O'Rourke, T. D., & Power, M. (2001). Seismic fragility formulations for water systems, web site report, ge engineering systems inc. *ALA - American Lifelines Alliance*.

## Βιβλιογραφία

- European facilities for earthquake hazard and risk (efehr). (2020). Retrieved April 2023, from <http://www.efehr.org/earthquake-hazard/hazard-map/>
- FLAC Version, 7. (2011). Dynamic analysis manual.
- Hashash, Y. M. A., Hook, J. J., Schmidt, B., & Yao, J. I. C. (2001). Seismic design and analysis of underground structures. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 16 (2), 247–293.
- HAZUS. (2003). Hazus-mh-mr1, advanced engineering building module - technical and user's manual. *Federal Emergency Management Agency - Department of Homeland Security - U.S.*
- HAZUS. (2022). Hazus 5.1 - hazus earthquake model technical manual - fema. *Federal Emergency Management Agency - Department of Homeland Security - U.S.*
- Høeg, K. (1968). Stresses against underground structural cylinders. *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div*, 94, 833–858.
- Huo, H., Bobet, A., Fernández, G., & Ramírez, J. (2005). Load transfer mechanisms between underground structure and surrounding ground: Evaluation of the failure of the daikai station. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131 (12), 1522–1533.
- Jiang, Y., Wang, C., & Zhao, X. (2010). Damage assessment of tunnels caused by the 2004 mid niigata prefecture earthquake using hayashi's quantification theory type ii. *Natural Hazards*, 53(3), 425–441.
- Konagai, K., Takatsu, S., Kanai, T., Fujita, T., Ikeda, T., & Johansson, J. (2009). Kizawa tunnel cracked on 23 october 2004 mid-niigata earthquake: An example of earthquake-induced damage to tunnels in active-folding zones. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29, 394–403.
- Kuhlemeyer, R. L., & Lysmer, J. (1973). Finite element method accuracy for wave propagation problems. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 99(5), 421–427.
- Li, T. (2011). Damage to mountain tunnels related to the wenchuan earthquake and some suggestions for aseismic tunnel construction. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 71, 297–308.

## Βιβλιογραφία

- Mair, R. J. (1993). Unwin memorial lecture 1992-developments in geotechnical engineering research: Application to tunnels and deep excavation. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering*, 97(1), 27–41.
- O' Rourke, T. D., Goh, S. H., Menkiti, C. O., & Mair, R. J. (2001). Highway tunnel performance during the 1999 duzce earthquake. *XV International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical*, 2, 1365–1368.
- Owen, G. N., & Scholl, R. E. (1981). *Earthquake engineering of large underground structures*. Washington, D.C. : The Division ; Springfield, Va. : Available through NTIS.
- Penzien, J. (2000). Seismically induced racking of tunnel linings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 29(5), 683–691.
- Penzien, J., & Wu, C. L. (1998). Stresses in linings of bored tunnels. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 27(3), 283–300.
- Pitilakis, K., & Tsinidis, G. (2013). Performance and seismic design of underground structures. *Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering*, 279–340.
- Reiter, L. (1990). *Earthquake hazard analysis - issues and insights*. Columbia University Press, New York.
- Sharma, S., & Judd, W. R. (1991). Underground opening damage from earthquakes. *Engineering Geology*, 30, 263–276.
- The si-eng. (2021). Retrieved April 2023, from <https://www.si-eng.org/post/mohr-coulomb-model-for-soil-when-not-to-use-it>
- Soil models-flac. (2018). Retrieved April 2023, from <https://soilmodels.com/flac/>
- Towhata, I. (2008). *Geotechnical earthquake engineering*. Springer Berlin, Heidelberg.
- Tsinidis, G., de Silva, F., Anastasopoulos, I., Bilotta, E., Bobet, A., Hashash, Y. M. A., He, C., Kampas, G., Knappett, J., Madabhushi, G., Nikitas, N., Pitilakis, K., Silvestri, F., Viggiani, G., & Fuentes, R. (2020). Seismic behaviour of tunnels: From experiments to analysis. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 99, 103334.
- Tsinidis, G., Karatzetzou, A., Stefanidou, S., & Markogiannaki, O. (2022). Developments in seismic vulnerability assessment of tunnels and underground structures. *Geotechnics 2022*, 2, 209–249.

## Βιβλιογραφία

- Tsinidis, G., Pitilakis, K., Madabhushi, G., & Heron, C. (2015). Dynamic response of flexible square tunnels: Centrifuge testing and validation of existing design methodologies. *Geotechnique*, *65*(5), 401–417.
- Tsinidis, G. (2015). *On the seismic behaviour and design of tunnels* (PhD thesis). Aristotle University of Thessaloniki.
- Wang, J. N. (1993). *Seismic design of tunnels, a state-of-the-art approach*. Parsons Brinckerhoff Inc., Monograph 7, New York.
- Wang, J. M., & Litehiser, J. J. (1985). The distribution of earthquake damage to underground facilities during the 1976 tang-shan earthquake. *Earthquake Spectra*, *1*(4), 741–757.
- Wang, W. L., Wang, T. T., Su, J. J., Lin, C. H., Seng, C. R., & Huang, T. H. (2001). Assessment of damage in mountain tunnels due to the taiwan chi-chi earthquake. *Tunnelling and Underground Space Technology*, *16*, 133–150.
- Zhang, X., Jiang, Y., & Sugimoto, S. (2018). Seismic damage assessment of mountain tunnel: A case study on the tawarayama tunnel due to the 2016 kumamoto earthquake. *Tunnelling and Underground Space Technology*, *71*, 138–148.
- ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. (2021). Retrieved May 2023, from <https://www.ametro.gr/>
- Ελληνική Αρχή Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών - Ε.Α.Γ.Μ.Ε. (2019). Retrieved April 2023, from <https://gaia.igme.gr/portal/apps/webappviewer/index.html?id=61dc7b67790944a198d4dbdc876d1a3c>
- Καλλιόγλου, Π. (2022). Παραμένουσα Αντοχή, Ειδικά Θέματα Γεωτεχνικής Μηχανικής, Σημειώσεις Μαθήματος. Retrieved March 2023, from <https://eclass.uth.gr/>
- Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας-Υπουργείο Κλιματικής Κρίσης και Πολιτικής Προστασίας. (2003). Retrieved April 2023, from <https://www.oasp.gr/node/87>
- Τσινίδης, Γ. (2022). Applications FLAC-2D, Υπολογιστική Γεωτεχνική Μηχανική, Σημειώσεις μαθήματος. Retrieved April 2023, from <https://eclass.uth.gr/>
- Τσινίδης, Γ., & Πιτιλάκης, Κ. (2011). Γενική παρουσίαση του γραφικού περιβάλλοντος του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS v6.9-1.