

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ



ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΑΝΤΩΝΙΟΥ ΡΟΥΜΠΟΥ

**ΜΕΛΕΤΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΟΔΙΚΩΝ ΚΑΙ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΩΝ ΕΠΙΧΩΜΑΤΩΝ**  
**ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΙΟΓΚΩΜΕΝΗΣ ΠΟΛΥΣΤΕΡΙΝΗΣ (EPS)**  
**ΥΠΟ ΣΤΑΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ.**

Επιβλέπων: ΜΑΡΙΝΟΣ ΚΑΤΤΗΣ Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.  
Συνεπιβλέπων: ΠΡΟΔΡΟΜΟΣ ΨΑΡΡΟΠΟΥΛΟΣ Ε.ΔΙ.Π. Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2022



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ευστάθεια των εδαφικών πρानών αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα αντικείμενα της γεωτεχνικής μηχανικής, δεδομένου ότι η πιθανότητα αστοχίας τους είναι δυνατόν να οδηγήσει σε καταστροφές στοιχείων του φυσικού ή και τεχνητού περιβάλλοντος, απώλειες περιουσιών ή ακόμη και ανθρώπινων ζωών.

Η ευστάθεια ενός πρानού καθορίζεται από πολλές διαφορετικές παραμέτρους, καθεμία από τις οποίες επιδρά με διαφορετικό τρόπο. Η μελέτη της ισορροπίας ενός πρानού είναι απαραίτητο να πραγματοποιείται τόσο υπό στατικές συνθήκες, όσο και σεισμικές. Συχνά, η επίδραση των δυνάμεων βαρύτητας αποτελεί τον καθοριστικό παράγοντα για την αστοχία ενός πρानού, ενώ ο συνδυασμός τους με ένα σεισμικό γεγονός μπορεί να έχει καταστροφικές συνέπειες. Παράλληλα, εξίσου σημαντική για την ευστάθεια, ή μη, ενός πρανού κρίνεται η παρουσία του νερού, είτε ως υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας στην περίπτωση των χερσαίων πρανών, είτε ως επιφανειακός στην περίπτωση των υποθαλάσσιων.

Η παρουσία των πρανών στα περισσότερα τεχνικά έργα σε συνδυασμό με τις καταστροφικές συνέπειες που μπορεί να έχει η αστοχία τους, έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη πολλών τεχνικών μελέτης της ευστάθειας τους, καθεμία από τις οποίες μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διαφορετικές περιπτώσεις. Ως μέτρο εκτίμησης της ευστάθειας ενός πρανού έχει τεθεί ο συντελεστής ασφαλείας, η τιμή του οποίου υπολογίζεται από την πλειοψηφία των μεθόδων ανάλυσης. Οι σημαντικότερες από αυτές είναι η αναλυτική μέθοδος, όπου χρησιμοποιούνται αναλυτικές εξισώσεις για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας και η αριθμητική μέθοδος, όπου η ανάλυση συνήθως γίνεται με τη χρήση της μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων.

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας μελετήθηκε η επίδραση της βαρύτητας και των σεισμικών διεγέρσεων ως προς την ευστάθεια των πρανών επιχωμάτων σε συγκοινωνιακά έργα, καθώς επίσης αξιολογήθηκε η χρήση εναλλακτικού υλικού διογκωμένης πολυστερίνης (EPS) ως υλικού κατασκευής. Για την εκπόνηση των υπολογισμών ελέγχου, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Slide 2D της εταιρίας Rocscience που υπολογίζει τον συντελεστή ασφαλείας και την πιθανή επιφάνεια αστοχίας με την αναλυτική μέθοδο Bishop.

## **ABSTRACT**

Slope stability is one of the most important object of geotechnical engineering, since the possibility of fall can result natural disaster, loss of human properties and lives.

The stability of slope is determined by different factors, every single one has a different way of effects. It is always necessary that the slope stability study involves both static and pseudostatic analyses. Static forces are usually considered to be the main factor contributing to a landslide while seismic acceleration is the triggering factor in most cases. At the same time, the presence of water either as underground water table in case of onshore slopes or as surface water table in case of submarine slopes, is considered to be an equally important factor to the stability of a slope.

Slope presence in almost every infrastructure's environment combined with the catastrophic consequences that its failure might have, has led to the development of many stability analysis techniques each of which has application in different case studies. Safety factor is considered to be the measure of slope stability and is calculated in almost every technique. The most frequently used methods are the analytical method that uses analytical equations to calculate the safety factor and the numerical method which uses Finite Elements for the stability analysis.

The present thesis focuses on the effects of gravity and seismic events on embankment slopes, on transport projects, also was evaluated the use of EPS as construction material. For the preparation of calculations was used the Slide 2D software of Rocscience, which calculate safety factor and possible failure surface with analytical method of Bishop.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους επιβλέποντες καθηγητές μου κ. Μαρίνο Καπτή και κ. Πρόδρομο Ψαρρόπουλο, που συνέβαλαν με τις γνώσεις και την επιστημονική τους κατάρτιση στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης την οικογένεια και τους φίλους μου για την αγάπη και τη στήριξη που μου έχουν προσφέρει όλα αυτά τα χρόνια.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	I
ABSTRACT .....	II
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	III
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ .....	IV
<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΠΡΑΝΩΝ .....</b>	<b>3</b>
2.1. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΤΩΝ ΠΡΑΝΩΝ.....	4
2.2. ΠΙΘΑΝΟΙ ΤΡΟΠΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ .....	7
2.3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ .....	12
2.4. ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ .....	13
2.5. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ .....	19
2.6. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΝΑΛΥΣΗΣ.....	20
2.7. ΈΛΕΓΧΟΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΠΡΑΝΩΝ.....	21
<b>3. ΧΡΗΣΗ ΔΙΟΓΚΩΜΕΝΗΣ ΠΟΛΥΣΤΕΡΙΝΗΣ (EPS) ΣΕ ΤΕΧΝΙΚΑ ΕΡΓΑ.....</b>	<b>25</b>
3.1. ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΟΓΚΩΜΕΝΗΣ ΠΟΛΥΣΤΕΡΙΝΗΣ (EPS).....	26
3.2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΔΙΟΓΚΩΜΕΝΗΣ ΠΟΛΥΣΤΕΡΙΝΗΣ (EPS) .....	27
3.3. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΔΙΟΓΚΩΜΕΝΗΣ ΠΟΛΥΣΤΕΡΙΝΗΣ (EPS) ΣΕ ΠΡΑΝΗ ΕΠΙΧΩΜΑΤΩΝ .....	29
3.4. ΣΤΑΔΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΠΡΑΝΩΝ ΕΠΙΧΩΜΑΤΩΝ ΑΠΟ EPS.....	30
3.5. ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΣ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΤΩΝ ΜΠΛΟΚ EPS.....	33
3.6. ΧΡΟΝΟΣ ΖΩΗΣ .....	37
3.7. ΠΡΟΤΥΠΑ – ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ .....	38
<b>4. ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΟΔΙΚΟΥ ΕΠΙΧΩΜΑΤΟΣ.....</b>	<b>39</b>
4.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ ΚΑΙ ΜΕΤΡΩΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ .....	40
4.2. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ.....	44
4.3. ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΕΠΙΧΩΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΕΔΑΦΙΚΟ ΥΛΙΚΟ .....	45
4.4. ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΕΠΙΧΩΜΑΤΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΟΥ ΑΠΟ ΔΙΟΓΚΩΜΕΝΗ ΠΟΛΥΣΤΕΡΙΝΗ (EPS) ΚΑΙ ΕΔΑΦΙΚΟ ΥΛΙΚΟ .....	51
4.5. ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑ .....	56
<b>5. ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΟΥ ΕΠΙΧΩΜΑΤΟΣ .....</b>	<b>59</b>
5.1. ΜΕΛΕΤΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΩΝ ΔΟΝΗΣΕΩΝ .....	60
5.2. ΟΙ ΤΥΠΟΙ ΤΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ ΚΑΙ ΟΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥΣ .....	61
5.3. ΑΡΧΕΣ ΚΑΙ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ .....	64
5.4. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ.....	67
5.5. ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑ .....	88
<b>6. ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....</b>	<b>91</b>
<b>7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>92</b>

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο την διερεύνηση της ευστάθειας πρανών επιχωμάτων σε συγκοινωνιακά έργα τόσο υπό στατικές, όσο και υπό ψευδοστατικές συνθήκες φόρτισης. Η διερεύνηση διεξάγεται αρχικά επί πρανών δομημένων από συνήθη εδαφικά υλικά, ενώ στην συνέχεια επιχειρείται η διερεύνηση επί πρανών δομημένων από μπλοκ διογκωμένης πολυστερίνης EPS και αξιολογείται η χρήση τους ως εναλλακτικού υλικού κατασκευής επιχωμάτων σε οδικά ή/και σιδηροδρομικά έργα.

Με τον όρο “πρανές” νοείται ο κεκλιμένος, φυσικός ή τεχνητός, σχηματισμός του εδάφους.

Τα πρανή χαρακτηρίζονται ως φυσικά, όταν ο σχηματισμός τους προκύπτει σταδιακά κατόπιν φυσικών διεργασιών οι οποίες εκτυλίσσονται κατά την πάροδο του χρόνου και ως τεχνητά, όταν έχουν διαμορφωθεί κατόπιν ανθρώπινων παρεμβάσεων στο φυσικό έδαφος για την εξυπηρέτηση διαφόρων σκοπών, και κυρίως την κατασκευή τεχνικών έργων.

Ανάλογα με το περιβάλλον στο οποίο ευρίσκονται, διακρίνονται σε χερσαία και θαλάσσια, όπως π.χ. θωράκιση λιμενικών έργων με φυσικούς ή τεχνητούς ογκόλιθους, αποσπασμένοι κυματοθραύστες κλπ.

Τα πρανή, είτε φυσικά είτε τεχνητά, είναι δυνατόν να διακριθούν ανάλογα με το μέγεθος τους, δηλαδή τις φυσικές τους διαστάσεις, σε δύο κατηγορίες. Τα απειρομήκη (π.χ. η συνεχής πλαγία ενός λόφου ομοιόμορφης κλίσης) και τα πεπερασμένα, όλα εκείνα τα οποία χαρακτηρίζονται από περιορισμένες και σαφείς διαστάσεις και ιδιαίτερα διακριτή στέψη (φρύδι).

Οι συνηθέστερα συναντώμενες μορφές τεχνητών πρανών είναι τα πρανή ορυγμάτων και τα πρανή επιχωμάτων.

Ειδικότερα τα πρανή των επιχωμάτων τα οποία αποτελούν και θέμα τις παρούσας διπλωματικής εργασίας, διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με τα υλικά κατασκευή τους. Τα κατασκευασμένα από αμιγώς εδαφικά υλικά (γαιώδη, γαιωημιβραχώδη και βραχώδη δομημένα κατόπιν κατάλληλης διαλογής και κατεργασίας του υλικού) και εκείνα τα οποία κατασκευάζονται με συνδυασμό φυσικών και τεχνητών υλικών (π.χ. γεωφάσματα, γεωπλέγματα, λιθοπληρωμένα συρματοκιβώτια, μηχανικά σταθεροποιημένα επιχώματα, ελαφρά υλικά όπως διογκωμένη πολυστερίνη (EPS) κλπ). Δεδομένου ότι, όπως προαναφέρθηκε, αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί ο έλεγχος της ευστάθειας

πρανών επιχωμάτων, με τους όρους “πρανές” ή “πρανή” θα νοούνται στη συνέχεια το πρανές ή τα πρανή, αντίστοιχα, επιχωμάτων.

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο την διερεύνηση της ευστάθειας πρανών επιχωμάτων δομημένων από εδαφικά υλικά σε συγκοινωνιακά έργα, τόσο υπό στατικές, όσο και υπό ψευδοστατικές συνθήκες ως επίσης και αξιολογείται η χρήση διογκωμένης πολυστερίνης (EPS) ως εναλλακτικού υλικού κατασκευής επιχωμάτων.

Στο επόμενο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζονται αναλυτικά, οι παράγοντες που επηρεάζουν την ευστάθεια, οι πιθανοί τρόποι αστοχίας των πρανών με πραγματικά παραδείγματα, οι μέθοδοι ελέγχου της ευστάθειας, καθώς επίσης και η παρακολούθηση παραμορφώσεων/μικρομετακινήσεων των πρανών, ως μέτρο πρόληψης σοβαρών αστοχιών.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά της διογκωμένης πολυστερίνης (EPS) και γίνεται αναφορά στο τρόπο εφαρμογής του υλικού σε επιχώματα. Παρατίθενται επίσης στοιχεία για τον τρόπο εφαρμογής του υλικού και το χρόνο ζωής του. Τέλος, αναφέρονται τα πρότυπα και οι κανονισμοί που προβλέπονται για την χρήση του υλικού σε τεχνικά έργα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά σε μία πραγματική γεωτεχνική μελέτη που εκπονήθηκε το 2008, με σκοπό την επίλυση προβλημάτων ευστάθειας που παρουσιάστηκαν κατά την κατασκευή του οδικού άξονα ΠΑΘΕ στην περιοχή των Θερμοπυλών. Σκοπό του κεφαλαίου αποτελεί η περιγραφή των δεδομένων της μελέτης, δηλαδή ο εντοπισμός των αιτιών και ο τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος το οποίο εμφανίστηκε κατά την κατασκευή των έργων, καθώς και η περαιτέρω διερεύνηση του θέματος με την εξέταση περαιτέρω παραγόντων. Γίνεται επίσης αξιολόγηση της λύσης που τελικά προτείνεται από την γεωτεχνική μελέτη, για χρήση διογκωμένης πολυστερίνης (EPS) ως υλικό κατασκευής του οδικού επιχώματος.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην διδακτορική διατριβή του κ. Αλέξανδρου Λυρατζάκη με θέμα την μείωση των δονήσεων που παράγονται από τα τρένα υψηλών ταχυτήτων, στα σιδηροδρομικά επιχώματα με την χρήση διογκωμένης πολυστερίνης (EPS). Στο κεφάλαιο αυτό ελέγχεται η ευστάθεια σιδηροδρομικού επιχώματος τόσο υπό στατικές όσο και υπό ψευδοστατικές συνθήκες. Συγκεκριμένα, εξετάζονται πέντε διαφορετικές διατάξεις δόμησης των μπλοκ EPS του επιχώματος, όπως αυτές προτείνονται από την διδακτορική διατριβή του κ.Αλέξανδρου Λυρατζάκη.



## 2. ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΠΡΑΝΩΝ

Η ευστάθεια των εδαφικών πρανών αποτελεί σημαντικό αντικείμενο μελέτης για την κατασκευή των τεχνικών έργων τόσο σε οικονομικό επίπεδο όσο και σε επίπεδο ασφάλειας.

Ένα πρανές οποιασδήποτε φύσης, μορφής και είδους, θεωρείται ότι ευρίσκεται υπό συνθήκες ευστάθειας όταν τα βαρυτικά φορτία τα οποία δρουν στο σύνολο της μάζας του είναι μικρότερα της διατμητικής αντοχής, η οποία είναι διαθέσιμη τόσο στη βάση έδρασής του όσο και σε κάθε σημείο του σώματος του. Σε περίπτωση κατά την οποία τα ασκούμενα βαρυτικά φορτία υπερβούν την διατιθέμενη διατμητική αντοχή σε κάποια θέση του πρανούς, τότε επέρχεται διατμητική παραμόρφωση η οποία μπορεί να εξελιχθεί σε εκτεταμένη κινηματική ενεργοποίηση της μάζας του επιχώματος και σε τοπική ή συνολική αστοχία.

Αντικείμενο μελέτης της ευστάθειας ενός πρανούς αποτελεί η διερεύνηση της συμπεριφοράς του υπό την δράση των εξωτερικών παραγόντων όπως:

- η βαρύτητα
- η δυναμική φόρτιση εξαιτίας σεισμικής διέγερσης
- η δυναμική φόρτιση εξαιτίας κινητών φορτίων
- η επίδραση υπόγειου νερού
- η υδροστατική πίεση (σε περιπτώσεις φραγμάτων)

Οι παράγοντες και ο τρόπος με τον οποίο αυτοί επηρεάζουν την ευστάθεια των πρανών, αναλύονται εκτενέστερα στη συνέχεια.

### • Ευστάθεια πρανών υπό στατικές συνθήκες

Οι δυνάμεις βαρύτητας αποτελούν έναν από τους βασικότερους παράγοντες οι οποίοι καθορίζουν την ευστάθεια ενός πρανούς. Η δύναμη της βαρύτητας αναλύεται σε δύο συνιστώσες, οι οποίες αναφέρονται ως διατμητική και ορθή τάση αντίστοιχα. Υπό στατικές συνθήκες, όσο η διατμητική αντοχή του εδαφικού υλικού είναι μεγαλύτερη της διατμητικής τάσης που ασκείται στο πρανές, τότε θεωρείται πως ευσταθεί. Εναλλακτικά, αναμένεται αστοχία του πρανούς.

Η αστοχία είναι δυνατόν να προκύψει είτε με μείωση της διατμητικής αντοχής, η οποία οφείλεται σε ανάλογη μεταβολή των ιδιοτήτων του εδαφικού υλικού, είτε με αύξηση της διατμητικής τάσης που ασκείται λόγω της βαρύτητας.

Οι ιδιότητες του υλικού οι οποίες καθορίζουν την διατμητική αντοχή του είναι η γωνία εσωτερικής τριβής και η συνοχή, μείωση των οποίων οδηγεί σε αντίστοιχη μείωση της διατμητικής αντοχής. Παράλληλα, βασικός παράγοντας ο οποίος καθορίζει την

διατμητική τάση η οποία ασκείται στο πρανές λόγω της βαρύτητας είναι η γωνία κλίσης, για την οποία ισχύει ότι όσο μεγαλύτερη είναι αυτή, τόσο μεγαλύτερη είναι η διατμητική τάση.

- Ευστάθεια πρανών έναντι σεισμικών φορτίσεων

Οι σεισμικές φορτίσεις αποτελούν σημαντικό εξωτερικό παράγοντα ο οποίος δύναται να οδηγήσει στην αστοχία τόσο των φυσικών, όσο και των τεχνητών πρανών. Ωστόσο, τα τεχνητά πρανή, δεδομένου ότι έχουν μελετηθεί και κατασκευαστεί ακολουθώντας συγκεκριμένες προδιαγραφές οι οποίες προβλέπουν αυτές τις συνθήκες, παρουσιάζουν ικανοποιητικότερη συμπεριφορά και έχουν μεγαλύτερη ευστάθεια έναντι των φυσικών, χωρίς ωστόσο να αποκλείεται η αστοχία τους σε περίπτωση σεισμού.

Οι σεισμικές δονήσεις αποτελούν ένα φαινόμενο που μπορεί να επηρεάσει την ευστάθεια ενός πρανούς με δύο τρόπους. Η αστοχία υπό την επίδραση σεισμικών δονήσεων μπορεί να προκληθεί είτε με μείωση της διατμητικής αντοχής, είτε με αύξηση των διατμητικών τάσεων. Η μείωση της διατμητικής αντοχής προκύπτει συνήθως λόγω αύξησης της πίεσης νερού στους πόρους του εδαφικού υλικού. Είναι πιθανόν, κατά τη διάρκεια της σεισμικής δόνησης οι πόροι του εδάφους να συμπιεστούν, με αποτέλεσμα την μείωση των κενών μεταξύ τους και συνεπώς την αύξηση των πιέσεων του νερού την μείωση της ενεργητικής τάσης και συνεπώς την μείωση της διατμητικής αντοχής. Εάν η μείωση της διατμητικής αντοχής είναι αρκετά μεγάλη ώστε αυτή να καταστεί μικρότερη των διατμητικών τάσεων, τότε επέρχεται αστοχία στο πρανές. Αντίστροφα, είναι δυνατόν η διατμητική αντοχή του υλικού να παραμείνει αμετάβλητη και οι διατμητικές τάσεις οι οποίες εφαρμόζονται στο πρανές να αυξηθούν. Κατά τη διάρκεια μιας σεισμικής δόνησης προκαλούνται τόσο οριζόντιες όσο και κατακόρυφες επιταχύνσεις, οι οποίες παράγουν αντίστοιχα ορθές και διατμητικές τάσεις. Η προσθήκη αυτών των διατμητικών τάσεων στις ήδη υπάρχουσες επιτείνουν την πρόκληση αστοχίας του πρανούς, εάν το σύνολο αυτών υπερβεί τη διαθέσιμη διατμητική αντοχή του εδάφους.

## **2.1. Παράγοντες που επηρεάζουν την ευστάθεια των πρανών**

Οι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν την ευστάθεια ενός πρανούς διακρίνονται σε δύο κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν εκείνοι οι οποίοι σχετίζονται με το φυσικό περιβάλλον, ενώ στην δεύτερη, εντάσσονται οι παράγοντες οι οποίοι σχετίζονται με ανθρώπινες δραστηριότητες. Ωστόσο, κατά κανόνα η αστοχία ενός πρανούς δεν οφείλεται σε ένα μοναδικό παράγοντα, αλλά σε για συνδυασμό περισσότερων.

Όπως αναφέρεται, ένας από τους κυριότερους παράγοντες που επηρεάζουν την ευστάθεια ενός πρανούς, είναι η βαρύτητα, η οποία ορίζει τις διατμητικές τάσεις στο εσωτερικό του πρανούς και τείνει μεταβάλλει την μορφή του, εάν αυτές υπερβούν τη διατμητική αντοχή του υλικού από το οποίο αποτελείται. Παράλληλα, οι ιδιότητες του εδαφικού υλικού καθορίζουν σε σημαντικό βαθμό την ισορροπία του πρανούς. Ειδικότερα, η συνοχή ( $c$ , kPa) και η γωνία εσωτερικής τριβής ( $\phi$ , deg) αποτελούν τις ιδιότητες οι οποίες επηρεάζουν στον μεγαλύτερο βαθμό την ευστάθεια, καθώς οι τιμές τους καθορίζουν τη διατμητική αντοχή του υλικού. Μεγαλύτερης συνοχή υλικού συνεπάγεται μεγαλύτερη ευστάθεια του πρανούς. Αντίστοιχα, υψηλότερη τιμή γωνίας εσωτερικής τριβής συνεπάγεται μεγαλύτερη ευστάθεια.

Η κλίση διαμόρφωσης ενός πρανούς ( $u:\beta$ ), εφόσον για κάποιους λόγους επιλέγει με τιμή μεγαλύτερη της ενδεδειγμένης, αναμένεται να αποτελέσει αιτία αστοχίας, συμπαρασύροντας ανεξέλεγκτα σε κατάρρευση εδαφικές μάζες μεγαλύτερης εκτάσεως και μάλιστα σε χρόνο απρόβλεπτο, με ότι τούτο συνεπάγεται τόσο για την ασφάλεια τυχόν διερχομένων, όσο και για την ακεραιότητα του έργου (π.χ. οδικό όρυγμα ή επίχωμα διαμορφωμένα με κλίσεις ισχυρότερες των ενδεδειγμένων)

Η κλίση του κάθε πρανούς, σε συνδυασμό με τις δυνάμεις βαρύτητας που ασκούνται σε αυτό καθώς και των τυχόν υδροστατικών πιέσεων, είναι δυνατόν να οδηγήσει σε αστοχία, ειδικά στις περιπτώσεις που αυτή είναι ισχυρή. Η κλίση αποτελεί ένα παράγοντα ο οποίος επηρεάζεται τόσο από φυσικές διεργασίες που συμβαίνουν κατά την πάροδο του χρόνου (φυσικά πρανή), όσο και από ανθρώπινες δραστηριότητες, όπως τα έργα οδοποιίας, και γενικότερα τα τεχνικά έργα.

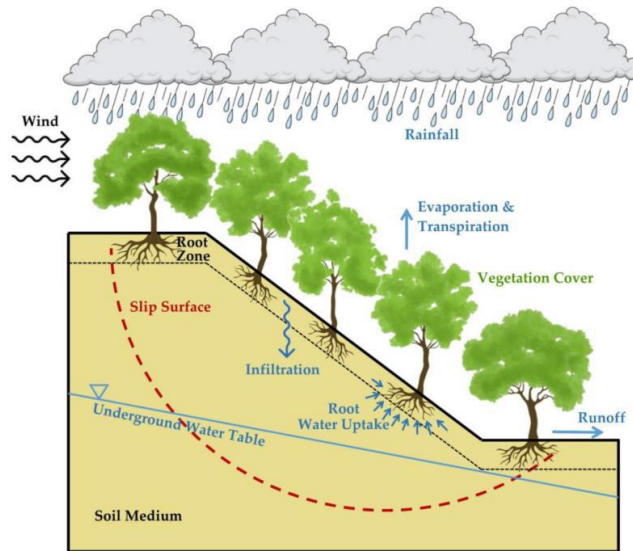
Τέλος, οι φορτίσεις οι οποίες αναπτύσσονται στο έδαφος κατά την διάρκεια σεισμικών δονήσεων, αποτελούν επίσης παράγοντα ο οποίος επηρεάζει σημαντικά την ευστάθεια ενός πρανούς, αφού είναι ικανές είτε να μειώσουν την συνοχή του εδαφικού υλικού και συνεπώς την διατμητική αντοχή αυτού, είτε να προκαλέσουν αύξηση των διατμητικών τάσεων των ασκούμενων σε αυτό.

Όσον αφορά τους ανθρωπογενείς παράγοντες, συχνότερες αιτίες οι οποίες οδηγούν σε αστοχία ένα φυσικό-εδαφικό πρανές αποτελούν οι επεμβάσεις στην επιφάνεια αυτού, με σκοπό κυρίως την κατασκευή τεχνικών έργων (κτιριακών, συγκοινωνιακών κ.λ.π.) ή άλλων επεμβάσεων όπως αποψίλωσεις δασών ή δασικών εκτάσεων. Τα κατολισθητικά φαινόμενα λόγω των ανωτέρω ενεργειών είναι δυνατόν να αποφευχθούν, ή τουλάχιστον να ελεγχθούν, με προμελετημένες παρεμβάσεις επί του φυσικού εδάφους και κατάλληλες τεχνικές.

Το νερό διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην ευστάθεια των πρανών, καθώς μειώνει τη διατμητική αντοχή του εδαφικού υλικού με πολλούς τρόπους. Μια έντονη βροχόπτωση ή η τήξη των πάγων ενέχουν κινδύνους, όπως η ύψωση του υδροφόρου ορίζοντα, οι οποίοι μπορούν να οδηγήσουν σε κατολίσθηση ένα εδαφικό πρανές. Αρχικά, η διείσδυση μεγάλης ποσότητας νερού στο εδαφικό υλικό επιφέρει αύξηση του βάρους αυτού και συνεπώς των δυνάμεων βαρύτητας που ασκούνται. Όταν οι διατμητικές τάσεις λόγω των βαρυτικών δυνάμεων υπερβούν την διατμητική αντοχή του εδαφικού υλικού, το πρανές αστοχεί. Παράλληλα, το νερό που διεισδύει στο έδαφος μπορεί να προκαλέσει ύψωση του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα και συγχρόνως αύξηση της πίεσης στους πόρους του, με αποτέλεσμα τη μείωση της διατμητικής αντοχής του υλικού, με συνέπεια το πρανές να οδηγηθεί σε αστοχία. Επιπρόσθετα, ανύψωση του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα και συνεπώς αύξηση του όγκου του νερού που ενυπάρχει στο έδαφος, οδηγεί σε μείωση αφενός της συνοχής και αφετέρου της γωνίας εσωτερικής τριβής μεταξύ των κόκκων αυτού. Οι δυο αυτές ιδιότητες του εδαφικού υλικού καθορίζουν σε σημαντικό βαθμό την διατμητική αντοχή του. Η μείωση των τιμών τους συνεπάγεται μείωση της διατμητικής αντοχής του υλικού, γεγονός το οποίο καθιστά το πρανές επιρρεπέστερο σε αστοχία. Τέλος, η επιφανειακή ροή του νερού των βροχοπτώσεων είναι δυνατόν να προκαλέσει διάβρωση του εδάφους, μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο την διατμητική αντοχή του υλικού, ή μεταβάλλοντας τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πρανούς. Εάν η εν λόγω μείωση είναι μεγάλη ή η αλλαγή της γεωμετρίας έντονη, μπορεί να προκληθεί αστοχία.

Η κλιματική αλλαγή αποτελεί και αυτή ένα παράγοντα ο οποίος διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην ευστάθεια πρανών, ιδιαίτερα τα τελευταία έτη. Βασικές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής είναι η ραγδαία αύξηση της θερμοκρασίας, η αλλαγή στην ένταση και τη συχνότητα των βροχοπτώσεων και των χιονοπτώσεων, αλλά και οι καύσωνες, ως επίσης και οι ξηρασίες. Όσον αφορά τις κατακρημνίσεις η συχνότητα, η διάρκεια και η ένταση, αποτελούν κύριους παράγοντες που δύνανται να επηρεάσουν την ισορροπία ενός πρανούς. Κατά τα τελευταία έτη παρατηρούνται εντονότερες βροχοπτώσεις, οι οποίες ωστόσο είναι μικρότερες σε διάρκεια και πιο σπάνιες συγκριτικά με παλαιότερα έτη. Η επίδραση του βρόχινου νερού στην ευστάθεια ενός πρανούς εξαρτάται από τον συνδυασμό πολλών παραγόντων, όπως η συνοχή, η γωνία εσωτερικής τριβής του υλικού και η διηθητικότητα του, αλλά και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά αυτού, όπως το ύψος και η γωνία κλίσης. Σύμφωνα με τους Merat et al. (2018), εδαφικά υλικά με υψηλότερες τιμές συνοχής και γωνίας εσωτερικής τριβής παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευστάθεια κατά τη διάρκεια μιας ισχυρής βροχόπτωσης. Ωστόσο, ο συντελεστής ασφαλείας παρουσιάζει μείωση όσο αυξάνεται

το ύψος και η γωνία κλίσης του πρανού. Παράλληλα, πρανή που αποτελούνται από εδαφικά υλικά υψηλής διηθητικότητας θεωρούνται λιγότερο ευσταθή από άλλα, αφού παρατηρείται ταχεία μείωση του συντελεστή ασφαλείας.



Εικόνα 2.1: Επίδραση βροχόπτωσης στην ευστάθεια εδαφικών πρανών

## 2.2. Πιθανοί τρόποι αστοχίας πρανών

Η αστοχία ενός πρανού συνεπάγεται καθοδική κίνηση εδαφικών υλικών, η οποία αποκαλείται κατολίσθηση. Στην πράξη διακρίνονται πολλές μορφές κατολισθήσεων. Ο Varnes το 1978, παρουσίασε μια ολοκληρωμένη ταξινόμηση των κατολισθήσεων λαμβάνοντας υπόψη δύο βασικά κριτήρια, τον τύπο της μετακίνησης και το είδος του μετακινούμενου υλικού.

Με βάση τον τύπο της μετακίνησης οι κατολισθήσεις κατατάσσονται σε πέντε κατηγορίες: καταπτώσεις, ανατροπές, ολισθήσεις, πλευρικές εξαπλώσεις και ροές.

Αντίστοιχα, λαμβάνοντας υπόψιν το είδος του μετακινούμενου υλικού, διακρίνονται στις μετακινήσεις του βραχώδους υπόβαθρου, των χονδρόκοκκων εδαφικών σχηματισμών (κορήματα) και των λεπτόκοκκων εδαφικών σχηματισμών (γαίες).

Στον ακόλουθο Πίνακα 2.1. παρατίθενται οι συνδυασμοί μεταξύ όλων των τύπων μετακίνησης (κατολίσθησης) και κατολισθαινόντων εδαφικών υλικών κατά Varnes.

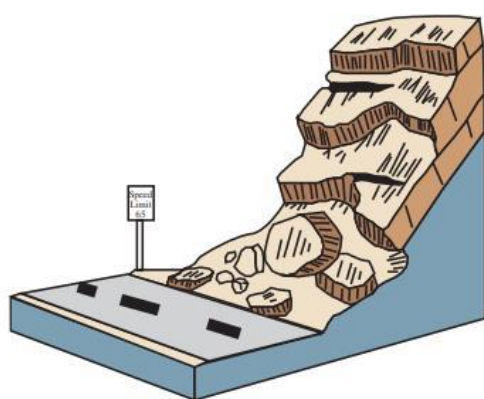
Τύπος μετακίνησης	Τύπος Υλικού		
	Βραχώδες υπέδαφος	Εδάφη	
		Χονδρόκοκκα	Λεπτόκοκκα

Κατάπτωση		Κατάπτωση Βράχων	Κατάπτωση κορημάτων	Κατάπτωση γαιών
Ανατροπή		Ανατροπή βράχων	Ανατροπή κορημάτων	Ανατροπή γαιών
Ολίσθηση	Περιστροφική Ολίσθηση	Περιστροφική ολίσθηση βραχίων	Περιστροφική ολίσθηση κορημάτων	Περιστροφική ολίσθηση γαιών
	Μεταθετική ολίσθηση	Μεταθετική ολίσθηση βραχίων	Μεταθετική ολίσθηση κορημάτων	Μεταθετική ολίσθηση γαιών
Ροή		Ροή βράχων	Ροή κορημάτων	Ροή γαιών
Πλευρική εξάπλωση		Εξάπλωση βράχων	Εξάπλωση κορημάτων	Εξάπλωση γαιών
Σύνθετη μετακίνηση		Συνδυασμός δύο ή περισσότερων κύριων τύπων μετακίνησης		

Πίνακας 2.1: Ταξινόμηση κατολισθήσεων με βάση το είδος μετακίνησης (Varnes, 1978)

### Κατάπτωση (Fall)

Πρόκειται για αποκόλληση τμήματος συνεκτικού εδάφους ή βράχου από ένα απότομο πρανές κατά μήκος μιας επιφάνειας με μικρή έως μηδενική διατμητική αντοχή. Η μετακίνηση του εδάφους στην περίπτωση αυτή είναι εξαιρετικά γρήγορη, το υλικό εκτελεί ελεύθερη πτώση με κύλιση ή αναπήδηση.



(α)

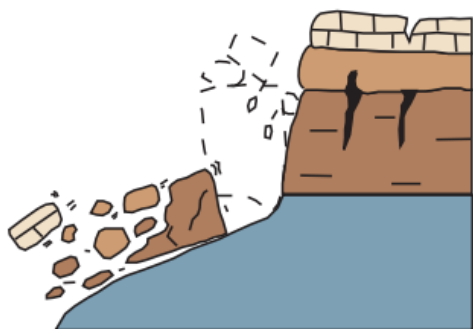


(β)

Εικόνα 2.2: (α) Σχηματική απεικόνιση κατάπτωσης βράχων,  
(β) Κατάπτωση βράχων στην Λακωνία

### Ανατροπή (Topple)

Πρόκειται για την προς τα εμπρός περιστροφή της αστοχούσας μάζας γύρω από ένα σημείο που θεωρείται χαμηλότερα του κέντρου βάρους αυτής. Η μετακίνηση του εδάφους σε πρώτο στάδιο γίνεται αργά, ενώ σταδιακά ο ρυθμός αυξάνεται σημαντικά, έως ότου επέλθει η αστοχία. Κύρια αίτια που οδηγούν μια εδαφική μάζα στην ανατροπή είναι τόσο οι δυνάμεις βαρύτητας, όσο και η επίδραση που έχουν οι βροχοπτώσεις, και γενικότερα η ύπαρξη νερού, στις ρωγμές του πρσανούς.



(α)



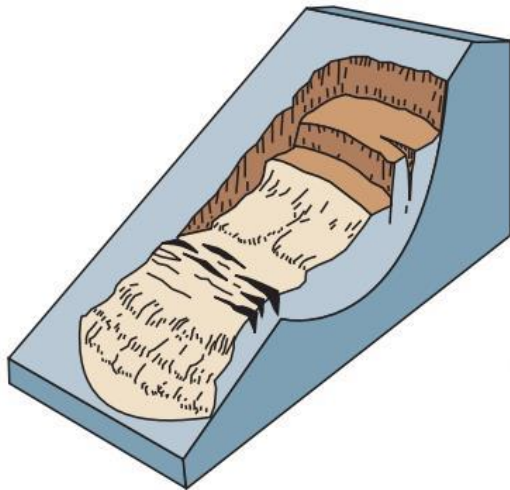
(β)

Εικόνα 2.3: (α) Σχηματική απεικόνιση ανατροπής βράχων,  
(β) Ανατροπή βράχων στον Β.Ο.Α.Κ, Κρήτη

### Ολίσθηση (Slide)

Αφορά την καθοδική κίνηση της εδαφικής ή βραχώδους μάζας κατά μήκος επιφανειών θραύσης ή ζωνών που χαρακτηρίζονται για την έντονη διατμητική παραμόρφωσή τους. Η κίνηση έχει προοδευτικό χαρακτήρα και δεν εκδηλώνεται σε όλη την επιφάνεια αστοχίας εξ αρχής. Σύμφωνα με τον Varnes, η ολίσθηση διακρίνεται σε περιστροφική και μεταθετική. Ως περιστροφική (rotational) νοείται η ολίσθηση κατά την οποία η κίνηση της εδαφικής μάζας πραγματοποιείται κατά μήκος μιας κεκλιμένης επιφάνειας αστοχίας, η οποία στρέφει τα κοίλα προς τα πάνω. Σε περιπτώσεις ομοιογενών υλικών η επιφάνεια αστοχίας είναι συνήθως κυκλική. Ωστόσο, τα φυσικά πρρανή χαρακτηρίζονται από μη ομοιογενή υλικά και συνεπώς η γεωμετρία της επιφάνειας ασυνέχειας βασίζεται στις ανομοιογένειες, καθώς και σε προηγούμενες επιφάνειες αστοχίας.





(α)



(β)

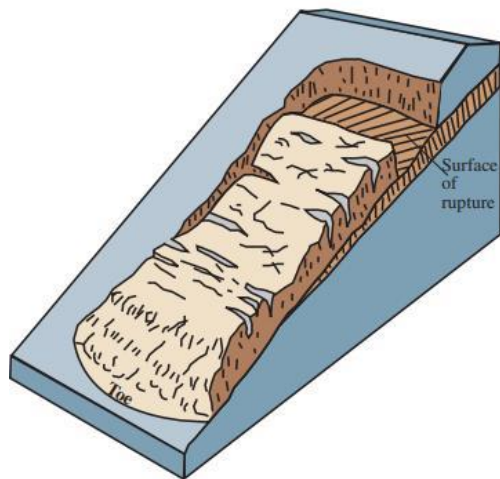
Εικόνα 2.4: (α) Σχηματική απεικόνιση περιστροφικής ολίσθησης πρανούς, (β) Περιστροφική ολίσθηση πρανούς στο Ηνωμένο Βασίλειο

### Μετάθεση

Ως μεταθετική (translational) νοείται η ολίσθηση κατά μήκος μιας επίπεδης ή κυματοειδούς επιφάνειας θραύσης με μικρή περιστροφική κίνηση. Η επιφάνεια αστοχίας μπορεί να έχει είτε μορφή σφήνας είτε επίπεδη μορφή. Η πρώτη προκύπτει όταν το ίχνος της τομής δύο επιφανειών ασυνέχειας που περικλείουν την αστοχούσα μάζα έχει διεύθυνση όμοια με αυτή της κλίσης του πρανούς. Αντιστοίχως, η αστοχία επίπεδης μορφής προκύπτει όταν η επιφάνεια ολίσθησης είναι σχεδόν παράλληλη με την επιφάνεια του πρανούς. Προϋπόθεση για να συμβεί αστοχία οποιασδήποτε μορφής είναι η κλίση του προαναφερόμενου ίχνους ή της επιφάνειας ολίσθησης να είναι μεγαλύτερη της γωνίας εσωτερικής τριβής των αντίστοιχων επιφανειών ασυνέχειας.

Η κύρια διαφορά μεταξύ της περιστροφικής και της μεταθετικής ολίσθησης έγκειται στο ότι η πρώτη τείνει να ισορροπήσει την αστοχούσα μάζα ενώ η δεύτερη τείνει να εξελιχθεί ανεξέλεγκτα, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις μεγάλης κλίσης.





(α)

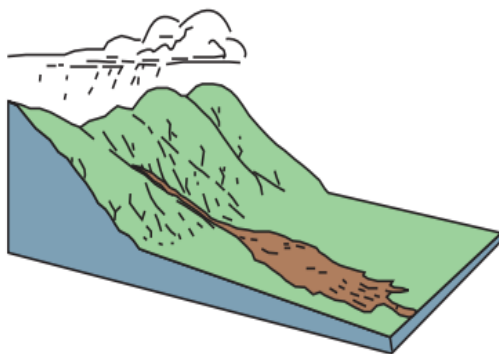


(β)

Εικόνα 2.5: (α) Σχηματική απεικόνιση μεταθετικής ολίσθησης πρανούς, (β) Μεταθετική ολίσθηση πρανούς σε περιοχή του Καναδά

### Ροή

Ως ροή χαρακτηρίζεται η συνεχής κίνηση εδαφικού υλικού στον χώρο με επιφάνειες διάτμησης μικρής έκτασης, οι οποίες συνήθως δεν διατηρούνται. Διακρίνονται σε ροές βράχων, ροές κορημάτων και ροές γαιών. Όσον αφορά τις ροές βράχων, παρατηρούνται παραμορφώσεις χωρίς ωστόσο να εντοπίζεται μετατόπιση κατά μήκος μιας επιφάνειας. Οι ροές κορημάτων προκαλούνται συνήθως από έντονη επιφανειακή ροή νερού, λόγω δυνατής βροχόπτωσης ή λιώσιμο πάγων. Πρόκειται για μια εξαιρετικά γρήγορη μετακίνηση εδαφικής μάζας, η οποία παρατηρείται συνήθως σε εκτάσεις με μειωμένη βλάστηση. Τέλος, οι ροές γαιών ξεχωρίζουν λόγω του σχήματος τους, το οποίο θυμίζει «κλεψύδρα». Η ροή γαιών παρατηρείται σε λεπτόκοκκα υλικά ή βραχώδη με άργιλο και σε αυτή την περίπτωση το υποκείμενο υλικό ρευστοποιείται, οδηγώντας σε καθοδική κίνηση των γαιών και τελικά σε ρευστοποίηση ολόκληρης της εδαφικής μάζας.



(α)



(β)

Εικόνα 2.6: (α) Σχηματική απεικόνιση ροής, (β) Μεταθετική ολίσθηση πρανούς σε περιοχή του Καναδά

### Πλευρική εξάπλωση

Πρόκειται για πλευρική έκταση ενός συνεκτικού υλικού πάνω σε μαλακότερο υποκείμενο εδαφικό υλικό. Η πλευρική εξάπλωση εδαφικού υλικού διευκολύνεται λόγω της ύπαρξης διατμητικών ή εφελκυστικών ρωγμών, ενώ συνήθως εκδηλώνονται σε ομαλές πλαγιές ή επίπεδο έδαφος. Διακρίνονται σε δυο βασικές κατηγορίες, την εξάπλωση βράχων και την εξάπλωση ρευστοποίησης. Στην πρώτη κατηγορία 7 εντάσσεται η πλευρική εξάπλωση βραχώδους εδαφικής μάζας, η οποία υπέρκειται μαλακών υλικών και παρουσιάζει ρωγμές, ενώ παράλληλα πρόκειται για μια εξαιρετικά αργή διαδικασία. Αντιθέτως, στην εξάπλωση ρευστοποίησης η αστοχία του εδάφους προκύπτει από τη ρευστοποίηση χαλαρών ιζημάτων, όπως η άμμος, τα οποία υπόκεινται του συνεκτικού υλικού και προκαλούν θραύση και επέκταση αυτού. Η συγκεκριμένη μορφή εξάπλωσης είναι πιθανό να προκύψει κατά τη διάρκεια μιας σεισμικής δόνησης ή με τεχνητά μέσα. Παράλληλα, η διαδικασία της θραύσης γίνεται βαθμιαία, ενώ η επέκταση είναι μια εξαιρετικά γρήγορη διαδικασία.



Εικόνα 2.7: Σχηματική απεικόνιση πλευρικής εξάπλωσης

### Σύνθετη μετακίνηση

Στην πράξη, και καθώς στην φύση δεν ακολουθούνται τα θεωρητικά δεδομένα με απόλυτη ακολουθία, όλες οι κατολισθήσεις περιλαμβάνουν περισσότερους από έναν τύπους κινήσεων. Για το λόγο αυτό η σύνθετη μετακίνηση αποτελεί την συνηθέστερη περίπτωση που εμφανίζεται κατά την κατολίσθηση ενός πρηνούς και αποτελεί συνδυασμό δύο, ή περισσότερων, από τις παραπάνω κατηγορίες.

### **2.3. Μέθοδοι ανάλυσης ευστάθειας πρηνών**

Η ανάλυση της ευστάθειας πρηνών, αποτελεί ουσιαστικό αντικείμενο κάθε μελέτης η οποία συντάσσεται με σκοπό την υλοποίηση τεχνικών έργων (κτιριακών, υδραυλικών, συγκοινωνιακών κ.λ.π.), ενώ είναι δυνατόν να αποτελέσει ανεξάρτητη διαδικασία, σε περιπτώσεις όπου απαιτείται η μελέτη ευστάθειάς τους, λόγω υπονοιών ή ενδείξεων αστοχίας.

Με την πάροδο των ετών, έχει αναπτυχθεί ποικιλία μεθόδων για την μελέτη της ευστάθειας των πρανών. Οι δυο βασικές κατηγορίες είναι οι αναλυτικές και οι αριθμητικές μέθοδοι.

Η ανάλυση της ευστάθειας συνήθως συνεπάγεται τον υπολογισμό ενός συντελεστή ασφαλείας, η τιμή του οποίου καθορίζει εάν θα πρέπει να ληφθούν μέτρα για την αύξηση της αντοχής του υπό μελέτη πρανούς.

Ο συντελεστής αυτός ορίζεται ως το πηλίκο της διαθέσιμης διατμητικής αντοχής του εδαφικού υλικού προς τις διατμητικές τάσεις που ασκούνται σε αυτό:

$$F.S. = \frac{\text{ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ}}{\text{ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΤΑΣΗ}}$$

Όταν ο συντελεστής ασφαλείας είναι μικρότερος της μονάδας ( $FS < 1$ ), το πρανές θεωρείται πως βρίσκεται σε κατάσταση αστοχίας. Αντιθέτως, όταν ο συντελεστής είναι μεγαλύτερος της μονάδας ( $FS > 1$ ) η διατμητική αντοχή είναι μεγαλύτερη τάσεων που επιδρούν στο πρανές και συνεπώς δεν υπάρχει κίνδυνος αστοχίας, ενώ όταν ο συντελεστής είναι ίσος με την μονάδα ( $FS = 1$ ) θεωρείται πως το πρανές βρίσκεται στην οριακή κατάσταση ευστάθειας.

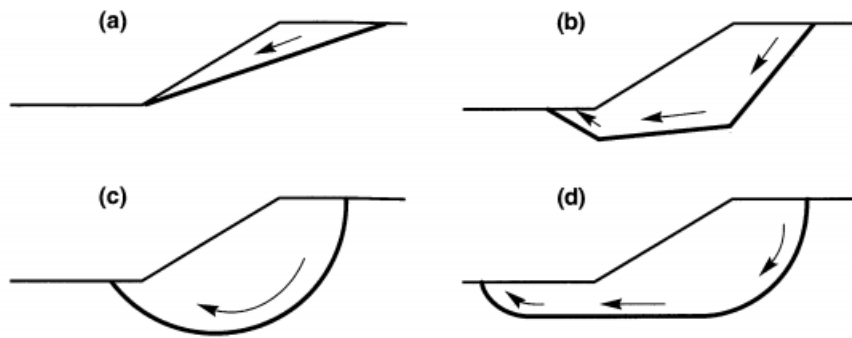
#### 2.4. Αναλυτικές μέθοδοι ανάλυσης ευστάθειας πρανών

- Μέθοδος Οριακής Ισορροπίας (Limit Equilibrium Method – LEM)

Η μέθοδος της Οριακής Ισορροπίας είναι μία αναλυτική μέθοδος ελέγχου της ευστάθειας των πρανών, και αφορά τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας πρανών τα οποία βρίσκονται σε στατικές συνθήκες και η αστοχία τους βασίζεται στο κριτήριο Mohr – Coulomb.

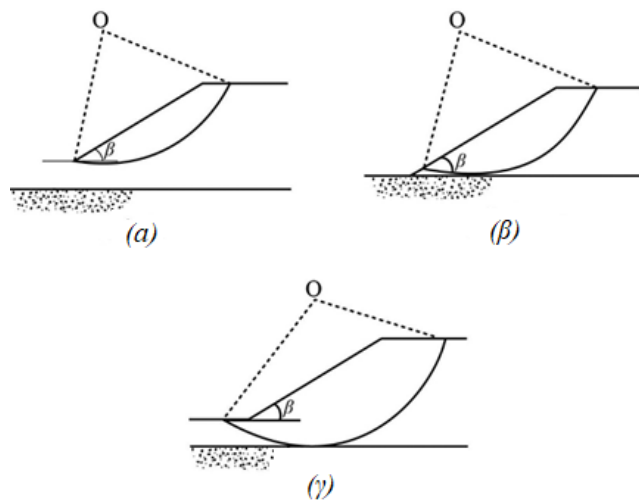
Για την εφαρμογή της μεθόδου απαιτείται να γίνουν κάποιες παραδοχές, ώστε οι γνωστές εξισώσεις να επαρκούν για την επίλυση.

Αρχικά, υποτίθεται ότι το σύστημα τάσεων είναι δυο διαστάσεων, καθώς η τρισδιάστατη ανάλυση του προβλήματος απαιτεί την ταυτόχρονη επίλυση σύνθετων μη γραμμικών εξισώσεων. Συνεπώς, οι τάσεις στην τρίτη διάσταση θεωρούνται μηδενικές. Στη συνέχεια, είναι απαραίτητο να γίνει κάποια υπόθεση για την επιφάνεια αστοχίας η οποία θα προκύψει. Οι επιφάνειες αστοχίας οι οποίες ενδέχεται να προκύψουν είναι οι εξής τέσσερις: Επίπεδη, ή αστοχία σφήνας, πολυεπίπεδη, κυκλική και μη κυκλική. Στις ακόλουθες εικόνες, παρουσιάζονται σχηματικά αυτές οι μορφές αστοχίας.



Σχήμα 2.1: Δυνητικές επιφάνειες αστοχίας: (a) αστοχία σφήνας, (b) πολυεπίπεδη αστοχία, (c) κυκλική αστοχία και (d) μη κυκλική αστοχία.

Όσον αφορά την κυκλική επιφάνεια αστοχίας, διακρίνονται τρεις κατηγορίες, ανάλογα με την περιοχή επιρροής αυτής. Η πρώτη είναι η αστοχία μετώπου, στην οποία το κυκλικό τόξο της επιφάνειας αστοχίας τέμνει το πρηνές πάνω από το πόδι του. Η δεύτερη ονομάζεται αστοχία στον πόδα του πρηνούς και το κυκλικό τόξο συναντά το πρηνές ακριβώς στο σημείο του πόδα, και η τελευταία είναι η αστοχία βάσης στην οποία το κυκλικό τόξο συναντά το πρηνές σε κάποιο σημείο κάτω από το πόδι του.



Σχήμα 2.2: Κατηγορίες κυκλικής αστοχίας: (α) αστοχία μετώπου, (β) αστοχία στον πόδα και (γ) αστοχία στην βάση.

Επιπρόσθετα, υποτίθεται πως επέρχεται ίδια πλαστική παραμόρφωση σε όλα τα σημεία της επιφάνειας αστοχίας που έχει θεωρηθεί. Αυτό πρακτικά, σημαίνει πως οι διατμητικές τάσεις που ασκούνται σε όλα τα σημεία της επιφάνειας αστοχίας είναι αρκετά μεγάλες ώστε να χρησιμοποιείται όλη η διαθέσιμη διατμητική αντοχή του υλικού. Τέλος, ως δεδομένα θεωρούνται η συνοχή, η γωνία εσωτερικής τριβής και το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα.

Για την ανάλυση της ευστάθειας με τη μέθοδο της Οριακής Ισορροπίας έχουν αναπτυχθεί πολυάριθμες θεωρίες, ανάλογα με την επιφάνεια αστοχίας η οποία έχει θεωρηθεί. Στην περίπτωση της επίπεδης επιφάνειας αστοχίας η πλέον ικανοποιητική μέθοδος ανάλυσης είναι αυτή του Culmann, ενώ στην περίπτωση υπόθεσης αστοχίας σφήνας, οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι αυτές των Perloff και Baron (1976) ή των Lambe και Whitman (1969). Τέλος, για ομογενή εδαφικά υλικά η επιφάνεια αστοχίας θεωρείται κυκλική και συνήθως προτιμάται για την ανάλυση της ευστάθειας η μέθοδος των λωρίδων (Fellenius, 1927) ή η μέθοδος του Bishop (1955), ενώ για ανομοιογενή υλικά, όπου η επιφάνεια αστοχίας συνήθως δεν είναι κυκλική, συχνά χρησιμοποιείται η μέθοδος Janbu (1968).

Κατά τις εφαρμογές στην παρούσα διπλωματική εργασία κατά τις εφαρμογές θεωρήθηκε κυκλική επιφάνεια αστοχίας, για τον λόγο δίνεται περισσότερη έμφαση στις μεθόδους Fellenius και Bishop στις οποίες γίνεται εκτενέστερη ανάλυση παρακάτω.

- Απλή μέθοδος των λωρίδων (Fellenius ή Σουηδική μέθοδος)

Σύμφωνα με την μέθοδο των λωρίδων, όπως αυτή συστήθηκε από τον Fellenius το 1927, η αστοχούσα μάζα υποδιαιρείται σε  $n$  κατακόρυφες λωρίδες, καθεμία από τις οποίες θεωρείται ότι δεν αλληλοεπιδρά με τις άλλες. Οι δυνάμεις που ασκούνται σε κάθε λωρίδα, υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις ισορροπίας. Λαμβάνονται υπόψη μόνον οι βαρυτικές δυνάμεις που ασκούνται σε κάθε λωρίδα, καθώς και οι ορθές και διατμητικές τάσεις που εφαρμόζονται κατά μήκος της επιφάνειας αστοχίας. Για την εφαρμογή της μεθόδου, γίνονται οι εξής παραδοχές: Αρχικά, θεωρείται ότι το υπό μελέτη πρσανές είναι πεπερασμένου ύψους και η επιφάνεια αστοχία μπορεί να εξομοιωθεί με τόξο κύκλου, ενώ αμελούνται οι εσωτερικές δυνάμεις που ασκούνται σε κάθε λωρίδα. Συγχρόνως, θεωρείται ότι οι εφαπτομενικές και κάθετες ενδιάμεσες δυνάμεις είναι ίσες και αντίθετες, δηλαδή  $X_1 = X_2$  και  $E_1 = E_2$ , ώστε η λωρίδα ισορροπεί με το βάρος της και την αντίδραση  $T, N$ . Με αυτόν τον τρόπο αίρεται η υπερστατικότητα του προβλήματος.

Η κάθετη δύναμη  $N'$  υπολογίζεται ως:

$$N' = N - U = W \cos \alpha - ul \quad (2.1)$$

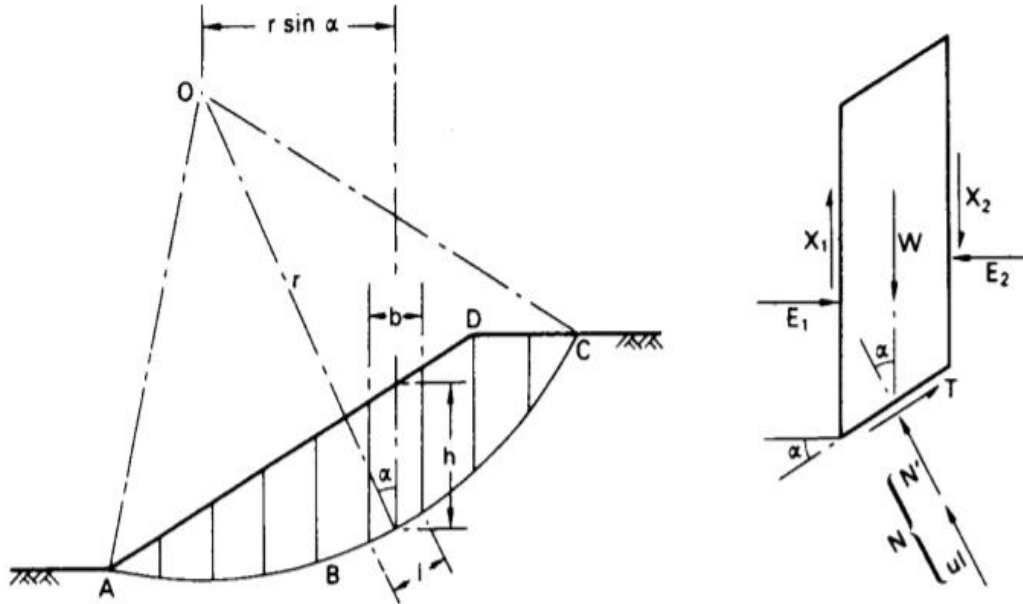
Όπου :  $W = \gamma bh$ : το βάρος της κάθε λωρίδας,

$\alpha$ : η γωνία ροπής, και

$L$ : το μήκος του κυκλικού τόξου της βάσης της λωρίδας

Ο τελικός τύπος που χρησιμοποιεί η μέθοδος χρησιμοποιώντας την παραπάνω τιμή του  $N'$  είναι:

$$F.S. = \frac{c'L + \sum(W\cos\alpha - ul)\tan\phi'}{\sum(W\sin\alpha)} \quad (2.2)$$



Σχήμα 2.3: Σύνολο δυνάμεων που ασκούνται σε κυκλικό τμήμα πρανούς

Η μέθοδος των λωρίδων είναι προσεγγιστική και παρέχει ικανοποιητική ακρίβεια αποτελεσμάτων μόνο στην περίπτωση κυκλικής επιφάνειας αστοχίας, ωστόσο έχει το χαρακτηριστικό να υποτιμά τον συντελεστή ασφαλείας κατά 5-20% ώστε να είναι πάντα υπέρ της ασφάλειας. Για πρανή μικρής γωνίας κλίσης, όπου παρατηρούνται υψηλές πιέσεις πόρων η ακρίβεια των εξαγόμενων αποτελεσμάτων είναι ιδιαίτερα χαμηλή.

#### - Μέθοδος Bishop

Η μέθοδος Bishop προσφέρει μια ακριβέστερη λύση από την μέθοδο Fellenius για τον συντελεστή ασφαλείας ευστάθειας πρανούς καταργώντας την θεώρηση  $X_1=X_2$  και  $E_1=E_2$  περί κάθετων και εφαπτομενικών ενδιάμεσων δυνάμεων. Με τον τρόπο αυτό η έκφραση που δίνει τον συντελεστή ασφαλείας είναι μια εξίσωση πεπλεγμένης μορφής του τύπου  $F = f(F, c', \phi', \dots)$ . Ο υπολογισμός γίνεται με επαναληπτικές μεθόδους, θέτοντας κάποιον αρχικό συντελεστή ασφαλείας (π.χ. από την μέθοδο Fellenius).

Τότε ο υπολογισμός γίνεται:

$$F_{i+1} = f(F_i, c', \phi', \dots) \quad (2.3)$$

Οι προσεγγίσεις του Bishop είναι δύο. Η απλοποιημένη και ακριβής. Κατά την απλοποιημένη προσέγγιση θεωρείται  $X_1=X_2$  και  $E_1 \neq E_2$  ενώ κατά την ακριβή θεωρείται ότι  $X_1 \neq X_2$  και  $E_1 \neq E_2$ . Ο Bishop αποδεικνύει ότι με την ακριβή θεώρηση επιτυγχάνεται βελτίωση στην ακρίβεια του συντελεστή ασφαλείας κατά 1%. Στην πράξη χρησιμοποιείται πάντοτε η απλοποιημένη προσέγγιση, η οποία αναπτύσσεται στην συνέχεια.

Με τις προσεγγίσεις Bishop το σφάλμα του υπολογισμένου συντελεστή ασφαλείας σε σχέση με τον πραγματικό, σπάνια υπερβαίνει το 7% ενώ, εν γένει, είναι μικρότερο από 2%, πάντα προς την πλευρά της ασφάλειας. Έτσι η μέθοδος Bishop υποτιμά τον συντελεστή ασφαλείας.

Με αναφορά το Σχήμα 2.3. και προκειμένου να ικανοποιείται η ισορροπία, οι διατμητικές δυνάμεις στην βάση σε σχέση με την διατμητική αντοχή, προκύπτει η σχέση:

$$T = \frac{1}{F}(c'l + N'\tan\varphi') \quad (2.4)$$

Θεωρούμε κατάσταση ισορροπίας κατά την κάθετη διεύθυνση ώστε να μην συμμετέχουν οι οριζόντιες δυνάμεις  $E_1, E_2$ , δηλαδή:

$$W = N'\cos\alpha + ul\cos\alpha + \frac{c'l}{F}\sin\alpha + \frac{N'}{F}\tan\varphi'\sin\alpha, \quad (2.5)$$

οπότε προκύπτει:

$$N' = (W - \frac{c'l}{F}\sin\alpha - ul\cos\alpha) / (\cos\alpha + \frac{\tan\varphi'\sin\alpha}{F}) \quad (2.6)$$

Αντικαθιστώντας τα παραπάνω στη σχέση (2.4) προκύπτει ο τύπος υπολογισμού του συντελεστή ασφαλείας ως εξής:

$$F.S. = \frac{1}{\sum W \sin\alpha} \sum \left\{ (c'b + (W - ub)\tan\varphi') \frac{\sec\alpha}{1 + \frac{\tan\alpha \tan\varphi'}{F}} \right\} \quad (2.7)$$

όπου:  $b = \frac{l}{\sec\alpha}$

Η μέθοδος Bishop είναι ιδανική για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή και χρησιμοποιείται ευρύτατα.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία για την πραγματοποίηση των υπολογισμών των ελέγχων ευστάθειας που απαιτήθηκαν, επιλέχθηκε το λογισμικό SLIDE 2D. Πρόκειται για ένα δοκιμασμένο λογισμικό ανεπτυγμένο από την Rocscience, το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως για αναλύσεις παραμόρφωσης και ευστάθειας δισδιάστατων μοντέλων (2D) στην γεωτεχνική μηχανική και συνιστάται για μελέτες τεχνικών συγκοινωνιακών έργων. Χρησιμοποιείται ευρύτατα από μηχανικούς για την αξιολόγηση του συντελεστή ασφαλείας και της πιθανής επιφάνειας αστοχίας σε γαιώδη ή και βραχώδη πρανή. Το λογισμικό προσφέρει τη δυνατότητα κατασκευής μοντέλου (επιχώματος) προς επίλυση και υπολογίζει συντελεστή ασφαλείας και πιθανή επιφάνεια βάσει της αναλυτικής μεθόδου των λωρίδων Bishop. Η ευστάθεια μπορεί να ελεγχθεί τόσο υπό στατικές όσο και υπό ψευδοστατικές συνθήκες, παρουσία ή μη υδροφόρου ορίζοντα.

- Ψευδοστατική μέθοδος ανάλυσης

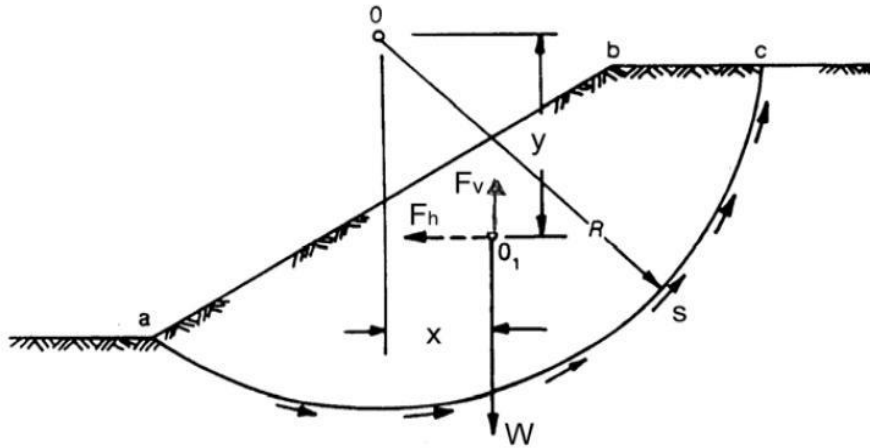
Σύμφωνα με την ψευδοστατική μέθοδο ανάλυσης της ευστάθειας ενός πρανού, το γεγονός του σεισμού θεωρείται ότι εκδηλώνεται μέσω δύο σταθερών σεισμικών συντελεστών επιτάχυνσης, οριζόντιας και κατακόρυφης, οι οποίοι αλλιώς ονομάζονται ψευδοστατικοί συντελεστές επιτάχυνσης. Η αδρανειακή δύναμη η οποία προκαλείται από τις δύο επιταχύνσεις ασκείται στο κέντρο μάζας του πρανού και αποτελείται από δύο συνιστώσες, μια οριζόντια και μια κατακόρυφη, το μέτρο των οποίων είναι αντίστοιχα,

$$F_h = \frac{a_h \times W}{g} = k_h * W \quad (2.8)$$

$$F_v = \frac{a_v \times W}{g} = k_v * W \quad (2.9)$$

όπου,  $a_h$  και  $a_v$ , η οριζόντια και κατακόρυφη ψευδοστατική επιτάχυνση αντίστοιχα,  $k_h$  και  $k_v$ , ο οριζόντιος και κατακόρυφος αδιάστατος ψευδοστατικός συντελεστής, και  $W$  το βάρος του υπό μελέτη πρανού.





Σχήμα 2.4 : Σύνολο δυνάμεων που ασκούνται σε κυκλικό τμήμα πρανούς

Από τις ασκούμενες στο πρανές δύο ψευδοστατικές δυνάμεις, η οριζόντια είναι εκείνη ή οποία λαμβάνεται συνήθως υπόψη, καθώς αποτελεί μεγαλύτερο κίνδυνο για την ευστάθεια αυτού αφού μειώνει την διατμητική αντοχή του, ενώ συγχρόνως αυξάνει τις συνολικές τάσεις που ασκούνται σε αυτό. Αντιθέτως, η κατακόρυφη ψευδοστατική δύναμη μεταβάλλει με τον ίδιο τρόπο τόσο την διατμητική αντοχή, όσο και τις τάσεις που ασκούνται στο πρανές. Η επιλογή του κατάλληλου ψευδοστατικού συντελεστή επιτάχυνσης γίνεται με βάση την πραγματική επιτάχυνση του σεισμού, προκειμένου να είναι ακριβέστερα τα αποτελέσματα. Η ψευδοστατική μέθοδος ανάλυσης, αν και αποτελεί μια από τις πλέον διαδεδομένες μεθόδους για μελέτη της ευστάθειας υπό σεισμικές συνθήκες, θεωρείται προσεγγιστική και είναι πιθανόν να δώσει αναξιόπιστα αποτελέσματα σε πολλές περιπτώσεις, όπως για παράδειγμα όταν στο υπό μελέτη υλικό αναπτύσσονται υψηλές πιέσεις πόρων λόγω των σεισμικών δονήσεων.

## 2.5. Αριθμητικές μέθοδοι ανάλυσης ευστάθειας πρανών

- Μέθοδος Πεπερασμένων στοιχείων

Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method – FEM) αποτελεί την πλέον διαδεδομένη προσεγγιστική μέθοδο αριθμητικής ανάλυσης, η οποία επιτρέπει την επίλυση μερικών διαφορικών εξισώσεων με σκοπό την περιγραφή προβλημάτων εξαρτώμενων από τον χώρο και τον χρόνο. Η επίλυση των εξισώσεων αυτών με αναλυτικές μεθόδους είναι σχεδόν αδύνατη για την πλειοψηφία των προβλημάτων αυτού του είδους και συνεπώς οι μερικές διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν τα προαναφερόμενα προβλήματα μετασχηματίζονται σε εξισώσεις αριθμητικών μοντέλων, οι οποίες στη συνέχεια επιλύονται με αριθμητικές μεθόδους, όπως η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν

προσεγγίζουν με τον βέλτιστο δυνατό τρόπο την πραγματική λύση των διαφορικών εξισώσεων.

- Μέθοδος τάσεων - μετατοπίσεων

Με βάση τη μέθοδο τάσεων – μετατοπίσεων κρίνεται η ευστάθεια του πρσανούς μέσω της ανάλυσης των διαγραμμάτων τάσης – παραμόρφωσης του εδαφικού υλικού.

Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται μέσω της χρήσης της μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων, η οποία λαμβάνει υπόψη τις μη γραμμικές σχέσεις τάσεων – παραμορφώσεων των εδαφικών υλικών. Η ανάλυση τάσεων – μετατοπίσεων για τη μελέτη της ευστάθειας πρσανών τόσο υπό στατικές συνθήκες όσο και σε σεισμικές συνθήκες, προβλέπει την επιφάνεια αστοχίας και τις μετατοπίσεις που πρόκειται να επέλθουν στο πρσανές. Η ακρίβεια της μεθόδου εξαρτάται άμεσα από την ακρίβεια των διαγραμμάτων τάσης – παραμόρφωσης που περιγράφουν το υπό μελέτη εδαφικό υλικό. Υπολογίζονται οι μόνιμες παραμορφώσεις σε κάθε στοιχείο του δικτύου, με σκοπό να πραγματοποιηθεί η εκτίμηση της συνολικής παραμόρφωσης του πρσανούς. Η μόνιμη παραμόρφωση που υφίσταται κάθε στοιχείο είναι δυνατόν να υπολογισθεί με τρεις τρόπους. Την μελέτη της δυναμικής παραμόρφωσης (Strain potential approach), την μείωση του μέτρου ακαμψίας (Stiffness reduction approach) ή την μη γραμμική ανάλυση (Nonlinear analysis). Οι δύο πρώτοι τρόποι εκτιμούν τις μόνιμες παραμορφώσεις μέσα από εργαστηριακά πειράματα, τα οποία διεξάγονται με σκοπό τον υπολογισμό της ακαμψίας των υλικών που υπόκεινται σε σεισμικές φορτίσεις. Η μη γραμμική ανάλυση χρησιμοποιεί την μη γραμμική σχέση των τάσεων – παραμορφώσεων του εδαφικού υλικού, με στόχο τον υπολογισμό των μόνιμων παραμορφώσεων.

## **2.6. Σύγκριση αναλυτικών και αριθμητικών μεθόδων ανάλυσης**

Μεταξύ των αναλυτικών και αριθμητικών μεθόδων οι οποίες περιγράφηκαν παραπάνω, η δεύτερη αποτελεί την πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδο ανάλυσης, καθώς προσφέρει πληθώρα δυνατοτήτων, όπως προσομοίωση σύνθετων γεωμετρικών μοντέλων και υψηλή ταχύτητα υπολογισμών. Βασικό πλεονέκτημα των αναλυτικών μεθόδων αποτελεί η απλότητα των υπολογισμών σε σχέση με την υψηλή αποδιδόμενη ακρίβεια των αποτελεσμάτων που προσφέρει, ωστόσο, οι ακόμη πιο γρήγοροι υπολογισμοί, σε συνδυασμό με τα ακριβέστερα αποτελέσματα καθιστούν τις αριθμητικές μεθόδους, προτιμότερες. Παράλληλα, για τη χρήση των αναλυτικών μεθόδων, όπως προαναφέρθηκε απαιτείται η υπόθεση της μορφής της επιφάνειας αστοχίας ενώ αντίθετα στις αριθμητικές μεθόδους προσφέρεται η αυτόματη εύρεση αυτής. Επιπροσθέτως, η δεύτερη μέθοδος προσφέρει τη δυνατότητα προσομοίωσης

πρανών σύνθετης γεωμετρίας λαμβάνοντας υπόψη την παρουσία, ή μη, νερού, σεισμού ή άλλων εξωτερικών φορτίων, ενώ παράλληλα δίνει τη δυνατότητα γραφικής απεικόνισης των μετατοπίσεων, των παραμορφώσεων και των τάσεων οι οποίες ασκούνται στο προσομοίωμα. Αντιθέτως, η πρώτη δεν προσφέρει τη δυνατότητα υπολογισμού και απεικόνισης τάσεων, παραμορφώσεων ή μετατοπίσεων του προσομοιώματος. Επίσης, οι αναλυτικές μέθοδοι χρησιμοποιούν αποκλειστικά το εδαφικό προσομοίωμα Mohr – Coulomb, σε αντίθεση με τις αριθμητικές μεθόδους, όπου είναι δυνατή η χρήση πιο σύνθετων εδαφικών μοντέλων. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι συχνά οι αναλυτικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται για την πρόχειρη επίλυση του ελέγχου και τα αποτελέσματα που προσφέρουν, αποτελούν τιμές επαλήθευσης των αριθμητικών μεθόδων επίλυσης.

## **2.7. Έλεγχος παραμορφώσεων πρανών**

Πρόκειται ουσιαστικά για την συστηματική παρακολούθηση των παραμορφώσεων (Deformation monitoring) οι οποίες εκδηλώνονται και ανιχνεύονται ως μικρομετακινήσεις στην επιφάνεια και εντός του σώματος των πρανών.

Σε πολλές περιπτώσεις τεχνητών ή φυσικών πρανών ευρισκόμενων πλησίον και ιδιαίτερα στα καπάντη θέσεων στις οποίες έχουν πραγματοποιηθεί ανθρώπινες επεμβάσεις (π.χ. εκσκαφές για την κατασκευή τεχνικών έργων) ελλοχεύει κίνδυνος κατάρρευσής τους. Το φαινόμενο αυτό είναι πιθανότερο να παρατηρηθεί σε εδάφη μειωμένης διατμητικής αντοχής, π.χ. σε ασύνδετους αργιλικούς σχηματισμούς και ιδιαίτερα δε, όταν στην περιοχή συντρέχουν συνθήκες οι οποίες προκαλούν ανύψωση του υδροφόρου ορίζοντα.

Εφόσον υπάρχουν υπόνοιες ή, ακόμα περισσότερο, όταν παρουσιασθούν πρόδρομα φαινόμενα (π.χ. μικρής αρχικά κλίμακας ρηγματώσεις) για ενεργές μικρομετακινήσεις του πρανούς, υποδηλώνονται σαφώς κατολισθητικές τάσεις, οι οποίες είναι δυνατόν να εξελιχθούν σε μερική ή και ολική κατάρρευσή του.

Στις περιπτώσεις αυτές θα πρέπει από πλευράς ειδικών γεωεπιστημόνων (γεωτεχνικών, τοπογράφων και γεωλόγων) να αναζητηθούν τα αίτια του φαινομένου, να προσδιορισθούν η έκταση και το βάθος επιρροής του, καθώς και η παρακολούθηση του ρυθμού εξέλιξής του, προκειμένου να ληφθούν εγκαίρως τα κατάλληλα μέτρα για την σταθεροποίηση της κατάστασης και την αποφυγή αστοχίας του πρανούς.

Οι μέθοδοι οι οποίες εφαρμόζονται για την ανίχνευση και την χρονική εξέλιξη των μικρομετακινήσεων, διακρίνονται σε φυσικές και τοπογραφικές.

Οι φυσικές μέθοδοι παρακολούθησης πραγματοποιούνται συνήθως με σειρά παρατηρήσεων μέσω ευαίσθητων οργάνων, των κλισιομέτρων, εγκατεστημένων σε κατάλληλα επιλεγμένες θέσεις στο εσωτερικό της μάζας του πρηνούς. Από την ερμηνεία των καταγραφόμενων ανά περίοδο παρατηρήσεων εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με την εξέλιξη του φαινομένου.

Οι τοπογραφικές μέθοδοι έχουν ως αρχή προσδιορισμού των μικρομετακινήσεων την σύγκριση μεταξύ των θέσεων στον χώρο (X,Y,Z) των ελεγχόμενων σημείων, οι οποίες προσδιορίζονται μέσω περιοδικών επαναλαμβανόμενων μετρήσεων.

Τα ελεγχόμενα σημεία (μάρτυρες) υλοποιούνται με κατάλληλους υποδοχείς τοπογραφικών οργάνων ή στόχων επί σταθερών βάθρων πακτωμένων σε επιλεγμένες θέσεις. Το τοπογραφικό δίκτυο ελέγχου (δίκτυο μικροτριγωνισμού) έχει ως κορυφές αφενός τα ελεγχόμενα σημεία και αφετέρου δύο τουλάχιστον επιπλέον σημεία, ευρισκόμενα σε θέσεις εκτός πεδίου επιρροής του υπό παρατήρηση φαινομένου, θεωρούμενες ως απολύτως σταθερές. Δεδομένης της κατά κανόνα μικρής κλίμακας παρατηρούμενων μετακινήσεων οι οποίες κυμαίνονται στην τάξη των μερικών χιλιοστών ή το πολύ ολίγων εκατοστών του μέτρου, το κύριο πρόβλημα το οποίο έχει να αντιμετωπίσει ο Τοπογράφος μηχανικός κατά την διεξαγωγή των εργασιών του, είναι το αποφανθεί αν οι διαφορές στις θέσεις των σημείων τις οποίες προσδιορίζει με τις διαδοχικές μετρήσεις, οφείλονται σε πραγματικές μετακινήσεις των ελεγχόμενων σημείων, ή αν αυτές δικαιολογούνται από τα τυχαία σφάλματα των μετρήσεων και την γεωμετρική δομή του δικτύου.

Εάν  $\chi$  το διάνυσμα το οποίο αντιστοιχεί στη θέση  $i_0$  ( $x_0, y_0, h_0$ ) ενός σημείου κατά την χρονική στιγμή  $t_0$  (εδώ ο χρόνος υπεισέρχεται ως τέταρτη διάσταση) ενός σημείου  $i$  και  $\chi+u$  είναι το διάνυσμα το οποίο αντιστοιχεί στη θέση  $i_1$  ( $x_1, y_1, h_1$ ) του αυτού ελεγχόμενου σημείου κατά τη χρονική στιγμή  $t_1$ , τότε το διάνυσμα ( $u_1, u_2, u_3$ ) εκφράζει την μετακίνηση του υλικού σημείου  $i$ , η οποία επήλθε κατά το χρονικό διάστημα  $t_1-t_0$ . Τα διανύσματα  $u$ , περιγράφουν το πεδίο των μετακινήσεων για κάθε ένα από τα ελεγχόμενα σημεία του πρηνούς. (βλ. Σχήμα 2.5.)

Κατά την μέθοδο σύγκρισης των συντεταγμένων, υπολογίζονται οι διαφορές ( $\delta_{x_i}, \delta_{y_i}$ ) των οριζοντίων συντεταγμένων του σημείου  $i$  οι οποίες προκύπτουν από τις συνορθώσεις των παρατηρήσεων οι οποίες έγιναν κατά τις δύο διαδοχικές χρονικές περιόδους  $t_0$  και  $t_1$ .

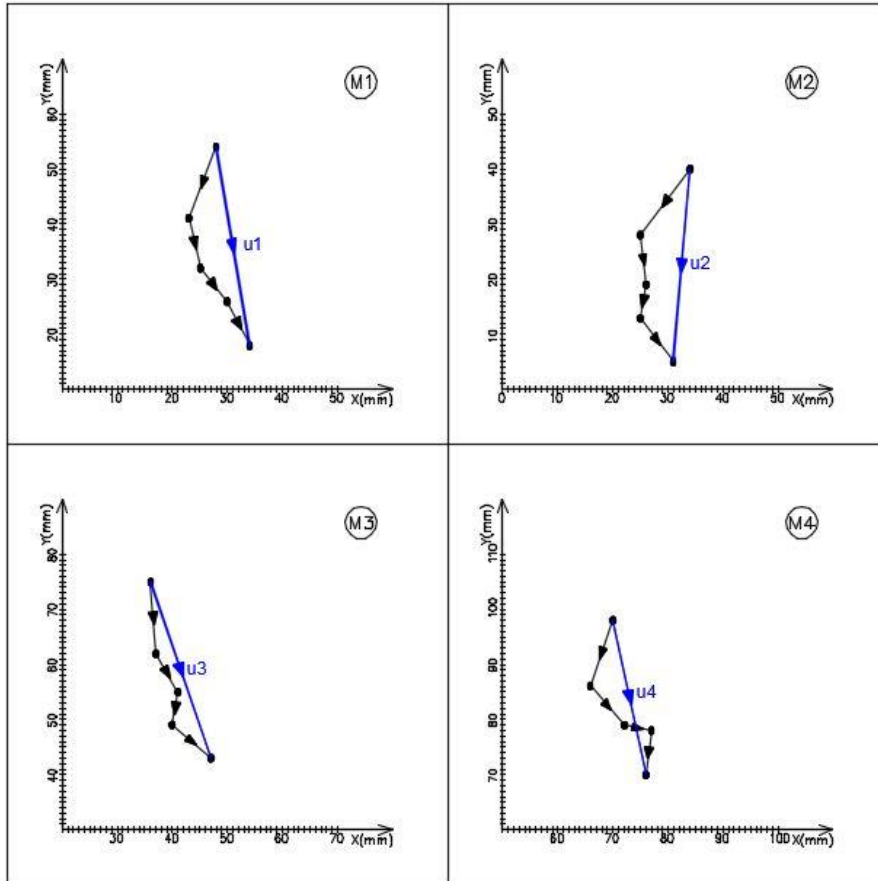
Επίσης από τα μητρώα μεταβλητοτήτων-συμμεταβλητοτήτων των συντεταγμένων του σημείου  $i$  κατά τις χρονικές περιόδους  $t_j, t_{j+1}$  υπολογίζεται το μητρώο των μεταβλητοτήτων-συμμεταβλητοτήτων διαφορών των συντεταγμένων

$$V_{\delta\chi_i \delta\gamma_i} = V_{\chi_i\gamma_i} + V_{\gamma_i\chi_i} \quad (2.10)$$

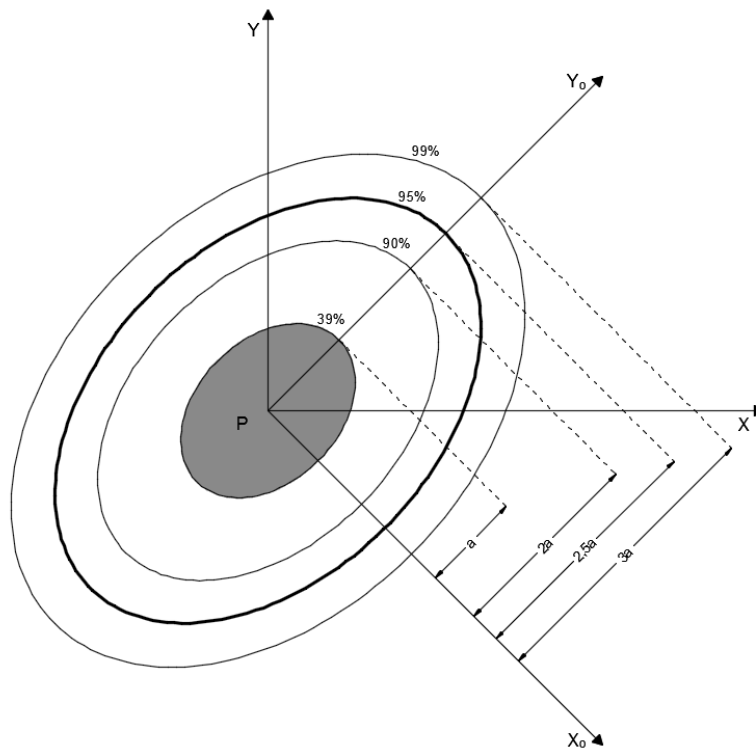
Τα στοιχεία του μητρώου αυτού, από τα οποία προκύπτουν και οι ελλείψεις σφάλματων των σημείων, εκφράζουν της αβεβαιότητες των μετακινήσεων και είναι απαραίτητα για την αξιολόγηση των διαφορών των συντεταγμένων.

Η χρήση των ελλείψεων σφαλμάτων των ελεγχόμενων σημείων για την εκτίμηση της σημαντικότητας των διαφορών στις θέσεις τους, οι οποίες παρατηρούνται σε διαδοχικές μετρήσεις, εκτός τους πλεονεκτήματος της εποπτείας των αποτελεσμάτων, αποτελούν το κριτήριο για την αποδοχή μίας παρατηρούμενης διαφοράς θέσεως ως μετακίνησης ή όχι.

Συγκεκριμένα, εάν οι διαδοχικές θέσεις ενός ελεγχόμενου σημείου δεν περιλαμβάνονται στο εσωτερικό έλλειψης με ημιάξονες ίσους με 2,5 φορές τους ημιάξονες της έλλειψης σφάλματος ομοιόθετης, δηλαδή μετατοπιζόμενης διατηρώντας τους άξονές της παράλληλους προς τις κύριες διευθύνσεις του σημείου, τότε η μετατόπιση πρέπει να θεωρείται πραγματική, με επίπεδο πιθανότητας 95%. (Αντίστοιχα, για επίπεδο πιθανότητας 90% οι ημιάξονες της ομοιόθετης έλλειψης θα πρέπει να είναι διπλάσιοι αυτών της έλλειψης σφάλματος ενώ, για επίπεδο πιθανότητας 99%, τριπλάσιοι.



Σχημα 2.5: Διανυσματική απεικόνιση μικρομετακινήσεων τεσσάρων μαρτύρων (M1, M2, M3, M4), σε τέσσερις χρονικές φάσεις.



*Σχημα 2.6: Έλλειψη σφάλματος σημείου και οι ομοιότητες της, για επίπεδα πιθανότητας 90%, 95% και 99%.*

### **3. ΧΡΗΣΗ ΔΙΟΓΚΩΜΕΝΗΣ ΠΟΛΥΣΤΕΡΙΝΗΣ (EPS) ΣΕ ΤΕΧΝΙΚΑ ΕΡΓΑ**

Η διογκωμένη πολυστερίνη (**Expanded PolyStyrene - EPS**), είναι ένα ελαφρύ υλικό το οποίο χρησιμοποιείται με διάφορους τρόπους στην κατασκευή τεχνικών έργων (οικοδομικών, συγκοινωνιακών κ.λ.π.). Η επιστημονικά ορθή ορολογία είναι Διογκωμένο Πολυστυρένιο, διότι παράγεται με τον πολυμερισμό του στυρενίου, ωστόσο έχει επικρατήσει η ονομασία “πολυστερίνη”.

Παράγεται από κόκκους πολυστυρολίου, οι οποίοι είναι θερμοπλαστικοί. Με τη διόγκωσή τους, οι κόκκοι μεγαλώνουν και γίνονται σφαιρίδια, τα οποία διογκώνονται περισσότερο και κολλούν μεταξύ τους. Το προωθητικό αέριο στη διογκωμένη πολυστερίνη είναι το πεντάνιο το οποίο περιέχεται σε ποσοστό μικρότερο του 5%. Μετά τη διόγκωση της πρώτης ύλης με ατμό και την παραγωγή του τελικού προϊόντος το πεντάνιο φεύγει από το υλικό και τη θέση του παίρνει ο αέρας. Στο τελικό προϊόν το 98% είναι αέρας και 2% είναι τα τοιχώματα των κλειστών κυψελών από Διογκωμένο Πολυστυρένιο. Η διογκωμένη πολυστερίνη διαμορφώνεται σε μεγάλου όγκου πρίσματα, τα οποία κόβονται στη συνέχεια σε μπλοκ διαφόρων διαστάσεων και αποτελούν πλέον προϊόν έτοιμο για χρήση.

Η διογκωμένη πολυστερίνη (EPS) δύναται να χρησιμοποιηθεί σε διάφορα τεχνικά έργα, είτε ως κατασκευαστικό υλικό πλήρωσης, είτε ως υλικό προστασίας έναντι επιβαλλόμενων τάσεων ή παραμορφώσεων. Στα βασικά πλεονεκτήματα της χρήσης του γεωαφρού EPS συγκαταλέγονται οι προκαθορισμένες μηχανικές

ιδιότητες, η υψηλή ταχύτητα κατασκευής, καθώς και η ανθεκτικότητα του υλικού στο χρόνο.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία και συγκεκριμένα στις δύο εφαρμογές που ακολουθούν στα Κεφάλαια 4 και 5, γίνεται αναφορά στην χρήση του υλικού σε συγκοινωνιακά έργα (ένα οδικό και ένα σιδηροδρομικό) ως εναλλακτικό υλικό κατασκευής επιχωμάτων. Είναι, λοιπόν, απαραίτητη η κατανόηση των βασικών χαρακτηριστικών, των ιδιοτήτων και του τρόπου που εφαρμόζεται για την δόμηση των επιχωμάτων. Στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου γίνεται εκτενής περιγραφή και επεξήγηση των παραπάνω.

### **3.1. Βασικά χαρακτηριστικά διογκωμένης πολυστερίνης (EPS)**

Η διογκωμένη πολυστερίνη (EPS) αποτελεί ένα σχετικά σύγχρονο υλικό εφαρμογής σε τεχνικά έργα. Οι κυριότεροι λόγοι που το καθιστούν πλεονεκτικό ως προς άλλους γεωαφρούς αναφέρονται παρακάτω:

- α) η συμπεριφορά και οι ιδιότητες του υλικού καλύπτουν σε μεγάλο βαθμό τις ανάγκες τεχνικών έργων.
- β) αποτελεί μία αξιόπιστη τεχνικο-οικονομική λύση
- γ) είναι διαθέσιμο σε μεγάλη ποικιλία τύπων και διαστάσεων
- δ) παράγεται στις περισσότερες περιοχές της χώρας, όντας έτσι άμεσα διαθέσιμο.

Ως βασικά χαρακτηριστικά της διογκωμένης πολυστερίνης (EPS) αναφέρονται τα ακόλουθα:

- Έχει πολύ μικρή πυκνότητα ( $\rho$ ), η οποία κυμαίνεται από 12 έως 60 kg/m<sup>3</sup>. Είναι το ελαφρύτερο από τα συνήθη ελαφροβαρή υλικά που είναι γνωστά μέχρι σήμερα, και έτσι είναι πολύ εύκολη τόσο η μεταφορά του, όσο και η τοποθέτησή του στη θέση του έργου.
- Η συμπιεστότητα του υλικού (η οποία συσχετίζεται με την πυκνότητά του), μπορεί να πάρει ιδιαίτερα μικρές τιμές σε σύγκριση με άλλους γεωαφρούς, ενώ παράλληλα μπορεί να μειωθεί ακόμα περισσότερο με πρόσθετη επεξεργασία κατά την παραγωγή του.
- Σε ένα τυπικό τεχνικό έργο, είναι ιδιαίτερα ανθεκτικό και φιλικό προς το περιβάλλον, όταν η χρήση του γίνεται βάσει των προδιαγραφών που προβλέπονται
- Η εύκολη τοποθέτηση και η επί τόπου επεξεργασία του υλικού επιταχύνει την διαδικασία κατασκευής του έργου.
- Απαιτεί ελάχιστη συντήρηση κατά τη διάρκεια ζωής του έργου.



### 3.2. Βασικές μηχανικές ιδιότητες διογκωμένης πολυστερίνης (EPS)

Σε αυτή την ενότητα του κεφαλαίου παρατίθενται οι βασικές μηχανικές ιδιότητες του γεωαφρού EPS. Οι ιδιότητες προσδιορίζονται στα πρότυπα ΕΛΟΤ EN 13163 και ΕΛΟΤ EN 14933 όσον αφορά στη θλιπτική αντοχή, στο μέτρο ελαστικής συμπίεσης και τις ερπυστικές θλιπτικές παραμορφώσεις. Οι υπόλοιπες μηχανικές ιδιότητες είναι σε συμβατότητα με τους σχετικούς Ευρωκώδικες (ΕΛΟΤ EN 1990 και ΕΛΟΤ EN 1997).

#### - Θλιπτική αντοχή

Σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 14933, οι διάφοροι τύποι EPS βασίζονται στην ονομαστική θλιπτική αντοχή  $\sigma_{10}$ , η οποία αντιστοιχεί σε παραμόρφωση  $\varepsilon = 10\%$ . Για παράδειγμα, το EPS100 έχει θλιπτική αντοχή  $\sigma_{10}$  ίση με 100 kPa. Σημειώνεται ότι η παραμόρφωση  $\varepsilon = 10\%$  αποτελεί συμβατική τιμή. Σε ειδικές περιπτώσεις προβλέπεται από το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 14933 κατηγοριοποίηση με βάση τη θλιπτική αντοχή  $\sigma_2$  (CS(2)) ή  $\sigma_5$  (CS(5)), που αντιστοιχούν σε παραμόρφωση  $\varepsilon = 2\%$  ή  $\varepsilon = 5\%$ , αντίστοιχα. Στον Πίνακα 3.1. που ακολουθεί παρατίθενται οι τιμές της θλιπτικής αντοχής για διάφορα επίπεδα παραμόρφωσης ανάλογα την κατηγορία του υλικού.

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

Πίνακας 3.1: Τιμές θλιπτικής αντοχής ( $\sigma_\varepsilon$ ) του EPS για διάφορα επίπεδα παραμόρφωσης ( $\varepsilon$ ) και πυκνότητας ( $\rho$ ).

Επισημαίνεται ότι σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 1997, για τον υπολογισμό της τιμής σχεδιασμού της θλιπτικής αντοχής  $\sigma_{10;d}$  θα πρέπει να χρησιμοποιείται ένας μειωτικός επιμέρους συντελεστής υλικού  $\gamma_m$ . Προτεινόμενη τιμή για τον συντελεστή  $\gamma_m$  είναι η τιμή 1,25 (δηλαδή για EPS100:  $\sigma_{10;d} = 100/1,25 = 80$  kPa).

- Μέτρο ελαστικής συμπίεσης

Οι ονομαστικές τιμές του μέτρου ελαστικής συμπίεσης  $E_t$  προέρχονται από εργαστηριακές δοκιμές σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 826 και ισχύουν για το ελαστικό τμήμα του διαγράμματος τάσεων – παραμορφώσεων. Η ίδια τιμή  $E_{dyn}$  μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της δυναμικής συμπεριφοράς στην περίπτωση ανακυκλικής φόρτισης. Οι τιμές του μέτρου ελαστικής συμπίεσης που αναφέρονται στον παρακάτω πίνακα βασίζονται στη σχέση που προτάθηκε από τον Horvath (1995):  $E_t$  (MPa) =  $0,45 \times \rho$  (kg/m<sup>3</sup>) – 3, όπου  $\rho$  είναι η πυκνότητα του υλικού.

Για παράδειγμα, το EPS 100, με πυκνότητα  $\rho = 18$  έως  $20$  kg/m<sup>3</sup>, έχει μέτρο ελαστικής συμπίεσης  $E_t$  που κυμαίνεται μεταξύ 5 και 6 MPa.

- Μόνιμη θλιπτική αντοχή

Ο γεωαφρός EPS αναμένεται να παρουσιάσει ερπυστικές θλιπτικές παραμορφώσεις έως 2% μετά από 50 έτη όταν υποβάλλεται σε μόνιμη θλιπτική τάση μικρότερη από  $0,30 \times \sigma_{10}$ . Κατά συνέπεια, η ονομαστική μόνιμη θλιπτική αντοχή είναι  $\sigma_{10;perm} = 0,30 \times \sigma_{10}$ . Για τον υπολογισμό της τιμής σχεδιασμού χρησιμοποιείται μειωτικός συντελεστής  $\gamma_m = 1,25$  (π.χ. για EPS100:  $\sigma_{10;perm;d} = 0,3 \times 100/1,25 = 24$  kPa)

- Θλιπτική αντοχή υπό ανακυκλική φόρτιση

Μετά από διεξοδικές μελέτες, έχει διαπιστωθεί ότι με ένα σχετικώς ελαφρύ μόνιμο φορτίο στην κορυφή (15 kN/m<sup>2</sup>), και εφόσον η παραμόρφωση υπό ανακυκλική φόρτιση παραμένει κάτω από 0,4%, η παραμόρφωση αυτή είναι ελαστική και δεν παρατηρείται μόνιμη παραμόρφωση. Σε όρους τάσεων αυτό σημαίνει ότι η μέγιστη ασφαλής τιμή σε ανακυκλική φόρτιση είναι  $0,35 \sigma_{10}$ . Η τιμή αυτή έχει επιβεβαιωθεί και στη διεθνή βιβλιογραφία (Duskon, 1997). Συνεπώς, η ονομαστική θλιπτική αντοχή υπό ανακυκλική φόρτιση είναι  $\sigma_{10;cycl} = 0,35 \times \sigma_{10}$  (π.χ. για EPS100:  $\sigma_{10;cycl} = 0,35 \times 100 = 35$  kPa). Για τον υπολογισμό της τιμής σχεδιασμού  $\sigma_{10;cycl;d}$  ο μειωτικός συντελεστής  $\gamma_m = 1,25$  πρέπει να ληφθεί υπόψη (οπότε για EPS100:  $\sigma_{10;cycl;d} = 35/1,25 = 28$  kPa).

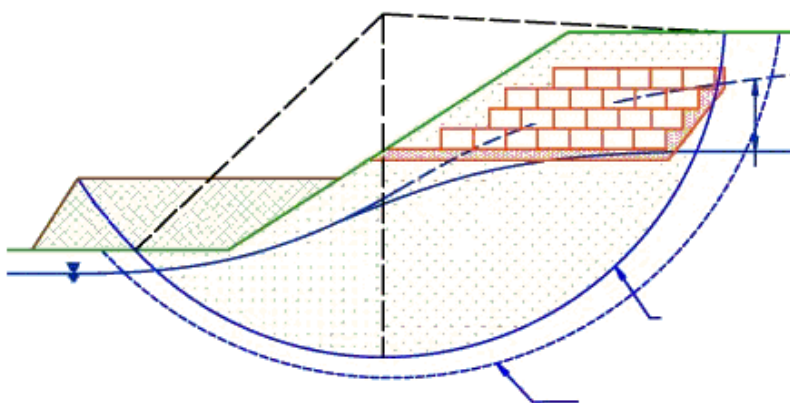
ΙΔΙΟΤΗΤΑ			ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ EPS				
Περιγραφή	Σύμβολο	Μονάδα	EPS 60	EPS 100	EPS 150	EPS 200	EPS 250
Θλιπτική αντοχή (ονομαστική τιμή)	$\sigma_{10}$	kPa	60	100	150	200	250

Θλιπτική αντοχή (τιμή σχεδιασμού)	$\sigma_{10;d}$	kPa	48	80	120	160	200
Μέτρο ελαστικής συμπίεσης	$E_i; E_{dyn}$	MPa	4	5	8	10	12
Μόνιμη θλιπτική αντοχή (ονομαστική τιμή)	$\sigma_{10;perm}$	kPa	18	30	45	60	75
Μόνιμη θλιπτική αντοχή (τιμή σχεδιασμού)	$\sigma_{10;perm;d}$	kPa	14,4	24	36	48	60
Θλιπτική αντοχή υπό ανακυκλική φόρτιση (ονομαστική τιμή)	$\sigma_{10;cycl}$	kPa	21	35	52,5	70	87,5
Θλιπτική αντοχή υπό ανακυκλική φόρτιση (τιμή σχεδιασμού)	$\sigma_{10;cycl;d}$	kPa	17	28	42	56	70

Πίνακας 3.2: Βασικές μηχανικές ιδιότητες διογκωμένης πολυστερίνης (EPS)

### 3.3. Εφαρμογή διογκωμένης πολυστερίνης (EPS) σε πρανή επιχωμάτων

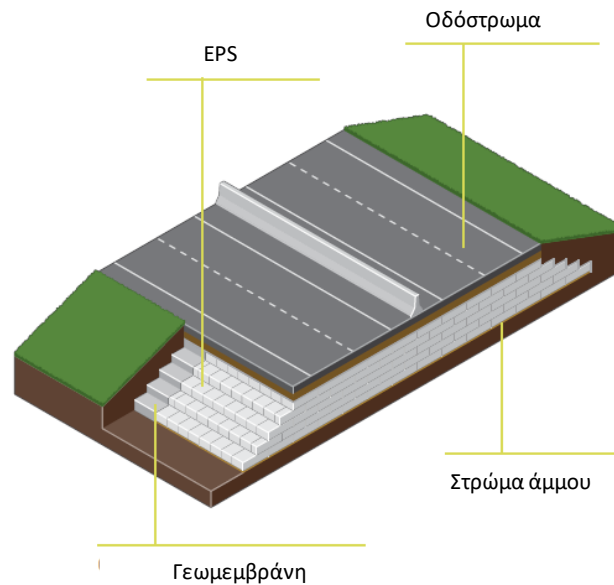
Όπως προαναφέρθηκε, η διογκωμένη πολυστερίνη (EPS) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σταθεροποίηση εδαφικών πρανών, όπως διακρίνεται στο Σχήμα 3.1. Για να μειωθεί ο κίνδυνος αστοχίας (κυκλικής ολίσθησης) του εδαφικού πρίσματος, αντικαθίσταται το εδαφικό υλικό που αποτελεί το επίχωμα από ελαφροβαρές υλικό EPS.



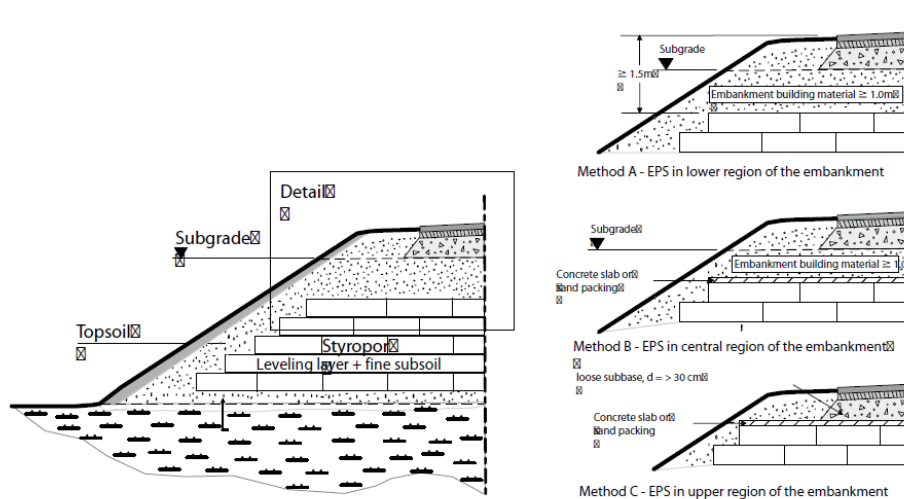
Σχήμα 3.1: Σταθεροποίηση εδαφικού πρανούς με χρήση διογκωμένης πολυστερίνης (EPS).

Στο Σχήμα 3.2. φαίνεται η περίπτωση κατασκευής ενός νέου επιχώματος που εδράζεται σε EPS. Σε μια τέτοια περίπτωση, υπό την επίδραση του βάρους ενός συμβατικού εδαφικού επιχώματος δύναται να παρουσιαστεί είτε καθολική εδαφική αστοχία (υπέρβαση φέρουσας ικανότητας του υποκείμενου εδάφους), είτε

σημαντικές άμεσες και δευτερογενείς καθιζήσεις, οι οποίες ολοκληρώνονται σε βάθος χρόνου (λόγω του φαινομένου της εδαφικής στερεοποίησης), και ενδέχεται εκτός των άλλων να είναι διαφορετικές. Η κατασκευή του επιχώματος με μπλοκ EPS και η τοποθέτηση του οδοστρώματος από πάνω αποτελεί μία ασφαλή και άμεση λύση.



Σχήμα 3.2: Κατασκευή νέου οδικού επιχώματος με χρήση διογκωμένης πολυστερίνης (EPS).



Σχήμα 3.3: Τυπικές μέθοδοι κατασκευής νέου επιχώματος με χρήση διογκωμένης πολυστερίνης (EPS).

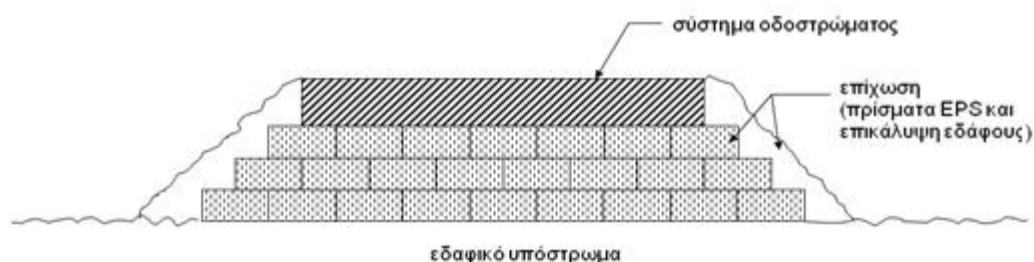
### 3.4. Στάδια σχεδιασμού πρικών επιχωμάτων από EPS

Ο σχεδιασμός των γεωτεχνικών έργων που περιλαμβάνουν εφαρμογή διογκωμένης πολυστερίνης EPS γίνεται με τη χρήση της μεθόδου των επιτρεπόμενων τάσεων βάσει συντελεστή ασφαλείας. Όπως φαίνεται στο Σχήμα

3.4., ένα επίχωμα μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από τρία κύρια μέρη, το καθένα από τα οποία έχει τη δική του μοναδική σύνθεση και ρόλο στη συνολική κατασκευή:

- α) Το υπάρχον εδαφικό υπόστρωμα, το οποίο ενδέχεται να έχει εξυγειανθεί πριν την κατασκευή του επιχώματος.
- β) Η επίχωση που αποτελείται κυρίως από μπλοκ EPS. Σημειώνεται ότι σε ορισμένες περιπτώσεις τοποθετείται μία ποσότητα εδαφικού υλικού ανάμεσα στην επιφάνεια του φυσικού εδάφους και της βάσης των μπλοκ EPS.
- γ) Το σύστημα οδοστρώματος που περιλαμβάνει όλα τα στρώματα υλικών, εγκιβωτισμένα ή μη, τα οποία βρίσκονται πάνω από το γεωαφρό. Μεταξύ των υλικών οδοστρώσεως και των πρισμάτων EPS τοποθετείται μεμβράνη PE και στρώση γεωυφάσματος η οποία επεκτείνεται στα πρηνή του επιχώματος.

Το επίχωμα στο σύνολό του, καθώς και καθένα από τα τμήματά του ξεχωριστά, πρέπει να σχεδιάζονται ώστε να αποτρέπεται η αστοχία και να εξασφαλίζεται η λειτουργικότητα.



Σχήμα 3.4.: Τα τρία κύρια μέρη ενός ελαφροβαρούς επιχώματος από διογκωμένη πολυστερίνη (EPS): (α) εδαφικό υπόστρωμα, (β) επίχωση με μπλοκ EPS και εδαφική επικάλυψη, και (γ) σύστημα οδοστρώματος.

Ο σχεδιασμός των ελαφροβαρών επιχωμάτων βασίζεται σε τρεις κατηγορίες ελέγχων:

#### 1) Έλεγχοι εξωτερικής ευστάθειας

Λαμβάνεται υπόψη η αλληλεπίδραση του συστήματος επιχώματος – οδοστρώματος με το υποκείμενο εδαφικό υπόστρωμα. Περιλαμβάνονται θέματα όπως η καθολική ομοιόμορφη ή διαφορική καθίζηση, καθώς επίσης η εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας και της ευστάθειας του πρηνούς υπό την επίδραση διαφόρων συνδυασμών φόρτισης. Τα θέματα αυτά, συνδυαζόμενα με άλλα ζητήματα, όπως η εκτίμηση της επιρροής σε παρακείμενες ή υπόγειες κατασκευές – εγκαταστάσεις και του χρόνου κατασκευής, καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τη γεωμετρία της διατομής του επιχώματος και τη σχετική ποσότητα του γεωαφρού

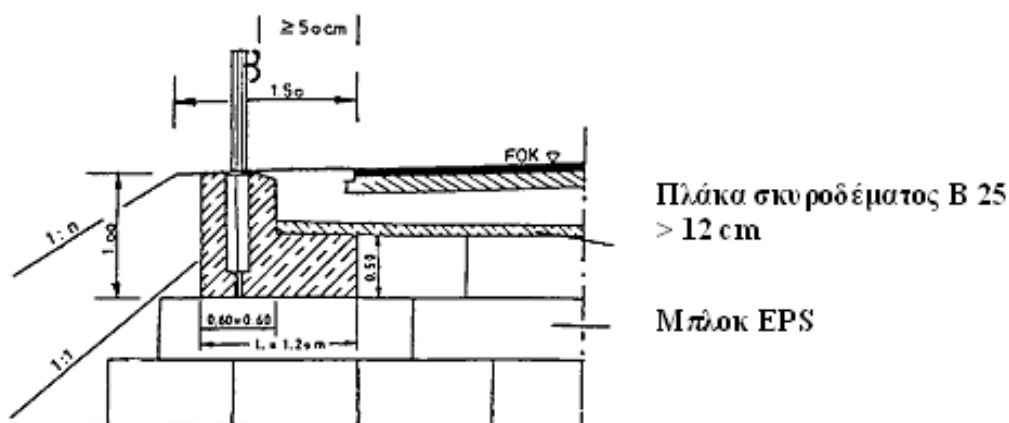
EPS που θα χρησιμοποιηθεί στο επίχωμα. Λόγω τού διαφορετικού κόστους μεταξύ γεωαφρού και εδαφικών υλικών μπορεί να γίνει βελτιστοποίηση του σχεδιασμού ώστε να ελαχιστοποιηθεί η ποσότητα του EPS, η οποία όμως θα πρέπει να εξακολουθεί να ικανοποιεί τα κριτήρια σχεδιασμού σχετικά με τις καθιζήσεις και την ευστάθεια.

### 2) Έλεγχοι εσωτερικής ευστάθειας

Βασικός παράγοντας είναι η σωστή επιλογή και ο καθορισμός των ιδιοτήτων του EPS έτσι ώστε η μάζα του γεωαφρού να μπορεί να υποστηρίξει το υπερκείμενο σύστημα οδοστρώματος χωρίς να υποστεί υπερβολική παραμόρφωση, είτε άμεσα, είτε σε βάθος χρόνου λόγω ερπυστικής συμπεριφοράς, η οποία δύναται να οδηγήσει σε υπερβολικές καθιζήσεις της επιφάνειας του οδοστρώματος.

### 3) Έλεγχος συστήματος οδοστρώματος

Το βασικό κριτήριο σχεδιασμού σε ένα σύστημα οδοστρώματος είναι η αποτροπή της πρόωρης αστοχίας του συστήματος οδοστρώματος, όπως αυτή προσδιορίζεται από τη δημιουργία αυλάκων στο οδόστρωμα (κριτήριο λειτουργικότητας) ή από ρηγμάτωση (κριτήριο αστοχίας). Κατά το σχεδιασμό της διατομής τού οδοστρώματος πρέπει να δίδεται ιδιαίτερη προσοχή στην παροχή κατάλληλης στήριξης, είτε μέσω απευθείας εγκιβωτισμού, είτε μέσω δομικής αγκύρωσης, για τον οποιοδήποτε οδικό εξοπλισμό, όπως προστατευτικά κιγκλιδώματα, νησίδες, κολόνες φωτισμού ή σηματοδότησης, κ.α. (βλ. Σχήμα 3.5.). Επίσης, θα πρέπει να προβλέπονται τα διάφορα βοηθητικά τεχνικά έργα για τη σωστή λειτουργία του έργου, όπως κρασπεδόρειθρα, διαζώματα, κανάλια απορροής ομβρίων, πεζοδρόμια, κ.α.



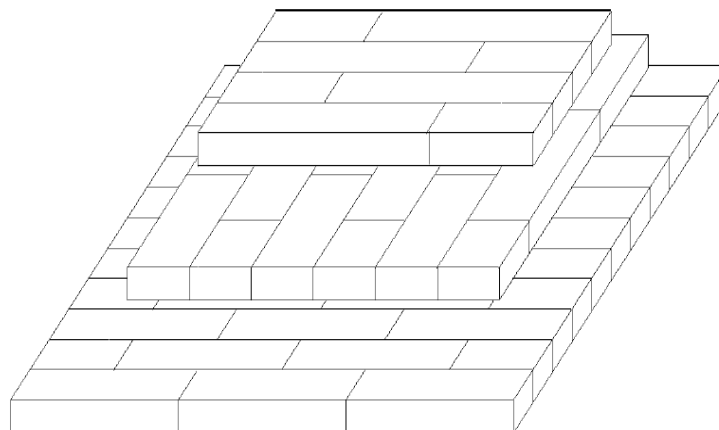
Σχήμα 3.5: Κατασκευαστική λεπτομέρεια στήριξης του οδικού εξοπλισμού.

### 3.5. Διάταξη και τρόπος τοποθέτησης των μπλοκ EPS

Η εμπειρία έχει δείξει ότι η χρήση μιας κατάλληλης οριζόντιας διάταξης από μπλοκ EPS παρέχει ουσιαστική εγγύηση για την αλληλεμπλοκή στην κατακόρυφη διεύθυνση. Οι γενικές οδηγίες είναι οι ακόλουθες:

- Το επίπεδο στο οποίο τοποθετείται ένα δεδομένο στρώμα από μπλοκ πρέπει να είναι παράλληλο με τον διαμήκη άξονα της οδού.
- Όλα τα μπλοκ θα πρέπει να τοποθετούνται εφαρμοστά σε διπλανά τους, σε όλες τις πλευρές τους.
- Τα μπλοκ θα πρέπει να τοποθετούνται με τη μικρότερη διάστασή τους (το πάχος τους) προσανατολισμένη κατακόρυφα.
- Ο ελάχιστος αριθμός στρωμάτων από μπλοκ EPS που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ελαφροβαρή επιχώματα κάτω από δρόμους είναι δύο.
- Συνολικά, τα μπλοκ θα πρέπει να τοποθετούνται σε διάταξη που θα ελαχιστοποιεί τη συνέχεια των κατακόρυφων ενώσεων μεταξύ τους. Αυτό συνήθως επιτυγχάνεται με:
  - α) ευθυγράμμιση όλων των μπλοκ εντός δεδομένου στρώματος με τους διαμήκεις άξονές τους παράλληλους, αλλά με τα άκρα τους μετατοπισμένα σε σχέση με τα άκρα των παρακείμενων γραμμών από μπλοκ
  - β) προσανατολισμός των διαμήκων αξόνων όλων των μπλοκ σε ένα δεδομένο στρώμα κάθετα προς τους διαμήκεις άξονες των πρισμάτων που βρίσκονται σε στρώματα τοποθετημένα πάνω ή κάτω από το πρώτο
  - γ) ευθυγράμμιση των μπλοκ του ανώτερου στρώματος εγκάρσια προς το διαμήκη άξονα του δρόμου.

Στο Σχήμα 3.6. διακρίνεται ένα γενικό σχέδιο της διάταξης των μπλοκ που ακολουθεί αυτές τις οδηγίες.



Σχήμα 3.6: Τυπική διάταξη μπλοκ EPS για την κατασκευή επιχώματος.

Στα σημεία στροφής του οδικού άξονα η διάταξη των πρισμάτων ακολουθεί την ακτίνα καμπυλότητας. Τα κενά που δημιουργούνται στο πίσω μέρος των μπλοκ πληρώνονται με άμμο.

Ο σχεδιασμός της διάταξης των μπλοκ αποτελεί ευθύνη του μηχανικού που σχεδιάζει το έργο, με την προϋπόθεση ότι οι διαστάσεις των μπλοκ είναι γνωστές εκ των προτέρων. Στην περίπτωση που η τροφοδοσία των μπλοκ για ένα έργο γίνεται από περισσότερους του ενός προμηθευτές, και επειδή στην περίπτωση αυτή οι διαστάσεις τους ενδέχεται να διαφέρουν μεταξύ διαφορετικών προμηθευτών, ο ακριβής σχεδιασμός της διάταξης που θα ακολουθήσουν τα μπλοκ EPS γίνεται από τον μηχανικό του έργου σε συνεργασία με τους προμηθευτές. Ο μηχανικός του έργου:

- υποδεικνύει τις επιθυμητές διαστάσεις του γεωαφρού EPS στα σχέδια,
- προσδιορίζει τις ζώνες με EPS διαφορετικής πυκνότητας (αντοχής), αν υπάρχουν,
- συμπεριλαμβάνει τις παραπάνω οδηγίες στις προδιαγραφές που θα χρησιμοποιήσει ο προμηθευτής EPS για να εκπονήσει το πρόγραμμα ποιότητας παραγωγής και το πρόγραμμα παραδόσεων, και
- εξετάζει κατά τη διάρκεια της κατασκευής την εφαρμογή των προγραμμάτων των προμηθευτών EPS που έχουν υποβληθεί.

#### Τοποθέτηση των μπλοκ EPS

Στη συνέχεια και αφού τα μπλοκ ικανοποιούν τις προδιαγεγραμμένες ανοχές διαστάσεων και τοποθετηθούν προσεκτικά ξεκινώντας από ένα επίπεδο υπόστρωμα όπως αναφέρεται παραπάνω, η επιφάνεια ενός δεδομένου



στρώματος θα πρέπει να παρέχει μια ανεκτά επίπεδη επιφάνεια για την επόμενη στρώση. Ωστόσο, σε περιπτώσεις όπου η επιφάνεια της στρώσης γίνει ανώμαλη, η πιο κοινή λύση είναι η έγχυση ενός λεπτού στρώματος άοπλου σκυροδέματος, για την τοποθέτηση των ανώτερων στρώσεων, με την σύμφωνη γνώμη του σχεδιαστή του έργου, καθώς αυτή θα προκαλέσει ενδεχόμενα επιπρόσθετη μόνιμη κατακόρυφη τάση στο έδαφος θεμελίωσης η οποία πρέπει να συνυπολογιστεί.

Σε περίπτωση που χρειαστεί να τεμαχιστούν πρίσματα EPS επί τόπου του έργου, ο πιο ακριβής τεμαχισμός μπορεί να γίνει με μια φορητή συσκευή θερμού σύρματος, καθώς επίσης με ξυλοπρίονο ή αλυσοπρίονο.

Οι επιφάνειες των μπλοκ EPS δεν πρέπει να διασχίζονται από οχήματα ή κατασκευαστικό εξοπλισμό κατά τη διάρκεια ή μετά την τοποθέτησή τους. Η τελική επιφάνεια των πρισμάτων EPS καλύπτεται όπως δείχνουν τα συμβατικά σχέδια. Τέλος, πρέπει να δίνεται προσοχή κατά την τοποθέτηση του υλικού κάλυψης έτσι ώστε να μην προκληθούν ζημιές στα μπλοκ EPS.



(α)



(β)

*Εικόνα 3.1: Τοποθέτηση μπλοκ EPS σε εργοτάξιο του αυτοκινητόδρομου ΠΑΘΕ στη θέση Θερμοπούλες (2008)*

#### Διάτμηση μεταξύ των μπλοκ EPS

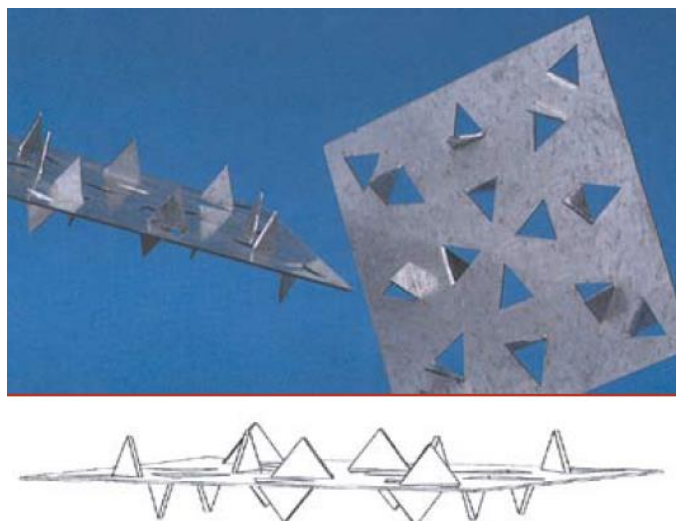
Οι διατμητικές δυνάμεις κατά μήκος των οριζόντιων διεπιφανειών μεταξύ στρωμάτων από πρίσματα EPS είναι ο κύριος και βασικός μηχανισμός που αλληλεμπλέκει τα πρίσματα ώστε να αντισταθούν σε οριζόντια φορτία. Αν και η γωνία τριβής κατά Mohr-Coulomb για ολίσθηση διεπιφάνειας EPS-EPS είναι συγκρίσιμη με αυτή της άμμου ( $\delta = 30^\circ$ ), η διατμητική αντοχή είναι γενικά σχετικά μικρή σε μέγεθος επειδή οι κατακόρυφες ορθές τάσεις είναι μικρές (για όλες τις πρακτικές περιπτώσεις ίσες με το ίδιο βάρος του συστήματος οδοστρώματος). Η εμπειρία έχει δείξει ότι η αντίσταση αυτή ενδέχεται να είναι ανεπαρκής για να παραλάβει τις σημαντικές δυνάμεις που προκύπτουν από ισχυρές οριζόντιες σεισμικές φορτίσεις. Τόσο οι δυνάμεις αντίστασης, όσο και οι δράσεις (δυνάμεις ή τάσεις) θα πρέπει να υπολογίζονται σε πολλά επίπεδα, σαρώνοντας το κατακόρυφο προφίλ του επιχώματος.

Εάν οι υπολογιζόμενες δυνάμεις αντίστασης κατά μήκος των οριζόντιων επιπέδων ανάμεσα στα πρίσματα EPS δεν επαρκούν έναντι των οριζόντιων σεισμικών δυνάμεων, απαιτείται οριζόντια αγκύρωση μεταξύ των πρισμάτων EPS για να ενισχυθεί η συνοχή μεταξύ τους. Αυτό γενικά επιτυγχάνεται με την προσθήκη μηχανικών συνδετήρων μεταξύ των πρισμάτων (συνήθως προκατασκευασμένες οδοντωτές μεταλλικές πλάκες) κατά μήκος των οριζόντιων διεπιφανειών μεταξύ των μπλοκ (βλ. Εικόνα 3.2.). Αυτοί οι συνδετήρες παρέχουν μια ψευδοσυνοχή

Mohr-Coulomb. Η μορφή των πλακών και ο τρόπος τοποθέτησής τους δίνονται από τον κατασκευαστή.

Εκτός από το ρόλο τους στην ανάληψη οριζόντιων φορτίων, οι μηχανικοί συνδετήρες έχουν αποδειχθεί χρήσιμοι για την αποφυγή μετατόπισης των πρισμάτων EPS, όταν αυτά συναρμολογούνται υπό συνθήκες ακραίων καιρικών φαινομένων.

Ωστόσο οι πλάκες αυτές θα πρέπει να χρησιμοποιούνται μόνο όταν οι υπολογισμοί υποδεικνύουν την αναγκαιότητά τους. Η γενικευμένη χρήση συνδετήρων θα πρέπει να αποφεύγεται επειδή οι τελευταίοι αυξάνουν σημαντικά το κόστος του έργου, αν και δεν είναι επιβλαβείς.



*Εικόνα 3.2: Οδοντωτή μεταλλική πλάκα για την ενίσχυση της συνοχής μεταξύ των μπλοκ EPS.*

### **3.6. Χρόνος ζωής**

Σύμφωνα με Μελέτη του Πανεπιστημίου Πατρών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών – Εργαστήριο Γεωτεχνικής Μηχανικής, με την εφαρμογή της αρχής της επαλληλίας χρόνου-θερμοκρασίας για τον προσδιορισμό της ερπυστικής συμπεριφοράς των γεωαφρών EPS σε βάθος χρόνου αποδείχθηκε ότι όταν το επιβαλλόμενο φορτίο προκαλεί αρχική παραμόρφωση έως 0.5%, αναμένεται γραμμική απόκριση των γεωαφρών EPS για χρονικό διάστημα έως 100 έτη.

Επίσης σύμφωνα με το Πρότυπο EN 13163 παρ. 4.2.7.3. Ανθεκτικότητα της θερμικής αντίστασης σε γήρανση και αποδόμηση η θερμική αγωγιμότητα των προϊόντων EPS δε μεταβάλλεται στο χρόνο.

Τέλος θα πρέπει να επισημανθεί πως ο χρόνος ζωής που αναφέρεται δεν προβλέπεται κατά έκθεση του υλικού σε δυσμενή φυσικά και ανθρωπογενή φαινόμενα (π.χ. ήλιος, φωτιά, πλημμύρα κ.λ.π.).

### 3.7. Πρότυπα – Κανονισμοί

Για τις εφαρμογές της διογκωμένης πολυστερίνης (EPS) σε τεχνικά έργα χρησιμοποιούνται ενδεικτικά οι ακόλουθοι ελληνικοί και διεθνείς κανονισμοί – πρότυπα :

- ΕΛΟΤ EN 1990 «Ευρωκώδικας 0 – Βάσεις σχεδιασμού»
- ΕΛΟΤ EN 1991 «Ευρωκώδικας 1 – Βάσεις σχεδιασμού και δράσεων στις κατασκευές»
- ΕΛΟΤ EN 1997 «Ευρωκώδικας 7 – Γεωτεχνικός σχεδιασμός»
- ΕΛΟΤ EN 1998 «Ευρωκώδικας 8 – Αντισεισμικός σχεδιασμός των κατασκευών»
- ΕΛΟΤ EN 14933 «Θερμομονωτικά και ελαφροβαρή προϊόντα πλήρωσης για εφαρμογές πολιτικού μηχανικού – Βιομηχανικώς παραγόμενα προϊόντα από διογκωμένη πολυστερίνη (EPS) – Προδιαγραφή»
- ΕΛΟΤ EN 13163: «Θερμομονωτικά προϊόντα κτιρίων – Βιομηχανικώς παραγόμενα προϊόντα από διογκωμένη πολυστερίνη – Προδιαγραφή»
- ΕΛΟΤ EN 826: «Θερμομονωτικά προϊόντα για κτιριακές εφαρμογές – Προσδιορισμός της συμπεριφοράς σε θλίψη»
- Norwegian Road Research Laboratory (1992), “Expanded Polystyrene used in road embankments”, Oslo, Form 482E
- Forschungsgesellschaft fur Strassen und Verkehrswesen (1995), “Merkblatt fur die Verwendung von EPS Hartshaumstoffen beim Bau von Strassendammen”, Koln
- Transportation Research Board NA (2004), “Geofoam Applications in the Design and Construction of Highway Embankments”, NCHRP 65
- Transportation Research Board NA (2004), “Guideline and Recommended Standard for Geofoam Applications in Highway Embankments”, NCHRP 529
- Duškov, M., (1999) “Dutch Design Manual for Light-Weight Pavements with EPS Geofoam.” Oranjwoud Infragroep BV, The Netherlands.

#### 4. ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΟΔΙΚΟΥ ΕΠΙΧΩΜΑΤΟΣ

Κατά το παρελθόν, έως δηλαδή τα τέλη της δεκαετίας του '70, η εφαρμοζόμενη πρακτική κατά τον σχεδιασμό και την κατασκευή των οδικών έργων, τουλάχιστον στην Ελλάδα, διέφερε της ακολουθούμενης σήμερα, όπως φυσικά διέφεραν και οι σχετικοί κανονισμοί.

Το κύριο μέλημα των μελετητών κατά την εποχή εκείνη ήταν ο περιορισμός του μεγέθους των απαιτούμενων τεχνικών έργων και, φυσικά, ο περιορισμός του όγκου των χωματουργικών εργασιών με τις ελάχιστες δυνατές αποκλίσεις της χάραξης από το ανάγλυφο του εδάφους, δηλαδή περιορισμένο διαστάσεων πρσανών ορυγμάτων και επιχωμάτων τηρουμένων βέβαια των τιμών των παραμέτρων σχεδιασμού, ανάλογα με την κατηγορία του οδικού άξονα.

Σήμερα, οι παράγοντες και γενικότερα η αντίληψη σχεδιασμού αλλά και οι τεχνικές κατασκευής των οδικών έργων έχουν διαφοροποιηθεί σε μεγάλο βαθμό, σε σχέση με τις προηγούμενες δεκαετίες. Οι παράγοντες οι οποίοι έπαιξαν ρόλο στην εξέλιξη αυτή, διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, την τεχνολογία και την τεχνογνωσία. Η δημιουργία νέων χωματουργικών οχημάτων (φορτωτές, εκσκαφείς, προωθητές γαιών, συμπυκνωτές, φορτηγά οχήματα μεταφοράς κλπ) βοήθησε στην αύξηση του μεγέθους των τεχνικών έργων που αποτελούν τους οδικούς άξονες, ενώ μέσω νέων τεχνικών οι οποίες μελετήθηκαν και εφαρμόστηκαν (οπλισμένα επιχώματα, χρήση αγκυρίων με τσιμεντενέσματα κλπ) εξασφαλίστηκε η ασφάλεια των πρσανών ορυγμάτων και επιχωμάτων.

Παρότι, κατά τα τελευταία έτη η εξέλιξη, όσον αφορά την κατασκευή συγκοινωνιακών έργων, είναι μεγάλη, συχνά εμφανίζονται νέα προβλήματα, τα οποία οι μελετητές καλούνται να αντιμετωπίσουν. Το κεφάλαιο αυτό πραγματεύεται μια τέτοια περίπτωση, όπου το πρόβλημα που δημιουργήθηκε απαιτεί μία λύση η οποία προτείνεται και τελικά υλοποιείται και αποτελεί πρωτοποριακή εφαρμογή για τα εγχώρια δεδομένα.

Συγκεκριμένα, γίνεται αναφορά σε μία ρεαλιστική γεωτεχνική μελέτη που έγινε το 2008 με σκοπό την επίλυση προβλημάτων που προέκυψαν κατά την κατασκευή οδικού άξονα αυτοκινητόδρομου ΠΑΘΕ στη θέση των Θερμοπύλες.

Η μελέτη εκδόθηκε από την εταιρία "Σωτηρόπουλος και Συν/τες" ΑΤΕ με τη συνεργασία και την επιτόπου παρουσία των Νορβηγών Συμβούλων Κ. Flaate, Τ.Ε. Frydenlund και Α. Sagbakken από το Norwegian Public Roads Administration, με εξαιρετική εμπειρία στο αντικείμενο.

Στο πλαίσιο των γεωτεχνικών μελετών, συνεργάστηκαν οι εξής μηχανικοί:

- Καββαδάς Μιχάηλ, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός
- Παπαχαραλάμπους Γεώργιος, Πολιτικός Μηχανικός
- Καραϊσκού Ευαγγελία, Πολιτικός Μηχανικός
- Κόντου Μιλένα, Πολιτικός Μηχανικός
- Σωτηρόπουλος Ηλίας, Πολιτικός Μηχανικός

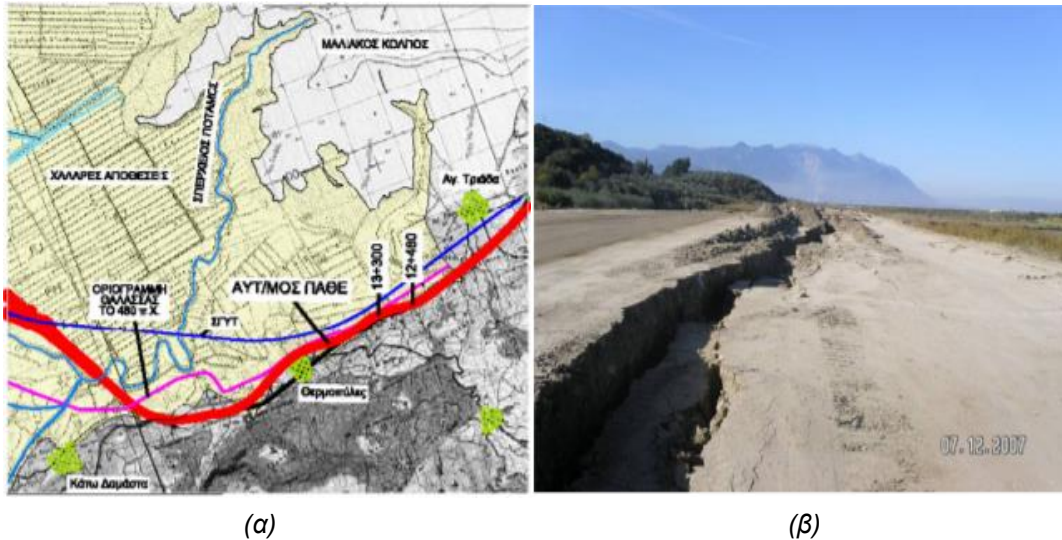
Στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου της εργασίας επιχειρείται η περιγραφή του αντικειμένου μελέτης των διενεργηθέντων ελέγχων και η μέθοδος αντιμετώπισης και επίλυσης του προβλήματος, το οποίο εμφανίστηκε κατά την κατασκευή των έργων, ως επίσης και η περαιτέρω διερεύνηση του προβλήματος, με την εξέταση διαφορετικών παραγόντων.

#### **4.1. Περιγραφή αντικειμένου και μέτρων αντιμετώπισης**

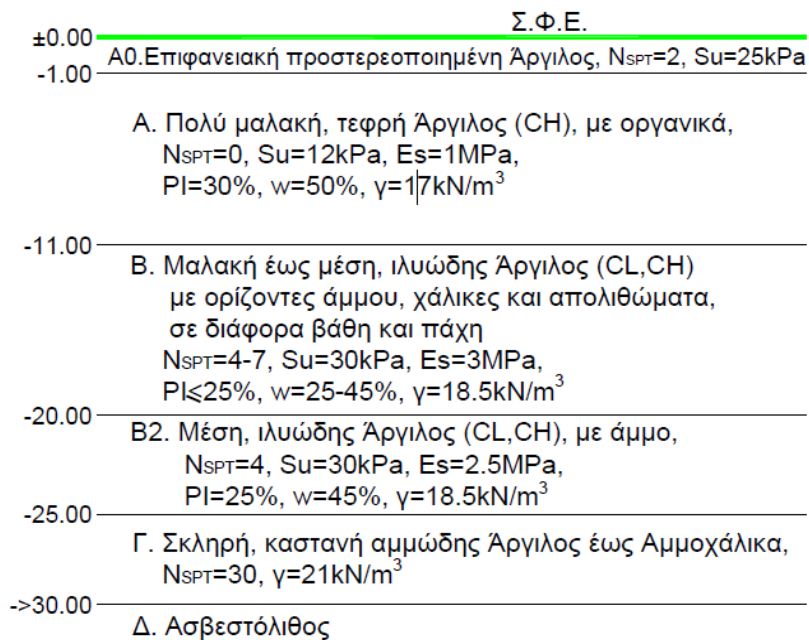
##### Θέση και περιγραφή αντικειμένου

Στην περιοχή βορειοανατολικά του οικισμού των Θερμοπυλών και νοτίως του Μαλιακού Κόλπου, προβλέπεται η κατασκευή αυτοκινητόδρομου από επίπεδη, βαλτώδη περιοχή, καλυπτόμενη από θαλάσσιες αποθέσεις, με πολύ πτωχά εδαφικά χαρακτηριστικά. Στην περιοχή το φυσικό έδαφος ευρίσκεται σε υψόμετρο, περίπου +1μ. από την στάθμη της θάλασσας, ενώ ο υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας εντοπίζεται σχεδόν στην επιφάνεια του εδάφους (περίπου 0,5μ.). Κατά την μελέτη του οδικού άξονα στην περιοχή προβλεπόταν επίχωμα ύψους έως 7,5m (και έως 8,5m στον Η/Κ Θερμοπυλών) με βελτίωση του εδάφους έδρασης με εξυγιαντική στρώση πάχους 1,0μ. και χαλικοπασσάλους διαμέτρου 0,80μ. και ύψους 11-15μ. σε τριγωνική διάταξη πλευράς 3,0μ. Κατά την κατασκευή του επιχώματος του αυτοκινητόδρομου, όταν το ύψος του επιχώματος έφθασε τα 4-4,5μ., προέκυψε αστοχία σε μήκος 200μ. περίπου, με καθίζηση ύψους περίπου 1μ. και δημιουργία ρωγμής, με άνοιγμα μεγαλύτερο των 2μ. παράλληλα προς τον άξονα της χάραξης και σε απόσταση περίπου 10μ. από το άκρο της στέψης (βλ. Εικόνα 4.1(β)). Η σημειωθείσα αστοχία αποδόθηκε στα πτωχά εδαφικά χαρακτηριστικά του υπεδάφους και στη συνέχεια εκπονήθηκαν νέες γεωτεχνικές έρευνες και μελέτες. Η στρωματογραφία του εδάφους φαίνεται στην Εικόνα 4.2. και χαρακτηρίζεται από την παρουσία πολύ μαλακής και συμπιεστής αργίλου, υψηλής γενικά πλαστικότητας έως βάθος 10–12μ., ενώ στη συνέχεια συναντώνται μαλακοί σχηματισμοί αργιλικής κυρίως σύστασης έως βάθους 25μ. περίπου. Οι γεωτεχνικές συνθήκες χαρακτηρίζονται ως οι δυσμενέστερες της ευρύτερης περιοχής της κοιλάδας του π. Σπερχειού, από την οποία διέρχεται ο αυτοκινητόδρομος. Δεδομένου ότι το ενδεχόμενο παραλλαγής της χάραξης τόσο οριζοντιογραφικά όσο και υψομετρικά ήταν αποκλεισμένο για διάφορους λόγους, θα

έπρεπε απαραίτητα να εξερευνηθεί τρόπος ώστε να θεμελιωθεί με ασφάλεια. Για την επίλυση του προβλήματος προτάθηκε η δόμηση του επιχώματος με ελαφρά υλικά και συγκεκριμένα με χρήση διογκωμένης πολυστερίνης (EPS), τεχνική εφαρμογή πρωτοποριακή για τα μέχρι σήμερα Ελληνικά δεδομένα.



Εικόνες 4.1: Απόσπασμα από την τεχνική έκθεση της μελέτης (2008): (α) Θέση οδικού άξονα, (β) Απεικόνιση εδαφικής αστοχίας του επιχώματος



Εικόνα 4.2 : Απόσπασμα από την τεχνική έκθεση της μελέτης (2008), στρωματογραφία εδάφους περιοχής

### Κριτήρια και σχεδιασμός μέτρων αντιμετώπισης

Όπως σε κάθε άλλο συγκοινωνιακό έργο, έτσι και σε αυτό τα κριτήρια και ο σχεδιασμός παίζουν πρωταρχικό ρόλο στην μελέτη του έργου και έχουν ως απώτερο σκοπό την εξασφάλιση της ασφάλειας και το όσο δυνατόν μικρότερο κόστος κατασκευής και συντήρησης.

Στην προκειμένη περίπτωση ο σχεδιασμός των μέτρων αποκατάστασης έγινε με τα ακόλουθα κριτήρια:

- 1) Την ασφαλή έδραση του επιχώματος έναντι αστοχίας της μαλακής αργίλου.
- 2) Τον περιορισμό των μετακατασκευαστικών καθιζήσεων σε ανεκτά μεγέθη <10cm.
- 3) Την ανάγκη ταχείας ολοκλήρωσης και απόδοσης του έργου, λόγω των κυκλοφοριακών προβλημάτων στο «πέταλο του Μαλιακού».

Αρχικά τροποποιήθηκε η μελέτη οδοποιίας και απομακρύνθηκαν τα τεχνικά Κάτω Διαβάσεων, με σκοπό να περιορισθεί το ύψος των επιχωμάτων του αυτοκινητόδρομου έως τα 4,5μ., ενώ για τον κλάδο του Η/Κ Θερμοπυλών διατηρήθηκε υποχρεωτικά το ύψος έως 8,5μ. Κατόπιν διερεύνησης εναλλακτικών λύσεων, ως μοναδική λύση η οποία θα ικανοποιούσε τα προαναφερθέντα κριτήρια, θεωρήθηκε η κατασκευή του επιχώματος από ελαφρά υλικά διογκωμένης πολυστερίνης EPS όπως προαναφέρθηκε. Το ελαφρύ επίχωμα εφαρμόστηκε σε μήκος  $\approx 820\mu.$  στον αυτοκινητόδρομο και  $\approx 210\mu.$  στον κλάδο Θερμοπυλών. Τα υπόλοιπα επιχώματα, μήκους περίπου 500μ. και ύψους έως 2,5μ., εδραζόμενα σε ελαφρώς καλύτερο έδαφος, κατασκευάστηκαν από γαιώδη υλικά, σε συνδυασμό με επιφόρτιση και πλαστικά στραγγιστήρια.

Για την αποτελεσματικότητα της λύσης EPS επιδιώχθηκε ο μέγιστος δυνατός περιορισμός του πάχους των γαιωδών επιχωμάτων και των στρώσεων οδοστρωσίας, αντιμετωπίζοντας επιπλέον και την υψομετρική διαφορά μεταξύ των δύο άκρων της στέψης του επιχώματος λόγω έντονης επίκλισης.

Προβλέφθηκαν κατά σειρά τα ακόλουθα:

Αφαιρέθηκε το κατασκευασθέν γαιώδες επίχωμα, ύψους  $\geq 1\mu.$  και του επιφανειακού εδάφους σε όλη την επιφάνεια έδρασης, έως βάθους 0,75μ. από τη φυσική στάθμη.

Περιορίστηκε το πάχος των στρώσεων στράγγισης-εξυγίανσης στο ελάχιστο 0,50μ., με καταρχήν τοποθέτηση στρώσης 25cm, ως δάπεδο εργασίας. Επί της στρώσης αυτής διαστρώθηκαν κατά σειρά γεώφασμα διαχωρισμού και γεώπλεγμα υψηλής αντοχής. Η εξυγίανση ολοκληρώθηκε με κατασκευή στρώσης στράγγισης-έδρασης-εξομάλυνσης μεταβλητού πάχους 0,25μ. έως 0,75μ., που διαμορφώθηκε με τελική κεκλιμένη επιφάνεια, ακολουθώντας τις κατά μήκος κλίσεις και επικλίσεις της οδού σύμφωνα με την σχετική μελέτη.



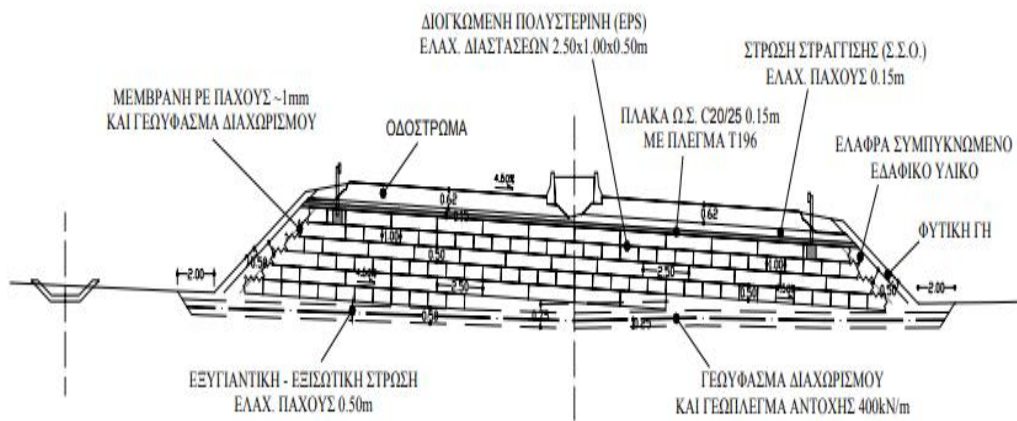
Ακολούθησε η κατασκευή του ελαφρού επιχώματος, με τοποθέτηση επί της κεκλιμένης επιφάνειας προκατασκευασμένων μπλοκ EPS 100 (κατά EN 14933, 2007), θλιπτικής αντοχής 100kPa και ελαχίστων διαστάσεων 1,0x2,0μ. Το EPS τοποθετήθηκε κατά στρώσεις, ελαχίστου πάχους 50cm εκάστη, σε κλιμακωτή διάταξη με μέση κλίση πρανών 2:3 (υ:β). Για την αποφυγή κατακόρυφων αρμών, οι διαδοχικές στρώσεις διαμορφώθηκαν με εναλλάξ τοποθέτηση των μπλοκ με τη μεγάλη διάσταση κατά μήκος και κατά πλάτος αντίστοιχα. Για να αποφευχθεί ολίσθηση κατά τη διάρκεια της ενσωμάτωσης, τα μπλοκ EPS των διαδοχικών στρώσεων συνδέθηκαν μεταξύ τους με μεταλλικά στοιχεία.

Τα πλευρικά πρανή καλύφθηκαν με μεμβράνη πολυαιθυλενίου πάχους 1mm και γεωυφάσματος διαχωρισμού και διαμορφώνονται τα τελικά πρανή του επιχώματος με ελαφρά συμπυκνωμένα υλικά κατηγορίας E1 και τελική κλίση 2:3(υ:β) και επικαλύφθηκαν με στρώση φυτικών γαιών πάχους 0,30μ.

Στη στέψη του ελαφρού επιχώματος και τη βάση του οδοστρώματος κατασκευάστηκε πλάκα σκυροδέματος C20/25, πάχους 15cm ελαφρά οπλισμένη με δομικό πλέγμα T196 στον άξονα, με σκοπό την εξασφάλιση της προστασίας του EPS, την απαιτούμενη φέρουσα ικανότητα έδρασης του οδοστρώματος και τη διευκόλυνση αποστράγγισης. Η πλάκα εκτείνεται έως το όριο των πρανών του επιχώματος, διατηρώντας, όπως και οι στρώσεις EPS τη διαμήκη κλίση και επίκλιση του οδοστρώματος.

Η διαστρωμάτωση (ποιότητα και πάχη στρώσεων) του εύκαμπτου οδοστρώματος, διατηρήθηκε όπως προβλεπόταν αρχικά, ενώ, η στράγγιση γίνεται μέσω μονοκλινούς στραγγιστικής στρώσης επί της πλάκας του ελαφρώς οπλισμένου σκυροδέματος. Στις θέσεις έδρασης στηθαίων και καναλιού εκφόρτισης του νερού από το οδόστρωμα, τα μπλοκ της διογκωμένης πολυστερίνης προσαρμόστηκαν κατάλληλα με επιτόπου κοπή, προ της σκυροδέτησης της πλάκας.

Τέλος, στη συναρμογή ελαφρού επιχώματος και συμβατικού επιχώματος διαμορφώνονται κλιμακωτοί αναβαθμοί, ύψους 0,50μ. και ακολούθησε τοποθέτηση κοκκώδους υλικού στο εύρος των αναβαθμών, διάστρωση γεωυφάσματος και στεγανωτικής μεμβράνης και τοποθέτηση των μπλοκ διογκωμένης πολυστερίνης σε κλιμακωτή διάταξη, με αύξηση από κάτω προς τα άνω. Στη βάση προβλέπεται εγκάρσιος διάτρητος πλαστικός σωλήνας για την αποφυγή εμπλοκισμού.



Σχήμα 4.1: Τυπική διατομή επιχώματος και διάταξης μέτρων βελτίωσης.



(α)

(β)

Εικόνα 4.3: (α) Διατομή οδικού τμήματος με γεωαφρό EPS, (β) Τοποθέτηση μπλοκ EPS για την κατασκευή οδικού επιχώματος.

## 4.2. Αναλύσεις και υπολογισμοί

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται και σχολιάζονται οι υπολογισμοί και τα αποτελέσματα που προέκυψαν. Όπως αναφέρεται στο Κεφάλαιο 2 το λογισμικό το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τους υπολογισμούς αυτούς είναι το SLIDE, προϊόν της εταιρίας Rocscience. Το λογισμικό προσφέρει δισδιάστατο περιβάλλον μοντελοποίησης και χρησιμοποιείται ευρέως για αναλύσεις παραμόρφωσης και ευστάθειας και χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση των γεωτεχνικών μελετών από την ομάδα των μηχανικών οι οποίοι ασχολήθηκαν με την εξεύρεση της βέλτιστης λύσης του προβλήματος το οποίο παρουσιάστηκε κατά την υλοποίηση των έργων.

### 4.3. Έλεγχος ευστάθειας επιχώματος από εδαφικό υλικό

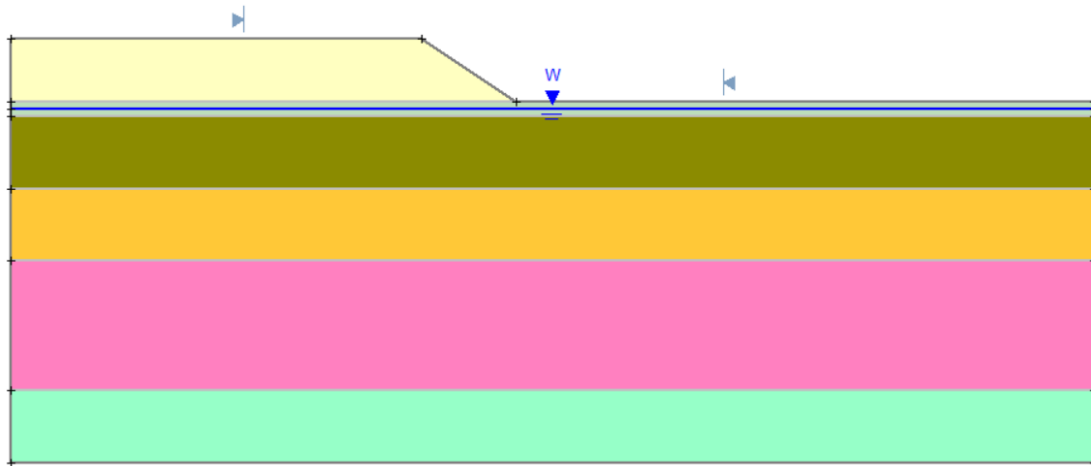
Όπως προαναφέρθηκε κατά την κατασκευή του οδικού τμήματος στη διατομή της χάραξης στη συγκεκριμένη θέση προβλεπόταν η κατασκευή επιχώματος ύψους 8,5μ. Όμως, κατά την κατασκευή του επιχώματος από εδαφικά υλικά και όταν αυτό έφθασε το ύψος των 4,4μ., παρουσιάστηκαν φαινόμενα αστοχίας.

Στην ενότητα αυτή πραγματοποιούνται οι υπολογισμοί για τη διερεύνηση της ευστάθειας του επιχώματος αυτού έως το σημείο που αυτό τελικά αστοχεί. Δεδομένης της γεωμετρίας της διατομής καθώς και των εδαφικών χαρακτηριστικών του υπεδάφους κατασκευάστηκε μοντέλο προς επίλυση στο λογισμικό SLIDE, το οποίο υπολογίζει συντελεστή ασφαλείας και πιθανή επιφάνεια αστοχίας με την μέθοδο Bishop.

Συγκεκριμένα, η κλίση του πρανούς είναι η τυπική κλίση οδικού επιχώματος 2÷3 ( $\alpha \div \beta$ ) δηλαδή  $\cong 34^\circ$ , ενώ τα εδαφικά χαρακτηριστικά και τα πάχη των στρώσεων τα οποία αφορούν τα υπέδαφος και το υλικό του επιχώματος, φαίνονται στον Πίνακα 4.1. και θεωρούνται δεδομένα. Η στάθμη του υδροφόρου ορίζονται ευρίσκεται σε ύψος +0,5μ από την Μ.Σ.Θ. Στην Εικόνα 4.4. φαίνεται η σχηματική απεικόνιση του δισδιάστατου μοντέλου που κατασκευάστηκε βάσει των παραπάνω δεδομένων.

Στρώσεις	Πάχος(μ.)	Χαρακτηριστικά εδαφικών υλικών
Επίχωμα	4,4	$\gamma=20\text{kN/m}^3$ , $c=5\text{kN/m}^2$ , $\phi=32^\circ$
A.0 (εξυγιαντική στρώση)	1,0	$\gamma=17\text{kN/m}^3$ , $c=25\text{kN/m}^2$ , $\phi=0^\circ$
A.1	5,0	$\gamma=17\text{kN/m}^3$ , $c=12\text{kN/m}^2$ , $\phi=1,5^\circ$
A.2	5,0	$\gamma=17\text{kN/m}^3$ , $c=15\text{kN/m}^2$ , $\phi=0^\circ$
B.1	9,0	$\gamma=18,5\text{kN/m}^3$ , $c=30\text{kN/m}^2$ , $\phi=0^\circ$
B.2	5,0	$\gamma=18,5\text{kN/m}^3$ , $c=30\text{kN/m}^2$ , $\phi=0^\circ$

Πίνακας 4.1: Εδαφικά χαρακτηριστικά και στρωματογραφία περιοχής



Εικόνα 4.4: Διατομή μοντέλου επιχώματος ύψους 4,4μ. από εδαφικό υλικό.

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο η ευστάθεια ενός πρανούς ελέγχεται ως προς δύο συνθήκες. Αυτές είναι οι στατικές όπου λαμβάνονται υπ' όψιν οι βαρυτικές δυνάμεις και οι ψευδοστατικές, όπου λαμβάνονται υπ' όψιν η επίδραση οριζόντιων και κατακόρυφων επιταχύνσεων, οι οποίες προσομοιάζονται με σεισμό.

Στη συνέχεια διαχωρίζονται και εξετάζονται οι δύο περιπτώσεις, αφού για την κατασκευή οποιουδήποτε τεχνικού έργου είναι απαραίτητη η εξασφάλιση της ασφάλεια αυτού, σε όσο το δυνατόν δυσμενέστερες συνθήκες, όπως μία σεισμική διέγερση.

1<sup>η</sup> Θεώρηση : Έλεγχος ευστάθειας επιχώματος από εδαφικό υλικό, υπό στατικές συνθήκες

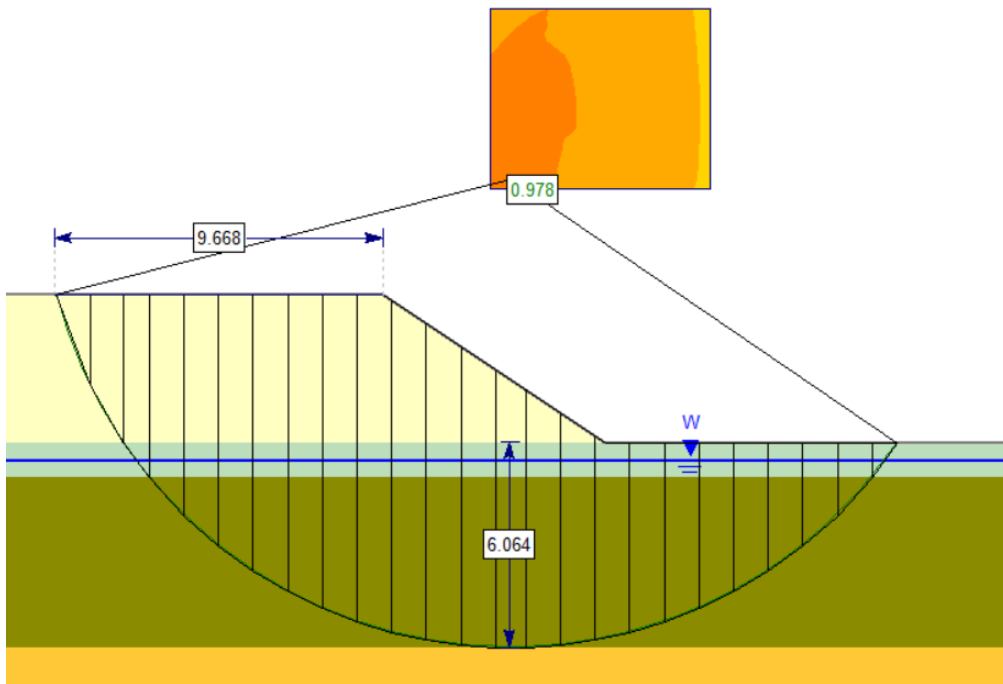
Ο πρώτος έλεγχος ευστάθειας, έγινε για στατικές συνθήκες (δηλαδή, την επίδραση της βαρύτητας), μετά την γεωμετρική κατασκευή του μοντέλου και την ενημέρωση του λογισμικού με τα χαρακτηριστικά των εδαφικών υλικών, όπως φαίνονται στον Πίνακα 4.1. Προέκυψε συντελεστής ασφαλείας του επιχώματος  $F.S.=0,98$ .

Πράγματι, λοιπόν το επίχωμα του αυτοκινητόδρομου σε αυτή τη θέση και με αυτό το ύψος, αστοχεί με βαθιά θραύση. Στην Εικόνα 4.4. φαίνεται σχηματικά η επιφάνεια αστοχίας η οποία προέκυψε.

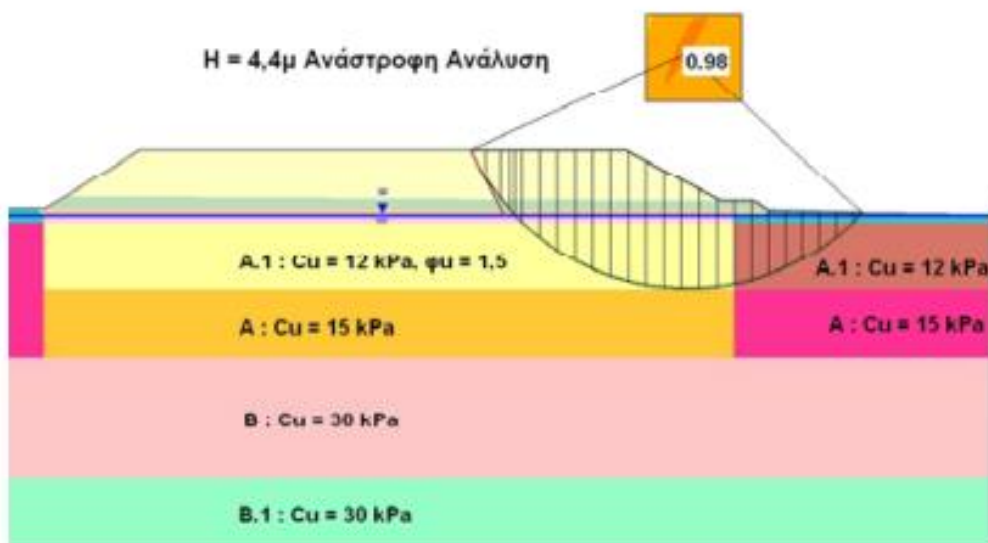
Το λογισμικό προσφέρει τη δυνατότητα μέτρησης αποστάσεων, εργαλείο το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την επαλήθευση των αποστάσεων που προέκυψαν από το λογισμικό σε σχέση με αυτές που πραγματικά έλαβαν χώρα στο έργο.

Συγκεκριμένα, όπως αναφέρεται η ρωγμή παρουσιάστηκε σε απόσταση 10μ. από την στέψη του επιχώματος και η επιφάνεια αστοχίας είχε βάθος 6,0μ. Στην Εικόνα 4.5. αναγράφονται οι αντίστοιχες αποστάσεις (9,67μ. και 6,06μ.) οι οποίες προέκυψαν από το λογισμικό SLIDE. Οι πολύ μικρής τάξεως διαφορές μεταξύ των αντίστοιχων αποστάσεων, καταδεικνύει την αξιοπιστία των αναλύσεων.

Ο πρώτος αυτός υπολογισμός, θεωρείται διαδικασία επαλήθευσης των αποτελεσμάτων. Πράγματι, τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν από τους υπολογισμούς ταυτίζονται με αυτά που παρουσιάζονται στην τεχνική έκθεση της μελέτης. Στην Εικόνα 4.6. παρουσιάζεται απόσπασμα των αποτελεσμάτων τα οποία προέκυψαν από την μελέτη.



Εικόνα 4.5: Έλεγχος ευστάθειας επιχώματος ύψους 4,4μ. από εδαφικό υλικό υπό στατικές συνθήκες



Εικόνα 4.6: Απόσπασμα από την τεχνική έκθεση της μελέτης (2008)

2<sup>η</sup> Θεώρηση: Έλεγχος ευστάθειας επιχώματος από εδαφικό υλικό, υπό ψευδοστατικές συνθήκες

Είναι αυτονόητο ότι, κατόπιν της παρατηρηθείσας αστοχίας του πρσανούς κατά την κατασκευή του υπό την επίδραση της βαρύτητας και μόνον, ο επόμενος έλεγχος υπό ψευδοστατικές συνθήκες είναι περιττός, δεδομένου ότι τα αποτελέσματα είναι αναμενόμενα, δηλαδή το επίχωμα και πάλι θα αστοχήσει και θα προκύψουν ακόμη μικρότεροι συντελεστές ασφαλείας. Σκόπιμη και χρήσιμη είναι η διερεύνηση του τρόπου με τον οποίο ο συντελεστής ασφαλείας μειώνεται κατά την εφαρμογή οριζόντιων και κατακόρυφων επιταχύνσεων.

Συγκεκριμένα και όσον αφορά το μέγεθος των επιταχύνσεων, η χώρα μας χωρίζεται σε τρεις ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας βάσει του Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού (Ε.Α.Κ.). Οι τιμές των οριζόντιων και κάθετων επιταχύνσεων φαίνονται παρακάτω στον Πίνακα 4.2. και η μονάδα μέτρησής τους είναι το (g). Οι τιμές των κάθετων επιταχύνσεων προκύπτουν από τις οριζόντιες επιταχύνσεις βάσει του τύπου:

$$a_h=0,5a_v \quad (1)$$

όπου  $a_h$ : οριζόντια επιτάχυνση,  
 $a_v$ : κατακόρυφη επιτάχυνση

Ζώνες κατά Ε.Α.Κ.	ΖΩΝΗ I	ΖΩΝΗ II	ΖΩΝΗ III
Οριζόντια επιτάχυνση(g)	0,16	0,24	0,36
Κατακόρυφη επιτάχυνση(g)	0,08	0,12	0,18

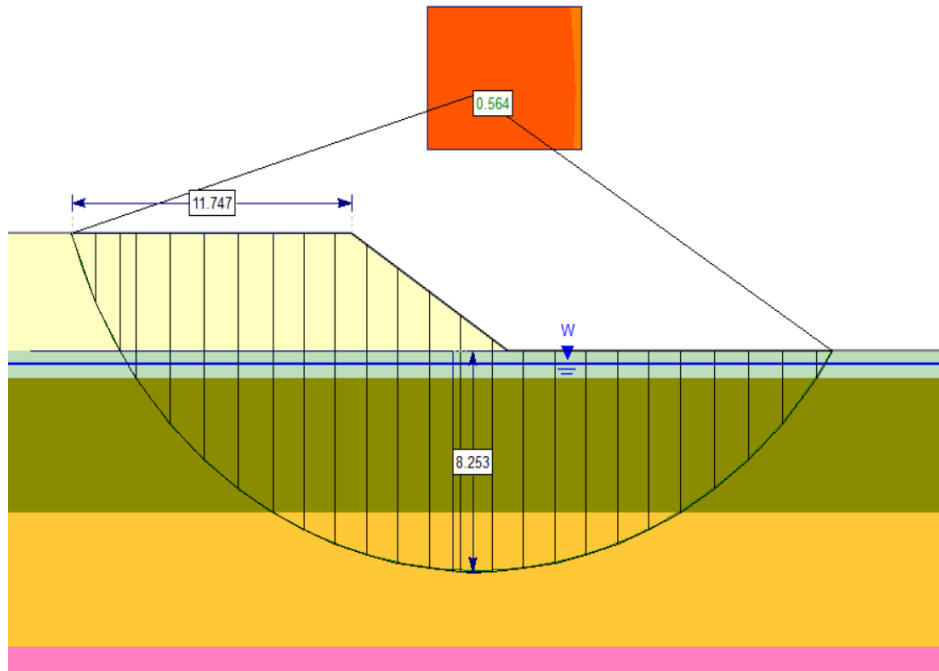
Πίνακας 4.2: Οριζόντιες και κάθετες επιταχύνσεις κατά Ε.Α.Κ.

Με μοντέλο της αυτής γεωμετρίας όπως και στην προηγούμενη θεώρηση (1<sup>η</sup> Θεώρηση), δόθηκε η εντολή στο πρόγραμμα να ελεγχθεί η ευστάθεια του επιχώματος για κάθε Ζώνη, με τις αντίστοιχες επιταχύνσεις οι οποίες αναφέρονται παραπάνω. Οι συντελεστές ασφαλείας που προέκυψαν από τους υπολογισμούς για κάθε μία από τις διαφορετικές σεισμικές διεγέρσεις, φαίνονται στον κατωτέρω Πίνακα 4.3:

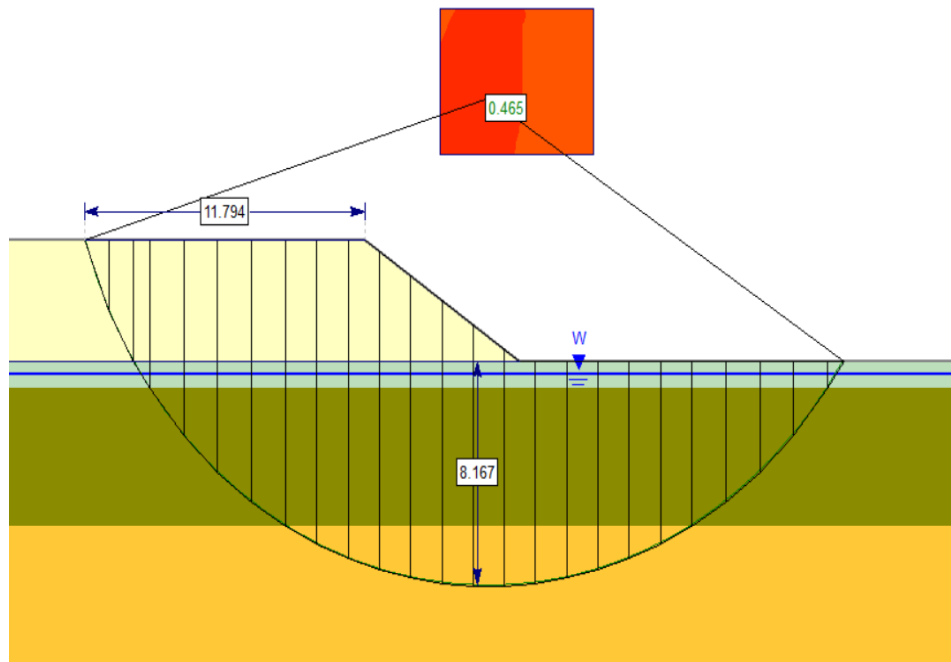
Οριζόντια/Κατακόρυφη επιτάχυνση (g)	0,16/0,08	0,24/0,12	0,36/0,18
Συντελεστής Ασφαλείας F.S.	0,56	0,47	0,37

Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα συντελεστών ασφαλείας του επιχώματος υπό σεισμική διέγερση

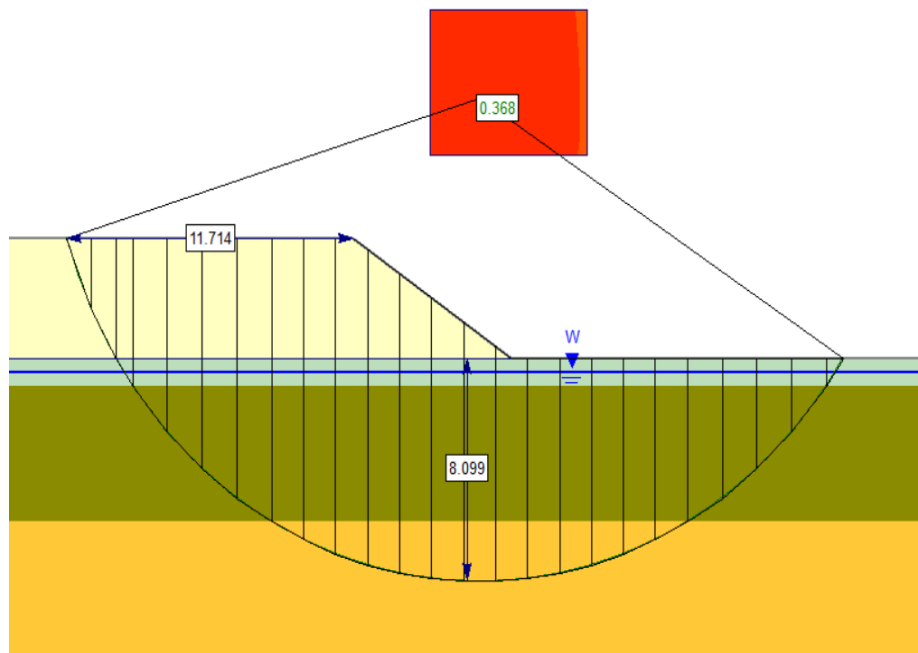
Όπως ήταν αναμενόμενο, το επίχωμα αστοχεί σε κάθε περίπτωση έχει απαγορευτικούς συντελεστές ασφαλείας όταν διεγείρεται από σεισμό και, σε κάθε περίπτωση, αστοχεί με βαθιά θραύση η οποία είναι κάθε φορά διαφορετική. Ο συντελεστής ασφαλείας παρουσιάζει μείωση 18-22%, όσο αυξάνονται οι μονάδες επιτάχυνσης. Η σχηματική απεικόνιση των τριών αυτών περιπτώσεων φαίνεται στις εικόνες που ακολουθούν.



(α)



(β)



(γ)

Εικόνα 4.7: Έλεγχος ευστάθειας επιχώματος υπό ψευδοστατικές συνθήκες: (α) Οριζόντια/Κατακόρυφη επιτάχυνση 0,16/0,08, (β) Οριζόντια/ Κατακόρυφη επιτάχυνση 0,24/0,12, (γ) Οριζόντια/Κατακόρυφη επιτάχυνση 0,36/0,18



#### 4.4. Έλεγχος ευστάθειας επιχώματος κατασκευασμένου από διογκωμένη πολυστερίνη (EPS) και εδαφικό υλικό

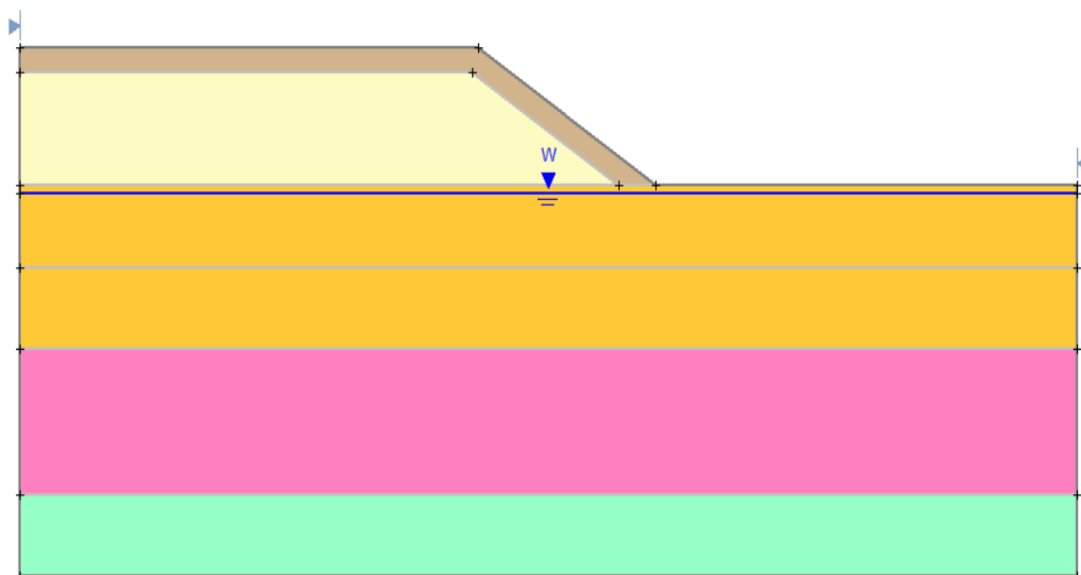
Δεδομένου ότι όπως ήδη αναφέρθηκε η χάραξη του οδικού άξονα δεν είναι δυνατόν να τροποποιηθεί τόσο οριζοντιογραφικά όσο και υψομετρικά, πρέπει να εξερευνηθεί λύση τέτοια ώστε το επίχωμα να φθάσει στο επιθυμητό ύψος των 8,5μ. και να ευσταθεί με ασφάλεια.

Η προταθείσα λύση ήταν αυτή της χρήσης διογκωμένης πολυστερίνης (EPS), με διάταξη μπλοκ σε όλη σχεδόν την έκταση της διατομής του επιχώματος.

Συγκεκριμένα, τοποθετήθηκαν ορθογώνια παραλληλεπίπεδα τεμάχια πάχους 1,0μ. μέχρι το ύψος των 7,0μ. και επίχωση του υλικού, πάχους 1,5μ. με εδαφικό υλικό.

Η γεωμετρία της διατομής ως προς την κλίση παραμένει η αυτή, όπως στις προηγούμενες περιπτώσεις. Για την διεξαγωγή του ελέγχου μέσω του λογισμικού το μόνο στοιχείο το οποίο αντικαταστάθηκε, ήταν αυτό του υλικού, δηλαδή αντί του εδαφικού υλικού, το υλικό EPS, με τις ιδιότητες οι οποίες αναφέρθηκαν στην ενότητα 4.1.

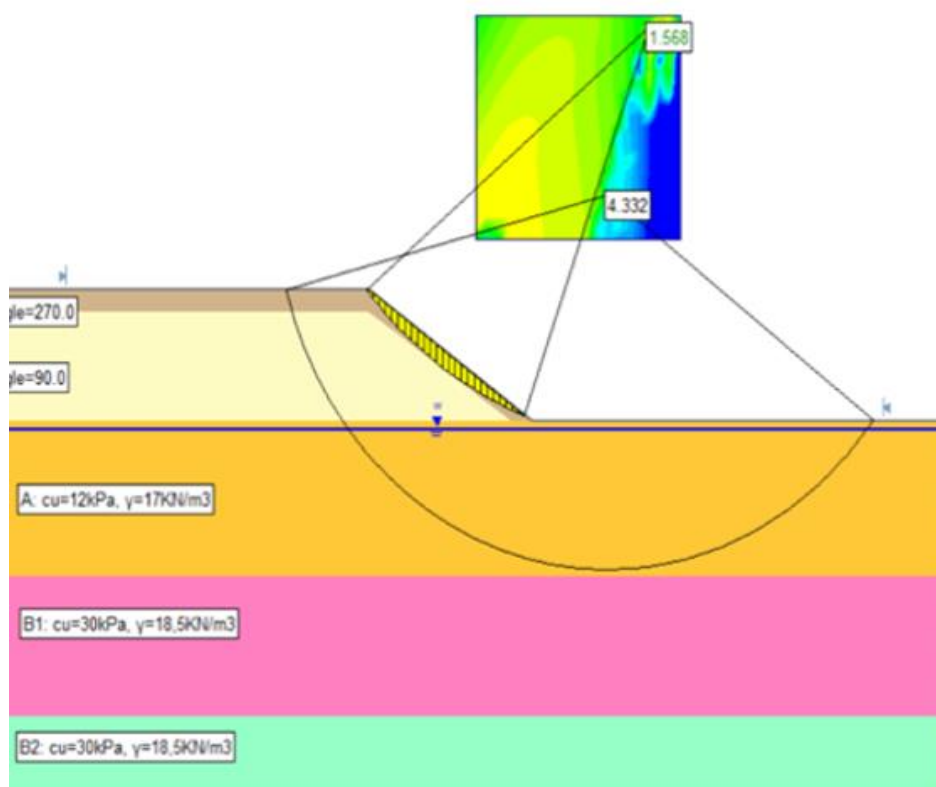
Στη συνέχεια διενεργούνται υπολογισμοί ελέγχου ευστάθειας, υπό δύο και πάλι θεωρήσεις, υπό στατικές και υπό ψευδοστατικές συνθήκες φόρτισης. Η υπό μελέτη διατομή απεικονίζεται φαίνεται στην Εικόνα 4.8.



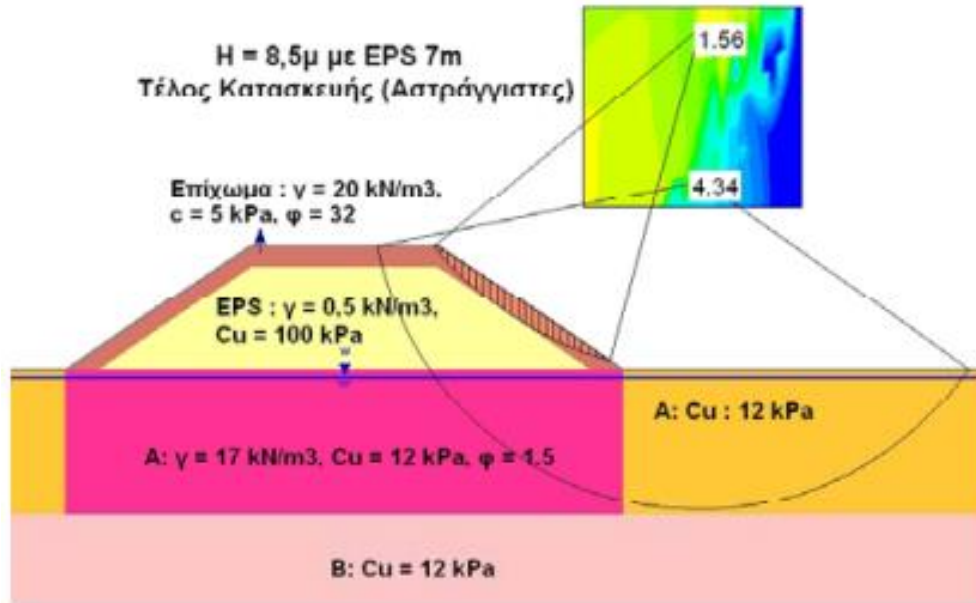
Εικόνα 4.8: Διατομή μοντέλου επιχώματος ύψους 8,5μ. από διογκωμένη πολυστερίνη (EPS) και εδαφικό υλικό

1<sup>η</sup> Θεώρηση: Έλεγχος ευστάθειας επιχώματος με EPS υπό στατικές συνθήκες

Στο ελεγχόμενο μοντέλο το επίχωμα είχε ύψος 8,5μ., εκ των οποίων τα 7,0μ. δομήθηκαν με υλικό EPS και το υπόλοιπο 1,5μ. είναι εδαφικό υλικό επίχωσης. Μέσω του λογισμικού και με εφαρμογή των ανωτέρω τιμών σχεδιασμού προέκυψε τιμή του συντελεστή ασφαλείας  $F.S.=1,59 (>1,00)$ , γεγονός το οποίο σημαίνει ότι δεν τίθεται θέμα για την ευστάθεια του πρανούς όσον αφορά την επίδραση της βαρύτητας. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι η επιφάνεια πιθανής αστοχίας που προέκυψε, αφορά την επιφανειακή στρώση επίχωσης από το εδαφικό υλικό το οποίο περιβάλλει το EPS. Για το ενδεχόμενο βαθιάς θραύσης ο συντελεστής ασφαλείας είναι αρκετά μεγαλύτερος, με τιμή  $F.S.= 4,33$ , γεγονός το οποίο καταδεικνύει ότι η ευστάθεια βελτιώνεται σε μεγάλο βαθμό, έναντι της περίπτωσης δόμησης του επιχώματος εξ ολοκλήρου από εδαφικά υλικά. Στην Εικόνα 4.9. φαίνεται η σχηματική απεικόνιση των παραπάνω υπολογισμών.



Εικόνα 4.9: Έλεγχος ευστάθειας επιχώματος ύψους 8,5μ. από διογκωμένη πολυστερίνη (EPS) και εδαφικό υλικό υπό στατικές συνθήκες.



Εικόνα 4.10: Απόσπασμα από την τεχνική έκθεση της μελέτης (2008)

2<sup>η</sup> Θεώρηση: Έλεγχος ευστάθειας επιχώματος αποτελούμενου από EPS και εδαφικό υλικό, υπό ψευδοστατικές συνθήκες

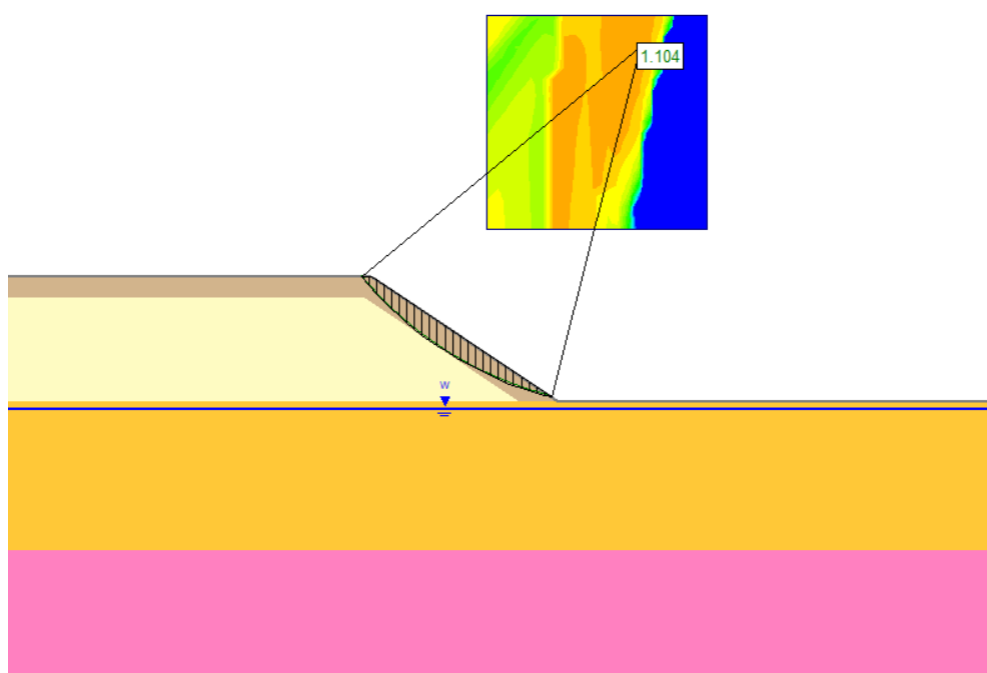
Για ακόμη μία φορά ο έλεγχος της ευστάθειας του επιχώματος γίνεται για ψευδοστατικές συνθήκες με την υπόθεση διέγερσης οριζόντιων και κατακόρυφων επιταχύνσεων. Ο έλεγχος διεξάγεται για τις τρεις διαφορετικές Ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας όπως και στην προηγούμενη ενότητα και τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν παρατίθενται στον ακόλουθο Πίνακα 4.4.

Οριζόντια/Κατακόρυφη επιτάχυνση (g)	0,16/0,08	0,24/0,12	0,36/0,18
Συντελεστής Ασφαλείας	1,10	0,98	0,84

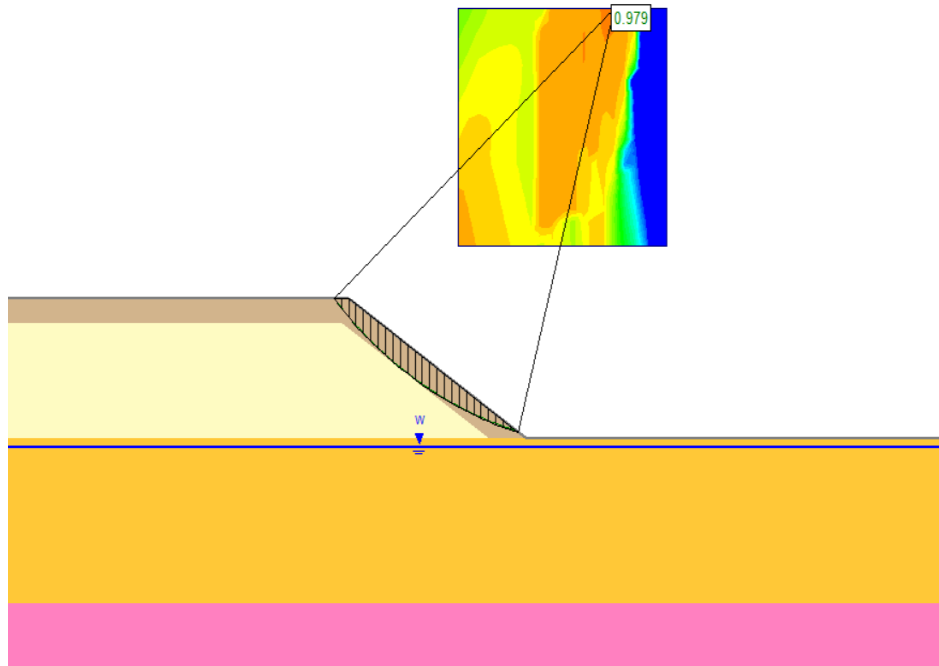
Πίνακας 4.4.: Αποτελέσματα συντελεστών ασφαλείας του επιχώματος υπό σεισμική διέγερση

Οι συντελεστές ασφαλείας παρουσιάζουν σχετικά σταθερή μείωση περίπου 18-22%, καθώς οι μονάδες επιταχύνσεων αυξάνονται. Στις τελευταίες δύο επιταχύνσεις το επίχωμα φαίνεται ότι αστοχεί όμως, όπως αναφέρθηκε και στην 2<sup>η</sup> Θεώρηση της ενότητας 4.2.1., η αστοχία παρουσιάζεται στην πλευρική επίχωση του EPS και δεν αφορά βαθιά θραύση. Ωστόσο αυτό δεν θα πρέπει να αμεληθεί, καθώς σε πιθανή αστοχία της πλευρικής επίχωσης το υλικό EPS θα εκτεθεί σε ήλιο και νερό, παράγοντες οι οποίοι συντελούν στην μείωση της λειτουργικότητάς του και ενδεχομένως στην καταστροφή του.

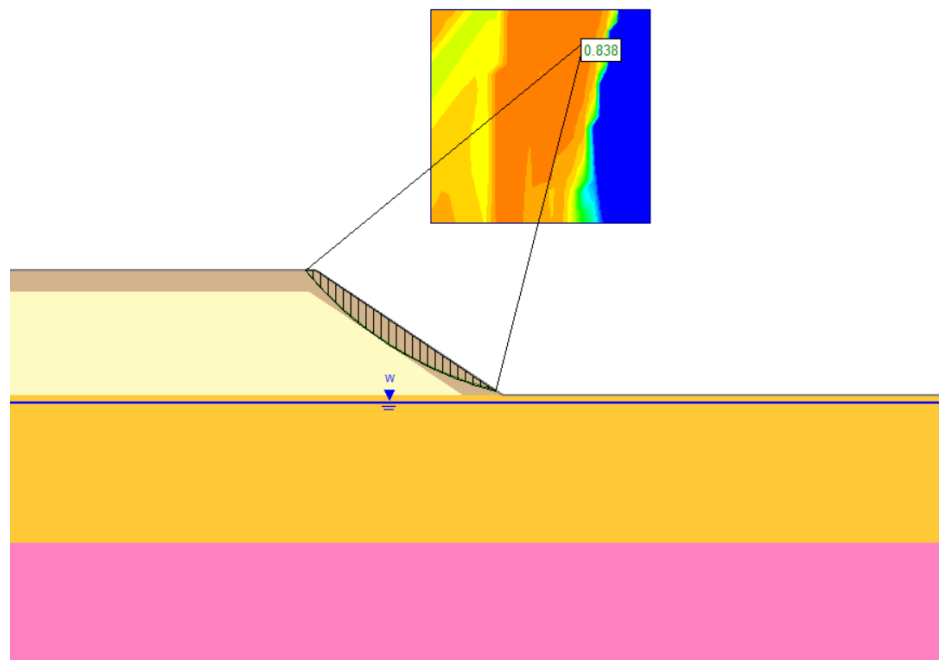
Στη συνέχεια παρατίθενται αποσπάσματα του λογισμικού που παρουσιάζουν την επιφάνεια αστοχίας για κάθε ένα από τα τρία εξετασθέντα ζεύγη επιταχύνσεων.



(α)



(β)

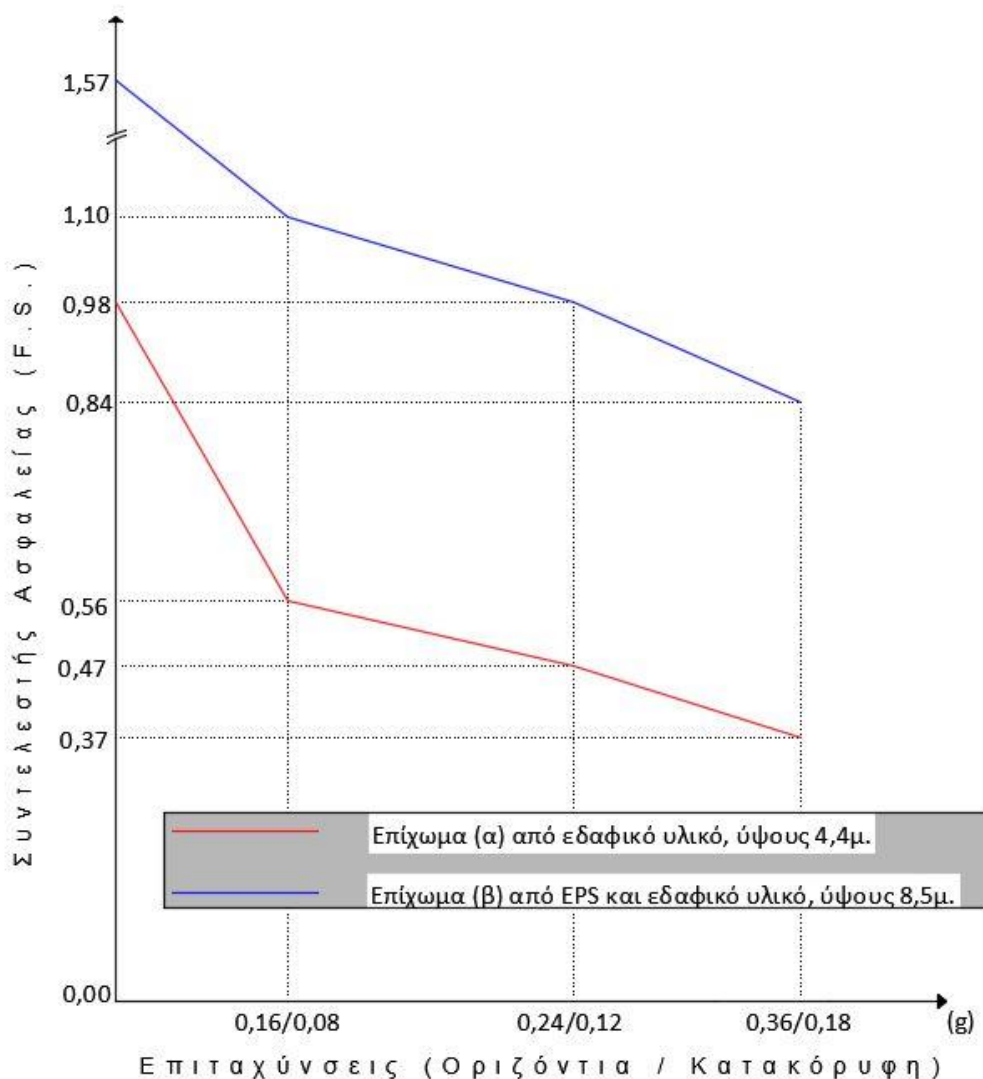


(γ)

Εικόνες 4.11: Έλεγχος ευστάθειας επιχώματος από διογκεωμένη πολυστερίνη (EPS) και εδαφικό υλικό υπό ψευδοστατικές συνθήκες: (α) Οριζόντια/Κατακόρυφη επιτάχυνση 0,16/0,08, (β) Οριζόντια/Κατακόρυφη επιτάχυνση 0,24/0,12,

#### 4.5. Παρατηρήσεις και σχόλια

Συνοψίζοντας και αφού ολοκληρώθηκαν οι έλεγχοι της ευστάθειας τόσο υπο στατικές όσο και υπο ψευδοστατικές συνθήκες για δύο διαφορετικά επιχώματα (α) Επίχωμα από εδαφικού υλικού ύψους 4,4μ. και (β) Επίχωμα από διογκωμένη πολυστερίνη (EPS) και εδαφικό υλικό ύψους 8,5μ. αξίζει να γίνει η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τους υπολογισμούς. Στην συνέχεια παρουσιάζεται γραφικό διάγραμμα σύγκρισης των δύο επιχωμάτων το οποίο διευκολύνει την κατανόηση και την εποπτεία των αποτελεσμάτων που προέκυψαν.



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα συντελεστή ασφαλείας σε συνάρτηση με τις οριζόντιες και κατακόρυφες επιταχύνσεις που εφαρμόστηκαν.

Παρατηρείται μία ενδιαφέρουσα, έντονη διαφορά μεταξύ των δύο προσεγγίσεων. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, ενώ η τιμή του συντελεστή ασφαλείας είναι αντιστρόφως

ανάλογη του ύψους του επιχώματος, προκύπτουν αποτελέσματα ευνοϊκότερα για το υψηλότερο επίχωμα ((β), ύψους 8,5μ.), λόγω της χρήσης της διογκωμένης πολυστερίνης (EPS). Η διαφορά των τιμών των συντελεστών ασφαλείας είναι σημαντική και όπως έχει αναφερθεί επανειλημμένα, από τις οριακές τιμές των συντελεστών οι οποίοι προέκυψαν κατά τον έλεγχο της ευστάθειας του επιχώματος ((β), ύψους 8,5μ.) προκύπτει ότι η πιθανή επιφάνεια αστοχίας αναμένεται, σε κάθε περίπτωση, εντός της μάζας του εδαφικού υλικού το οποίο επιστρώνεται περιμετρικά της διογκωμένης πολυστερίνης (EPS) και δεν αφορά βαθύτερη θραύση, όπως αντίθετα συμβαίνει στο επίχωμα ((α), ύψους 4,4μ.), όπου η επιφάνεια αστοχίας υπερβαίνει σε βάθος τα 6,0μ.

Οι παραπάνω τεκμηριωμένες διαπιστώσεις μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι με την χρήση της διογκωμένης πολυστερίνης (EPS) στο συγκεκριμένο έργο, όπου το υπέδαφος αποτελείται από μαλακά προβληματικά εδαφικά υλικά, επιτυγχάνεται ασφαλής λύση του προβλήματος της ευστάθειας το οποίο παρουσιάστηκε κατά την κατασκευή.

Όπως αναφέρεται στην τεχνική έκθεση της μελέτης, η κατασκευή ελαφρού επιχώματος από διογκωμένη πολυστερίνη (EPS) εφαρμόστηκε για πρώτη φορά στη χώρα μας στο συγκεκριμένο έργο οδοποιίας. Αξίζει να αναφερθεί ότι για την κατασκευή του επιχώματος με την παραπάνω τεχνική απαιτήθηκε χρονικό διάστημα κατά πολύ μικρότερο εκείνου, που θα απαιτούσε η κατασκευή ενός αντίστοιχου συμβατικού επιχώματος.

Όσον αφορά τέλος την μετακατασκευαστική συμπεριφορά του έργου υπό συνθήκες λειτουργίας, αυτή έχει αποδειχθεί, μέχρι σήμερα άμεμπτη, χωρίς ενδείξεις αστοχίας. Η επιτυχής αυτή πρώτη εφαρμογή ανοίγει τον δρόμο για την αξιοποίηση της μεθόδου στην κατασκευή εδραζόμενων σε μαλακά εδάφη τεχνικών έργων, αλλά και την ανακούφιση υφιστάμενων κατασκευών.

Σκόπιμη λοιπόν είναι η περαιτέρω διερεύνηση και η μελέτη από πλευράς των μηχανικών του τρόπου χρήσης και αξιοποίησης το υλικού EPS, για την εφαρμογή του σε δυσμενείς θέσεις νέων ή και υφιστάμενων έργων, με σκοπό την βελτιστοποίηση της λειτουργικότητας, αλλά και του κόστους κατασκευής του.



(α)



(β)

Εικόνα 4.12: (α), (β) Φωτογραφικό υλικό από το εργοτάξιο στον αυτοκινητόδρομο ΠΑΘΕ, στην θέση Θερμοπύλες (2008).



## 5. ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΟΥ ΕΠΙΧΩΜΑΤΟΣ

Οι σιδηρόδρομοι αποτελούν μια σημαντική μορφή μεταφοράς αγαθών και ανθρώπων η οποία παρουσιάζει ποικίλα πλεονεκτημάτων έναντι της οδικής και αεροπορικής για μικρές, μεσαίες, αλλά και μεγάλες αποστάσεις. Οι Σιδηρόδρομοι Υψηλών Ταχυτήτων (ΣΥΤ) (High Speed Lines - HSL) έχουν αναπτυχθεί σημαντικά σε παγκόσμιο επίπεδο τις τελευταίες δεκαετίες. Το δίκτυο υψηλών ταχυτήτων αναπτύσσεται συνεχώς στη δυτική Ευρώπη μετά το 1981. Ο πρώτος ΣΥΤ εγκαταστάθηκε στη Γαλλία στο τμήμα μεταξύ Παρισιού και Λυών. Σήμερα, έχει δημιουργηθεί ένα μεγάλο σιδηροδρομικό δίκτυο που συνδέει τις μεγάλες πρωτεύουσες των ευρωπαϊκών κρατών, ενώ δαπανώνται δεκάδες δισεκατομμύρια ευρώ ετησίως στον τομέα των σιδηροδρομικών μεταφορών. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την έντονη τεχνολογική ανάπτυξη, είχε ως αποτέλεσμα να αυξηθούν εκθετικά οι ταχύτητες των τρένων. Συγκεκριμένα, στην Ιαπωνία η οποία κατέχει το παγκόσμιο ρεκόρ για τη μεγαλύτερη ταχύτητα τραίνου ΣΥΤ, καταγράφηκε το 2015 η μέγιστη ταχύτητα των 603 χλμ/ώρα.

Η έντονη αυτή ανάπτυξη της ταχείας σιδηροδρομικής υποδομής, έχει οδηγήσει σε μια ποικιλία περιβαλλοντικών προκλήσεων. Το μεγαλύτερο πρόβλημα έγκειται στον εναέριο θόρυβο (air-borne vibration/noise) και τις εδαφικές δονήσεις (ground-borne vibration/noise) οι οποίες προκαλούνται από τους ΣΥΤ. Το μεγαλύτερο μέρος του προβλήματος, το οποίο αποτελεί πεδίο έρευνας πολλών ετών, εστιάζεται στις εδαφικές δονήσεις, οι οποίες είναι δυνατόν να προκαλέσουν βλάβες στα έργα υποδομής αλλά και σε γειτονικές κατασκευές.

Αντικείμενο του παρόντος κεφαλαίου αποτελεί αφενός η περιγραφή του φαινομένου διάδοσης των δονήσεων οι οποίες παράγονται κατά την διέλευση των τραίνων υψηλών ταχυτήτων, καθώς και ο τρόπος περιορισμού αυτών, με την χρήση διογκωμένη πολυστερίνης (EPS) στο επίχωμα, όπως επίσης ο έλεγχος ευστάθειας των σιδηροδρομικών επιχωμάτων έναντι στατικών και ψευδοστατικών συνθηκών και η διερεύνηση για την χρήση και την βέλτιστη διάταξη διογκωμένης πολυστερίνης (EPS) σε σιδηροδρομικά επιχώματα.

Συγκεκριμένα, γίνεται αναφορά στη Διδακτορική διατριβή (PhD) του κ. Αλέξανδρου Λυρατζάκη με τίτλο *“Efficient mitigation of high-speed trains induced vibrations of railway embankments using expanded polystyrene blocks”* υπό την επίβλεψη του κ. Πρόδρομου Ψαρρόπουλου, Ε.Δ.Ι.Π, Ε.Μ.Π., η οποία δημοσιεύτηκε το 2020 στο Γαλλικό περιοδικό Elsevier. Εκτενής περιγραφή της Διδακτορικής διατριβής γίνεται σε επόμενη Ενότητα (5.2.).

### 5.1. Μελέτη φαινομένου των δονήσεων

Το φαινόμενο των σιδηροδρομικών δονήσεων αποτελεί μέχρι και σήμερα σημαντικό αντικείμενο μελέτης και τούτο λόγω των αυξημένων ταχυτήτων των σύγχρονων τραίνων έναντι αυτών των παραδοσιακών, η ανάπτυξη των οποίων προκαλεί σημαντικό βαθμού εδαφικές δονήσεις, καθώς τα κύματα τα οποία παράγονται εντός του εδάφους από τα κινούμενα με υψηλές ταχύτητες φορτία έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά διάδοσης.

Το πρόβλημα συντίθεται από τρία κύρια στοιχεία: Την πηγή, τη διαδρομή διάδοσης και τις ιδιότητες του μέσου διάδοσης. Εάν η ταχύτητα του τραίνου επί της σιδηροτροχιάς είναι της αυτής τάξεως ή υψηλότερη από την ταχύτητα διάδοσης των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh στο υποκείμενο έδαφος ή εάν η συχνότητα της διέγερσης είναι της αυτής τάξεως με την ιδιοσυχνότητα του εδάφους διάδοσης, παρατηρείται πολύ μεγάλης κλίμακα αύξηση του πλάτους των εδαφικών δονήσεων. Το φαινόμενο εκτείνεται σε περιοχές διέλευσης από εδάφη μαλακής σύστασης, με πτωχές εδαφομηχανικές ιδιότητες.

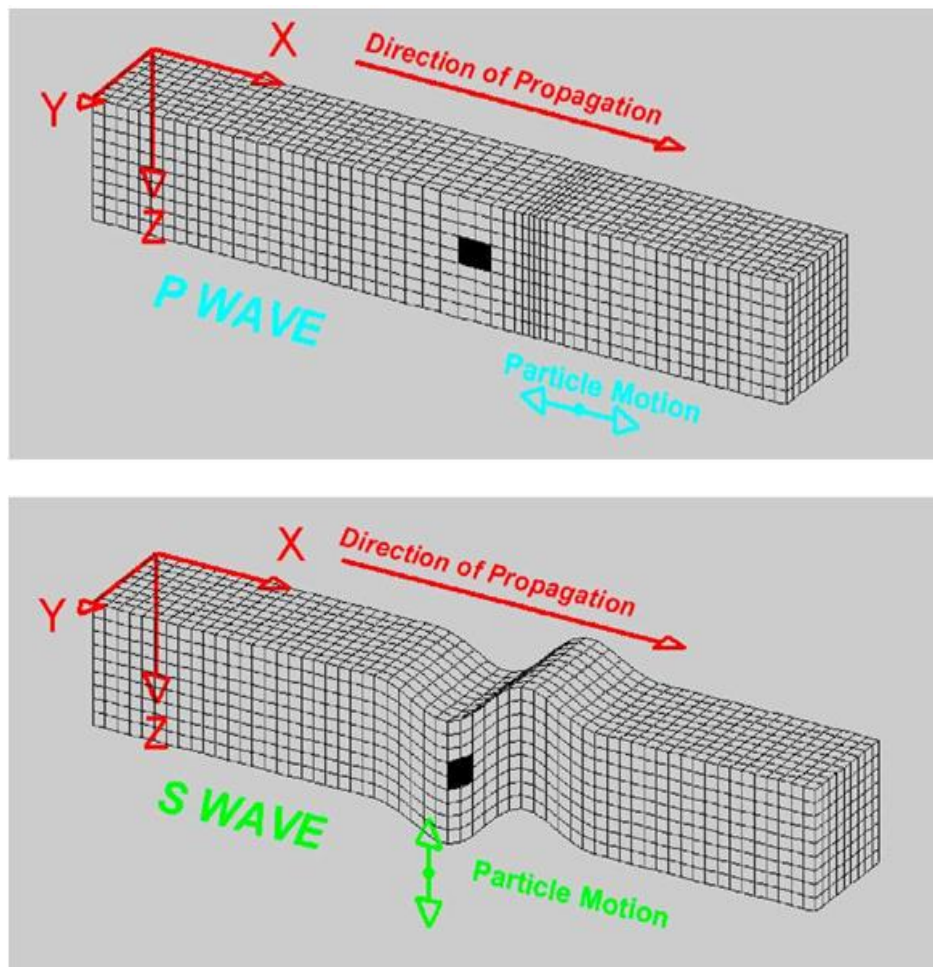
Το πρόβλημα αποκτά μεγαλύτερες διαστάσεις όταν πρόκειται για κατασκευή ή αναβάθμιση σιδηροδρομικής γραμμής διερχόμενης μέσω αστικής περιοχής. Το μέγεθος του προβλήματος το οποίο προκαλείται από το φαινόμενο, επιβάλλει την ανάπτυξη μίας αξιόπιστης και ενιαίας μεθοδολογίας πρόβλεψης των εδαφικών δονήσεων, η οποία θα εφαρμόζεται κατά την εκπόνηση των μελετών κατασκευής ή και αναβάθμισης.

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

Οι εδαφικές δονήσεις διαδίδονται στο έδαφος ως διάφοροι τύποι μηχανικών κυμάτων. Συνεπώς, κρίνεται απαραίτητη μια σύντομη αναφορά σε αυτά, στη διάδοσή τους στο έδαφος, στις σχετικές εδαφικές ιδιότητες και στις δονητικές μονάδες μέτρησης.

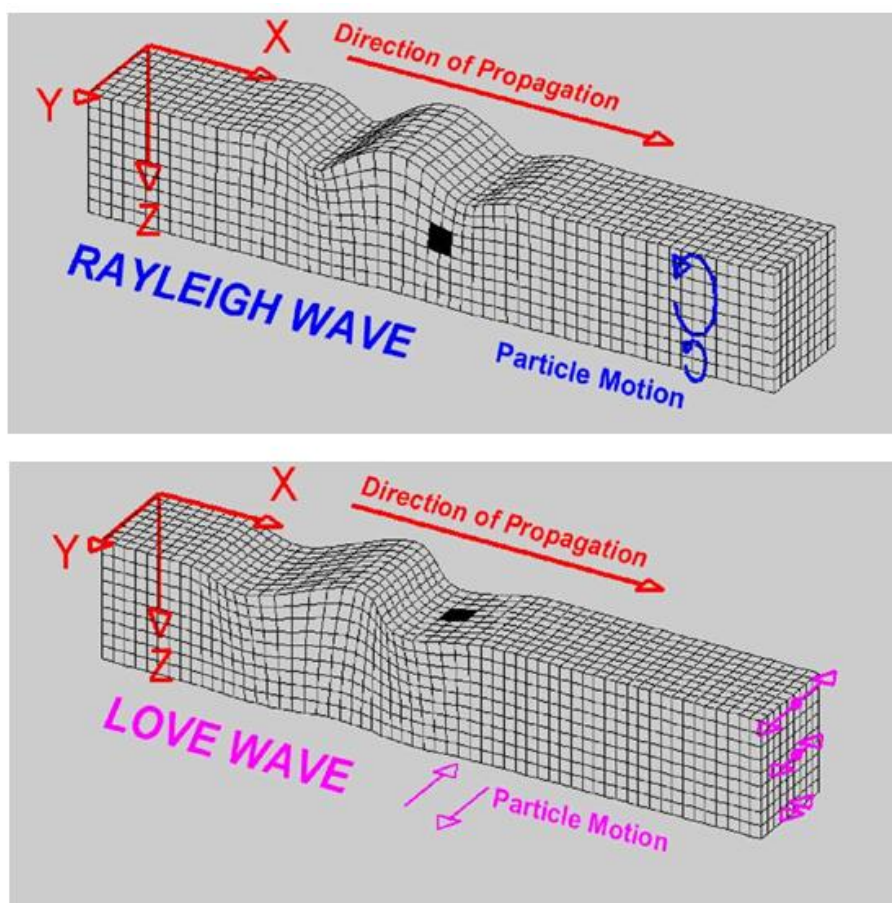
## 5.2. Οι τύποι των κυμάτων στο έδαφος και οι ιδιότητές τους

Οι δυο βασικοί τύποι κυμάτων σε ένα στερεό μέσο, όπως το έδαφος, είναι τα κύματα χώρου (Body Waves - BW) και τα επιφανειακά κύματα (Surface Waves - SW). Κύματα χώρου είναι τα διαμήκη ή επιμήκη ή συμπίεστικά κύματα ή κύματα P (Pressure Waves ή P - waves) και τα διατμητικά ή εγκάρσια κύματα ή κύματα S (Shear Waves ή S-waves). Στην τεχνική σεισμολογία αναφέρονται και ως πρωτεύοντα (Primary) και δευτερεύοντα (Secondary), αντίστοιχα. Η επιφανειακή αλληλεπίδραση μεταξύ των κυμάτων χώρου και μεταξύ της ίδιας της επιφάνειας μπορεί να παράγει επιφανειακά κύματα. Τα κύματα χώρου φαίνονται στο Σχήμα 5.1.



Σχήμα 5.1. : Διαμήκη και εγκάρσια κύματα χώρου

Επιφανειακά κύματα είναι τα κύματα Rayleigh (Rayleigh waves ή R- waves), τα κύματα Love (Love waves ή L-waves) και άλλα είδη επιφανειακών κυμάτων. Είναι χαμηλότερης συχνότητας και πιο αργά από τα κύματα χώρου. Το πλάτος τους μειώνεται εκθετικά με το βάθος και είναι περισσότερο «αισθητά από τον άνθρωπο» από ότι τα κύματα χώρου σε μεγάλες αποστάσεις από την πηγή της εδαφικής διαταραχής. Τα επιφανειακά κύματα μιας σεισμικής διαταραχής φέρουν το 67% της συνολικής ενέργειας, ενώ τα κύματα P φέρουν το 7%, και τα κύματα S το 26% αυτής (Ραπτάκης, 2007; Connolly et al., 2014a). Τα κύματα Love και τα υπόλοιπα είδη επιφανειακών κυμάτων έχουν ελάχιστη σημασία αναφορικά με το θέμα των παραγομένων εδαφικών δονήσεων εξαιτίας των τρένων και δεν μας απασχολούν στη μελέτη του φαινομένου (Persson, 2016). Τα επιφανειακά κύματα φαίνονται στο Σχήμα 5.2.



Σχήμα 5.2: Επιφανειακά κύματα Rayleigh και Love

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

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

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

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

Πίνακας 5.1: Συγκριτικά χαρακτηριστικά των τριών βασικών τύπων των εδαφικών κυμάτων (Avillez et al., 2012).

Τα κύματα Rayleigh είναι τα πιο αργά όλων των τύπων των σεισμικών κυμάτων και συνήθως τα πιο περίπλοκα. Σε ισοτροπικά στερεά τα σωματίδια ταλαντώνονται σε ελλειπτική τροχιά παράλληλα στη διεύθυνση διάδοσης. Τα κύματα Rayleigh λοιπόν, επειδή κυλούν, κινούν το έδαφος πάνω-κάτω, δεξιά-αριστερά στην ίδια κατεύθυνση που κινείται το κύμα. Μετακινούν το έδαφος, περίπου με τον ίδιο τρόπο, όπως ένα θαλάσσιο κύμα μετακινεί τα επιφανειακά νερά. Στον Πίνακα 2.1 συγκρίνονται μερικά χαρακτηριστικά των τριών βασικών τύπων των εδαφικών κυμάτων.

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

$$c_p = \sqrt{(A + 2\mu)/\rho} = \sqrt{(K + 4/3 G)/\rho} \text{ και } c_s = \sqrt{\mu/\rho} = Jc/\rho \quad (5.1)$$

όπου:

$$\lambda = \nu E / [(1 + \nu)(1 - 2\nu)] \text{ και } \mu = E / [2(1 + \nu)] \quad (5.2)$$

ενώ  $\lambda$  και  $\mu$  είναι οι παράμετροι του Lamé που αφορούν το υλικό διάδοσης,  $E$  είναι το μέτρο ελαστικότητας ή μέτρο Young,  $\nu$  είναι ο λόγος Poisson,  $\rho$  είναι η πυκνότητα του υλικού,  $K$  είναι το μέτρο διόγκωσης του υλικού και  $G$  είναι το μέτρο διάτμησης του υλικού.

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

$$c_R = [(0.87 + 1.12\nu)/(1 + \nu)] c_s \quad (5.3)$$

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

### 5.3. Αρχές και φαινόμενα διάδοσης των κυμάτων στο έδαφος

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

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

#### Αρχή επαλληλίας ή υπέρθεσης

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

#### Αρχή του Fermat

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

### Αρχή του Huygens

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

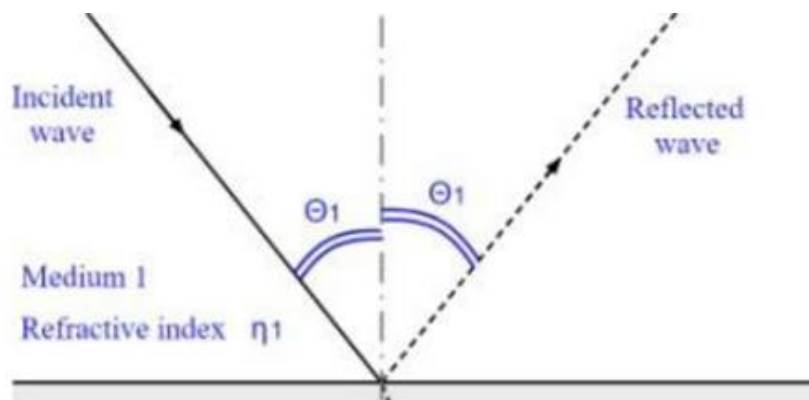
### Σκέδαση

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

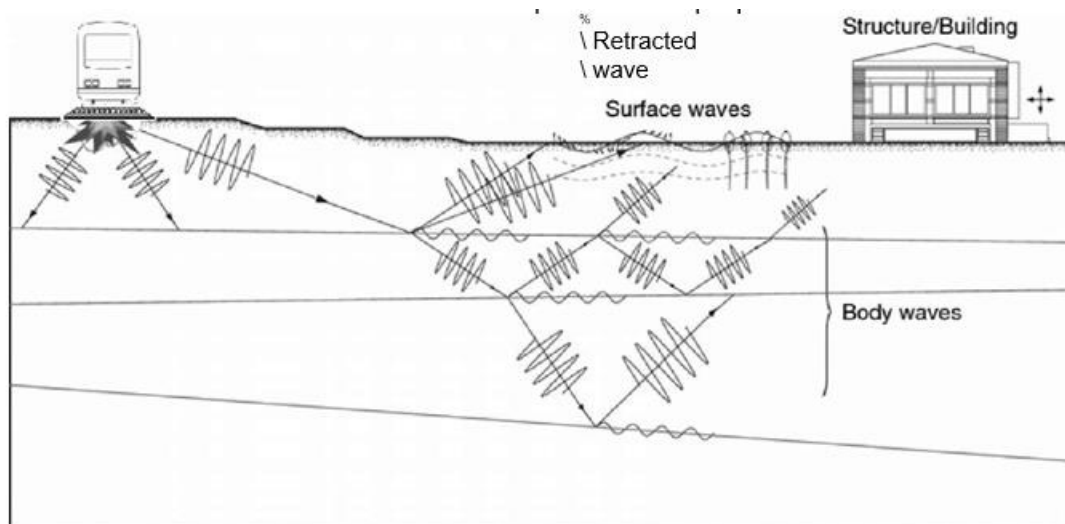
### Ανάκλαση και διάθλαση

Η ανάκλαση (reflection) και η διάθλαση (refraction) είναι φαινόμενα που υπακούουν στον νόμο του Snell, σύμφωνα με τον οποίο, ο λόγος  $n_2/n_1$  των δεικτών διάθλασης, που εξαρτάται από το μέσο διάδοσης, είναι αντιστρόφως ανάλογος με τον λόγο των ταχυτήτων στα δύο μέσα και αντιστρόφως ανάλογος του λόγου των ημιτόνων των γωνιών πρόσπτωσης (βλ. Σχήμα 5.3.).

Το έδαφος, συνήθως συντίθεται από στρώσεις εδαφικών υλικών διαφόρων ιδιοτήτων. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.4., όταν το κύμα συνάντα τη διεπιφάνεια των εδαφικών στρώσεων υπόκειται σε ανάκλαση και διάθλαση. Τα πλάτη και οι γωνίες των ανακλώμενων και διαθλώμενων κυμάτων εξαρτώνται από τη γωνία πρόσπτωσης καθώς και από τις αντιστάσεις των εδαφικών στρώσεων (Persson, 2016). Τα κύματα SH παράγουν μονοδιαθλώμενα και ανακλώμενα SH, ενώ τα κύματα P και SV παράγουν καθένα και τους δυο τύπους P και SV διαθλώμενα και ανακλώμενα (Ραπτάκης, 2007).



Σχήμα 5.3: Ανάκλαση και διάθλαση κυμάτων.



Σχήμα 5.4: Ανάκλαση και διάθλαση κυμάτων.

### Περίθλαση

Όταν ένα κύμα συναντήσει ένα αντικείμενο στην τροχιά του, το κύμα το προσπερνάει αφήνοντας μια «σκιά» πίσω από το αντικείμενο, αυτό το φαινόμενο ονομάζεται περίθλαση (diffraction). Ο βαθμός περίθλασης εξαρτάται από το μέγεθος του εμποδίου (αντικειμένου) σε σχέση με το μήκος κύματος. Εάν το αντικείμενο είναι πολύ μικρότερο από το μήκος κύματος, τότε το κύμα δεν επηρεάζεται. Όσο περισσότερο πλησιάζουν οι διαστάσεις του αντικειμένου στο μήκος κύματος, τόσο περισσότερο παρατηρείται το φαινόμενο της περίθλασης. Η περίθλαση έχει ως αποτέλεσμα να παράγονται και να παρατηρούνται μη αναμενόμενα κύματα σε διάφορες περιοχές του εδαφικού μέσου διάδοσης και να γίνεται ανακατανομή της ενέργειας λόγω των τοπικών ανωμαλιών.

### Εξασθένηση ή Απόσβεση ή Απορρόφηση του κύματος

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

Στην περίπτωση των σιδηροδρομικών δονήσεων η απόσβεση στο υποκείμενο έδαφος προκαλείται κυρίως από την απόσβεση του ίδιου του εδαφικού υλικού και τη γεωμετρική απόσβεση. Η γεωμετρική απόσβεση περιγράφει την εξάπλωση της ενέργειας των κυμάτων και εξαρτάται από τη γεωμετρία του εδάφους, ενώ η απόσβεση του υλικού περιγράφει την απορρόφηση ενέργειας μέσα στα σωματίδια του εδάφους (Persson, 2016). Επίσης, έχει αποδειχθεί ότι η απόσβεση εξαρτάται από τη συχνότητα της διέγερσης (Connolly et al., 2014b). Είναι μεγαλύτερη στα ανώτερα στρώματα και μειώνεται με το βάθος και αυτό οφείλεται στο ότι τα σωματίδια του



εδάφους είναι λιγότερο συμπαγή στα ανώτερα στρώματα, οπότε το κύμα χάνει μεγαλύτερη ενέργεια καθώς «διαπερνά» τα κενά του αέρα. Επιπλέον, το κορεσμένο έδαφος μπορεί να εμφανίζει αυξημένη ιξώδη απόσβεση σε υψηλές συχνότητες (Connolly et al., 2014a).

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

$$\eta = (1/2\pi) (E_D/E_s) \quad (5.4)$$

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

$$E_D = \pi c \omega \quad (5.5)$$

όπου  $c$ , η σταθερά της ιξώδους απόσβεσης. Η ενέργεια παραμορφώσεις δίνεται από τον τύπο:

$$E_s = k u^2/2 \quad (5.6.)$$

όπου  $k$  είναι η δυσκαμψία. Συνεπώς, η απώλεια στην περίπτωση αυτή είναι:

$$\eta = c \omega/k \quad (5.7.)$$

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

#### 5.4. Αναλύσεις και υπολογισμοί

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά στην Διδακτορική διατριβή του κ. Αλέξανδρου Λυρατζάκη (2020) με θέμα την μείωση των δονήσεων που προκαλούν τα τρένα υψηλών ταχυτήτων στο έδαφος, με την χρήση διογκωμένης πολυστερίνης (EPS). Ο στόχος του κεφαλαίου είναι η κατανόηση του αντικειμένου και η εκ νέου διερεύνηση όσον αφορά την ευστάθεια του σιδηροδρομικού επιχώματος καθώς και η βέλτιστη δυνατή διάταξη των μπλοκ EPS στο επίχωμα.

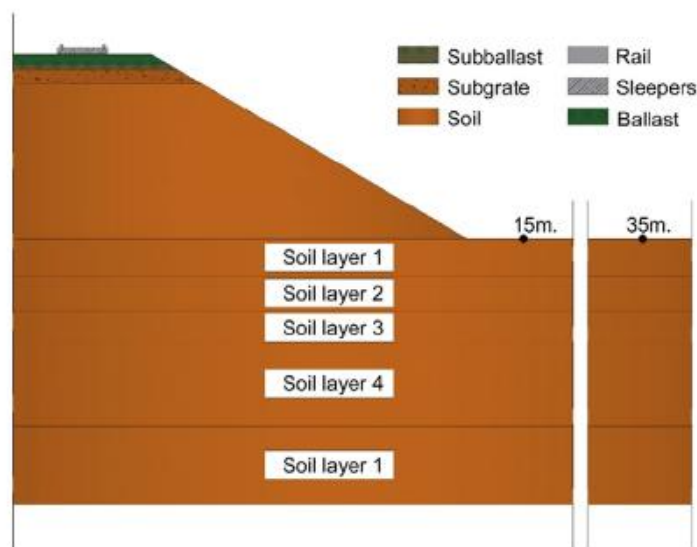
Για την εκπόνηση των δυναμικών αναλύσεων και υπολογισμών των επιταχύνσεων που δημιουργούνται από την κίνηση του τραίνου, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEM) στο τρισδιάστατο λογισμικό ABAQUS.

Όπως αναφέρεται στην τεχνική έκθεση το προσομοίωμα του τραίνου το οποίο επιλέχθηκε είναι το Thalys, το οποίο εδώ και δεκαετίες πραγματοποιεί το δρομολόγιο Παρίσι – Βρυξέλλες.

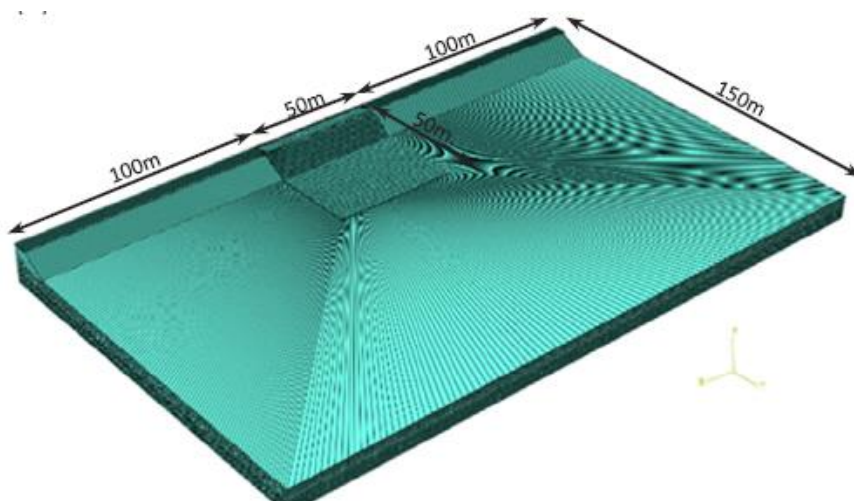
Συγκεκριμένα και όσον αφορά το μοντέλο το οποίο κατασκευάστηκε, στην τεχνική έκθεση παρατίθενται τα εξής στοιχεία:

- Γεωμετρία σιδηροδρομικού επιχώματος (ύψος και κλίση πρσανούς)
- Στοιχεία εδαφικών υλικών και στρωματογραφία
- Στοιχεία για το φορτίου του συρμού (Thalys)

Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνονται η υπό μελέτη ημιδιατομή (5.1.) και το μοντέλο προσομοίωσης στο λογισμικό ABAQUS (5.2.).

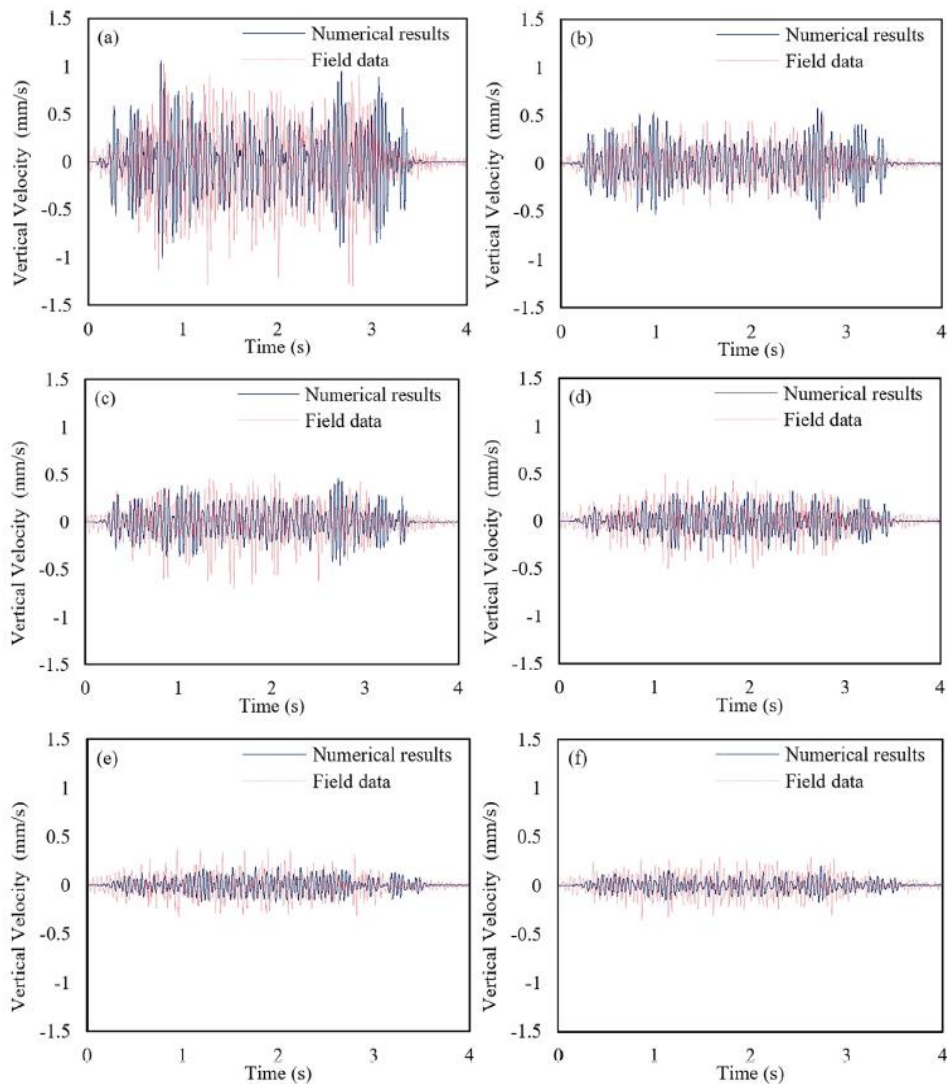


Εικόνα 5.1: Απόσπασμα ημιδιατομής σιδηροδρομικού επιχώματος



Εικόνα 5.2: Απόσπασμα μοντέλου προσομοίωσης σιδηροδρομικού συρμού (ABAQUS)

Κατά την φάση αυτή αποσκοπείται ο υπολογισμός των δονήσεων οι οποίες δημιουργούνται από το τραίνο στο έδαφος (επίχωμα και πλησίον αυτού), όταν ολόκληρο το σώμα του επιχώματος αποτελείται από εδαφικά υλικά. Συγκεκριμένα υπολογίζονται οι κατακόρυφες ταχύτητες σε συνάρτηση με το χρόνο που εντοπίζονται σε αποστάσεις 15, 19, 23, 27, 31, και 35μ. από της εσχάρες του σιδηρόδρομου. Για λόγους επαλήθευσης και ελέγχου χρησιμοποιούνται δεδομένα πεδίου (Field Data) τα οποία στην συνέχεια συγκρίνονται με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τους υπολογισμούς του λογισμικού. Στην συνέχεια στην Εικόνα 5.3. παρατίθενται τα διαγράμματα μεταξύ κατακόρυφων ταχυτήτων (mm/s) ως προς τον χρόνο (sec) για κάθε απόσταση από τον συρμό, και γίνεται η σύγκριση μεταξύ αριθμητικών αποτελεσμάτων που προέκυψαν και δεδομένων πεδίου.

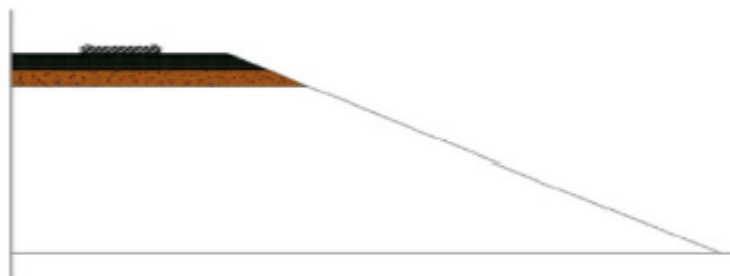


Εικόνα 5.3: Διαγράμματα κατακόρυφων ταχυτήτων σε συνάρτηση με τον χρόνο σε αποστάσεις: (a)15μ., (b)19μ., (c)23μ., (d)27μ., (e)31μ., (f)35μ., από τις εσχάρες του σιδηρόδρομου, όπως προέκυψαν από τις αναλύσεις του κ. Α.Λυρατζάκη

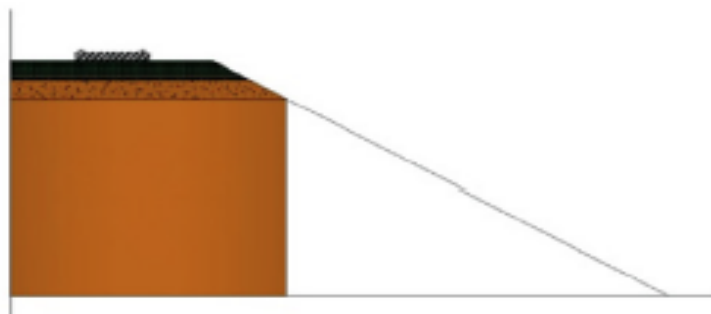
Σιδηροδρομικό επίχωμα από διογκωμένη πολυστερίνη (EPS) και εδαφικό υλικό.

Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά στην χρήση της διογκωμένης πολυστερίνης (EPS) στο σιδηροδρομικό επίχωμα με σκοπό της μείωση των δονήσεων που δημιουργούνται από το τραίνο. Αρχικά και για λόγους διερεύνησης της αποτελεσματικότητας και της συμπεριφοράς του υλικού επιλέγονται δύο διαφορετικές κατηγορίες. Συγκεκριμένα το EPS19 και το EPS46. Πρόκειται για δύο ακραίες σχετικά επιλογές όσον αφορά την κλίμακα διαβάθμισης του υλικού. Το EPS46 είναι το πιο πυκνό και σκληρό υλικό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί, με πυκνότητα  $\rho=45,7\text{kg/m}^3$  και συντελεστή Young  $12.800\text{kPa}$ . Αντίθετα, το EPS19 έχει πυκνότητα  $\rho=18,4\text{kg/m}^3$  και συντελεστή Young  $4.000\text{kPa}$ . Ένας ακόμη βασικός διαχωρισμός που έγινε είναι η διάταξη με την οποία θα τοποθετηθούν τα μπλοκ EPS στο επίχωμα ώστε να επιτυγχάνεται ταυτόχρονα η βέλτιστη μείωση των δονήσεων και η οικονομία. Στην τεχνική έκθεση του διδακτορικού προτείνονται τέσσερις διατάξεις:

- 1) Χρήση μπλοκ EPS σχεδόν σε όλη την έκταση του επιχώματος (Full EPS)
- 2) Χρήση μπλοκ EPS σε τριγωνική διάταξη πλευρικά (Side fill EPS)
- 3) Χρήση μπλοκ EPS σε οριζόντια διάταξη κάτω από την σιδηροδρομική γραμμή (Limited EPS under the tracks)
- 4) Χρήση μπλοκ EPS πλευρικά του πρσανούς επιχώματος (EPS along the side)



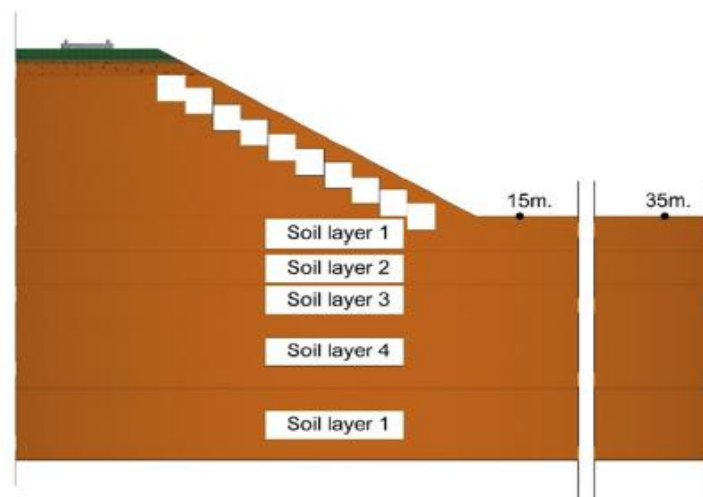
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Εικόνα 5.4: Διατάξεις μπλοκ EPS στο επίχωμα: (α) EPS σε όλη την έκταση του επιχώματος, (β) EPS σε τριγωνική διάταξη πλευρικά, (γ) EPS σε οριζόντια διάταξη κάτω από την σιδηροδρομική γραμμή, (δ) EPS πλευρικά του πρανούς επιχώματος

Ακολουθώντας την διερεύνηση των διατάξεων προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα. Η πρώτη διάταξη των μπλοκ EPS σε όλη την έκταση του επιχώματος, έδωσε όπως ήταν αναμενόμενο πολύ καλά αποτελέσματα ως προς την μείωση των δονήσεων, ωστόσο

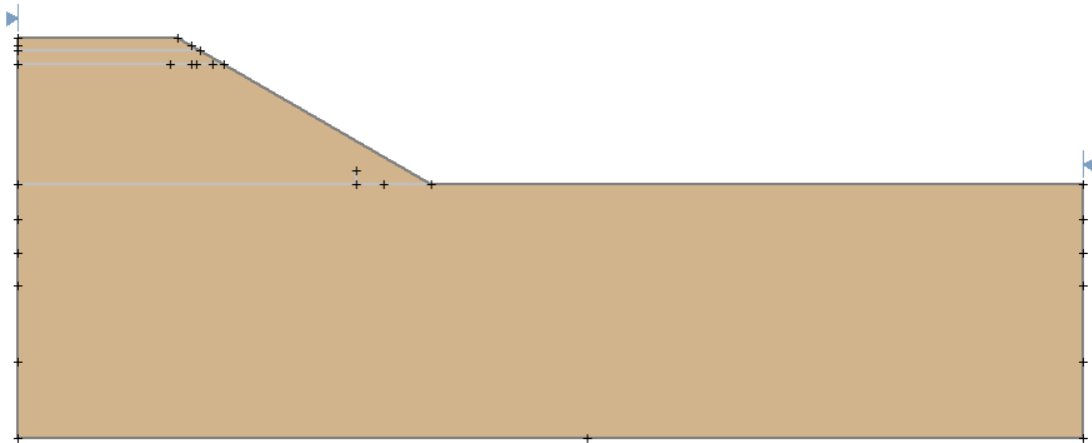
παρουσίασε υψηλές κατακόρυφες μετακινήσεις και παραμορφώσεις στο επίχωμα, κάτι το οποίο θα μπορούσε να είναι επικίνδυνο για τις σιδηροδρομικές γραμμές. Για την πρόληψη του τελευταίου προτείνεται στην συνέχεια η τριγωνική διάταξη πλευρικά η οποία όμως παρουσίασε αστάθεια στην ισορροπία του επιχώματος, για τον λόγο αυτό απορρίφθηκε κι εκείνη. Η τρίτη διάταξη της οριζόντιας τοποθέτησης EPS κάτω από την σιδηροδρομική γραμμή δεν έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα ως προς τις δονήσεις και για τον λόγο αυτό απορρίπτεται. Τελικά, ως βέλτιστη και συμφέρουσα διάταξη επιλέγεται αυτή της πλευρικής τοποθέτησης επί του πρανούς επιχώματος. Η διάταξη απέδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα ως προς την μείωση των δονήσεων, απαιτεί μικρό αριθμό μπλοκ EPS και την καθιστά οικονομική. Τέλος, η διάταξη αυτή έκτος από την εξ αρχής κατασκευή ενός επιχώματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί εκ των υστέρων σε ήδη υφιστάμενα επιχώματα ως αναβάθμιση.

Στην συνέχεια του κεφαλαίου και αφού το θέμα των δονήσεων εξετάστηκε και η λύση που προτείνεται είναι μοναδική, γίνεται διερεύνηση ως προς την ευστάθεια του επιχώματος ως προς στατικές και ψευδοστατικές συνθήκες, ξεχωριστά για κάθε διάταξη από τις παραπάνω.

#### 1) Έλεγχος ευστάθειας σιδηροδρομικού επιχώματος από εδαφικό υλικό

Αρχικά για το έλεγχο της ευστάθειας του σιδηροδρομικού επιχώματος θεωρείται απαραίτητη η διερεύνηση αυτού, όταν τούτο κατασκευάζεται εξ ολοκλήρου από εδαφικό υλικό. Τα αποτελέσματα της θεώρησης αυτής, δηλαδή της “μηδενικής” για EPS, θα αποτελέσουν ένα απόλυτο μέτρο σύγκρισης για τις εφαρμογές των μπλοκ EPS που θα ακολουθήσουν. Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 4 οι υπολογισμοί του ελέγχου της ευστάθειας πραγματοποιούνται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή με την χρήση του λογισμικού SLIDE 2D.

Για την ακρίβεια και την ποιότητα των αποτελεσμάτων είναι απαραίτητη η όσο το δυνατόν αντιπροσωπευτικότερη κατασκευή του μοντέλου προσομοίωσης. Η κατασκευή του μοντέλου επιχώματος ακολουθεί τα χαρακτηριστικά που αναφέρονται στην τεχνική έκθεση της διδακτορικής διατριβής του Α.Λυρατζάκη. Συγκεκριμένα, αφορά επίχωμα ύψους 5,0μ. με κλίση πρανούς 30°, το οποίο αποτελείται από εδαφικό υλικό με ειδικό βάρος  $\gamma=20\text{kN/m}^3$ , συνοχή  $c=5\text{kPa}$  και εσωτερική τριβή  $\varphi=35^\circ$ . Στην Εικόνα 5.5. φαίνεται το μοντέλο του επιχώματος, όπως αυτό κατασκευάστηκε βάσει των παραπάνω δεδομένων.

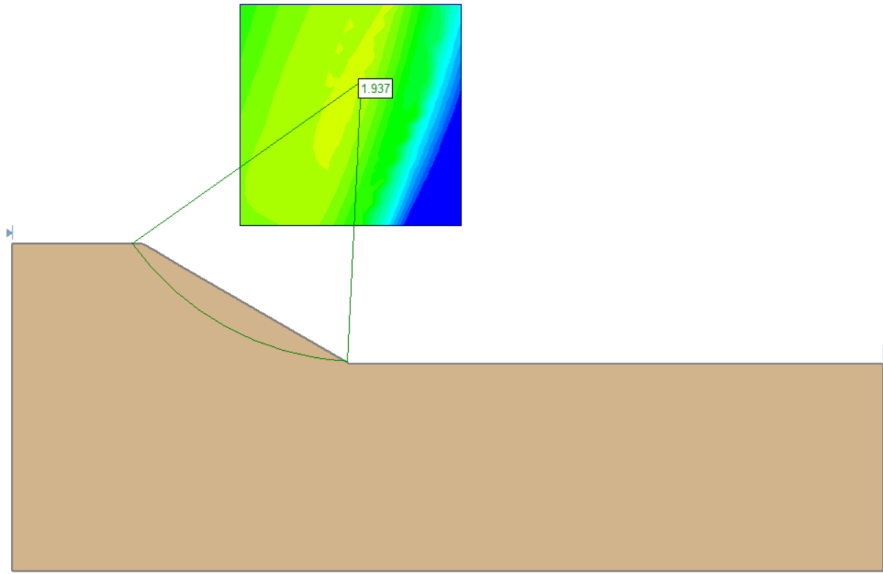


Εικόνα 5.5: Απόσπασμα μοντέλου προσομοίωσης επιχώματος από εδαφικό υλικό

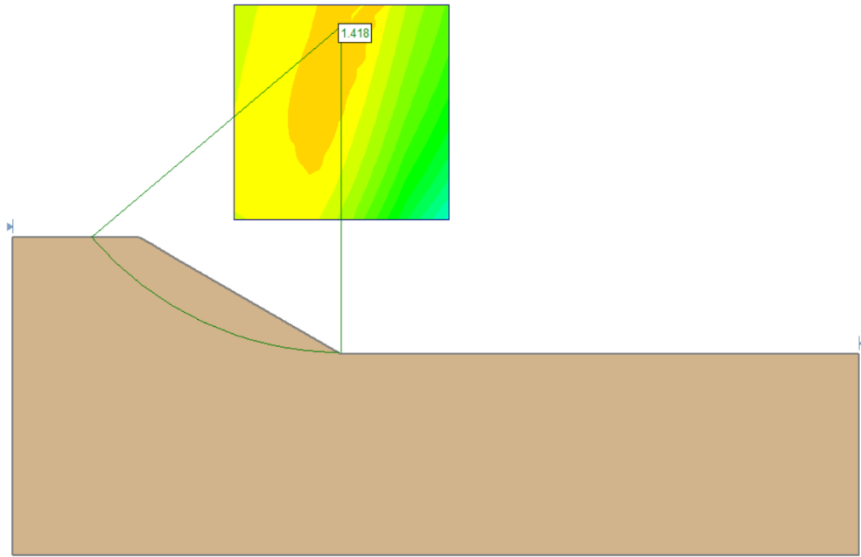
Στο εξής και για τον έλεγχο της ευστάθειας του επιχώματος για κάθε περίπτωση, θα υπολογίζεται ο συντελεστής ασφαλείας τόσο υπό στατικές (επίδραση βαρύτητας) όσο και υπό ψευδοστατικές (διέγερση οριζόντιας και κατακόρυφης επιτάχυνσης) συνθήκες. Για τις δύο παραπάνω συνθήκες και για το επίχωμα από εδαφικό υλικό προέκυψαν οι συντελεστές ασφαλείας οι οποίοι παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2., ενώ στην Εικόνα 5.6. απεικονίζονται οι πιθανές επιφάνειες αστοχίας.

	Οριζόντια/Κατακόρυφη επιτάχυνση	Συντελεστής Ασφαλείας (F.S.)
Στατικές συνθήκες	0,00/0,00	1,94
Ψευδοστατικές συνθήκες	0,16/0,08	1,40
	0,24/0,12	1,12
	0,36/0,18	0,96

Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα ελέγχου ευστάθειας επιχώματος από εδαφικό υλικό, υπό στατικές και ψευδοστατικές συνθήκες

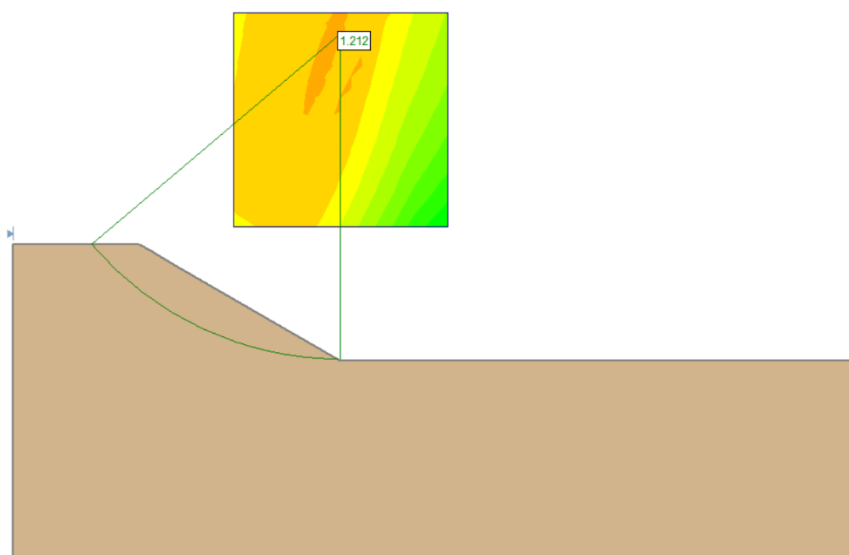


(a)

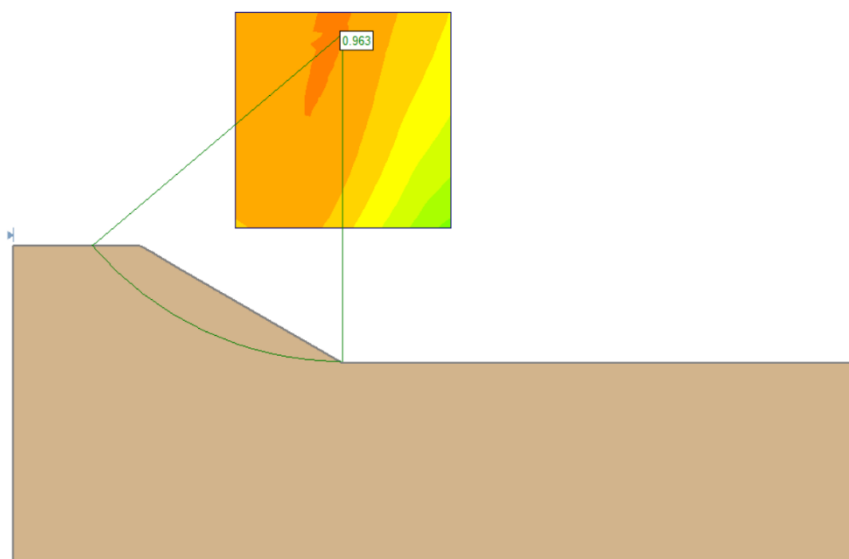


(b)





(γ)



(δ)

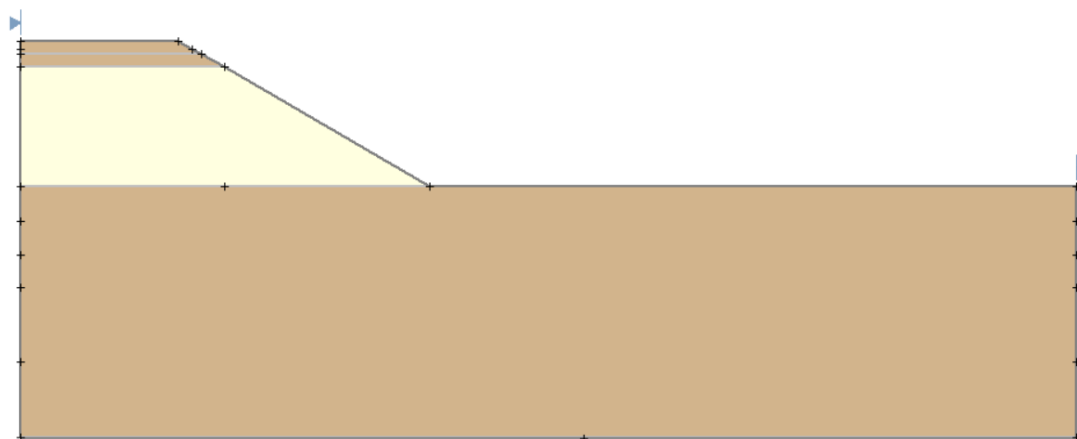
Εικόνα 5.6: Απόσπασμα αποτελεσμάτων ελέγχου ευστάθειας πρανούς από εδαφικό υλικό: (α)στατικές συνθήκες, (οριζόντιες/κάθετες, επιταχύνσεις) (β)0,16/0,08, (γ)0,24/0,12, (δ)0,36/0,18

2) Έλεγχος ευστάθειας σιδηροδρομικού επιχώματος με μπλοκ EPS σε όλη την έκταση του

Ο δεύτερος έλεγχος ευστάθειας αφορά την πρώτη διάταξη των μπλοκ EPS στο επίχωμα, όπως αυτή αναφέρεται στο διδακτορικό του Α. Λυρατζάκη. Το μοντέλο προσομοίωσης τροποποιείται και το εδαφικό υλικό αντικαθίσταται από μπλοκ EPS σχεδόν σε όλη την έκταση του επιχώματος (βλ. Εικόνα 5.7.).

Συγκεκριμένα η γεωμετρία του επιχώματος παραμένει η ίδια και τοποθετούνται μπλοκ EPS μέχρι του ύψους των 4,0μ. Το υπόλοιπο 1,0μ. το οποίο απομένει για το επιθυμητό ύψος των 5,0μ. αποτελείται από εδαφικό υλικό με τα αυτά χαρακτηριστικά που

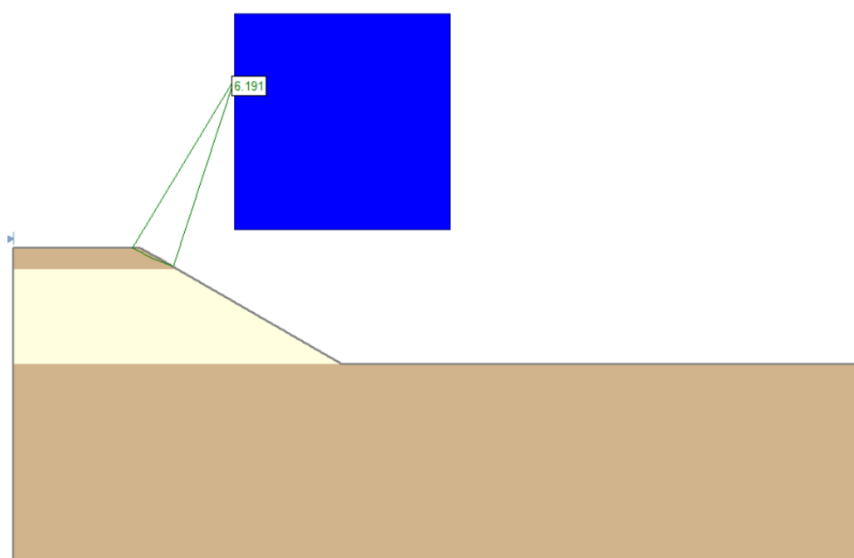
αναφέρθηκαν παραπάνω. Τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν τόσο για στατικές όσο και για ψευδοστατικές συνθήκες φόρτισης, παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.3. και στην Εικόνα 5.8.



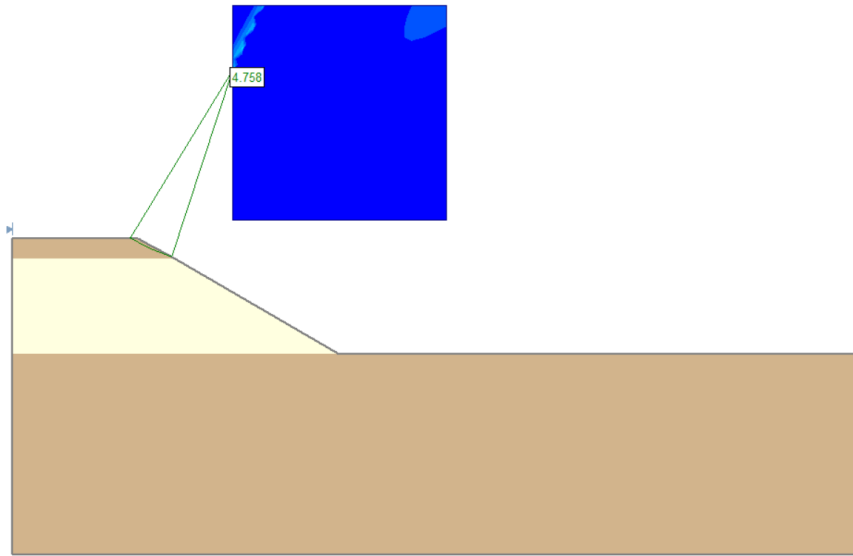
Εικόνα 5.7 : Απόσπασμα μοντέλου προσομοίωσης επιχώματος από μπλοκ EPS σχεδόν σε όλη την έκταση και εδαφικό υλικό

	Οριζόντια/Κατακόρυφη επιτάχυνση	Συντελεστής Ασφαλείας (F.S.)
Στατικές συνθήκες	0,00/0,00	6,19
Ψευδοστατικές συνθήκες	0,16/0,08	4,76
	0,24/0,12	3,96
	0,36/0,18	2,65

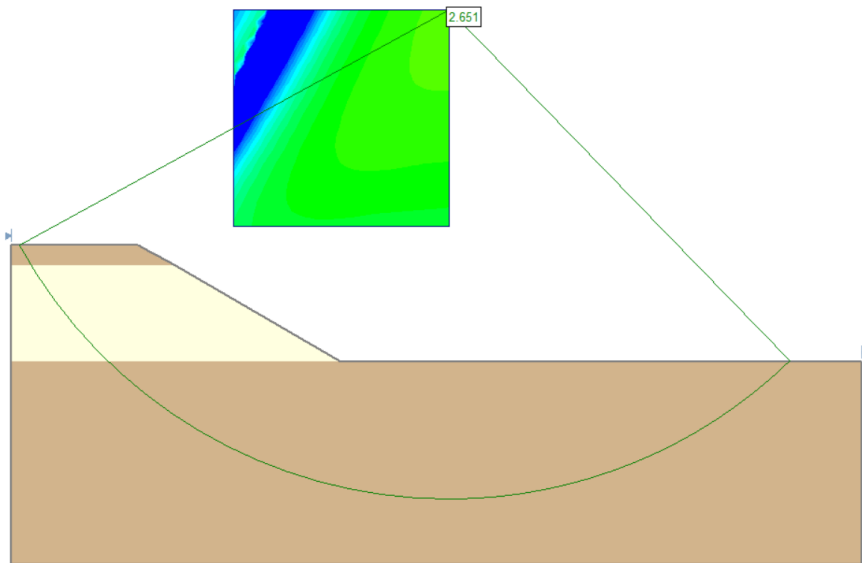
Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα ελέγχου ευστάθειας επιχώματος από μπλοκ EPS, σχεδόν σε όλη την έκταση και εδαφικό υλικό, υπό στατικές και ψευδοστατικές συνθήκες



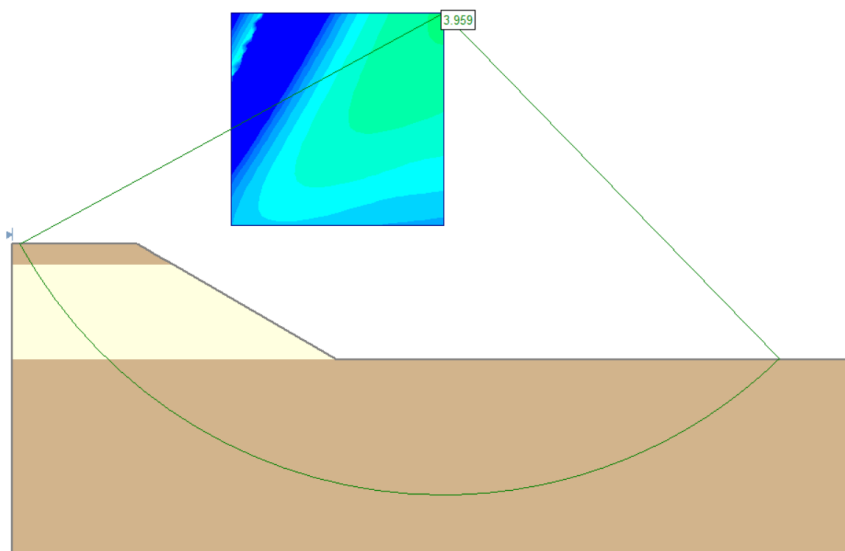
(α)



(β)



(γ)



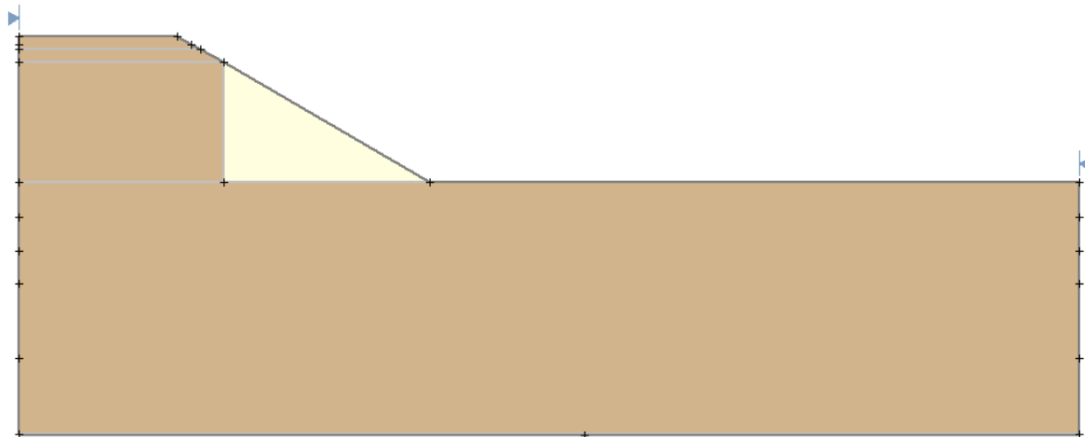
(δ)

Εικόνα 5.8: Απόσπασμα αποτελεσμάτων ελέγχου ευστάθειας πρανούς από μπλοκ EPS σε τριγωνική διάταξη: (α)στατικές συνθήκες, (οριζόντιες/κάθετες, επιταχύνσεις) (β)0,16/0,08, (γ)0,24/0,12, (δ)0,36/0,18

Τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν από τον έλεγχο ευστάθειας είναι πολύ ικανοποιητικά, όπως ήταν αναμενόμενο. Η διογκωμένη πολυστερίνη (EPS) είναι ένα πολύ ελαφρύ υλικό και η χρήση της σχεδόν σε όλη την έκταση του επιχώματος έχει ως αποτέλεσμα το επίχωμα να μην αντιμετωπίζει κανένα πρόβλημα ως προς την ευστάθεια τόσο υπό στατικές όσο και υπό ψευδοστατικές συνθήκες. Ωστόσο είναι μία διάταξη η οποία απορρίπτεται κατά την διατριβή του Α.Λυρατζάκη, καθώς η ιδιότητα αυτή του υλικού μπορεί να θεωρηθεί επικίνδυνη όσον αφορά τις παραμορφώσεις στην επιφάνεια του επιχώματος, λόγω της μεγάλης φόρτισης την οποία επιφέρει το τραίνο επί των σιδηροδρομικών γραμμών.

### 3) Έλεγχος ευστάθειας σιδηροδρομικού επιχώματος με μπλοκ EPS σε τριγωνική διάταξη, πλευρικά

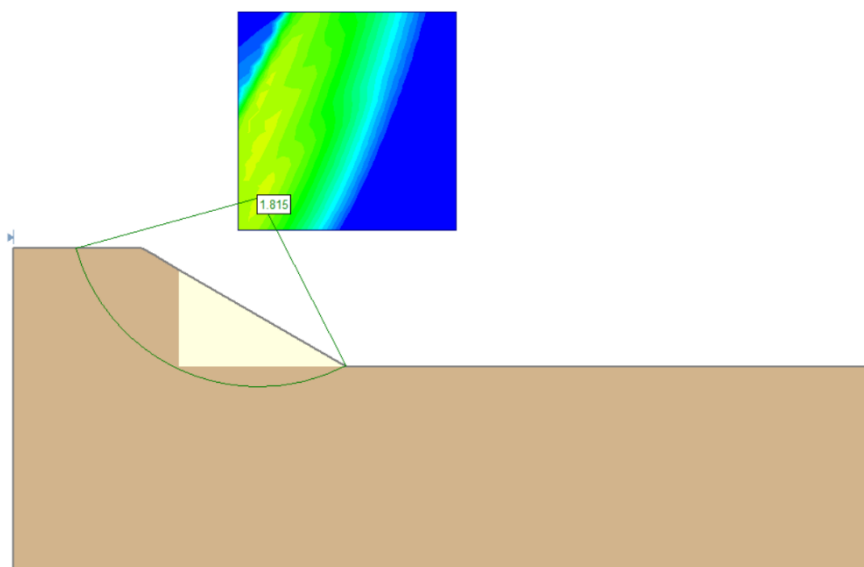
Η τριγωνική διάταξη πλευρικά αποτελεί μια πρόταση η οποία έχει ως στόχο την διατήρηση των ικανοποιητικών αποτελεσμάτων της πρώτης διάταξης ως προς την μείωση των δονήσεων και την ταυτόχρονη απαλλαγή των επιφανειακών παραμορφώσεων. Για τον λόγο αυτόν προτείνεται η αφαίρεση των μπλοκ EPS κάτω από την επιφάνεια της οποίας εδράζεται η σιδηροδρομική γραμμή και η εφαρμογή τους γίνεται πλευρικά του επιχώματος. (βλ. Εικόνα 5.9. ). Τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν από τον έλεγχο της ευστάθειας της διάταξης αυτής, παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.4. και στην Εικόνα 5.10 .



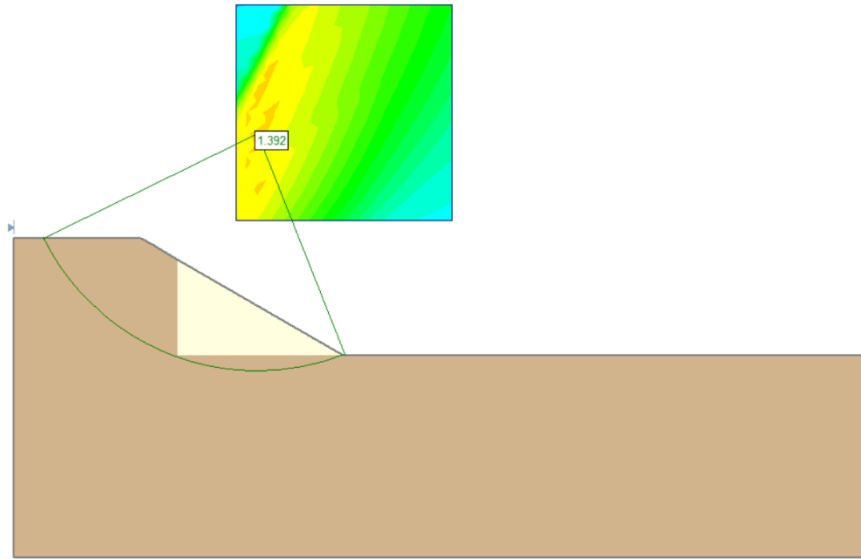
Εικόνα 5.9: Απόσπασμα μοντέλου προσομοίωσης επιχώματος από μπλοκ EPS σε τριγωνική διάταξη και εδαφικό υλικό

	Οριζόντια/Κατακόρυφη επιτάχυνση	Συντελεστής Ασφαλείας (F.S.)
Στατικές συνθήκες	0,00/0,00	1,18
Ψευδοστατικές συνθήκες	0,16/0,08	1,39
	0,24/0,12	1,22
	0,36/0,18	1,00

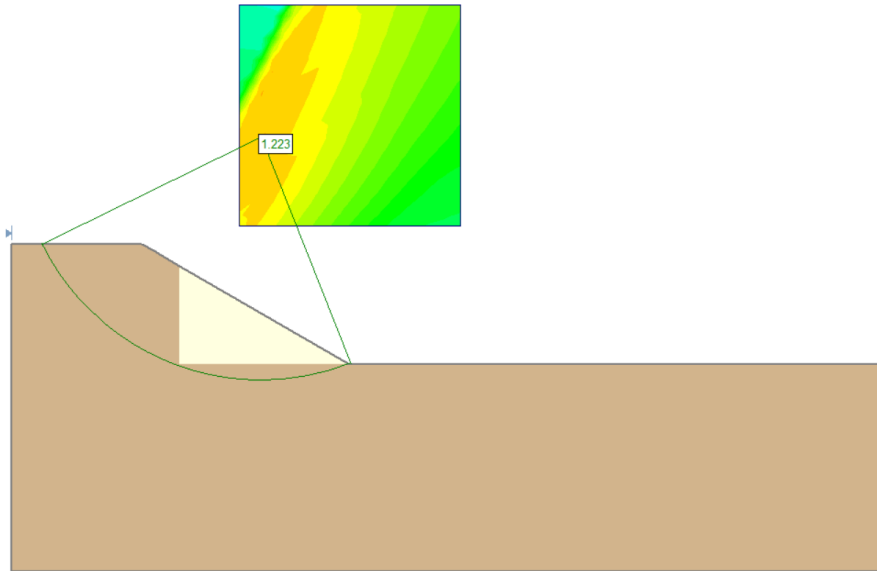
Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα ελέγχου ευστάθειας επιχώματος από μπλοκ EPS σε τριγωνική διάταξη και εδαφικό υλικό, υπό στατικές και ψευδοστατικές συνθήκες



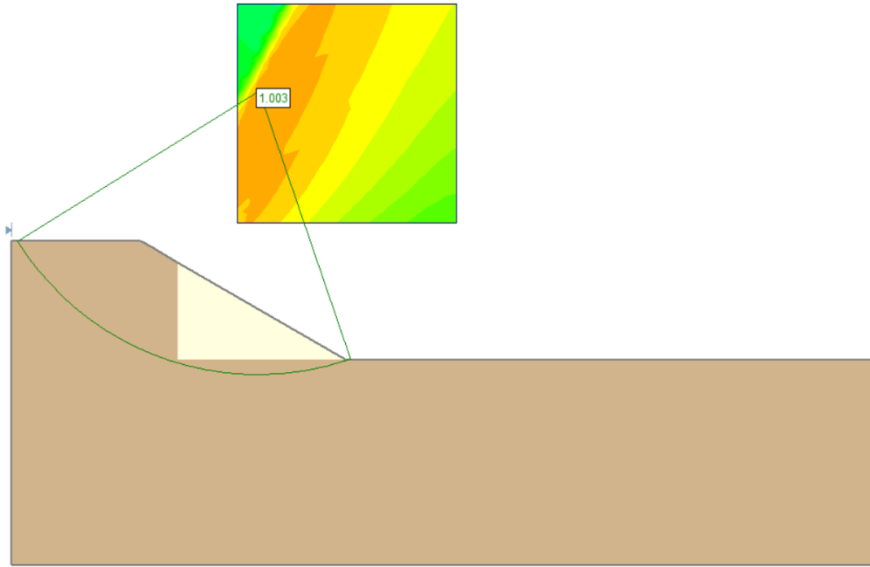
(α)



(B)



(V)



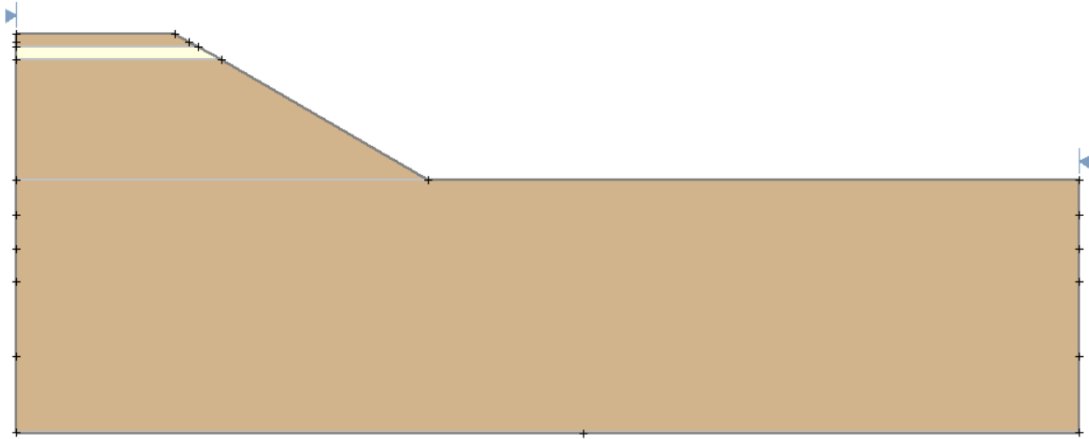
(δ)

Εικόνα 5.10: Απόσπασμα αποτελεσμάτων ελέγχου ευστάθειας πρανούς από μπλοκ EPS σε τριγωνική διάταξη: (α)στατικές συνθήκες, (οριζόντιες/κάθετες, επιταχύνσεις) (β)0,16/0,08, (γ)0,24/0,12, (δ)0,36/0,18

Στο σημείο αυτό επαληθεύεται ο λόγος για τον οποίο η συγκεκριμένη διάταξη απορρίπτεται κατά την διδακτορική διατριβή. Όπως αναφέρεται παρουσιάζει προβλήματα ως προς την ευστάθεια. Όπως προκύπτει από τους υπολογισμούς οι συντελεστές ασφαλείας μειώνονται αρκετά από την προηγούμενη διάταξη και η επιφάνεια αστοχίας αφορούν βαθιά θραύση του επιχώματος. Συμπεραίνεται, λοιπόν, πως η συγκεκριμένη διάταξη είναι αδόκιμη και απορρίπτεται.

#### 4) Έλεγχος ευστάθειας σιδηροδρομικού επιχώματος με μπλοκ EPS σε οριζόντια διάταξη

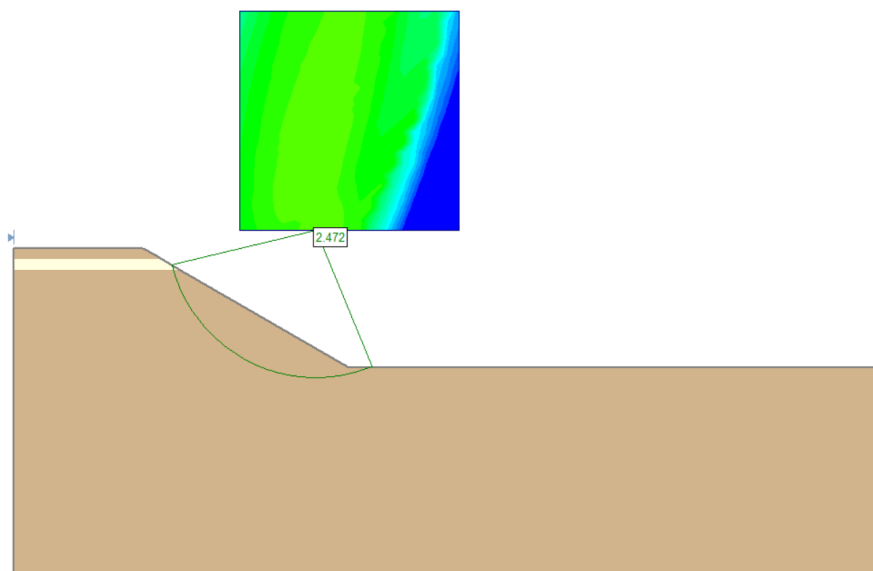
Στην τρίτη αυτή διάταξη αντικαθίσταται η στρώση της υπόβασης με μπλοκ EPS πάχους 0,5μ. και σε οριζόντια διάταξη ως προς το επίχωμα (βλ. Εικόνα 5.11.). Όπως προκύπτει από τις αναλύσεις που αφορούν την μείωση των δονήσεων, η συγκεκριμένη περίπτωση δεν αποδίδει ικανοποιητικά αποτελέσματα και για τον λόγο αυτό απορρίπτεται. Ωστόσο στη συνέχεια ακολουθεί ο έλεγχος ευστάθειας του επιχώματος χρησιμοποιώντας αυτή τη διάταξη των μπλοκ EPS. Στον Πίνακα 5.5. και στην Εικόνα 5.12 φαίνονται τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν.



Εικόνα 5.11: Απόσπασμα μοντέλου προσομοίωσης επιχώματος από μπλοκ EPS σε οριζόντια διάταξη και εδαφικό υλικό

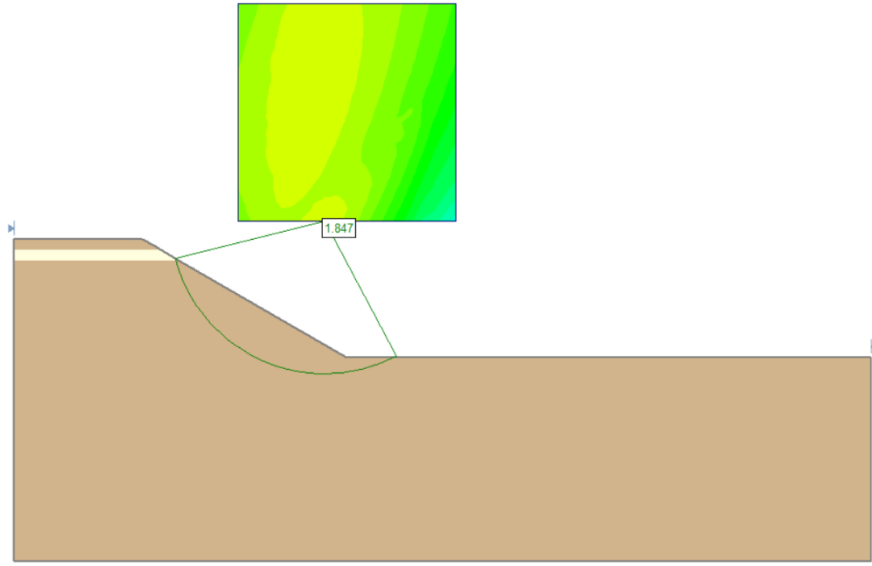
	Οριζόντια/Κατακόρυφη επιτάχυνση	Συντελεστής Ασφαλείας (F.S.)
Στατικές συνθήκες	0,00/0,00	2,47
Ψευδοστατικές συνθήκες	0,16/0,08	1,85
	0,24/0,12	1,60
	0,36/0,18	1,29

Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα ελέγχου ευστάθειας επιχώματος από μπλοκ EPS σε οριζόντια διάταξη και εδαφικό υλικό, υπό στατικές και ψευδοστατικές συνθήκες

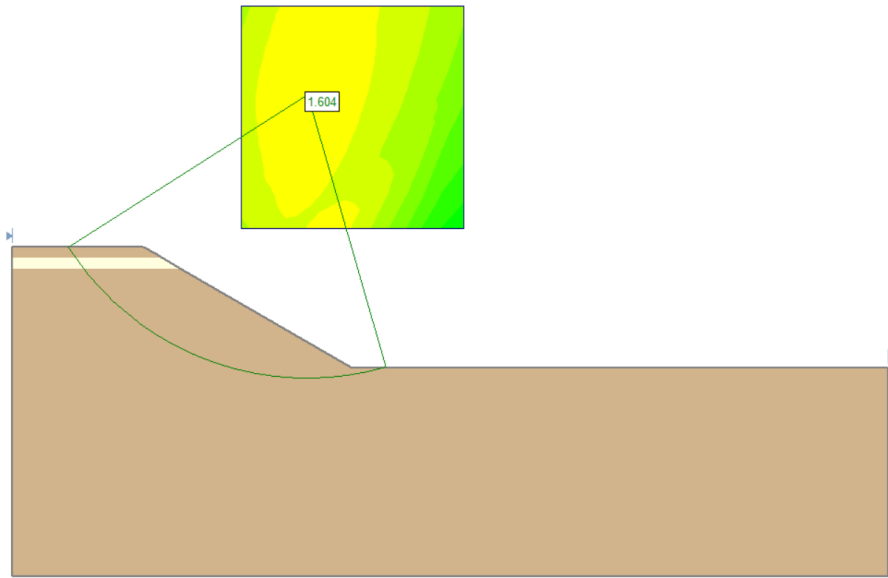


(α)

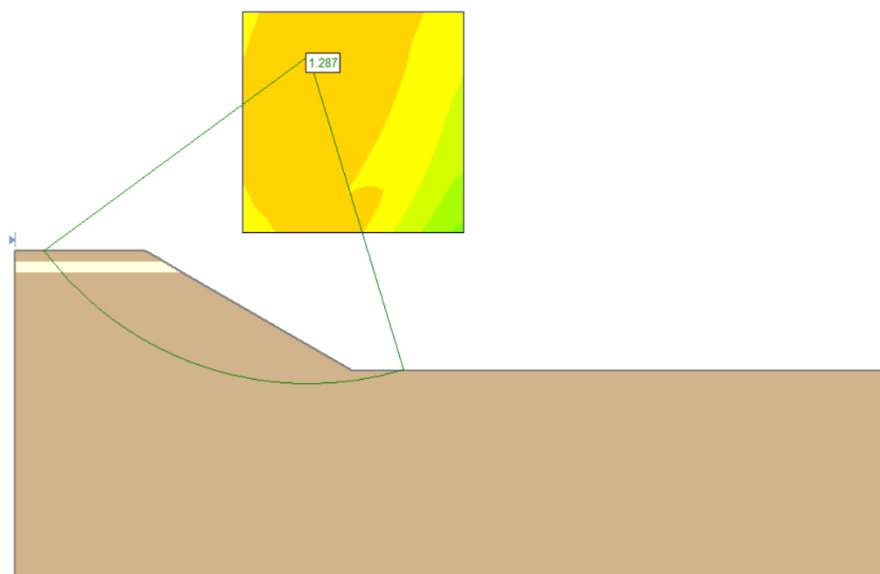




(β)



(γ)



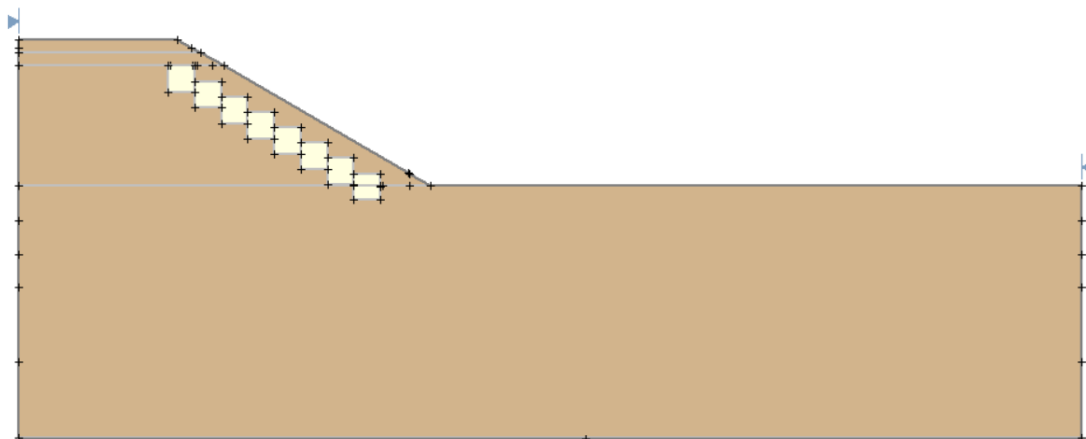
(δ)

Εικόνα 5.12: Απόσπασμα αποτελεσμάτων ελέγχου ευστάθειας πρανούς από μπλοκ EPS σε οριζόντια διάταξη: (α)στατικές συνθήκες, (οριζόντιες/κάθετες, επιταχύνσεις) (β)0,16/0,08, (γ)0,24/0,12, (δ)0,36/0,18

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι ικανοποιητικά ως προς την ευστάθεια του επιχώματος τόσο υπό στατικές όσο και υπό ψευδοστατικές συνθήκες. Όμως, όπως προαναφέρθηκε πρόκειται για μια διάταξη των μπλοκ EPS η οποία δεν μειώνει το μέγεθος των δονήσεων τις οποίες προκαλεί το τραίνο και για τον λόγο αυτόν απορρίπτεται και δεν προτείνεται.

##### 5) Έλεγχος ευστάθειας σιδηροδρομικού επιχώματος με μπλοκ EPS πλευρικά του πρανούς επιχώματος

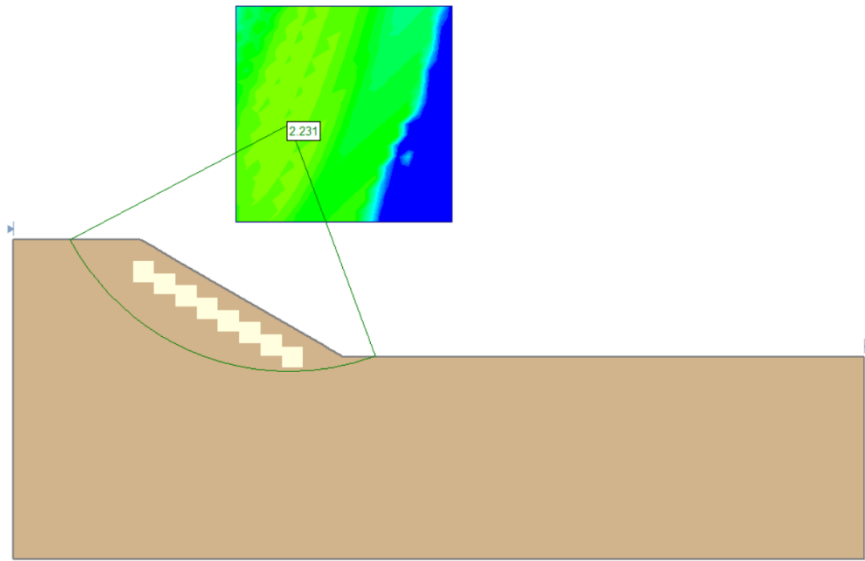
Στην περίπτωση αυτή η λογική η οποία ακολουθείται, είναι αυτή της παράλληλης προς την κλίση του πρανούς του επιχώματος τοποθέτησης των μπλοκ EPS. Συγκεκριμένα, τοποθετούνται κύβοι αποτελούμενοι από μπλοκ EPS με διάσταση 1,0μ.χ1,0μ. με καθ' ύψος αλληλεμπλοκή μεταξύ τους και από την υπόβαση του σιδηρόδρομου έως την βάση έδρασή του επιχώματος (βλ. Εικόνα 5.13.). Προκειμένου για την λύση η οποία τελικά προτείνεται από την διατριβή Α.Λυρατζάκη, δεδομένου ότι, όπως προκύπτει από τους σχετικούς αναλυτικούς υπολογισμούς, με την εφαρμογή της επιτυγχάνεται η μέγιστη μείωση των δονήσεων οι οποίες προκαλούνται λόγω της διέλευσης του τραίνου. Στον Πίνακα 5.6. και στην Εικόνα 5.14. παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν από τον έλεγχο της ευστάθειας του επιχώματος υπό στατικές και ψευδοστατικές συνθήκες.



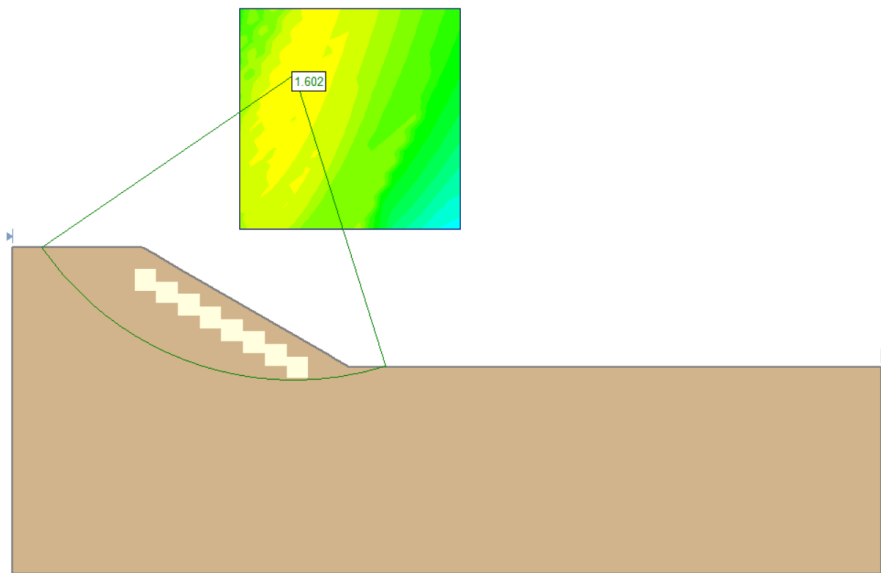
Εικόνα 5.13: Απόσπασμα μοντέλου προσομοίωσης επιχώματος από μπλοκ EPS πλευρικά του πρανούς και εδαφικό υλικό

	Οριζόντια/Κατακόρυφη επιτάχυνση	Συντελεστής Ασφαλείας (F.S.)
Στατικές συνθήκες	0,00/0,00	2,23
Ψευδοστατικές συνθήκες	0,16/0,08	1,60
	0,24/0,12	1,36
	0,36/0,18	1,09

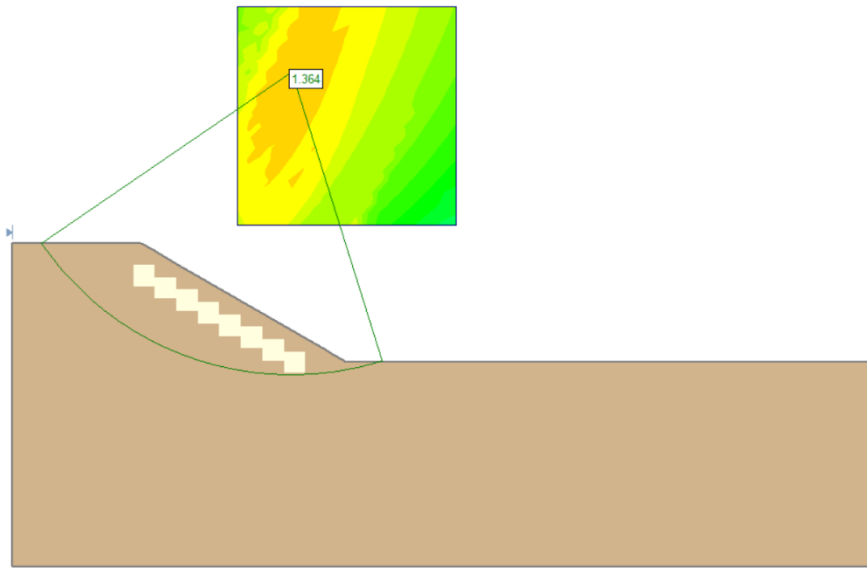
Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα ελέγχου ευστάθειας επιχώματος από μπλοκ EPS πλευρικά του πρανούς και εδαφικό υλικό, υπό στατικές και ψευδοστατικές συνθήκες



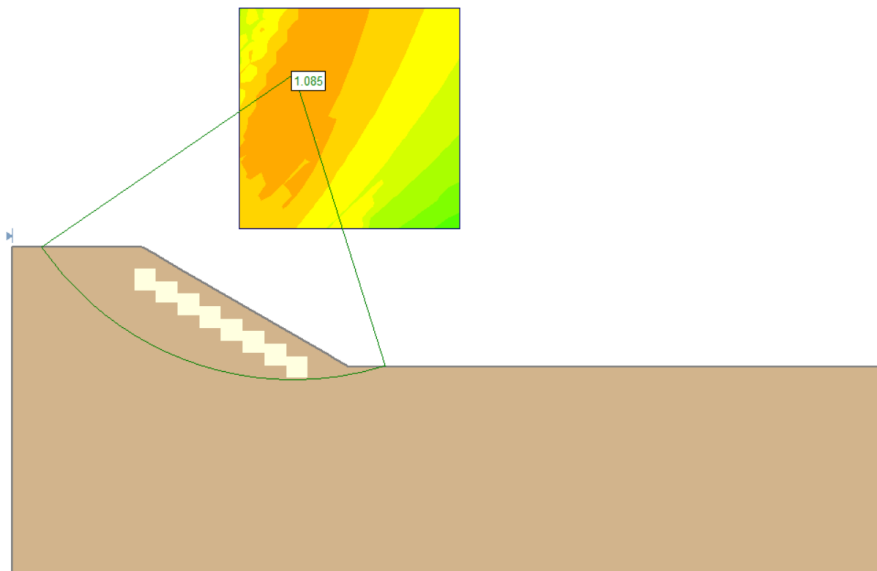
(a)



(b)



(γ)



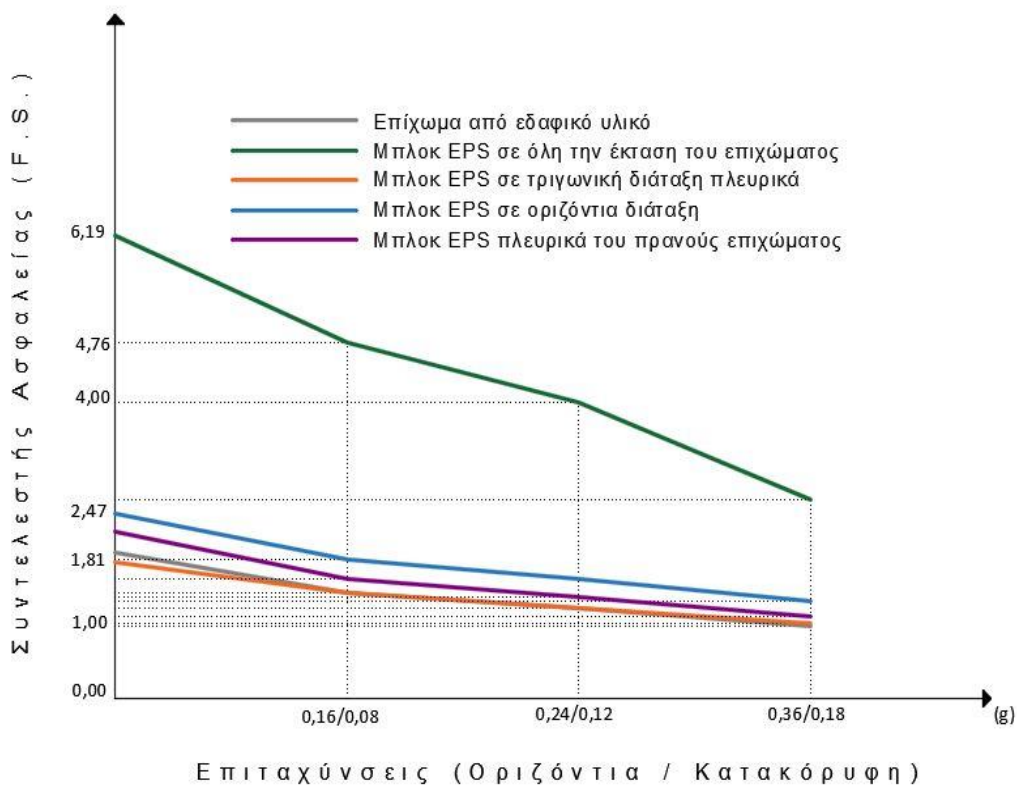
(δ)

Εικόνα 5.14: Απόσπασμα αποτελεσμάτων ελέγχου ευστάθειας πρानούς από μπλοκ EPS πλευρικά του πρानούς: (α)στατικές συνθήκες, (οριζόντιες/κάθετες, επιταχύνσεις) (β)0,16/0,08, (γ)0,24/0,12, (δ)0,36/0,18

Τα παραπάνω αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά όσον αφορά την ευστάθεια του επιχώματος τόσο υπό στατικές όσο και υπό ψευδοστατικές συνθήκες. Το επίχωμα δεν αστοχεί για την δυσμενέστερη περίπτωση σεισμικής διέγερσης. Η πλευρική διάταξη των μπλοκ EPS όπως αναφέρθηκε μειώνει επίσης την επίδραση των δονήσεων στο έδαφος. Οι δύο παραπάνω ιδιότητες καθιστούν την διάταξη αυτή προτιμότερη των προηγούμενων και προτείνεται για την κατασκευή σιδηροδρομικού επιχώματος.

## 5.5. Παρατηρήσεις και σχόλια

Συνοψίζοντας, και καθώς σκοπός του κεφαλαίου είναι η διερεύνηση της βέλτιστης διάταξης διογκωμένης πολυστερίνης (EPS) σε σιδηροδρομικά επιχώματα, που προσφέρει ταυτόχρονη μείωση των δονήσεων και ευστάθεια ισορροπίας του επιχώματος, στην προηγούμενη ενότητα έγινε ο έλεγχος ευστάθειας με χρήση διογκωμένης πολυστερίνης ως υλικό κατασκευής. Συγκεκριμένα, ελέγχθηκαν πέντε (5) διαφορετικά μοντέλα του σιδηροδρομικού επιχώματος ως προς την διάταξη εφαρμογής της διογκωμένης πολυστερίνης (EPS), όπως αυτά εξετάστηκαν στην διδακτορική διατριβή του κ. Α.Λυρατζάκη. Στο διάγραμμα που ακολουθεί (βλ. Σχήμα 5.5.) παρουσιάζονται οι συντελεστές ασφαλείας που προέκυψαν από τις αναλύσεις τόσο υπό στατικές όσο και υπό ψευδοστατικές συνθήκες φόρτισης, για κάθε περίπτωση ξεχωριστά. Η πρώτη περίπτωση αφορά επίχωμα από εδαφικό υλικό και μόνον, σκοπός της ανάλυσης αυτής είναι η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν με τα εκάστοτε αποτελέσματα των επόμενων περιπτώσεων όπου το επίχωμα κατασκευάζεται από γεωαφρό EPS. Στην δεύτερη περίπτωση, τοποθετούνται μπλοκ γεωαφρού EPS σχεδόν σε όλη την έκταση του επιχώματος. Το πολύ μικρό ειδικό βάρος του υλικού EPS δίνει εξαιρετικά αποτελέσματα ως προς την ευστάθεια του επιχώματος. Το επίχωμα δεν κινδυνεύει σε καμία περίπτωση για αστοχία, ωστόσο είναι μία διάταξη η οποία όπως προκύπτει με την διέλευση τρένων υψηλών ταχυτήτων, παρουσιάζει παραμορφώσεις στην επιφάνεια της βάσης του σιδηρόδρομου. Για το λόγο αυτό στην συνέχεια προτείνεται η αφαίρεση του γεωαφρού EPS κάτω από την σιδηροδρομική γραμμή και τοποθέτηση αυτού πλευρικά σε τριγωνική μορφή. Κατά τον έλεγχο ευστάθειας της συγκεκριμένης διάταξης προέκυψαν μη ικανοποιητικά αποτελέσματα. Το επίχωμα παρουσιάζει τους μικρότερους συντελεστές ασφαλείας από κάθε άλλη διάταξη. Η τέταρτη περίπτωση αφορά την τοποθέτηση μπλοκ EPS σε οριζόντια διάταξη πάχους 0,5μ. κάτω από την σιδηροδρομική γραμμή. Η διάταξη αυτή παρουσιάζει ικανοποιητικά αποτελέσματα ως προς την ευστάθεια ωστόσο, όπως αναφέρεται, δεν μειώνει τις δονήσεις που προκαλούνται τόσο στο σώμα του επιχώματος όσο και στον υποκείμενο σχηματικό έδρασης. Η πέμπτη και τελευταία διάταξη αφορά την διάταξη των μπλοκ EPS πλευρικά του πρσανούς. Όπως αναφέρεται στην διδακτορική διατριβή του κ. Α.Λυρατζάκη δίνει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα ως προς την μείωση των δονήσεων και είναι αυτή που τελικά προτείνεται. Όσον αφορά την ευστάθεια, βάσει των αναλύσεων της παρούσας διπλωματικής εργασίας, δίνει εξίσου ικανοποιητικά αποτελέσματα και το επίχωμα δεν διατρέχει κίνδυνο αστοχίας τόσο υπό στατική όσο και υπό ψευδοστατική φόρτιση. Στον Πίνακα 5.7. συνοψίζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις για κάθε περίπτωση.



Σχήμα 5.5: Διάγραμμα συντελεστή ασφαλείας σε συνάρτηση με οριζόντιες και κάθετες επιταχύνσεις που εφαρμόστηκαν

		Συντελεστής Ασφαλείας (F.S.)				
Διάταξη		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Στατικές συνθήκες	0,00/0,00	1,94	6,19	1,18	2,47	2,23
Ψευδοστατικές συνθήκες	0,16/0,08	1,40	4,76	1,39	1,85	1,60
	0,24/0,12	1,12	3,96	1,22	1,60	1,36
	0,36/0,18	0,96	2,65	1,00	1,29	1,09

Πίνακας 5.7: Συνοπτικά αποτελέσματα αναλύσεων για κάθε διάταξη υπό στατικές και ψευδοστατικές συνθήκες φόρτισης

Τέλος, τόσο η απόδοση όσο και η αξιοπιστία ενός επιχώματος από EPS σε σιδηροτροχιές υψηλών ταχυτήτων, θα πρέπει να διερευνώνται από κάθε τεχνικο-οικονομική πτυχή. Η γεωμετρία του επιχώματος, σε συνδυασμό με τις μηχανικές ιδιότητες του γεωαφρού και του υπεδάφους, θα πρέπει να ρυθμίζονται κατά τον βέλτιστο τρόπο σε σχέση με την επιχειρησιακή ταχύτητα του συρμού.

Δεδομένου ότι η διογκωμένη πολυστερίνη (EPS) έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία στην κατασκευή οδικών επιχωμάτων, η χρήση της σε σιδηροδρομικά επιχώματα αποτελεί νέο πεδίο έρευνας των μηχανικών, με σκοπό την αναβάθμιση της ποιότητας και της ασφάλειας της υποδομής των σιδηροδρομικών έργων.



## 6. ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στις δύο πρακτικές εφαρμογές που ακολούθησαν στόχος ήταν η διερεύνηση της ευστάθειας των πρηνών επιχωμάτων σε συγκοινωνιακά έργα. Σε κάθε περίπτωση θεωρήθηκε η χρήση γεωαφρού EPS ως κατασκευαστικού υλικού του επιχώματος. Πραγματοποιώντας τις αναλύσεις και τους υπολογισμούς τα αποτελέσματα που προκύπτουν τόσο υπό στατικές, όσο και υπό ψευδοστατικές συνθήκες ελέγχου καταλήγουν στο ότι η χρήση του υλικού δίνει σε κάθε περίπτωση καλύτερα αποτελέσματα ως προς στην ευστάθεια του επιχώματος, σε σύγκριση με οποιοδήποτε επίχωμα από εδαφικό υλικό και μόνον. Όπως αναφέρεται σε κάθε κεφάλαιο επιμέρους, η χρήση του υλικού EPS σε συγκοινωνιακά έργα αποτελεί πρωτοποριακή τεχνική κατασκευής και απαιτείται η διερεύνηση της αξιοπιστίας και ασφάλειας. Συγκεκριμένα και όσον αφορά τα εγχώρια δεδομένα ο γεωαφρός EPS έχει χρησιμοποιηθεί σε οδικά έργα επιτυχώς. Δεν έχει χρησιμοποιηθεί ωστόσο για την κατασκευή σιδηροδρομικών επιχωμάτων.

Η εφαρμογή του υλικού ανοίγει τον δρόμο για την αξιοποίηση της μεθόδου στην κατασκευή εδραζόμενων σε μαλακά εδάφη τεχνικών έργων, αλλά και την ανακούφιση υφιστάμενων κατασκευών. Σκόπιμη, λοιπόν, είναι η περαιτέρω διερεύνηση και η μελέτη από πλευράς των μηχανικών του τρόπου χρήσης και αξιοποίησης το υλικού EPS, για την εφαρμογή του σε δυσμενείς θέσεις νέων ή και υφιστάμενων έργων, με σκοπό την βελτιστοποίηση της λειτουργικότητας, αλλά και του κόστους κατασκευής του.

Τέλος, δεδομένου ότι το Slide 2D είναι ένα λογισμικό με περιορισμένες δυνατότητες, καθώς θεωρεί κυκλική επιφάνεια αστοχίας και προορίζεται για την μελέτη απλών γεωτεχνικών προβλημάτων, θα ήταν σκόπιμο να πραγματοποιηθεί η παραπάνω μελέτη ευστάθειας με κάποιο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων μεγαλύτερης αξιοπιστίας και δυνατοτήτων ανάλυσης. Παράλληλα, με τη χρήση ενός λογισμικού με περισσότερες δυνατότητες θα ήταν ενδιαφέρουσα η εξέταση της συμπεριφοράς των επιχωμάτων έναντι δυναμικών φορτίσεων. Η δημιουργία προσομοιωμάτων τριών διαστάσεων και η δυναμική ανάλυση θα προσέφεραν μια πιο ρεαλιστική απεικόνιση του προβλήματος της ευστάθειας και θα έδιναν αποτελέσματα που θα προσέγγιζαν καλύτερα τις πραγματικές συνθήκες.

## 7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

M. W. (n.d.). Impact of global warming on stability of natural slopes. Retrieve January 26, 2021, from Uval.ca website:

<http://www.geohazard.ggl.ulaval.ca/Processus/bo.pdf>

“Τοπογραφία” Τόμος Γ΄, Θεσσαλονίκη 1987. Δημήτριος Βλάχος, Καθηγητής Α.Π.Θ.

Fleming, R. W., & Varnes, D. J. (2015). Slope movements. In *The Heritage of Engineering Geology; The First Hundred Years* (pp. 201–218). Ithaca, New York 14853-1504: Geological Society of America.

“Σχεδιασμός πρανών με το κριτήριο των προκαλούμενων από σεισμό μόνιμων μετατοπίσεων”, Σακελλαρίου Μιχαήλ, Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Kramer, S. L. (1995). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Upper Saddle River, NJ: Pearson.

M., H. L., & P, B. (n.d.). *The Landslide Handbook - A Guide to Understanding Landslides*.

Masson, D. G., Harbitz, C. B., Wynn, R. B., Pedersen, G., & Løvholt, F. (2006). Submarine landslides: processes, triggers and hazard prediction. *Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 364(1845), 2009–2039.

ΕΛΟΤ EN 14933 (2007), “Θερμομονωτικά και ελαφροβαρή προϊόντα πλήρωσης για εφαρμογές πολιτικού μηχανικού – Βιομηχανικώς παραγόμενα προϊόντα από διογκωμένη πολυστερίνη (EPS)”, Αθήνα (2007).

ASTM D578-95 (1999), “Standard Specification for Rigid, Cellular Polystyrene thermal Insulation” Vol.04.06, USA.

“Efficient mitigation of high-speed trains induced vibrations of railway embankments using expanded polystyrene blocks”. *Transportations geotechnics* 22 (2020), Elsevier. Αλέξανδρος Λυρατζάκης, Πρόδρομος Ψαρρόπουλος, ΕΔΙΠ Ε.Μ.Π.