



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ - ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

Ανάλυση ευστάθειας πρηνών σε επιφανειακά λιγνιτωρυχεία: η  
επίδραση εδαφικής ζώνης χαμηλής διατμητικής αντοχής

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Φελέκης

Επιβλέπων: Ιωάννης Ε. Ζευγώλης  
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2021





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ - ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

Ανάλυση ευστάθειας πρανών σε επιφανειακά λιγνιτωρυχεία: η επίδραση εδαφικής ζώνης χαμηλής διατμητικής αντοχής

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Φελέκης

Επιβλέπων: Ιωάννης Ε. Ζευγώλης  
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις 23/07/2021

Ζευγώλης Ιωάννης, Επίκουρος Καθηγητής  
Μιχαλακόπουλος Θεόδωρος, Καθηγητής  
Μπενάρδος Ανδρέας, Αναπληρωτής Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2021



## Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στη Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Αντικείμενο της εργασίας είναι η ανάλυση ευστάθειας πρηνών λιγνιτωρυχείων με τη χρήση λογισμικού λαμβάνοντας υπόψη την παρουσία εδαφικής ευαίσθητης ζώνης χαμηλής διατμητικής αντοχής. Σκοπός της εργασίας είναι η εξέταση της δράσης της ευαίσθητης αυτής ζώνης στην ευστάθεια εδαφικών πρηνών λιγνιτωρυχείων. Με τη διεξαγωγή σειρών, παραμετρικών αναλύσεων σε κατάλληλο προσομοίωμα (χρήση του λογισμικού Slide2 της Rocscience) καταλήγουμε σε ορισμένα γενικά συμπεράσματα για τις συνθήκες ευστάθειας που επικρατούν στα ελληνικά λιγνιτωρυχεία.

## Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Δρ. Ιωάννη Ζευγώλη, Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών (Ε.Μ.Π.) και επιβλέποντα καθηγητή της παρούσας διπλωματικής εργασίας για την άψογη συνεργασία, την καθοδήγηση και τις γνώσεις που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Αντώνιο Μικρούτσικο, Πολιτικό Μηχανικό Πανεπιστημίου Πατρών και κάτοχο ΜΔΕ ΕΜΠ, για την πολύτιμη βοήθεια και υποστήριξη σχετικά με το λογισμικό Slide2 της εταιρείας Rocscience, που χρησιμοποιήθηκε για τις αναλύσεις στο πλαίσιο της εργασίας.

Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω το Εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων του Τομέα Μεταλλευτικής της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών (Ε.Μ.Π.) που μου παρείχε πρόσβαση στο εξειδικευμένο λογισμικό Slide2 της Rocscience καθιστώντας εφικτή την πραγματοποίηση της εργασίας αυτής.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για όλη την ψυχολογική και οικονομική υποστήριξη που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.



## Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η ευστάθεια των εδαφικών πρανών στα επιφανειακά λιγνιτωρυχεία όταν επιδρά σε αυτά ζώνη εδαφικού υλικού χαμηλής διατμητικής αντοχής. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται μία περιεκτική σύνοψη της βιβλιογραφίας που αφορά στα πιο συχνά γεωτεχνικά προβλήματα που έχουν καταγραφεί στα ελληνικά λιγνιτωρυχεία τις τελευταίες δεκαετίες. Επισημαίνονται περιπτώσεις αστοχιών στις οποίες εμφανίζεται σύνθετη επιφάνεια αστοχίας που ακολουθεί κατά μήκος την εδαφική ζώνη χαμηλής διατμητικής αντοχής (ευαίσθητη ζώνη). Παρατίθενται επίσης τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των υλικών των πρανών στα ελληνικά λιγνιτωρυχεία οι τιμές των οποίων εκτιμήθηκαν μέσω εργαστηριακών μεθόδων και στη συνέχεια υποβλήθηκαν σε στατιστική επεξεργασία. Τέλος, δημιουργώντας ένα αντιπροσωπευτικό προσομοίωμα πρανούς βαθιάς λιγνιτικής εκσκαφής με την εμφάνιση μίας ή περισσότερων ευαίσθητων ζωνών πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αναλύσεις ευστάθειας. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών είναι οι ελάχιστοι συντελεστές ασφαλείας που υπολογίστηκαν για διάφορα σενάρια, όπως επίσης και η θέση που εμφανίζεται κάθε φορά η επιφάνεια αστοχίας. Τα αποτελέσματα σχολιάζονται και σε συνδυασμό με τις πληροφορίες των λοιπών κεφαλαίων εξάγονται ορισμένα συμπεράσματα. Εκτιμάται ότι τα ζητήματα που αναλύονται στην παρούσα εργασία αφορούν σε μεγάλο βαθμό προβλήματα που θα προκύψουν και κατά την επερχόμενη μεταλιγνιτική εποχή.

**Λέξεις Κλειδιά:** ανοιχτή εκσκαφή, λιγνιτωρυχεία, ευστάθεια πρανών, γεωτεχνική μηχανική, διατμητική αντοχή, οριακή ισορροπία, μεταλιγνιτική εποχή, απολιγνιτοποίηση

## **Abstract**

### **Slope stability analysis in surface lignite mines: the effect of a low shear strength soil zone**

by *George Felekis*

Thesis Submitted for the Degree

*Diploma (MEng) in Mining and Metallurgical Engineering*

School of Mining and Metallurgical Engineering

National Technical University of Athens

Supervisor: Dr. Ioannis E. Zevgolis  
Assistant Professor, NTUA

The present Diploma Thesis examines the stability of slopes, encountered in surface lignite mines, when it is affected by the existence of a low shear strength soil zone. Specifically, a comprehensive summary of the relevant bibliography is presented which concerns the most common issues of geotechnical nature that have been recorded on Greek lignite mines the last decades. Cases on which a compound surface of failure that follows along a low shear strength soil zone (weak zone) are especially highlighted. Furthermore, the values of geotechnical characteristics from the slopes' materials were estimated through laboratory analysis and then they were submitted to extensive statistical analysis. Finally, a representative model of a slope from a deep lignite excavation was created with the occurrence of one or more weak zones on which parametric stability analyses were conducted. The results of these analyses were the minimum values of the safety factors that were calculated as well as the position on which the sliding surface appears for the varied scenarios. The results from these analyses are discussed and combined with the information provided in other chapters, some conclusions are extracted. The issues that are explored in this Thesis also concern the slope stability conditions of the pits in the post lignite era.

**Keywords:** open pit, lignite mines, slope stability, geotechnical engineering, shear strength, limit equilibrium, post lignite era



## Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>1</b>
1.1	Σκοπός εργασίας.....	1
1.2	Δομή εργασίας.....	1
<b>2</b>	<b>ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΣΤΙΣ ΒΑΘΙΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΕΚΣΚΑΦΕΣ ΤΩΝ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΛΙΓΝΙΤΩΡΥΧΕΙΩΝ .....</b>	<b>3</b>
2.1	Εισαγωγή.....	3
2.2	Περί ελληνικών λιγνιτωρυχείων .....	4
2.2.1	Μέθοδοι εκμετάλλευσης .....	4
2.2.2	Τυπικά προφίλ εκσκαφών και γεωλογία .....	7
2.3	Παλαιότερες μελέτες γεωτεχνικής διερεύνησης .....	10
2.4	Πρόσφατες μελέτες και περιστατικά αστοχιών .....	17
2.4.1	Μαυροπηγή.....	18
2.4.2	Λάβα .....	22
2.4.3	Προσήλιο .....	23
2.4.4	Χωρέμι .....	24
2.4.5	Αμύνταιο – 2016.....	27
2.4.6	Αμύνταιο – 2017.....	27
2.5	Συνήθεις μηχανισμοί αστοχίας.....	30
2.6	Συμπεράσματα.....	34
<b>3</b>	<b>ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΛΙΓΝΙΤΩΡΥΧΕΙΩΝ .....</b>	<b>37</b>
3.1	Εισαγωγή.....	37
3.2	Χαρακτηρισμός των υλικών – Θεώρηση βασικών σεναρίων.....	39
3.3	Κατατάξεις και φυσικά χαρακτηριστικά.....	41
3.4	Μηχανικά χαρακτηριστικά .....	48
3.4.1	Παραμένουσα αντοχή .....	49
3.4.2	Μέγιστη αντοχή.....	51
3.5	Συμπεράσματα.....	56

<b>4</b>	<b>ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ .....</b>	<b>58</b>
4.1	Εισαγωγή – Διατύπωση προβλήματος .....	58
4.2	Ανάλυση ευστάθειας με το πρόγραμμα Slide2 της Rocscience .....	60
4.3	Αναλύσεις ευστάθειας με την ύπαρξη μίας ευαίσθητης ζώνης .....	61
4.3.1	Έλεγχος ευστάθειας για διάφορες τιμές των παραμέτρων $c$ και $\phi$ των υπερκειμένων.....	61
4.3.2	Έλεγχος ευστάθειας για διάφορες τιμές της παραμέτρου $\phi_z$ της ευαίσθητης ζώνης ( $\beta=0^\circ$ ) σε εναλλακτικές υψομετρικές θέσεις.....	63
4.3.3	Έλεγχος ευστάθειας για διάφορες τιμές της παραμέτρου $\phi_z$ της ευαίσθητης ζώνης ( $\beta=6^\circ$ ) σε εναλλακτικές υψομετρικές θέσεις.....	64
4.3.4	Σύνοψη αποτελεσμάτων .....	65
4.4	Αναλύσεις ευστάθειας με την ταυτόχρονη ύπαρξη δύο ή περισσότερων ευαίσθητων ζωνών.....	68
4.4.1	Έλεγχος ευστάθειας για δύο ευαίσθητες ζώνες οριζόντιου προσανατολισμού ( $\beta=0^\circ$ ) .....	69
4.4.2	Έλεγχος ευστάθειας για κεκλιμένες ευαίσθητες ζώνες ( $\beta=6^\circ$ ).....	70
4.4.3	Σύνοψη αποτελεσμάτων .....	71
4.5	Συμπεράσματα.....	73
<b>5</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>75</b>
	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>80</b>

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1 Γεωγραφική κατανομή των περιοχών εξόρυξης λιγνίτη στην Ελλάδα .....	5
Εικόνα 2 Τυπική βαθιά λιγνιτική εκσκαφή σε ορυχείο στη Βόρεια Ελλάδα (Ορυχείο Μαυροπηγής, φωτογραφία από Zevgolis et al. 2019).....	6
Εικόνα 3 Διαδοχικές βαθμίδες με καδοφόρους εκσκαφείς σε βαθύ λιγνιτωρυχείο (Kanvadas et al. 2018).....	7
Εικόνα 4 Απλοποιημένη τομή βαθιάς λιγνιτικής εκσκαφής στην Ελλάδα (Zevgolis et al. 2019).....	7
Εικόνα 5 Πολυστρωματική στρωματογραφία ελληνικών λιγνιτικών κοιτασμάτων (Galetakis et al. 2005).....	8
Εικόνα 6 Ενδεικτική γεωλογική στρωματογραφική στήλη της λιγνιτικής λεκάνης Δυτικής Μακεδονίας (Koukouzas 2007) .....	9
Εικόνα 7 Επιφάνειες στις οποίες αναμένεται αστοχία με ευδιάκριτο οριζόντιο / παρα-οριζόντιο τμήμα (H: συνολικό ύψος της εκσκαφής, a: συνολική κλίση της εκσκαφής) (Περιπτώσεις που αφορούν την περίοδο 1996-2001, τροποποιημένες εικόνες από Leonardos (2004a)).....	14
Εικόνα 8 Προχώρηση εκσκαφής δυσμενούς κλίσης στη Μαυροπηγή λόγω καθυστέρησης στη διασκασία απαλλοτριώσεων (Zevgolis et al. 2019) .....	19
Εικόνα 9 Αναμενόμενες ζώνες διάτμησης και μηχανισμοί αστοχίας στη Μαυροπηγή (τροποποιημένη εικόνα από Kanvadas et al. 2013 και Steiakakis et al. 2017).....	20
Εικόνα 10 Εδαφική υποχώρηση (~2m) από τη νοτιοανατολική στέψη του πρανούς της εκσκαφής στη Μαυροπηγή (2013) (Zevgolis et al. 2019) .....	21
Εικόνα 11 Τομή και ενδεικτική επιφάνεια ολίσθησης στις κατολισθήσεις του ορυχείου Λάβας το 2007 (βάσει των Prountzopoulos et al. (2010)) (Zevgolis et al. 2019).....	22
Εικόνα 12 Εναέρια άποψη του λιγνιτωρυχείου Λάβας και των σχετικών κατολισθήσεων το 2018 (φωτογραφία από GMMSA LARCO) (Zevgolis et al. 2019).....	23
Εικόνα 13 Οριζόντιες μετατοπίσεις μίας βαθμίδας στο ορυχείο Χωρεμίου (νοτιοδυτικά της εκσκαφής) μετά την κατολίσθηση του 2013 (Roumpros et al. 2014).....	25
Εικόνα 14 Χαρτογράφηση της κατολίσθησης του 2013 στο ορυχείο Χωρεμίου με μεθόδους τηλεπισκόπησης (εικόνα από S. Valkaniotis) (Zevgolis et al. 2019) .....	26
Εικόνα 15 Εναέρια άποψη της μεγάλης κατολίσθησης στο Αμύνταιο το 2017 (φωτογραφία από Eurokinissi) (Zevgolis et al. 2019) .....	27
Εικόνα 16 Χαρτογράφηση της κατολίσθησης στο Αμύνταιο (Ιούνιος 2017) χρησιμοποιώντας τεχνικές τηλεπισκόπησης (Valkaniotis et al. 2017) .....	28
Εικόνα 17 Τυπικός (απλοποιημένος) μηχανισμός αστοχίας που συναντάται στα ελληνικά λιγνιτωρυχεία (Zevgolis et al. 2019).....	31
Εικόνα 18 Χαρακτηριστικά σενάρια εδαφικής στρωματογραφίας (κατάταξη σύμφωνα με το USCS) βάσει τιμών παραμένουσας γωνίας τριβής με το βάθος: (a) σενάριο περίπτωσης με ευαίσθητη ζώνη και (b) σενάριο περίπτωσης με ομογενές πρανές (Theocharis et al. 2021).....	40

Εικόνα 19 Επιφάνειες αναμενόμενης αστοχίας με ευδιάκριτο οριζόντιο / υπο-οριζόντιο τμήμα για (a) πρανές με ευαίσθητη ζώνη και (b) ομογενές πρανές με βαθύ βραχώδες υπόβαθρο (τροποποιημένη εικόνα από Leonardos (2004)).....	41
Εικόνα 20 Χαρακτηριστικές κοκκομετρικές οκτώ δειγμάτων από διάφορα βάθη (συντελεστής ομοιομορφίας: $C_u=d_{60}/d_{10}$ ) (Theocharis et al. 2021) .....	42
Εικόνα 21 Ταξινόμηση των εδαφικών δειγμάτων κατά USCS .....	43
Εικόνα 22 Διάγραμμα Πλαστικότητας λεπτόκοκκων εδαφικών υλικών από διάφορα ορυχεία (Theocharis et al. 2021).....	43
Εικόνα 23 Ιστόγραμμα (a) Ορίου Υδαρότητας (LL), (b) Ορίου Πλαστικότητας (PL), (c) Δείκτη Πλαστικότητας (PI), (d) Περιεχόμενη Υγρασία (w) των λεπτόκοκκων υπερκείμενων εδαφικών υλικών (Theocharis et al. 2021) .....	45
Εικόνα 24 Συνεχές της Περιεχόμενης Υγρασίας που απεικονίζει τις διάφορες καταστάσεις ενός εδαφικού υλικού σχετικά με το φυσικό περιοχόμενο υγρασίας και τα Όρια Atterberg, όπως επίσης τις αντίστοιχες ενδείξεις (βάσει του LI) των σχετικών ανταποκρίσεων σε τάσεις και παραμορφώσεις και τον βαθμό στερεοποίησης (Means and Parcher 1963) .....	47
Εικόνα 25 Σχέση μεταξύ λόγου των πόρων και κορεσμένου ειδικού βάρους των υπερκείμενων εδαφικών υλικών (Theocharis et al. 2021) .....	48
Εικόνα 26 Ιστόγραμμα της παραμένουσας γωνίας τριβής των εδαφικών υλικών (Theocharis et al. 2021) .....	49
Εικόνα 27 Παραμένουσα γωνία τριβής με φυσικές ιδιότητες: (a) PI και (b) LI .....	51
Εικόνα 28 Ιστόγραμμα (a) γωνίας τριβής και (b) συνοχής από δοκιμές τριαξονικής φόρτισης (τα στατιστικά που αναφέρονται αφορούν τα δέκα ορυχεία εξαιρουμένου του ορυχείου Σερβίων) (Theocharis et al. 2021) .....	52
Εικόνα 29 Ιστόγραμμα (a) γωνίας τριβής και (b) συνοχής από δοκιμές άμεσης διάτμησης .....	53
Εικόνα 30 (a) Μέγιστη γωνία τριβής με τον Δείκτη Πλαστικότητας (PI) και (b) τον Δείκτη Υδαρότητας (LI) (Theocharis et al. 2021) .....	54
Εικόνα 31 Διασυσχέτιση μεταξύ μέγιστης γωνίας τριβής και συνοχής (Theocharis et al. 2021).....	55
Εικόνα 32 Διαστασιολόγηση της προς μελέτης γεωμετρίας της εκσαφής.....	59
Εικόνα 33 Συντελεστές Ασφαλείας για οριζόντια και κεκλιμένη ευαίσθητη ζώνη όταν $\phi=28.4$ (deg.) .....	62
Εικόνα 34 Συντελεστές Ασφαλείας για οριζόντια και κεκλιμένη ευαίσθητη ζώνη όταν $c=185$ kPa.....	63
Εικόνα 35 Συντελεστές Ασφαλείας σε τρεις υπομετρικά διακριτές θέσεις της ευαίσθητης ζώνης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $\phi_z$ .....	64
Εικόνα 36 Συντελεστές Ασφαλείας σε τρεις υπομετρικά διακριτές θέσεις της ευαίσθητης ζώνης για διάφορες τιμές της παραμέτρου $\phi_z$ .....	65

Εικόνα 37 Σύνθετη επιφάνεια αστοχίας για οριζόντια ευαίσθητη ζώνη που διέρχεται από τον πόδα του πρανούς (μέσες τιμές των παραμέτρων αντοχής των υλικών της εκσκαφής) .....	66
Εικόνα 38 Συγκεντρωτικό διάγραμμα αναλύσεων για πολλαπλές υψομετρικές θέσεις της ευαίσθητης ζώνης και διακριτές τιμές της παραμέτρου $\phi_z$ .....	67
Εικόνα 39 Παράδειγμα συγκριτικού διαγράμματος για την περίπτωση ανάλυσης με οριζόντια ευαίσθητη ζώνη που διέρχεται από τον πόδα του πρανούς για διακριτές τιμές $\phi_z$ .....	68
Εικόνα 40 Τυπικό παράδειγμα αστοχίας στην ζώνη ευαισθησίας που διέρχεται από τον πόδα του πρανούς για την περίπτωση όπου $\phi_{z1}=\phi_{z2}=10^\circ$ ( $\beta=0^\circ$ , Cuckoo).....	72
Εικόνα 41 Τυπικό παράδειγμα αστοχίας στην ψηλότερη υψομετρικά ευαίσθητη ζώνη για την περίπτωση όπου $\phi_{z1}=7.3^\circ$ και $\phi_{z2}=12.7^\circ$ ( $\beta=6^\circ$ , Cuckoo).....	72

## Κατάλογος Πινάκων

Table 1 Περιπτώσεις αστοχιών πρανών στα ελληνικά λιγνιτωρυχεία που αναφέρθηκαν την περίοδο 1996-2001 (από Leonardos (2004a)) (Zevgolis et al. 2019) .....	15
Table 2 Παραδείγματα μετατοπίσεων οπισθοδρομικού τύπου (περιστατικά την περίοδο 1996-2001, βάσει δεδομένων από τον Leonardos (2004a)) (Zevgolis et al. 2019) .....	16
Table 3 Περιστατικά αστάθειας που αναφέρθηκαν την περίοδο 2007-2017 (Zevgolis et al. 2019).....	18
Table 4 Στατιστικά φυσικών ιδιοτήτων για υπερκείμενα εδαφικά υλικά (Theocharis et al. 2021).....	42
Table 5 Παραμένουσα γωνία τριβής ( $\sigma'_v \approx 700 \text{ kPa}$ ) για όλα τα υλικά, για ευαίσθητες ( $\leq 15^\circ$ ) και μη-ευαίσθητες ( $> 15^\circ$ ) ζώνες (Theocharis et al. 2021).....	50
Table 6 Μέση τιμή για την παραμένουσα γωνία τριβής ( $\sigma'_v \approx 700 \text{ kPa}$ ) για όλα τα υλικά, για ευαίσθητες ( $\leq 15^\circ$ ) και μη-ευαίσθητες ( $> 15^\circ$ ) ζώνες, μέγιστη γωνία τριβής και συνοχή για διάφορα ορυχεία βάσει δοκιμών τριαξονικής φόρτισης (Theocharis et al. 2021) .....	51
Table 7 Συντελεστές ασφαλείας που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο Cuckoo για τις διάφορες τιμές της γωνίας τριβής για δύο οριζόντιες ευαίσθητες ζώνες .....	69
Table 8 Συντελεστές ασφαλείας που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο Simulated Annealing για τις διάφορες τιμές της γωνίας τριβής για δύο οριζόντιες ευαίσθητες ζώνες .....	70
Table 9 Συντελεστές ασφαλείας που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο Cuckoo για τις διάφορες τιμές της γωνίας τριβής για δύο κεκλιμένες ευαίσθητες ζώνες .....	70
Table 10 Συντελεστές ασφαλείας που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο Simulated Annealing για τις διάφορες τιμές της γωνίας τριβής για δύο κεκλιμένες ευαίσθητες ζώνες .....	71

# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Σκοπός εργασίας

Σκοπός της εργασίας είναι η εξέταση της επιρροής της ευαίσθητης ζώνης (εδαφική ζώνη χαμηλής διατμητικής αντοχής) στην ευστάθεια των εδαφικών πρानών σε βαθιές εκσκαφές (200 m βάθος) λιγνιτωρυχείων. Έτσι, θα μελετήσουμε περιπτώσεις οι οποίες έχουν καταγραφεί στη βιβλιογραφία και σχετίζονται με αυτού του τύπου τις αστοχίες. Ωστόσο, θα εμβαθύνουμε και στις ιδιότητες των υλικών που αποτελούν τα συγκεκριμένα πρानή ώστε να αξιολογηθούν οι γεωτεχνικοί παράγοντες που επηρεάζουν την αντοχή τους. Τέλος, για να έχουμε ολοκληρωμένη εικόνα των αστοχιών που εντοπίζονται και των συνθηκών ευστάθειας που επικρατούν θα εκτελέσουμε σειρές παραμετρικών αναλύσεων σε κατάλληλο προσομοίωμα με το λογισμικό Slide2.

## 1.2 Δομή εργασίας

Μετά την εισαγωγή αυτή ακολουθεί κεφάλαιο στο οποίο συνοψίζονται παλαιότερες αλλά και πιο πρόσφατες μελέτες σχετικά με συχνά γεωτεχνικά προβλήματα που καταγράφηκαν σε ελληνικά επιφανειακά λιγνιτωρυχεία. Σε αυτά τα περιστατικά εντοπίζονται συγκεκριμένες μορφές μηχανισμών αστοχίας. Ο πιο συνήθης μηχανισμός αστοχίας είναι ο σύνθετος μη-κυκλικός μηχανισμός αστοχίας. Ακολουθεί κατά μήκος μία ζώνη εδαφικού υλικού χαμηλής διατμητικής αντοχής σε παρα-οριζόντια ή οριζόντια διεύθυνση και τέμνει το πρானές πίσω από την στέψη του. Αυτού του τύπου οι μηχανισμοί αστοχίας θα εξεταστούν στην παρούσα εργασία.

Στη συνέχεια περιγράφονται τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των εδαφικών υλικών των ελληνικών λιγνιτωρυχείων. Αναλύονται οι μηχανικές τους ιδιότητες όπως επίσης τα μηχανικά χαρακτηριστικά όπως η παραμένουσα αντοχή και η μέγιστη διατμητική αντοχή. Αυτές οι παράμετροι έχουν εκτιμηθεί μέσω εργαστηριακών δοκιμών όπως δοκιμές τριαξονικής φόρτισης και άμεσης διάτμησης.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, βασισμένοι σε αριθμητικά δεδομένα των Theocharis et al. 2021 και μέσω του λογισμικού Slide2 της Rocscience δημιουργούμε κατάλληλο προσομοίωμα ενός αντιπροσωπευτικού πρானούς βαθιάς λιγνιτικής εκσκαφής. Σε αυτό, θα τρέξουμε παραμετρικές αναλύσεις ευστάθειας, δηλαδή θα εκτιμήσουμε τους συντελεστές ασφαλείας και τον τύπο της αστοχίας σε περιπτώσεις όπου η ευαίσθητη ζώνη έχει οριζόντια διεύθυνση ή είναι κεκλιμένη και βρίσκεται σε πολλαπλές υψομετρικές θέσεις καθώς και σε περιπτώσεις ύπαρξης παραπάνω από

μίας ευαίσθητης ζώνης. Στις αναλύσεις αυτές θα χειριστούμε ως παράμετρος τα μεγέθη που επηρεάζουν την διατμητική αντοχή των υλικών ως τη συνοχή και τη γωνία τριβής.

Τέλος παραθέτουμε ένα σύνολο συμπερασμάτων σχετικά με την επικινδυνότητα της εμφάνισης μίας ευαίσθητης ζώνης, ποιες είναι οι μορφές αστοχίας που εμφανίζονται και ποια είναι η γεωμετρία τους καθώς και πως επηρεάζουν τα υλικά και οι ιδιότητες τους στη δημιουργία τέτοιων αστοχιών. Αξιολογούμε τους συντελεστές ασφαλείας που εμφανίζονται στις περιπτώσεις που ελέγξαμε και σχολιάζουμε την ευστάθεια και τους κατάλληλους τρόπους διαχείρισης των γεωτεχνικών ζητημάτων στα ελληνικά λιγνιτωρυχεία.



## 2 ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΣΤΙΣ ΒΑΘΙΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΕΚΣΚΑΦΕΣ ΤΩΝ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΛΙΓΝΙΤΩΡΥΧΕΙΩΝ

### 2.1 Εισαγωγή

Η Ελλάδα τοποθετείται παραδοσιακά ανάμεσα στις μεγαλύτερες παραγωγούς-χώρες λιγνίτη στην Ευρώπη. Για περισσότερο από μισό αιώνα, ο λιγνίτης αποτέλεσε το πιο σημαντικό ορυκτό καύσιμο - πηγή ενέργειας της χώρας και έχει συνεισφέρει στην ηλεκτροδότηση και την οικονομική της άνθιση από τη δεκαετία του 1950 (εποχή έναρξης της έντονης και συστηματικής εκμετάλλευσης). Το 2017 εξορύχθηκαν 37.7Mt λιγνίτη, η μεγάλη πλειοψηφία των οποίων από τα ορυχεία της ΔΕΗ (Euracoal 2018). Παρά την πρόσφατη μείωση του μεριδίου του λιγνίτη στο συνολικό ενεργειακό μίγμα της χώρας (το 2017 αποτέλεσε το 33% της παραγωγής ηλεκτρισμού, ενώ πριν λίγα μόνο χρόνια αποτελούσε περισσότερο από το 50%), η εκμετάλλευση λιγνίτη μπορεί να παραμείνει μια βιώσιμη επιχείρηση μελλοντικά, αρκεί οι εξορυκτικές διαδικασίες να βελτιστοποιηθούν (Roumpros et al. 2018). Ένα σημαντικό μέρος της αποτελεσματικής διαχείρισης των λιγνιτωρυχείων σχετίζεται με τη γεωτεχνική μηχανική, και πιο συγκεκριμένα με την ευστάθεια των πρανών των αντίστοιχων βαθιών επιφανειακών εκσκαφών (πολλές φορές σε βάθη που φτάνουν τα 200m κάτω από τη φυσική επιφάνεια του εδάφους). Πραγματικά, όσον αφορά στον ελληνικό λιγνίτη ο οποίος είναι χαμηλής ποιότητας άνθρακας, η εκμετάλλευση πρέπει να διεξάγεται με οικονομικό τρόπο (Kanvadas et al. 1994), οπότε η επίτευξη βέλτιστων εκσκαφών είναι απαραίτητη. Για παράδειγμα, ο Καράς (1998) έδειξε πως πρανή λιγνιτωρυχείων που είναι πιο ήπια ακόμα και κατά μία μόνο μοίρα (1<sup>ο</sup>) από τη βέλτιστη κλίση, μπορεί να οδηγήσουν – ανάλογα με το ύψος της εκσκαφής – σε συντηρητικό σχεδιασμό και μη οικονομική εκμετάλλευση (Καράς 1988). Παρόμοια παραδείγματα έχουν παρουσιαστεί από τον Λεονάρδο (Λεονάρδος 2004a). Οι Zevgolis et al., στο πλαίσιο βελτιστοποίησης του γεωτεχνικού σχεδιασμού ενός λιγνιτωρυχείου με πιθανοτική προσέγγιση, παρουσίασαν μία σχέση μεταξύ κλίσης εκσκαφής και συνολικού κόστους εκσκαφής για ένα τυπικό επιφανειακό λιγνιτωρυχείο (Zevgolis et al. 2018).

Από την άλλη πλευρά, τις τελευταίες δεκαετίες, οι εκσκαφές των ελληνικών λιγνιτωρυχείων έχουν γίνει αναπόφευκτα πιο βαθιές και επομένως, πιο δύσκολες στο σχεδιασμό και διαχείριση. Οι Leonardos και Terezopoulos αναφέρουν πως το μέγιστο

βάθος των εκσκαφών στα ελληνικά λιγνιτωρυχεία έχει αυξηθεί από τα 70m το 1980 σε 170m το 2000 (Leonardos and Terezopoulos 2003). Άλλωστε, στα ορυχεία της ΔΕΗ διακρίνονται τέσσερις περιόδους που εμφανίζουν σχετικά σταθερούς λόγους αποκάλυψης (ορίζονται ως ο όγκος σε  $m^3$  στείρου υλικού που πρέπει να αφαιρεθεί ώστε να παραχθεί 1 ton λιγνίτη): 1 – 2  $m^3/t$  την περίοδο 1959 – 1967, 2 – 3  $m^3/t$  την περίοδο 1968 – 1991, 3 – 4  $m^3/t$  την περίοδο 1992 – 2003, και 4 – 5  $m^3/t$  από το 2004 έως και σήμερα (Roumpros et al. 2018). Με άλλα λόγια, οι λόγοι αποκάλυψης αυξάνονται σταθερά με τον χρόνο, που επί της αρχής σημαίνει ότι οι εκσκαφές γίνονται μεγαλύτερες και βαθύτερες και ως αποτέλεσμα πιο απαιτητικές από γεωτεχνικής άποψης. Πράγματι, την τελευταία δεκαετία έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία πολλά περιστατικά μεγάλων μετατοπίσεων και/ή φαινομένων αστάθειας στα ελληνικά λιγνιτωρυχεία (Prountzopoulos et al. 2010, Kavvadas et al. 2013, Marinou et al. 2015, Zevgolias et al. 2015, Steiakakis et al. 2016, Prountzopoulos et al. 2017, Steiakakis et al. 2017). Επιπροσθέτως, άλλα περιστατικά έχουν γίνει γνωστά στο ευρύ κοινό από τα Μέσα Μαζικής Ενημέρωσης, αλλά δεν έχουν αναφερθεί ακόμη στην επιστημονική βιβλιογραφία. Σε ορισμένες περιπτώσεις, εκτός από σοβαρές δυσκολίες στην λειτουργία και την παραγωγή, τα παραπάνω περιστατικά έχουν επίσης προκαλέσει σοβαρές ανησυχίες στις τοπικές κοινωνίες, δεδομένης της εγγύτητας αρκετών λιγνιτωρυχείων σε κατοικημένες περιοχές.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, είναι φανερό πως η σωστή εφαρμογή των αρχών της γεωτεχνικής μηχανικής είναι ιδιαίτερα σημαντική για το μέλλον των ελληνικών λιγνιτωρυχείων, ακόμα και στην περίπτωση της απολιγνιτοποίησης.

## 2.2 Περί ελληνικών λιγνιτωρυχείων

### 2.2.1 Μέθοδοι εκμετάλλευσης

Στην Ελλάδα, οι εκμεταλλεύσεις λιγνίτη εντοπίζονται κυρίως στην Περιφέρεια Δυτικής Μακεδονίας (κυρίως στη λεκάνη Πτολεμαΐδας – Αμυνταίου, καθώς και στις λεκάνες Φλώρινας και Κοζάνης – Σερβίων) και δευτερευόντως στην περιοχή της Μεγαλόπολης (Περιφέρεια Πελοποννήσου) (Εικόνα 1).

Η συντριπτική πλειοψηφία του λιγνίτη εξορύσσεται από τη ΔΕΗ. Για παράδειγμα, από τους 37.7Mt λιγνίτη που εξορύχθηκαν το 2017, οι 35.4Mt (94%) προήλθαν από τα επιφανειακά ορυχεία της ΔΕΗ και οι 2.3Mt (6%) από περιορισμένο αριθμό ιδιωτικών ορυχείων (Euracoal 2018). Συνήθως, η μέθοδος εκμετάλλευσης που εφαρμόζεται στα επιφανειακά λιγνιτωρυχεία της ΔΕΗ είναι η συνεχής μέθοδος επιφανειακής εκμετάλλευσης (ορισμένες φορές αναφέρεται και ως Γερμανική μέθοδος) στην οποία γίνεται χρήση καδοφόρων εκσκαφών. Ο λιγνίτης και τα στείρα υλικά μεταφέρονται συνήθως με μεταφορικές ταινίες, ενώ χρησιμοποιούνται αποθέτες για την απόθεσή

τους. Σε μικρότερη κλίμακα και περιστασιακά (αν απαιτείται), χρησιμοποιούνται και συμβατικές μέθοδοι εξόρυξης (υδραυλικοί εκσκαφείς, φορτωτές και χωματοουργικά αυτοκίνητα). Διάτρηση και ανατίναξη εφαρμόζονται επίσης σε ορισμένες περιπτώσεις που συναντώνται σχηματισμοί μεγάλης σκληρότητας (όπως για παράδειγμα στο ορυχείο Νοτίου Πεδίου στην Πτολεμαΐδα). Συμβατικές μέθοδοι με υδραυλικούς εκσκαφείς χρησιμοποιούνται επίσης στα μικρότερα, ιδιωτικά ορυχεία (για παράδειγμα, στα ορυχεία Λάβας και Προσηλίου) που βρίσκονται στην Περιφέρεια Δυτικής Μακεδονίας (λεκάνη Κοζάνης – Σερβίων). Σημειώνεται ότι από τα μέσα προς τέλος της δεκαετίας του 1980 έως και σήμερα, η εξόρυξη λιγνίτη στην Ελλάδα πραγματοποιείται αποκλειστικά με επιφανειακές εκμεταλλεύσεις. Εξάριση αποτελεί μόνο μία ιδιωτικής πρωτοβουλίας υπόγεια εκμετάλλευση που ξεκίνησε πρόσφατα, σε συνδυασμό με επιφανειακή εξόρυξη, στο ορυχείο Προσηλίου (λεκάνη Κοζάνης – Σερβίων) (Tzalamarias et al. 2018) . Στα λιγνιτωρυχεία της ΔΕΗ, ειδικά στη λεκάνη Πτολεμαΐδας – Αμυνταίου, τα εκμεταλλεύσιμα αποθέματα λιγνίτη βρίσκονται πλέον σε βάθη 150 – 200m κάτω από τη φυσική επιφάνεια του εδάφους. Οπότε, το συνολικό βάθος των πρυνών του ορυχείου μπορεί να φτάνει μέχρι και τα 200m. Ένα παράδειγμα βαθιάς επιφανειακής εκσκαφής (ορυχείο Μαυροπηγής, Πτολεμαΐδα) φαίνεται στην Εικόνα 2.



Εικόνα 1 Γεωγραφική κατανομή των περιοχών εξόρυξης λιγνίτη στην Ελλάδα



Εικόνα 2 Τυπική βαθιά λιγνιτική εκσκαφή σε ορυχείο στη Βόρεια Ελλάδα (Ορυχείο Μαυροπηγής, φωτογραφία από Zevgolits et al. 2019)

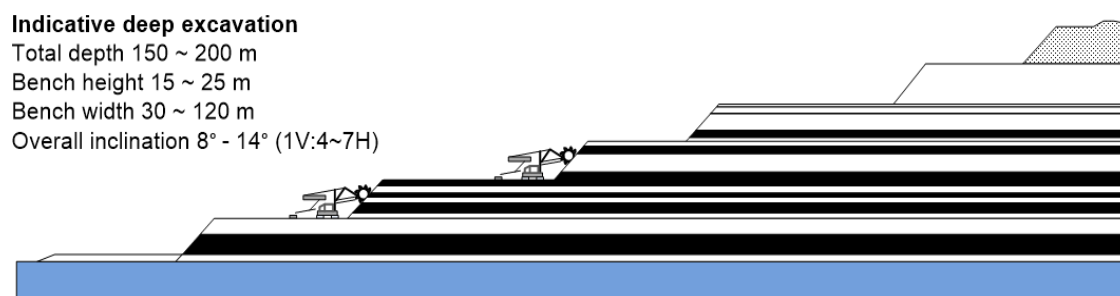
Γενικά, οι εκσκαφές της ΔΕΗ στην λεκάνη Πτολεμαΐδας – Αμυνταίου είναι βαθύτερες από τις εκσκαφές στη λεκάνη της Μεγαλόπολης. Παρ' όλα αυτά, αν και τα ορυχεία στη Μεγαλόπολη δεν είναι τόσο βαθιά, παρουσιάζουν παρόμοια προβλήματα ευστάθειας λόγω της χαμηλότερης διατμητικής αντοχής των υλικών της εκσκαφής Kanvadas et al. (2018). Ακόμη, οι εκσκαφές των ιδιωτικών ορυχείων στη βόρεια Ελλάδα είναι μικρότερης κλίμακας (συχνά με πιο απότομες κλίσεις) από εκείνες της ΔΕΗ. Σε κάθε περίπτωση, οι εκσκαφές χωρίζονται σε κατακόρυφες ή παρακατακόρυφες βαθμίδες. Στη περίπτωση των ορυχείων της ΔΕΗ, το ύψος των βαθμίδων αυτών συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 15 – 25m (με μέση τιμή περίπου 20m), ή ακόμη και μεταξύ 10 – 30m, ανάλογα με ορισμένες παραμέτρους (όπως το ύψος των εκσκαφών αλλά και πιθανά ζητήματα ευστάθειας). Το πλάτος των βαθμίδων συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 30 – 120m, ανάλογα με θέματα ευστάθειας, λειτουργικότητας και το στάδιο προχώρησης της εκσκαφής. Μια χαρακτηριστική άποψη πέντε βαθμίδων στο ορυχείο της Μαυροπηγής (διακρίνονται οι καδοφόροι εκσκαφείς) δίνεται στην Εικόνα 3.

Σήμερα, η συνολική κλίση των ορυχείων της ΔΕΗ συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 1V:4H (14°) και 1V:7H (8°) Kanvadas et al. (2018). Παλαιότερες πηγές αναφέρουν επίσης ορυχεία με πιο απότομες κλίσεις. Για παράδειγμα, στη βιβλιογραφία αναφέρεται μία μελέτη περίπτωσης που διεξήχθη στα μέσα της δεκαετίας του 1990 στην οποία η συνολική κλίση μίας εκσκαφής βάθους 140m (ορυχείο Τομέα 6, Πτολεμαΐδα) υπολογίστηκε 1V:2.5H (~22°) Steiakakis and Agioutantis (2010). Επίσης, ο Λεονάρδος παρέχει ορισμένες τομές (περιστατικών αστοχίας) από τα μέσα προς τα τέλη της

δεκαετίας του 1990, στις οποίες οι συνολικές κλίσεις κυμαίνονται μεταξύ  $12^\circ$  και  $20^\circ$  (Λεονάρδος 2004a). Σε κάθε περίπτωση, μία ενδεικτική και απλοποιημένη τομή μίας τυπικής λιγνιτικής εκσκαφής απεικονίζεται στην Εικόνα 4.



Εικόνα 3 Διαδοχικές βαθμίδες με καδοφόρους εκσκαφείς σε βαθύ λιγνιτωρυχείο (Kavvadas et al. 2018)



Εικόνα 4 Απλοποιημένη τομή βαθιάς λιγνιτικής εκσκαφής στην Ελλάδα (Zevgolis et al. 2019)

### 2.2.2 Τυπικά προφίλ εκσκαφών και γεωλογία

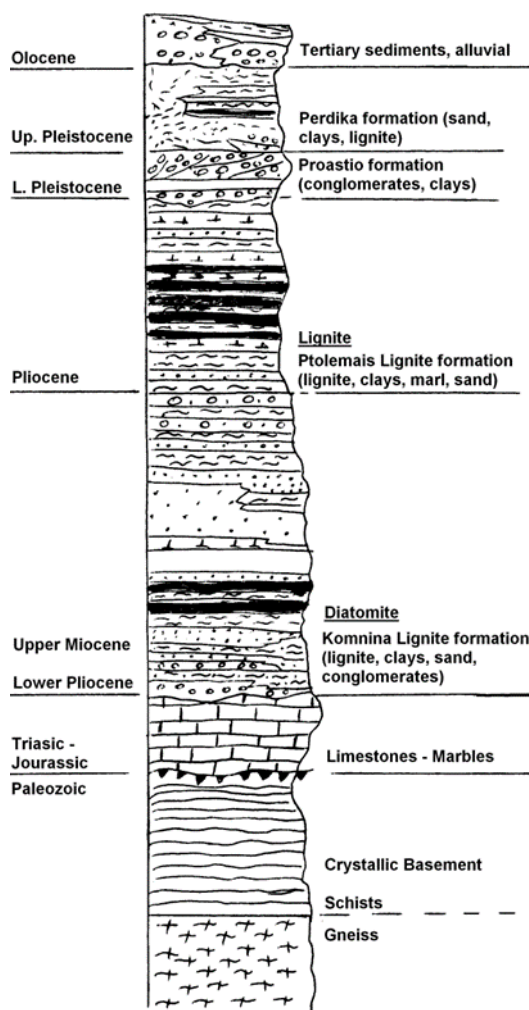
Όσον αφορά στα τυπικά προφίλ εκσκαφών και στη στρωματογραφία, οι εδαφικές τομές στα ορυχεία αποτελούνται από μία ζώνη υπερκείμενων στείρων υλικών μεγάλου πάχους (Τεταρτογενείς αποθέσεις με μέσο πάχος μερικές δεκάδες μέτρα) που υπέρκεινται των λιγνιτικών κοιτασμάτων (Νεογενείς αποθέσεις). Οι λιγνιτικές αποθέσεις συνήθως εναλλάσσονται με ενδιάμεσα λεπτά στρώματα στείρου υλικού.

Μία χαρακτηριστική περίπτωση πολυστρωματικής στρωματογραφίας από τα ορυχεία της ΔΕΗ δίνεται στην Εικόνα 5.



Εικόνα 5 Πολυστρωματική στρωματογραφία ελληνικών λιγνιτικών κοιτασμάτων (Galetakis et al. 2005)

Επίσης, μία γενική γεωλογική στρωματογραφική στήλη της λιγνιτικής λεκάνης της Δυτικής Μακεδονίας δίνεται στην Εικόνα 6. Το στείρο υλικό (Τεταρτογενούς και Νεογενούς προέλευσης) αποτελείται κυρίως από μάργες και αργίλους, συχνά συμπαγείς έως και σκληρές, και περιστασιακά από αδύναμα κροκαλοπαγή και υδροφόρες άμμους. Οπότε, σε γενικές γραμμές, όταν πρόκειται για μελέτες ευστάθειας πρανών στα ορυχεία, εφαρμόζονται αρχές της εδαφομηχανικής (αντί της βραχομηχανικής). Να σημειωθεί πως λόγω ήπιων τεκτονικών συνθηκών, ο προσανατολισμός των στρωμάτων είναι σχετικά σταθερός και η κλίση τους σχετικά μικρή ( $0^{\circ}$ - $6^{\circ}$ ), καταλήγοντας σε οριζόντια και παρα-οριζόντια στρώματα. Σε κάθε περίπτωση, η τεκτονική της περιοχής (παρουσία ρηγμάτων, κ.λπ.) πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τον σχεδιασμό ή την εκμετάλλευση κάθε ορυχείου, δεδομένου ότι συχνά παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην κινητική συμπεριφορά των εκσκαφών Steiakakis and Agioutantis (2010).



Εικόνα 6 Ενδεικτική γεωλογική στρωματογραφική στήλη της λιγνιτικής λεκάνης Δυτικής Μακεδονίας (Κουκουζας 2007)

Στο παρελθόν, διάφοροι συγγραφείς έχουν περιγράψει λεπτομερώς τυπικά προφίλ εκσκαφών των ορυχείων της ΔΕΗ. Για παράδειγμα, οι Kanvadas et al. (1992, 1993, 1994, 2018) αναφέρονται (από πάνω προς τα κάτω) στους ακόλουθους σχηματισμούς (Kanvadas et al. 1992, Kanvadas et al. 1993, Kanvadas et al. 1994, Kanvadas et al. 2018):

- (i) Πρόσφατες Τεταρτογενείς (Ολόκαινου) αποθέσεις (μέσου πάχους 5-10m).
- (ii) Ανώτερος ορίζοντας Πλειστόκαινων Τεταρτογενών ιζημάτων που περιλαμβάνει στείρο υλικό, όπως μάργες, συμπαγείς αργίλους, και περιστασιακά, αδύναμα κροκαλοπαγή και στρώματα υδροφόρας άμμου (μέσου πάχους 70 – 120 m).
- (iii) Χαμηλότερος ορίζοντας με αποθέσεις Κατώτερου Πλειστόκαινου (Τεταρτογενείς)-Ανώτερου Μειόκαινου (Νεογενείς) (μέσου πάχους 50-80m). Αυτός περιέχει τις περισσότερες στρώσεις λιγνίτη και πολύ συμπαγείς έως και σκληρές μάργες και αργίλους. Το κύριο σώμα του λιγνιτικού κοιτάσματος

βρίσκεται αρκετά κοντά στον πυθμένα της εκσκαφής. Η ανώτερη ζώνη του ορίζοντα αποτελείται από στείρο υλικό (μάργες/άργιλοι), (με πάχος που κυμαίνεται από χιλιοστά του μέτρου μέχρι και μερικές δεκάδες εκατοστά) το οποίο εναλλάσσεται με λεπτότερα στρώματα λιγνίτη.

- (iv) Σκληρή μάργα βάσης που συναντάται στο χαμηλότερο σημείο των λιγνιτικών στρωμάτων και υποδεικνύει τον πυθμένα του κοιτάσματος.

Οι Monopolis et al. (1999) και οι Steiakakis και Agioutantis (2010) παρουσιάζουν παρόμοια στρωματογραφία (σε τομή βασισμένη στο ορυχείο Τομέα 6). Ειδικά όσον αφορά στις Νεογενείς αποθέσεις (λιγνιτοφόρα στρώματα), αναφέρονται στην παρουσία των τριών ακόλουθων σειρών (Monopolis et al. 1999, Steiakakis and Agioutantis 2010):

- (i) την ανώτερη σειρά (μέγιστο πάχος 100m) με αργίλους και μάργες,
- (ii) τη λιγνιτοφόρα σειρά (μέσο πάχος 135m), και
- (iii) τη χαμηλότερη σειρά, της οποίας τα ανώτερα 40m αποτελούνται από αργιλώδεις (ή κατά τόπους αμμώδεις) μάργες, με παρεμβολές μαργαϊκών ασβεστόλιθων.

Όσον αφορά στη λιγνιτοφόρα σειρά, αναφέρονται σε μία χαμηλότερη (80m) και μία ανώτερη (40m) πολυστρωματική λιγνιτική αλληλουχία και μία ενδιάμεση διαδοχή στείρου υλικού (15m). Η ενδιάμεση σειρά αυτή και το υπόλοιπο διαστρωματομένο στείρο υλικό (στην ανώτερη και τη χαμηλότερη λιγνιτική αλληλουχία) αποτελείται κυρίως από μάργες, αργίλους, και ασβεστιτικούς λιυόλιθους.

### 2.3 Παλαιότερες μελέτες γεωτεχνικής διερεύνησης

Η πρώτη ερευνητική εργασία που αναφέρεται στα ελληνικά λιγνιτωρυχεία από γεωτεχνική σκοπιά ήταν οι μελέτες του Αναγνωστόπουλου (1979, 1982) (Anagnostopoulos 1979, Anagnostopoulos 1982). Συγκεκριμένα, διερευνώντας τη συμπίεση του λιγνίτη της Μεγαλόπολης, συμπέρανε πως ο λιγνίτης συμπεριφέρεται όπως μια τυπική υπερστερεοποιημένη άργιλος, παρουσιάζοντας αξιοσημείωτη δευτερογενή συμπίεση. Παρ' όλα αυτά, ο Anagnostopoulos δεν επέκτεινε την έρευνα του σε μελέτες ευστάθειας. Μια από τις πρώτες δημοσιευμένες εργασίες που ασχολήθηκαν με την ανάλυση ευστάθειας πρανών (όχι όμως περιστατικών αστοχίας) ήταν η μελέτη των Stamatopoulos and Kontzias (Stamatopoulos and Kotzias 1981). Αναλύθηκε η ευστάθεια ενός επιφανειακού ορυχείου της ΔΕΗ βάθους 60m, πάνω στο οποίο προοριζόταν να πραγματοποιηθεί η κατασκευή ενός αναχώματος (μέγιστου ύψους 15m και περίπου 4km σε μήκος), κατά μήκος του ποταμού Αλφειού στην περιοχή της Μεγαλόπολης. Βασισμένοι σε έρευνα που διεξήγαγαν, συμπέραναν πως ο λιγνίτης και η ενδιάμεση άργιλος διαφέρουν κυρίως από πλευράς πλαστικότητας, αφού ο καθαρός λιγνίτης δεν εμφανίζει



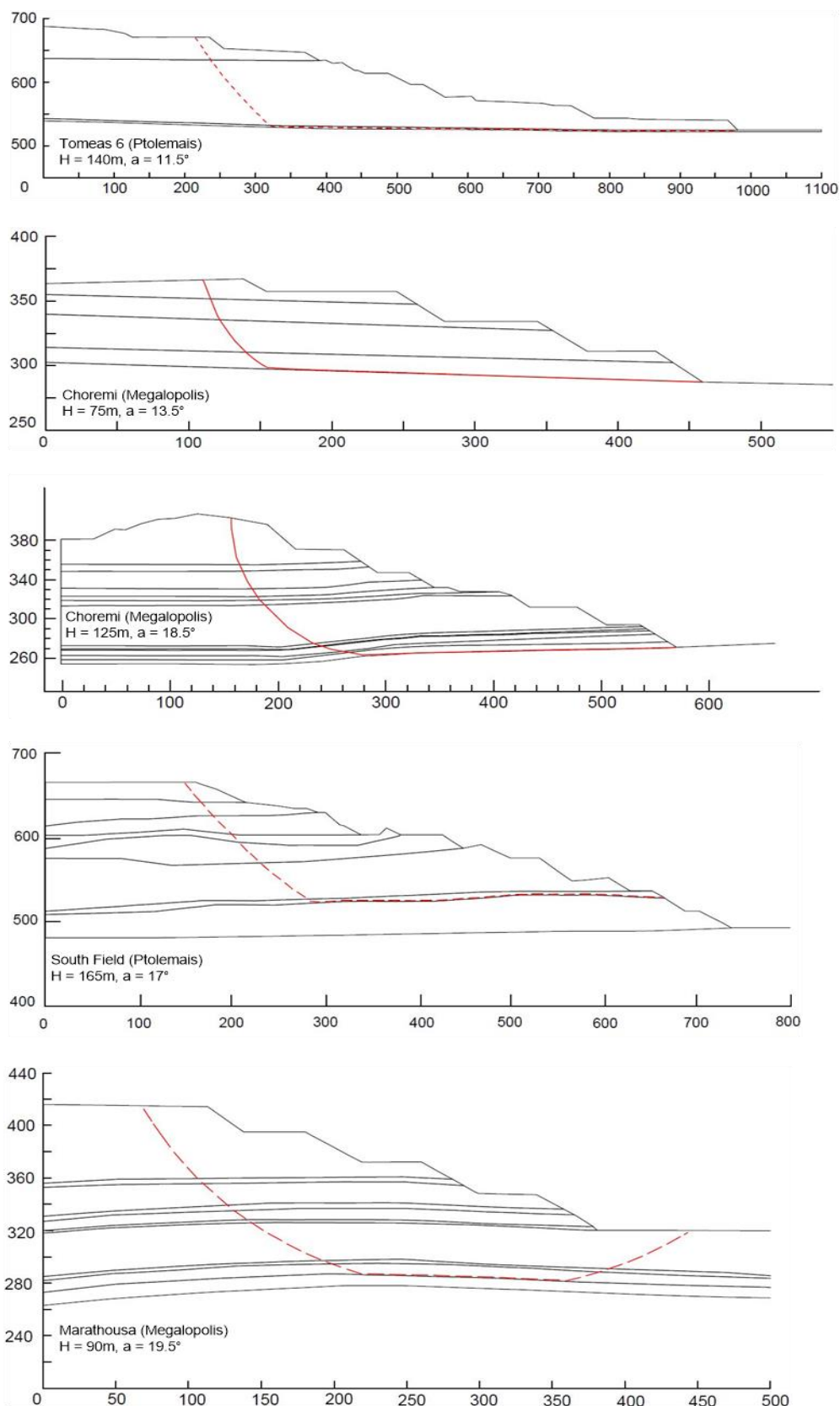
πλαστικότητα. Άλλη μία δημοσιευμένη μελέτη της δεκαετίας του 1980 αποτελεί η δουλειά του Karas (1988). Παρείχε μία σύντομη και γενική συζήτηση για γεωτεχνικά χαρακτηριστικά και σχεδιαστικά ζητήματα των πρανών εκσκαφής των ελληνικών λιγνιτωρυχείων (αναφερόμενος στο ορυχείο Κύριου Πεδίου στη Πτολεμαΐδα και το τότε νέο ορυχείο Αμυνταίου). Επίσης επισημάνθηκαν συντόμως δύο περιστατικά αστοχιών από τη δεκαετία του 1970, χωρίς να παρέχονται πολλές λεπτομέρειες. Πρόκειται για κατολισθήσεις του 1974 και του 1976 στο ορυχείο Θωκνίας, το πρώτο ορυχείο που δημιουργήθηκε στη περιοχή της Μεγαλόπολης. Επιπροσθέτως, ο Karas αναφέρθηκε επίσης στην αφθονία συμπαγούς υπερστερεοποιημένης αργίλου τόσο στη Μεγαλόπολη όσο και στη Πτολεμαΐδα, και συγκεκριμένα στον κρίσιμο ρόλο της διείσδυσης νερού στα ανοίγματα και στις ρωγμές της αργίλου αυτής. Επίσης, ανέφερε την σποραδική παρουσία ευαίσθητων (θιξότροπων) αργίλων στην περιοχή της Πτολεμαΐδας. Ο ζωτικός ρόλος της διείσδυσης του υπόγειου νερού επισημαίνεται επίσης από τους Kanvadas et al. (1992), που έδειξαν πως η διείσδυση νερού σε ανοίγματα και ανοικτά ρήγματα προκαλεί υδραυλικές πιέσεις, και ως αποτέλεσμα παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο (σε συνδυασμό με τις ιδιότητες των υλικών) στην ευστάθεια των πρανών της εκσκαφής (Kanvadas et al. 1992). Ακόμα, βάσει διεξοδικής διερεύνησης των γεωτεχνικών ιδιοτήτων του λιγνίτη της Πτολεμαΐδας, οι Kanvadas et al. (1993, 1994) έδειξαν πως έχει μεταβλητό δείκτη πόρων, γεγονός που δεν συμβαδίζει με την τάση προστερεοποίησής του (Kanvadas et al. 1993, Kanvadas et al. 1994). Αυτό μπορεί να οφείλεται στην παρουσία δομής (χημικοί δεσμοί). Βάσει δοκιμών τριαξονικής φόρτισης CU και CD, έδειξαν πως η διατμητική αντοχή είναι μεταβλητή, όμως εξαρτάται έντονα από την επί τόπου παρουσία υγρασίας. Στη πραγματικότητα, έλαβαν υπόψιν ότι το μέγεθος της δύναμης των δεσμών (εκφράζεται από τη μέγιστη διατμητική αντοχή) είναι αντιστρόφως ανάλογο της περιεχόμενης υγρασίας και θεώρησαν πως η μέγιστη διατμητική αντοχή του υλικού μπορεί να εκτιμηθεί από την επί τόπου περιεχόμενη υγρασία με ικανοποιητική ακρίβεια.

Η πρώτη περίπτωση σημαντικών μετατοπίσεων σε λιγνιτωρυχείο που αναφέρθηκε εκτενώς στη βιβλιογραφία ήταν η περίπτωση του ορυχείου του Τομέα 6 της ΔΕΗ στη Πτολεμαΐδα (Monopolis et al. 1999). Το 1994 και το 1995, δημιουργήθηκαν ρωγμές πίσω από ορισμένα πρανά του ορυχείου και καταγράφηκε σημαντική ανύψωση (περίπου 0.6m) σε βαθμίδα παραγωγής. Εξαιτίας αυτών, η ΔΕΗ διεξήγαγε ένα πρόγραμμα παρακολούθησης πεδίου, στο οποίο συνδυάστηκαν τοπογραφική έρευνα και μετρήσεις κλισιομέτρων. Η κύρια ανησυχία αφορούσε στο αν οι μετατοπίσεις προκλήθηκαν λόγω αποτόνωσης τάσεων (δεδομένου του μεγέθους της εκσκαφής βάθους 120m και της σημαντική μάζα εδαφικών υλικών που αφαιρέθηκε), ή ήταν πρόδρομο φαινόμενο μίας επικείμενης καταστροφικής αστοχίας πρανούς. Οι Monopolis et al. (1999) παρουσίασαν τη γεωτεχνική έρευνα που έλαβε χώρα, στην οποία συμπεριλαμβάνονται εργαστηριακές δοκιμές, μετρήσεις πεδίου, και

αναλύσεις ευστάθειας (οριακής ισορροπίας). Συμπέραναν ότι οι ρωγμές και η ανύψωση του εδάφους πιθανότατα οφείλονται στην αποτόνωση των τάσεων λόγω της εξορυκτικής διαδικασίας (δηλαδή ανάκαμψη των σχηματισμών λόγω της εκσκαφής), παρά σε επικείμενη δημιουργία ευρύτερης κατολίσθησης. Το έργο των Monopolis et al. επεκτείνεται περαιτέρω από τον Steiakakis στην διδακτορική του διατριβή (Στειακάκης 2003). Μελέτησε λεπτομερώς τη συμπεριφορά της βαθιάς εκσκαφής του ορυχείου Τομέα 6, διερευνώντας τις γεωτεχνικές παραμέτρους (μέσω εκτενούς εργαστηριακής διερεύνησης και δοκιμών) και την κινηματική συμπεριφορά του ορυχείου (μέσω αναλυτικών και αριθμητικών προσομοιωμάτων, αλλά και προσομοιωμάτων οριακής ισορροπίας). Η μελέτη του αναφέρθηκε επίσης από τους Steiakakis και Agioutantis (Steiakakis and Agioutantis 2010). Συνολικά, οι Steiakakis και Agioutantis συμπεραίνουν πως οι μάργες επηρέασαν έντονα την κινηματική συμπεριφορά της εκσκαφής του ορυχείου. Ακόμη, με χρήση πεπερασμένων στοιχείων (Plaxis), προσομοίωσαν την κινητικότητα η οποία ήταν εμφανής κατά τη διάρκεια της εκσκαφής του ορυχείου και τα αποτελέσματά τους συγκρίθηκαν πολύ καλά με τα δεδομένα της παρακολούθησης. Ουσιαστικά, οι συγγραφείς συμπεραίνουν πως οι διατμητικές τάσεις που αναπτύχθηκαν δεν ήταν αρκετά υψηλές, ώστε να δικαιολογήσουν την εμφάνιση μηχανισμού αστοχίας. Ακόμη και αν τοπικά φανερώνεται υπέρβαση των τάσεων και αστάθεια, δεν συνδέονται με μία ολική αστοχία πρσανούς. Όσον αφορά στο μεγάλο μέγεθος των παραμορφώσεων (εκτιμήθηκαν οριζόντιες μετατοπίσεις περίπου 0.8m και ανύψωση του εδάφους 0.5m), οι συγγραφείς δήλωσαν πως τέτοιες παραμορφώσεις είναι αναμενόμενες σε εκσκαφές με βάθος γύρω στα 150m στην περιοχή της Πτολεμαΐδας. Ισχυρίστηκαν επίσης πως αν το σημείο αυτό δεν επηρεάζεται τοπικά από δυσμενή τεκτονική και στρωματογραφία, ο κίνδυνος κατολισθήσεων μεγάλης κλίμακας είναι περιορισμένος. Συνοψίζοντας, οι Steiakakis και Agioutantis (2010) συμπέραναν πως η κινηματική συμπεριφορά του ορυχείου του Τομέα 6 οφείλεται κυρίως στην ανύψωση λόγω αποφόρτισης καθώς προχωρά η εκσκαφή σε συνδυασμό με την ελαστοπλαστική συμπεριφορά των γεωλογικών σχηματισμών.

Άλλη μια ενδιαφέρουσα εργασία η οποία αντιμετώπισε κάποια γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των βαθιών ελληνικών λιγνιτωρυχείων ήταν η διδακτορική διατριβή του Λεονάρδου (Λεονάρδος 2004a) και οι σχετικές δημοσιεύσεις (Λεονάρδος and Τερεζόπουλος 2002, Leonardos and Terezopoulos 2003, Λεονάρδος 2004b). Βασισμένος σε δεδομένα και παρατηρήσεις από την δική του επαγγελματική εμπειρία στα ελληνικά λιγνιτωρυχεία, ο Leonardos έκανε έναν αριθμό επισημάνσεων σχετικά με τη γεωτεχνική συμπεριφορά των βαθιών εκσκαφών των ελληνικών λιγνιτωρυχείων. Πρώτα απ' όλα, αναγνώρισε αυτό που αποκαλούσε «σύνθετο μηχανισμό αστοχίας» ως τον πιο κρίσιμο μηχανισμό αστοχίας στα ελληνικά λιγνιτωρυχεία. Αυτός αποτελείται από μία οριζόντια ή παρα-οριζόντια επιφάνεια ολίσθησης που ακολουθείται από μία ανοδική καμπύλη στο πίσω μέρος (πίσω από

την στέψη του πρανούς). Η γραμμική επιφάνεια εντοπίζεται συνήθως κατά μήκος μίας ευαίσθητης στρώσης, το οποίο συχνά αποτελεί τη διεπιφάνεια μεταξύ του λιγνίτη και της υποκείμενης αργίλου. Η Εικόνα 7 απεικονίζει πέντε παραδείγματα αστοχίας της ευστάθειας πρανών (κατά τη διάρκεια της περιόδου 1996-2001) ο μηχανισμός αστοχίας των οποίων (μαζί με άλλα ζητήματα) συζητήθηκε από τον Λεονάρδο (Λεονάρδος 2004a).



Εικόνα 7 Επιφάνειες στις οποίες αναμένεται αστοχία με ευδιάκριτο οριζόντιο / παρα-οριζόντιο τμήμα (H: συνολικό ύψος της εκσκαφής,  $\alpha$ : συνολική κλίση της εκσκαφής) (Περιπτώσεις που αφορούν την περίοδο 1996-2001, τροποποιημένες εικόνες από Leonardos (2004a))

Όλες οι περιπτώσεις αναφέρονται σε επιφάνειες αστοχίας, στις οποίες ένα ουσιαστικά γραμμικό (οριζόντιο ή υπό-οριζόντιο) μέρος ήταν διακριτό. Οι γεωμετρίες των εκσκαφών ποικίλουν, με ύψη που κυμαίνονται από 75 έως 165m και ολικές κλίσεις μεταξύ 11.5° και 19.5°. Μια σύνοψη των περιστατικών αυτών παρέχεται στον ακόλουθο Πίνακα.

**Table 1 Περιπτώσεις αστοχιών πρανών στα ελληνικά λιγνιτωρυχεία που αναφέρθηκαν την περίοδο 1996-2001 (από Leonardos (2004a)) (Zevgolts et al. 2019)**

<b>Mine - area (date)</b>	<b>H</b>	<b>b</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b>D</b>	<b>V</b>	<b>Comments</b>
Tomeas 6 - Ptolemais (n/a)	140	7	11.5°	0	n/a	Horizontal part of the failure surface: along a thin clay layer.
Choremi Megalopolis (10/1996)	75	4	13.5°	0	650	Horizontal part of the failure surface at the interface between lignite and an underlying clay. Limited rupture of the ground mass (extensive ruptures only at the crest and the upper part of the slope). No spreading of the failing ground mass at the floor of the excavation.
Choremi Megalopolis (12/2001)	125	7	18.5°	0	650	Limited rupture of the ground mass (extensive ruptures only at the crest and the upper part of the slope). No spreading of the failing ground mass at the floor of the excavation.
South Field Ptolemais (10/2001)	165	8	17°	+35m	120	Horizontal part of the failure surface along a thin zone of marls in between lignite layers. Significant spreading of the failing ground mass at the floor of the excavation.
Marathousa Megalopolis (11/2001)	90	4	19.5°	-35m	120	No spreading of the failing ground mass at the floor of the excavation (despite of the extensive rupture of the ground mass, and the bulging at the floor of the excavation).
Amyntaio (12/1998)	110	n/a	n/a	-20m	n/a	Significant spreading of the failing ground mass at the floor of the excavation.

H: depth of the excavation (m), b: number of benches,  $\alpha$ : total inclination of the excavation (°), D: depth / location of the horizontal part of the failure surface with respect to the bottom of the excavation (m), V: velocity (mm/day) of the displacements the day before the failure event

Πέραν των περιπτώσεων αυτών, τις οποίες ο Leonardos χαρακτήρισε ως προοδευτικού τύπου αστοχίες, παρείχε επίσης κάποια δεδομένα από περιστατικά μετατοπίσεων οπισθοδρομικού τύπου. Ο διαχωρισμός που έκανε βασίστηκε στις έννοιες που περιγράφονται από τον Zavdoni (2001), που εισήγαγε την έννοια των οπισθοδρομικών και προοδευτικών καταστάσεων αστάθειας (Zavdoni 2001): στην πρώτη περίπτωση, τα πρηνή της εκσκαφής παρουσιάζουν κύκλους επιβραδυνόμενων μετατοπίσεων, ενώ τελικά φτάνουν σε κατάσταση απόλυτης ευστάθειας, ενώ στη δεύτερη περίπτωση, εμφανίζονται κύκλοι επιταχυνόμενων μετατοπίσεων και αναμένεται ολική κατάρρευση (εκτός αν εφαρμοστούν διορθωτικά μέτρα). Στο πλαίσιο των οπισθοδρομικών μετατοπίσεων, ο Πίνακας 2 αναφέρεται σε τέσσερις περιπτώσεις, στις οποίες καταγράφηκαν αξιοσημείωτες (οπισθοδρομικές) μετατοπίσεις.

**Table 2 Παραδείγματα μετατοπίσεων οπισθοδρομικού τύπου (περιστατικά την περίοδο 1996-2001, βάσει δεδομένων από τον Leonardos (2004a)) (Zevgolits et al. 2019)**

Mine	Triggering reasons	Displacements (mm/day)*
Choremi - Megalopolis	Water infiltration in cracks of an old landslide due to extensive and intense rainfall	90
Tomeas 6 - Ptolemais	Intense rainfall combined with water drainage network's failure	60
Amyntaio	Deepening of the excavation	105
Tomeas 6 - Ptolemais	Water infiltration in cracks of an old landslide due to extensive and intense rainfall	65

\* Maximum displacements before the pit reaching an ultimate stability stage.

Και στις τέσσερις περιπτώσεις, η εκσκαφή φτάνει τελικά στο στάδιο ολικής ευστάθειας. Αξίζει να σημειωθεί πως στις τρεις από τις τέσσερις περιπτώσεις, εκτενείς και έντονες περίοδοι βροχόπτωσης προηγήθηκαν των περιστατικών. Επιπροσθέτως, σύμφωνα με τον Leonardos, ο πιο σημαντικός παράγοντας για την ευστάθεια είναι η διατμητική αντοχή της αργλικής στρώσης που αναφέρθηκε παραπάνω. Σε αυτό το πλαίσιο, εξετάστηκε η κρίσιμη επιρροή της παραμένουσας γωνίας τριβής (της αργλικής στρώσης) στην ευστάθεια. Ακόμη, μέσω απλών αναλύσεων, σημειώθηκε εν συντομία ο ρόλος της δυσμενούς κλίσης (προς την εκσκαφή) αυτής της στρώσης, όπως επίσης ο ρόλος της διείσδυσης του νερού σε ρωγμές και ανοίγματα του εδάφους. Επιπλέον, επισημάνθηκε η σπουδαιότητα της παρακολούθησης πεδίου στα βαθιά λιγνιτωρυχεία (πράγμα που δεν αποτελούσε συνήθη πρακτική μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1990), με σκοπό την εξασφάλιση αποτελεσματικής αξιολόγησης της ευστάθειας των πρηνών και την εγγύηση της ασφάλειας. Πράγματι, αναφέρει πως η πρώτη φορά που χρησιμοποιήθηκαν σε ελληνικά λιγνιτωρυχεία ήταν το 1991, με σκοπό την παρακολούθηση πρηνούς κλίσης 1V:3H και ύψους 95m και ρυθμό μετακίνησης 8-20mm/month. Συνολικά, σύμφωνα

με τον Leonardos, οι επικείμενες αστοχίες πρανών μπορούν να εντοπισθούν και να αναλυθούν πολύ πριν γίνει ορατός ο σχηματισμός οποιασδήποτε ρωγμής στη στέψη του πρανού (Leonardos and Terezoroulos 2003). Στην πραγματικότητα ισχυρίστηκε πως η ταχύτητα καταγεγραμμένων μετατοπίσεων (ρυθμός κίνησης) αποτελεί αξιόπιστο κριτήριο για συνθήκες επικείμενης αστοχίας. Συγκεκριμένα, βάσει των δεδομένων και των παρατηρήσεών του, δήλωσε πως όταν ο ρυθμός της μετακίνησης αυξάνεται σταθερά πάνω από 20mm/day, τότε η αστοχία του πρανού αναμένεται να λάβει χώρα σε μία περίοδο 6 έως 12 ημερών αφ' ότου η ταχύτητα έχει ξεπεράσει αυτό το όριο (Λεονάρδος and Τερεζόπουλος 2002). Παρ' όλα αυτά, το συμπέρασμα αυτό αμφισβητήθηκε από άλλους ερευνητές, όπως θα συζητηθεί στο ακόλουθο μέρος (Kanvadas et al. 2013, Kanvadas et al. 2020). Τέλος, ο Leonardos εξέτασε επίσης διορθωτικά μέτρα για αστοχίες πρανών στα βαθιά ελληνικά λιγνιτωρυχεία και συμπάιρανε πως συχνά η καταλληλότερη μέθοδος σταθεροποίησης είναι η εσωτερική (δηλαδή εσωτερικά του ορυχείου) απόθεση του στείρου υλικού (Λεονάρδος 2004b).

## 2.4 Πρόσφατες μελέτες και περιστατικά αστοχιών

Σε μια ενδιαφέρουσα πρόσφατη μελέτη, οι Kanvadas et al. διερεύνησαν την ευστάθεια πρανών σε λιγνιτωρυχεία της ΔΕΗ και δήλωσαν πως η αστάθεια πρανών συνήθως διέπεται από την ολίσθηση κατά μήκος μιας παρα-οριζόντιας, δυσμενούς κλίσης (προς την εκσκαφή), διεπιφάνειας μεταξύ του λιγνίτη και του υποκείμενου συμπαγούς, υψηλής πλαστικότητας στρώματος αργίλου ή μάργας, πολύ κοντά στον πόδα του πρανού, όπου οι διατμητικές τάσεις είναι μεγαλύτερες (Kanvadas et al. 2020). Όπως περιγράφεται από τους συγγραφείς, ο τυπικός μηχανισμός αστοχίας τέτοιων αστοχιών πυροδοτείται από τη μεγάλη διαφορά δυσκαμψίας μεταξύ των γειτονικών στρωμάτων λιγνίτη και αργίλου/μάργας που προκαλεί διαφορική ελαστική ανάκαμψη κατά την εκσκαφή και αφαίρεση του υλικού που αποτελεί οριζόντιο περιορισμό των στρωμάτων αυτών. Βάσει παραμετρικών αναλύσεων, διερευνήθηκε η επιρροή (στην ευστάθεια) των παραμέτρων όπως η γεωμετρία της εκσκαφής (ολικό ύψος και συνολική κλίση), οι συνθήκες της υπόγειας υδροφορίας, και η διατμητική αντοχή της κρίσιμης διεπιφάνειας μεταξύ αργίλου και λιγνίτη. Επιπροσθέτως, συμπέραναν πως ακόμη και μία μικρή αλλά δυσμενής κλίση (δηλαδή προς το ορυχείο) της διεπιφάνειας λιγνίτη/στείρου παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην ευστάθεια. Η μελέτη επίσης εξετάζει πρανή στα λιγνιτωρυχεία που παρέμειναν σταθερά πάρα τις μετακινήσεις τους με σχετικά σταθερές ταχύτητες που άγγιζαν έως και τα 100mm/day, ενώ άλλα πρανή αστοχούσαν όταν επιτάχυναν απότομα ακόμα και αν συνολικά εμφάνιζαν μικρότερες ταχύτητες. Σύμφωνα με τους συγγραφείς, οι περιπτώσεις αυτές δείχνουν πως το απόλυτο μέγεθος της ταχύτητας μετακίνησης πρανών δεν σχετίζεται πάντα με την πρόβλεψη της αστάθειας, ενώ η επιτάχυνση των

πρανών (χαράσσεται γραφικά ως η αντίστροφη ταχύτητα προς τον χρόνο) είναι καλύτερος δείκτης. Με άλλα λόγια, αμφισβήτησαν τα συμπεράσματα των Leonardos and Terezopoulos (2002) και Leonardos and Terezopoulos (2004a). Σε κάθε περίπτωση, οι Kanvadas et al. θεωρούν πως κάθε προσπάθεια συσχέτισμού των συντελεστών ασφαλείας των πρανών με την ταχύτητα ή την επιτάχυνση πρέπει να γίνεται με μεγάλη προσοχή. Ακόμη μεγαλύτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στις περιπτώσεις όπου γίνεται προσπάθεια εκτίμησης του χρόνου στον οποίο θα λάβει χώρα επικείμενη κατάρρευση πρανούς.

Εκτός από την παραπάνω μελέτη που απευθύνθηκε σε ορισμένα γεωτεχνικά ζητήματα των ελληνικών λιγνιτωρυχείων, πολλές ακόμα πρόσφατες μελέτες έχουν εστιάσει σε κάποια περιστατικά αστοχιών πρανών και άλλες γεωτεχνικές ανησυχίες. Τα περιστατικά αυτά, τα οποία συνοψίζονται στον Πίνακα 3, περιγράφονται στις ακόλουθες παραγράφους.

**Table 3 Περιστατικά αστάθειας που αναφέρθηκαν την περίοδο 2007-2017 (Zevgolts et al. 2019)**

Case	Type of mine	Year of event	Reference
Lava (Servia - Kozani)	Private mine	2007	Prountzopoulos et al. (2010)
Mavropigi (Ptolemais)	PPC excavation	2010	Kavvadas et al. (2013), Steiakakis et al. (2013), Kalogirou et al. (2014), Marinos et al. (2015), Zevgolts et al. (2015), Steiakakis et al. (2017)
Prosilio (Servia - Kozani)	Private mine	2010	Prountzopoulos et al. (2017)
Choremi (Megalopolis)	PPC excavation	2013	Present study
Amyntaio	PPC excavation	2016	Steiakakis et al. (2016)
Amyntaio	PPC excavation	2017	Pottakis (2019)

#### 2.4.1 Μαυροπηγή

Μία πολύ ενδιαφέρουσα μελέτη περίπτωσης αποτελεί εκείνη του ορυχείου Μαυροπηγής στην Πτολεμαΐδα. Το 2010, αξιοσημείωτες εφελκυστικές ρωγμές



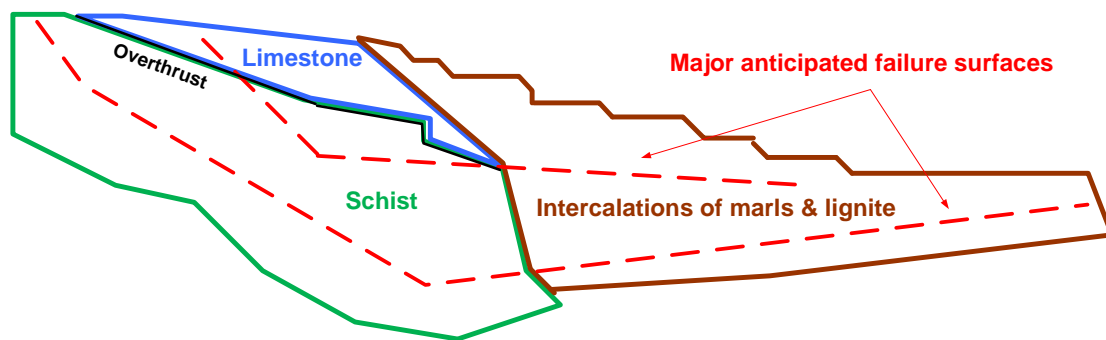
εμφανίστηκαν στην στέψη των νοτιοανατολικών πρανών της εκσκαφής (βορειοδυτικά από χωριό Μαυροπηγή). Το φαινόμενο προκάλεσε έντονες ανησυχίες όχι μόνο για την ευστάθεια της εκσκαφής, αλλά και για την επίδραση της εκμετάλλευσης στην γύρω περιοχή (Kalogirou et al. 2014, Marinou et al. 2015). Από τότε, σημαντικές ενέργειες για την παρακολούθηση της περιοχής έχουν λάβει χώρα και εφαρμόστηκαν μέτρα αντιμετώπισης με σκοπό την εξασφάλιση της ευστάθειας των πρανών του ορυχείου και των γύρω περιοχών. Οι αιτίες πίσω από την ασταθή σφήνα που εμφανίστηκε στην Μαυροπηγή το 2010 ήταν (Steiakakis et al. 2013): (i) η δυσμενής, απότομη και κυρτή γεωμετρία της εκσκαφής, (ii) η περίπλοκη τεκτονικά δομή (παρουσία ρηγμάτων με απότομες κλίσεις), και (iii) η παρουσία ενός υπο-οριζώντιου, δυσμενούς κλίσης, λεπτού αργιλικού στρώματος πολύ μικρής παραμένουσας διατμητικής αντοχής. Να σημειωθεί πως η αντισυμβατική και δυσμενής, απότομη γεωμετρία της εκσκαφής οφείλεται κυρίως σε ζητήματα σχετικά με κτηματικές ιδιοκτησίες και περιορισμούς απαλλοτριώσεων εκείνο το χρονικό διάστημα. Η Εικόνα 8 δείχνει την αντισυμβατική πρόοδο της εκσκαφής (από τα αριστερά προς τα δεξιά) λόγω των περιορισμών απαλλοτριώσεων, που τελικά οδήγησαν σε απότομη, κυρτή γεωμετρία (φαίνεται ξεκάθαρα στο δεξί σχήμα) και προκάλεσε δυσμενή γεωτεχνικά αποτελέσματα.



Εικόνα 8 Προχώρηση εκσκαφής δυσμενούς κλίσης στη Μαυροπηγή λόγω καθυστέρησης στη διαδικασία απαλλοτριώσεων (Zevgolis et al. 2019)

Δύο πολύ ενδιαφέρουσες μελέτες που σχετίζονται με τη περίπτωση της Μαυροπηγής παρουσιάστηκαν από τους Kanvadas et al. και τους Steiakakis et al. (Kanvadas et al. 2013, Steiakakis et al. 2013). Οι Kanvadas et al. (2013) ερεύνησαν την ευστάθεια του κινούμενου νοτιοανατολικού πρανούς του ορυχείου και παρουσίασαν πληροφορίες μίας εκτενούς επιχείρησης παρακολούθησης, με τοπογραφικά πρίσματα, κλισιόμετρα και πιεζόμετρα. Βάσει των δεδομένων αυτών, συμπέραναν πως αναπτύσσονταν οριζόντιες μετατοπίσεις πάνω σε ένα υπο-οριζόντιο λεπτό στρώμα υψηλής πλαστικότητας με μέση ταχύτητα 2cm/day (και άγγιζε τα 5cm/day σε

περιόδους έντονων βροχοπτώσεων). Η χρήση των δεδομένων της έρευνας για την αξιολόγηση του τύπου των μετακινήσεων, την γεωμετρία της επιφάνειας ολίσθησης και την αποτελεσματικότητα των μέτρων αντιμετώπισης, όπως επίσης και η διαδικασία εκτίμησης της ευστάθειας και της ασφαλούς λειτουργίας του πρηνούς κατά τη διάρκεια της παραγωγής, αναλύθηκαν λεπτομερώς. Να σημειωθεί πως το λεπτό αργιλικό στρώμα υψηλής πλαστικότητας που ορίζει τον μηχανισμό ολίσθησης, βρέθηκε (μέσω ανάδρομων αναλύσεων οριακής ισορροπίας) να είναι σε κατάσταση παραμένουσας αντοχής, με παραμένουσα γωνία τριβής περίπου  $7^\circ$  (και μηδενική παραμένουσα συνοχή). Ακόμη, βάσει πληροφοριών που συγκεντρώθηκαν από διεξοδική γεωτεχνική έρευνα (συμπεριλαμβανομένων γεωτρήσεων, κλισιόμετρων, τοπογραφικών μετρήσεων, γεωφυσικών και DInSAR), οι Steiakakis et al. (2017) παρουσίασαν ένα λεπτομερές γεωλογικό, γεωτεχνικό και κινηματικό προσομοίωμα της ολισθαίνουσας μάζας και το επιβεβαίωσαν με ανάδρομες αναλύσεις οριακής ισορροπίας (το οποίο έδειξε συντελεστή ασφαλείας ελάχιστα μικρότερο της μονάδας). Το προσομοίωμα αυτό φαίνεται στην Εικόνα 9.



Εικόνα 9 Αναμενόμενες ζώνες διάτμησης και μηχανισμοί αστοχίας στη Μαυροπηγή (τροποποιημένη εικόνα από Kavnadas et al. 2013 και Steiakakis et al. 2017)

Βάσει αυτού του προσομοιώματος, οι Zevgolis et al. (2015) διεξήγαγαν ορισμένες προκαταρκτικές αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιώντας την τεχνική μείωσης της διατμητικής αντοχής (Zevgolis et al. 2015). Συνολικά, οι μελέτες των Kavnadas et al. (2013) και των Steiakakis et al. (2017) έδειξαν πως, αν εκτελεστεί σωστά, η εξόρυξη μπορεί πράγματι να λάβει χώρα ακόμη και εντός μίας κατολίσθησης. Πραγματικά, έχει φανεί πως υπάρχουν περιπτώσεις όπου τα πρηνή των ορυχείων μπορούν να μετακινηθούν μερικά μέτρα και να εξακολουθούν να είναι λειτουργικά χωρίς την εμφάνιση καταστροφικών αστοχιών. Μία εντυπωσιακή άποψη των σημαντικών εφελκυστικών ρωγμών και εδαφικής υποχώρησης νοτιοανατολικά της εκσκαφής τρία χρόνια μετά την έναρξη του φαινομένου απεικονίζεται στην Εικόνα 10.

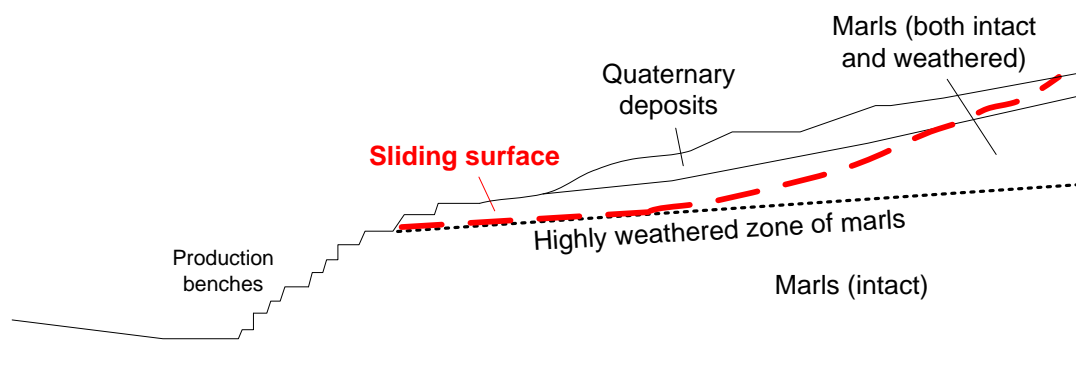


Εικόνα 10 Εδαφική υποχώρηση (~2m) από τη νοτιοανατολική στέψη του πρανούς της εκσκαφής στη Μαυροπηγή (2013) (Zevgolis et al. 2019)

Τα συμπεράσματα αυτά συμφωνούν με την συνήθη περίπτωση που ισχύει στη μεταλλευτική, όπου η έννοια «αστοχία της ευστάθειας πρανούς» ορίζεται διαφορετικά από τα έργα πολιτικού μηχανικού. Από μεταλλευτικής άποψης, τα περισσότερα υπαίθρια λιγνιτωρυχεία εμφανίζουν ικανοποιητική λειτουργική ελαστικότητα ώστε να αντιστέκονται σε σημαντικές μετατοπίσεις των πρανών, όσο εφαρμόζεται συστηματική παρακολούθηση και προσομοίωση, ώστε : (i) να ερμηνεύονται σωστά οι μηχανισμοί ολίσθησης, (ii) να μπορούν να γίνουν προβλέψεις σχετικά με το μέγεθός τους και την κινητική τους συμπεριφορά και (iii) να εγγυάται η ασφάλεια λειτουργίας. Ως αποτέλεσμα, ο σχεδιασμός και η κατασκευή των πρανών της εκσκαφής με οικονομικά βέλτιστες κλίσεις, ακόμη και συνοδεύονται συχνά από διακριτές μετακινήσεις, είναι μεγάλης σημασίας. Πράγματι, οι εξορυκτική επιχείρηση μπορούν να λάβουν χώρα ακόμη και σε κινούμενα πρανή, όσο εγγυάται η ασφάλεια του προσωπικού και του εξοπλισμού (Kanvadas et al. 2013). Ο Zavdoni (2001) δήλωσε πως η εξόρυξη μπορεί να προχωρήσει με ασφάλεια και ελάχιστες διακοπές, δεδομένου ότι καταγράφεται συνεχώς η εξέλιξη των μετατοπίσεων σε σχέση με τον χρόνο, και ο αναπτυσσόμενος μηχανισμός ολίσθησης είναι γνωστός. Σημειώνει ακόμα πως η αστάθεια στην εξόρυξη μπορεί να είναι πλεονεκτική από οικονομικής άποψης, εάν τα υφιστάμενα κόστη (συμπεριλαμβανομένου του κόστους της εγγύησης ασφαλών συνθηκών εργασίας) ξεπερνούνται από τα οφέλη της εξόρυξης σε απότομες κλίσεις πρανούς.

### 2.4.2 Λάβα

Οι Prountzopoulos et al. παρουσίασαν μία πολύπλοκη και σχετικά μεγάλη κατολίσθηση που εμφανίστηκε το 2007 στο ορυχείο Λάβας (Prountzopoulos et al. 2010). Πρόκειται για ιδιωτικό ορυχείο, μικρό σε σχέση με τις μεγαλύτερες εκσκαφές της ΔΕΗ, το οποίο εντοπίζεται μερικά χιλιόμετρα νοτιοδυτικά της πόλης των Σερβίων, στην Περιφερειακή ενότητα Κοζάνης (Περιφέρεια Δυτικής Μακεδονίας). Στη περίπτωση αυτή, η ολίσθηση δεν σχετιζόταν με τις βαθμίδες παραγωγής (παρά την απότομη συνολική κλίση της εκσκαφής), αλλά έλαβε χώρα στο ανώτερο μέρος του πρηνούς παραγωγής. Το μέρος αυτό αποτελούσαν κυρίως από αργιλώδεις μάργες, στις οποίες οι συγγραφείς κάνουν τον διαχωρισμό ανάμεσα σε συμπαγές ( $\phi'=40^\circ$ ,  $c'=200\text{kPa}$ ,  $PI=2-24$ ) και αποσαθρωμένο ( $\phi'=23^\circ$ ,  $c'=75\text{kPa}$ ,  $PI=13-25$ ) υλικό. Συμπέραναν πως η ολίσθηση οφειλόταν κυρίως σε παραμέτρους πολύ χαμηλής παραμένουσας διατμητικής αντοχής κατά μήκος μίας παρα-οριζόντιας ευαίσθητης επιφάνειας αποσαθρωμένης μάργας την οποία ακολουθούσε μία ανοδική καμπύλη επιφάνεια που περνούσε μέσα από τις μάργες και τις τεταρτογενής αποθέσεις. Αυτό φαίνεται στην Εικόνα 11.



Εικόνα 11 Τομή και ενδεικτική επιφάνεια ολίσθησης στις κατολισθήσεις του ορυχείου Λάβας το 2007 (βάσει των Prountzopoulos et al. (2010)) (Zevgolis et al. 2019)

Βάσει παραμετρικών ανάδρομων αναλύσεων και εν απουσία πιεζομετρικών δεδομένων, θεώρησαν πως η παραμένουσα γωνία τριβής της κρίσιμης επιφάνειας πρέπει να είναι περίπου  $9-11^\circ$  (στην απουσία υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα) ή  $15-17^\circ$  (στην περίπτωση που ο υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια του εδάφους). Νέα προβλήματα έχουν προκύψει στο ορυχείο με σημαντικές ολισθήσεις των τεταρτογενών αποθέσεων πάνω στους μαργαϊκούς σχηματισμούς (GMMSA, LARCO, (επικοινωνία με Zevgolis et al. 2019)). Οι κατολισθήσεις αυτές φαίνονται καθαρά στην Εικόνα 12.



Εικόνα 12 Εναέρια άποψη του λιγνιτωρυχείου Λάβας και των σχετικών κατολισθήσεων το 2018 (φωτογραφία από GMMSA LARCO) (Zevgolis et al. 2019)

### 2.4.3 Προσήλιο

Μία ακόμα αξιοσημείωτη κατολίσθηση έλαβε πρόσφατα χώρα στο ορυχείο του Προσήλιου (Prountzopoulos et al. 2017). Πρόκειται ξανά για μικρό ιδιωτικό ορυχείο που βρίσκεται μερικά χιλιόμετρα νοτιότερα της πόλης των Σερβίων (Περιφερειακή ενότητα Κοζάνης, Περιφέρεια Δυτικής Μακεδονίας), δηλαδή πολύ κοντά στο ορυχείο Λάβας. Τα προβλήματα πρωτοαναφέρθηκαν το 2008, όταν παρατηρήθηκαν ρωγμές στην επιφάνεια του εδάφους βορειοδυτικά του ορυχείου. Βάσει τοπογραφικής παρακολούθησης, η οποία έδειξε αργή αλλά σταθερή κινηματική δραστηριότητα, η ιδιοκτήτρια εταιρεία του ορυχείου αποφάσισε να κατασκευάσει πλευρικό αντίβαρο από στείρο υλικό, με σκοπό την παύση των μετατοπίσεων. Ωστόσο, το αντίβαρο δεν ολοκληρώθηκε. Στο τέλος του 2010, παρατηρήθηκε μία αύξηση του μεγέθους και της ταχύτητας των μετατοπίσεων, και εντέλει μία μεγάλης κλίμακας κατολίσθηση έλαβε χώρα τον Φεβρουάριο του 2011. Γενικά, η κατολίσθηση διαπέρασε λιμναία μαργαϊκά ιζήματα. Βάσει των μελετών τους, οι παράγοντες που πυροδότησαν το φαινόμενο ήταν η μη ολοκλήρωση του αντίβαρου, το μεγάλο ύψος του πρानούς (πάνω από 60m), η παρουσία μίας συγκεκριμένης ευαίσθητης επιφάνειας μεταξύ συμπαγών και αποσαθρωμένων μαργών (οι οποίες είχαν προκαλέσει προβλήματα μικρότερης κλίμακας στο παρελθόν), η αργιλική και ευαίσθητη φύση της μάργας (και η ευαισθησία της σε περιβαλλοντικούς παράγοντες), και τέλος η διπλή δράση του νερού το οποίο όχι μόνο υποβάθμισε την ποιότητα των ανώτερων μαργαϊκών

στρωμάτων, αλλά συντέλεσε επίσης στην σταδιακή αύξηση της πίεσης των πόρων ανάμεσα στις στρώσεις. Όσον αφορά το ορυχείο του Προσήλιου, σημειώνεται πως τελικά μέρος της υπαίθριας εκσκαφής μετατράπηκε σε υπόγεια χρησιμοποιώντας την μέθοδο εκμετάλλευσης των θαλάμων και στύλων. Στην πραγματικότητα, αυτή είναι η πρώτη φορά που επιδιώκεται η υπόγεια λιγνιτική εκμετάλλευση στην Ελλάδα, από την δεκαετία του 1980 (μετά το κλείσιμο του ορυχείου στο Αλιβέρι Εύβοιας, κεντρική Ελλάδα). Δεδομένου ότι η παρούσα εργασία εστιάζει στις υπαίθριες εκσκαφές, περεταίρω ανάπτυξη του θέματος αυτού απομακρύνεται από το αντικείμενο της μελέτης.

#### 2.4.4 Χωρέμι

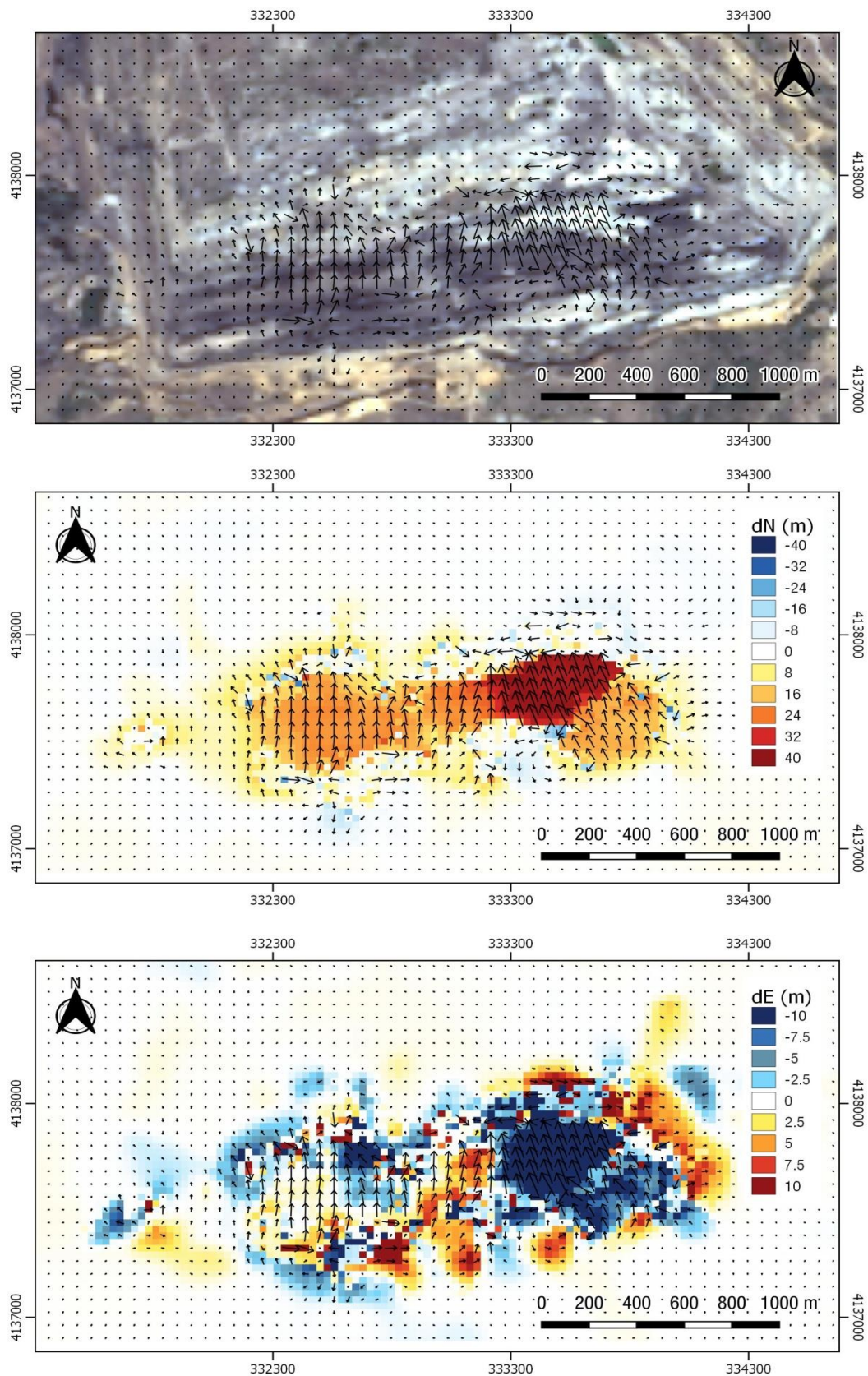
Το ορυχείο Χωρεμίου διευθύνεται από τη ΔΕΗ και πρόκειται για μεγάλο λιγνιτωρυχείο στη νοτιότερη Ελλάδα (περιοχή Μεγαλόπολης), με ετήσια παραγωγή (2013) περίπου 8 εκατομμυρίων τόνων λιγνίτη. Το 2011, εμφανίστηκαν επιφανειακές ρωγμές σε απόσταση 150m νοτιοδυτικά της στέψης (και παράλληλες σε αυτή) στο νοτιοδυτικό τμήμα του ορυχείου, προς το χωριό Τριπόταμος. Μία συστηματική εξέταση του φαινομένου έλαβε χώρα, που περιλάμβανε μελέτες ευστάθειας και παρακολούθηση, όμως δεν εμφανίστηκαν περεταίρω φαινόμενα αστάθειας από τότε. Ωστόσο, στις 12 και 13 Σεπτεμβρίου, 2013, εντοπίστηκαν επιφανειακές ρωγμές, αυτή τη φορά στο ανατολικότερο μέρος του νότιου τμήματος του ορυχείου. Τελικά, στις 14 Σεπτεμβρίου, 2013 μεγάλη κατολίσθηση έλαβε χώρα σε δύο φάσεις. Πρώτα, το πρανές στο νοτιοανατολικό μέρος της εκσκαφής μετατοπίστηκε περίπου 36m οριζοντίως και την ίδια στιγμή έλαβε χώρα υποχώρηση του εδάφους περίπου 20m στην περιοχή της στέψης της εκσκαφής. Αυτή ήταν η κύρια κατολίσθηση και συνέβη σε διάστημα περίπου μίας ώρας. Πριν την κατολίσθηση, η μέση κλίση της εκσκαφής στην περιοχή εκείνη ήταν περίπου 1V:5.5H, δηλαδή ομαλή κλίση περίπου 10.5°. Στη δεύτερη φάση, την ίδια ημέρα, μία δευτερεύουσα κατολίσθηση έλαβε χώρα στο νοτιοδυτικό τμήμα της εκσκαφής (προς το χωριό Τριπόταμος, δηλαδή κοντά στις ρωγμές του 2011). Στο τμήμα αυτό, η οριζόντια μετατόπιση ήταν μικρότερη, περίπου 17m, και στον οικισμό στη στέψη της εκσκαφής ήταν περίπου 10-15m (στον οποίο η μέση κλίση ήταν περίπου 9.5°, δηλαδή 1V:6H). Μία επεξηγηματική φωτογραφία που δείχνει την οριζόντια μετατόπιση της βαθμίδας (ως μπλοκ) φαίνεται στην Εικόνα 13.

Βάσει ανάδρομων αναλύσεων, η επιφάνεια αστοχίας ορίζεται κυρίως από ένα λεπτό (πάχος μικρότερο του 1m) οριζόντιο αργιλικό στρώμα που υπόκειται του πυθμένα του λιγνιτικού κοιτάσματος, του οποίου η παραμένουσα γωνία τριβής εκτιμήθηκε να είναι περίπου 6-7° και η παραμένουσα συνοχή κοντά στο μηδέν (ΔΕΗ, προσωπική επικοινωνία, 2015). Πέραν από τις παραπάνω πληροφορίες, στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης η κατολίσθηση και οι αντίστοιχες επιφανειακές εδαφικές παραμορφώσεις χαρτογραφήθηκαν με τη χρήση τεχνικών τηλε-ανίχνευσης, βάσει

δορυφορικών εικόνων του Landsat 8 που επεξεργάστηκαν στο λογισμικό Cosi-Corr. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης φαίνονται στην Εικόνα 14. Στο ανώτερο τμήμα του σχήματος τα διανύσματα της μετατόπισης είναι χαραγμένα πάνω στην δορυφορική εικόνα του ορυχείου. Τα διανύσματα δείχνουν την κατεύθυνση και το μέγεθος των μετατοπίσεων. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης είναι ακόμα πιο ξεκάθαρα στο δεύτερο και το τρίτο μέρος του σχήματος, που αντιστοιχούν στις οριζόντιες μετατοπίσεις κατά μήκος των κατευθύνσεων Βορρά-Νότου και Ανατολής-Δύσης, αντίστοιχα. Οι δύο διαφορετικές κατολισθήσεις (με διαφορά μερικών ωρών), στα νοτιοανατολικά και νοτιοδυτικά της εκσκαφής, διακρίνονται εμφανώς στο σχήμα: οι μέγιστες μετατοπίσεις κατά μήκος της κατεύθυνσης νότου προς βορρά είναι περίπου 40m στο νοτιοανατολικό τμήμα της εκσκαφής (πρώτο συμβάν), και περίπου 15m στο νοτιοδυτικό τμήμα της εκσκαφής (δεύτερο συμβάν). Οι θετικές τιμές αναφέρονται σε μετατοπίσεις από τον νότο προς τον βορρά. Οι μέγιστες μετατοπίσεις που καταγράφηκαν κατά μήκος της κατεύθυνσης ανατολής προς δύση είναι περίπου 10m στο νοτιοανατολικό τμήμα (πρώτο συμβάν) και πολύ μικρές στο νοτιοδυτικό τμήμα της εκσκαφής (δεύτερο συμβάν).



Εικόνα 13 Οριζόντιες μετατοπίσεις μίας βαθμίδας στο ορυχείο Χωρεμίου (νοτιοδυτικά της εκσκαφής) μετά την κατολίσθηση του 2013 (Roumpos et al. 2014)



Εικόνα 14 Χαρτογράφηση της κατολίθησης του 2013 στο ορυχείο Χωρεμίου με μεθόδους τηλεπισκόπησης (εικόνα από S. Valkaniotis) (Zevgolis et al. 2019)



#### 2.4.5 Αμύνταιο – 2016

Το ορυχείο Αμυνταίου στη Δυτική Μακεδονία διευθύνεται από την ΔΕΗ από τη μέση της δεκαετίας του 1980 και θεωρείται πολύ σημαντικό ορυχείο για την ενεργειακή παραγωγή στην Ελλάδα. Πρόκειται για τυπικό παράδειγμα βαθιάς επιφανειακής εκσκαφής με βάθη μέχρι και 180m. Λόγω δυσμενών γεωλογικών, γεωτεχνικών και υδρογεωλογικών συνθηκών έχει εμφανιστεί σημαντικός αριθμός κατολισθήσεων στο παρελθόν. Πρόσφατα, παρουσιάστηκε μία περίπτωση όπου ο συνδυασμός λεπτών στρωμάτων αργίλου (με αναδρόμως υπολογισμένες παραμένουσες γωνίες τριβής μεταξύ 9° και 10°), επικαλυπτόμενων στρωμάτων άμμου με δυσμενή κλίση και περίπλοκων τεκτονικών σχηματισμών πυροδότησαν μία αργοκίνητη κατολίσθηση (κάλυπτε περιοχή περίπου 1.2km x 0.5km) εντός του ορυχείου (Steiakakis et al. 2016). Επιπροσθέτως, μελετήθηκαν φαινόμενα εδαφικών υποχωρήσεων στην περίμετρο του ορυχείου Αμυνταίου, βάσει αξιολόγησης γεωλογικών και γεωτεχνικών δεδομένων με εστίαση σε φαινόμενα υπεραντλήσεων (Tzampoglou and Loupasakis 2017, Tzampoglou and Loupasakis 2018). Παρ' όλα αυτά, ο τύπος των φαινομένων αυτών είναι εκτός του αντικειμένου της παρούσας μελέτης.

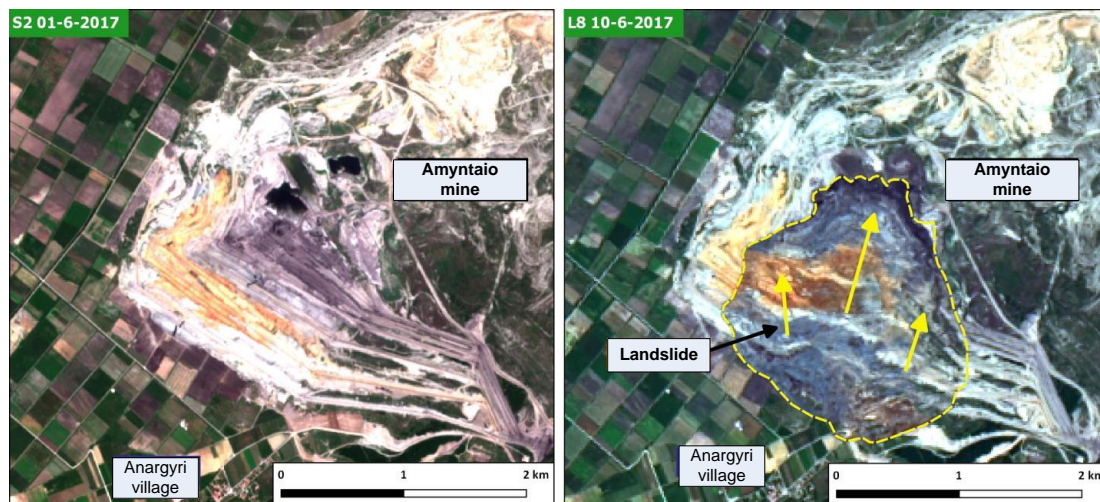
#### 2.4.6 Αμύνταιο – 2017

Η κατολίσθηση που έλαβε χώρα στις 12 Ιουνίου, 2017 ήταν συμβάν χωρίς προηγούμενο στην ιστορία των ελληνικών λιγνιτωρυχείων και είναι ίσως μία από τις μεγαλύτερες κατολισθήσεις λιγνιτωρυχείων παγκοσμίως (Εικόνα 15).



Εικόνα 15 Εναέρια άποψη της μεγάλης κατολίσθησης στο Αμύνταιο το 2017 (φωτογραφία από Eurokinissi) (Zevgolis et al. 2019)

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 16, η ολισθαίνουσα μάζα κινήθηκε από τα νότια (πολύ κοντά στον οικισμό των Αναργύρων) προς τα βόρεια και κάλυψε πολύ μεγάλη περιοχή, η οποία βάσει δορυφορικών εικόνων εκτιμήθηκε να είναι μεταξύ 2.98 και 3.56 km<sup>2</sup> (Valkaniotis et al. 2017).



Εικόνα 16 Χαρτογράφηση της κατολίσθησης στο Αμύνταιο (Ιούνιος 2017) χρησιμοποιώντας τεχνικές τηλεπισκόπησης (Valkaniotis et al. 2017)

Δεδομένων των καταστροφικών συνεπειών της κατολίσθησης, δύο ανεξάρτητες μεταξύ του επιτροπές συστάθηκαν (μία εκ μέρους της ΔΕΗ και μία άλλη εκ μέρους του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας) και τους ζητήθηκε να ερευνηθεί το φαινόμενο. Οι αναφορές των δύο αυτών επιτροπών δεν έχουν γίνει ακόμη διαθέσιμες στο κοινό. Παρ' όλα αυτά, μία αναφορά που δημοσιεύτηκε πρόσφατα από την Ανεξάρτητη Αρχή του Συνηγόρου του Πολίτη συνοψίζει τα κύρια συμπεράσματα των αναφορών των δύο επιτροπών. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με την επιτροπή που συστάθηκε από την ΔΕΗ, οι κύριες αιτίες από τις οποίες προκλήθηκε η κατολίσθηση είναι οι ακόλουθες (Pottakis 2019):

- Ο συνδυασμός της κυκλικής εναλλαγής των εργασιών στο δυτικότερο μέρος του νοτιοδυτικού πρानούς και η κλίση των στρωμάτων βάσης των λιγνιτικών αποθέσεων προς τα βορειοδυτικά, μαζί με μία αύξηση του βάθους εκμετάλλευσης λόγω των βαθιών εκσκαφών στο δυτικό άκρο του πόδα του νοτιοδυτικού πρानούς (όπου βρίσκεται το βαθύτερο μέρος του λιγνιτικού κοιτάσματος).
- Η ενεργοποίηση δύο γειτονικών ρηγμάτων, ονομαστικά το ρήγμα της Βεγορίτιδας και ειδικά το ρήγμα των Αναργύρων, που έλαβε χώρα λόγω της μείωσης των κανονικών τάσεων στις επιφάνειες των ρηγμάτων και λόγω μηχανισμών αργής διατμητικής ολίσθησης. Η αιτία της ενεργοποίησής τους ήταν η αποφόρτιση λόγω

της σταδιακής επέκτασης του ορυχείου και της απομάκρυνσης σημαντικής εδαφικής μάζας.

- Η γόμωση με υπόγειο νερό της σημαντικής εδαφικής ρωγμής που εμφανίστηκε στις 15 Μαΐου, 2017 (δηλαδή τέσσερις εβδομάδες πριν το συμβάν) στη στέψη του δυτικού τμήματος των νοτιοδυτικών πρανών. Η ρωγμή αυτή επεκτάθηκε με γρήγορο ρυθμό μέχρι το τέλος του Μαΐου κατά μήκος ολόκληρης της στέψης του πρανούς. Μετά το συμβάν της 12<sup>ης</sup> Ιουνίου, η κύρια επιφάνεια της κατολίσθησης εμφανίστηκε στο σημείο που βρισκόταν η ρωγμή πριν από το συμβάν.

Να σημειωθεί πως, όπως αναφέρεται από τον Pottakis (2019), σύμφωνα με τη μελέτη της ΔΕΗ η κατολίσθηση δεν συνέβη εξαιτίας των συνηθισμένων λόγων που προκαλούν προβλήματα ευστάθειας στα λιγνιτωρυχεία της ΔΕΗ. Για παράδειγμα, η κλίση του πρανούς δεν θα μπορούσε να είναι η αιτία της κατολίσθησης, δεδομένου ότι η μέση κλίση του νοτιοδυτικού πρανούς ήταν πολύ ομαλότερη από τις συνήθεις συστάσεις για τα ορυχεία της ΔΕΗ (1V:5H). Επιπλέον, η επιτροπή συμπέρανε πως η κατολίσθηση δεν προκλήθηκε ούτε από τη σημαντική αύξηση των πιέσεων του νερού στο εσωτερικό της μάζας του πρανούς, ούτε από την απουσία υποστήριξης στον πόδα του πρανούς με εσωτερική απόθεση στείρου υλικού και τέφρας. Αυτό γιατί, αν και η προσέγγιση την εσωτερικής απόθεσης στον πόδα του νοτιοδυτικού πρανούς δεν είναι πρακτικά εφαρμόσιμη, λειτουργεί εδώ και τουλάχιστον πέντε χρόνια χωρίς προβλήματα ευστάθειας. Συνολικά, στη μελέτη της ΔΕΗ δηλώνεται πως ενώ -γενικά μιλώντας- οι παραπάνω παράγοντες (απότομη κλίση, αύξηση των πιέσεων του νερού, και η έλλειψη εσωτερικής απόθεσης) είναι πάντα μη ευνοϊκοί στην ευστάθεια των πρανών των ορυχείων της εταιρείας, στην περίπτωση του Αμυνταίου οι παράγοντες αυτοί παρέμειναν ουσιαστικά अपαράλλαχτοι για τουλάχιστον πέντε χρόνια πριν από το συμβάν, οπότε δεν θεωρήθηκαν ως η αιτία της κατολίσθησης. Από την άλλη πλευρά, σύμφωνα με την μελέτη του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας, η κατολίσθηση έλαβε χώρα εξαιτίας μίας σειράς λόγων που συνέτρεξαν δυσμενώς και ταυτοχρόνως. Ήταν το αποτέλεσμα μη ευνοϊκών και σύνθετων γεωλογικών, τεκτονικών, υδρογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών σε συνδυασμό, ωστόσο, με την εξορυκτική δραστηριότητα. Συγκεκριμένα, η επιτροπή ταξινομήσε τους παράγοντες που πυροδότησαν το καταστροφικό συμβάν σε δύο κύριες κατηγορίες (Pottakis 2019): ενδογενείς και ανθρωπογενείς παράγοντες. Κρίσιμοι ενδογενείς παράγοντες θεωρήθηκαν οι παρουσία επιφανειών χαμηλής διατμητικής αντοχής, η παρουσία υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα κάτω από τον πυθμένα του ορυχείου, και η παρουσία των ρηγμάτων Αναργύρων και Βεγορίτιδας. Συγκεκριμένα για τα ρήγματα, σύμφωνα με την επιτροπή, επηρέασαν την γεωμετρία της ολισθαίνουσας μάζας, όμως δεν ήταν ο παράγοντας που πυροδότησε την κατολίσθηση (δεδομένου ότι σύμφωνα με την επιτροπή η ενεργοποίηση των ρηγμάτων δεν είχε καταγραφεί). Εκτός από τα παραπάνω, η επιτροπή ανέφερε δύο ανθρωπογενείς παράγοντες που έπαιξαν ρόλο στην κατολίσθηση. Αυτοί ήταν οι τοπικά αυξημένες κλίσεις των πρανών του ορυχείου (αντιφατικό συμπέρασμα με

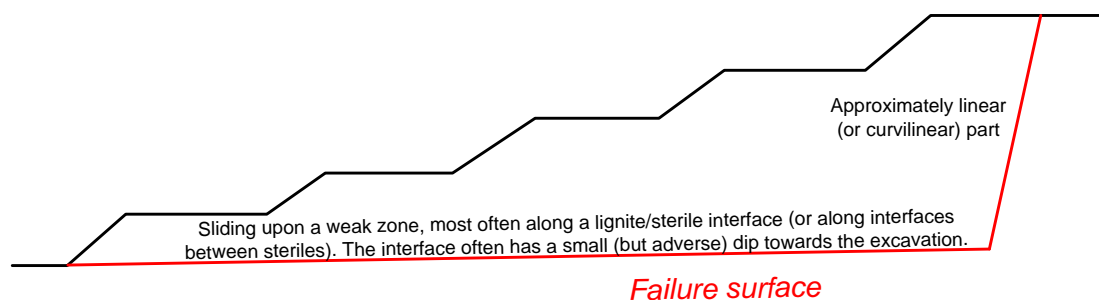
αυτό της πρώτης επιτροπής), και οι πιέσεις του νερού που αναπτύσσονταν για μήνες, και εσωτερικά των τεκτονικών επιφανειών και στις εδαφικές ρωγμές, λόγω της διείσδυσης του υπόγειου νερού και/ή του νερού των βροχών. Η επιτροπή του υπουργείου δήλωσε επίσης πως οι συνθήκες ευστάθειας των πρηνών στα προάστια του οικισμού των Αναργύρων ήταν χειρότερες από ότι στα υπόλοιπα πρηνή του ορυχείου, εξαιτίας της υψηλής στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα λόγω της διακοπής των αντλήσεων της ΔΕΗ από το 2014.

## 2.5 Συνήθειες μηχανισμοί αστοχίας

Γενικά, οι παράγοντες που τυπικά επηρεάζουν τους μηχανισμούς αστάθειας στα επιφανειακά λιγνιτωρυχεία συνοψίζονται ως εξής (Στειακάκης and Αγιουτάντης 2007): (i) το αρχικό τασικό πεδίο και οι επακόλουθες αλλαγές (π.χ. μείωση των επί τούτου τάσεων) σε αυτό λόγω της εκσκαφής, (ii) τη γεωλογική δομή (π.χ. τεκτονική) της περιοχής, (iii) τις γεωτεχνικές ιδιότητες των εμπλεκόμενων σχηματισμών, (iv) τις συνθήκες υδροφορίας, (v) το μέγεθος της εκσκαφής και (vi) την ένταση των δονήσεων, αν υπάρχουν (είτε λόγω σεισμικότητας που προκαλείται φυσικά είτε λόγω της εξορυκτικής δραστηριότητας). Οπότε, είναι ξεκάθαρο πως οι μηχανισμοί αστάθειας στις βαθιές λιγνιτικές εκσκαφές εξαρτάται από πολλούς και διαφορετικούς παράγοντες, των οποίων ο συνδυασμός μπορεί να οδηγήσει σε πολύ σύνθετους και πολύπλοκους μηχανισμούς αστοχίας. Ως αποτέλεσμα, μερικές φορές οι αντίστοιχες επιφάνειες αστοχίας μπορεί να είναι δύσκολο να εξηγηθούν καλά.

Σε κάθε περίπτωση, ειδικά όσον αφορά τα ελληνικά επιφανειακά λιγνιτωρυχεία, θα μπορούσαμε να ειπωθεί πως οι επιφάνειες αστοχίας είναι συχνά συσχετισμένες με την ολίσθηση σε ευαίσθητες ζώνες, είτε κατά μήκος της διεπιφάνειας λιγνίτη-μάργας/αργίλου, ή κατά μήκος των λεπτών αργιλικών στρωμάτων υψηλής πλαστικότητας και χαμηλής διατμητικής αντοχής, ή κατά μήκος διεπιφανειών μαργαϊκών στρωμάτων με διαφορετικές διατμητικές αντοχές (και μέτρα παραμόρφωσης). Αυτή η επιφάνεια ολίσθησης τυπικά ακολουθεί τον προσανατολισμό της στρωματογραφίας των εδαφών, και έτσι, είναι πρακτικά γραμμική και οριζόντια ή υπο-οριζόντια. Θα πρέπει να δοθεί έμφαση στο γεγονός ότι η κλίση της διεπιφάνειας έχει σημαντική επιρροή στην ευστάθεια της εκσκαφής. Μικρές διαφορές της τάξης μερικών μοιρών (δυσμενούς κλίσης προς την εκσκαφή, η οποία δεν είναι σπάνια περίπτωση των ελληνικών ορυχείων) μπορεί να οδηγήσει σε αξιοσημείωτα διαφορετικούς συντελεστές ασφαλείας όσον αφορά την ευστάθεια του πρηνούς. Αυτό έχει παρουσιασθεί συντόμως από τον Leonardos (2004a) και έχει συζητηθεί εκτενώς από τους Kanvadas et al. (2020). Τελικά, η επιφάνεια αστοχίας φτάνει την επιφάνεια του εδάφους σε κάποια απόσταση πίσω από την στέψη του πρηνούς, με τη μορφή απότομης επιφάνειας (πλαγιάς) η οποία μπορεί να είναι

ανοδική καμπύλη ή σχεδόν ευθεία/επίπεδη. Μία ενδεικτική τομή φαίνεται στην Εικόνα 17.



Εικόνα 17 Τυπικός (απλοποιημένος) μηχανισμός αστοχίας που συναντάται στα ελληνικά λιγνιτωρυχεία (Zevgolis et al. 2019)

Στη βιβλιογραφία, τέτοιοι τύποι αστοχίας έχουν περιγραφεί με τον όρο μικτοί (compound) (Bromhead 1992) ή σύνθετοι (composite) (Chowdhury et al. 2009, Duncan et al. 2014) μηχανισμοί αστοχίας. Ο Leonardos, ο οποίος κυρίως ανέφερε ανοδικές καμπύλες επιφάνειες αστοχίας, χρησιμοποίησε τον πρώτο όρο (Leonardos and Terezopoulos 2003, Leonardos 2004a) για τα ελληνικά λιγνιτωρυχεία. Ο ίδιος όρος χρησιμοποιήθηκε επίσης από τους Steiakakis et al. (2016) για να περιγράψει την κατολίσθηση του 2016 στο Αμύνταιο. Από την άλλη πλευρά, οι Kanvadas et al. (2020) αποφεύγουν να αναφερθούν σε οποιονδήποτε από τους δύο όρους. Παρ' όλα αυτά, παρέχουν μία εξαιρετική και ξεκάθαρη εξήγηση (από άποψης τάσεων-παραμορφώσεων) των αιτιών που επιφάνειες ολίσθησης κατά μήκος κάποιων διεπιφανειών λιγνίτη/στείρου φτάνουν την επιφάνεια του εδάφους με ευθεία ανοδική επιφάνεια. Συνολικά, η (απλή αλλά ουσιαστική) γεωμετρία που πρότεινε ο Kanvadas έχει σχήμα τραπεζοειδούς διατομής, όπως αυτό στην Εικόνα 17. Τραπεζοειδείς τομές έχουν επίσης συζητηθεί και προταθεί στο παρελθόν για την ανάλυση της ευστάθειας των εκσκαφών λόγω επιφανειακής εξόρυξης (Huang 1983). Ανεξαρτήτως του όρου που τους προσάγεται, το πιο αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό των μηχανισμών αστοχίας που συναντάμε συχνά στα ελληνικά λιγνιτωρυχεία είναι ότι δεν είναι κυκλικές. Πράγματι, το κρίσιμο χαρακτηριστικό του μηχανισμού είναι αδιαμφισβήτητη η οριζόντια/παρα-οριζόντια επιφάνεια ολίσθησης που αναφέρεται παραπάνω. Συνολικά, η ανάπτυξη του μηχανισμού μπορεί να περιγραφεί ως ακολούθως:

Όταν τα πρανή σχηματίζονται από μία βαθιά εκσκαφή, τείνουν να μετατοπιστούν προς την εκσκαφή λόγω σημαντικής μείωσης των τάσεων συγκράτησης (επι τόπου οριζόντιες τάσεις), που προκαλείται από την αφαίρεση του εκσκαμένου εδάφους. Αυτή η διαδικασία αποφόρτισης φυσικά καταλήγει στην ανάπτυξη σημαντικών

οριζόντιων εφελκυστικών παραμορφώσεων στο πρανές ( $\epsilon_h \neq 0$ ). Ωστόσο, οι παραμορφώσεις που προκαλούνται είναι διαφορετικές στον λιγνίτη και το στείρο υλικό που βρίσκεται από πάνω ή από κάτω του (π.χ. μάργες και/ή άργιλοι), λόγω της διαφοράς του μέτρου παραμορφωσιμότητας της αποφόρτισης των υλικών (όπως δηλώνεται από τους Kanvadas et al. (2020), ο ψαθυρός λιγνίτης έχει μικρότερο μέτρο παραμορφωσιμότητας κατά την αποφόρτιση, απ'ότι οι εύπλαστες άργιλοι/μάργες). Τελικά, λόγω διαφορετικών οριζόντιων εφελκυστικών παραμορφώσεων, αξιοσημείωτη πλαστική διάτμηση λαμβάνει χώρα κατά μήκος των διεπιφανειών λιγνίτη/στεύρου. Αν οι διατμητικές τάσεις που προκύπτουν υπερβαίνουν την μέγιστη διατμητική αντοχή (πράγμα που συμβαίνει συχνά), τότε η μηχανική συμπεριφορά της διεπιφάνειας περιγράφεται από παραμέτρους μετά της μέγιστης ή παραμένουσας διατμητικής αντοχής. Συνεπώς, σε τέτοιες περιπτώσεις, οι παράμετροι παραμένουσας διατμητικής αντοχής πρέπει να χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της ευστάθειας των πρανών της εκσκαφής. Πράγματι, αυτή είναι συχνά η μέθοδος που χρησιμοποιείται στον σχεδιασμό των λιγνιτωρυχείων της ΔΕΗ.

Όσον αφορά την πίσω επιφάνεια ολίσθησης: Οι συνθήκες που περιγράφηκαν προηγουμένως οδηγούν επίσης στη δημιουργία κατακόρυφων ή υπο-κατακόρυφων εφελκυστικών ρωγμών στην εδαφική μάζα σε κάποια απόσταση πίσω από την πρόσοψη της εκσκαφής. Όσο η εκσκαφή γίνεται βαθύτερη, και οι τάσεις συγκράτησης του εδάφους μειώνονται περαιτέρω (λόγω της εκσκαφής), οι εφελκυστικές παραμορφώσεις αυξάνονται, οπότε οι (εφελκυστικές) ρωγμές αυξάνονται επίσης. Τελικά, αν οι συνθήκες οδηγήσουν σε καταστροφική αστοχία (κατολίσθηση), η πίσω επιφάνεια ολίσθησης είναι μάλλον μία επιφάνεια σε σχήμα αυξανόμενης καμπύλης. Πιο δυσμενείς συνθήκες υφίστανται όταν ένα τεκτονικό ρήγμα (με δυσμενή κλίση, δηλαδή προς την εκσκαφή) βρίσκεται πίσω από την στέψη ενός πρανούς. Σε αυτή τη περίπτωση, η κινητοποίησή του μπορεί να προκληθεί από τις αναπτυσσόμενες οριζόντιες παραμορφώσεις. Πιο συγκεκριμένα, η κινητοποίηση του ρήγματος προκαλείται από τη μείωση των τάσεων συγκράτησης (λόγω της εκσκαφής) που οδηγεί σε ελάττωση της κανονικής τάσης που δρα στο ρήγμα, και ως αποτέλεσμα στην ελάττωση της διατμητικής αντοχής κατά μήκος της επιφάνειας του ρήγματος. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η πίσω επιφάνεια ολίσθησης είναι συχνά (υπο-οριζόντια) επίπεδη, οπότε η συνολική επιφάνεια αστοχίας μοιάζει περισσότερο με τραπέζιο. Να σημειωθεί ότι σε περίπτωση έντονων βροχοπτώσεων, τα ρήγματα (ή οι εφελκυστικές ρωγμές) γεμίζουν με νερό, και έτσι οι πιέσεις του νερού που δρουν στην επιφάνεια του ρήγματος αυξάνονται, οδηγώντας σε ελάττωση των τάσεων που δρουν, και ως αποτέλεσμα στη μείωση της διατμητικής αντοχής. Η μείωση της διατμητικής αντοχής της επιφάνειας του ρήγματος προκαλεί την ολίσθηση πάνω της, όπου με τη σειρά της προκαλεί σχετικές μετακινήσεις στη διεπιφάνεια λιγνίτη/στεύρου.

Αξίζει να σημειωθεί πως οι μηχανισμοί που περιγράφηκαν προηγουμένως (γραμμικής ολίσθησης κατά μήκος των επιφανειών) έχουν αναγνωρισθεί και εξηγηθεί βάσει στη γνώση που αποκτήθηκε από το επάγγελμα τα τελευταία 25-30 χρόνια. Πράγματι, ήταν (i) η ανάπτυξη των τεχνικών ενοργάνωσης και παρακολούθησης στο πεδίο την δεκαετία του 1990, (ii) η ανάπτυξη και η κοινή χρήση προηγμένων υπολογιστικών προγραμμάτων ευστάθειας πρανών, και (iii) οι προσεκτικές παρατηρήσεις ορισμένων περιπτώσεων αστοχίας, που τελικά οδήγησε στα συμπεράσματα που περιγράφηκαν παραπάνω. Άλλωστε, σύμφωνα με τον Leonardos (2004a), όλες οι μελέτες σχεδιασμού για τα ελληνικά λιγνιτωρυχεία πριν το 1990 (και πολλές μέσα στη δεκαετία του 1990) ήταν βασισμένες στην υπόθεση ύπαρξης περιστροφικών επιφανειών αστοχίας (είτε κυκλικές είτε όχι). Για παράδειγμα, ο Karas (1988) δήλωσε πως η επικρατούσα πρακτική για τον σχεδιασμό πρανών (εκείνη την εποχή) ήταν η απλοποιημένη μέθοδος Bishop. Ωστόσο, όπως δηλώνεται από κάποιους συγγραφείς, πρόκειται για μία ακατάλληλη και ανακριβή μέθοδο για σύνθετες μη κυκλικές επιφάνειες ολίσθησης (Chowdhury et al. 2009, Duncan et al. 2014). Οπότε, ίσως, αυτός να είναι ο λόγος, σύμφωνα με τον Leonardos (2004a), για τον οποίο, πριν τη δεκαετία του 1990 εμφανιζόταν περιστατικά όπου, παρά το γεγονός ότι τα πρανά είχαν σχεδιαστεί βάσει κατάλληλων εργαστηριακών δοκιμών και ικανοποιητικών συντελεστών ασφαλείας, αστοχούσαν.

Οι αναμενόμενες επιφάνειες αστοχιών από παλαιότερα περιστατικά αστάθειας έχουν είδη φανεί στη Εικόνα 7. Πρέπει να σημειωθεί πως στο περιστατικό του ορυχείου του Τομέα 6 (επιφάνεια αστοχίας κατά μήκος λεπτού στρώματος αργίλου) και στα δύο περιστατικά του ορυχείου Χωρέμης (επιφάνεια αστοχίας στη διεπιφάνεια λιγνίτη και υποκείμενης αργίλου), η γραμμική επιφάνεια τέμνει την εκσκαφή στον πόδα του πρανούς. Από την άλλη πλευρά, στην περίπτωση του ορυχείου Νοτίου Πεδίου (επιφάνεια αστοχίας κατά μήκος λεπτής στρώσης μαργών ανάμεσα σε λιγνιτικά στρώματα), η γραμμική επιφάνεια τέμνει την εκσκαφή σε μία απόσταση 35m πάνω από τον πόδα της εκσκαφής, ενώ στη περίπτωση του ορυχείου Μαραθούσας σε μία απόσταση 35m χαμηλότερα από τον πόδα της εκσκαφής (βαθιά αστοχία). Ανάμεσα στις πρόσφατες περιπτώσεις, ένα τυπικό παράδειγμα είναι η σύνθετη περίπτωση της Μαυροπηγής, όπου ο προσδιορισμός της κινηματικής του προσομοιώματος αποτέλεσε δύσκολο έργο λόγω των περίπλοκων και ειδικών συνθηκών που επικρατούν στη συγκεκριμένη τοποθεσία. Παρ' όλα αυτά, βάσει εκτενούς παρακολούθησης και ανάδρομων αναλύσεων οριακής ισορροπίας, η επιφάνεια αστοχίας θεωρήθηκε ως ένας συνδυασμός μίας γειτονικής οριζόντιας επιφάνειας κατά μήκος ενός λεπτού στρώματος (περίπου 7° παραμένουσας γωνίας τριβής και μηδενικής παραμένουσας συνοχής) με μία παρα-κατακόρυφη επιφάνεια στο πίσω μέρος (Εικόνα 9). Στην περίπτωση του ορυχείου Λάβας, η κύρια επιφάνεια ολίσθησης επίσης αποτελείται από μία παρα-οριζόντια επιφάνεια (αν και βρίσκεται αρκετά ψηλότερα από τις στρώσεις λιγνίτη και τα πρανά παραγωγής) η οποία

ακολουθείται από μία καμπύλη επιφάνεια που διαπερνά τις μάργες και τα τεταρτογενή (Εικόνα 11). Επίσης, στην περίπτωση του ορυχείου του Προσήλιου, το γραμμικό μέρος της επιφάνειας αστοχίας βρισκόταν περίπου 20m πάνω από το ψηλότερο σημείο του εκμεταλλεύσιμου λιγνιτικού στρώματος και ήταν παράλληλη σε αυτό, κατά μήκος της επιφάνειας επαφής μεταξύ ενός στρώματος αποσαθρωμένης μάργας και ενός στρώματος άθικτης μάργας (Prountzopoulos et al. 2017). Πρέπει να σημειωθεί πως στην περίπτωση του Προσήλιου, το δεύτερο μέρος της επιφάνειας αστοχίας (που φτάνει την φυσική επιφάνεια του εδάφους) φαίνεται να ποικίλλει μεταξύ διαφορετικών τμημάτων της κατολίσθησης κατά πλάτος (δηλαδή βρέθηκαν και παρα-κατακόρυφες και πιο ομαλές επιφάνειες). Στη περίπτωση του 2016 στο Αμύνταιο, η ολισθαίνουσα μάζα παρουσίασε μία βαθιά επιφάνεια αστοχίας με ένα κύριο γραμμικό τμήμα να περνά μέσα από στρώμα αργίλου χαμηλής αντοχής και ένα καμπύλο τμήμα στον πόδα και στη στέψη (Steiakakis et al. 2016). Οπότε βάση όλων των παραπάνω παλαιών και πιο πρόσφατων περιπτώσεων, συμπεραίνεται πως η οριζόντια/παρα-οριζόντια επιφάνεια αστοχίας μπορεί να τμήσει το πρηνές είτε στον πόδα, ή σε κάποια απόσταση ψηλότερα ή ακόμη και χαμηλότερα από αυτόν. Παρ' όλα αυτά, για διεπιφάνειες όμοιων χαρακτηριστικών, οι Kanvadas et al. (2020) θεωρούν πως η διεπιφάνεια που βρίσκεται πιο κοντά στον πόδα του πρηνούς είναι πιο κρίσιμη από μία διεπιφάνεια που βρίσκεται σε ψηλότερο ή πολύ χαμηλότερο σημείο. Στην πρώτη περίπτωση (διεπιφάνειες σε μεγαλύτερο ύψος ενάντι διεπιφανειών στον πόδα του πρηνούς), αυτό συμβαίνει διότι η μάζα του ολισθαίνοντος σώματος (και κατ' επέκταση οι δυνάμεις που δρουν) αυξάνονται με το βάθος. Στη δεύτερη περίπτωση (διεπιφάνειες σε πολύ χαμηλότερα ύψη ενάντι διεπιφανειών στον πόδα του πρηνούς), συμβαίνει κυρίως λόγω κινηματικής και λόγω απουσίας κάποιας παθητικής εδαφικής πίεσης στον πόδα του πρηνούς.

## 2.6 Συμπεράσματα

Μία λεπτομερής σύνοψη της βιβλιογραφίας, καλύπτοντας μία περίοδο περίπου 40 ετών, σε περιστατικά αστοχίας πρηνών και άλλα ζητήματα ευστάθειας στα ελληνικά επιφανειακά λιγνιτωρυχεία παρουσιάστηκε και συζητήθηκε παραπάνω. Τα κύρια συμπεράσματα της συνοψίζονται ως εξής (Zevgolias et al. 2019):

- Όπως φαίνεται από τους σταθερά αυξανόμενους λόγους εκμετάλλευσης ανά τα χρόνια, οι εκσκαφές στα ελληνικά λιγνιτωρυχεία, αναπόφευκτα, έχουν γίνει μεγαλύτερες και βαθύτερες (σε ορισμένες περιπτώσεις φτάνουν τα 150-200m σε βάθος). Ως αποτέλεσμα, η διαχείρισή τους από γεωτεχνική σκοπιά έχει γίνει δυσκολότερη και πιο απαιτητική. Οπότε, η σωστή και ενδεδειγμένη εφαρμογή της γεωτεχνικής μηχανικής γίνεται όλο και πιο κρίσιμη για την αποτελεσματική και βιώσιμη διαχείριση των ελληνικών λιγνιτωρυχείων.



- Τα ορυχεία στην πλειοψηφία τους αποτελούν βαθιές εκσκαφές σε πυκνές ζώνες στείρου υλικού που υπέρκεινται των εκμεταλλεύσιμων λιγνιτικών αποθέσεων. Επιπροσθέτως, οι λιγνιτικές στρώσεις συχνά εναλλάσσονται με ενδιάμεσες στρώσεις στείρου υλικού. Γενικά, το στέιρο υλικό αποτελείται κυρίως από μάργες και αργίλους (συχνά από συμπαγείς έως σκληρές), και περιστασιακά από ευαίσθητα κροκαλοπαγή και υδροφόρες άμμους. Σε κάθε περίπτωση, τα ζητήματα ευστάθειας πρανών καλούν για εφαρμογή των αρχών της εδαφομηχανικής (αντί της βραχομηχανικής).
- Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό των μηχανισμών αστοχίας είναι το ότι δεν είναι κυκλικές. Πραγματικά, συχνά, τα είδη αστοχίας σχετίζονται με μία οριζόντια ή παρα-οριζόντια (πρακτικά γραμμική) επιφάνεια ολίσθησης, κατά μήκος μίας ευαίσθητης ζώνης στη διεπιφάνεια μεταξύ λιγνίτη και στείρου υλικού (ή ακόμα και μεταξύ στείρων υλικών με διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά). Αυτή η ολίσθηση συμβαίνει εξαιτίας της διαφορετικής απόκρισης του λιγνίτη και στείρου στις τάσεις-παραμορφώσεις που προκαλούνται από τις συνθήκες αποφόρτισης (μείωση τάσεων συγκράτησης) που λαμβάνουν χώρα κατά την εκσκαφή. Σε κάθε περίπτωση, εφόσον η ολίσθηση κατά μήκος της επιφάνειας αντιστοιχεί σε μεγάλες πλαστικές διατμητικές παραμορφώσεις, εφαρμόζονται οι παράμετροι παραμένουσας διατμητικής αντοχής κατά μήκος της επιφάνειας αυτής για την αξιολόγηση της ευστάθειας των πρανών της εκσκαφής. Πράγματι, αυτή αποτελεί την συνήθη πρακτική στα περισσότερα ελληνικά λιγνιτωρυχεία. Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί πως σε κάποιες περιπτώσεις, έχουν καταγραφεί παραμένουσες γωνίες τριβής έως και  $6^\circ$  ή  $7^\circ$  (με μηδενική παραμένουσα συνοχή).
- Οι μηχανισμοί αστοχίας είναι πολλές φορές αρκετά σύνθετοι και οι τοπικές τεκτονικές συνθήκες συχνά παίζουν καθοριστικό ρόλο στα περιστατικά αστοχίας. Για παράδειγμα, όταν ρήγματα με δυσμενή κλίση (προς την εκσκαφή) παρουσιάζονται πίσω από την εκσκαφή, μπορεί να επηρεάσουν έντονα την κινητική τους συμπεριφορά. Γι' αυτό, θα πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν με προσοχή (εφόσον η παρουσία τους είναι γνωστή) κατά τον σχεδιασμό και την εκμετάλλευση.
- Εκτός από τις παραπάνω παραμέτρους, η κλίση της διεπιφάνειας λιγνίτη/στείρου έχει σημαντική επιρροή στην ευστάθεια της εκσκαφής. Ακόμη και μια δυσμενή κλίση λίγων μοιρών (προς την εκσκαφή), μπορεί να επηρεάσει δραστικά τις συνθήκες ευστάθειας. Ακόμη, η διείδυση νερού σε ρωγμές και ανοιχτά ρήγματα παίζει επίσης σημαντικό ρόλο στην ευστάθεια των πρανών της εκσκαφής λόγω των υδραυλικών πιέσεων που προκαλούνται. Άλλωστε, πολλά περιστατικά αστοχίας είναι συνδεδεμένα με περιόδους έντονων βροχοπτώσεων που προηγούνται των αστοχιών.
- Δεδομένου του μεγέθους των εκσκαφών (σήμερα μέχρι και 200m), συχνά λαμβάνουν χώρα μεγάλες παραμορφώσεις ανεξάρτητα του βαθμού συντηρητισμού που έχει υιοθετηθεί κατά τον σχεδιασμό (άλλωστε, περιστατικά αστάθειας έχουν αναφερθεί ακόμη και για πολύ ήπιες συνολικές κλίσεις περίπου  $10^\circ$ ). Παρόλα αυτά, αυτές οι παραμορφώσεις δεν οδηγούν απαραίτητα σε καταστροφικές αστοχίες. Ξανά, η τεκτονική και η στρωματογραφία πρέπει να

λαμβάνονται υπ' όψη. Σε κάθε περίπτωση, κάποιες μελέτες έδειξαν πως, αν εφαρμοστεί σωστά, η εξορυκτική διαδικασία μπορεί να λάβει χώρα ακόμα και σε καταστάσεις όπου τα πρηνή ενός ορυχείου εμφανίζουν μετακινήσεις μερικών μέτρων. Σε αυτές τις καταστάσεις οι διατμητικές τάσεις δεν είναι αρκετά υψηλές ώστε να προκαλέσουν καταστροφική αστοχία.

- Έχει δοθεί έμφαση στον σημαντικό ρόλο της παρακολούθησης των πρηνών κατά τη διάρκεια της εξόρυξης τις τελευταίες δύο δεκαετίες. Παλαιότερα έργα προτείνουν την ταχύτητα των καταγεγραμμένων μετατοπίσεων (ρυθμός της μετακίνησης) ως ένα αξιόπιστο κριτήριο για επικείμενες συνθήκες αστοχίας. Παρ' όλα αυτά, αυτό το συμπέρασμα έχει αμφισβητηθεί πρόσφατα και έχει προταθεί η επιτάχυνση της ταχύτητας των πρηνών έναντι της απόλυτης τιμής αυτών ως καλύτερος δείκτης της ευστάθειας πρηνών κατά την ανάπτυξη των προοδευτικών αστοχιών.

## 3 ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΛΙΓΝΙΤΩΡΥΧΕΙΩΝ

### 3.1 Εισαγωγή

Η εκμετάλλευση του άνθρακα και του λιγνίτη ορίζει το παγκόσμιο ενεργειακό μίγμα για δεκαετίες. Ο άνθρακας αποτελεί γεω-πόρο που συνεισφέρει σημαντικά στην παγκόσμια παραγωγή ενέργειας αποτελώντας το 24.5% της παγκόσμιας ενεργειακής παραγωγής το 2000, το 30% το 2010 και το 27% το 2019 (Ritchie 2014, BP 2020). Ορισμένα κράτη (Καναδάς, Γερμανία, Γαλλία, Ιταλία, Ηνωμένο Βασίλειο και Ελλάδα) έχουν δεσμευτεί για την οριστική παύση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από άνθρακα τις επόμενες δεκαετίες. Μετά το κλείσιμο των ορυχείων, ιδιοκτήτες και δικαιούχοι θα υποχρεωθούν να αποκαταστήσουν και να αξιοποιήσουν τις τεράστιες εκτάσεις των εκσκαφών. Κάποιες λύσεις για την αποκατάσταση των ορυχείων αποτελούν η φύτευση βλάστησης και η δημιουργία τεχνητών λιμνών, αιολικών και ηλιακών πάρκων. Η εξόρυξη λιγνίτη μπορεί να παραμείνει βιώσιμη και κερδοφόρα για τα επόμενα χρόνια, μόνο εάν οι διαδικασίες εξόρυξης και εκμετάλλευσης βελτιστοποιηθούν και διευθετηθούν καταλλήλως.

Όταν τα στρώματα λιγνίτη εμφανίζονται σχετικά κοντά στην επιφάνεια, εξορύσσονται συνήθως με μεθόδους υπαίθριας εκμετάλλευσης. Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν εκσκαφεί μεγάλες ποσότητες εδαφικών υλικών, δημιουργώντας βαθιά και απότομα πρανή (μέχρι και 200 m στα ορυχεία της Ελλάδας, της Ινδίας και της Αυστραλίας), όπως και μεγάλες ποσότητες στείρων υλικών έχουν αποθεθεί εσωτερικά και εξωτερικά των ορυχείων (Leonardos and Terezopoulos 2003, Scott et al. 2010, Verma et al. 2013). Ο γεωτεχνικός χαρακτηρισμός των υλικών και η ευστάθεια των επιφανειακών λιγνιτωρυχείων ήταν και θα είναι πολύ σημαντικά θέματα. Ζητήματα που σχετίζονται με την ευστάθεια των ορυχείων θα συνεχίσουν να παρουσιάζουν ενδιαφέρον ακόμη και κατά τη διάρκεια της μετά-λιγνιτικής εποχής, καθώς οι περιοχές των ορυχείων θα πρέπει να προσαρμοστούν για μελλοντική χρήση.

Ένα πολύ σημαντικό ζήτημα για την κατάλληλη διαχείριση των επιφανειακών λιγνιτωρυχείων αποτελεί η ευστάθεια των πρανών των εκσκαφών. Έχουν αναφερθεί πολλά περιστατικά εκτενών μετατοπίσεων και αστοχιών πρανών στη βιβλιογραφία (Kavvadas et al. 2013, Marinos et al. 2015, Satyanarayana and Sinha 2018, Tutluoglu et al. 2011, Zevgolts et al. 2019, Zhigang et al. 2020). Η ευστάθεια των πρανών

αποτελεί βασικό παράγοντα για την ασφάλεια του προσωπικού και του εξοπλισμού, την αποδοτική λειτουργία των ορυχείων και την ευστάθεια της ευρύτερης περιοχής. Ακόμη, η ευστάθεια των πρανών κυριαρχεί σαν ζήτημα στην αποκατάσταση των ορυχείων, όντας ένας από τους βασικούς παράγοντες στην λήψη αποφάσεων (Kasmer et al. 2006, Poulsen et al. 2014, Sharma and Roy 2015, Steiakakis et al. 2009). Οπότε, μία σε βάθος αξιολόγηση των εδαφικών ιδιοτήτων είναι απαραίτητη για μία μελέτη ευστάθειας λόγω της ευαισθησίας που παρουσιάζουν οι αναλύσεις στον χαρακτηρισμό των υλικών (Ghadrdan et al. 2020).

Δεν εστιάζουμε στην περίπτωση ενός ορυχείου (Bednarczyk 2017, Pulipati et al. 2020, Ulusay et al. 2014) αλλά παρέχονται πληροφορίες για πολλές περιοχές εξόρυξης μέσω ενός περιληπτικού χαρακτηρισμού των εδαφών αυτών. Ακόμη, επιστρατεύονται σενάρια ευστάθειας πρανών με σκοπό να καθοδηγήσουν τον γεωτεχνικό χαρακτηρισμό των εδαφών, σε αντίθεση με τυπικές αναλύσεις όπου ο χαρακτηρισμός πάντα προηγείται των αναλύσεων ευστάθειας. Η προσέγγιση αυτή διαφέρει από τις κλασσικές χωρίς να τις αντικαθιστά. Συνδυάζει ήδη υπάρχοντα δεδομένα που αποκτήθηκαν για την ανάλυση ευστάθειας σε διάφορα ορυχεία και μπορεί να προσφέρει μία συνολική εικόνα και επιπρόσθετη γνώση για τις σχετικές περιοχές εξόρυξης οδηγώντας σε καλύτερο σχεδιασμό.

Μελετώνται οι γεωτεχνικές ιδιότητες των εδαφικών υλικών των ορυχείων σε συνολικό πλαίσιο, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως συμπληρωματικό εργαλείο σε τυπικές διαδικασίες που εστιάζουν στη συγκεκριμένη γεωλογία μιας περιοχής ή ενός ορυχείου. Τα σενάρια ευστάθειας πρανών καθοδηγούν τον χαρακτηρισμό προς τις κρίσιμότερες παραμέτρους και την ορθή τους ανάλυση (Theocharis et al. 2021).

Χρησιμοποιούνται αποτελέσματα διάφορων εργαστηριακών ερευνών (που αφορούν διαφορετικά ορυχεία στα οποία αναμένονται παρόμοιοι μηχανισμοί ευστάθειας) για να συνθέσουν μία εκτενή βάση δεδομένων με τελικό σκοπό τον ενιαίο χαρακτηρισμό των εδαφών των ορυχείων. Δίνεται έμφαση στην παραμένουσα αντοχή (παραμένουσα γωνία τριβής) και την μέγιστη διατμητική αντοχή (μέγιστη γωνία τριβής και συνοχή), οι οποίες είναι οι κρίσιμες παράμετροι στα δύο σενάρια ευστάθειας πρανών που θα συζητηθούν. Οι φυσικές ιδιότητες αναλύονται επίσης εκτενώς αφού είναι απλές στον προσδιορισμό τους. Αυτές χαρακτηρίζουν τους τύπους των εδαφών και μπορούν να παρέχουν την τιμή της διατμητικής αντοχής μέσω εμπειρικών σχέσεων. Η λήψη δεδομένων από διάφορα ορυχεία ενισχύει την στατιστική σημασία των αποτελεσμάτων και παρέχει μία σφαιρική εικόνα των ιδιοτήτων των εδαφών. Στο πλαίσιο αυτό, οι μηχανικές ιδιότητες των εδαφικών υλικών μπορούν να αξιολογηθούν πιο ξεκάθαρα. Τελικά, η σύνοψη αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως οδηγός προκαταρκτικής ανάλυσης. Περαιτέρω, μπορεί να

βελτιώσει τον σχεδιασμό και να επεκτείνει την γνώση στα ζητήματα ευστάθειας πρηνών στις λιγνιτικές εκσκαφές (Theocharis et al. 2021).

### 3.2 Χαρακτηρισμός των υλικών – Θεώρηση βασικών σεναρίων

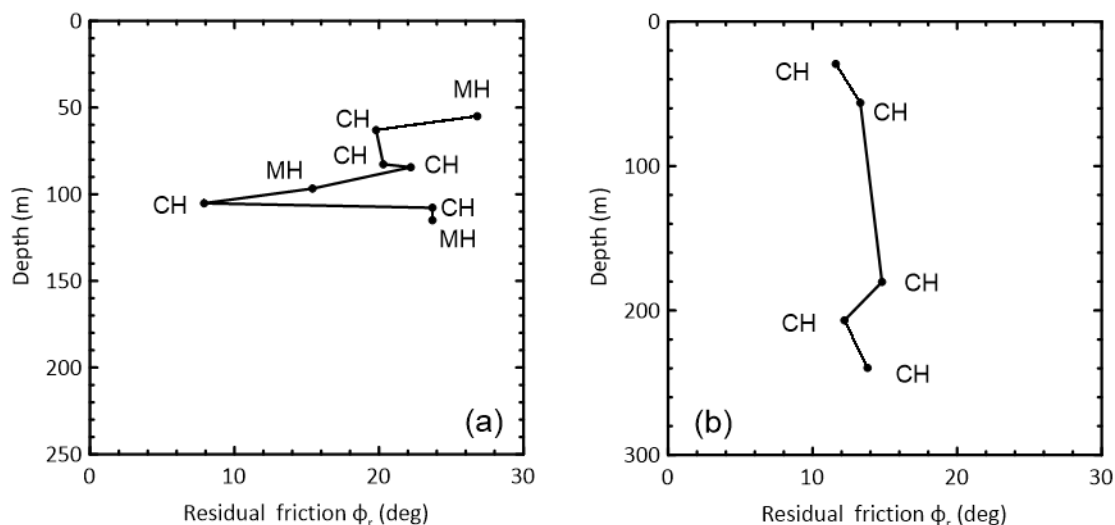
Ακολουθεί περιεκτική ταυτοποίηση των εδαφικών υλικών στα ελληνικά λιγνιτωρυχεία. Δεν αντιμετωπίζεται μία συγκεκριμένη γεωμετρία ή γεωλογία κάποιου ορυχείου αλλά εξάγονται γενικότερα χαρακτηριστικά και μοτίβα. Έχει δημιουργηθεί εκτενής βάση δεδομένων από αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών σε εδαφικά δείγματα από διάφορα ελληνικά λιγνιτωρυχεία (της Δυτικής Μακεδονίας και της Πελοποννήσου).

Αρχικά, εξετάζεται σε βάθος η αντοχή του εδάφους με όρους παραμένουσας γωνίας τριβής. Επιλέγεται η εξέταση της παραμένουσας αντοχής (δηλαδή η διατμητική αντοχή σε πολύ μεγάλες παραμορφώσεις (Holtz et al. 2010)) διότι είναι το μέγεθος που χαρακτηρίζει τις αστοχίες πρηνών στα ελληνικά λιγνιτωρυχεία και τα τυπικά αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών περιλαμβάνουν το συγκεκριμένο τύπο αντοχής. Διακρίνονται δύο κύρια σενάρια, όπως απεικονίζεται σε δύο ενδεικτικές γεωτρήσεις στην Εικόνα 18. Η Εικόνα 18(a) παρουσιάζει στρωματογραφία που ορίζεται από μία στρώση (ή ζώνη) χαμηλής αντοχής, και η Εικόνα 18 (b) παρουσιάζει μία πρακτικά ομογενή κατανομή της αντοχής με το βάθος. Προηγούμενοι ερευνητές αναγνώρισαν επίσης παρόμοια τυπικά σενάρια ((Kavvadas et al. 2020, Leonardos 2004, Steiakakis 2003).

Από αυτά τα δύο σενάρια, η κρίσιμη περίπτωση για την ευστάθεια πρηνών είναι όταν εμφανίζεται ζώνη χαμηλής διατμητικής αντοχής. Αυτή ονομάζεται ευαίσθητη ζώνη και μπορεί να είναι είτε στρώμα με υλικό χαμηλής διατμητικής αντοχής ή διεπιφάνεια μεταξύ μαργών, αργίλων ή λιγνίτη σε διαφορετικούς συνδυασμούς (δηλαδή διεπιφάνεια μάργας με μάργα, μάργας με άργιλο κ.α.). Αυτή η ζώνη είναι συνήθως μικρού πάχους και ποικίλει από μερικά εκατοστά έως μερικά μέτρα. Ακόμη, έχει πολύ μικρότερο μέτρο ελαστικότητας αποφόρτισης από τα προσκείμενα σε αυτή στρώματα. Ως αποτέλεσμα, μεγάλες διατμητικές παραμορφώσεις εμφανίζονται στην ευαίσθητη ζώνη κατά τη παραμόρφωση του πρηνούς και το έδαφος συνήθως αστοχεί στην παραμένουσα αντοχή του. Περισσότερες πληροφορίες για την γεωλογική δημιουργία και την κατάσταση αστοχίας που προκαλεί παρέχονται από τον Kavvadas et al. (2020).

Τα υπερκείμενα εδαφικά υλικά γίνονται δευτερεύουσας σημασίας, ενώ κρίσιμότερη γίνεται η ταυτοποίηση της παραμένουσας αντοχής στην ευαίσθητη ζώνη. Αυτό επιβεβαιώνεται επίσης από ανάδρομες αναλύσεις καταγεγραμμένων αστοχιών πρηνών (Kavvadas et al. 2013, Prountzopoulos et al. 2017, Steiakakis et al. 2017, Zengolis et al. 2019). Τυπικά, η παραμένουσα αντοχή υπολογίζεται από την δοκιμή

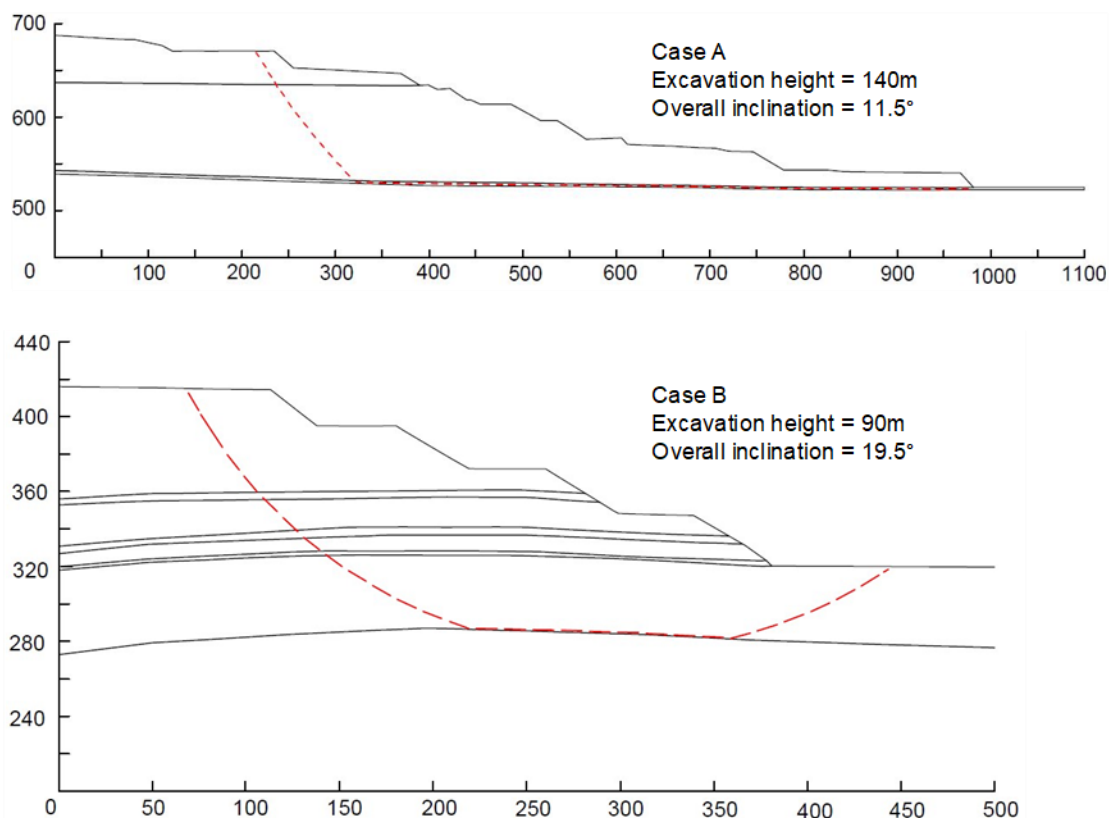
δακτυλιοειδούς διάτμησης που αν παρουσιαστεί σε βάθος μπορεί να αποκαλύψει το προφίλ της ευαίσθητης ζώνης (όπως στην Εικόνα 18(a)).



Εικόνα 18 Χαρακτηριστικά σενάρια εδαφικής στρωματογραφίας (κατάταξη σύμφωνα με το USCS) βάσει τιμών παραμένουσας γωνίας τριβής με το βάθος: (a) σενάριο περίπτωσης με ευαίσθητη ζώνη και (b) σενάριο περίπτωσης με ομογενές πρανές (Theocharis et al. 2021)

Το δεύτερο σενάριο αναφέρεται στη περίπτωση όπου δεν απαντάται ξεκάθαρα ευαίσθητη ζώνη. Το σενάριο αυτό είναι συνήθως λιγότερο ευαίσθητο υπό όρους ευστάθειας, και για λόγους ευκολίας υποθέτουμε την ύπαρξη ομογενούς πρανούς που υπέρκεινται βαθιού σχηματισμού πυθμένα (σε αυτή τη περίπτωση ο διαχωρισμός των γεωλογικών στρωμάτων είναι ασήμαντος Εικόνα 18(b)). Το σενάριο αυτό είναι λιγότερο συντηρητικό όμως εξετάζεται διότι υπό ορισμένες συνθήκες τα πρανή εμφανίζουν αστοχία, όταν οι πιέσεις των πόρων αυξάνονται απότομα.

Η Εικόνα 19 παρουσιάζει δύο περιπτώσεις αστοχιών ευστάθειας σε πρανή των οποίων οι μηχανισμοί περιγράφονται από τον Leonardos (2004) και παρουσιάζονται τα δύο σενάρια περίπτωσης επιφανειών αστοχίας. Επισημαίνεται πως η ολοκληρωμένη στρωματογραφία των πρανών των λιγνιτωρυχείων είναι πιο πολύπλοκη, από την απλοποιημένη περιγραφή που παρέχεται εδώ. Ωστόσο, μόνο το σύνολο των γεωτεχνικών ιδιοτήτων των διάφορων στρωμάτων επηρεάζει σημαντικά την ευστάθεια.



Εικόνα 19 Επιφάνειες αναμενόμενης αστοχίας με ευδιάκριτο οριζόντιο / υπο-οριζόντιο τμήμα για (α) πρανές με ευαίσθητη ζώνη και (β) ομογενές πρανές με βαθύ βραχώδες υπόβαθρο (τροποποιημένη εικόνα από Leonardos (2004))

### 3.3 Κατατάξεις και φυσικά χαρακτηριστικά

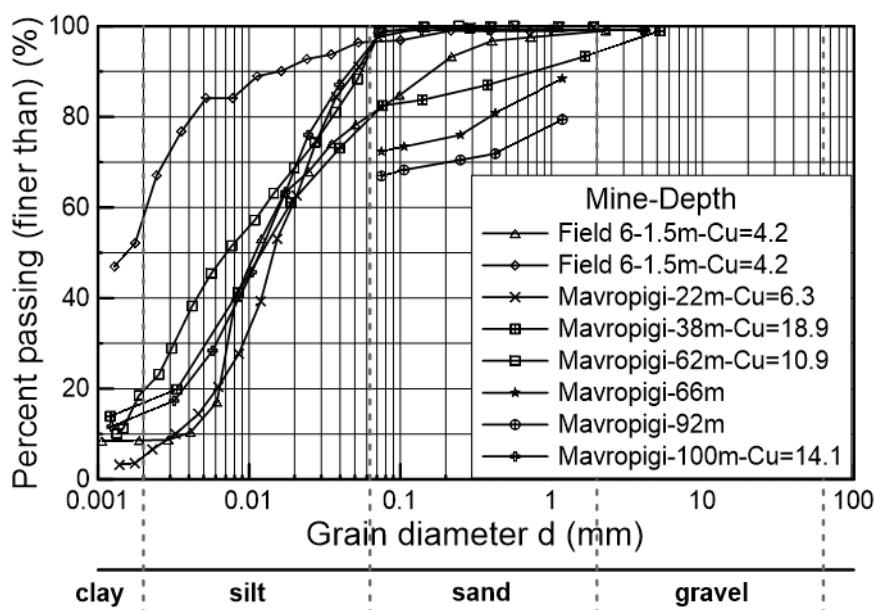
Συγκεντρώθηκαν πολλά δείγματα από συνολικά 11 λιγνιτωρυχεία (Αμύνταιου, Τομέα 6, Καρδιάς, Κομνηνών, Κυρίου Πεδίου, Μαυροπηγής, Μεγαλόπολης, Προσήλιου, Σερβίων, Νοτίου Πεδίου και Βέβης). Τα όρια Atterberg, τα ειδικά βάρη των κορεσμένων εδαφών και οι περιεκτικότητες τους σε υγρασία συνοψίζονται στον Πίνακα 1. Ακόμα, η Εικόνα 20 παρουσιάζει μερικές χαρακτηριστικές κοκκομετρίες λεπτόκοκκων υλικών (που κυριαρχούν σε όλα τα ορυχεία) από διάφορα βάθη (1.5m έως 100m).

Ο συντελεστής ομοιομορφίας ( $C_u = d_{60}/d_{10}$ ) είναι δείκτης του σχήματος της κατανομής. Εδάφη που κυμαίνονται από πτωχά-διαβαθμισμένα έως καλά-διαβαθμισμένα παρουσιάζουν  $C_u$  που ποικίλει από 4.2 έως 18.9. Ακολουθήθηκαν τα πρότυπα ASTM C136, ASTM D4318-83, ASTM D 2216.

Table 4 Στατιστικά φυσικών ιδιοτήτων για υπερκείμενα εδαφικά υλικά (Theocharis et al. 2021)

Parameter	Moisture content and Atterberg Limits (%)					$\gamma_d$ ( $\text{kN/m}^3$ )	$\gamma$ ( $\text{kN/m}^3$ )	e (-)
	w	LL	PL	PI	LI			
n	879	1128	1134	1128	819	154	248	189
$\mu$	40	54	35	18	0.41	12.1	17.2	1.20
m	38	53	33	18	0.25	12.1	17.1	1.19
$\sigma$	16	14	13	11	1.4	1.7	1.6	0.46
COV (%)	39	26	37	57	340	14	9	38
min	15	21	13	0	-2	4.5	11.7	0.49
max	118	128	120	67	22	16.9	20.7	4.82
range	103	107	107	67	24	12.4	9.0	4.33

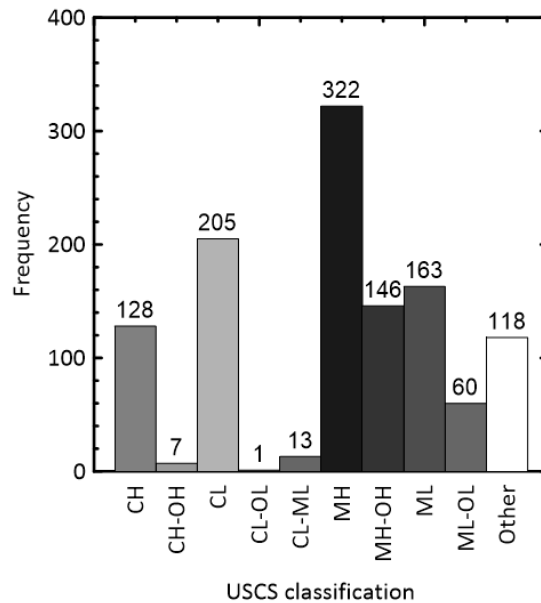
n: population,  $\mu$ : mean value, m: median value,  $\sigma$ : standard deviation, COV: coefficient of variation



Εικόνα 20 Χαρακτηριστικές κοκκομετρίες οκτώ δειγμάτων από διάφορα βάθη (συντελεστής ομοιομορφίας:  $C_u = d_{60}/d_{10}$ ) (Theocharis et al. 2021)

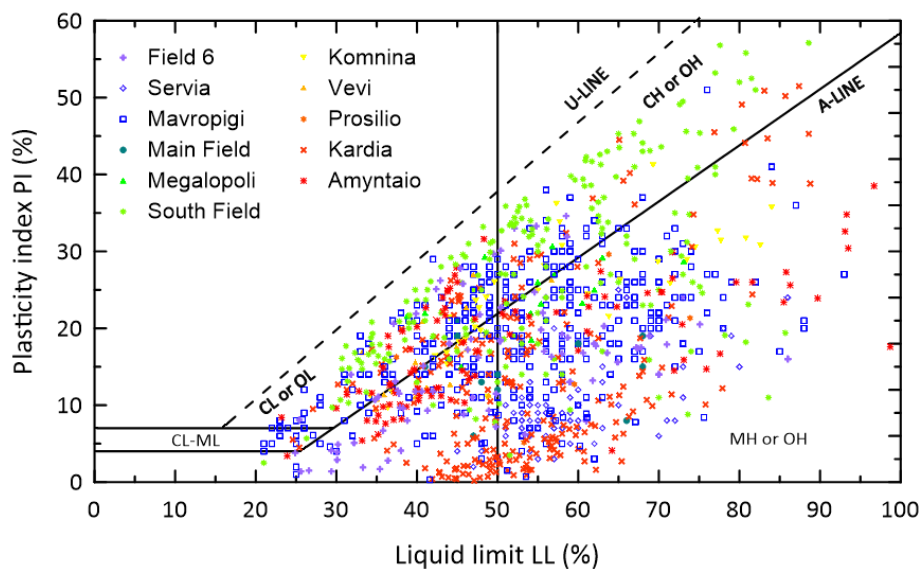
Σύμφωνα με το USCS τα περισσότερα δείγματα χαρακτηρίζονται λεπτομερή, δηλαδή πρόκειται για ιλύες και αργίλους (στη βάση δεδομένων, 1117 δείγματα από τα 1163 είναι λεπτομερή ενώ τα υπόλοιπα είναι οργανικά και ιλυώδεις/αργιλώδεις άμμοι), συμφωνώντας με την γενική γεωλογική ταυτοποίηση. Τα 118 δείγματα που δεν ταξινομήθηκαν ως ιλύες ή άργιλοι είναι κυρίως οργανικά, και λίγα είναι ιλυώδεις και αργιλώδεις άμμοι.





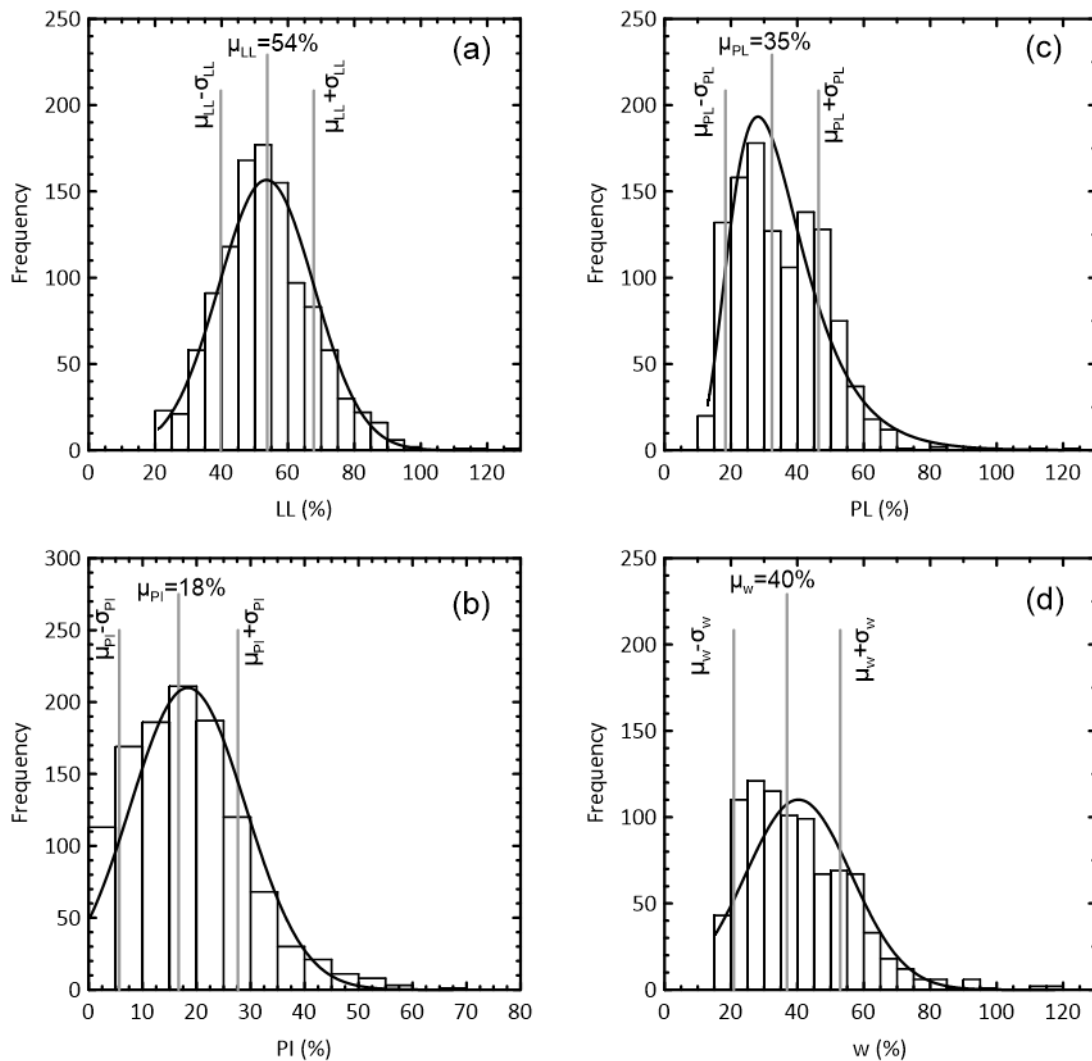
Εικόνα 21 Ταξινόμηση των εδαφικών δειγμάτων κατά USCS

Για την ταξινόμηση του λεπτομερούς υλικού, κατασκευάζεται το διάγραμμα της σχέσης του Ορίου Υδαρότητας (LL) με τον Δείκτη Πλαστικότητας (PI) για όλα τα δείγματα (Εικόνα 22). Ξανά, παρουσιάζονται άργιλοι και ιλύες υψηλής και χαμηλής πλαστικότητας με τις ιλύες (κυρίως μάργες) να είναι οι πιο συχνές. Ωστόσο, σε κάποια ορυχεία, υπήρχαν περιπτώσεις όπου είτε οι άργιλοι είτε οι ιλύες κυριαρχούσαν ή ακόμη και τα δύο υλικά εμφανίζονταν σε παρόμοιες ποσότητες.



Εικόνα 22 Διάγραμμα Πλαστικότητας λεπτόκκοκων εδαφικών υλικών από διάφορα ορυχεία (Theocharis et al. 2021)

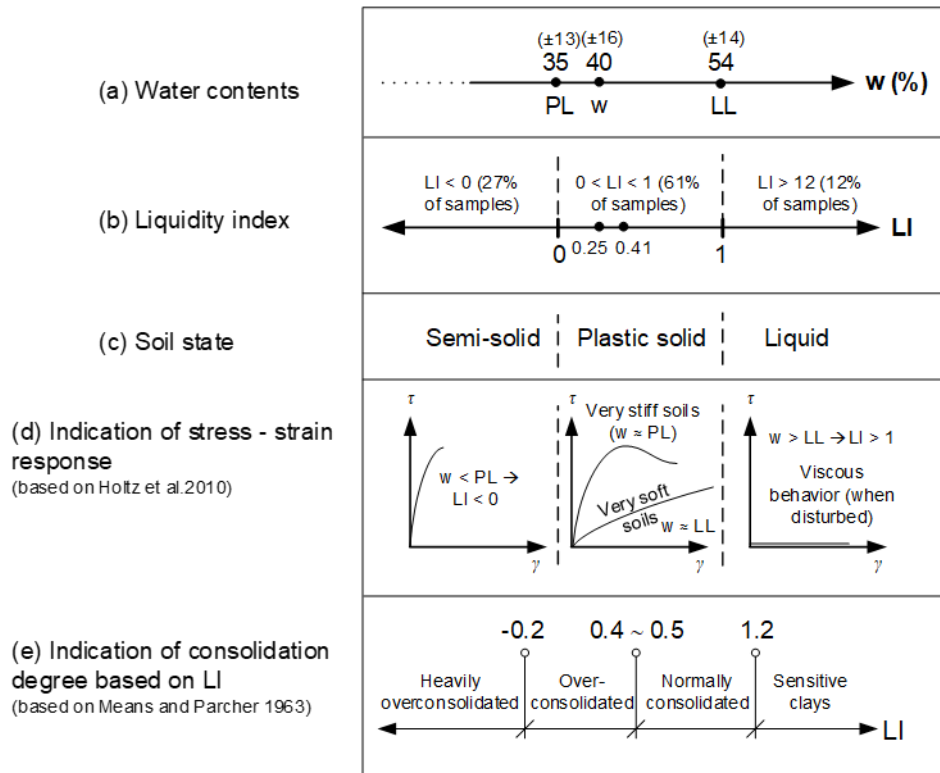
Η Εικόνα 23 παρουσιάζει τα ιστογράμματα των LL και PI. Το Όριο Υδαρότητας (LL) (Εικόνα 23(a)) εμφανίζει σχεδόν κανονική κατανομή, με μέγιστη τιμή στο 50%-55% και μέση τιμή στο 54%. Αυτό παρατηρείται επίσης στην Εικόνα 22. Επιπλέον ο Δείκτης Πλαστικότητας (PI) (Εικόνα 23(b)) παρουσιάζει αποτελέσματα που προσομοιάζουν περικομμένη κανονική κατανομή με τιμές που συγκεντρώνονται γύρω από την μέση τιμή στο 18% και απομακρύνονται προς τα δεξιά με τιμές μέχρι και στο 70%. Το Όριο Πλαστικότητας (PL) (Εικόνα 23(c)) εμφανίζει κατανομή που μοιάζει με τον λογάριθμο της κανονικής κατανομής με μέση τιμή στο 35%. Η Περιεχόμενη Υγρασία ( $w$ ) (Εικόνα 23(d)) ταιριάζει σε περικομμένη κανονική κατανομή με μέση τιμή στο 40%, κοντά στο σημείο που εμφανίζει μέση τιμή το Όριο Πλαστικότητας (PL). Οι Συντελεστές Μεταβλητότητας (COV) των LL, PL, PI και  $w$  είναι 26%, 37%, 57% και 39% αντίστοιχα. Ως αναμενόμενο, ο Συντελεστής Μεταβλητότητας του PI είναι μεγαλύτερος, δεδομένου ότι είναι συνάρτηση των LL και PL (οπότε η αβεβαιότητα είναι μεγαλύτερη από την μεγαλύτερη των δύο). Σε κάθε περίπτωση, οι τιμές αυτές δεν είναι ασυνήθιστες για φυσικά εδάφη, αφού λεπτομερή υλικά εμφανίζουν συχνά COV=30% ή μεγαλύτερο για LL και PL, και έως 80% για PI (Baecher and Christian 2003, Lacasse and Nadim 1996).



Εικόνα 23 Ιστόγραμμα (α) Ορίου Υδαρότητας (LL), (β) Ορίου Πλαστικότητας (PL), (γ) Δείκτη Πλαστικότητας (PI), (δ) Περιεχόμενη Υγρασία (w) των λεπτόκοκκων υπερκείμενων εδαφικών υλικών (Theocharis et al. 2021)

Στα 649 από τα 1128 δείγματα (57% του πληθυσμού), το LL ήταν μεγαλύτερο του 50 (δείγματα υψηλής πλαστικότητας). Από την άλλη, οι τιμές του w βρισκόταν ανάμεσα στο PL και το LL σε μόλις 512 από τα 819 δείγματα (συνολικός αριθμός δειγμάτων με ταυτόχρονες μετρήσεις PL, LL και w). Αυτό σημαίνει πως 62.5% από τα δείγματα βρίσκονται στην πλαστική περιοχή ( $PL < w < LL$ ). Ακόμη, έχουμε  $w > LL$  για 94 δείγματα και  $w < PL$  για 213 δείγματα. Με άλλα λόγια, ένα αξιοσημείωτο μέρος των δειγμάτων (11%) μπορεί να θεωρηθεί ως μαλακά, κανονικά στερεοποιημένα υλικά ενώ άλλο σημαντικό μέρος των δειγμάτων (26%) αποτελεί υλικά σε ημι-στερεή κατάσταση, πιθανώς υπερστερεοποιημένα. Η μέση τιμή Περιεχόμενης Υγρασίας (w) υπολογίστηκε να είναι 40% με  $COV=39\%$ . Αυτή η τιμή είναι τυπική αφού οι Συντελεστές Μεταβλητότητας της Περιεχόμενης Υγρασίας κυμαίνονται μέχρι σχεδόν 65% για αργίλους και ιλύες (Baecher and Christian 2003).

Ακόμη ένας συνήθης δείκτης που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της φυσικής υγρασίας που περιέχεται στα εδάφη είναι ο Δείκτης Υδαρότητας (LI) που ορίζεται ως  $LI = [w - PL] / [LL - PL]$ . Τυπικά, συνήθη συνεκτικά εδάφη έχουν τιμές LI που κυμαίνονται από 0 έως 1 (δηλαδή  $PL < w < LL$ ), που σημαίνει πως το έδαφος συμπεριφέρεται πλαστικά, ή με πλαστικό τρόπο. Κατ' αρχήν, το ότι το LI πλησιάζει το 0 ή το 1 δείχνει ότι το έδαφος βρίσκεται σε πολύ συμπαγή ή πολύ χαλαρή κατάσταση αντίστοιχα (Murthy 2002). Βάσει των διαθέσιμων δεδομένων, η μέση και ενδιάμεση τιμή του LI υπολογίστηκαν ίσες με 0.41 και 0.25, αντίστοιχα. Αυτές οι τιμές δηλώνουν, κατά μέσο όρο, ελαφρώς υπερστερεοποιημένο έδαφος. Σχετικά με τα παραπάνω, η Εικόνα 24 απεικονίζει ένα συνεχές της περιεχόμενης υγρασίας και των σχετικών καταστάσεων του εδάφους, μαζί με ενδείξεις του βαθμού στερεοποίησης και των ανταποκρίσεων των τάσεων και των παραμορφώσεων. Εξετάζοντας ολόκληρο τον πληθυσμό, οι τιμές του LI ποικίλουν από 0 έως 1 σε 501 δείγματα (61%). Όπως έχει ήδη ειπωθεί, πρόκειται για τυπικές τιμές για εδάφη με πλαστική συμπεριφορά. Σε 218 δείγματα (27%) οι τιμές του LI είναι μικρότερες του 0. Αυτό είναι αναμενόμενο για υπερστερεοποιημένα έως εντόνως υπερστερεοποιημένα εδάφη (Εικόνα 24(e)), και από πλευράς τάσεων-παραμορφώσεων σημαίνει πως το έδαφος συμπεριφέρεται ψαθυρά κατά τη διάτμηση (Εικόνα 24(d)). Τέλος, σε 100 δείγματα (12%) το LI είναι μεγαλύτερο από το 1. Αυτό δείχνει την ύπαρξη φυσικά στερεοποιημένου ή ευαίσθητου συνεκτικού εδάφους (Εικόνα 24(e)). Υπο διάτμηση, το εδαφικό υλικό αυτό συμπεριφέρεται ως ρευστό με μεγάλο ιξώδες (Εικόνα 24(d)). Οι Holtz et al. (2010) υποστηρίζουν πως τέτοια υλικά μπορεί να είναι πολύ ευαίσθητα σε κατάρρευση της δομής τους: εάν δεν διαταράσσονται μπορεί να είναι σχετικά καλής αντοχής, εάν όμως διατμηθούν, η δομή τους καταρρέει και συμπεριφέρονται ως ρευστά. Σημειώνεται πως  $LI > 1$  δεν σημαίνει αυτομάτως πως το έδαφος είναι οριακά ρευστό, εκτός εάν επανασηματιστεί-πλαθεί ξανά. Πράγματι, πολλές άργιλοι και ιλύες έχουν  $LI > 1$  και αποτελούν συμπαγή υλικά. Αυτό αναδεικνύει τον ρόλο που παίζει η δομή τους στις ιδιότητές τους. Να σημειωθεί πως η αστράγγιστη διατμητική αντοχή αδιατάραχτων συνεκτικών εδαφών με LI κοντά στο 1, συχνά ποικίλει από 15kPa έως 50kPa. Εάν  $LI \approx 0$ , η αστράγγιστη διατμητική αντοχή τυπικά κυμαίνεται μεταξύ 50kPa έως 250kPa (Smith 2014, Terzaghi et al. 1996).



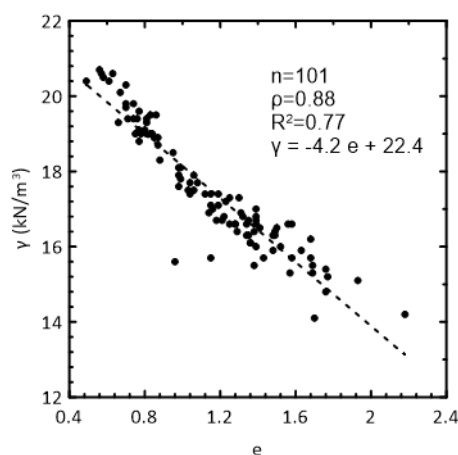
Εικόνα 24 Συνεχές της Περιεχόμενης Υγρασίας που απεικονίζει τις διάφορες καταστάσεις ενός εδαφικού υλικού σχετικά με το φυσικό περιοχόμενο υγρασίας και τα Όρια Atterberg, όπως επίσης τις αντίστοιχες ενδείξεις (βάσει του LI) των σχετικών ανταποκρίσεων σε τάσεις και παραμορφώσεις και τον βαθμό στερεοποίησης (Means and Parcher 1963)

Είναι αξιοσημείωτο πως το LI παρουσιάζει μεγάλο εύρος τιμών και υπερβολικά μεγάλο Συντελεστή Μεταβλητότητας. Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω της παρουσίας ημι-στερεών και στερεών δειγμάτων με τιμές  $w$  αρκετά χαμηλότερες από τις τιμές του PL, και ευαίσθητα δείγματα με τιμές  $LI > 1$ . Επιπλέον, το LI εξαρτάται από τα LL, PL και  $w$ , επομένως, κάποιο σφάλμα στον υπολογισμό αυτών των μεγεθών ακολουθώντας εμφανίζεται και στην τιμή του LI οδηγώντας σε υψηλό Συντελεστή Μεταβλητότητας. Λίγα δεδομένα στη βιβλιογραφία εμφανίζονται σχετικά με τον Συντελεστή Μεταβλητότητας του LI, διότι για χαμηλές μέσες τιμές του LI (κοντά στο 0) ο Συντελεστής Μεταβλητότητας μεγαλώνει ακόμη και για μικρή τυπική απόκλιση.

Στον Πίνακα 4 παρέχονται επίσης βασικά στατιστικά για το κορεσμένο και ακόρεστο ειδικό βάρος των δειγμάτων. Οι μέσες τιμές του ειδικού βάρους είναι σχετικά χαμηλές ( $17.2 \text{ kN/m}^3$  και  $12.1 \text{ kN/m}^3$  αντίστοιχα), αναδεικνύοντας έτσι τον λεπτόκοκκο χαρακτήρα των εδαφών. Έχει αναφερθεί πως ανεξαρτήτως του τύπου του εδάφους, το ειδικό βάρος και η πυκνότητα εμφανίζουν μικρή μεταβλητότητα σε σχέση με τις περισσότερες άλλες εδαφικές ιδιότητες, τυπικά μικρότερη του 10% (Baecher and Christian 2003, Lacasse and Nadim 1996). Ο Συντελεστής Μεταβλητότητας των ειδικών βαρών στη μελέτη αυτή είναι 9% και 14% για κορεσμένο και ακόρεστο ειδικό βάρος αντίστοιχα. Η αναλογία πόρων παρουσιάζει τιμή 1.20 και σχετικά υψηλό

Συντελεστή Μεταβλητότητας=38%, ενώ οι Lacasse και Nadim (1996) αναφέρουν τιμές Συντελεστή Μεταβλητότητας για τον λόγο των πόρων έως 30%.

Τελικά, σημειώνεται έντονη αρνητική διασυσχέτιση μεταξύ του αρχικού λόγου των πόρων  $e$  και του κορεσμένου ειδικού βάρους που αντιστοιχεί σε γραμμικό συντελεστή συσχέτισης  $\rho=-0.88$  και συντελεστή προσδιορισμού  $R^2=0.77$  (Εικόνα 25). Είναι γνωστό πως το  $e$  και το  $\gamma$  αλληλεξαρτώνται. Επίσης, εξαρτώνται από την περιεχόμενη υγρασία  $w$  και την πυκνότητα των στερεών κόκκων του εδάφους, και δεν διαφέρει σημαντικά. Παρόλο που η περιεχόμενη υγρασία εμφανίζει αξιοσημείωτη μεταβλητότητα ( $COV_w= 39\%$ ), συνεχίζει να υφίσταται η σχέση  $\gamma=-4.2e+22.4$  μεταξύ του  $e$  και του  $\gamma$ , και το ένα μπορεί να υπολογιστεί εάν γνωρίζουμε το άλλο. Πρόκειται για γραμμική σχέση βασισμένη στην εξάρτηση των δύο αυτών παραμέτρων και την μεγάλη τιμή του  $R^2$ .



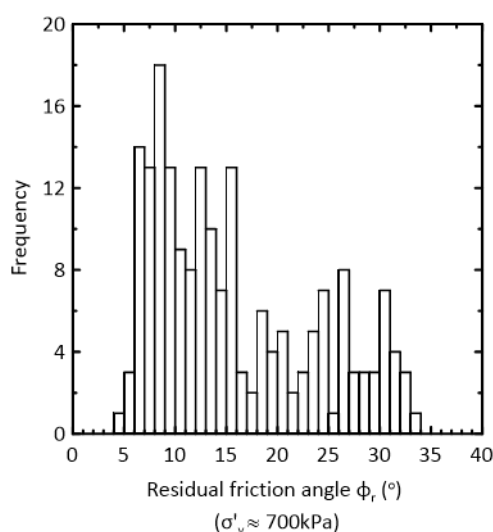
Εικόνα 25 Σχέση μεταξύ λόγου των πόρων και κορεσμένου ειδικού βάρους των υπερκείμενων εδαφικών υλικών (Theocharis et al. 2021)

### 3.4 Μηχανικά χαρακτηριστικά

Η διατμητική αντοχή είναι κρίσιμη ιδιότητα που σχετίζεται με τα ζητήματα ευστάθειας πρανών. Βάσει των προηγούμενων δύο σεναρίων που αναφέρθηκαν, δύο σετ παραμέτρων αντοχής είναι τα σημαντικότερα: εκείνα που χαρακτηρίζουν την μέγιστη διατμητική αντοχή και εκείνα που ορίζουν την παραμένουσα διατμητική αντοχή. Οι παράμετροι αυτές έχουν εκτιμηθεί με δοκιμές τριαξονικής φόρτισης και δοκιμές άμεσης διάτμησης για την μέγιστη διατμητική αντοχή (ASTM D2850 και ASTM D3080), και με δοκιμές δακτυλιοειδούς διάτμησης για την παραμένουσα αντοχή (ASTM D7608). Αναλύθηκαν τα αποτελέσματα από ορισμένα ορυχεία και παρουσιάζονται παρακάτω.

### 3.4.1 Παραμένουσα αντοχή

Η παραμένουσα αντοχή χαρακτηρίζεται μόνο από τη γωνία τριβής  $\phi_r$  αφού η συνοχή είναι ουσιαστικά μηδενική στην ακραία αυτή κατάσταση που επικρατούν μεγάλες παραμορφώσεις. Η Εικόνα 26 παρουσιάζει το ιστόγραμμα των παραμένουσων γωνιών τριβής που υπολογίστηκαν από 192 δείγματα και απεικονίζει δύο μέγιστα, περίπου  $10^\circ$  και  $26^\circ$ . Παρατηρούμε πως τα δείγματα προέρχονται από διάφορα βάθη και δεν γίνεται εστίαση σε κάποια ξεκάθαρη ευαίσθητη ζώνη. Οπότε, αυτές οι γωνίες τριβής δεν περιγράφουν μόνο κάποια ευαίσθητη ζώνη αλλά όλους τους εδαφικούς σχηματισμούς.



Εικόνα 26 Ιστόγραμμα της παραμένουσας γωνίας τριβής των εδαφικών υλικών (Theocharis et al. 2021)

Από αυτή την άποψη, διακρίνονται δύο περιοχές στο ιστόγραμμα της Εικόνας 26 που χωρίζονται περίπου στις  $15^\circ$ . Το όριο αυτό διαχωρίζει δύο περιοχές με παρόμοιο αριθμό δειγμάτων και θεωρείται μια λογική άνω τιμή για την παραμένουσα αντοχή της ευαίσθητης ζώνης. Ακόμη, τα στατιστικά των δύο περιοχών του ιστογράμματος (ευαίσθητες και μη ευαίσθητες ζώνες) φαίνονται στον Πίνακα 5. Η μέση τιμή για την περιοχή των ευαίσθητων ζωνών είναι  $10^\circ$  με τυπική απόκλιση  $2.7^\circ$ . Η γωνία τριβής στις ευαίσθητες ζώνες ποικίλει από  $4.6^\circ$  έως  $15^\circ$ , δηλαδή περίπου το διπλάσιο μέγεθος της τυπικής απόκλισης γύρω από τη μέση τιμή. Τελικά, στον Πίνακα 6 απεικονίζονται οι μέσες τιμές για την παραμένουσα γωνία τριβής κάθε ορυχείου (για όλους τους εδαφικούς σχηματισμούς και τις δύο ζώνες που διακρίθηκαν παραπάνω). Σε δείγματα από κάποια ορυχεία εμφανίζονται τιμές παραμένουσας γωνίας τριβής λίγο μεγαλύτερες από τον συνολικό μέσο όρο, ενώ δεν υπάρχει σημαντική απόκλιση τιμών από αυτόν.

Table 5 Παραμένουσα γωνία τριβής ( $\sigma'_v \approx 700 \text{ kPa}$ ) για όλα τα υλικά, για ευαίσθητες ( $\leq 15^\circ$ ) και μη-ευαίσθητες ( $> 15^\circ$ ) ζώνες (Theocharis et al. 2021)

Parameter	$\phi_r$ ( $^\circ$ )	$\phi_r$ ( $^\circ$ ) $\leq 15$	$\phi_r$ ( $^\circ$ ) $> 15$
n	192	109	83
$\mu$	15.8	10.0	23.5
m	13.5	9.4	23.7
$\sigma$	7.9	2.7	5.7
COV (%)	50.1	26.6	24.0
min	4.6	4.6	15.2
max	33.7	15.0	33.7
range	29.1	10.4	18.5

n: population,  $\mu$ : mean value, m: median value,  $\sigma$ : standard deviation, COV: coefficient of variation

Σε συμφωνία με προηγούμενη βιβλιογραφία (δηλαδή Lambe and Whitman 1969, Terzaghi et al. 1996) και με πρακτικές εφαρμογές των μηχανικών, έχει γίνει προσπάθεια αξιολόγησης της σχέσης μεταξύ της παραμένουσας αντοχής και των φυσικών παραμέτρων, που μετρούνται πιο συχνά και πιο εύκολα στην πράξη. Η μεγάλη διασπορά των αποτελεσμάτων δεν επιτρέπει ακριβή συσχέτιση των παραπάνω μεγεθών, παρ' όλα αυτά, η παραμένουσα γωνία τριβής μπορεί να εκτιμηθεί προσεγγιστικά για μία προκαταρκτική αξιολόγηση βάσει του Δείκτη Πλαστικότητας (PI). Η Εικόνα 27(a) απεικονίζει την συγκεκριμένη συσχέτιση και προτείνεται η σχέση  $\phi_r = 265(PI)^{-0.9}$ , με ένα ανώτερο και ένα κατώτερο όριο. Τα σημαντικά όρια της διασποράς, η εφαρμοσιμότητα αυτής της σχέσης σε προκαταρκτική ανάλυση και τα δύο όρια πρέπει πάντα να λαμβάνονται υπόψιν μαζί με τη σχέση αυτή. Για την ανάλυση, τα εδάφη έχουν διακριθεί ευρέως βάση την κατάταξή τους κατά USCS (άργιλοι, ιλύες και οργανικά). Το γεγονός αυτό δεν μειώνει τη διασπορά ούτε παρουσιάζει διαφορετική τάση.

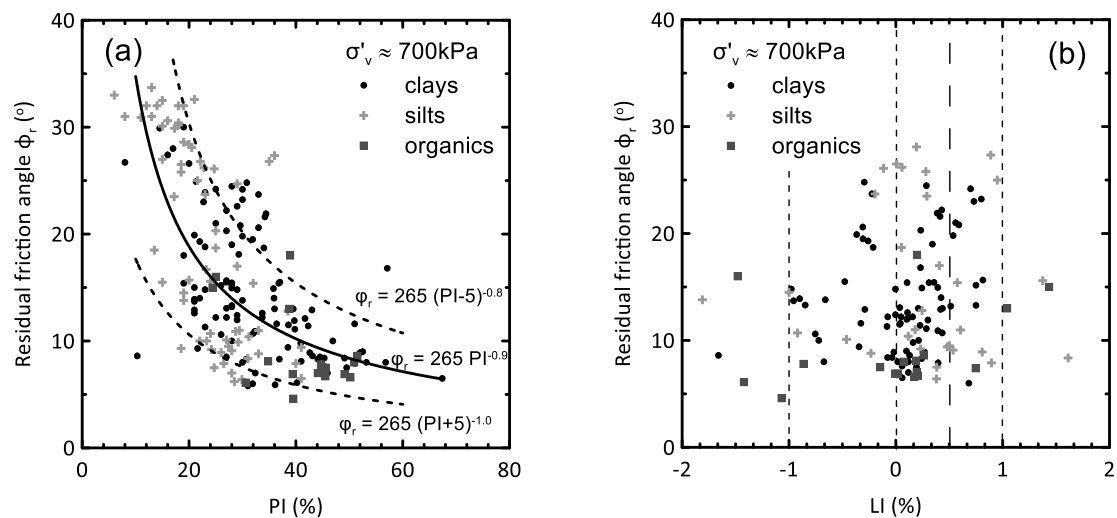
Τελικά, η Εικόνα 27(b) απεικονίζει τη σχέση των γωνιών τριβής με τον Δείκτη Υδαρότητας (LI). Δεν διακρίνεται κάποια ξεκάθαρη σχέση, όμως οι περισσότερες τιμές του LI βρίσκονται μεταξύ του 0 και του 0.5 σε συμφωνία με τα στατιστικά αποτελέσματα του Πίνακα 4.



Table 6 Μέση τιμή για την παραμένουσα γωνία τριβής ( $\sigma'_v=700\text{kPa}$ ) για όλα τα υλικά, για ευαίσθητες ( $\leq 15^\circ$ ) και μη-ευαίσθητες ( $>15^\circ$ ) ζώνες, μέγιστη γωνία τριβής και συνοχή για διάφορα ορυχεία βάσει δοκιμών τριαξονικής φόρτισης (Theocharis et al. 2021)

Parameter	$\phi_r$ ( $^\circ$ )			$\phi_r$ ( $^\circ$ ) $\leq 15$			$\phi_r$ ( $^\circ$ ) $>15$			$\phi'$ ( $^\circ$ )			$c'$ (kPa)		
	$\mu$	n	COV	$\mu$	n	COV	$\mu$	n	COV	$\mu$	n	COV	$\mu$	n	COV
	(-)	(-)	(%)	(-)	(-)	(%)	(-)	(-)	(%)	(-)	(-)	(%)	(-)	(-)	(%)
Amyntaio	14.9	9	62	8.9	6	25	26.8	3	4	-	-	-	-	-	-
Field 6	17.5	3	66	6.0	1	50	23.3	2	2	33.0	6	13	160	6	39
Kardia	13.9	3	70	7.7	21	55	24.8	12	16	-	-	-	-	-	-
Komnina	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28.7	14	13	41	14	84
Main Field	29.6	11	20	12.6	1	-	31.3	10	6	-	-	-	-	-	-
Mavropigi	16.8	5	50	11.9	32	43	22.6	27	27	28.1	7	28	221	7	67
Prosilio	-	-	-	-	-	-	-	-	-	26.3	3	31	32	3	86
South Field	14.0	6	51	9.8	40	38	21.6	22	19	-	-	-	-	-	-
Servia	-	-	-	-	-	-	-	-	-	41.0	40	20	242	40	43
Vevi	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27.9	17	26	-	-	-
Megalopoli	14.1	15	53	10.2	8	49	18.5	7	28	-	-	-	-	-	-

n: population,  $\mu$ : mean value, COV: coefficient of variation

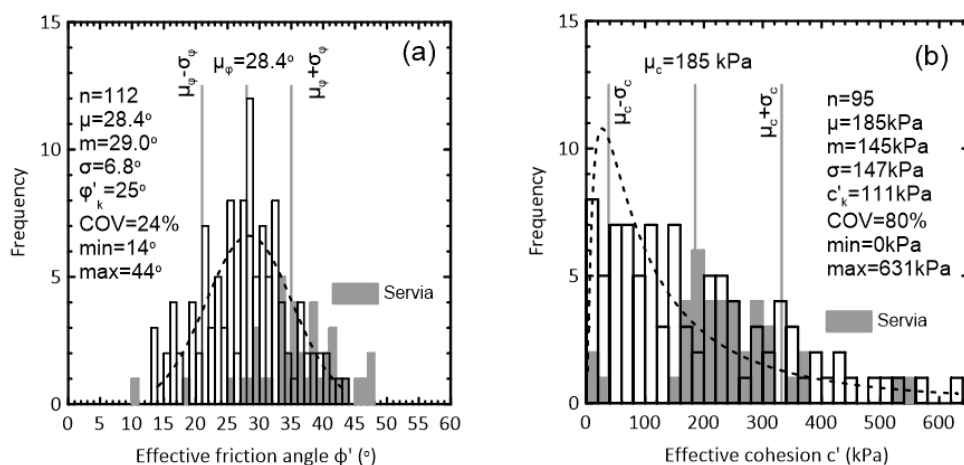


Εικόνα 27 Παραμένουσα γωνία τριβής με φυσικές ιδιότητες: (α) PI και (β) LI

### 3.4.2 Μέγιστη αντοχή

Η μέγιστη διατμητική αντοχή επηρεάζει σημαντικά την ευστάθεια. Στην παρουσία ευαίσθητης ζώνης, η μέγιστη αντοχή θα ήταν η πραγματική αντοχή των υπερκειμένων εδαφών (αντί της παραμένουσας αντοχής), δηλαδή όλων των εδαφικών σχηματισμών εκτός της ευαίσθητης ζώνης. Στο σενάριο ομογενούς

πρανούς, η μηχανική απόκριση του εδάφους προσομοιώνεται βάσει μόνο της μέγιστης αντοχής και όχι της παραμένουσας. Στη μελέτη των Theocharis et al. 2021, η μέγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους έχει υπολογιστεί κυρίως από δοκιμές τριαξονικής φόρτισης και δευτερευόντως από δοκιμές άμεσης διάτμησης. Στη δοκιμή τριαξονικής φόρτισης χρησιμοποιείται προηγμένη πειραματική συσκευή που μπορεί να ποσοτικοποιήσει την απόκριση ενός εδαφικού δείγματος σε τάσεις και παραμορφώσεις, ενώ η δοκιμή άμεσης διάτμησης ορισμένες φορές θεωρείται κατάλληλη για αναλύσεις ευστάθειας πρανών. Χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα από 22 δοκιμές τριαξονικής φόρτισης με στερεοποίηση και αποστράγγιση των δειγμάτων, από 130 δοκιμές τριαξονικής φόρτισης με στερεοποίηση και χωρίς αποστράγγιση των δειγμάτων (με μέτρηση της πίεσης των πόρων) και από 52 δοκιμές άμεσης διάτμησης. Το ορυχείο των Σερβίων παρουσιάζει σημαντικές διαφορές από τα υπόλοιπα ορυχεία, όπως φαίνεται παρακάτω. Οι Εικόνες 28 και 29 παρουσιάζουν τις τιμές της γωνίας τριβής και της συνοχής που αποκτήθηκαν από τις δοκιμές τριαξονικής φόρτισης και άμεσης διάτμησης. Τα αποτελέσματα διακρίνονται μεταξύ αυτών του ορυχείου των Σερβίων και των υπόλοιπων 10 ορυχείων.



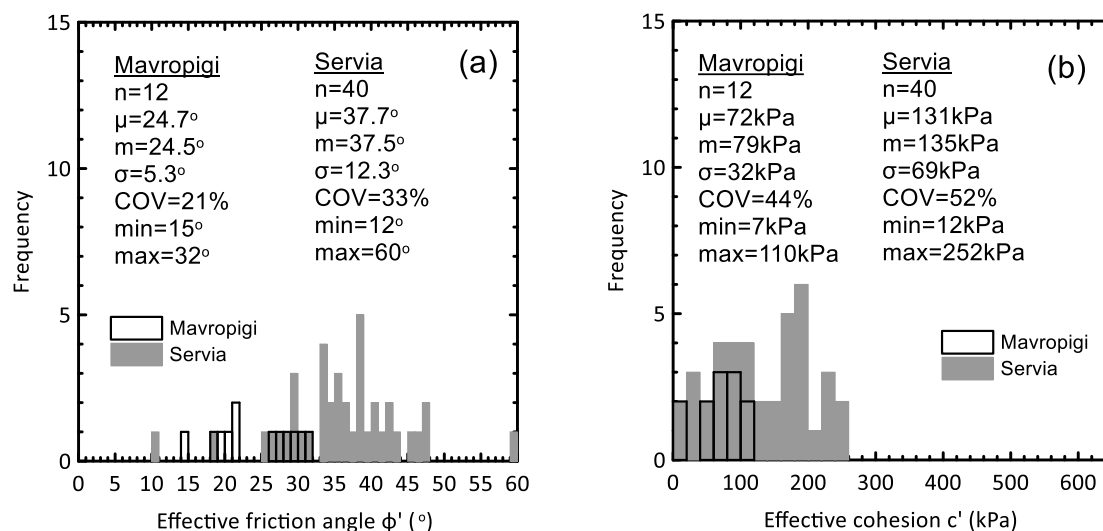
$n$ : population,  $\mu$ : mean value,  $m$ : median value,  $\sigma$ : standard deviation,  $k$ : characteristic value,  $COV$ : coefficient of variation

Εικόνα 28 Ιστόγραμμα (α) γωνίας τριβής και (β) συνοχής από δοκιμές τριαξονικής φόρτισης (τα στατιστικά που αναφέρονται αφορούν τα δέκα ορυχεία εξαιρουμένου του ορυχείου Σερβίων) (Theocharis et al. 2021)

Αρχικά, εστιάζουμε στα δέκα ορυχεία (εξαιρουμένου του ορυχείου των Σερβίων). Η κατανομή των τιμών της γωνίας τριβής από τις δοκιμές τριαξονικής φόρτισης πλησιάζει μία κανονική κατανομή με μέση τιμή  $28.4^\circ$ , με εύρος τιμών από  $14^\circ$  έως  $44^\circ$ , και Συντελεστή Μεταβλητότητας ( $COV$ ) = 24%. Παρ' όλο που το εύρος εμφανίζεται μεγάλο, τα περισσότερα αποτελέσματα (77 από τα 112 δείγματα, δηλαδή περίπου το 70%) βρίσκονται κοντά στον μέσο όρο με μία τυπική απόκλιση. Στα κύρια πλαίσια σχεδιασμού (δηλαδή Eurocode 7 (EC7) ή Load and Resistance

Factor Design (LRFD)), ο μέσος όρος δεν χρησιμοποιείται ευθέως για αναλύσεις και σχεδιασμό. Για παράδειγμα, το πλαίσιο του EC7 προτείνει την λεγόμενη χαρακτηριστική τιμή  $X_k$  μίας εδαφικής ιδιότητας. Ο Schneider (1997) έδειξε πως ένας κατάλληλος τρόπος προσέγγισης της  $X_k$  είναι με την αφαίρεση της μισής τυπικής απόκλισης από την μέση τιμή ( $X_k = \mu - 0.5\sigma$ ). Ο ορισμός αυτός έλαβε ευρεία αποδοχή στη γεωτεχνική επιστημονική κοινότητα (Orr and Farrell 2000). Οπότε, βάσει αυτού του ορισμού, η χαρακτηριστική τιμή της γωνίας τριβής είναι  $25.0^\circ$ .

Από την άλλη πλευρά, οι τιμές της συνοχής παρουσιάζουν μεγάλο εύρος (εξαιρουμένου του ορυχείου των Σερβίων), από 0 έως 631kPa, με μέση τιμή 185kPa, διάμεσο 145kPa και COV=80%. Το εύρος αυτό οφείλεται στη φύση της συνοχής, στα διαφορετικά υλικά και το εύρος των τάσεων που χρησιμοποιήθηκαν. Βάσει του ορισμού του Schneider, η χαρακτηριστική τιμή  $c_k$  πέφτει στα 111kPa, λαμβάνοντας υπόψιν ότι πολλά δείγματα εμφάνισαν χαμηλή ή μηδενική συνοχή.



n: population,  $\mu$ : mean value, m: median value,  $\sigma$ : standard deviation, k: characteristic value, COV: coefficient of variation

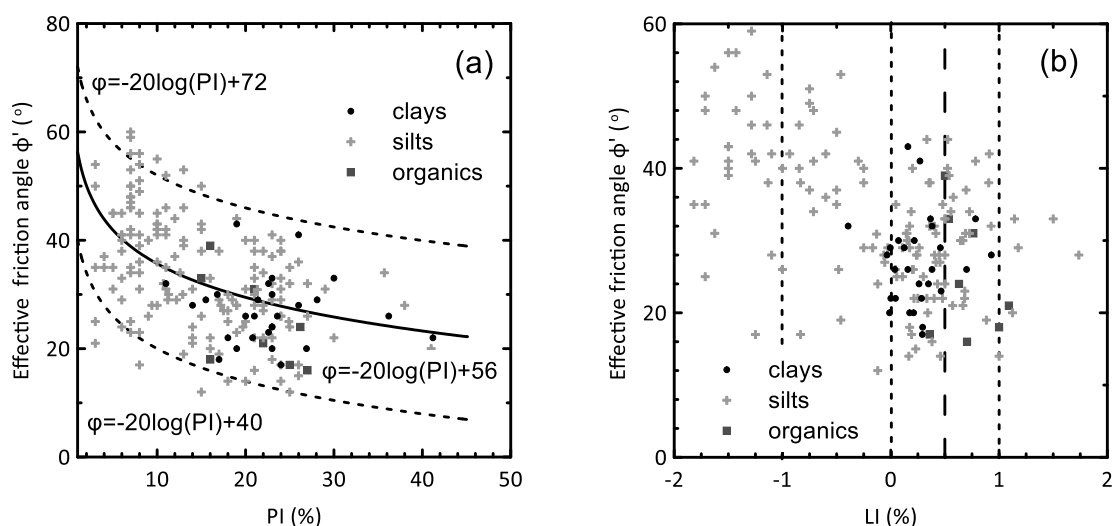
Εικόνα 29 Ιστόγραμμα (α) γωνίας τριβής και (β) συνοχής από δοκιμές άμεσης διάτμησης

Τα δείγματα που προήλθαν από το ορυχείο των Σερβίων παρουσιάζουν αξιοσημείωτες διαφορές από τα υπόλοιπα. Μόνο σε δείγματα από αυτό το ορυχείο, η μέση τιμή της μέγιστης γωνίας τριβής είναι  $41^\circ$  (σε σχέση με το  $28.4^\circ$  των υπόλοιπων δειγμάτων άλλων ορυχείων). Εάν η μέγιστη γωνία τριβής αξιολογείται βάσει δειγμάτων από κάθε ορυχείο (Πίνακας 6), γίνεται ακόμη πιο φανερό πως τα δείγματα αυτού του ορυχείου παρουσιάζουν σημαντικά μεγαλύτερες τιμές από τα άλλα. Τελικά, παρατηρούμε πως η παραμένουσα αντοχή των εδαφών στο ορυχείο των Σερβίων δεν ήταν διαθέσιμη και δεν χρησιμοποιήθηκε στην ενότητα 3.4.2 και τα

αποτελέσματα από τα δείγματα του ορυχείου των Σερβίων έχουν μικρή επιρροή στην ταξινόμηση και στα όρια των δεικτών.

Αποκτήθηκαν λίγα αποτελέσματα δοκιμών άμεσης διάτμησης και μόνο για δύο ορυχεία, της Μαυροπηγής και των Σερβίων. Αυτά εμφανίζουν διαφορετική κατανομή της γωνίας τριβής (Εικόνα 29(a)) αλλά είναι ανέφικτο να αξιολογηθούν ευθέως τα δεδομένα αυτά λόγω του μικρού τους πληθυσμού. Στο ορυχείο της Μαυροπηγής, η γωνία τριβής παρουσιάζει μέση τιμή  $24.7^\circ$  και τυπική απόκλιση  $5.3^\circ$  και στο ορυχείο των Σερβίων η γωνία τριβής παρουσιάζει μέση τιμή  $37.7^\circ$  και τυπική απόκλιση  $12.3^\circ$ . Η σύγκριση αυτή επιβεβαιώνει περαιτέρω την διαφορετική φύση των εδαφικών υλικών στο ορυχείο των Σερβίων. Εμφανίζεται μικρότερη μέση τιμή της συνοχής στις δοκιμές άμεσης διάτμησης απ' ότι στις δοκιμές τριαξονικής φόρτισης (72kPa έναντι 200kPa στο ορυχείο της Μαυροπηγής και 131kPa έναντι 242kPa στο ορυχείο των Σερβίων).

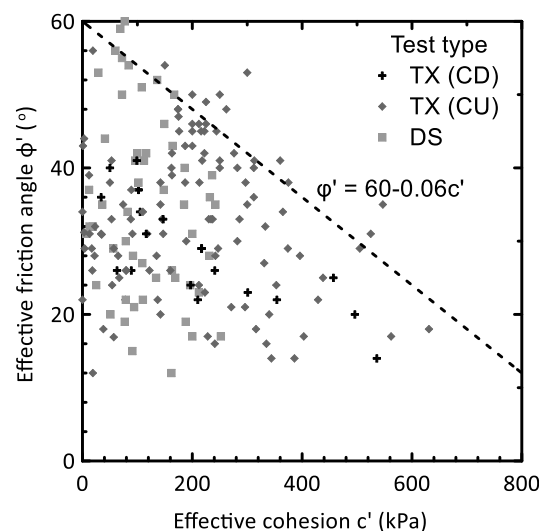
Συχνά χρησιμοποιούνται εμπειρικές σχέσεις για την εκτίμηση της μέγιστης γωνίας τριβής και των φυσικών ιδιοτήτων των εδαφικών υλικών και εξετάζονται στην παρούσα μελέτη. Η Εικόνα 30(a) απεικονίζει μία τέτοια σχέση μεταξύ της μέγιστης γωνίας τριβής και του Δείκτη Πλαστικότητας (PI). Να σημειωθεί πως σχεδόν όλες οι ιλύες με  $PI < 12\%$  προέρχονται από το ορυχείο των Σερβίων όμως δεν αλλάζουν την συνολική τάση. Παρατηρείται σημαντική διασπορά, όπως σε κάθε συσχέτισμό της μέγιστης γωνίας τριβής και των φυσικών παραμέτρων αυτής της μελέτης. Ως αποτέλεσμα, πολύ γνωστές σχέσεις (π.χ. Kulhawy and Mayne 1990, Lambe and Whitman 1969, Terzaghi et al. 1996) να μην ταιριάζουν στα παρατηρούμενα δεδομένα πολύ καλά.



Εικόνα 30 (α) Μέγιστη γωνία τριβής με τον Δείκτη Πλαστικότητας (PI) και (β) τον Δείκτη Υδαρότητας (LI) (Theocharis et al. 2021)

Ωστόσο, προτείνεται μια προσεγγιστική σχέση:  $\phi' = -20 \log(PI) + 56$ , η οποία πρέπει να εφαρμόζεται με προσοχή (Εικόνα 30(a)). Η σχέση αυτή παρουσιάζει μεγάλη διασπορά και δύναται να εφαρμοστεί μόνο σε προκαταρκτικές αναλύσεις με προσοχή στα όρια που παρουσιάζονται. Η Εικόνα 30(b) απεικονίζει την σχέση της μέγιστης γωνίας τριβής με τον Δείκτη Υδαρότητας, με τα δείγματα να ταξινομούνται προσεγγιστικά ως άργιλοι, ιλύες και οργανικά (βάσει του USCS), παρόμοια με την Εικόνα 27(b). Δεν μπορεί να διατυπωθεί συγκεκριμένη σχέση. Όλα τα σημεία με LI μικρότερο του -0.5 προέρχονται από δείγματα του ορυχείου των Σερβίων, απεικονίζοντας την διαφοροποίηση του από τα υπόλοιπα ορυχεία. Ουσιαστικά, τα δείγματα όλων των ορυχείων (εκτός των Σερβίων) παρουσιάζουν τιμές LI από -0.5 έως 1 και μέγιστη γωνία τριβής από 15° έως 45°. Τα δείγματα από το ορυχείο των Σερβίων παρουσιάζουν δείγματα με τιμές LI μικρότερες του -0.5 και μέγιστη γωνία τριβής από 15° έως 60°.

Τελικά, οι Theocharis et al. (2021) αξιολόγησαν διάφορους τύπους σχέσεων μεταξύ των γεωτεχνικών παραμέτρων (π.χ. γωνία τριβής και συνοχή, όρια Atterberg, ειδικό βάρος, περιεχόμενη υγρασία και ο δείκτης πόρων). Ωστόσο, δεν διατυπώθηκαν ισχυρές σχέσεις (εκτός αυτής της Εικόνας 25). Ενδεικτικά, ο συσχετισμός μεταξύ της μέγιστης γωνίας τριβής και της συνοχής αξιολογείται στην Εικόνα 31.



Εικόνα 31 Διασυσχέτιση μεταξύ μέγιστης γωνίας τριβής και συνοχής (Theocharis et al. 2021)

Η γωνία τριβής των φυσικών εδαφών μειώνεται με συνήθη τρόπο με τη μείωση της συνοχής, μία τάση που παρατηρείται επίσης εδώ. Ωστόσο, δεν διατυπώνεται κάποια σχέση αφού η διασπορά είναι υπερβολικά μεγάλη. Ένα ανώτερο όριο είναι το  $\phi' = 60 - 0.6c'$ , και όλοι οι συνδυασμοί γωνίας τριβής-συνοχής βρίσκονται κάτω από τη γραμμή αυτή, εμφανίζοντας συντελεστή γραμμικής σχέσης  $\rho = -0.21$ . Να σημειωθεί πως ο συντελεστής αυτός ειδικά για τις δοκιμές τριαξονικής φόρτισης CD ήταν -0.80 (22

δείγματα), ενώ για τις δοκιμές τριαξονικής φόρτισης CUPP ήταν -0.12 (130 δείγματα) και για τις δοκιμές άμεσης διάτμησης (DS) ήταν -0.23 (52 δείγματα).

### 3.5 Συμπεράσματα

Στη μελέτη των Theocharis et al. (2021), εδραιώθηκε μία εκτενής βάση δεδομένων γεωτεχνικών ερευνών από 11 ελληνικά λιγνιτωρυχεία, και τα αποτελέσματα αναλύθηκαν με στατιστικές μεθόδους και συνδυάστηκαν με παλαιότερη γνώση και εμπειρία. Το προτεινόμενο πλαίσιο παρέχει πληροφορίες για τα υπερκείμενα εδαφικά υλικά των σχετικών ορυχείων. Τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον προκαταρκτικό σχεδιασμό και να παρέχουν μία συνοπτική εικόνα των γεωτεχνικών ιδιοτήτων εδαφικών σχηματισμών που πρόκειται να συναντηθούν στο πεδίο. Άλλωστε, ακολουθώντας την ανάλυση αυτή, μπορούν να αποφευχθούν σημαντικά λάθη στον σχεδιασμό και την διαχείριση. Ωστόσο, πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν και η συγκεκριμένη γεωλογία (συμπεριλαμβανομένων των τεκτονικών), η στρωματογραφία και οι ιδιότητες του εδάφους του κάθε ορυχείου στην διαχείριση και τη λήψη σχεδιαστικών αποφάσεων.

Αρχικά οι φυσικές ιδιότητες των δειγμάτων που εξετάστηκαν, αναλύθηκαν σύμφωνα με γεωτεχνικά standards. Δείκτες και ιδιότητες ταξινόμησης περιγράφουν τα λεπτόκοκκα υλικά (ιλύες και άργιλοι), που εμφανίζονται συχνά στους γνωστούς γεωλογικούς σχηματισμούς των ελληνικών λιγνιτωρυχείων. Οι μέσες τιμές του LI και του PI είναι 54% και 18% αντίστοιχα. Η μέση τιμή του LI είναι κοντά στο 0. Αυτό δείχνει την ύπαρξη πλαστικού εδαφικού υλικού κοντά στην ημιστερεή κατάσταση. Παρ' όλα αυτά, το LI παρουσιάζει εξαιρετικά μεγάλο εύρος τιμών και μεγάλο COV.

Ακόμη, χρησιμοποιήθηκαν δύο σενάρια κρίσιμης ευστάθειας πρανών λιγνιτωρυχείων για να οριστεί το πλαίσιο της ανάλυσης: (i) πρανές με εμφάνιση ευαίσθητης ζώνης χαμηλής αντοχής, (ii) ομογενές πρανές. Η παραμένουσα αντοχή είναι η κύρια παράμετρος για το σενάριο της ευαίσθητης ζώνης, και η μέγιστη αντοχή για το σενάριο του ομογενούς πρανούς. Η αντοχή του εδάφους αξιολογείται με δοκιμές δακτυλιοειδούς δοκιμίων για την παραμένουσα διατμητική αντοχή (παραμένουσα γωνία τριβής) και με δοκιμές τριαξονικής φόρτισης και άμεσης διάτμησης για την μέγιστη αντοχή (μέγιστη γωνία τριβής και συνοχή).

Οι μετρήσεις δείχνουν πως πολλά εδαφικά στρώματα παρουσιάζουν πολύ μικρή παραμένουσα αντοχή-γωνία τριβής με τιμές από 4.6° έως 15° και αντιστοιχούν στην ευαίσθητη ζώνη. Αντιθέτως, για όλες τις περιπτώσεις, υπολογίζεται η υψηλότερη τιμή της παραμένουσας αντοχής. Ακόμη, η μέγιστη γωνία που υπολογίστηκε από δοκιμές τριαξονικής φόρτισης παρουσιάζει μέση τιμή 28.4° με τα περισσότερα αποτελέσματα να βρίσκονται κοντά στη μέση τιμή με μία τυπική απόκλιση. Η χαρακτηριστική τιμή, όπως ορίζεται από τον Eurocode 7, γίνεται 25.0°. Η συνοχή,

βάσει των δοκιμών τριαξονικής φόρτισης, παρουσιάζει μεγάλο εύρος από 0 έως 631kPa με μέση τιμή 185kPa, και χαρακτηριστική τιμή 84kPa (αναδεικνύοντας το γεγονός πως υπάρχουν πολλά δείγματα με μηδενικές ή χαμηλές τιμές). Τα δείγματα ενός ορυχείου (Σέρβια) παρουσιάζουν συνολικά διαφορετικές αντοχές, σημαντικά μεγαλύτερες από τα υπόλοιπα ορυχεία. Οπότε, αξιολογείται ξεχωριστά εμφανίζοντας μέση τιμή γωνίας τριβής 45° και μέση τιμή συνοχής 242kPa.

Τελικά, αξιολογήθηκαν μερικές κατανομές μεταξύ γεωτεχνικών παραμέτρων. Όλες οι σχέσεις μεταξύ φυσικών και μηχανικών παραμέτρων παρουσιάζουν μεγάλη διασπορά και δεν παρατηρούνται ουσιαστικοί συσχετισμοί. Ωστόσο, προτείνονται σχέσεις για την προσεγγιστική εκτίμηση της παραμένουσας και της μέγιστης γωνίας τριβής. Αυτές οι σχέσεις παρουσιάζουν γενικές τάσεις και μπορούν να εφαρμοστούν σε προκαταρκτική ανάλυση με την απαραίτητη προσοχή.

Η μελέτη αυτή στοχεύει στη δημιουργία ενός πλαισίου για την ανάλυση ευστάθειας σε λιγνιτωρυχεία για την προκαταρκτική ανάλυση και το σχεδιασμό ειδικά όταν υπάρχει έλλειψη δεδομένων από γεωτεχνική έρευνα πεδίου. Τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των ελληνικών λιγνιτωρυχείων αξιολογήθηκαν βάσει μίας εκτενούς βάσης δεδομένων από αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών. Ο χαρακτηρισμός αυτός σχετίζεται με την ευστάθεια πρηνών των ορυχείων, την ολική ευστάθεια και τη γεωτεχνική ανάλυση των περιοχών εξόρυξης κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους αλλά και μετά την παύση της εκμετάλλευσης.

## 4 ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ

### 4.1 Εισαγωγή – Διατύπωση προβλήματος

Στην ενότητα αυτή θα πραγματοποιηθούν παραμετρικές αναλύσεις ευστάθειας πρανούς συγκεκριμένης γεωμετρίας και διαστάσεων με το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό την ύπαρξη μίας ή πολλαπλών ευαίσθητων ζωνών (όπως αυτές περιγράφηκαν στις προηγούμενες ενότητες).

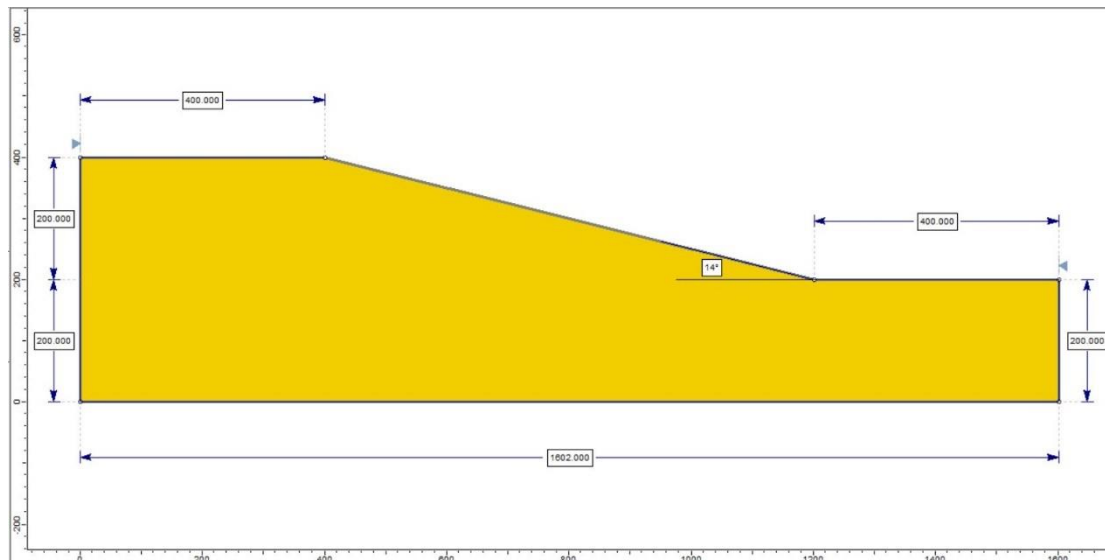
Σκοπός των αναλύσεων αυτών είναι η εκτίμηση των Συντελεστών Ασφαλείας για τις επιμέρους περιπτώσεις και παραμέτρους που θα μελετηθούν όπως επίσης η παρατήρηση του τύπου και της γεωμετρίας των επιφανειών αστοχίας. Επιπλέον θα συγκριθούν τα αποτελέσματα αυτά με στόχο να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την επικινδυνότητα της κάθε περίπτωσης όπως επίσης θα σχολιαστούν οι μέθοδοι και οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν.

Η γεωμετρία η οποία επιλέγεται έχει τα εξής χαρακτηριστικά :

- Ύψος πρανούς εκσκαφής = 200 m
- Οριζόντια απόσταση πίσω από την στέψη του πρανούς = 400 m
- Οριζόντια απόσταση μπροστά από τον πόδα του πρανούς = 400 m
- Κλίση πρανούς =  $14^\circ$
- Συνολικό μήκος γεωμετρίας = 1602 m

Η τομή που θα μελετηθεί επεκτείνεται εκατέρωθεν 200 m κατακόρυφα για να προσομοιωθεί το υπέδαφος της εκσκαφής. Τα παραπάνω στοιχεία φαίνονται και στην Εικόνα 32.





Εικόνα 32 Διαστασιολόγηση της προς μελέτης γεωμετρίας της εκσάφης

Στην παραπάνω γεωμετρία ελέγχουμε την ύπαρξη ευαίσθητης ζώνης (μία ή περισσότερες) πάχους 2 m με προσανατολισμό άλλοτε οριζόντιο και άλλοτε κεκλιμένο ( $6^\circ$  δεξιόστροφα από την οριζόντια διεύθυνση). Η ευαίσθητη ζώνη αυτή θα ξεκινά στο ύψος του πόδα του πρανούς. Θα εξεταστούν περιπτώσεις στις οποίες η ευαίσθητη ζώνη θα ξεκινά σε υψομετρική διαφορά +100 m ή -100 m από τον πόδα του πρανούς όπως επίσης και η ταυτόχρονη ύπαρξη πολλαπλών ευαίσθητων ζωνών.

Από άποψη στρωματογραφίας, ορίζουμε πως κάτω από την χαμηλότερη υψομετρικά αδύναμη ζώνη θα βρίσκεται βραχώδες υπόστρωμα υψηλής αντοχής και πάνω από αυτή στρώμα υπερκειμένων υλικών.

Οι μέσες τιμές των κύριων παραμέτρων της αντοχής των στρωμάτων δίνονται παρακάτω :

- Υπερκείμενα : Μέσο ειδικό βάρος  $\gamma = 17.2 \text{ kN/m}^3$ , μέση τιμή γωνίας τριβής  $\mu = \phi = 28.4^\circ$  (τυπική απόκλιση  $\sigma = 6.8^\circ$ ), και μέση τιμή συνοχής  $c = 185 \text{ kPa}$  (τυπική απόκλιση  $\sigma = 147 \text{ kPa}$ ).
- Ευαίσθητη ζώνη : Μέσο ειδικό βάρος  $\gamma = 17.2 \text{ kN/m}^3$ , μέση τιμή γωνίας τριβής  $\mu = \phi_z = 10^\circ$  (τυπική απόκλιση  $\sigma = 2.7^\circ$ ), και συνοχή  $c = 0$ .
- Βραχώδες υπόβαθρο : Μέσο ειδικό βάρος  $\gamma = 17.2 \text{ kN/m}^3$ , μέση τιμή γωνίας τριβής  $\mu = \phi = 35^\circ$  και συνοχή  $c = 185 \text{ kPa}$ .

Τα δεδομένα επιλέχθηκαν από την εργασία των Theocharis et al. (2021).

Στις επόμενες ενότητες περιγράφονται οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για κάθε διαφορετική θέση της ευαίσθητης ζώνης και τις διάφορες τιμές των παραμέτρων. Με την εύρεση των επιφανειών αστοχίας και τον υπολογισμό των συντελεστών ασφαλείας για κάθε σενάριο καταλήγουμε σε ορισμένα συμπεράσματα τα οποία θα σχολιαστούν ακολούθως.

Τέλος, για την εύρεση των σύνθετων μη κυκλικών επιφανειών αστοχίας που αναμένονται χρησιμοποιήθηκε κυρίως η μέθοδος Cuckoo σε συνδυασμό με τη μέθοδο Bishop Simplified για την εκτίμηση των ελάχιστων Συντελεστών Ασφαλείας. Σε ορισμένες περιπτώσεις πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις με άλλες μεθόδους με στόχο τη σύγκριση των αντίστοιχων αποτελεσμάτων της κάθε μίας.

## 4.2 Ανάλυση ευστάθειας με το πρόγραμμα Slide2 της Rocscience

Για τις αναλύσεις που θα πραγματοποιήσουμε χρησιμοποιείται το πρόγραμμα Slide2 της RocScience. Πρόκειται για ένα λογισμικό γεωτεχνικής μηχανικής που χρησιμοποιεί τη μέθοδο οριακής ισορροπίας σε δύο διαστάσεις, για την ανάλυση ευστάθειας εδαφικών ή βραχωδών πρηνών. Το συγκεκριμένο λογισμικό υπολογίζει τον συντελεστή ασφαλείας αλλά και την πιθανότητα αστοχίας, σε κυκλικές και σύνθετες επιφάνειες αστοχίας ενός πρηνούς. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας θα χρειαστεί να υπολογιστούν συντελεστές ασφαλείας σύνθετων επιφανειών αστοχίας εδαφικών πρηνών που προσομοιάζουν λιγνιτικές εκσκαφές. Οι μέθοδοι που θα χρησιμοποιηθούν για τις αναλύσεις στις επόμενες ενότητες περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω.

Σαν μέθοδοι εύρεσης των κρίσιμων επιφανειών αστοχίας θα χρησιμοποιηθούν οι μέθοδοι Cuckoo και Simulated Annealing. Επιλέγονται αυτές τις μέθοδοι αφού πρόκειται για μεθόδους που εξετάζουν μη-κυκλικές επιφάνειες αστοχίας (χαρακτηριστικές των ελληνικών λιγνιτωρυχείων). Επίσης πρόκειται για μεθόδους εύκολες στη χρήση, οι οποίες δίνουν αποτελέσματα σε μικρό χρονικό διάστημα και με ικανοποιητική ακρίβεια.

- Μέθοδος Cuckoo : Η μέθοδος αυτή λειτουργεί με ακρίβεια σε προσομοιώματα όλων των τύπων, τις περισσότερες φορές παράγει βέλτιστα αποτελέσματα σε χρονικό διάστημα μερικών δευτερολέπτων. Από την άλλη, είναι μία μέθοδος που δεν απαιτεί εισαγωγή δεδομένων από τον χρήστη όμως αυτό περιορίζει τον βαθμό ελέγχου του χρήστη σε ορισμένες παραμέτρους. Πρόκειται για μέθοδο τύπου «μαύρου κουτιού» (Black box method).
- Μέθοδος Simulated Annealing : Η μέθοδος αυτή έχει όλα τα θετικά στοιχεία της Cuckoo όμως παράγει αποτελέσματα σε λίγο μεγαλύτερο χρονικό διάστημα από την Cuckoo. Επιπλέον οι παράμετροι ελέγχου της δεν έχουν φυσική συσχέτιση με το πρηνές. Είναι ακόμη μία μέθοδος τύπου «μαύρου κουτιού».

Θα χρησιμοποιήσουμε επίσης το Sensitivity Analysis του Slide2 για να εξετάσουμε αν υπάρχει σημαντική διαφορά ανάμεσα στα αποτελέσματα μίας ανάλυσης ευαισθησίας σαν αυτή και σε αντίστοιχες χειροκίνητες αναλύσεις. Πρόκειται για μία ανάλυση που εκτιμά την επίδραση μίας παραμέτρου ( $\gamma$ ,  $c$  και  $\phi$ ), η οποία μπορεί να θεωρηθεί και ως τυχαία μεταβλητή, στον καθορισμό του συντελεστή ασφαλείας.

### 4.3 Αναλύσεις ευστάθειας με την ύπαρξη μίας ευαίσθητης ζώνης

Στις επόμενες υποενότητες θα εξεταστεί η παραπάνω γεωμετρία όταν επιδρά στην ευστάθεια της μία ευαίσθητη ζώνη. Σε πρώτη φάση θα ελέγξουμε πως επηρεάζει την ευστάθεια της εκσκαφής η αλλαγή των παραμέτρων της αντοχής του υλικού των υπερκειμένων στην περίπτωση ύπαρξης μίας οριζόντιας ή κεκλιμένης ( $\beta=6^\circ$ ) ευαίσθητης ζώνης που περνά από τον πόδα του πρανούς. Ακολούθως, θα ελέγξουμε πως επηρεάζεται η ευστάθεια για διαφορετικές τιμές της γωνίας τριβής του υλικού της ευαίσθητης ζώνης όταν αυτή έχει οριζόντια ή κεκλιμένη διεύθυνση και διέρχεται είτε από τον πόδα του πρανού ή είναι μετατοπισμένη 100 m χαμηλότερα ή ψηλότερα από το σημείο αυτό.

Σε κάθε περίπτωση θα υπολογιστούν οι Συντελεστές Ασφαλείας των επιφανειών αστοχία με τις μεθόδους Cuckoo και Bishop Simplified και θα παρασταθούν σε διαγράμματα για την καλύτερη σύγκριση τους. Εκτός από χειροκίνητες παραμετρικές αναλύσεις θα διεξάγουμε τις ίδιες αναλύσεις χρησιμοποιώντας το Sensitivity Analysis tool του Slide2 με σκοπό να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα των δύο εναλλακτικών.

Όλες οι αναλύσεις εκτελούνται σε ξηρές συνθήκες.

#### 4.3.1 Έλεγχος ευστάθειας για διάφορες τιμές των παραμέτρων $c$ και $\phi$ των υπερκειμένων

Στη παρούσα ενότητα θα εκτιμήσουμε τους Συντελεστές Ασφαλείας που προκύπτουν από τις χειροκίνητες αναλύσεις με τη χρήση των μεθόδων Cuckoo και Bishop Simplified αλλάζοντας τις τιμές των παραμέτρων  $c$  και  $\phi$  των υπερκειμένων.

Για οριζόντια ( $\beta=0^\circ$ ) ευαίσθητη ζώνη που τέμνει το πρανές στον πόδα, θα επιλέξουμε τις μέσες τιμές των παραμέτρων αντοχής των υλικών της ευαίσθητης ζώνης και του βραχώδους υπόβαθρου. Για τα υπερκείμενα, με μέση τιμή του  $\phi = 28.4^\circ$  θα εκτιμήσουμε τους Συντελεστές Ασφαλείας για :

$$c_1 = 185 \text{ kPa} = \mu \quad c_2 = \mu - 0.5 \sigma = 111.5 \text{ kPa} \quad c_3 = \mu - 1.0 \sigma = 38 \text{ kPa} \quad c_4 = 0$$

Όπου  $\sigma = 147 \text{ kPa}$  (τυπική απόκλιση).

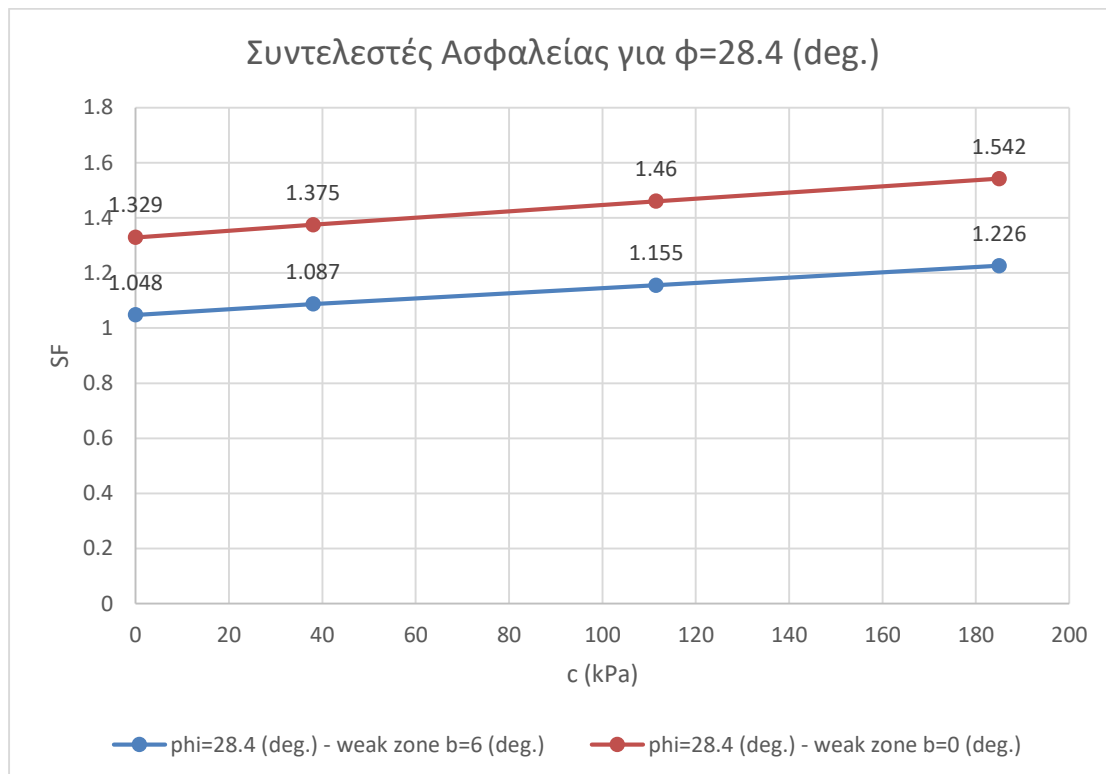
Στη συνέχεια θα εκτιμήσουμε τους Συντελεστές Ασφαλείας έχοντας σταθερή την μέση τιμή της συνοχής  $c = 185 \text{ kPa}$  και :

$$\phi_1 = 28.4^\circ \quad \phi_2 = \mu - 0.5 \sigma = 25^\circ \quad \phi_3 = \mu - 1.0 \sigma = 21.6^\circ \quad \phi_4 = \mu - 1.5 \sigma = 18.2^\circ \quad \phi_5 = \mu - 2.0 \sigma = 14.8^\circ$$

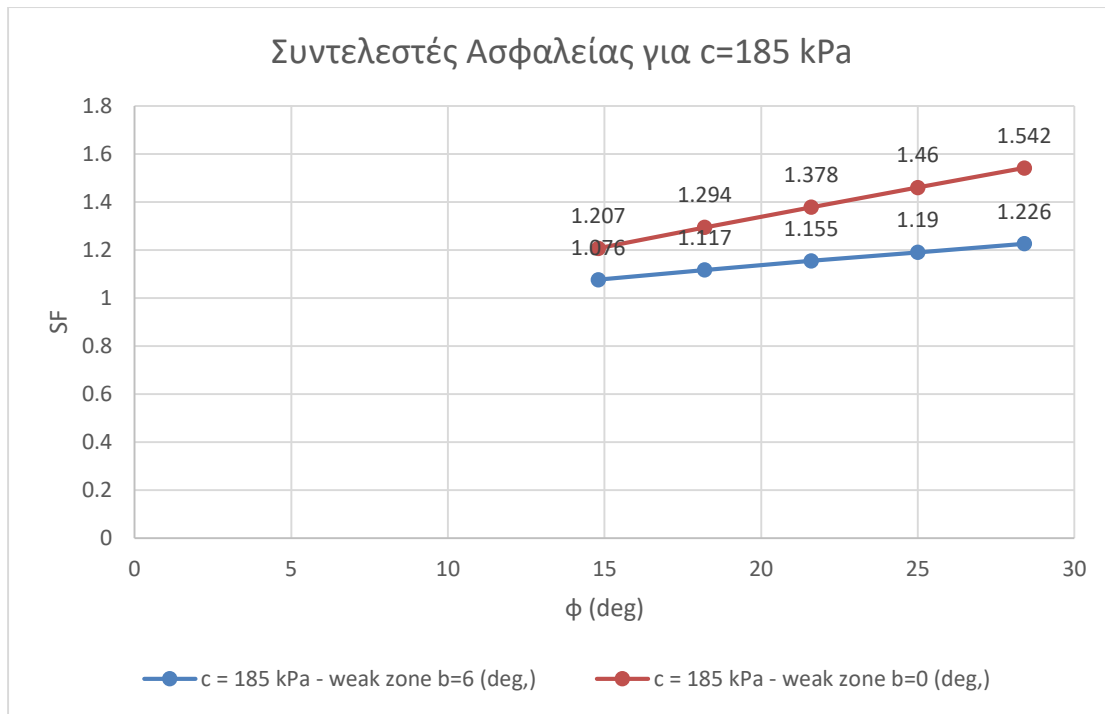
Όπου  $\sigma = 6.8^\circ$  (τυπική απόκλιση).

Οι αναλύσεις για τις ίδιες τιμές παραμέτρων θα διεξαχθούν και για την περίπτωση κεκλιμένης ευαίσθητης ζώνης με κλίση  $\beta = 6^\circ$  που διέρχεται από τον πόδα του πρηνούς.

Συγκρίνονται οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας πρώτα για σταθερή την τιμή του  $\phi=28.4^\circ$  και στην συνέχεια για σταθερή τιμή του  $c=185$  kPa. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα αντίστοιχα διαγράμματα της Εικόνας 33 και 34.



Εικόνα 33 Συντελεστές Ασφαλείας για οριζόντια και κεκλιμένη ευαίσθητη ζώνη όταν  $\phi=28.4$  (deg.)



Εικόνα 34 Συντελεστές Ασφαλείας για οριζόντια και κεκλιμένη ευαίσθητη ζώνη όταν c=185 kPa

Παρατηρούμε πως σε κάθε σενάριο οι αναλύσεις που έγιναν για την οριζόντια ευαίσθητη ζώνη παράγουν μεγαλύτερους συντελεστές ασφαλείας απ' ότι για την κεκλιμένη. Επιπλέον βλέπουμε πως οι αλλαγές στις παραμέτρους της αντοχής των υπερκειμένων δεν επηρεάζουν ιδιαίτερα έντονα τις τιμές των Συντελεστών Ασφαλείας και συνεπώς την ευστάθεια.

#### 4.3.2 Έλεγχος ευστάθειας για διάφορες τιμές της παραμέτρου $\phi_z$ της ευαίσθητης ζώνης ( $\beta=0^\circ$ ) σε εναλλακτικές υψομετρικές θέσεις

Θα υπολογίσουμε τους Συντελεστές Ασφαλείας που προκύπτουν από τις χειροκίνητες αναλύσεις με τη χρήση των μεθόδων Cuckoo και Bishop Simplified αλλάζοντας τις τιμές της παραμέτρου  $\phi_z$  για τις περιπτώσεις όπου η ευαίσθητη ζώνη ( $\beta=0^\circ$ ) βρίσκεται στο ύψος του πόδα του πρανού, 100 m ψηλότερα και 100 m χαμηλότερα από αυτόν.

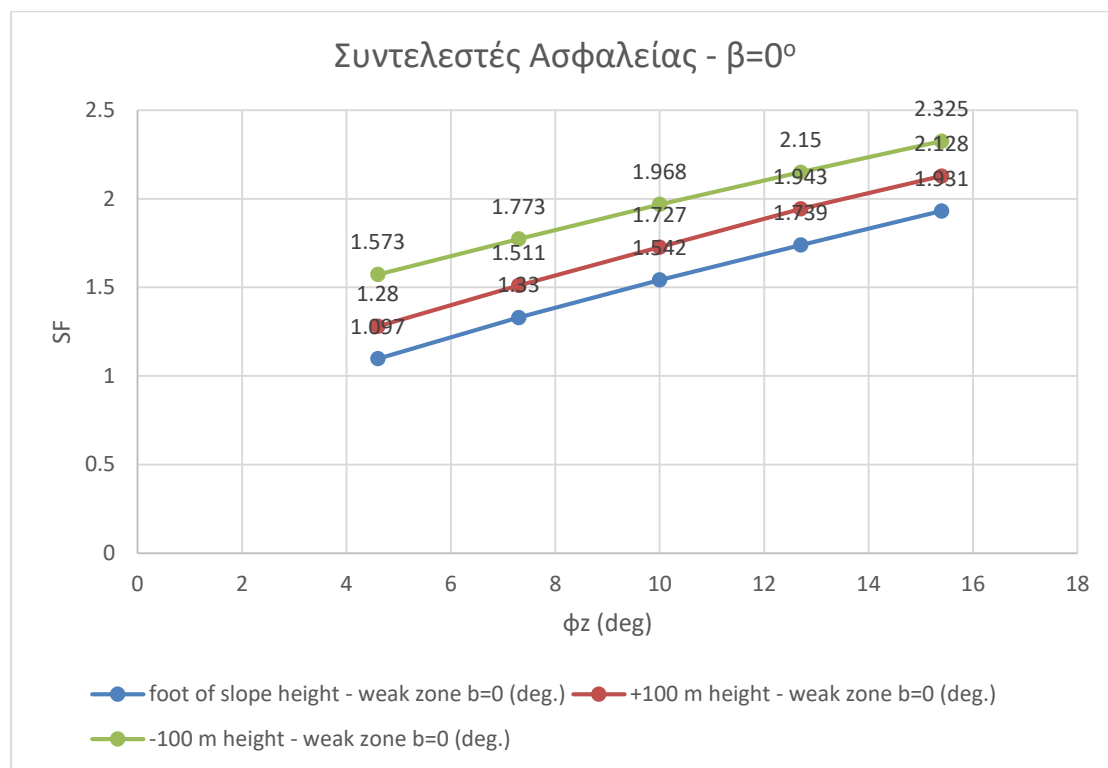
Οι παράμετροι αντοχής των υπερκειμένων και του βραχώδους υποστρώματος θα λάβουν τις μέσες τιμές τους ενώ η γωνία τριβής του υλικού της ευαίσθητης ζώνης  $\phi_z$  θα λάβει τις παρακάτω τιμές :

$$\phi_{z1} = \mu - 2 \sigma = 4.6^\circ \quad \phi_{z2} = \mu - 1 \sigma = 7.3 \quad \phi_{z3} = 10^\circ = \mu \quad \phi_{z4} = \mu + 1 \sigma = 12.7$$

$$\phi_{z5} = \mu + 2 \sigma = 15.4^\circ$$

Όπου  $\sigma = 2.7^\circ$  (τυπική απόκλιση).

Συγκρίνονται οι τιμές των συντελεστών ασφαλείας για κάθε διαφορετική υψομετρική θέση της ευαίσθητης ζώνης στο παρακάτω διάγραμμα της Εικόνας 35.



Εικόνα 35 Συντελεστές Ασφαλείας σε τρεις υψομετρικά διακριτές θέσεις της ευαίσθητης ζώνης για διάφορες τιμές της παραμέτρου  $\phi_z$

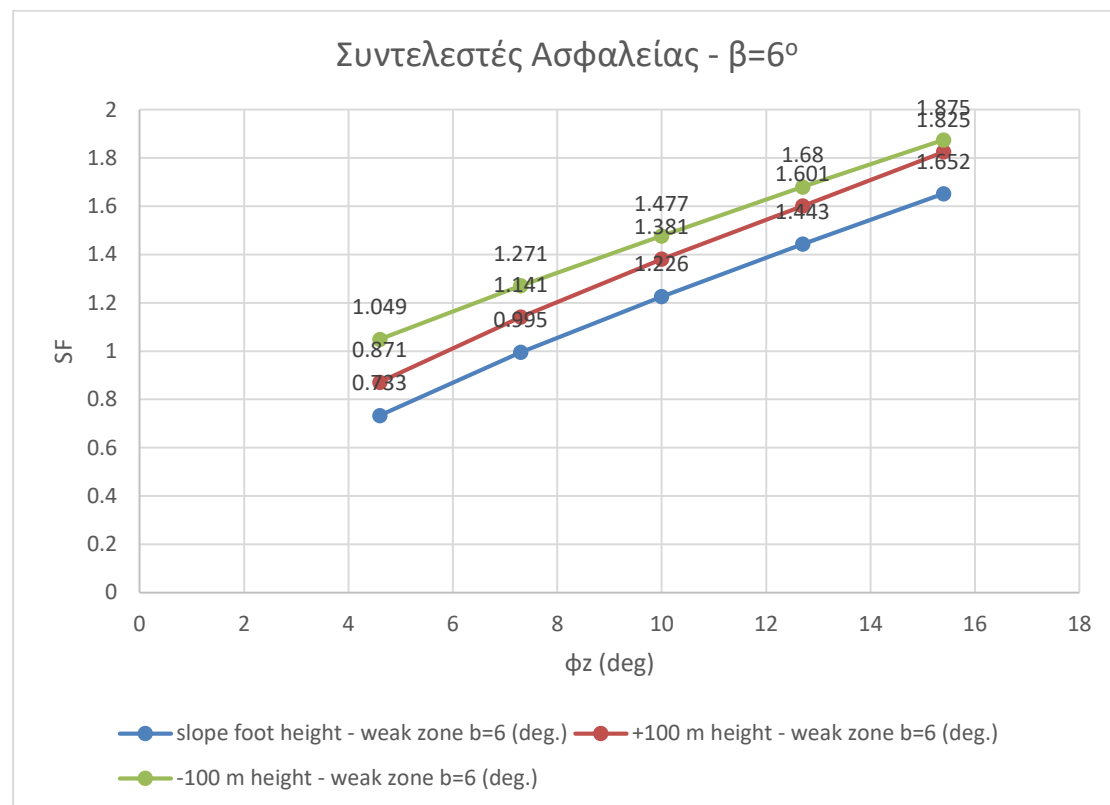
Φαίνεται πως οι συντελεστές ασφαλείας για την περίπτωση όπου η ευαίσθητη ζώνη βρίσκεται στο ύψος του πόδα του πρανούς εμφανίζουν μικρότερες τιμές από τις υπόλοιπες περιπτώσεις.

#### 4.3.3 Έλεγχος ευστάθειας για διάφορες τιμές της παραμέτρου $\phi_z$ της ευαίσθητης ζώνης ( $\beta=6^\circ$ ) σε εναλλακτικές υψομετρικές θέσεις

Θα υπολογίσουμε τους Συντελεστές Ασφαλείας που προκύπτουν από τις χειροκίνητες αναλύσεις με τη χρήση των μεθόδων Cuckoo και Bishop Simplified αλλάζοντας τις τιμές της παραμέτρου  $\phi_z$  για τις περιπτώσεις όπου η κεκλιμένη ευαίσθητη ζώνη ( $\beta=6^\circ$ ) βρίσκεται στο ύψος του πόδα του πρανούς, 100 m ψηλότερα και 100 m χαμηλότερα από αυτόν.

Οι τιμές των παραμέτρων της αντοχής των υλικών της εκσκαφής είναι οι ίδιες με της παραπάνω ενότητας και οι αναλύσεις που θα πραγματοποιηθούν για την εκτίμηση των Συντελεστών Ασφαλείας θα γίνουν για τις ίδιες τιμές  $\phi_z$ .

Συγκρίνονται οι τιμές των συντελεστών ασφαλείας για κάθε διαφορετική υψομετρική θέση της ευαίσθητης ζώνης στο παρακάτω διάγραμμα της Εικόνας 36.



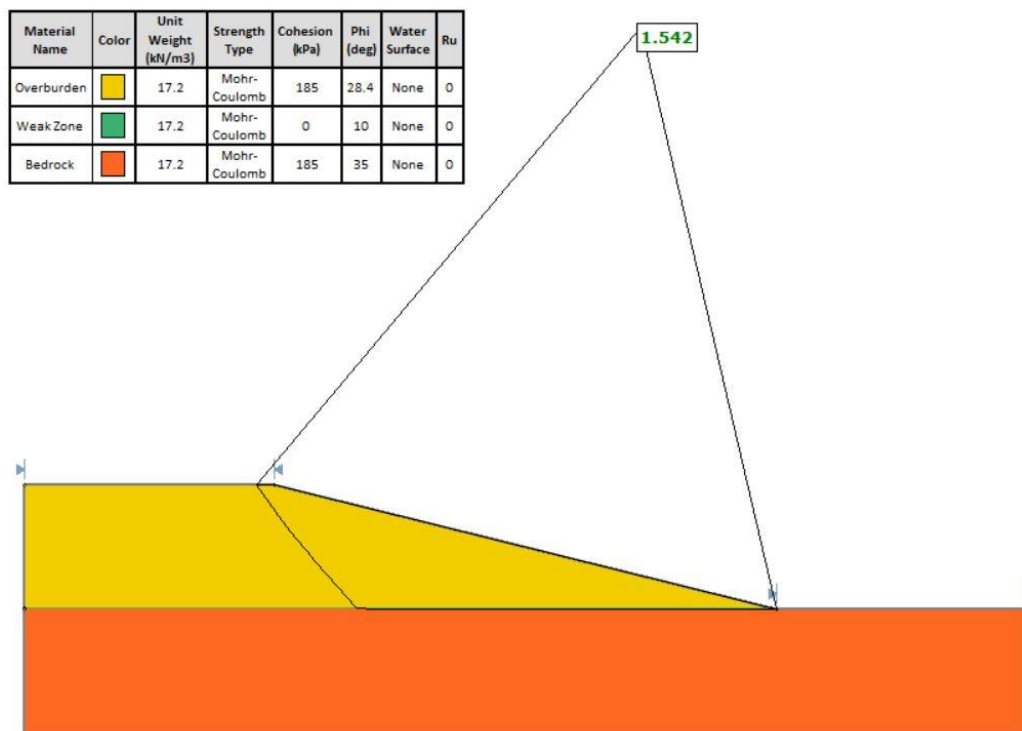
Εικόνα 36 Συντελεστές Ασφαλείας σε τρεις υψομετρικά διακριτές θέσεις της ευαίσθητης ζώνης για διάφορες τιμές της παραμέτρου  $\phi_z$

Παρατηρούμε πως στην περίπτωση ύπαρξης κεκλιμένης ευαίσθητης ζώνης οι παραγόμενοι συντελεστές ασφαλείας είναι μικρότεροι και συνεπώς η περίπτωση αυτή είναι πιο επικίνδυνη από μεριάς ευστάθειας. Επίσης βλέπουμε πως και εδώ, όταν η ευαίσθητη ζώνη διέρχεται από τον πόδα του πρανούς, έχουμε τους μικρότερους συντελεστές ασφαλείας για κάθε αντίστοιχη τιμή του  $\phi_z$ .

#### 4.3.4 Σύνοψη αποτελεσμάτων

Βασισμένοι στα αποτελέσματα των παραπάνω αναλύσεων για την ύπαρξη μίας αδύναμης ζώνης παρατηρούμε πως οι εμφανιζόμενες επιφάνειες αστοχίας ακολουθούν την σύνθετη γεωμετρία που περιγράφηκε στα προηγούμενα κεφάλαια.

Ακολουθεί δηλαδή την ευαίσθητη ζώνη για κάποιο μήκος και τέμνει πίσω από τη στέψη του πρανούς σχεδόν κατακόρυφα. Μια τυπική επιφάνεια αστοχίας από εκείνες που εξετάσαμε στις παραπάνω αναλύσεις είναι αυτή που φαίνεται στην Εικόνα 37.

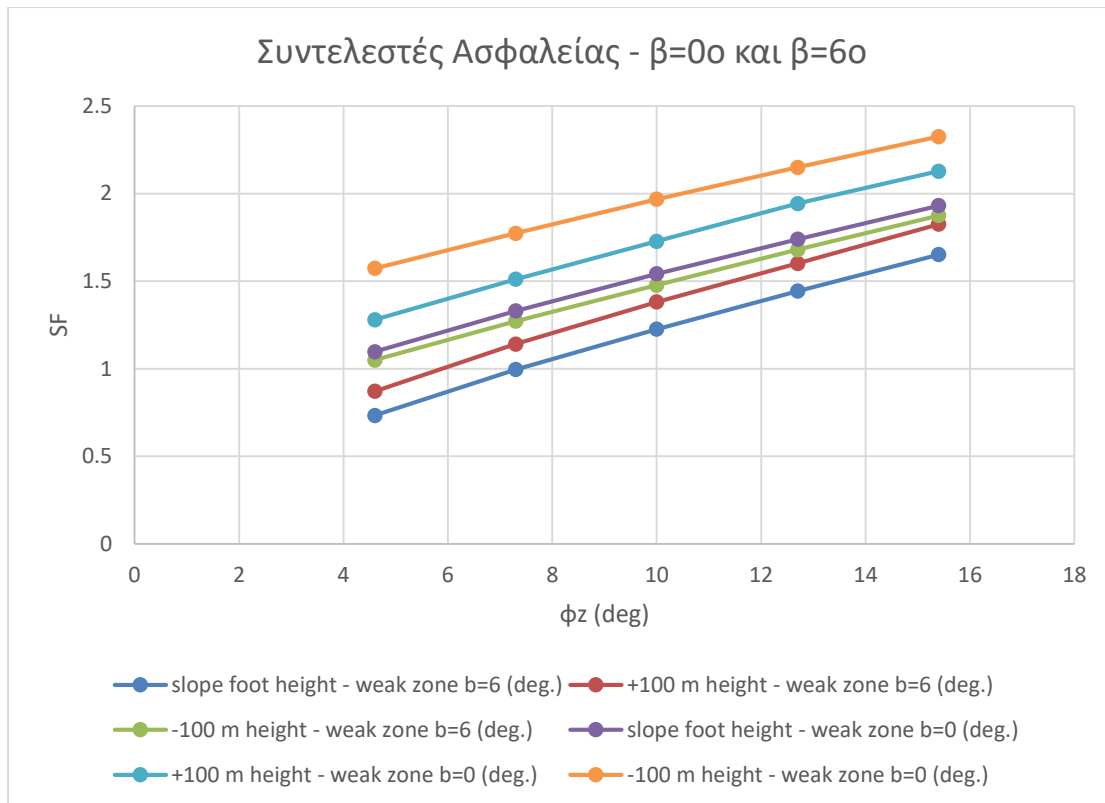


Εικόνα 37 Σύνθετη επιφάνεια αστοχίας για οριζόντια ευαίσθητη ζώνη που διέρχεται από τον πόδα του πρανούς (μέσες τιμές των παραμέτρων αντοχής των υλικών της εκσκαφής)

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί πως χρησιμοποιήθηκε δεύτερο ζευγάρι ορίων για τον περιορισμό της ανάλυσης σε σύνθετες επιφάνειες αστοχίας όπου ξεκινούν πίσω από την στέψη του και καταλήγουν σε σημείο κοντά στον πόδα. Αυτό έγινε διότι σε ορισμένες περιπτώσεις οι αναλύσεις κατέληγαν σε πολύ επιφανειακές και μικρές αστοχίες (επιφάνειες με τον μικρότερο συντελεστή ασφαλείας), αντικείμενο το οποίο δεν εξετάζεται στην παρούσα εργασία.

Παρακάτω φαίνεται το συγκεντρωτικό διάγραμμα των αποτελεσμάτων των αναλύσεων για διαφορετικές υψομετρικές θέσεις οριζόντιων και κεκλιμένων ευαίσθητων επιφανειών με διακριτές τιμές της παραμέτρου  $\phi_z$ .



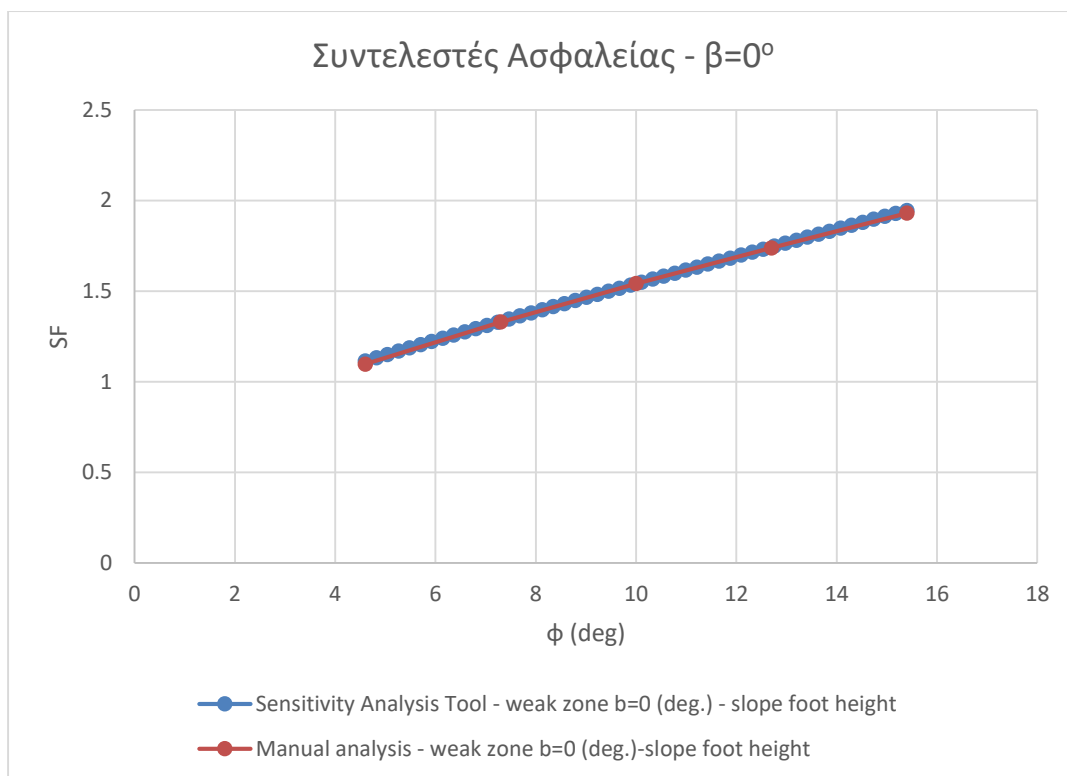


**Εικόνα 38 Συγκεντρωτικό διάγραμμα αναλύσεων για πολλαπλές υψομετρικές θέσεις της ευαίσθητης ζώνης και διακριτές τιμές της παραμέτρου  $\phi_z$**

Αποδεικνύεται ότι, όπως ήταν αναμενόμενο, οι περιπτώσεις κεκλιμένης ευαίσθητης ζώνης εμφανίζουν μεγαλύτερη επικινδυνότητα (μικρότερους συντελεστές ασφαλείας). Ακόμα και οι μεγαλύτεροι συντελεστές ασφαλείας που εμφανίζουν οι αναλύσεις για  $\beta=6^\circ$  δεν ξεπερνούν εκείνους που υπολογίστηκαν για  $\beta=0^\circ$ .

Επιπλέον, οι ίδιες αναλύσεις έγιναν με το Sensitivity Tool του Slide2 και επιβεβαίωσαν τα αποτελέσματα των χειροκίνητων αναλύσεων αφού, όπως απεικονίζεται και παρακάτω, οι τιμές στα διαγράμματα ταυτίζονται (Εικόνα 39). Επιλέγουμε ωστόσο να κρατήσουμε τα αποτελέσματα των χειροκίνητων αναλύσεων αφού αρκούν για να αναδειχθούν οι διαφορές στην ευστάθεια σε κάθε σενάριο.

Τέλος, παρατηρούμε πως η ευστάθεια σε κάθε περίπτωση επηρεάζεται πιο έντονα από αλλαγές στις παραμέτρους αντοχής της ίδιας ευαίσθητης ζώνης. Από την άλλη, αλλαγές στα χαρακτηριστικά των υπερκειμένων δεν έχουν την ίδια επιρροή.



Εικόνα 39 Παράδειγμα συγκριτικού διαγράμματος για την περίπτωση ανάλυσης με οριζόντια ευαίσθητη ζώνη που διέρχεται από τον πόδα του πρανούς για διακριτές τιμές  $\phi_z$

#### 4.4 Αναλύσεις ευστάθειας με την ταυτόχρονη ύπαρξη δύο ή περισσότερων ευαίσθητων ζωνών

Στις επόμενες υποενότητες θα εξεταστεί η ευστάθεια του ίδιου πρανούς εκσκαφής όταν επιδρούν σε αυτό περισσότερες από μία ευαίσθητες ζώνες ταυτόχρονα. Σε πρώτη φάση θα ελέγξουμε πως επηρεάζουν την ευστάθεια της εκσκαφής δύο ευαίσθητες ζώνες οριζόντιου προσανατολισμού ( $\beta=0^\circ$ ) που δρουν ταυτόχρονα. Η μία θα διέρχεται από το ύψος του πόδα του πρανούς και η άλλη σε ύψος 100 m ψηλότερα από την προηγούμενη. Στη συνέχεια, θα εξεταστεί το σενάριο ύπαρξης δύο κεκλιμένων ευαίσθητων ζωνών ( $\beta=6^\circ$ ) οι οποίες θα διέρχονται από τα ίδια υψομετρικά σημεία με τις προηγούμενες. Επιπλέον θα σχολιαστεί συνοπτικά το σενάριο ύπαρξης τριών ευαίσθητων ζωνών.

Σε κάθε περίπτωση θα υπολογίσουμε τους συντελεστές ασφαλείας για διάφορες τιμές των γωνιών τριβής κάθε ευαίσθητης ζώνης. Θα εκτελέσουμε χειροκίνητες αναλύσεις ευστάθειας με τις μεθόδους Cuckoo και Bishop Simplified για την εύρεση των επιφανειών αστοχίας και την εκτίμηση των συντελεστών ασφαλείας. Θα συγκρίνουμε επίσης τα αποτελέσματα της μεθόδου Cuckoo με εκείνα της μεθόδου Simulated Annealing.

Όλες οι αναλύσεις εκτελούνται σε ξηρές συνθήκες.

#### 4.4.1 Έλεγχος ευστάθειας για δύο ευαίσθητες ζώνες οριζόντιου προσανατολισμού ( $\beta=0^\circ$ )

Θα εκτιμήσουμε τους συντελεστές ασφαλείας που παράγουν οι μέθοδοι Cuckoo και Simulated Annealing σε συνδυασμό με τη μέθοδο Bishop Simplified για την περίπτωση δύο οριζόντιων ( $\beta=0^\circ$ ) ευαίσθητων ζωνών για τους παρακάτω συνδυασμούς τιμών της γωνίας τριβής της κάθε ζώνης :

- Οριζόντια ευαίσθητη ζώνη στο +100 m από τον πόδα του πρανούς :

$$\phi_{z1} = \mu - 1 \sigma = 7.3^\circ \quad \phi_{z1} = 10^\circ = \mu \quad \phi_{z1} = \mu + 1 \sigma = 12.7^\circ$$

Όπου  $\sigma$  = τυπική απόκλιση =  $2.7^\circ$

- Οριζόντια ευαίσθητη ζώνη στο ύψος του πόδα του πρανούς :

$$\phi_{z2} = \mu - 1 \sigma = 7.3^\circ \quad \phi_{z2} = 10^\circ = \mu \quad \phi_{z2} = \mu + 1 \sigma = 12.7^\circ$$

Όπου  $\sigma$  = τυπική απόκλιση =  $2.7^\circ$

Οι συντελεστές ασφαλείας που υπολογίσαμε φαίνονται στους Πίνακες 7 και 8.

Table 7 Συντελεστές ασφαλείας που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο Cuckoo για τις διάφορες τιμές της γωνίας τριβής για δύο οριζόντιες ευαίσθητες ζώνες

Cuckoo Method				
b=0				
		$\phi_{z1}$		
		7.3	10	12.7
$\phi_{z2}$	7.3	1.32	1.32	1.32
	10	1.54	1.54	1.54
	12.7	1.52	1.73	1.73

Table 8 Συντελεστές ασφαλείας που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο Simulated Annealing για τις διάφορες τιμές της γωνίας τριβής για δύο οριζόντιες ευαίσθητες ζώνες

Simulated Annealing Method				
b=0				
		φz1		
		7.3	10	12.7
φz2	7.3	1.32	1.4	1.33
	10	1.53	1.53	1.54
	12.7	1.73	1.73	1.73

Οι συντελεστές ασφαλείας που σημειώνονται με κόκκινο χρώμα δηλώνουν πως η αστοχία έλαβε χώρα κατά μήκος της ψηλότερης υψομετρικά ευαίσθητης ζώνης. Σε κάθε άλλη περίπτωση η αστοχία λαμβάνει χώρα κατά μήκους της χαμηλότερης υψομετρικά ευαίσθητης ζώνης η οποία διέρχεται από τον πόδα του πρανούς.

Παρατηρούμε πως οι αλλαγές στην παράμετρο  $\phi_{z2}$  (ευαίσθητη ζώνη στο ύψος του πόδα του πρανούς) επηρεάζουν πιο έντονα την αλλαγή στις τιμές του συντελεστή ασφαλείας.

#### 4.4.2 Έλεγχος ευστάθειας για κεκλιμένες ευαίσθητες ζώνες ( $\beta=6^\circ$ )

Θα εκτιμήσουμε τους συντελεστές ασφαλείας που παράγουν οι μέθοδοι Cuckoo και Simulated Annealing σε συνδυασμό με τη μέθοδο Bishop Simplified για την περίπτωση δύο κεκλιμένων ( $\beta=6^\circ$ ) ευαίσθητων ζωνών για τους ίδιους συνδυασμούς τιμών της γωνίας τριβής της κάθε ζώνης όπως και στη προηγούμενη ενότητα.

Οι συντελεστές ασφαλείας που υπολογίσαμε φαίνονται στους Πίνακες 9 και 10.

Table 9 Συντελεστές ασφαλείας που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο Cuckoo για τις διάφορες τιμές της γωνίας τριβής για δύο κεκλιμένες ευαίσθητες ζώνες

Cuckoo Method				
b=6				
		φz1		
		7.3	10	12.7
φz2	7.3	0.99	0.99	0.99
	10	1.22	1.22	1.22
	12.7	1.15	1.38	1.46

Table 10 Συντελεστές ασφαλείας που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο Simulated Annealing για τις διάφορες τιμές της γωνίας τριβής για δύο κεκλιμένες ευαίσθητες ζώνες

Simulated Annealing Method				
b=6				
		φz1		
		7.3	10	12.7
φz2	7.3	0.99	0.99	0.99
	10	1.22	1.22	1.22
	12.7	1.45	1.43	1.44

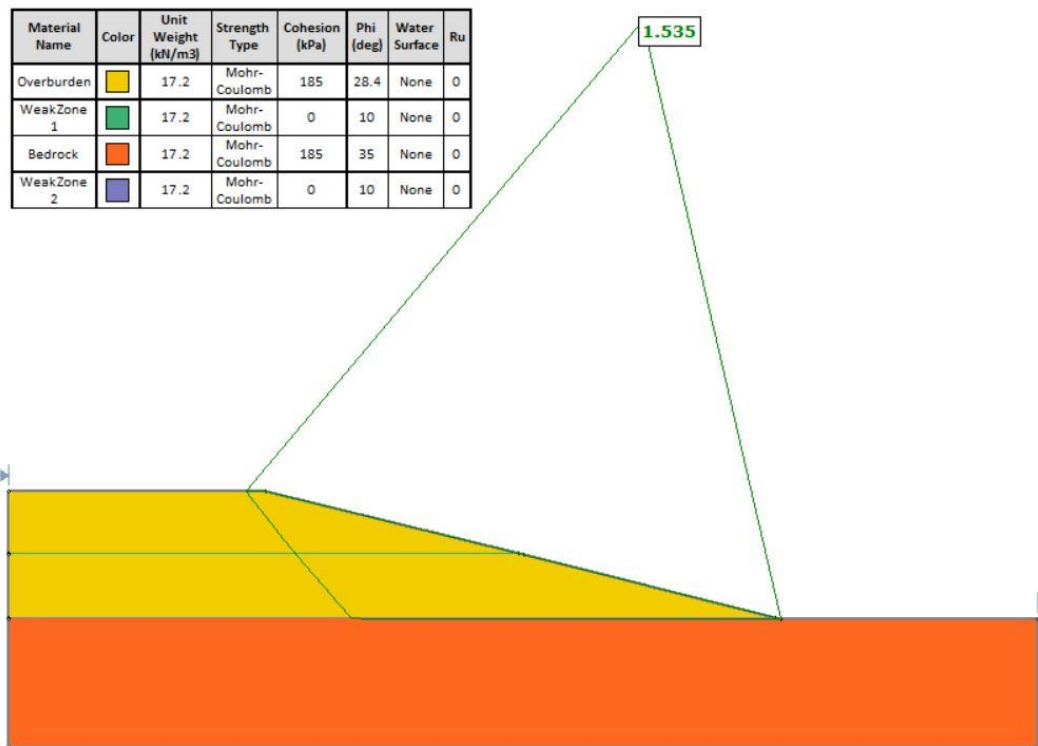
Οι συντελεστές ασφαλείας που σημειώνονται με κόκκινο χρώμα δηλώνουν πως η αστοχία έλαβε χώρα κατά μήκος της ψηλότερης υψομετρικά ευαίσθητης ζώνης. Σε κάθε άλλη περίπτωση η αστοχία λαμβάνει χώρα κατά μήκους της χαμηλότερης υψομετρικά ευαίσθητης ζώνης η οποία διέρχεται από τον πόδα του πρανούς.

Παρατηρούμε πως οι αλλαγές στην παράμετρο  $\phi_{z2}$  (ευαίσθητη ζώνη στο ύψος του πόδα του πρανούς) επηρεάζουν πιο έντονα την αλλαγή στις τιμές του συντελεστή ασφαλείας. Επιπλέον επιβεβαιώνεται για ακόμη μία φορά πως οι συντελεστές ασφαλείας για το σενάριο με κεκλιμένες ευαίσθητες ζώνες είναι μικρότεροι, όπως και αναμένεται.

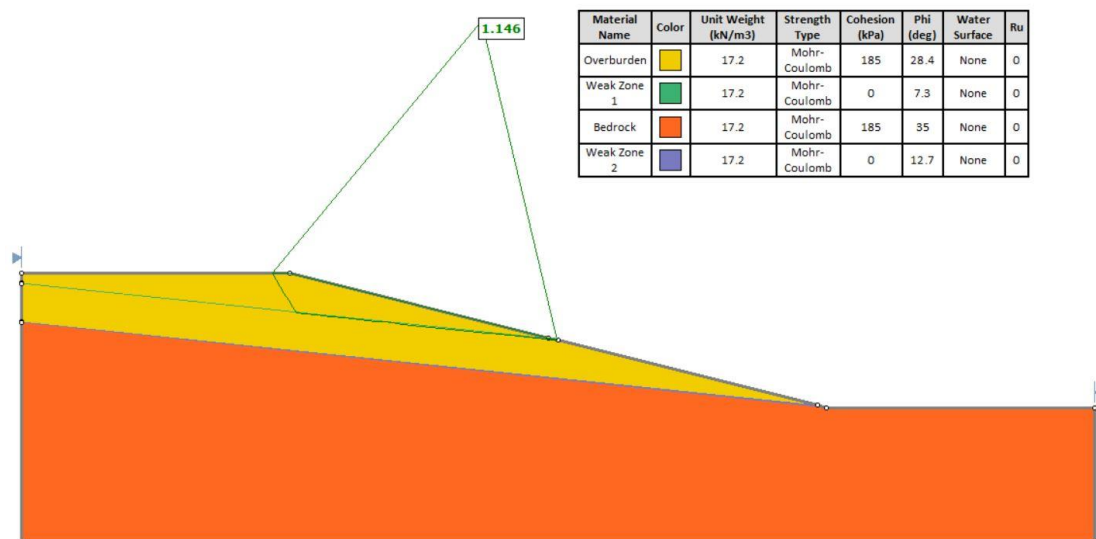
#### 4.4.3 Σύνοψη αποτελεσμάτων

Βάση των αποτελεσμάτων των παραπάνω αναλύσεων καταλήγουμε στο ότι οι επιφάνειες αστοχίας ακολουθούν και σε αυτά τα σενάρια την τυπική γεωμετρία μιας σύνθετης μη κυκλικής επιφάνειας αστοχίας. Ακολουθεί δηλαδή κατά μήκος την ευαίσθητη ζώνη και τέμνει το πρανές κοντά στη στέψη του. Ωστόσο στην περίπτωση ύπαρξης δύο ευαίσθητων ζωνών, ανάλογα με τις τιμές των γωνιών τριβής, η επιφάνεια αστοχίας άλλοτε ακολουθεί κατά μήκος την μία ευαίσθητη επιφάνεια και άλλοτε την άλλη. Όπως βλέπουμε από τους παραπάνω πίνακες, η εκσκαφή αστοχεί στο υψηλότερο σημείο όταν η αντοχή της χαμηλότερης ευαίσθητης ζώνης είναι μεγαλύτερη και συνεπώς η τιμή της γωνίας τριβής της. Στην πλειοψηφία τους όμως, οι επιφάνειες αστοχίας με τους μικρότερους συντελεστές ασφαλείας εμφανίζονται κατά μήκος της ευαίσθητης ζώνης που διέρχεται από τον πόδα του πρανούς.

Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται δύο τυπικές επιφάνειες αστοχίας που εμφανίστηκαν κατά τη διάρκεια των αναλύσεων.



Εικόνα 40 Τυπικό παράδειγμα αστοχίας στην ζώνη ευαισθησίας που διέρχεται από τον πόδα του πρανούς για την περίπτωση όπου  $\phi_{z1}=\phi_{z2}=10^\circ$  ( $\beta=0^\circ$ , Cuckoo)



Εικόνα 41 Τυπικό παράδειγμα αστοχίας στην ψηλότερη υψομετρικά ευαίσθητη ζώνη για την περίπτωση όπου  $\phi_{z1}=7.3^\circ$  και  $\phi_{z2}=12.7^\circ$  ( $\beta=6^\circ$ , Cuckoo)

Παρατηρούμε από τις τιμές των συντελεστών πως η μέθοδος Cuckoo παράγει, με μικρές διαφορές, μικρότερους συντελεστές ασφαλείας από την Simulated Annealing σε σημαντική πλειοψηφία.

Αξίζει να σημειωθεί σε αυτό το σημείο πως πραγματοποιήθηκε σειρά αναλύσεων με την ταυτόχρονη ύπαρξη τριών ευαίσθητων ζωνών. Δηλαδή με μία επιπλέον ευαίσθητη ζώνη στα -100 m χαμηλότερα του πόδα του πρανούς. Φάνηκε όμως πως η συγκεκριμένη ευαίσθητη ζώνη δεν επηρέαζε ιδιαίτερα την ευστάθεια της εκσκαφής αφού ως επί το πλείστον οι επιφάνειες αστοχίας ακολουθούσαν τις άλλες δύο ζώνες. Ακόμα, κρίθηκε πως επηρέαζε αρνητικά την μέθοδο Cuckoo αφού παράγαγε σε ορισμένες περιπτώσεις μη λογικά αποτελέσματα (μεγάλους συντελεστές ασφαλείας και επιφάνειες αστοχίας που δεν εξυπηρετούν τον σκοπό της συγκεκριμένης εργασίας).

#### 4.5 Συμπεράσματα

- Συμπερασματικά, από τους συντελεστές ασφαλείας που υπολογίσαμε στις περιπτώσεις των διαγραμμάτων των Εικόνων 35 και 36 παρατηρούμε ότι η πίο «επικίνδυνες» περιπτώσεις είναι εκείνες στις οποίες οι αναλύσεις γίνονται για την ευαίσθητη επιφάνεια που βρίσκεται στο ύψος του πόδα του πρανούς. Είτε συγκρίνουμε σενάρια με  $\beta=0^\circ$  ή  $\beta=6^\circ$  οι τιμές των συντελεστών ασφαλείας σε αυτές τις περιπτώσεις λαμβάνουν τις μικρότερες τιμές τους.
- Στο σύνολο των αναλύσεων που διεξάγαμε για  $\beta=6^\circ$  επιβεβαιώσαμε πως σε σύγκριση με τις αναλύσεις για  $\beta=0^\circ$  στις αντίστοιχες περιπτώσεις δίνουν μικρότερους συντελεστές ασφαλείας (φαίνεται και στα αντίστοιχα διαγράμματα σύγκρισης).
- Σε κάθε περίπτωση η ευαίσθητη ζώνη στην υψομετρική θέση -100 m χαμηλότερα από τον πόδα του πρανούς δίνει τους μεγαλύτερους συντελεστές ασφαλείας. Άρα είναι λιγότερο πιθανό να λάβει χώρα αστοχία κατά μήκος μίας τέτοιας ευαίσθητης ζώνης.
- Στις αναλύσεις που εκτελέσαμε για  $\beta=0$  και δοκιμάσαμε το sensitivity tool του slide2 επιβεβαιώσαμε πως, τουλάχιστον σε αυτές τις περιπτώσεις, δίνει ακριβώς τις ίδιες τιμές συντελεστή ασφαλείας με τις χειροκίνητες αναλύσεις.
- Για τα πρώτα δύο διαγράμματα (Εικόνες 33 και 34) βλέπουμε πως με την αλλαγή των διαφορετικών  $\phi$  η ευστάθεια επηρεάζεται πιο δραστικά απ' ότι όταν αλλάζουμε την παράμετρο της συνοχής.
- Παρατηρούμε επίσης πως η μέθοδος simulated annealing που χρησιμοποιήθηκε στις αναλύσεις με ταυτόχρονη ύπαρξη δύο ευαίσθητων ζωνών, δεν δίνει ποτέ αστοχία στην ευαίσθητη ζώνη που βρίσκεται +100 m πάνω από τον πόδα του πρανούς. Αντίθετα η cuckoo το πετυχαίνει.

- Τέλος, βλέπουμε πως η αλλαγή της παραμέτρου  $\phi_{z1}$  δεν επηρεάζει τόσο την τιμή του υπολογισμένου συντελεστή ασφαλείας όσο την θέση που θα βρίσκεται η επιφάνεια της αστοχίας.



## 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα παραπάνω κεφάλαια της εργασίας εξετάστηκαν τα διάφορα περιστατικά αστοχίας πρηνών βαθιών λιγνιτικών εκσκαφών οι οποίες έχουν καταγραφεί και συχνά εμφανίζουν ως κοινό χαρακτηριστικό τους μία ζώνη εδαφικού υλικού χαμηλής διατμητικής αντοχής. Μελετάται διεξοδικά η γεωμετρία μιας τέτοιας ευαίσθητης ζώνης καθώς και η φύση των υλικών που αποτελούν αυτή και τους γύρω σχηματισμούς της στρωματογραφίας. Τέλος, πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αναλύσεις σε κατάλληλο προσομοίωμα με το πρόγραμμα Slide2 της Rocscience έτσι ώστε να εξαχθούν αριθμητικά και σαφέστερα συμπεράσματα σχετικά με την ευστάθεια για ορισμένα σενάρια. Τα κύρια συμπεράσματα της εργασίας συνοψίζονται ως εξής :

Η διαχείρισή όλο και βαθύτερων λιγνιτικών εκσκαφών έχει γίνει πιο απαιτητική τα τελευταία χρόνια από γεωτεχνικής σκοπιάς. Οπότε, η σωστή και ενδεδειγμένη εφαρμογή της γεωτεχνικής μηχανικής γίνεται όλο και πιο κρίσιμη για την αποτελεσματική και βιώσιμη αντιμετώπιση προβλημάτων ευστάθειας των ελληνικών λιγνιτωρυχείων. Οι βαθιές εκσκαφές αυτές λαμβάνουν χώρα σε πυκνές ζώνες στείρου υλικού που υπέρκεινται των εκμεταλλεύσιμων λιγνιτικών αποθέσεων. Οι λιγνιτικές στρώσεις εναλλάσσονται με ενδιάμεσες στρώσεις στείρου υλικού. Γενικά, το σύνολο μιας τυπικής στρωματογραφίας λιγνιτικής εκσκαφής αποτελείται κυρίως από μάργες και αργίλους (συχνά από συμπαγείς έως σκληρές), και περιστασιακά από ευαίσθητα κροκαλοπαγή και υδροφόρες άμμους. Έτσι, τα ζητήματα ευστάθειας πρηνών καλούν για εφαρμογή των αρχών της εδαφομηχανικής.

Στις λιγνιτικές εκσκαφές εμφανίζονται κυρίως μηχανισμοί αστοχίας μη κυκλικής γεωμετρίας. Συχνά, τα είδη αστοχίας σχετίζονται με μία οριζόντια ή παρα-οριζόντια (πρακτικά γραμμική) επιφάνεια ολίσθησης, κατά μήκος μίας ευαίσθητης ζώνης στη διεπιφάνεια μεταξύ λιγνίτη και στείρου υλικού (ή ακόμα και μεταξύ στείρων υλικών με διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά). Παρατηρείται ολίσθηση εξαιτίας της διαφορετικής απόκρισης του λιγνίτη και στείρου στις τάσεις-παραμορφώσεις που προκαλούνται από τις συνθήκες αποφόρτισης (μείωση τάσεων συγκράτησης) που επικρατούν λόγω της εκσκαφής.

Σε κάθε περίπτωση, η ολίσθηση κατά μήκος της επιφάνειας αυτής οδηγεί σε μεγάλες πλαστικές διατμητικές παραμορφώσεις. Οπότε, για να αξιολογηθεί η ευστάθεια των πρηνών της εκσκαφής χρησιμοποιούνται οι παράμετροι παραμένουσας διατμητικής αντοχής κατά μήκος της ζώνης ολίσθησης. Είναι αξιοσημείωτο πως σε κάποιες

περιπτώσεις, έχουν καταγραφεί παραμένουσες γωνίες τριβής έως και 60 ή 70 (με μηδενική παραμένουσα συνοχή).

Οι μηχανισμοί αστοχίας είναι συχνά σύνθετοι και ο τοπικός τεκτονισμός παίζει καθοριστικό ρόλο στα περιστατικά αστοχίας. Δηλαδή, όταν ρήγματα με δυσμενή κλίση (προς την εκσκαφή) παρουσιάζονται πίσω από την εκσκαφή, μπορεί να επηρεαστεί έντονα η κινητική τους συμπεριφορά. Γι' αυτό, θα πρέπει να λαμβάνονται πάντα υπόψιν (εφόσον η παρουσία τους είναι γνωστή) κατά τον σχεδιασμό και την εκμετάλλευση. Πολύ σημαντική επίσης παράμετρος που σχετίζεται με την ευστάθεια είναι η κλίση της διεπιφάνειας λιγνίτη/στερίου. Ακόμη και μια δυσμενής κλίση λίγων μοιρών (προς την εκσκαφή), μπορεί να απειλήσει την ευστάθεια του πρανούς. Μία ακόμη τέτοια παράμετρος που παίζει σημαντικό ρόλο σε προβλήματα ευστάθειας είναι η διείδυση νερού (κυρίως βροχοπτώσεων) σε ρωγμές και ανοιχτά ρήγματα αφού προκαλεί αύξηση των υδραυλικών πιέσεων πίσω από τα πρανές μιας εκσκαφής.

Δεδομένου του συνεχώς αυξανόμενου μεγέθους των λιγνιτικών εκσκαφών (σήμερα μέχρι και 200m), συχνά λαμβάνουν χώρα μεγάλες παραμορφώσεις ανεξάρτητα του βαθμού συντηρητισμού που έχει υιοθετηθεί κατά τον σχεδιασμό (άλλωστε, περιστατικά αστάθειας έχουν αναφερθεί ακόμη και για πολύ ήπιες συνολικές κλίσεις περίπου 10ο). Παρόλα αυτά, αυτές οι παραμορφώσεις δεν οδηγούν πάντα σε καταστροφικές αστοχίες. Σε κάθε περίπτωση, έχει αποδειχθεί πως η εξορυκτική διαδικασία (εάν εφαρμοστεί σωστά) μπορεί να λάβει χώρα ακόμα και σε καταστάσεις όπου τα πρανά ενός ορυχείου εμφανίζουν μετακινήσεις μερικών μέτρων. Σε αυτές τις καταστάσεις οι διατμητικές τάσεις δεν είναι αρκετά υψηλές ώστε να προκαλέσουν καταστροφική αστοχία.

Δίνεται έμφαση στην σημασία που είχε η παρακολούθηση των πρανών κατά τη διάρκεια των διαδικασιών εξόρυξης τις τελευταίες δύο δεκαετίες στα ελληνικά λιγνιτωρυχεία. Παλαιότερα έργα προτείνουν την ταχύτητα των καταγεγραμμένων μετατοπίσεων (ρυθμός της μετακίνησης) ως ένα αξιόπιστο κριτήριο για την αξιολόγηση των συνθηκών ευστάθειας. Όμως, αυτό το συμπέρασμα έχει αμφισβητηθεί πρόσφατα και έχει προταθεί η εκτίμηση της επιτάχυνσης της ταχύτητας ολίσθησης των πρανών ως καλύτερος δείκτης της ευστάθειας πρανών κατά την ανάπτυξη των προοδευτικών αστοχιών.

Στη συνέχεια παρουσιάστηκε εκτενής βάση γεωτεχνικών δεδομένων από έρευνες σε 11 ελληνικά λιγνιτωρυχεία. Τα δεδομένα αυτά αναλύθηκαν με στατιστικές μεθόδους και συνδυάστηκαν με παλαιότερη γνώση και εμπειρία. Από αυτά παρέχονται πληροφορίες για τα υπερκείμενα εδαφικά υλικά των σχετικών ορυχείων. Τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον προκαταρκτικό σχεδιασμό και να παρέχουν μία συνοπτική εικόνα των γεωτεχνικών

ιδιοτήτων εδαφικών σχηματισμών που πρόκειται να συναντηθούν στο πεδίο με σκοπό να αποφευχθούν σημαντικά λάθη στον σχεδιασμό και την διαχείριση.

Αναλύθηκαν ο φυσικές ιδιότητες των εδαφικών δειγμάτων των ορυχείων στο εργαστήριο σύμφωνα με γεωτεχνικά standards. Δείκτες και ιδιότητες ταξινόμησης περιγράφουν τα λεπτόκοκκα υλικά (ιλύες και άργιλοι), που εμφανίζονται συχνά στους γνωστούς γεωλογικούς σχηματισμούς των ελληνικών λιγνιτωρυχείων. Οι μέσες τιμές του LL και του PI είναι 54% και 18% αντίστοιχα. Η μέση τιμή του LI είναι κοντά στο 0. Αυτό δείχνει την ύπαρξη πλαστικού εδαφικού υλικού κοντά στην ημιστερεή κατάσταση. Παρ' όλα αυτά, το LI παρουσιάζει εξαιρετικά μεγάλο εύρος τιμών και μεγάλο COV.

Ακόμη, χρησιμοποιήθηκαν δύο σενάρια κρίσιμης ευστάθειας πρανών λιγνιτωρυχείων για να οριστεί το πλαίσιο της ανάλυσης: (i) πρανές με εμφάνιση ευαίσθητης ζώνης χαμηλής αντοχής, (ii) ομογενές πρανές. Η παραμένουσα αντοχή είναι η κύρια παράμετρος για το σενάριο της ευαίσθητης ζώνης, και η μέγιστη αντοχή για το σενάριο του ομογενούς πρανούς. Η αντοχή του εδάφους αξιολογείται με δοκιμές δακτυλιοειδούς δοκιμίων για την παραμένουσα διατμητική αντοχή (παραμένουσα γωνία τριβής) και με δοκιμές τριαξονικής φόρτισης και άμεσης διάτμησης για την μέγιστη αντοχή (μέγιστη γωνία τριβής και συνοχή).

Οι μετρήσεις δείχνουν πως πολλά εδαφικά στρώματα παρουσιάζουν πολύ μικρή παραμένουσα αντοχή - γωνία τριβής με τιμές από 4.6ο έως 15ο - και αντιστοιχούν στην ευαίσθητη ζώνη. Αντιθέτως, για όλες τις άλλες περιπτώσεις, υπολογίζεται η υψηλότερη τιμή της παραμένουσας αντοχής. Ακόμη, η μέγιστη γωνία που υπολογίστηκε από δοκιμές τριαξονικής φόρτισης παρουσιάζει μέση τιμή 28.4ο με τα περισσότερα αποτελέσματα να βρίσκονται κοντά στη μέση τιμή με εύρος μίας τυπικής απόκλισης. Η χαρακτηριστική τιμή, όπως ορίζεται από τον Eurocode 7, γίνεται 25.0ο. Η συνοχή, βάσει των δοκιμών τριαξονικής φόρτισης, παρουσιάζει μεγάλο εύρος από 0 έως 631kPa με μέση τιμή 185kPa, και χαρακτηριστική τιμή 84kPa (αναδεικνύοντας το γεγονός πως υπάρχουν πολλά δείγματα με μηδενικές ή χαμηλές τιμές). Τα δείγματα ενός ορυχείου (Σέρβια) παρουσιάζουν συνολικά διαφορετικές αντοχές, σημαντικά μεγαλύτερες από τα υπόλοιπα ορυχεία. Οπότε, αξιολογείται ξεχωριστά εμφανίζοντας μέση τιμή γωνίας τριβής 45ο και μέση τιμή συνοχής 242kPa.

Αξιολογήθηκαν ορισμένες κατανομές μεταξύ γεωτεχνικών παραμέτρων. Όλες οι σχέσεις μεταξύ φυσικών και μηχανικών παραμέτρων παρουσιάζουν μεγάλη διασπορά και δεν παρατηρούνται ουσιαστικοί συσχετισμοί. Ωστόσο, προτείνονται σχέσεις για την προσεγγιστική εκτίμηση της παραμένουσας και της μέγιστης γωνίας τριβής που παρουσιάζουν γενικές τάσεις και μπορούν να εφαρμοστούν σε στάδιο προκαταρκτικής μελέτης.

Ο χαρακτηρισμός αυτός των εδαφικών υλικών σχετίζεται με την ευστάθεια πρηνών των ορυχείων, την ολική ευστάθεια και τη γεωτεχνική ανάλυση των περιοχών εξόρυξης κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους αλλά και μετά την παύση της εκμετάλλευσης.

Σύμφωνα με τα δεδομένα που παρουσιάστηκαν κυρίως στην ενότητα 3, δημιουργήθηκε κατάλληλο προσομοίωμα πρηνούς βαθιάς λιγνιτικής εκσκαφής στο λογισμικό γεωτεχνικής μηχανικής Slide2 και πραγματοποιήθηκαν ορισμένα σενάρια παραμετρικών αναλύσεων με κοινό χαρακτηριστικό την ύπαρξη ζώνης εδαφικού υλικού χαμηλής διατμητικής αντοχής.

Έτσι υπολογίστηκαν οι συντελεστές ασφαλείας για τις περιπτώσεις όπου παραμέτρους αποτελούσαν τα χαρακτηριστικά των υπερκειμένων εδαφικών υλικών και για τις περιπτώσεις όπου συμπεριφερόταν ως παράμετροι τα χαρακτηριστικά της ευαίσθητης ζώνης. Βλέπουμε πώς με την αλλαγή της παραμέτρου της γωνίας τριβής  $\phi$  η ευστάθεια επηρεάζεται πιο δραστικά απ' ό τι όταν αλλάζουμε την παράμετρο της συνοχής  $c$ . Παρατηρήθηκε επίσης πως οι αλλαγές στα χαρακτηριστικά της αντοχής των υπερκειμένων δεν επηρεάζουν δραστικά την ευστάθεια.

Στη δεύτερη περίπτωση υπολογίζουμε τους συντελεστές ασφαλείας για διάφορες τιμές της γωνίας τριβής του υλικού της ευαίσθητης ζώνης και για τρεις πιθανές διαφορετικές υψομετρικές θέσεις. Καταλήγουμε πως η περίπτωση που παράγει τους μικρότερους συντελεστές ασφαλείας (μεγαλύτερη επικινδυνότητα) είναι όταν η ευαίσθητη ζώνη διέρχεται από τον πόδα του πρηνούς. Σε κάθε περίπτωση η ευαίσθητη ζώνη στην υψομετρική θέση -100 m χαμηλότερα από τον πόδα του πρηνούς δίνει τους μεγαλύτερους συντελεστές ασφαλείας. Άρα είναι λιγότερο πιθανό να λάβει χώρα αστοχία κατά μήκος αυτής της ευαίσθητης ζώνης.

Να σημειωθεί πως οι ίδιες αναλύσεις εκτελέστηκαν και για την περίπτωση όπου η ευαίσθητη ζώνη παρουσιάζει δυσμενή κλίση  $60^\circ$  (προς την εκσκαφή). Εδώ φαίνεται ξεκάθαρα πως οι περιπτώσεις με κεκλιμένη ευαίσθητη ζώνη ευνοούν την ολίσθηση όπως είναι αναμενόμενο αφού οι συντελεστές ασφαλείας που υπολογίζονται είναι μικρότεροι από τις αντίστοιχες περιπτώσεις όπου η ευαίσθητη ζώνη είναι οριζόντια.

Εκτός από χειροκίνητες παραμετρικές αναλύσεις, για τις παραπάνω περιπτώσεις, χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο Sensitivity Analysis του Slide2 για να διαπιστώσουμε τελικά πως τα αποτελέσματα και από τις δύο μεθόδους ταυτίζονται.

Πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για την περίπτωση ταυτόχρονης εμφάνισης δύο ευαίσθητων ζωνών στο ίδιο πρηνές. Βρέθηκαν δηλαδή οι πιθανές επιφάνειες αστοχίας για διάφορους συνδυασμούς τιμών των γωνιών τριβής σε κάθε ευαίσθητη ζώνη. Παρατηρούμε πως η μέθοδος simulated annealing που χρησιμοποιήθηκε στις αναλύσεις αυτές, δεν δίνει ποτέ αστοχία στην ευαίσθητη ζώνη που βρίσκεται +100 m

πάνω από τον πόδα του πρανούς. Αντίθετα η μέθοδος cuckoo το πετυχαίνει σε ορισμένες συνθήκες.

Τέλος, συμπεραίνουμε πως για τον σχεδιασμό και τη βιώσιμη διαχείριση ενός ορυχείου είναι απαραίτητη η καλή γνώση και εφαρμογή της γεωτεχνικής μηχανικής. Πλέον υπάρχει ικανοποιητική βιβλιογραφία και πολλά καταγεγραμμένα συμβάντα που συνδέουν τα λιγνιτωρυχεία με ζητήματα ευστάθειας και γενικότερα γεωτεχνικής μηχανικής. Επιπλέον έχουν συγκεντρωθεί εργαστηριακά δεδομένα σχετικά με την φύση και τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών που εμφανίζονται στα ελληνικά λιγνιτωρυχεία. Επίσης στη συγκεκριμένη εργασία πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αναλύσεις μέσω λογισμικού ώστε να παρατηρηθεί η (σχετική με την ευστάθεια) συμπεριφορά ενός προσομοιώματος πρανούς εκσκαφής σε διάφορες αλλαγές στις ιδιότητες των υλικών ή της γεωμετρίας. Σχηματίζεται λοιπόν μία πιο ολοκληρωμένη εικόνα στο συγκεκριμένο πεδίο της γεωτεχνικής μηχανικής. Έτσι, ωφελείται ένα σύνολο ενέργειων που είναι πιθανό να λάβουν χώρα στο μέλλον της λιγνιτικής εξόρυξης ή ακόμα και μετά την παύση της.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Anagnostopoulos, A. G. (1979). "The mechanical behavior of the Megalopolis lignites." Thesis presented to the National Technical University of Athens, in partial fulfillment of the requirements for the academic title of Docent in Foundation Engineering (in Greek), National Technical University of Athens, Greece.
- [2] Anagnostopoulos, A. G. (1982). "Compressibility Behavior of Soft Lignite." *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 108(12), 1549-1566.
- [3] BP (2020). "BP Statistical Review of World Energy."
- [4] Chowdhury, R., Flentje, P., and Bhattacharya, G. (2009). *Geotechnical slope analysis*, CRC Press, London.
- [5] Duncan, J., Wright, S., and Brandon, T. (2014). *Soil Strength and Slope Stability*, John Wiley & Sons.
- [6] Euracoal (2018). "EURACOAL Market Report 1/2018 - April 2018." European Association for Coal and Lignite.
- [7] Galetakis, M., Vasiliou, A., Roumpos, C., and Pavloudakis, F. "Developing Fuzzy Inference Systems (FIS) for the evaluation of multiple layer lignite deposits." *Proc., International Workshop in Geoenvironment and Geotechnics (GEOENV 2005)*, 99-104.
- [8] Huang, Y. H. (1983). *Stability Analysis of Earth Slopes*, Springer.
- [9] Kalogirou, E. E., Tsapanos, T. M., Karakostas, V. G., Marinos, V. P., and Chatzipetros, A. (2014). "Ground Fissures in the Area of Mavropigi Village (N. Greece): Seismotectonics or Mining Activity?" *Acta Geophysica*, 62(6), 1387-1412.
- [10] Kavvadas, M., Agioutantis, Z., Schilizzi, P., and Steiakakis, C. "Stability and movements of open-pit lignite mines in Northern Greece." *Proc., Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVIII ICSMGE)*, 2193-2196.
- [11] Kavvadas, M., Anagnostopoulos, A., Leonardos, M., and Karras, V. "Mechanical properties of the Ptolemais lignite." *Proc., International Symposium: Geotechnical Engineering of Hard Soils - Soft Rocks*, Balkema, 585-592.
- [12] Kavvadas, M., Marinos, P., and Anagnostopoulos, A. "Stability of open-pit lignite slopes in Ptolemais, Greece." *Proc., 6th International Symposium on Landslides*, 1293-1298.
- [13] Kavvadas, M., Papadopoulos, B., and Kalteziotis, N. (1994). "Geotechnical properties of the Ptolemais lignite." *Geotechnical and Geological Engineering*, 12(2), 87-112.
- [14] Kavvadas, M., Roumpos, C., and Schilizzi, P. "Investigation of the Stability of Deep Excavation Slopes in Continuous Surface Lignite Mines." *Proc., 14th International Symposium of Continuous Surface Mining (ISCSM)*.
- [15] Kavvadas, M., Roumpos, C., and Schilizzi, P. (2020). "Stability of Deep Excavation Slopes in Continuous Surface Lignite Mining Systems." *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(1), 791-812.

- [16] Koukouzas, N. (2007). "Mineralogy and geochemistry of diatomite associated with lignite seams in the Komnina Lignite Basin, Ptolemais, Northern Greece." *International Journal of Coal Geology*, 71(2), 276-286.
- [17] Leonardos, M., and Terezopoulos, N. (2003). "Rim slope failure mechanism in the Greek deep lignite mines - a case study." *Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy: Section A - Mining Technology*, 112(3), 197-204.
- [18] Marinos, V., Tsapanos, T., Pavlidis, S., Tsourlos, P., Chatzipetros, A., and Voudouris, K. (2015). "Large Induced Displacements and Slides Around an Open Pit Lignite Mine, Ptolemais Basin, Northern Greece." *Engineering Geology for Society and Territory*, Springer 311-315.
- [19] Monopolis, D., Stiakakis, E., Agioutantis, Z., and Kavouridis, K. (1999). "Geotechnical Investigation at lignite mines." *Mineral Resources Engineering*, 8(4), 405-418.
- [20] Pottakis, A. I. (2019). "Landslide at the Amyntaion lignite mine. Environmental sequences and further exploitation (in Greek)." The Greek Ombudsman, Athens, Greece.
- [21] Prountzopoulos, G., Fortsakis, P., Marinos, P., and Kavaddas, M. (2010). "Analysis of a slide along a lignite mine slope in very poor marl." *6th National Conference of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* Volos, Greece, 1-8 (in Greek).
- [22] Prountzopoulos, G., Fortsakis, P., Marinos, V., and Marinos, P. (2017). "A Large Scale Landslide in a Coal Mine in Marly Formations: Evaluation, Analysis and Rehabilitation." *ISSMGE International Journal of Geoengineering Case Histories*, 34(1), 29-45.
- [23] Ritchie, H. (2014). "Energy." (OurWorldInData.org [Online Resource]).
- [24] Roumpos, C., Papakosta, E., Triantafyllou, G., and Paraskevis, N. (2014). "Key factors for optimizing mine planning of surface mines." *International Conference "Mineral resources and development possibilities - modern concepts"* Nicosia, Cyprus.
- [25] Roumpos, C., Pavloudakis, F., Liakoura, A., Nalmpanti, D., and Arampatzis, K. "Utilisation of Lignite Resources within the Context of a Changing Electricity Generation Mix." *Proc., 10th Jubilee International Brown Coal Mining Congress "Bełchatów", Bełchatów, Poland*, 355-365.
- [26] Stamatopoulos, A., and Kotzias, P. "Geotechnical properties of lignite." *Proc., Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Balkema, 789-792.
- [27] Steiakakis, C., Agioutantis, Z., Apostolou, E., and Papavgeri, G. "Mining in a Landslide - Is It Possible? Geotechnical Investigation and Analysis." *Proc., Geotechnical Frontiers 2017 - GSP 278*, ASCE, 264-274.
- [28] Steiakakis, C., Agioutantis, Z., Schilizzi, P., Papacosta, E., Tsalidis, A., and Pagonis, G. "Best practices for geotechnical planning and design in open pit mining operations - A sustainable engineering approach." *Proc., 6th International Conference on Sustainable Development in the Minerals Industry (SDIMI 2013)*, Heliotopos, 638-644.
- [29] Steiakakis, C., Apostolou, E., Papavgeri, G., Agioutantis, Z., and Schilizzi, P. (2016). "Large moving landslide inside a lignite mine in northern Greece." *Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice Proceedings of the 12th International Symposium on Landslides*, S. Aversa, L. Cascini, L. Picarelli, and C. Scavia, eds. Napoli, Italy.

- [30] Steiakakis, E., and Agioutantis, E. (2010). "A kinetic behavior model at a surface lignite mine, based on geotechnical investigation." *Simulation Modelling Practice and Theory*, 18(5), 558-573.
- [31] Tzalamarias, M., Tzalamarias, I., Benardos, A., and Marinos, V. (2018). "Room and Pillar Design and Construction for Underground Coal Mining in Greece." *Geotechnical and Geological Engineering*, 1-14.
- [32] Tzampoglou, P., and Loupasakis, C. (2017). "Mining geohazards susceptibility and risk mapping: The case of the Amyntaio open-pit coal mine, West Macedonia, Greece." *Environmental Earth Sciences*, 76(15), 542.
- [33] Tzampoglou, P., and Loupasakis, C. (2018). "Evaluating geological and geotechnical data for the study of land subsidence phenomena at the perimeter of the Amyntaio coalmine, Greece." *International Journal of Mining Science and Technology*, 28(4), 601-612.
- [34] Valkaniotis, S., Ganas, A., and Papathanassiou, G. (2017). "Rapid Mapping of the Amyntaio-Anargyroi landslide (Western Macedonia, Greece) using combined remote sensing techniques." *Oral Presentation. Safe Athens 2017*Athens.
- [35] Zavodni, Z. M. (2001). "Time-dependent movements of open-pit slopes." *Slope Stability in Surface Mining*, W. A. Hustrulid, M. K. McCarter, and D. J. A. Van Zyl, eds., Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME), 81-87.
- [36] Zevgolis, I. E., Deliveris, A. V., and Koukouzas, N. C. (2018). "Probabilistic design optimization and simplified geotechnical risk analysis for large open pit excavations." *Computers and Geotechnics*, 103, 153-164.
- [37] Zevgolis, I. E., Deliveris, A. V., and Koukouzas, N. C. (2019). "Slope failure incidents and other stability concerns in surface lignite mines in Greece." *Journal of Sustainable Mining*, 18(4), 182-197.
- [38] Zevgolis, I. E., Koukouzas, N. C., and Schilizzi, P. (2015). "Deformations and stability of a surface lignite mine - a challenging case study." *Proceedings, 5th International Symposium on Mineral Resources and Mine Development (AIMS 2015)*Aachen, Germany.
- [39] Καράς, Β. "Ευστάθεια πρηνών στα υπαίθρια λιγνιτωρυχεία." *Proc., 1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής Μηχανικής, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος - Ελληνική Επιστημονική Εταιρεία Εδαφομηχανικής και Θεμελιώσεων*, 193-198.
- [40] Λεονάρδος, Μ. (2004α). "Μέθοδοι και διαδικασίες παρακολούθησης, εκτίμησης και βελτίωσης της ευστάθειας των πρηνών των εκσκαφών των βαθέων ελληνικών λιγνιτικών εκμεταλλεύσεων." *Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα*.
- [41] Λεονάρδος, Μ. (2004β). "Μέτρα αντιμετώπισης των κατολισθήσεων στα περιφερειακά πρηνή των βαθέων λιγνιτικών εκμεταλλεύσεων / Remedial measures for the rim slopes failures in the greek deep lignite mines." *Ορυκτός Πλούτος*, 131, 9 - 18.
- [42] Λεονάρδος, Μ., and Τερεζόπουλος, Ν. (2002). "Προσδιορισμός του χρόνου επέλευσης της κατάρρευσης μιας κατολισθήσεως στα περιφερειακά πρηνή των βαθέων λιγνιτικών εκμεταλλεύσεων / Time estimation of slope failure collapse in the rim slopes of the deep lignite mines." *Ορυκτός Πλούτος*, 124, 7-18.
- [43] Στειακάκης, Ε., and Αγιουτάντης, Ζ. (2007). "Εκσκαφές μεγάλου βάθους με έμφαση στις επιφανειακές εκμεταλλεύσεις γαιανθράκων: Κινητική συμπεριφορά και γεωτεχνική διερεύνηση." *Ορυκτός Πλούτος*, 142, 47-62.



[44] Στειακάκης, Ε. Κ. (2003). "Συμπεριφορά ανοικτών εκσκαφών μεγάλου βάθους. Έρευνα γεωτεχνικών παραμέτρων και κινητικότητας εδαφών στο λιγνιτικό πεδίο Πτολεμαΐδας-Αμυνταίου." Διδακτορική Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.