



Πολυτεχνείο Κρήτης  
Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων

Μεταπτυχιακή Διατριβή

Αξιοπιστία συστήματος καθοδηγούμενης  
εξόρυξης σε εκσκαφέα καδοτροχού

Βασίλειος Γ. Δεληγιώργης

Χανιά  
Δεκέμβριος, 2020



Αποποίηση ευθυνών – Disclaim.

Copyright © Βασίλειος Δεληγιώργης, Δεκέμβριος 2020.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης ή τρίτου που συνέβαλε στην εργασία αυτή.

Τρόπος αναφοράς:

Δεληγιώργης Β., 2020, Αξιοπιστία συστήματος καθοδηγούμενης εξόρυξης σε εκσκαφέα καδο-τροχού, Μεταπτυχιακή διατριβή, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

Cite as:

Deligiorgis V., 2020, Reliability of a bucket-wheel excavator guidance system, Master Thesis, School of Mineral Resource Engineering, Technical University of Crete, Chania.

### **Εξεταστική επιτροπή:**

Μιχαήλ Γαλετάκης, Καθηγητής (επιβλέπων)

Αντώνιος Βαφείδης, Καθηγητής

Γεώργιος Εξαδάκτυλος, Καθηγητής



## Πρόλογος και ευχαριστίες

Ερέθισμα για την ενασχόλησή μου με αυτό το θέμα της διατριβής και την εκπόνησή της αποτέλεσαν τα σύγχρονα προβλήματα επάρκειας των ορυκτών πρώτων υλών τα οποία προκαλούνται από την απόκλιση της χρηστικής, της εμπορικής αξίας τους και των δαπανών παραγωγής. Τέτοια φαινόμενα εντείνονται συνεχώς προς την πορεία για μία περισσότερο πράσινη, ψηφιακή και κυκλική οικονομία και η επίλυσή τους γίνεται περισσότερο επιτακτική.

Η εξορυκτική βιομηχανία και η σχετική επιστημονική κοινότητα εστιάζει στην επίλυση αυτών των προβλημάτων με την αυτοματοποίηση των εξορυκτικών διαδικασιών. Σε αυτό το πλαίσιο αναπτύσσονται συνεργασίες μεταξύ του εξορυκτικού κλάδου και κυρίως του στρατιωτικού, ναυπηγικού και αεροδιαστημικού κλάδου σε ερευνητικό αλλά και εμπορικό επίπεδο. Αυτές οι διακλαδικές και διεπιστημονικές πρωτοβουλίες παράγουν προϊόντα και υπηρεσίες υψηλής προστιθέμενης αξίας. Εκτιμάται ότι οι πρωτοβουλίες αυτές θα ενταθούν το επόμενο χρονικό διάστημα κάτι το οποίο παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον από ερευνητική σκοπιά.

Οι σχεδιασμοί του πρώτου αυτοματοποιημένου ορυχείου στην Ελλάδα, που αφορά ένα υπόγειο ορυχείο λευκόλιθου στην Εύβοια και η ταυτόχρονη ενασχόληση μου με σχετικό ερευνητικό έργο για την αυτοματοποίηση της εξόρυξης με εκσκαφέα καδοτροχού έκανε αυτό το ενδιαφέρον ουσιαστικό επειδή τα ερευνητικά αποτελέσματα της αυτοματοποίησης σε τοπικό αλλά και παγκόσμιο επίπεδο συναντήθηκαν με τα δεδομένα της δικής μου έρευνας η οποία παράλληλα εξελισσόταν. Καθώς οι έννοιες εξελίσσονταν σε θεωρητικό επίπεδο και τελικά αποτυπώνονταν σε πρακτικό επίπεδο απαιτήθηκε η ενδελεχής μελέτη τους για την κατανόηση και τη περιγραφή τους. Σε αυτό το πλαίσιο δημιουργήθηκε έντονος προβληματισμός για τον τρόπο παρουσίασης των αποτελεσμάτων έτσι ώστε αφενός να παρουσιαστούν τα ερευνητικά αποτελέσματα σε περιορισμένη έκταση αλλά ταυτόχρονα να είναι επαρκώς τεκμηριωμένα καθότι υπεισέρονται πολλά και διαφορετικά ερευνητικά αντικείμενα.

Αυτή η πορεία στο δύσβατο μονοπάτι για τη κατανόηση των εννοιών της αυτοματοποίησης και την εφαρμογή τους στη πράξη είχε συνεχείς ανατροπές και συνεπώς αρκετές καθυστερήσεις. Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα κ. Γαλετάκη για την υποστήριξη του ερευνητικού μου έργου, την επεξήγηση των εννοιών στην ανάλυση αξιοπιστίας και την εκτίμηση της διακινδύνευσης αλλά και τις κρίσιμες παρατηρήσεις στο κείμενο της διατριβής. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της επιτροπής κ. Βαφείδη και κ. Εξαδάκτυλο για τη συμμετοχή τους και τα εύστοχα σχόλια και τις παρατηρήσεις τους. Τέλος θα ήθελα να τον κ. Βαφείδη και τον Δρ. Γ. Κρητικάκη για την επεξήγηση της λειτουργίας της μεθόδου κινητού πομπού-δέκτη.

Β.Γ. Δεληγιώργης

Χανιά, Δεκέμβρης 2020









## Σύνοψη

Η ελαχιστοποίηση του μοναδιαίου κόστους παραγωγής και η αύξηση της ασφάλειας κατά την εξόρυξη αποτελούν αναγκαίους παράγοντες για την αξιοποίηση οριακά εκμεταλλεύσιμων κοιτασμάτων. Στην επίτευξη του στόχου αυτού εκτιμάται ότι η προηγμένη αυτοματοποίηση των εξορυκτικών διαδικασιών μπορεί να προσφέρει σημαντικά.

Στη διατριβή αυτή αναλύεται η λειτουργία μιας πειραματικής ενόργανης μετρητικής διάταξης για την ανέπαφη αναγνώριση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των γεωλογικών σχηματισμών κατά την εξόρυξη. Η εξόρυξη πραγματοποιείται με εκσκαφέα καδοτροχού και αφορά γεωλογικούς σχηματισμούς των υπερκείμενων λιγνιτικού κοιτάσματος με έντονη παρουσία σκληρών σχηματισμών. Στόχος είναι να εξεταστούν οι δυνατές επιλογές για την ελαχιστοποίηση της διακινδύνευσης κατά την εξόρυξη. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της ανάπτυξης ενός συστήματος καθοδήγησης του εκσκαφέα σε πραγματικό χρόνο μέσω της δημιουργίας μηνυμάτων – οδηγιών προς τον χειριστή για την αποφυγή σύγκρουσης των κάδων του εκσκαφέα με σκληρούς σχηματισμούς που μπορεί να δημιουργήσουν σημαντικά προβλήματα-βλάβες.

Για τη βελτίωση της αξιοπιστίας του συστήματος χρησιμοποιείται η μέθοδος FMECA (Failure mode, effects and criticality analysis) προκειμένου να εντοπιστούν τα σημεία που χρήζουν αλλαγών-βελτιώσεων σε διάφορες φάσεις του κύκλου ζωής του συστήματος. Η ευελιξία της μεθόδου FMECA και η δυνατότητα προσδιορισμού της αποτελεσματικότητας της διασκόπησης, την καθιστούν κατάλληλη για αυτό τον σκοπό. Πιο συγκεκριμένα η μέθοδος χρησιμοποιείται για τη διασφάλιση της εφαρμογής της σωστής διαδικασίας διασκόπησης του μετώπου κατά την εξόρυξη και τον εκ των προτέρων προσδιορισμό των κατάλληλων παραμέτρων εκσκαφής.

Για την καλύτερη ανάλυση του συστήματος το οποίο, αποτελείται τόσο από υλικά εξαρτήματα όσο και από διαδικασίες, επιλέχθηκε η περιγραφή αυτού και των υποσυστημάτων του βάσει των σταδίων της αυτοματοποίησης. Το σύστημα αναλύεται σειριακά ξεκινώντας από τη διαδικασία της διασκόπησης για τον λεπτομερή διαχωρισμό των διαφορετικών γεωλογικών ιδιοτήτων των σχηματισμών και καταλήγει στις επιπτώσεις τόσο στα εξαρτήματα του εξοπλισμού όσο και στη διαδικασία της εκσκαφής. Η παραπάνω προσέγγιση αποτελεί βασικό στοιχείο του όρου «μεταλλευτική ακριβείας» ο οποίος προτείνεται για την περιγραφή της αυτοματοποίησης σε εξορυκτικά συστήματα και κυρίως της διαδικασίας της εκσκαφής.

Με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης αξιοπιστίας με μέθοδο FMECA εκτιμάται ότι η κατασκευή ενός αντίστοιχου βιομηχανικού πρωτοτύπου θα έχει βελτιωμένη απόδοση, ενώ με την επιλογή αποφάσεων από τον χειριστή οι οποίες ακολουθούν τις συμβουλές που παράγονται αυτοματοποιημένα σε πραγματικό χρόνο, η εξορυκτική διαδικασία θα βελτιωθεί σημαντικά.

## Abstract

The reduction of production cost and the enhancement of the mining safety are essential factors for the exploitation of the marginally mineable deposits. The advanced automation of the mining processes is considered the most promising solution to attain these goals.

In this dissertation the operation of an experimental system measuring contactless the electrical conductivity of geological formations during extraction is analyzed. The experimental system was installed to a bucket-wheel excavator that is used for the excavation of the overburden of a lignite deposit. This overburden includes hard formations which are difficult to be excavated by bucket-wheel excavators and the contact of buckets with these hard formations must be avoided. The final scope is to investigate the appropriate measures for risk mitigation during the mining procedure. This is achieved with the development of a real-time guidance system for the excavator in order to avoid collision of the buckets with hard formations.

For the reliability enhancement of this system, FMECA (Failure mode, effects and criticality analysis) method is used in order to detect the most vulnerable parts of the system at different phases of its life cycle. The flexibility of the method and the feature of detection are suitable for the accomplishment of this target. More specifically the method is used for the assurance of the implementation of the suitable procedure of bench face reconnaissance during the excavation, and for the determination of the appropriate excavation parameters in advance.

For an accurate reliability analysis, the system and its subsystems (consisting of hardware and processes) are defined in accordance to the stages of automation. The system is serially analyzed and the analysis begins from the accurate separation of the different geologic formation attributes and ends with the consequence to the mining equipment and the excavation process. This approach is related to the term “precision mining” which is proposed mainly for the definition of this type of automation in excavation.

Based on the results of the FMECA reliability analysis of the examined experimental system, it is anticipated that the corresponding industrial prototype will have better performance. The real-time consultation will aid operator to make the right decisions and the overall excavation process will be improved significantly.

# Περιεχόμενα

Πρόλογος και ευχαριστίες .....	v
Σύνοψη.....	ix
Abstract.....	x
Περιεχόμενα.....	xi
Κατάλογος σχημάτων .....	xii
Κατάλογος πινάκων .....	xiv
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή .....	1
1.1. Αντικειμενικός σκοπός και καινοτομίες της διατριβής .....	1
1.2. Δομή εργασίας.....	6
Κεφάλαιο 2ο: Η μεταλλευτική ακριβείας ως τμήμα της αυτοματοποίησης .....	7
2.1. Η αυτοματοποίηση στην εξορυκτική βιομηχανία .....	7
2.1.1. Η αλληλεπίδραση ανθρώπου-αυτοματοποίησης και ο ρόλος της στην κατασκευή ιεραρχικά δομημένων συστημάτων .....	7
2.1.2. Τα στάδια της αυτοματοποίησης στην εξορυκτική βιομηχανία, η ιστορική και η μελλοντική τους εξέλιξη .....	17
2.2. Το περιεχόμενο του όρου μεταλλευτική ακριβείας.....	24
2.3. Επιλογή μετρητικών διατάξεων για τη διασκόπηση μετώπου .....	27
2.4. Βασικά στοιχεία της μεθόδου κινητού πομπού-δέκτη (Slingram) .....	33
Κεφάλαιο 3ο: Βασικά στοιχεία της μεθόδου FMECA .....	37
3.1. Επιλογή μεθόδου εκτίμησης της διακινδύνευσης .....	37
3.2. Ιστορική εξέλιξη και εφαρμογές της FMECA στην εξορυκτική βιομηχανία ..	39
3.3. Διαδικασία υλοποίησης της μεθόδου FMECA .....	42
3.4. Εκτίμηση διακινδύνευσης με τη μέθοδο FMECA.....	47
Κεφάλαιο 4ο: Καθορισμός του συστήματος βάσει των αναγκών της μεθόδου FMECA..	53
4.1. Οι ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες και η περιγραφή της γεωλογίας της περιοχής μελέτης .....	53
4.1.1. Οι ηλεκτρικές και μαγνητικές ιδιότητες των υλικών .....	54
4.1.2. Η επίδραση της δομής των γεωυλικών στην ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα ..	55
4.1.3. Η δομή των πολυστρωματικών κοιτασμάτων λιγνίτη .....	57
4.2. Η δομή του συστήματος και οι τρόποι αστοχίας του .....	61
4.3. Περιγραφή των παραμέτρων του υποσυστήματος εκτέλεσης.....	66
4.3.1. Οι παράμετροι της μεθόδου εκμετάλλευσης και οι επιπτώσεις των αστοχιών της.....	67
4.3.2. Οι παράμετροι της μεθόδου εξόρυξης και οι επιπτώσεις των αστοχιών της.....	68
4.3.3. Τα μέσα καταγραφής και διαχείρισης των δεδομένων και οι αστοχίες τους.....	70
4.1. Υποσυστήματα λήψης αποφάσεων και προσομοίωσης .....	74
4.2. Υποσύστημα μετώπου-μετρητικής διάταξης.....	76
4.2.1. Η επίδραση των γεωλογικών παραμέτρων στη μέτρηση .....	76
4.2.2. Η επίδραση των παραμέτρων της μετρητικής διάταξης στις καταγραφές ..	80
4.2.3. Η επίδραση των μεταλλευτικών παραμέτρων στη μέτρηση.....	87
Κεφάλαιο 5ο: Εφαρμογή της μεθόδου FMECA για την εκτίμηση της αξιοπιστίας του συστήματος.....	91
Κεφάλαιο 6ο: Συμπεράσματα και προτάσεις.....	100
6.1. Συμπεράσματα.....	100
6.2. Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα .....	103
Αναφορές.....	104

## Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1.1: Εκσκαφέας καδοτροχού του οίκου Takraf, μαζί με τον βραχίονα και τις μετρητικές διατάξεις (δέκτης GPS και μετρητική διάταξη τύπου CMD-2, κόκκινα βέλη) .....	2
Σχήμα 1.2: Θάλαμος χειρισμού του εκσκαφέα και υπολογιστής για την καθοδήγηση του χειριστή. ....	2
Σχήμα 1.3: Σχηματική απεικόνιση των μετρητικών διατάξεων του συστήματος (Galetakis, 2017). ....	2
Σχήμα 2.1: Ποιοτική απεικόνιση αβεβαιότητας. Ο τρόπος προσδιορισμού μίας ιδιότητας μπορεί να είναι αντικειμενικός ή υποκειμενικός. Η σχέση εξάρτησης μεταξύ μίας ιδιότητας και του αυτοματισμού (οντότητας) αφορά το αν η ιδιότητα υπάρχει πριν την εισαγωγή του αυτοματισμού ή ανακύπτει από αυτόν. ....	16
Σχήμα 2.2: Πρωτεύοντα και δευτερεύοντα ηλεκτρομαγνητικά κύματα από τους Grant και West (1965) όπως τροποποιήθηκε από τον Reynold (1997). ....	34
Σχήμα 3.1: Λειτουργική (πάνω) και δομική (κάτω) προσέγγιση, διακρίνονται επίσης το επίπεδο ανάλυσης και τα ιεραρχικά επίπεδα. Τροποποιημένη από τον Clifton (2005). ....	44
Σχήμα 3.2: Δυνατές περιπτώσεις ανάλυσης του συστήματος με τη μέθοδο FMECA, ένα προϊόν ή μία διαδικασία αναλύεται είτε βάσει των δομικών του μονάδων είτε βάσει των λειτουργιών του. ....	45
Σχήμα 4.1: Χαρακτηριστική μορφή πολυστρωματικού λιγνιτικού κοιτάσματος (Delogos, 2016). ....	58
Σχήμα 4.2: Τομές βαθμίδων με διαφορετικούς τρόπους εμφάνισης σκληρών (κίτρινο) και μαλακών σχηματισμών, τροποποιημένο από τον Χωροπανίτη (2006). ....	59
Σχήμα 4.3: Ασύνδετοι χάλικες με καστανέρυθρη άργιλος (επάνω) καστανέρυθρη άργιλος (κάτω). ....	60
Σχήμα 4.4: Ιεραρχική δομή των υλικών και άυλων μέσων του συστήματος (α). Ιεραρχική δομή των διαδικασιών του συστήματος (β). Σειριακή δομή του συστήματος (γ). ....	64
Σχήμα 4.5: Μέθοδος εκλεκτικής εξόρυξης (Durst και Vogt, 1988; Γαλετάκης, 1996). ....	69
Σχήμα 4.6: Διεπαφή ανθρώπου υπολογιστή μαζί με κατάλληλες προειδοποιήσεις (Risk Panel), σε περίπτωση που υψηλές τιμές παραμένουν για πάνω από 5s αναδύεται ξεχωριστό μήνυμα. Επίσης στην εικόνα της κάμερας φαίνεται το μέτωπο εξόρυξης με το στήριγμα και τη μετρητική διάταξη. ....	71
Σχήμα 4.7: Απεικόνιση βάσης δεδομένων των καταγραφόμενων τιμών. Χρονοσειρά ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με μονάδες $[\Omega m]$ επάνω. Χρονοσειρά διακινδύνευσης (κόκκινο) σύγκρουσης με σκληρά μαζί την πιθανότητα (πράσινο) και την αντίσταση στη κοπή (μπλε), όλα αυτά τα μεγέθη είναι αδιάστατα. Χρονική διάρκεια με μονάδες [s] εκτέλεσης υπολογισμών για κάθε καταγραφή (κάτω). ....	71
Σχήμα 4.8: Διασυνδέσεις μεταξύ των διατάξεων και του υπολογιστή. ....	72
Σχήμα 4.9: Στήριγμα διατάξεων τοποθετημένο πάνω στον βραχίονα του εκσκαφέα. Διακρίνεται επίσης η μικρή απόσταση της διάταξης από το πρανές. ....	73
Σχήμα 4.10: Διάταξη τύπου CMD-2 εντός του προστατευτικού καλύμματος και της αστοχία βάσης του δέκτη του GPS. ....	73
Σχήμα 4.11: Νέα θέση του δέκτη του GPS μετά την αστοχία του στηρίγματος. ....	73
Σχήμα 4.12: Τοποθέτηση σκληρών σχηματισμών στη βαθμίδα ....	76
Σχήμα 4.13: Η θέση των σκληρών (πάσσαλοι) στη βαθμίδα κατά την εκσκαφή. ....	76
Σχήμα 4.14: Σκληρός σχηματισμός τοποθετημέν-ος πριν την ταφή. ....	77
Σχήμα 4.15: Ψευδοσκληρός σχηματισμός ο οποίος επηρεάζει τις μετρήσεις. ....	77
Σχήμα 4.16: Απεικόνιση μετώπου πριν τη διασκόπηση. ....	78

Σχήμα 4.17: Καταγραφή ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (επάνω) για το πάσο 25R0 όπως αποτυπώνεται στο Σχήμα 4.15 και παράμετροι διακινδύνευσης (κάτω). ....	78
Σχήμα 4.18: Μετεωρολογικά δεδομένα Μαΐου (πάνω). Μέση θερμοκρασία και υγρασία ανά 10 min για την 17/05/2018 (κάτω) από το σταθμό του Νοτίου Πεδίου (Lagouvardos et al., 2017). Ο υετός των 15 προηγούμενων ημερών ήταν 68.4 mm. ....	79
Σχήμα 4.19: Μετρητική διάταξη τύπου CMD-2 μαζί με το κάλυμμα, κατά τη διάρκεια διασκόπησης. ....	80
Σχήμα 4.20: Ευαισθησία μετρητικών διατάξεων για διάφορες διευθύνσεις πηνίων της εταιρείας Geonics. ....	81
Σχήμα 4.21: Δεδομένα από τις καταγραφές από τη δοκιμή εκτός του ορυχείου. Οι μετρήσεις στον Πίνακα 4.1 ορίζουν και τις τελευταίες μετρήσεις για τις τέσσερις πρώτες χρονοσειρές. ....	82
Σχήμα 4.22: Πειραματικά δεδομένα από την πρώτη δοκιμή στο ορυχείο Νοτίου πεδίου. ....	83
Σχήμα 4.23: Δεδομένα συντεταγμένων από την πρώτη δοκιμή στο ορυχείο Νοτίου Πεδίου στα οποία έχουν επισημανθεί τα σημεία όπου παραμένει σταθερός ο βραχίονας. ....	83
Σχήμα 4.24: Θέση διενέργειας πειράματος, άξονας πορείας και γωνία άξονα πορείας από τους θαμμένους σκληρούς σχηματισμούς. Το μήκος του τελευταίου τόξου είναι 50 m. ...	85
Σχήμα 4.25: Καταγραφή του ένατου πάσου κατά την εξόρυξη (R0) και την επιστροφή (R1) στο εσωτερικό της βαθμίδας. ....	85
Σχήμα 4.26: Πάσο 25R0 περίπου 1 m μακριά από τη θέση των σκληρών. ....	85
Σχήμα 4.27: Γωνίες διεύθυνσης $\omega_1$ και $\omega_2$ της ενόργανης διάταξης με τις δύο επιφάνειες κάθετα στην επιφάνεια της γης. ....	86
Σχήμα 4.28: Άποψη της γεωμετρικής μορφής του block εκμετάλλευσης στην οποία διακρίνεται η ακανόνιστη μορφή του δαπέδου της βαθμίδας και η «γεωμετρική» μορφή του μετώπου. ....	87
Σχήμα 4.29: Στεφάνη καδοτροχού (μικρός κύκλος), δόντια καδοτροχού (μεγάλος κύκλος) και απόσταση διάταξης από την προβολή της στεφάνης (πράσινο). Η ρύθμιση πραγματοποιείται με τον μεταλλικό βραχίονα. ....	89
Σχήμα 5.1: Μεταβολή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης των καταγραφών για το πάσο 26R0 (επάνω). Παράμετροι διακινδύνευσης πριν τη λήψη μέτρων δράσης (κέντρο). Υπολογισμός RPN μετά από την εφαρμογή των διορθωτικών προτάσεων (κάτω), αν δεν εφαρμοστούν αυτά τα μέτρα τότε ο RPN θα αυξηθεί στο επίπεδο της αντίστασης στην κοπή. ....	94

## Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 2.1: Στάδια και επίπεδα αυτοματοποίησης, τροποποιημένο από τους de Wardt et al. (2019), συνέχεια στην επόμενη σελίδα. ....	12
Πίνακας 3.1: Πίνακας ανάλυσης FMECA όπως συνήθως συναντάται στη βιβλιογραφία.....	51
Πίνακας 3.2: Ποιοτική κλίμακα για τη σοβαρότητα και τον ρυθμό αστοχίας. ....	52
Πίνακας 4.1: Επίδραση της απόστασης διάταξης μετώπου στη μετρούμενη τιμή και ο συντελεστής διόρθωσής της. ....	82
Πίνακας 5.1: Πίνακας ανάλυσης FMECA για το υποσύστημα μετώπου-μετρητικής διάταξης κατασκευασμένο από τα δεδομένα των μετρήσεων του Σχήματος 6.1. ....	98
Πίνακας 5.2: Πίνακας ανάλυσης FMECA για το υποσύστημα εκτέλεσης για το ογκοστοιχείο «25-30» του Πίνακα 6.1. ....	99

# Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται συνοπτικά στην Ενότητα [1.1] η ακολουθία των συλλογισμών από τον αρχικό στόχο της διατριβής έως και τις καινοτομίες που ανέκυσαν στη διαδρομή επίτευξής του και στην Ενότητα [1.2] παρουσιάζεται αναλυτικά η δομή της.

## 1.1. Αντικειμενικός σκοπός και καινοτομίες της διατριβής

Αντικειμενικός σκοπός της παρούσας διατριβής είναι η μελέτη της αξιοπιστίας ενός πειραματικού συστήματος προειδοποίησης για εκσκαφείς καδοτροχού το οποίο αναπτύχθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού έργου «BEWEXMIN: Bucket wheel excavators operating under difficult mining conditions including unmineable inclusions and geological structures with excessive mining resistance» έτσι ώστε να βελτιωθεί και να εξελιχθεί σε επόμενο στάδιο ένα λειτουργικό βιομηχανικό πρωτότυπο. Η βελτίωση αφορά την ελαχιστοποίηση της διακινδύνευσης τόσο κατά τη φάση του σχεδιασμού του, όσο και κατά τη μόνιμη λειτουργία του.

Το πειραματικό σύστημα που αναπτύχθηκε (η Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων ήταν υπεύθυνη για τη συγκεκριμένη δράση), βασίζεται σε μία γεωφυσική μετρητική διάταξη και έχει τη δυνατότητα να προβλέπει τη πιθανότητα σύγκρουσης των κάδων ενός εκσκαφέα καδοτροχού με σκληρούς σχηματισμούς κατά την εξόρυξη των υπερκείμενων ενός λιγνιτικού κοιτάσματος και να προειδοποιεί τον χειριστή.

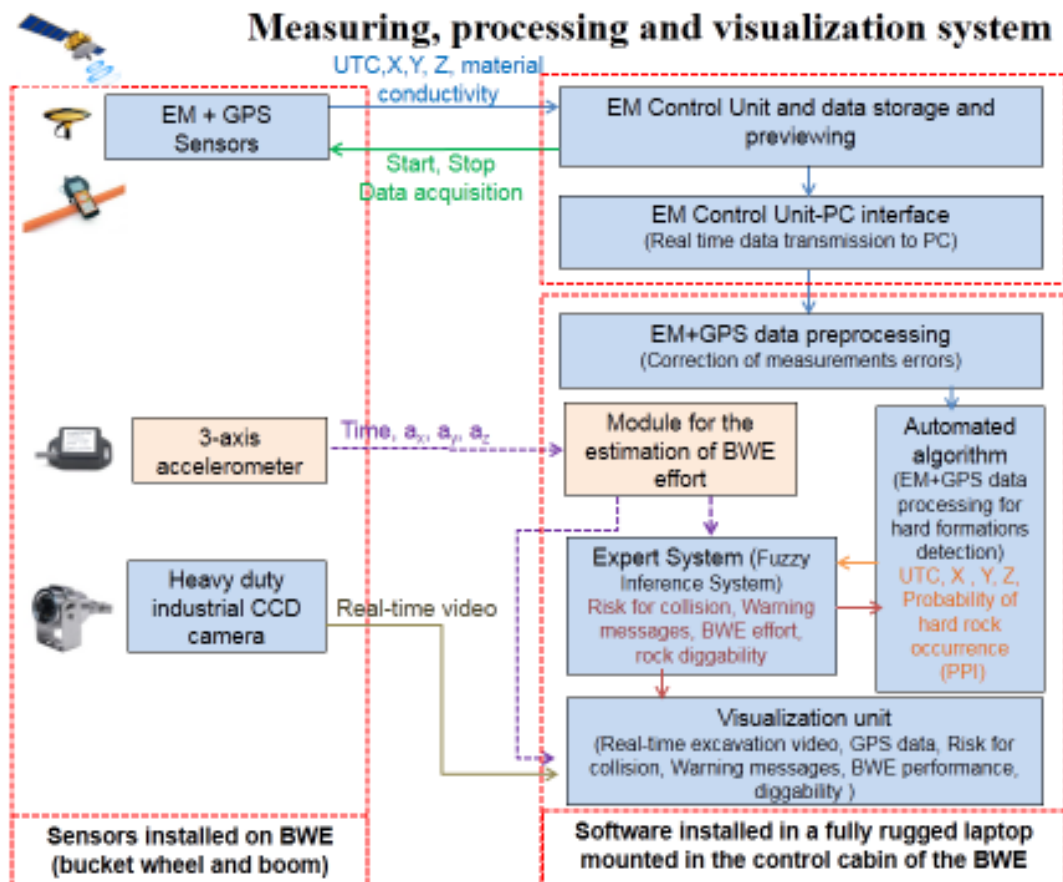
Συνοπτικά το σύστημα αυτό αποτελούνταν από έναν εκσκαφέα καδοτροχού (Σχήμα 1.1) στον οποίο εγκαταστάθηκε μία πειραματική διάταξη αποτελούμενη από ένα ηλεκτρομαγνητικό όργανο ανέπαφης μέτρησης της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του μετώπου, έναν δέκτη GPS (Global positioning system) για τον προσδιορισμό της θέσης του καδοτροχού και μία κάμερα για τον οπτικό έλεγχο του μετώπου εξόρυξης. Τα όργανα και η κάμερα συνδέονταν με ένα ηλεκτρονικό υπολογιστή (Σχήμα 1.2 και Σχήμα 1.3) για αποθήκευση, επεξεργασία και αξιολόγηση των συλλεγόμενων στοιχείων κάτι το οποίο υλοποιήθηκε με ειδικό λογισμικό (HaRoR: Hard Rock Reconnaissance) το οποίο αναπτύχθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού έργου. Το σύστημα αξιολογήθηκε μέσω δοκιμαστικών εκσκαφών που πραγματοποιήθηκαν σε περιοχή του ορυχείου εντός της οποίας υπήρχε μη αποκαλυμμένος σκληρός σχηματισμός του οποίου η θέση ήταν γνωστή. Κατά τη δοκιμαστική εκσκαφή επιβεβαιώθηκε ότι μέσω της διάταξης που αναπτύχθηκε είναι δυνατός ο έγκαιρος εντοπισμός του σκληρού σχηματισμού και κατά συνέπεια μπορεί να αποφευχθεί η σύγκρουση του κάδου με τους σκληρούς σχηματισμούς που συνήθως οδηγούν σε σημαντικές βλάβες και καθυστερήσεις στην εξορυκτική διαδικασία (Galetakis et al., 2018).



Σχήμα 1.1: Εκσκαφέας καδοτροχού του οίκου Takraf, μαζί με τον βραχίονα και τις μετρητικές διατάξεις (δέκτης GPS και μετρητική διάταξη τύπου CMD-2, κόκκινα βέλη)



Σχήμα 1.2: Θάλαμος χειρισμού του εκσκαφέα και υπολογιστής για την καθοδήγηση του χειριστή.



Σχήμα 1.3: Σχηματική απεικόνιση των μετρητικών διατάξεων του συστήματος (Galetakis, 2017).



Κατά τη διάρκεια της δοκιμαστικής λειτουργίας διαπιστώθηκε ότι προκειμένου αυτή η πειραματική διάταξη να μετεξελιχθεί σε ένα πρωτότυπο σύστημα καθοδηγούμενης εξόρυξης, λειτουργικό και αποτελεσματικό σε συνθήκες ορυχείου πρέπει να επιλυθεί μια σειρά λειτουργικών προβλημάτων-αστοχιών που σχετίζονται κυρίως με τις ιδιαιτερότητες του μετώπου εξόρυξης και την απαιτούμενη προσαρμογή του πειραματικού συστήματος (υλικό και λογισμικό) σε αυτές. Πιο αναλυτικά δύο βασικές προκλήσεις προκύπτουν. Η μία αφορά τη δημιουργία μίας μεθοδολογίας η οποία να υποστηρίζει την παραγωγή αξιόπιστων πρωτοτύπων με περιορισμένες δαπάνες. Η δεύτερη αφορά τη δημιουργία μίας μεθοδολογίας η οποία να εντοπίζει τότε και ποιες αστοχίες παράγονται στο σύστημα, ώστε να καθοδηγείται ο χειριστής για την αντιμετώπισή τους με συγκεκριμένα μηνύματα-προειδοποιήσεις, πριν την εκσκαφή και σε πραγματικό χρόνο.

Η αντιμετώπιση αυτών των δύο προκλήσεων είναι βασικός στόχος της διατριβής. Κατά την πορεία ολοκλήρωσης του έργου και την εξέλιξη της μελέτης για την επίτευξη του στόχου προέκυψαν καινοτόμες προσεγγίσεις που σχετίζονται με:

1. Τη χρήση μίας μεικτής μεθόδου FMECA (failure modes effects and criticality analysis) για την εκτίμηση της διακινδύνευσης του συστήματος με στόχο την αξιολόγηση τόσο της μεθόδου εξόρυξης και των γεωλογικών σχηματισμών όσο και του εξοπλισμού.
2. Τον χαρακτηρισμό των γεωυλικών με τη διακινδύνευση ή αντίθετα με την ασφάλεια.
3. Ένα επαρκέστερο ορισμό της μεταλλευτικής ακριβείας, δηλαδή την αυτοματοποίηση της εξόρυξης με επίκεντρο τα γεωλογικά χαρακτηριστικά του κοιτάσματος.
4. Την κατηγοριοποίηση των τρόπων αυτοματοποίησης σε όλες τις εξορυκτικές διαδικασίες στο σύνολο της εξορυκτικής βιομηχανίας, βάσει της οποίας δημιουργείται μία περισσότερο σειριακή δομή του συστήματος.

Πρώτο βήμα για την επίτευξη του στόχου είναι η ανάλυση της αξιοπιστίας του συστήματος ώστε να εντοπιστούν τα σημεία με τη μεγαλύτερη τρωτότητα. Για αυτό επιλέχθηκε η μέθοδος FMECA, η οποία δίνει τη δυνατότητα της εκ των προτέρων εκτίμησης της διακινδύνευσης, λόγω μίας αστοχίας (failure), σε ένα σύστημα. Πιο συγκεκριμένα με αυτή τη μέθοδο συνθέτονται εμπειρικά και στατιστικά δεδομένα των «εξαρτημάτων» του συστήματος ώστε να εκτιμηθεί η συμπεριφορά των συνθετότερων εξαρτημάτων και τελικά του συνόλου του συστήματος σε μία άγνωστη κατάσταση λειτουργίας για την οποία δεν υπάρχουν απολογιστικά δεδομένα. Το σύστημα αναλύεται ιεραρχικά σε υποσυστήματα-εξαρτήματα, εντοπίζονται, μελετώνται-περιγράφονται οι τρόποι αστοχίας των εξαρτημάτων και παρουσιάζονται σε ένα συγκεντρωτικό πίνακα. Στη συνέχεια με βάση λογικούς ή εμπειρικούς κανόνες εκτιμώνται οι επιπτώσεις στο σύστημα με τον υπολογισμό της διακινδύνευσης του κάθε τρόπου αστοχίας. Τελικά έχοντας εντοπίσει εκ των προτέρων τα πιο ευάλωτα εξαρτήματα προτείνονται τρόποι-μέτρα δράσης ώστε να μεγιστοποιηθεί η ασφάλεια του συστήματος συνολικά.

Η διαδικασία αυτή είναι κυρίως προδραστική και μπορεί να εφαρμοστεί στις διάφορες φάσεις ανάπτυξης του συστήματος όπως στη φάση σχεδιασμού, κατασκευής (πρωτοτύπου, τελικού προϊόντος, την τροποποίηση ή τη βελτίωση ενός συστήματος κτλ.) και για την εκ των προτέρων αναγνώριση αστοχιών κατά τη λειτουργία (δοκιμαστική, κανονική-μόνιμη κτλ.). Αυτό καθίσταται εφικτό διότι η μέθοδος μπορεί να διαχειριστεί περίπλοκα συστήματα τα οποία

αποτελούνται από διαδικασίες (Processes) και υλικά (Hardware) με αποτέλεσμα να εντάσσονται στην αξιολόγηση ένα σύνολο παραμέτρων από τις διαδικασίες και τα γεωυλικά και όχι για παράδειγμα μόνο η αντοχή του γεωυλικού, η διαθεσιμότητά του εξοπλισμού κτλ. Η μεικτή μέθοδος που δημιουργήθηκε αναλύει αρχικά το σύστημα ως διαδικασία (εξόρυξης) και στη συνέχεια αναλύει τις επιπτώσεις της εξορυκτικής διαδικασίας στα υλικά του εξοπλισμού.

Επειδή στην εξεταζόμενη περίπτωση η εξορυκτική διαδικασία αφορά τα γεωυλικά και η μέθοδος FMECA απαιτεί τα εξαρτήματα του συστήματος να χαρακτηριστούν με τη διακινδύνευση (risk), τα γεωυλικά (γεωλογικοί σχηματισμοί του μετώπου εξόρυξης) αναλύονται ως «εξαρτήματα» του συστήματος και χαρακτηρίζονται με τη διακινδύνευση. Η διακινδύνευση υπολογίζεται από την πιθανότητα (probability) να συμβεί ένα γεγονός (αστοχία ή σφάλμα) προερχόμενο από μία πηγή κινδύνου πολλαπλασιασμένη με τη σημαντικότητα (severity) της επίπτωσης. Σε αντίθεση με άλλες μεθόδους όπου υπολογίζεται μόνο η διακινδύνευση στη μέθοδο FMECA χρησιμοποιείται μία συγγενής οντότητα, ο αριθμός προτεραιότητας διακινδύνευσης ο οποίος αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία ως risk priority number (RPN). Ο υπολογισμός του RPN γίνεται με τον πολλαπλασιασμό της διακινδύνευσης με την ανιχνευσιμότητα (detectability) η οποία αντιπροσωπεύει την αποτελεσματικότητα των μεθόδων ανίχνευσης της αστοχίας που χρησιμοποιεί ένα σύστημα. Στη συνέχεια πρέπει να ορισθεί ένα ανώτατο όριο διακινδύνευσης πέραν του οποίου θεωρείται ότι προκύπτει αστοχία στο σύστημα.

Ο υπολογισμός της διακινδύνευσης και ο προσδιορισμός των ορίων είναι μία σχετικά απλή διαδικασία όταν αναφέρεται σε χαρακτηριστικά των υλικών-«εξαρτημάτων» τα οποία μπορούν να αποτιμηθούν αντικειμενικά, όπως ο μη παραγωγικός χρόνος, η διάρκεια και ο τύπος ηλεκτρομηχανολογικών βλαβών, το κόστος των αναλώσιμων κ.α. Ωστόσο όταν αναλύονται διαδικασίες όπως η ερμηνεία γεωφυσικών δεδομένων, υπεισέρχεται ο ανθρώπινος παράγοντας. Για τον λόγο αυτό τα χαρακτηριστικά αυτά εκτιμώνται περισσότερο υποκειμενικά με αποτέλεσμα να δημιουργούνται προβλήματα αλληλεξαρτήσεων μεταξύ των υποσυστημάτων-εξαρτημάτων του συστήματος. Αυτό συμβαίνει διότι απουσιάζει ένας κοινός δείκτης σύγκρισης των διαφορετικών αστοχιών. Η επιλογή διαφορετικών δεικτών δημιουργεί αλληλεπικαλύψεις μεταξύ τους κάτι το οποίο υποδηλώνει αλληλεξαρτήσεις μεταξύ των «εξαρτημάτων» του συστήματος. Η λύση βρίσκεται στην κατάλληλη επιλογή του δείκτη, σε συνδυασμό με την κατάλληλη επιλογή της δομής και της διαμέρισης του συστήματος.

Η χρήση μίας μεικτής μεθόδου FMECA η οποία αναλύει τόσο την εξορυκτική διαδικασία όσο και τον εξοπλισμό έχει δύο προαπαιτούμενα προκειμένου να είναι λειτουργική. Το πρώτο αφορά την κατανόηση της γεωλογικής αβεβαιότητας μέσω της καταγραφής των ιδιοτήτων των γεωυλικών. Αυτό είναι αναγκαίο διότι από τα γεωυλικά προέρχονται οι περισσότερες αστοχίες και επομένως αποτελούν κοινή βάση για τη σύγκριση διαφορετικών αστοχιών. Προδήλως από αυτή τη βάση (γεωλογικές ιδιότητες) οφείλει να ξεκινάει και η ανάλυση του συστήματος. Το δεύτερο σχετίζεται με τη διαμέριση του συστήματος (διαδικασίας) η οποία είναι αναγκαίο να υλοποιηθεί με μία δομημένη μορφή ώστε να μην υπεισέρχονται πρόσθετες αλληλεξαρτήσεις αλλά και να μειώνονται αυτές που προέρχονται από τη γεωλογική αβεβαιότητα.

Επόμενο βήμα για την εφαρμογή αυτής της μεικτής μεθόδου είναι να κατανοηθεί ο τρόπος λειτουργίας των ενόργανων-μετρητικών διατάξεων (εφεξής διατάξεις). Στόχος είναι να διερευνηθούν παράμετροι όπως το αν οι χρησιμοποιούμενες μέθοδοι είναι καταστρεπτικές ή όχι, το

κόστος κτήσης των διατάξεων, η ακρίβεια με την οποία αναλύουν τους γεωλογικούς σχηματισμούς κτλ. Απώτερος σκοπός είναι να μειωθεί η αβεβαιότητα των μετρήσεων τόσο με την επιλογή νέων διατάξεων για ένα βελτιωμένο βιομηχανικό πρωτότυπο αλλά και τη βελτίωση των παραμέτρων λειτουργίας των διατάξεων οι οποίες είναι εγκατεστημένες στο εξεταζόμενο σύστημα.

Η πρόβλεψη των ιδιοτήτων εκ των προτέρων, με σκοπό τη βραχυπρόθεσμη γεωλογική χαρτογράφηση του μετώπου αλλά και του block πριν την εκσκαφή του, σε συνδυασμό με την ανάγκη αυτή να υλοποιείται σε πραγματικό χρόνο κατά την εξόρυξη όπου το μέτωπο συνεχώς μεταβάλλεται, περικλείει το περιεχόμενο του όρου «μεταλλευτική ακρίβειας». Αυτός ο όρος τεκμηριώνεται επαρκέστερα σε αυτή τη διατριβή και έχει στόχο τη δυνατόν πλήρως αυτοματοποιημένη εξόρυξη με τη χαμηλότερη δυνατή διακινδύνευση.

Για την επίτευξη αυτού του στόχου εκτός από τις μεθόδους οι οποίες διαχωρίζουν με ακρίβεια τους γεωλογικούς σχηματισμούς στο μέτωπο είναι απαραίτητο το ίδιο το σύστημα να είναι δομημένο με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιεί την ενδογενή αβεβαιότητα που παράγεται εντός του συστήματος και τελικά να διευκολύνει τον παραπάνω στόχο. Συνεπώς ο όρος μπορεί να επεκταθεί και στον τρόπο διαμέρισης του συστήματος (διαδικασιών) ο οποίος με ακρίβεια «τοποθετεί» και επιλέγει τα μέρη του συστήματος ώστε να ελαχιστοποιούνται οι αλληλεξαρτήσεις μεταξύ τους.

Λύση στο πρόβλημα των αλληλεξαρτήσεων δίνει η μελέτη της αυτοματοποίησης και πιο συγκεκριμένα των σταδίων της στην εξορυκτική βιομηχανία. Αυτή αφορά τις αλληλεπιδράσεις Ανθρώπου-Αυτοματισμών-Μετώπου, οι οποίες μπορούν να χωριστούν σε στάδια αυτοματοποίησης. Αυτά προέρχονται από την προσομοίωση των ανθρώπινων εργασιών τα οποία με βάση την επικρατούσα άποψη είναι, η αυτοματοποίηση της αίσθησης, της αντίληψης-προσομοίωσης, της λήψης αποφάσεων και της εκτέλεσης των αποφάσεων. Με την υποδιαίρεση των υποσυστημάτων σύμφωνα με τα στάδια αυτοματοποίησης επιτυγχάνεται μία σειριακή δομή των εξορυκτικών διαδικασιών η οποία επιτρέπει την εφαρμογή της μεικτής FMECA σε ένα περίπλοκο σύστημα όπως το εξεταζόμενο.

Με βάση την παραπάνω συλλογιστική σχεδιάστηκε ο τρόπος εφαρμογής της FMECA με τελικό σκοπό να αποτελέσει έναν τεχνικό «σύμβουλο» κυρίως του χειριστή αλλά και του σχεδιαστή για την ελαχιστοποίηση της διακινδύνευσης του παραγόμενου «προϊόντος».

## 1.2. Δομή εργασίας

Στο Κεφάλαιο [2] περιγράφεται η αυτοματοποίηση και τα στάδιά της με έμφαση στην εξορυκτική διαδικασία ενώ αναλύεται η σχέση της με τον ανθρώπινο παράγοντα και τη γεωλογία. Προτείνεται ο όρος μεταλλευτική ακριβείας με τον οποίο δημιουργείται μία ιεραρχική και σειριακή δομή του συστήματος βάσει των σταδίων αυτοματοποίησης και με αφετηρία ανάλυσης τα γεωλογικά χαρακτηριστικά του κοιτάσματος. Στη συνέχεια μελετώνται οι κατάλληλες μετρητικές διατάξεις που αποτελούν το πρώτο βήμα για αυτού του τύπου την αυτοματοποίηση. Στο τέλος αυτού του κεφαλαίου αναλύεται η γεωφυσική μέθοδος που επιλέχθηκε για την ανάπτυξη του συστήματος καθοδηγούμενης εξόρυξης.

Στο Κεφάλαιο [3] γίνεται μία αναλυτική παρουσίαση της μεθόδου FMECA. Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζεται η τεκμηρίωση για την επιλογή της η οποία βασίζεται τόσο στα χαρακτηριστικά της μεθόδου όσο και στη σχετική βιβλιογραφική ανασκόπηση για την εξορυκτική βιομηχανία που πραγματοποιείται γι' αυτό το σκοπό. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η μέθοδος, περιγράφονται τα βήματά της και αναλύεται ο τρόπος εκτίμησης της διακινδύνευσης.

Στο Κεφάλαιο [4] παρουσιάζονται τα γεωλογικά χαρακτηριστικά του κοιτάσματος με έμφαση στα ηλεκτρικά και μαγνητικά χαρακτηριστικά των γεωυλικών. Στη συνέχεια περιγράφεται το σύστημα και υποδιαιρείται σε τέσσερα υποσυστήματα σύμφωνα με τα στάδια αυτοματοποίησης, βάση των αναγκών της FMECA. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στο πρώτο και στο τέταρτο υποσύστημα που αφορούν τον τρόπο καταγραφής και το υλικό τμήμα του συστήματος αντίστοιχα.

Στο Κεφάλαιο [5] εφαρμόζεται η μέθοδος στο σύστημα όπως προηγουμένως αναλύθηκε και προτείνεται ένα πλαίσιο ελαχιστοποίησης της διακινδύνευσης τόσο σε επίπεδο σχεδιασμού πρωτοτύπου όσο και για την επιλογή βέλτιστων τακτικών κατά την εξόρυξη. Τέλος στο Κεφάλαιο [6] παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της διατριβής και οι προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

## **Κεφάλαιο 2ο: Η μεταλλευτική ακριβείας ως τμήμα της αυτοματοποίησης**

Η αυτοματοποίηση είναι μία υποσχόμενη διέξοδος για τις προκλήσεις που αντιμετωπίζει η εξορυκτική βιομηχανία. Παρά το γεγονός ότι τα προβλήματα της εξορυκτικής βιομηχανίας έχουν κοινά αίτια δεν υπάρχει μία ενιαία αντιμετώπιση στο σύνολο της. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μία προσπάθεια να αναπτυχθεί ένα πλαίσιο για την περιγραφή ενός καθοδηγούμενου συστήματος εξόρυξης, το οποίο μπορεί να τύχει γενικότερης εφαρμογής στην εξορυκτική βιομηχανία.

Αρχικά περιγράφονται η αυτοματοποίηση και τα στάδιά της στα πλαίσια μίας θεωρητικής και ιστορικής ανάλυσης ενώ επιπρόσθετα παρουσιάζονται και τα προβλήματα που αυτή επιλύει αλλά και δημιουργεί (Ενότητα [2.1]). Στη συνέχεια εστιάζεται η ανάλυση των εξορυκτικών διαδικασιών, με αφετηρία τα γεωλογικά χαρακτηριστικά του κοιτάσματος. Με αυτή την νέα οπτική θεώρηση η σε πραγματικό χρόνο, κατά την εξόρυξη, αυτοματοποίηση οδηγεί στην πρόταση για μία ακριβέστερη θεμελίωση του ορισμού της μεταλλευτικής ακριβείας (Ενότητα [2.2]). Στην Ενότητα [2.3] παρουσιάζεται ο τρόπος επιλογής ενόργανων διατάξεων που καταγράφουν δεδομένα στα πλαίσια των αναγκών του νέου ορισμού. Τέλος στην Ενότητα [2.4] αναλύεται ο τρόπος λειτουργίας της διάταξης που χρησιμοποιήθηκε στο καθοδηγούμενο σύστημα το οποίο μελετάται, της οποίας οι αρχές λειτουργίας βασίζονται στη γεωφυσική μέθοδο κινητού πομπού-δέκτη (Slingram).

### **2.1. Η αυτοματοποίηση στην εξορυκτική βιομηχανία**

Στην Υποενότητα [2.1.1] παρουσιάζονται βιβλιογραφικά τα βασικά σημεία της αυτοματοποίησης και η αλληλεπίδρασή της με τον άνθρωπο. Η κατανόηση αυτής της αλληλεπίδρασης είναι βασικό στοιχείο για τη δημιουργία συστημάτων χωρίς έντονες αλληλεξαρτήσεις στα υποσυστήματά τους. Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο η αβεβαιότητα μίας ιδιότητας χρησιμοποιείται για να καθορίσει πότε μία παράμετρος, συνεισφέρει στη δημιουργία ενός προβλήματος και ποιοι παράμετροι χρησιμοποιούνται ώστε αυτό να λυθεί. Σε αυτό το πλαίσιο αναλύονται τα στάδια της αυτοματοποίησης και εναρμονίζονται με τις διαδικασίες της εξορυκτικής βιομηχανίας στην Υποενότητα [2.1.2]. Ταυτόχρονα δίνονται βιβλιογραφικά παραδείγματα παρουσιάζοντας την ιστορική εξέλιξη κάθε σταδίου τα οποία περιγράφουν και τις προκλήσεις της αυτοματοποίησης στην εξορυκτική βιομηχανία. Επίσης παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο η κάθε ιδιότητα μπορεί να χαρακτηριστεί με τη διακινδύνευση.

#### **2.1.1. Η αλληλεπίδραση ανθρώπου-αυτοματοποίησης και ο ρόλος της στην κατασκευή ιεραρχικά δομημένων συστημάτων**

Για την καλύτερη παρουσίαση του αντικειμένου διαχωρίζονται οι έννοιες αυτοματοποίηση, αυτονομία, νοημοσύνη (intelligence) ή ευφυΐα (smart) και συσχετίζονται με τη γνώση. Στην καθημερινότητα το προαναφερθέν λεξιλόγιο χρησιμοποιείται ως επιθετικός προσδιορισμός για μηχανές, υπολογιστικά συστήματα, αλγόριθμους και άλλες παρόμοιες οντότητες. Η

τακτική αυτή χρησιμοποιείται για επικοινωνιακούς λόγους ενώ, αρκετά συχνά υιοθετείται και από την επιστημονική κοινότητα. Ωστόσο η ύπαρξη πανομοιότυπων εννοιών οι οποίες περιγράφουν συγγενείς οντότητες δημιουργεί σύγχυση και αλλάζει το περιεχόμενο των οντοτήτων. Μία κριτική σε αυτή την επικοινωνιακή τακτική μπορεί να συμπυκνωθεί στη φράση: «*Αν οι μηχανές είχαν νοημοσύνη τότε θα απεργούσαν*».

Δύο χαρακτηριστικά παραδείγματα της επικρατούσας άποψης είναι τα παρακάτω. Όταν ο χειριστής δηλαδή αυτός που λαμβάνει τις αποφάσεις δεν είναι ο άνθρωπος το σύστημα είναι αυτόνομο. Έξυπνο είναι ένα σύστημα όταν το ίδιο μαθαίνει μόνο του. Οι θεωρήσεις αυτές είναι απλουστευτικές καθώς δεν εξηγούν ποιος έπλασε το σύστημα αυτόνομο, ούτε με ποιο τρόπο απέκτησε τη νοημοσύνη. Αν αλλάξουν οι καταστάσεις, με τις οποίες ένα σύστημα έχει «μάθει» να συμπεριφέρεται έξυπνα και αυτόνομα, θα συνεχίσει να συμπεριφέρεται έτσι; Με την υφέρπουσα απροσδιοριστία πιθανόν να συνάγεται ότι η αυτονομία και η νοημοσύνη αποτελούν εξελικτικό στάδιο των μηχανών το οποίο μόνες τους αποκτούν.

Πιο συγκεκριμένα ενώ διαπιστώνεται η ορθή ετυμολογική μετάφραση, αυτοκυβέρνηση (self-government), της λέξης αυτονομία (Bradshaw et al., 2004), δεν γίνεται χρήση της εναλλακτικής «fully automated». Με αυτό τον τρόπο ενισχύεται η έννοια της ανεξάρτητης και ελεύθερης διακυβέρνησης των μηχανών με το χαρακτηριστικό της αυτοδιάθεσης των ιδίων των μηχανών και όχι ως χρηστικό εργαλείο που απελευθερώνει τον ίδιο τον άνθρωπο, κάτι το οποίο τελικά αποδίδει στις μηχανές υπερβατικά χαρακτηριστικά.

Ουσιαστικά, το απροσδιόριστο νέφος εννοιών χρησιμοποιείται για να σκιαγραφηθούν οι τρόποι συμπύκνωσης της υπάρχουσας γνώσης σε ένα υπολογιστικό σύστημα-αλγόριθμο. Οι αλγόριθμοι και οι αρχικές τους συνθήκες σχεδιάζονται και καθορίζονται αντίστοιχα, από τους ανθρώπους. Απώτερος σκοπός είναι οι αλγόριθμοι, τυποποιημένα να σχεδιάζουν και τελικά να λαμβάνουν αποφάσεις σε καλά ορισμένες και διακριτές διαδικασίες με μικρό ποσοστό αβεβαιότητας. Επιπρόσθετα αυτή η αβεβαιότητα έχει τυχαίο χαρακτήρα ο οποίος προκύπτει από τα ίδια τα δεδομένα δηλαδή στη συγκεκριμένη περίπτωση, τους γεωλογικούς σχηματισμούς και γενικότερα τη γεωλογική δομή και όχι από την «κρίση» του ίδιου του αλγόριθμου. Τέτοιοι αλγόριθμοι στην επιστήμη είναι ακατάλληλοι και σε κάθε περίπτωση αναξιόπιστοι καθώς δεν αναπαράγουν επαναλήψιμα και ακριβή αποτελέσματα.

Ο αντίκτυπος αυτής της, επικοινωνιακά, κυρίαρχης άποψης και στην εξορυκτική βιομηχανία είναι η δημιουργία μίας χαοτικής κατάστασης κατά την οποία δεν είναι ξεκάθαρο ποιο είναι το διακύβευμα από την περαιτέρω διεξόδου της αυτοματοποίησης. Εφόσον δεν είναι ο άνθρωπος που ωφελείται αλλά οι «μηχανές», γιατί να υπάρξει αντικατάσταση; Τελικά αυτή η σύγχυση οδηγεί στην απουσία αντικειμενικού στόχου η οποία «αποκαρδιώνει» κάθε προσπάθεια προς την κατεύθυνση της αυτοματοποίησης. Αντιθέτως η συνεισφορά του ανθρώπου είναι περισσότερο αναγκαία και καθοριστική όσο τα εξορυκτικά συστήματα αυτοματοποιούνται.

Σαφέστατα η αυτοματοποίηση αντικαθιστά ένα τμήμα της ανθρώπινης εργασίας - όπως υφίσταται - ταυτόχρονα όμως τη συμπληρώνει, δημιουργώντας νέες δυνατότητες οι οποίες προηγουμένως δεν υπήρχαν.

Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η καταγραφή των ιδιοτήτων εντός του μετώπου για την οποία ο άνθρωπος δεν έχει τα κατάλληλα αισθητήρια όργανα. Από τα δεδομένα αυτών των καταγρα-

φών παράγεται πλήθος προειδοποιήσεων και γραφικών τα οποία ενισχύουν την ανθρώπινη αίσθηση αντικαθιστώντας ένα τμήμα της και συμπληρώνοντας ένα άλλο με μεγέθη που προηγουμένως δεν γινόντουσαν αντιληπτά.

Πλέον η παρουσία του ανθρώπου σε υψηλού βαθμού αυτοματοποιημένα συστήματα αφορά τον έλεγχο και κυρίως την επίβλεψη της παραγωγικής διαδικασίας και λιγότερο την ενεργή συμμετοχή του στην εκτέλεσή της. Αυτά τα νέα καθήκοντα ισχυροποιούν το ρόλο του ανθρώπου σε πιο εποπτικές θέσεις, για τα οποία πλέον είναι αναγκαίο να αναπτυχθούν νέες δεξιότητες. Η αλλαγή του ρόλου του ανθρώπινου δυναμικού είναι μία πρόκληση από την οποία η μεταλλευτική βιομηχανία δεν αποτελεί εξαίρεση (Rogers et al., 2019). Πρέπει λοιπόν να προσδιοριστούν οι σχέσεις συνεργασίας και συμπληρωματικότητας του ανθρώπινου παράγοντα και των αυτοματισμών ώστε να μην προκύπτουν προβλήματα.

Υπάρχουν αρκετές μελέτες περιγραφής αυτών των σχέσεων σε διαφορετικά είδη βιομηχανιών, μία εκ των οποίων των (Kaber και Endsley, 2004) παρουσιάζει ενδιαφέρον καθώς αποτυπώνει το επίπεδο αυτοματοποίησης σε σχέση με τις συμπεριφορικές επιπτώσεις στον χειριστή ενός μηχανήματος με τρεις δείκτες, την απόδοση του χειριστή, την επίγνωση της κατάστασης (situation awareness) και το φόρτο εργασίας του. Μία πιο πρόσφατη μετά-ανάλυση (Onnasch et al., 2013) μελετά αυτές τις επιπτώσεις σε δεδομένα από 18 πειράματα ενώ πραγματοποιείται μία πιο λεπτομερής περιγραφή των προβλημάτων. Το ευρύτερο πρόβλημα μελετάται θεωρητικά από την ψυχολογία και την εργονομία συνεπικουρούμενες από την κατάλληλη επιστήμη μηχανικών και αναφέρεται βιβλιογραφικά ως αλληλεπίδραση ανθρώπου-αυτοματοποίησης (human-automation interaction).

Το ενδιαφέρον για αυτόν τον κλάδο άρχισε να γίνεται εντονότερο κατά την προετοιμασία των διαστημικών αποστολών στη σελήνη (Ferrell, 1965; Ferrell και Sheridan, 1967) αλλά και κατά τις υποθαλάσσιες εξερευνήσεις (Sheridan και Verplank, 1978). Ωστόσο η αναζήτηση ξεκινά με τη διαχείριση ραδιενεργών υλικών και με την εντατικοποίηση της στρατιωτικής βιομηχανίας, όπου οι πρώτοι προβληματισμοί χρονολογούνται από τις δεκαετίες του 40' και του 50'. Στην εποχή μας υπάρχει μεγαλύτερη ένταση στη συζήτηση αυτή καθώς αναπτύσσονται τάσεις αναθεώρησης (Kaber, 2018) της πρώτης ουσιαστικής θεμελίωσης, η οποία πραγματοποιήθηκε από τις έρευνες για την αεροπορική βιομηχανία κυρίως τη δεκαετία του 80' και 90'. Αυτές οι νέες θεωρήσεις σχετίζονται με την επιλογή του κατάλληλου τύπου προσομοίωσης της αλληλεπίδρασης ανθρώπου-αυτοματοποίησης τόσο για τις ανάγκες της στρατιωτικής βιομηχανίας όσο και για αυτές της αυτοκινητοβιομηχανίας.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η προσομοίωση (modeling) των ανθρώπινων εργασιών δεν πραγματοποιείται ενιαία για όλους τους βιομηχανικούς κλάδους διότι, κάθε κλάδος έχει διαφορετικές προτεραιότητες και οπτικές για το ίδιο θέμα. Επίσης αυτή η προσομοίωση δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί με ένα γραμμικό αιτιοκρατικό μοντέλο, πολλές φορές ακόμα και για τις ίδιες εργασίες, συνεπώς υφίσταται ασυμφωνία μεταξύ πραγματικότητας και ομοιώματος της αλληλεπίδρασης το οποίο μεταφέρεται στο τρόπο μοντελοποίησης ανθρώπου-αυτοματοποίησης.

Οι πρώτες προσπάθειες προσομοίωσης της σχέσης ανθρώπου-αυτοματοποίησης παρήγαγαν μία περισσότερο εμπειρική-πρακτική κατηγοριοποίηση (Taxonomy) η οποία διαχωρίζει την ανθρώπινη εργασία σε διάφορα επίπεδα (Sheridan και Verplank, 1978). Ο αριθμός των επιπέδων ποικίλλει ανάλογα με τις ανάγκες κάθε κλάδου, ωστόσο η κατηγοριοποίηση των έξι

επιπέδων (βλέπε παρακάτω) και δέκα επιπέδων (Sheridan και Verplank, 1978) έχει επικρατήσει. Οι εμπειρικές προσεγγίσεις αποτελούν την κυρίαρχη άποψη στις θεωρίες της εργονομίας και συνεπώς ακολουθούνται από την εξορυκτική βιομηχανία κυρίως όσον αφορά τις γεωτρητικές διαδικασίες κατά την εξόρυξη υδρογονανθράκων. Αυτές αποτυπώνονται στον οδικό χάρτη για την αυτοματοποίησης των γεωτρητικών διαδικασιών σε κοιτάσματα υδρογονανθράκων (de Wardt et al., 2019) και λιγότερο στην υπόλοιπη εξορυκτική βιομηχανία, χωρίς ωστόσο να υπάρχει μία ενιαία προσέγγιση από όλους τους κλάδους.

- Επίπεδο 0: Καθόλου αυτοματοποίηση.
- Επίπεδο 1: Καθοδήγηση του χειριστή.
- Επίπεδο 2: Αυτοματοποίηση χαμηλού βαθμού.
- Επίπεδο 3: Αυτοματοποίηση μεσαίου βαθμού.
- Επίπεδο 4: Αυτοματοποίηση υψηλού βαθμού.
- Επίπεδο 5: Πλήρης αυτοματοποίηση.

Προκειμένου να βελτιωθεί η παραπάνω θεώρηση των επιπέδων, οι (Parasuraman et al., 2000) προσομοίωσαν μία ανθρώπινη εργασία αρχικά, με τέσσερα στάδια (1) την αίσθηση, (2) την αντίληψη, (3) τη λήψη αποφάσεων και (4) τη δράση. Αντίστοιχα η αυτοματοποίηση περιλαμβάνει τα ισοδύναμα βιομηχανικά στάδια (stages) τα οποία είναι (1) η καταγραφή με μετρητικές διατάξεις, (2) η προσομοίωση, (3) η τυποποιημένη λήψη αποφάσεων και (4) η εκτέλεση των αποφάσεων. Στη συνέχεια τα στάδια διαχωρίζονται σε διαφορετικά επίπεδα (levels) με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένας δισδιάστατος πίνακας με στάδια και επίπεδα (Πίνακας 2.1).

Με αυτό τον τρόπο διαχωρισμού των ανθρώπινων εργασιών δίνεται έμφαση στην ανάθεση «ευθυνών» στους αυτοματισμούς, όπως αναλύεται παρακάτω, με αποτέλεσμα ορισμένες διαδικασίες όπως αυτή της καθοδήγησης να εμπεριέχονται σε διαφορετικά επίπεδα ή στάδια. Η έννοια της καθοδήγησης αφορά τη δημιουργία με αυτοματοποιημένο τρόπο των κατάλληλων οδηγιών προς τον χειριστή ώστε να βελτιστοποιηθεί η εξόρυξη. Με βάση τον ίδιο πίνακα η καθοδήγηση περιλαμβάνει ορισμένα στοιχεία των επιπέδων στη στήλη Γ και του επιπέδου στη Δ2.

Μία άλλη περίπτωση είναι η διαδικασία της επεξεργασίας και της διαλογής των δεδομένων το οποίο αφορά το δεύτερο στάδιο όμως στον πίνακα εμφανίζεται και στο πρώτο. Επίσης στο δεύτερο στάδιο σε ορισμένα επίπεδα παράγονται προειδοποιήσεις για τον χειριστή κάτι το οποίο απαιτεί τη λήψη μίας απόφασης, η οποία όμως πραγματοποιείται στο επόμενο στάδιο. Στο τελευταίο στάδιο (Δ) δίνεται έμφαση στο άυλο τμήμα εκτέλεσης των αποφάσεων και όχι στη μηχανοποίηση η οποία αυξάνει σε μεγαλύτερο βαθμό την παραγωγικότητα. Όσον αφορά τον τηλεχειρισμό είναι ένας σύνθετος τύπος κατά τον οποίο ο χειριστής απομακρύνεται, σε πρώτη φάση, από το θάλαμο χειρισμού εντός του μηχανήματος και η καταγραφή των ιδιοτήτων γίνεται αυτοματοποιημένα όπως επίσης και ορισμένες εργασίες εκτέλεσης της απόφασης.

Με την κατηγοριοποίηση σε επίπεδα αποτυπώνεται θεωρητικά, ο βαθμός αυτοματοποίησης ενός συστήματος, ο οποίος υποδεικνύει τότε ο άνθρωπος αναθέτει ευθύνες στους αυτοματισμούς. Η «ανταλλαγή» των εργασιών μεταξύ ανθρώπου και αυτοματισμού πραγματοποιείται όταν οι αστοχίες των αυτοματισμών είναι λιγότερο επικίνδυνες από τα λάθη ή τις αδυναμίες του ανθρώπου. Έχει ιδιαίτερη σημασία ο προσδιορισμός αυτού του ορίου «ανάθεσης» ευθυνών



διότι ταυτόχρονα καθορίζεται και το όριο της διακινδύνευσης που αναλαμβάνει η εταιρεία αλλά και ο ίδιος ο εργαζόμενος. Από αυτό τελικά προσδιορίζεται το ύψος κυρίως, των μισθολογικών δαπανών χωρίς όμως να είναι πάντα εφικτό να προταθεί ο υπεύθυνος για την ανάληψη των νομικών βαρών σε περίπτωση ατυχήματος ή μη καλής λειτουργίας.

Το συγκεκριμένο όριο «ανάθεσης» εργασίας για κάθε επίπεδο αυτοματοποίησης πρέπει να προσδιοριστεί με κάποιο δείκτη αποτελεσματικότητας-απόδοσης αυτής της αλληλεπίδρασης. Η μέτρηση της απόδοσης του συστήματος μπορεί να έχει βάση τον ανθρώπινο παράγοντα, τον αυτοματισμό ή το κοίτασμα.

Στην πρώτη περίπτωση μπορεί να βρεθεί πως και τότε οι αυτοματισμοί δημιουργούν σωματικές επιπτώσεις, συμπεριφορικές και άλλες επιπτώσεις με την τροποποίηση της εργασίας του ανθρώπου. Ωστόσο καθώς οι ικανότητες του εκάστοτε ανθρώπου μεταβάλλονται, δεν μπορεί να αποτελέσει μία σταθερή βάση για ένα τέτοιο κριτήριο. Ένα ακόμα υποψήφιο κριτήριο έχει βάση την απόδοση των ίδιων των αυτοματισμών, σε αυτή την περίπτωση δεν περιέχονται τυχαίες παράμετροι διότι οι αυτοματισμοί είναι «προϊόντα» με συγκεκριμένες προδιαγραφές και δεν υπάρχει ενιαία κοινή βάση για διαφορετικές εξορυκτικές διαδικασίες.

Αντιθέτως ένα κριτήριο απόδοσης που βασίζεται στα γεωλογικά χαρακτηριστικά του κοιτάσματος αφενός, στηρίζεται σε μία σταθερή βάση διότι αυτά δεν εξαρτώνται από κάποια άγνωστη παράμετρο. Αφετέρου, όλες οι εργασίες-διαδικασίες που αφορούν την εξόρυξη προέρχονται από τα γεωλογικά χαρακτηριστικά του κοιτάσματος. Με αυτό τον τρόπο μπορεί ένα σύστημα να διαχωριστεί ένα σύστημα ώστε να αποκτήσει μία ιεραρχική ή μία σειριακή δομή.

Αφού έχει προσδιοριστεί η ενιαία βάση επόμενο βήμα είναι να προσδιοριστεί η μεταβλητή αυτού του λόγου. Υπάρχουν αρκετές δυνατότητες όπως η παραγωγικότητα της εργασίας, η παραγωγή του χρήσιμου ορυκτού κτλ. ωστόσο, καταλληλότερο μέγεθος είναι οι αστοχίες οι οποίες συμβαίνουν καθώς οι περισσότερες παράμετροι της εξόρυξης εξαρτώνται από το πόσο συχνά το σύστημα αστοχεί.

Συμπερασματικά μία σχέση η οποία περιλαμβάνει τις αστοχίες της αυτοματοποίησης και τα γεωλογικά χαρακτηριστικά του κοιτάσματος στα οποία οφείλονται οι περισσότερες αστοχίες αποτελεί ένα κατάλληλο μέγεθος για τη μέτρηση της απόδοσης της «ανάθεσης».

Δεν δημιουργούν όλες οι αστοχίες προβλήματα με την ίδια ένταση. Η έντασή τους εξαρτάται από το εάν έχουν ένα γνωστό μηχανισμό δράσης ή όχι. Το πρώτο σημείο των αυτοματισμών είναι παραγωγή αστοχιών με άγνωστο μηχανισμό καθώς δε λαμβάνονται υπόψη κατά τον σχεδιασμό των συστημάτων, συνεπώς δεν εφαρμόζονται προδραστικά μέτρα για να αντιμετωπιστούν. Βασικό στοιχείο του ανθρώπου είναι ότι εντοπίζει, αντιμετωπίζει και καταγράφει άμεσα όποια αστοχία προκύψει. Με την απουσία-περιορισμένη παρουσία του σε αυτοματοποιημένα συστήματα τέτοιες αστοχίες αγνοούνται και προξενούν σημαντικές βλάβες σε πιο σύνθετα υποσυστήματα της δαπανηρής υποδομής ενός αυτοματοποιημένου ορυχείου. Αυτό συμβαίνει διότι δεν υπάρχουν ούτε άνθρωποι, ούτε προδραστικά μέτρα για να περιορίσουν τις αστοχίες. Επιπρόσθετα δεν υπάρχει τρόπος να κατανοηθεί ο μηχανισμός τους ώστε οι αστοχίες να ενσωματωθούν στους αλγόριθμους. Είναι επιτακτικό λοιπόν να καθοριστεί μία μεθοδολογία με την οποία διαχωρίζεται η κανονική λειτουργία του συστήματος από τη λειτουργία με ύπαρξη αστοχιών.

Πίνακας 2.1: Στάδια και επίπεδα αυτοματοποίησης, τροποποιημένο από τους de Wardt et al. (2019), συνέχεια στην επόμενη σελίδα.

<b>A-Καταγραφή ιδιοτήτων</b>	<b>B-Προσομοίωση</b>	<b>Γ-Λήψη αποφάσεων</b>	<b>Δ-Εκτέλεση</b>
<b>A0-Ανθρώπινη αίσθηση</b>	<b>B0-Ανθρώπινη νόηση</b>	<b>Γ0-Ανθρώπινη λήψη αποφάσεων</b>	<b>Δ0-Χειροκίνητη εκτέλεση και παρακολούθηση</b>
Χρήση μόνο της ανθρώπινης αίσθησης χωρίς τη χρήση κάποιου μέσου, ψηφιακού ή μη ψηφιακού.	Χρήση μόνο των νοητικών διαδικασιών του ανθρώπου χωρίς τη χρήση κάποιου μέσου, ψηφιακού ή μη ψηφιακού.	Η παραγωγή εναλλακτικών επιλογών, η επιλογή και η απόφαση για την εκτέλεσή της πραγματοποιείται σύμφωνα με την κρίση του χειριστή.	Η εκτέλεση της απόφασης πραγματοποιείται χειρωνακτικά χωρίς πολύ μηχανοποιημένα μέσα.
<b>A1-Υποστηριζόμενη καταγραφή</b>	<b>B1-Υποστηριζόμενη προσομοίωση</b>	<b>Γ1-Υποστηριζόμενη λήψη αποφάσεων</b>	<b>Δ1-Μηχανοποίηση</b>
Χρήση της ανθρώπινης αίσθησης χωρίς την χρήση κάποιου ψηφιακού μέσου.	Χρήση των ανθρώπινων νοητικών διαδικασιών χωρίς την χρήση κάποιου ψηφιακού μέσου.	Η παραγωγή εναλλακτικών επιλογών, η επιλογή της και η απόφαση για την εκτέλεσή της πραγματοποιείται σύμφωνα με τη κρίση του χειριστή με τη χρήση μη ψηφιακών μέσων.	Η εκτέλεση της απόφασης πραγματοποιείται με μηχανοποιημένες μεθόδους χωρίς την χρήση λογισμικού.
<b>A2-Αυτοματοποιημένη καταγραφή χαμηλού επιπέδου</b>	<b>B2- Αυτοματοποιημένη προσομοίωση χαμηλού επιπέδου</b>	<b>Γ2-Αυτοματοποιημένη υποστήριξη αποφάσεων</b>	<b>Δ2-Καθοδηγούμενη εκτέλεση</b>
Η καταγραφή πραγματοποιείται αυτοματοποιημένα αλλά η προεπεξεργασία και η διαλογή των δεδομένων γίνεται από τον άνθρωπο.	Με αίτηση του χειριστή πραγματοποιείται προσομοίωση ανάλογα με τις διαδικασίες που ακολουθούνται.	Παράγονται αυτοματοποιημένα εναλλακτικές επιλογές. Ο χειριστής μπορεί να προσθέσει νέες επιλογές ενώ ο ίδιος αποφασίζει για την επιλογή μίας εξ' αυτών.	Με πρωτοβουλία του χειριστή εκτελείται και ελέγχεται από αυτόν η εντολή με την καθοδήγηση του είτε με αυτοματοποιημένη εκτέλεση μέρους της εντολής ή παρέχοντας πληροφορίες για τον τρόπο εκτέλεσης.
<b>A3-Αυτοματοποιημένη καταγραφή μεσαίου επιπέδου</b>	<b>B3-Αυτοματοποιημένη προσομοίωση μεσαίου επιπέδου</b>	<b>Γ3-Αυτοματοποιημένη υποστήριξη προεπιλεγμένων αποφάσεων</b>	<b>Δ3-Χαμηλού βαθμού αυτοματοποιημένη καθοδήγηση της εκτέλεσης</b>

Η καταγραφή πραγματοποιείται αυτοματοποιημένα αλλά ο συνδυασμός διαφορετικών δεδομένων, η προεπεξεργασία και η διαλογή τους γίνεται με κριτήρια τα οποία θέτει ο χειριστής κατά τη λειτουργία του συστήματος.	Με αίτηση του χειριστή πραγματοποιείται προσομοίωση ανάλογα με τις διαδικασίες που ακολουθούνται. Επίσης παράγονται προειδοποιήσεις για τον χειριστή.	Παράγονται αυτοματοποιημένα εναλλακτικές επιλογές από τις οποίες ο χειριστής λαμβάνει απόφαση.	Με πρωτοβουλία του χειριστή εκτελείται αυτοματοποιημένα μία εντολή και ίδιος έχει την δυνατότητα να παρακολουθεί, να διακόπτει και να τροποποιεί την εντολή.
<b>A4</b> -Αυτοματοποιημένη καταγραφή υψηλού επιπέδου	<b>B4</b> -Αυτοματοποιημένη προσομοίωση υψηλού επιπέδου	<b>Γ4</b> -Αυτοματοποιημένη λήψη αποφάσεων χαμηλού επιπέδου	<b>Δ4</b> -Υψηλού βαθμού αυτοματοποιημένη καθοδήγηση της εκτέλεσης
Η καταγραφή πραγματοποιείται αυτοματοποιημένα αλλά ο συνδυασμός διαφορετικών δεδομένων, η προεπεξεργασία και η διαλογή των δεδομένων γίνεται με κριτήρια τα οποία θέτει ο σχεδιαστής του συστήματος και τα κριτήρια είναι ορατά στο χειριστή.	Χωρίς αίτηση του χειριστή πραγματοποιείται προσομοίωση ανάλογα με τις διαδικασίες που ακολουθούνται βάσει προκαθορισμένων παραμέτρων από τον χειριστή. Επίσης παράγονται προειδοποιήσεις για τον χειριστή.	Η λήψη αποφάσεων πραγματοποιείται αυτοματοποιημένα και ο χειριστής ενημερώνεται για την απόφαση που επιλέχθηκε.	Με πρωτοβουλία του χειριστή εκτελείται αυτοματοποιημένα μία εντολή και ίδιος έχει την δυνατότητα να παρακολουθεί και να διακόπτει την εντολή αυτή.
<b>A5</b> -Πλήρως αυτοματοποιημένη καταγραφή	<b>B5</b> -Πλήρως αυτοματοποιημένη προσομοίωση	<b>Γ5</b> -Αυτοματοποιημένη λήψη αποφάσεων μεσαίου επιπέδου	<b>Δ5</b> -Χαμηλού επιπέδου αυτοματοποίησης της δράσης
Η καταγραφή πραγματοποιείται αυτοματοποιημένα αλλά ο συνδυασμός διαφορετικών δεδομένων, η προεπεξεργασία και η διαλογή των δεδομένων γίνεται με κριτήρια τα οποία θέτει ο σχεδιαστής του συστήματος και τα κριτήρια είναι ορατά στο χειριστή.	Πραγματοποιείται αυτοματοποιημένα προσομοίωση ανάλογα με τις διαδικασίες που ακολουθούνται βάσει προκαθορισμένων παραμέτρων από τον σχεδιαστή. Επίσης παράγονται προειδοποιήσεις για τον χειριστή.	Η λήψη αποφάσεων πραγματοποιείται αυτοματοποιημένα και ο χειριστής ενημερώνεται μετά από αίτησή του για την απόφαση που επιλέχθηκε. (Απαιτείται αυτοματοποιημένη εκτέλεση της απόφασης)	Η εντολή εκτελείται αυτοματοποιημένα και ο χειριστής μπορεί να παρακολουθεί, να διακόπτει και να τροποποιεί αυτή την εντολή.

-	-	<b>Γ6-Αυτοματοποιημένη λήψη αποφάσεων υψηλού επιπέδου</b>	<b>Δ6-Μεσαίου επιπέδου αυτοματοποίησης της δράσης</b>
-	-	Η λήψη αποφάσεων πραγματοποιείται αυτοματοποιημένα και ο χειριστής δεν ενημερώνεται για την απόφαση που επιλέχθηκε. (Απαιτείται αυτοματοποιημένη εκτέλεση της απόφασης)	Η εντολή εκτελείται αυτοματοποιημένα και ο χειριστής μπορεί να παρακολουθεί και να διακόπτει αυτή την εντολή.
-	-	-	<b>Δ7-Υψηλού επιπέδου αυτοματοποίησης της εκτέλεσης</b>
-	-	-	Η εντολή εκτελείται αυτοματοποιημένα και ο χειριστής μπορεί να παρακολουθεί μέρος της εκτέλεσης και έχει περιορισμένες ευκαιρίες για διακοπή της εντολής.
-	-	-	<b>Δ8-Πλήρης αυτοματοποίηση της εκτέλεσης</b>
-	-	-	Η εντολή εκτελείται αυτοματοποιημένα χωρίς να υπάρχει δυνατότητα παρακολούθησης και διακοπής της εντολής πριν την εκτέλεσή της.

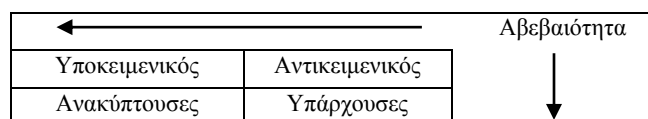
Συγκεκριμένα η εξορυκτική βιομηχανία αποτελεί μία περίπτωση με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τα οποία δυσχεραίνουν την ανίχνευση μίας αστοχίας ειδικά σε τηλεχειριζόμενα ή πλήρως αυτοματοποιημένα συστήματα για τέσσερεις λόγους.

Αρχικά λόγω της συνεχώς ενισχυόμενης ανάγκης για γνώση των γεωλογικών ορίων εντός των οποίων περιλαμβάνεται το χρήσιμο ορυκτό πριν την εξόρυξη, επάνω αλλά κυρίως μέσα στο μέτωπο, ο χειριστής δεν είναι ικανός να ξεχωρίσει μικρότερες διαφορές στα ποιοτικά γεωλογικά χαρακτηριστικά του μετώπου. Δεύτερον για λόγους ασφαλείας ο χειριστής απομακρύνεται από το μέτωπο με αποτέλεσμα να υπάρχει απώλεια της άμεσης επαφής με αυτό. Συνεπώς αν προκύψει μία αστοχία δεν είναι δυνατό πάντα να την παρατηρήσει έγκαιρα καθώς πιθανόν να υπάρξει αυξημένος φόρτος εργασίας. Τρίτον διότι τα παραγόμενα δεδομένα από τους αισθητήρες δεν είναι εύκολα ερμηνεύσιμα-προσπελάσιμα από τον χειριστή, ακόμα και στην περίπτωση που είναι εκπαιδευμένος γι' αυτό, το πλήθος των δεδομένων είναι απαγορευτικό. Είναι λοιπόν εύκολο από μία λανθασμένη ερμηνεία των δεδομένων οι αστοχίες να μην γίνουν αντιληπτές. Τέταρτον σε συνθήκες υψηλού βαθμού αυτοματοποίησης οι αστοχίες είναι περισσότερο σπάνιες και πιο δύσκολα ανιχνεύσιμες από τον άνθρωπο διότι μειώνεται η επίγνωση της κατάστασης του εργασιακού αντικειμένου ενώ επίσης, οι αστοχίες «παραβλέπονται» και από τους αυτοματισμούς.

Μερικά από τα παραπάνω έχουν διαπιστωθεί και στη βιομηχανία γεωτρήσεων για υδρογονάνθρακες. Στην έκθεση οδηγό (de Wardt et al., 2019) αναφέρεται ότι καλά εκπαιδευμένα πληρώματα είναι πιο αποδοτικά από ένα αυτοματοποιημένο σύστημα. Επίσης έχει διαπιστωθεί ότι όσο απομακρύνονται οι άνθρωποι από τις παραγωγικές διαδικασίες και εργασίες, αυτές παύουν να εξελίσσονται.

Παρά την πρωτοπορία της βιομηχανίας υδρογονανθράκων σε θέματα που αφορούν την αυτοματοποίηση, η μεταλλευτική βιομηχανία έχει κάνει επίσης σημαντικά βήματα. Μία τέτοια εφαρμογή είναι η αυτοματοποίηση των λειτουργιών των φορτωτών στο υπόγειο ορυχείο χρυσού-χαλκού Northparkes στη Νέα Νότια Ουαλία της Αυστραλίας, όπου χρησιμοποιείται η μέθοδος της κατακρήμνισης οροφής (Burgess-Limerick et al., 2019). Σε αυτήν την περίπτωση ο χειριστής έχει απομακρυνθεί από το ορυχείο και έχει την ευθύνη για τον τηλεχειρισμό τριών φορτωτών. Στη διαδικασία επεμβαίνει ο άνθρωπος μόνο κατά τη φάση φόρτωσης του μεταλλεύματος ενώ η μεταφορά και η εκφόρτωση στο φορτηγό πραγματοποιείται αυτοματοποιημένα. Κατά την εφαρμογή ενός τέτοιου συστήματος είναι απαραίτητη η επικοινωνία μεταξύ των χειριστών των μηχανημάτων και των απομακρυσμένων χειριστών καθώς δημιουργούνται προβλήματα τα οποία δεν είχαν προβλεφθεί κατά τον σχεδιασμό. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι ο σημαντικός περιορισμός των μη χρήσιμων σημάτων-πληροφοριών από το εργοτάξιο, όπως το μεγάλο πλήθος προειδοποιήσεων, ο θόρυβος και άλλες πληροφορίες από το εργοτάξιο.

Ενώ είναι αναγκαία η χρήσης μίας μεθόδου η οποία θα ελαχιστοποιεί τις αστοχίες και έχει διαπιστωθεί (Burgess-Limerick, 2020) ότι οι μέθοδοι εκτίμησης της διακινδύνευσης έχουν σημαντικό ρόλο σε αυτό, δεν υπάρχουν εφαρμογές οι οποίες να ελαχιστοποιούν εκ των προτέρων τη διακινδύνευση. Τέτοιες εφαρμογές αποτελούν δύσκολα υλοποιήσιμα εγχειρήματα καθότι οι αλληλεπιδράσεις ανθρώπου-αυτοματισμών-μετώπου και ιδιαίτερα ο ρόλος της γεωλογικής στοχαστικότητας παράγουν συστήματα τα οποία εμπεριέχουν πολλές άγνωστες αλληλεξαρτήσεις μεταξύ των υποσυστημάτων τους.



Σχήμα 2.1: Ποιοτική απεικόνιση αβεβαιότητας. Ο τρόπος προσδιορισμού μίας ιδιότητας μπορεί να είναι αντικειμενικός ή υποκειμενικός. Η σχέση εξάρτησης μεταξύ μίας ιδιότητας και του αυτοματισμού (οντότητας) αφορά το αν η ιδιότητα υπάρχει πριν την εισαγωγή του αυτοματισμού ή ανακύπτει από αυτόν.

Ο τρόπος προσδιορισμού των ιδιοτήτων της οντότητας (αυτοματισμός, σύστημα, υποσύστημα εξαρτήματα κτλ.) η οποία αστοχεί και οι σχέσεις εξάρτησης μεταξύ των ιδιοτήτων και της εκάστοτε οντότητας καθορίζουν την περιεχόμενη αβεβαιότητα σε μία ιδιότητα (Σχήμα 2.1) επομένως και τις αλληλεξαρτήσεις της.

Όταν ο προσδιορισμός των ιδιοτήτων γίνεται με τεχνοοικονομικά δεδομένα όπως για παράδειγμα στην περίπτωση της μέτρησης της απόστασης από το μέτωπο, ο προσδιορισμός έχει αντικειμενικά χαρακτηριστικά που τεκμηριώνονται. Όταν υπεισέρχονται στοχαστικές παράμετροι όπως ο ανθρώπινος παράγοντας και η γεωλογία ο τρόπος προσδιορισμού των ιδιοτήτων είναι υποκειμενικός. Τέτοιες περιπτώσεις αφορούν την υγεία και ασφάλεια στην εργασία, την ίδια την εργασία του ανθρώπου, την αλληλεπίδραση του ανθρώπου με ένα λογισμικό (αλγόριθμο), την κοινωνία, τις επενδυτικές επιλογές, την επίδραση των περιβαλλοντικών, κοινωνικών και κανονιστικών επιπτώσεων στο μεταλλευτικό έργο κτλ.

Η υποκειμενικότητα όσον αφορά τον ανθρώπινο παράγοντα κινείται σε δύο άξονες. Ο πρώτος σχετίζεται με την ικανότητα του ανθρώπου να προσαρμοστεί σε ένα περιβάλλον κατά τη λειτουργία του συστήματος που έχει τον ρόλο του επιβλέποντα για την παρακολούθηση του συστήματος ώστε σε περίπτωση αστοχίας του να δράσει άμεσα. Ο δεύτερος σχετίζεται με την ικανότητα του ανθρώπου να σχεδιάζει με τέτοιο τρόπο ώστε οι αυτοματισμοί να «αντιλαμβάνονται» σφάλματα τα οποία είναι γνωστά αλλά και να προλαμβάνει τη δημιουργία αστοχιών με μηχανισμούς οι οποίοι δεν έχουν εμφανιστεί. Όσον αφορά τη γεωλογική στοχαστικότητα, οι ιδιότητες ενός γεωλογικού σχηματισμού παραμένουν σταθερές στο χρόνο και στο χώρο. Παρόλα αυτά η μεταβλητότητα μεταξύ δύο τιμών μίας ιδιότητας σε δύο διαφορετικά σημεία είναι μεγάλη.

Όσο πιο υποκειμενικός είναι ο τρόπος προσδιορισμού των ιδιοτήτων τόσο μεγαλύτερη είναι η αβεβαιότητα. Το ίδιο συμβαίνει όταν ανακύπτουν νέες ιδιότητες (επίγνωση της κατάστασης, φόρτος εργασίας, δυσκολία προσομοίωσης κτλ.) από μία νέα οντότητα την οποία και περιγράφουν ενώ, μικρότερη είναι όταν η ιδιότητα υπήρχε και πριν την εμφάνιση της οντότητας (περιεκτικότητα μετάλλου, μη παραγωγικός χρόνος, αντίσταση στην κοπή κτλ.). Στην πραγματικότητα προϋπάρχουν οι «νέες» ιδιότητες ωστόσο ο ρόλος τους στην περιγραφή υπαρχόντων οντοτήτων είναι εξαιρετικά περιορισμένος.

Όσο μεγαλύτερη είναι η αβεβαιότητα της εξεταζόμενης ιδιότητας τόσο μεγαλύτερα προβλήματα (μειωμένη ικανότητα επίβλεψης κτλ.) τείνουν να δημιουργήσουν στον αυτοματισμό οι αιτίες που την προκαλούν. Αντίθετα όσο μικρότερη είναι υπάρχει συσσωρευμένη γνώση για

αυτές. Συνεπώς η αβεβαιότητα των ιδιοτήτων αυτών αφενός, αποτελεί δείκτη για το ποια προβλήματα έχουν προτεραιότητα να επιλυθούν αφετέρου, αποτελεί δείκτη για το ποιες ιδιότητες είναι κατάλληλες για να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση αυτών των προβλημάτων.

Στη διατριβή αυτή τα στάδια της αυτοματοποίησης χρησιμοποιούνται ως μέσο «απομόνωσης» της υψηλής αβεβαιότητας. Με αυτό τον τρόπο μειώνονται οι αλληλεξαρτήσεις μεταξύ των προβλημάτων στα διαφορετικά στάδια και συνεπώς στα υποσυστήματα του συστήματος. Σαφέστατα η απουσία αλληλεξαρτήσεων είναι κάτι ανέφικτο, ωστόσο αυτό που μπορεί να γίνει είναι σε μία εξάρτηση να είναι αφενός γνωστή η ύπαρξή της, αφετέρου καλά προσδιορισμένος ο τρόπος αλληλεπίδρασης μεταξύ των προβλημάτων. Τελικά με αυτόν τον τρόπο μελετώνται ξεχωριστά μόνο τα σοβαρά προβλήματα με καλά προσδιορισμένες ιδιότητες.

Τα σημαντικότερα προβλήματα που διαπιστώθηκαν και αποτελούν αντικείμενο μελέτης αυτής της διατριβής αφορούν αφενός, τον τρόπο ανάπτυξης των πρωτοτύπων των αυτοματισμών και ιδιαίτερα όσον αφορά την επιλογή και εγκατάσταση των ενόργανων μετρητικών διατάξεων. Αφετέρου, τον τρόπο καθοδήγησης του χειριστή κατά την κανονική λειτουργία των συστημάτων. Αυτά τα προβλήματα καθορίζουν πότε έχει νόημα να επενδυθούν πόροι στο σχεδιασμό και την ανάπτυξη νέων αυτοματισμών και πόσο μπορούν να διεισδύσουν και να συμπληρώσουν την εργασία του ανθρώπου.

### **2.1.2. Τα στάδια της αυτοματοποίησης στην εξορυκτική βιομηχανία, η ιστορική και η μελλοντική τους εξέλιξη**

Σε αυτή την υποενότητα παρουσιάζονται τα στάδια της αυτοματοποίησης και το περιεχόμενο τους χωρίς να διαχωρίζονται περαιτέρω σε επίπεδα, όπως διαπιστώθηκε βιβλιογραφικά ότι συνήθως γίνεται. Η επιλογή αυτή έγινε διότι στόχος είναι να αναλυθούν όλες οι διαδικασίες που πραγματοποιεί ο άνθρωπος για την εξόρυξη ώστε να αποτυπωθούν τα προβλήματα και όχι να προσδιοριστούν διάφορα όρια που σχετίζονται με τη διείσδυση της αυτοματοποίησης στην ανθρώπινη εργασία. Στόχος είναι να διαχωριστούν τα προβλήματα, που προκύπτουν ή προϋπάρχουν των αυτοματισμών, ώστε να μην ανακύπτουν άγνωστες αλληλεξαρτήσεις.

Είναι σημαντικό να κατανοηθεί ο τρόπος σχεδιασμού ενός τέτοιου συστήματος αλλά και η διαδικασία λειτουργίας του συστήματος όταν ακολουθείται μία ανάλυση με τα στάδια αυτοματοποίησης. Κατά τον σχεδιασμό σε μία τέτοια ανάλυση οι ανάγκες του επόμενου σταδίου καθορίζουν τις προδιαγραφές του προηγούμενου. Κατ' αυτόν τον τρόπο, από τις επιπτώσεις κατά τη λειτουργία ενός αυτοματισμού προέρχονται τα όρια της διακινδύνευσης. Στη συνέχεια η μέθοδος εκτίμησης της διακινδύνευσης καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο θα πραγματοποιηθεί η πρόβλεψη. Τελικά με αυτό τον τρόπο προσδιορίζεται ποιες ιδιότητες θα μετρηθούν στο πεδίο συνεπώς, ποιες διατάξεις θα χρησιμοποιηθούν.

Όσον αφορά τη διατριβή αυτή το στάδιο της λήψης αποφάσεων ταυτίζεται με την εκτίμηση της διακινδύνευσης. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί κατά τον σχεδιασμό του τρόπου εκτίμησης της διακινδύνευσης διότι κατά τη λειτουργία θα πιστοποιεί ότι σε κάθε στάδιο όλα βαίνουν σύμφωνα με τις προδιαγραφές. Παρά το γεγονός ότι κατά τη λειτουργία η απόφαση λαμβάνεται αργότερα, ο χαρακτηρισμός με τη διακινδύνευση υλοποιείται σε προηγούμενα στάδια

από αυτό της λήψης της απόφασης. Γι' αυτό τον λόγο κατά τον σχεδιασμό του συστήματος δεν αναλύονται τα στάδια με την ακολουθία που θα προκύψει κατά τη λειτουργία.

Αντιστρόφως, κατά τη λειτουργία και αφού έχει σχεδιαστεί το σύστημα, καταγράφονται οι ιδιότητες με τις οποίες γίνεται η πρόβλεψη της διακινδύνευσης των επιπτώσεων. Από αυτήν την πρόβλεψη λαμβάνονται αποφάσεις για τη βέλτιστη λειτουργία και τελικά από τα αποτελέσματα της εξόρυξης προσδιορίζονται οι επιπτώσεις εκ των υστέρων. Σε αυτό το σημείο επαληθεύονται ή όχι οι προβλέψεις που έχουν γίνει καθώς εμφανίζεται η πραγματική κατάσταση του μετώπου και τελικά αναθεωρούνται ή όχι οι παράμετροι.

Το τελευταίο στάδιο έχει ένα απολογιστικό χαρακτήρα και μεγάλη βεβαιότητα ενώ στα προηγούμενα πραγματοποιείται ένας «προϋπολογισμός» του αποτελέσματος με μεγαλύτερη αβεβαιότητα. Τα στάδια αυτοματοποίησης στην εξορυκτική βιομηχανία, αποτελούνται από:

- (1) τη ψηφιοποίηση-τηλεμετρία-καταγραφή των ιδιοτήτων των γεωυλικών,
- (2) την προσομοίωση-πρόβλεψη-ερμηνεία τους,
- (3) την τυποποιημένη λήψη αποφάσεων και
- (4) την εκτέλεση των εντολών.

Παρακάτω ακολουθεί η παρουσίασή τους που πραγματοποιείται από το τελευταίο προς το πρώτο στάδιο διότι με αυτή τη διαδοχή εξελίχθηκαν ιστορικά κυρίως τα δύο τελευταία στάδια ενώ εκτιμάται ότι και τα υπόλοιπα θα εξελιχθούν μελλοντικά με αυτή την αντίστροφη πορεία.

Το τέταρτο στάδιο περιλαμβάνει τις μεθόδους εξόρυξης, εκμετάλλευσης και τα μέσα τα οποία χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή των προηγούμενων σταδίων. Δεν πραγματοποιείται μία θεωρητική ανάλυση για την καταλληλότητα των μέσων για το σκοπό που επιλέχθηκαν, το οποίο ελέγχεται στα προηγούμενα στάδια, αλλά εξετάζεται αν η εκτέλεσή τους είναι σωστή.

Εδώ εμφανίζονται τα σημαντικότερα αποτελέσματα από τις μη βέλτιστες αποφάσεις διότι αστοχίες σε προηγούμενα στάδια προκαλούν τις σοβαρότερες επιπτώσεις σε αυτό το στάδιο και τελικά στο σύστημα. Αυτές οι αστοχίες μπορεί να σχετίζονται με μηχανικές, ηλεκτρικές και βλάβες της αυτοματοποίησης (Ghodrati et al., 2015). Αφορούν αστοχίες σχετικές με τις μεθόδους εξόρυξης και εκμετάλλευσης, τα υλικά των διατάξεων, τα λογισμικά με τα οποία πραγματοποιείται η ερμηνεία των καταγραφών και η πρόβλεψη και τέλος τα σφάλματα που σχετίζονται με τον ανθρώπινο παράγοντα. Η γενεσιουργός αιτία όλων των αστοχιών είναι κυρίως η γεωλογική πολυπλοκότητα και αυτή καθορίζει την επικινδυνότητά τους.

Όσον αφορά τις μεθόδους εξόρυξης και εκμετάλλευσης έχουν επιβληθεί οι μηχανοποιημένες λύσεις στην πλειοψηφία της εξορυκτικής βιομηχανίας ώστε να αναπτυχθούν οικονομίες κλίμακας. Καθώς το κεφαλαιουχικό κόστος του εξοπλισμού για αυτά τα συστήματα είναι υψηλό, συχνές αστοχίες μικρής σημαντικότητας αν δεν αντιμετωπιστούν έγκαιρα προκαλούν σημαντικές επιπτώσεις.

Η αυτοματοποίηση στον κλάδο των γεωτρήσεων υδρογονανθράκων δεν δημιουργεί σημαντικά εμπόδια διότι όλες οι διαδικασίες είναι συγκεντρωμένες σε ένα μηχάνημα ενώ η εξόρυξη πραγματοποιείται σε πολύ περιορισμένο χώρο και χρόνο. Σε περίπλοκα γεωλογικά και μικρά κοιτάσματα απαιτούνται διαδικασίες στις οποίες διακόπτεται συχνά η παραγωγή με αποτέλεσμα να δημιουργείται κόπωση στον μηχανολογικό εξοπλισμό. Τελικά αυξάνεται ο μη παραγω-



γικός χρόνος μεταξύ των διαδοχικών εργασιών-διαδικασιών (workflow) και μειώνεται η παραγωγικότητά του εξοπλισμού και της εργασίας. Επίσης η αυξημένη φθορά αφενός οδηγεί σε συχνότερες βλάβες άρα επιπλέον μείωση της διαθεσιμότητας λόγω μείωσης της αξιοπιστίας, αφετέρου αυξάνει τις δαπάνες για αναλώσιμα του εξοπλισμού. Για τη βελτιστοποίηση των παραπάνω καθοριστική σημασία έχει η «τακτική» της εξόρυξης δηλαδή ποιες κινήσεις κάνει ο εκσκαφέας και το πτύο-κοπτικό άκρο.

Όσον αφορά τα υπολογιστικά συστήματα και τις διατάξεις σε αυτό το στάδιο, τα προβλήματα τα οποία προκύπτουν σχετίζονται με την αξιοπιστία των υλικών και άυλων (λογισμικού και αλγόριθμων) τμημάτων τους και όχι με την ορθότητα της επιλογής του τρόπου προσομοίωσης το οποίο αφορά προηγούμενο στάδιο. Πιο συγκεκριμένα οι ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες σε συνδυασμό με τις έντονες μεταβολές κατά την εξόρυξη καταπονούν τις διατάξεις και δυσχεραίνουν την ενσωμάτωσή τους στο σύστημα. Έτσι τα υλικά τμήματα της διάταξης αλλά και του Η/Υ πρέπει να είναι ανθεκτικά σε αυτές τις συνθήκες. Επιπρόσθετα τα τμήματα του Η/Υ πρέπει να ικανοποιούν τις αποθηκευτικές απαιτήσεις ώστε να επαρκούν για τις ανάγκες μετάδοσης των δεδομένων. Τέλος τα άυλα τμήματα δηλαδή το λογισμικό και οι αλγόριθμοι πρέπει να είναι ευσταθή και να μην παράγουν σφάλματα. Τα σφάλματα αυτά προέρχονται κατά κύριο λόγο από τη γεωλογία, πιο συγκεκριμένα οι έντονες γεωλογικές μεταβολές δημιουργούν την ανάγκη για πιο περίπλοκους αλγόριθμους οι οποίοι αυξάνουν τις υπολογιστικές απαιτήσεις και τελικά δεν παράγουν έγκαιρα τα ορθά αποτελέσματα.

Μέρος του συστήματος είναι και ο χειριστής, τα σφάλματα του οποίου δημιουργούν επιπτώσεις που βαρύνουν τον ίδιο και τον εξοπλισμό. Οι επιπτώσεις στον χειριστή είναι σωματικές είτε συχνότερα συμπεριφορικές και έμμεσες-μακροπρόθεσμες (καταπονήσεις του μυοσκελετικού συστήματος από δονήσεις, παθήσεις του αναπνευστικού συστήματος από αιωρούμενα σωματίδια κτλ.) είτε άμεσες-βραχυπρόθεσμες (εμβοή από υψηλής έντασης ήχο κτλ.). Οι σημαντικότερες για την αυτοματοποίηση είναι οι άμεσες συμπεριφορικές επιπτώσεις, αυτές σχετίζονται με την αύξηση του φόρτου εργασίας, τη μείωση της επίγνωσης της κατάστασης του χειριστή κτλ. Μία αναλυτική μελέτη που αναλύει αυτούς τους παράγοντες για τη μεταλλευτική βιομηχανία είναι των Rogers et al. (2019). Οι επιπτώσεις αυτές επίσης προέρχονται από τα παραγόμενα σήματα στα προηγούμενα στάδια, όσο περιπλοκότερη είναι η γεωλογική δομή τόσο περισσότερες είναι οι παραγόμενες προειδοποιήσεις επομένως και τα σφάλματα του χειριστή.

Κατά την ιστορική εξέλιξη της εξορυκτικής βιομηχανίας ήταν το πρώτο στάδιο που αυτοματοποιήθηκε σε μεγάλο βαθμό. Έτσι από το τις αρχές του περασμένου αιώνα χρησιμοποιούνται μηχανοποιημένες μέθοδοι εξόρυξης (εκσκαφέας ανεστραμμένου πτύου, εκσκαφέας καδοτροχού κτλ.). Επίσης αυτό συνέβη και με την εξέλιξη των γεωτρυπάνων. Ο Eustes (2007), παρουσιάζει την πορεία της αυτοματοποίησης του γεωτρητικού εξοπλισμού για εξόρυξη υδρογονανθράκων ξεκινώντας από τη μηχανοποίηση του εξοπλισμού και φτάνοντας ως τα τελευταία στάδια της αυτοματοποίησης στη σύγχρονη εποχή. Όσον αφορά τον εξοπλισμό διάνοιας διατηρημάτων με σκοπό την ανατίναξη του πετρώματος οι προσπάθειες έχουν σταματήσει στο τηλεχειρισμό των διατρητικών φορείων. Οι Ha et al. (2019) παρουσιάζουν την υφιστάμενη κατάσταση αλλά και τις εκτιμώμενες εξελίξεις στην αυτοματοποίηση του εξοπλισμού της ασυνεχούς λειτουργίας. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η έρευνα σχετικά με την αυτοματοποίηση

της διαδικασίας της φόρτωσης (Kalakuda and Shapiro, 2020) καθώς δεν έχει επιτευχθεί πλήρως αυτοματοποιημένα η αποδοτική λύση της συνέχειας και φόρτωση του γεωυλικού στον κάδο.

Η φόρτωση χύδην γεωυλικών από σωρούς είναι μία απλούστερη διαδικασία καθότι η σύνδεσή τους δεν παρουσιάζει εσωτερική συνοχή αλλά οφείλεται μόνο στη γωνία εσωτερικής τριβής. Αντιθέτως κατά την εκσκαφή ακόμα και μαλακών σχηματισμών η εμφάνιση της συνοχής απαιτεί πρόσθετες δυνάμεις για την κοπή του γεωυλικού ενώ η ύπαρξη ρευστής φάσης κάνει ακόμα περιπλοκότερη τη συμπεριφορά του γεωυλικού κατά την εκσκαφή του λόγω της πλαστικής συμπεριφοράς. Επομένως η εκσκαφή του γεωυλικού από τη φυσική του θέση απαιτεί πρόσθετες δυνάμεις οι οποίες είναι δύσκολο να προβλεφθούν αλλά και να ασκηθούν χωρίς την επίβλεψη του χειριστή. Αυτό είναι ένα ερευνητικό πεδίο στο οποίο εκτιμάται ότι θα ενταθεί το επιστημονικό ενδιαφέρον την επόμενη περίοδο.

Η μηχανοποίηση δεν διαδόθηκε ταυτόχρονα σε όλο τον πλανήτη και σε όλα τα ορυχεία. Στα μεγάλα σε έκταση, συνεχή, ομοιογενή και με απλή γεωλογική δομή κοιτάσματα όπως αυτά που εξορύσσονται από τα λιγνιτωρυχεία στη Γερμανία και από τα ορυχεία γαιάνθρακα στην Κίνα (Wang και Huang, 2017), τα κοιτάσματα συμπαγούς μεταλλοφορίας, τα κοιτάσματα υδρογονανθράκων όπως το κοιτάσμα πετρελαίου Ghawar και το κοιτάσμα φυσικού αερίου-συμπυκνωμάτων South Pars-North Dome οι χρησιμοποιούμενες μέθοδοι εκμετάλλευσης μπορούν να μηχανοποιηθούν και γενικότερα να αυτοματοποιηθούν ευκολότερα.

Αυτή ήταν η αιτία για την οποία τα λιγνιτωρυχεία στη Γερμανία αυτοματοποιήθηκαν πρώτα, όμως οι δυνατότητες για αύξηση της προστιθέμενης αξίας περιορίστηκαν σύντομα. Αντίθετα γεωλογικά περίπλοκα κοιτάσματα με συχνές ασυνέχειες και έντονη ανομοιογένεια δύσκολα «ψηφιοποιούνται» και χρησιμοποιούνται αυτοματοποιημένες μέθοδοι εξόρυξης και εκμετάλλευσης αλλά όταν επιτευχθεί αυτό, τα παραγόμενα τελικά προϊόντα αποδίδουν πολύ μεγάλη προστιθέμενη αξία. Συνεπώς οι ωφέλειες της αυτοματοποίησης δε βασίζονται μόνο στην αύξηση της παραγωγικότητας, η οποία πιθανόν και να μειώνεται αλλά στη μείωση των δαπανών και στην αύξηση της ανάκτησης του κοιτάσματος.

Μετά την πρώτη «επανάσταση» που έφερε η μηχανοποίηση οι περισσότερες εξελίξεις αφορούσαν τη δημιουργία οικονομίας κλίμακας με μεγαλύτερα μηχανήματα παρά με τη βελτίωση της αποτελεσματικότητάς η οποία έφτασε σε κορεσμό. Οι υπόλοιπες αλλαγές οφείλονταν στη διάδοση του ηλεκτρισμού με την οποία κατέστη δυνατό να επεκταθεί η ηλεκτρική ενέργεια στην εξορυκτική διαδικασία όπως με τη χρήση εκσκαφών καδοτροχού, εκσκαφών με τύμπανο σημειακής κοπής, εκσκαφείς μετωπικού πτύου (shovel) τροφοδοτούμενοι με ηλεκτρική ενέργεια, ταινιόδρομοι κτλ. Με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων δόθηκε η δυνατότητα να δημιουργηθούν διατάξεις οι οποίες με την ταχεία διάδοση δεδομένων μέσω του παγκόσμιου διαδικτύου και άλλων τοπικών δικτύων δίνουν τη δυνατότητα ταχείας επικοινωνίας μεταξύ των διαφορετικών συστημάτων κάτι το οποίο τελικά θα επιτρέψει τη συνολική βελτιστοποίηση μίας εκμετάλλευσης.

Παρά το ώριμο τεχνολογικά στάδιο που βρίσκονται οι μηχανοποιημένες μέθοδοι εξόρυξης η μελλοντική τους εξέλιξη φαίνεται να είναι ο πλήρης εξηλεκτρισμός τους. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να μειωθεί το αποτύπωμα στην υγεία και την ασφάλεια, το περιβαλλοντικό αποτύπωμα και να αυξηθούν οι δυνατότητες ανάκτησης των χρήσιμων ορυκτών του κοιτάσματος. Επιπρό-

σθετα αυτά τα συστήματα εξόρυξης έχουν ένα σημαντικό πλεονέκτημα που αφορά τις διατάξεις συνεχούς διασκόπησης και ανάλυσης του μετώπου. Καθώς αυτός ο εξοπλισμός εξόρυξης έχει μειωμένο βαθμό ελευθερίας των κινήσεών του, η εγκατάσταση των διατάξεων είναι πιο εύκολη και οι αισθητήρες λόγω της εγγύτητας με το μέτωπο έχουν καλύτερη απόκριση. Τελικά για αυτούς τους λόγους η καταγραφή, επεξεργασία, αποθήκευση, ερμηνεία και εν τέλει διαχείριση των δεδομένων είναι λιγότερο περίπλοκη.

Την τελευταία 15ετία έχει παρουσιαστεί νέος εξοπλισμός με τύμπανα σημειακής κοπής για επιφανειακές εκμεταλλεύσεις (Dammers και Deppe, 2018; Oppelaar και Hutchins, 2014). Αντίστοιχα στις υπόγειες εκμεταλλεύσεις όπου η παραγωγικότητα είναι σχετικά περιορισμένη, τα μηχανήματα σημειακής κοπής μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά την ανάκτηση του κοιτάσματος. Τέτοιες εφαρμογές για υπόγεια ορυχεία (Leonida, 2019; Vogt, 2016) επιτρέπουν την εφαρμογή μίας πιο εκλεκτικής εξόρυξης με μεθόδους συνεχούς λειτουργίας (Grafe et al., 2018) και σε ορυχεία στα οποία δεν ήταν εφικτό να εφαρμοστεί η μέθοδος εκμετάλλευσης επιμήκους μετώπου η οποία έχει αυτοματοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό (Ralston και Strange, 2013).

Σαφέστατα οι εκσκαφείς καδοτροχού στις υπαίθριες εκμεταλλεύσεις έχουν το πλεονέκτημα της, πολύ μεγάλης, παραγωγικότητας αλλά η χρήση εκσκαφών με πολύ μεγάλους καδοτροχούς αυξάνει πολύ τη ρύπανση και την αραίωση (Γαλετάκης, 1996; Μέβοραχ και Φυντικάκης, 1993) με αποτέλεσμα να προκύπτουν σοβαρές επιπτώσεις στη βιωσιμότητα της επένδυσης με την αύξηση των δαπανών όπως με αυτή που προκαλείται από την εξόρυξη σκληρών σχηματισμών (Δεληγιώργης, 2017).

Στο τρίτο στάδιο, το οποίο αποτελεί το κεντρικότερο σημείο της διατριβής, σκοπός είναι η τυποποίηση της λήψης αποφάσεων ώστε να πιστοποιούνται τα δεδομένα από τα οποία προκύπτει κάθε απόφαση και να εξασφαλίζεται ότι αυτή είναι ορθή. Περιλαμβάνει τις μεθόδους οι οποίες πιστοποιούν ότι όλα τα υλικά και άυλα τμήματα του συστήματος λειτουργούν σύμφωνα με συγκεκριμένες προδιαγραφές συνεπώς οι αποφάσεις που λαμβάνονται έχουν την ελάχιστη δυνατή διακινδύνευση. Διασφαλίζεται δηλαδή ότι οι μετρήσεις έχουν καταγραφεί με αξιόπιστο τρόπο, η πρόβλεψη έχει πραγματοποιηθεί με μία αξιόπιστη μέθοδο, ότι τα μηχανήματα εξορύσσουν με αποδοτικό τρόπο και ο χειριστής είναι σε θέση να λάβει τις βέλτιστες αποφάσεις. Η ανάγκη αυτή γίνεται συνεχώς πιο επιτακτική διότι συχνότερα απαιτείται η λήψη επιτελικών αποφάσεων σε πολύ μικρά χρονικά διαστήματα από τον χειριστή. Επομένως είναι σημαντικό να ειδοποιείται ο χειριστής με κατανοητά, κατάλληλα και επαρκή μηνύματα ώστε η εντολή να είναι σαφής.

Σε αυτό το πλαίσιο εντάσσονται διάφορες μέθοδοι εκτίμησης ή/και διαχείρισης της διακινδύνευσης όπως η FMECA. Διάφορες μεθοδολογίες πιστοποιήσεις (ISO κτλ.), οδηγίες οργανισμών και διάφορων πρωτοβουλιών (initiatives) που παράγουν οδηγίες (Guidelines/Roadmaps) με καλές και βέλτιστες διαθέσιμες πρακτικές (Good practices/Best available techniques). Όσον αφορά τις οδηγίες για την αυτοματοποίηση οι προσπάθειες αυτές εστιάζουν σε προβλήματα που ανακύπτουν κάθε φορά στην «αγορά» (μηχανοποίηση γεωτρητικής διαδικασίας, ψηφιοποίηση) και όχι του συνόλου των σταδίων της αυτοματοποίησης. Αφορούν κυρίως διαφορετικούς κλάδους (επιφανειακών εκμεταλλεύσεων, εξόρυξης υδρογονανθράκων κτλ.) ενώ δεν υπάρχει ενιαία κατεύθυνση αντιμετώπισης των προβλημάτων ακόμα και στον ίδιο κλάδο.

Σε πολλές περιπτώσεις διαφορετικά τμήματα του φορέα αξιοποίησης (εταιρεία, οργανισμός κτλ.) χρησιμοποιούν διαφορετική μορφοποίηση για τα δεδομένα με αποτέλεσμα να δημιουργούνται προβλήματα διαλειτουργικότητας (interoperability). Σε ένα αυτοματοποιημένο σύστημα τα δεδομένα πρέπει να είναι διαθέσιμα σε διαφορετικά μηχανήματα διαφορετικών εταιριών (Διαχειριστή, εργολάβου για την εξόρυξη και γενικότερα όλων των εμπλεκόμενων εργολάβων). Η χρήση μίας ενιαίας μορφοποίησης απαιτεί ένα συμβιβασμό ώστε να πραγματοποιηθεί τυποποίηση των δεδομένων με συγκεκριμένα πρωτόκολλα. Ο συμβιβασμός αυτός δεν είναι εύκολος καθώς ανακύπτουν θέματα που άπτονται της προστασίας των εταιρικών δεδομένων, τέτοιες ανησυχίες εντείνονται την περίοδο αυτή εξ' αιτίας της τρωτότητας των συστημάτων στον κυβερνοχώρο. Το τελευταίο αποτελεί ένα εξαιρετικά σημαντικό ζήτημα το οποίο τελεί υπό διερεύνηση και δημιουργεί σημαντικές προκλήσεις κατά την εμβάθυνση της αυτοματοποίησης στην εξορυκτική βιομηχανία (Sidhu, 2018).

Ένα τεχνικής φύσης πρόβλημα που έχει διαπιστωθεί από τη βιομηχανία είναι η ποιότητα των δεδομένων (de Wardt et al., 2019). Δεδομένα με μεγάλη διακύμανση παράγονται από καταγραφές με αισθητήρες που δεν έχουν την επαρκή ακρίβεια ή δεν έχουν τοποθετηθεί και βαθμονομηθεί σωστά. Η ασφαλής διαχείριση, απόκτηση-μεταφορά των δεδομένων, είναι αμφίδρομη και αφορά τόσο τη ροή πληροφοριών προς το μέτωπο όσο και από το μέτωπο προς τον χειριστή. Αυτές οι πληροφορίες προκειμένου να είναι αξιόπιστες πρέπει με μία μέθοδο να ελέγχονται-πιστοποιούνται. Ειδικά σε περίπλοκα κοιτάσματα στα οποία οι γεωλογικές μεταβολές είναι συχνές η ροή μεγιστοποιείται και οι αποφάσεις που πρέπει να ληφθούν είναι αυξημένες.

Δεν διαπιστώθηκε βιβλιογραφικά η ύπαρξη ιστορικής αναφοράς με αυτή την οπτική της αυτοματοποίησης για αυτό το στάδιο, ωστόσο ορισμένες μελέτες ερευνούν τα παραπάνω προβλήματα. Η πιο κοντινή προσέγγιση που διαπιστώθηκε, ακολουθείται από τους de Wardt et al. (2016) και αφορά αποκλειστικά την αυτοματοποίηση γεωτρήσεων σε εξέδρες εξόρυξης υδρογονανθράκων. Στη μελέτη τους δεν δίνεται έκταση στο περιεχόμενο των σταδίων τα οποία ακολουθεί ο διαχωρισμός τους σε επίπεδα. Ακόμα τα στάδια δεν έχουν αφιερώσει ανάλυσης τις ιδιότητες των γεωυλικών αλλά διάφορες άλλες παραμέτρους. Πρέπει να σημειωθεί ότι η βελτιστοποίηση της γεωτρητικής διαδικασίας δεν παρουσιάζει τις δυσκολίες όπως κατά την ανάκτηση υδρογονανθράκων με μεθόδους EOR (Enhanced oil recovery) αλλά και κατά τις διαδικασίες εξόρυξης στη μεταλλευτική βιομηχανία. Συνεπώς δεν υπάρχει ανάγκη να ακολουθηθεί ένας συνολικός διαχωρισμός των σταδίων αυτοματοποίησης εκτός αυτού της μηχανοποίησης. Επομένως δεν δίνεται προτεραιότητα στην αυτοματοποίηση των υπόλοιπων σταδίων η οποία μετατίθεται χρονικά και δεν αναλύεται σε αυτή αλλά και παρόμοιες αναλύσεις.

Σε μία άλλη μελέτη οι Dudley και McAfee (2013) προτείνουν μία αρχιτεκτονική για τη μεταλλευτική βιομηχανία προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα που προκύπτουν από την αυτοματοποίησή της. Στην ίδια λογική βασίζονται και οι Rylnikova et al. (2017), οι οποίοι στην εργασία τους εστιάζουν στη «συμβίωση» μηχανών-ανθρώπου και προτείνουν διαφορετικές ζώνες σε ένα ορυχείο όπου στη μία θα λειτουργούν μόνο μηχανές και στην άλλη άνθρωποι και μηχανές. Ωστόσο αυτή η εργασία δεν εστιάζει στη λήψη αποφάσεων.

Όσον αφορά τη μελλοντική εξέλιξη, η παραγωγή διατάξεων οι οποίες έχουν υψηλή ακρίβεια αλλά και η εισαγωγή στα ορυχεία εξοπλισμού για την ταχεία μετάδοση δεδομένων κάνουν

πιο ελκτική την ιδέα της αυτοματοποιημένης λήψης αποφάσεων. Επιπρόσθετα το γεγονός ότι στην εξορυκτική βιομηχανία αστοχίες με μικρή πιθανότητα έχουν πολύ μεγάλη επίπτωση στη λειτουργία του ορυχείου αποθάρρυνε την υιοθέτηση πλήρως αυτοματοποιημένων συστημάτων καθώς δεν είναι ελέγξιμα. Ωστόσο η πίεση για μείωση των δαπανών αυξάνουν την ανάγκη για αυτοματοποιημένη λήψη αποφάσεων, εκτιμάται λοιπόν ότι η τυποποίηση και η αυτοματοποίηση της λήψης αποφάσεων το επόμενο διάστημα θα ενταθεί και στη μεταλλευτική βιομηχανία.

Στο δεύτερο στάδιο περιλαμβάνονται όλοι οι τρόποι ερμηνείας των καταγραφών και η προσομοίωσή τους με χωρικές και χρονικές διαστάσεις αυτοματοποιημένα. Τέτοια παραδείγματα είναι η πρόβλεψη με χρονοσειρές, η δημιουργία γεωλογικού και μεταλλευτικού μοντέλου κτλ. Η σημαντικότερη πρόκληση σε αυτή την περίπτωση είναι η αυτοματοποιημένη ερμηνεία των δεδομένων τα οποία είναι ποιοτικά και ενέχουν εμπειρικά στοιχεία στο προσδιορισμό τους. Τέτοια δεδομένα είναι τα γεωτρητικά, σε αυτή την περίπτωση έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες για την αυτοματοποιημένη ερμηνεία των γεωτρητικών δεδομένων όπως των (Wedge et al., 2019), ωστόσο είναι μία αρκετά δύσκολη διαδικασία αφού απαιτεί παραγωγική και αναλυτική σκέψη.

Πρέπει να σημειωθεί ότι από τις γνωστές τιμές οι οποίες με μεγάλη βεβαιότητα έχουν καταγραφεί με τις διατάξεις είναι αναγκαίο να εκτιμηθούν τιμές σε σημεία που δεν υπάρχουν μετρήσεις. Η διαδικασία αυτή περιγράφεται από τον γενικότερο όρο προσομοίωση. Ο όρος αυτός είναι ευρύτερος με αποτέλεσμα να μην διακρίνεται σε πόσες διατάξεις πραγματοποιείται ταυτόχρονα αυτή η διαδικασία. Ο όρος μοντελοποίηση αναφέρεται στη μεταλλευτική σε τρεις ή τέσσερις διαστάσεις και σχετίζεται κυρίως με την παρεμβολή τιμών. Καθώς η προσομοίωση στην εξεταζόμενη περίπτωση γίνεται για τις επόμενες τιμές και αφορά μόνο μία χωρική διάσταση η οποία συμπωματικά ταυτίζεται με το χρόνο, χρησιμοποιείται ο όρος πρόβλεψη για να τονιστεί ότι γίνεται μοντελοποίηση σε μία διάσταση και όχι για ενδιάμεσες άγνωστες τιμές.

Ιστορικά οι προσπάθειες αυτοματοποιημένης ερμηνείας, πρόβλεψης, προσομοίωσης και μοντελοποίησης ξεκίνησαν με τη διάδοση των υπολογιστών τις δεκαετίες του 70' και του 80' ενώ μετά τη δεκαετία του 90' και ιδιαίτερα το 2000 η ανάπτυξη των υπολογιστικών συστημάτων ήταν ραγδαία και δόθηκε η δυνατότητα να αυτοματοποιηθούν οι διαδικασίες αυτού του σταδίου. Μελλοντικά ύπαρξη υψηλών ταχυτήτων στο διαδίκτυο δημιουργεί προϋποθέσεις για συλλογή μεγάλου όγκου δεδομένων, ενώ η παραγωγή περισσότερων εμπορικών και τεχνολογικά διαθέσιμων διατάξεων θα επιτρέψει την καταγραφή των δεδομένων και επομένως την περαιτέρω αυτοματοποίηση του κλάδου.

Το πρώτο στάδιο αφορά την αυτοματοποιημένη καταγραφή των ιδιοτήτων των γεωυλικών με ενόργανες μετρητικές διατάξεις, επίσης το στάδιο αυτό αφορά διατάξεις που θέτουν τις βάσεις για την αυτοματοποίηση των διαδικασιών οι οποίες δε σχετίζονται με τη γεωλογία όπως συστήματα αποτροπής σύγκρουσης, χρήση μη επανδρωμένων αεροσκαφών για τη δημιουργία χωρικού μοντέλου, επιτήρηση κτλ. Προκειμένου να αυτοματοποιηθεί αυτό το στάδιο είναι απαραίτητο να κατανοηθεί τόσο, ο τρόπος απόκρισης των γεωυλικών δηλαδή ο φυσικός μηχανισμός αντίδρασης του γεωυλικού σε μία διέγερση όσο, και η απόκριση των ίδιων των διατάξεων δηλαδή ο τρόπος εκπομπής του σήματος και η καταγραφή του στο δέκτη.

Για την αυτοματοποίηση που δεν έχει αφετηρία την ανάλυση των ιδιοτήτων των γεωυλικών υπάρχει αρκετή έρευνα και η τεχνολογία βρίσκεται σε ώριμη φάση. Τέτοιες εφαρμογές

στη μεταλλευτική συνοψίζονται από τους Job και McAree (2017) και τους Thrun et al. (2004). Αυτές οι μελέτες εστιάζουν σε συστήματα με χρήση μη επανδρωμένων αεροσκαφών, συστήματα αποφυγής σύγκρουσης και αυτοματοποιημένης οδήγησης φορητών αλλά και την καταγραφή των ιδιοτήτων των γεωυλικών μετά την εξόρυξη. Τέτοιες ενόργανες διατάξεις χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της ποιότητας των γεωυλικών στον ταινιόδρομο, στα φορητά ή στις πλατείες του ορυχείου (Buxton et al., 2019; Galetakis et al., 2009; Galetakis και Pavloudakis, 2009; Giroux et al., 2020; Schönhofer et al., 2018). Άλλες διατάξεις χρησιμοποιούνται για τη «συγκοινωνιακή» διαχείριση των μηχανημάτων όπως φορητών, φορτωτών, ταινιόδρομων κτλ. (Agioutantis et al., 2018; Androulakis et al., 2020, 2019; J. Marshall et al., 2008; Marshall και Daneshmend, 2001; J. A. Marshall et al., 2008, 2008; Nettleton et al., 2006). Αυτές οι τεχνολογίες είναι ώριμες και έχουν ενσωματωθεί στην εξορυκτική βιομηχανία ψηφιοποιώντας την σε μεγάλο βαθμό (Bird et al., 2019).

Η αυτοματοποιημένη καταγραφή γεωλογικών δεδομένων του μετώπου όχι μόνο πάνω στις ελεύθερες επιφάνειες αλλά και πίσω από αυτές κατά την εξόρυξη παρουσιάζει ορισμένες ιδιαιτερότητες με αποτέλεσμα να υπάρχουν ελάχιστες τεχνολογικά ώριμες εφαρμογές. Με τον όρο «μεταλλευτική ακριβείας» περιγράφονται στην επόμενη ενότητα τα χαρακτηριστικά που πρέπει να έχουν, κυρίως αυτές οι διατάξεις τόσο για αυτοματοποιημένη διασκόπηση του μετώπου, όσο και για την περαιτέρω αυτοματοποίηση των υπόλοιπων σταδίων με έμφαση στη διαδικασία της εκσκαφής. Στη προτελευταία ενότητα του κεφαλαίου παρουσιάζεται ο τρόπος επιλογής των διατάξεων για τη μεταλλευτική ακριβείας και μία αναλυτικότερη περιγραφή τους.

Τα προβλήματα που αντιμετωπίζονται σε αυτό το στάδιο σχετίζονται με τη γεωλογική δομή. Όσο περιπλοκότερη είναι αυτή τόσο περισσότερες και πιο σύνθετες διατάξεις είναι απαραίτητες ενώ, χρειάζεται να πραγματοποιούν συχνότερη δειγματοληψία στο μέτωπο ώστε να επιτυγχάνεται ένας αποδεκτός διαχωρισμός των ιδιοτήτων. Αυτός ο διαχωρισμός μπορεί να αφορά τα χρήσιμα-άγωνα, τα σκληρά-μαλακά αλλά και γενικότερα όλα εκείνα τα γεωυλικά που απαιτούν διαφορετική διαχείριση κατά την εξόρυξη. Η επιλογή και η ρύθμιση της κατάλληλης διάταξης καθορίζει την αλληλεπίδρασή της με το, συνεχώς μεταβαλλόμενο κατά την εξόρυξη, μέτωπο και πρέπει να γίνεται με κριτήριο τη μείωση της διακινδύνευσης κατά τη δειγματοληψία. Η διακινδύνευση μειώνεται και για ένα επιπλέον λόγο. Με την εξέλιξη των διατάξεων και τη μείωση των δαπανών κτήσης και λειτουργίας τους είναι δυνατόν να εγκατασταθεί μεγάλος αριθμός ο οποίος παράγει πλήθος χαμηλής ποιότητας δεδομένων. Αναπτύσσεται λοιπόν η ιδέα ότι το μεγάλο πλήθος δεδομένων με μικρή ακρίβεια μπορεί να προσδώσει μεγάλη αξία στα λίγα και ακριβή δεδομένα τα οποία προέρχονται από τη μεταλλευτική έρευνα. Εκτός από την πιστοποίηση της ακρίβειας των αισθητήρων είναι αναγκαίο να πιστοποιούνται και άλλοι παράμετροι όπως η πυκνότητα δειγματοληψίας, το μέγεθος του δείγματος κτλ. ώστε να μειωθεί η γεωλογική αβεβαιότητα.

## **2.2. Το περιεχόμενο του όρου μεταλλευτική ακριβείας**

Μεγάλο μέρος των διαδικασιών στην εξορυκτική βιομηχανία είναι δυνατό να αυτοματοποιηθούν ώστε να αυξηθεί η παραγωγικότητα της εργασίας, να μειωθούν οι μισθολογικές δαπάνες και συνεπώς να βελτιωθούν τα οικονομικά μεγέθη της εκμετάλλευσης. Ωστόσο αυτό που

προσθέτει αξία είναι η βελτίωση της ανάκτησης του κοιτάσματος η οποία μπορεί να επιτευχθεί, κατ' αρχήν αν κατανοηθεί η γεωλογική πολυπλοκότητα και ετερογένεια τη στιγμή της εξόρυξης στη μικρή κλίμακα του μετώπου.

Παρά το γεγονός ότι σε άλλους επιστημονικούς και βιομηχανικούς κλάδους όπως στη γεωργία και στην ιατρική έχει τεκμηριωθεί και χρησιμοποιείται η έννοια της ακριβείας, στη μεταλλευτική αλλά και ευρύτερα στην εξορυκτική βιομηχανία οι προσπάθειες υιοθέτησης μίας τέτοιας ενιαίας ορολογίας είναι περιορισμένες. Αντίθετα υπάρχουν μελέτες και εφαρμογές, πολλές φορές βιομηχανικής κλίμακας, οι οποίες εμπεριέχουν αποσπασματικά ορισμένα στοιχεία και ιδέες της «μεταλλευτικής ακριβείας» και αναφέρονται με το λεξιλόγιο αυτονομία (autonomy), νοημοσύνη (intelligence), ευφυία (smart) κτλ.

Αυτές οι εφαρμογές αφορούν όλα τα στάδια αυτοματοποίησης και συναντώνται στη μεταλλευτική βιομηχανία, στη βιομηχανία γεωτρήσεων και παραγωγής υδρογονανθράκων-γεωθερμίας, σε γεωτρήσεις τεχνικών έργων. Ακόμα υπάρχουν παραδείγματα από διαστημικές αποστολές και την προετοιμασία τους, ενάλιες έρευνες και εξορύξεις καθώς επίσης, παραδείγματα από τον στρατιωτικό τομέα κυρίως για την εξουδετέρωση ναρκών. Οι εφαρμογές αυτές και κυρίως τα αποτελέσματα από το ερευνητικό έργο BEWEXMIN έδειξαν ότι η θεωρητική τεκμηρίωση ενός τέτοιου όρου είναι δυνατή και μπορεί να υποδείξει το δρόμο για την περαιτέρω αυτοματοποίηση της μεταλλευτικής.

*Στη διατριβή αυτή προσεγγίζεται η αυτοματοποίηση των εξορυκτικών διαδικασιών ξεκινώντας από την πηγή της απροσδιοριστίας που είναι τα γεωλογικά χαρακτηριστικά του κοιτάσματος. Αυτή η προσέγγιση αφορά την καταγραφή των ιδιοτήτων των γεωυλικών για τον διαχωρισμό των φάσεων που τα δομούν από απόσταση, δηλαδή χωρίς την επαφή των διατάξεων με το μέτωπο και με μη καταστρεπτικό τρόπο. Στόχος είναι να γίνει πρόβλεψη των ιδιοτήτων των γεωυλικών, πριν την εξόρυξη και σε πραγματικό χρόνο διασφαλίζοντας ότι κατά την εξόρυξη λαμβάνονται αποφάσεις για την εκσκαφή με τον πιο αποδοτικό τρόπο και την ελάχιστη διακινδύνευση. Τελικός στόχος είναι η ασφαλέστερη εξόρυξη στο μέτωπο και η ορθότερη αξιοποίηση του κοιτάσματος.*

Η αυτοματοποίηση της εξορυκτικής βιομηχανίας σύμφωνα με την παραπάνω αρχή συντελείται από δύο λειτουργίες οι οποίες σχηματοποιούν τον όρο «μεταλλευτικής ακριβείας». Πιο συγκεκριμένα η μία λειτουργία αφορά τον διαχωρισμό των ιδιοτήτων των γεωυλικών πριν πραγματοποιηθεί η εκσκαφή, από απόσταση, κατά την εξόρυξη και σε πραγματικό χρόνο. Η δεύτερη αφορά τον διαχωρισμό των τμημάτων του εξορυκτικού συστήματος ώστε να μην δημιουργούνται αλληλεξαρτήσεις μεταξύ αυτών. Αυτό επιτυγχάνεται αφενός με τη χρήση ενός δείκτη απόδοσης που αποτελείται από τις αστοχίες του συστήματος και τα γεωλογικά χαρακτηριστικά του κοιτάσματος αφετέρου με τη δόμηση του συστήματος βάσει των σταδίων της αυτοματοποίησης.

Με αυτή την ορολογία γίνεται προσπάθεια να περιγραφεί η αλληλεπίδρασης Ανθρώπου-Αυτοματισμών-Μετώπου ώστε να διασυνδεθεί η αυτοματοποίηση, η εξόρυξη και η γεωλογία του μετώπου και κυρίως να αποδοθεί ένα αξιόπιστο μέτρο της αβεβαιότητας των ιδιοτήτων των γεωυλικών μέσω της διακινδύνευσης. Καθώς οι μεμονωμένες πρωτοβουλίες δεν έχουν επιτύχει να συσσωρεύσουν την απαιτούμενη τεχνογνωσία, εκτιμάται ότι ένα εργαλείο με τα χαρακτηριστικά της «μεταλλευτικής ακριβείας» μπορεί να βοηθήσει στην ταχύτερη διείσδυση της αυτοματοποίησης στη μεταλλευτική. Ένα τέτοιο εργαλείο μπορεί να αποτελέσει εφαλτήριο

για την ανάπτυξη ευρύτερων συνεργασιών μεταξύ διαφορετικών κλάδων της εξορυκτικής βιομηχανίας αλλά και υποστηρικτικών εργασιών αυτής. Οι συνεργασίες αυτές μπορούν να αναπτυχθούν υπό το δόγμα συνεργασία στην τυποποίηση, ανταγωνισμός στην καινοτομία (collaborate on standards and compete on innovation) το οποίο έχει εφαρμοστεί με επιτυχία στην αμυντική, στην αεροδιαστημική βιομηχανία αλλά και στην αυτοκινητοβιομηχανία.

Με την αναζήτηση του όρου «precision mining» βρέθηκε πολύ μικρός αριθμός βιβλιογραφικών αναφορών ο οποίος ταιριάζει σε αυτή την έννοια όμως δε διαπιστώθηκε μία περισσότερο εκτεταμένη περιγραφή του όρου «μεταλλευτική ακριβείας».

Ο McAree (2018) αναφέρει τον όρο αυτό, ωστόσο υπάρχει ένας αρκετά περιγραφικός χαρακτηρισμός και δεν γίνεται εκτενέστερη βιβλιογραφική επισκόπηση. Μία επίσης ενδιαφέρουσα προσέγγιση είναι αυτή της μεταλλευτικής πραγματικού χρόνου (Real-time mining), (Benndorf, 2020) η οποία δίνει έμφαση στη διαχείριση (management) των μεταλλευτικών δεδομένων ώστε να βελτιστοποιηθεί η εκμετάλλευση χωρίς να δίνεται έμφαση στη βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη κάτω του ενός λεπτού. Επίσης ενώ σε αυτή τη μελέτη κατανοείται το πρόβλημα της βαθμονόμησης των διατάξεων δεν προτείνεται μία γενική μέθοδος για τον έλεγχο ορθότητας των καταγραφών ώστε να πιστοποιείται ότι είναι κατάλληλες για τη χρήση που προορίζονται. Κύριο μέλημα του μελετητή είναι η βελτιστοποίηση της ποιότητας του μεταλλεύματος και πρακτικά απουσιάζουν άλλες παράμετροι της εκμετάλλευσης οι οποίες όμως, την καθορίζουν. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι ο ρόλος του ανθρώπινου παράγοντα αλλά και γενικότερα η αλληλεπίδραση ανθρώπου-αυτοματοποίησης-μετώπου, την οποία δεν αναλύει δίνοντας μεγαλύτερη έμφαση στον τρόπο διαχείρισης της πληροφορίας και λιγότερη έμφαση στην αξιοπιστία της ίδιας της πληροφορίας.

Μία παρουσίαση εμπορικών τεχνολογιών με αναφορά στη μεταλλευτική ακριβείας γίνεται με έμφαση κυρίως στις διατρήσεις για ανατίναξη των πετρωμάτων (Morton, 2020). Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι ο προσδιορισμός των ασυνεχειών και της απόκλισης του διατρήματος για το βέλτιστο θρυμματισμό των πετρωμάτων κατά την ανατίναξη. Σε αυτό το περισσότερο εκλαϊκευμένο άρθρο γίνεται αναφορά σε αυτόν τον όρο χωρίς να υπάρχει επίσης βιβλιογραφική επισκόπηση. Σε αναφορές για μηχανοποιημένη επιλεκτική εξόρυξη (Hutchins και Oppelaar, 2016; Oppelaar και Hutchins, 2014) προσδιορίζεται η έννοια μόνο για εκσκαφείς σημειακής κοπής για υπαίθρια ορυχεία (surface miners) χωρίς να περιλαμβάνουν άλλα στάδια αυτοματοποίησης παρά μόνο, τη μηχανοποίηση. Οι αναφορές αυτές ουσιαστικά παρουσιάζουν μία εμπορική τεχνολογία και δεν εμβαθύνουν στην επιστημονική ανάλυση.

Η λιγότερο σχετική μελέτη (Crane και Sapsford, 2018) αναλύει μία μέθοδο αντιμετώπισης όξινης απορροής και ανάκτησης του Cu, ωστόσο δεν σχετίζεται άμεσα με αυτό τον ορισμό, αλλά ταιριάζει περισσότερο με την in situ εκχύλιση ή αυτή σε σωρούς και αναφέρεται για λόγους πληρότητας.

Όσον αφορά μελέτες με παρεμφερές λεξιλόγιο οι (Li και Zhan, 2018) παρουσιάζουν εφαρμογές για την έξυπνη μεταλλευτική (Intelligent mining) στην Κίνα, ωστόσο εστιάζουν στον τηλεχειρισμό του εξοπλισμού και τους τρόπους επικοινωνίας χωρίς να εμβαθύνουν σε μετρητικές διατάξεις κατάλληλες για την καταγραφή των ιδιοτήτων των γεωυλικών.



### 2.3. Επιλογή μετρητικών διατάξεων για τη διασκόπηση μετώπου

Η συγκεκριμένη διατριβή εστιάζει στο ζήτημα της καταγραφής των ιδιοτήτων των γεωυλικών προκειμένου να αναγνωριστεί η γεωλογική πολυπλοκότητα κατά την εξόρυξη. Η επιλογή των κατάλληλων ενόργανων μετρητικών διατάξεων είναι το πρώτο βήμα για αυτή τη διαδικασία και συνεπώς για την αυτοματοποίηση των υπόλοιπων εξορυκτικών διαδικασιών. Η κατανόηση των αρχών λειτουργίας και των δυνατοτήτων των διατάξεων είναι σημαντική αφενός ώστε, να κατανοηθεί η συμπεριφορά των ήδη επιλεγμένων διατάξεων στο υπό μελέτη σύστημα και ειδικά, της διάταξης που χρησιμοποιεί τη γεωφυσική μέθοδο κινητού πομπού-δέκτη. Αφετέρου ώστε, να επιλεχθούν νέες διατάξεις και για να σχεδιαστεί ένα βελτιωμένο ερευνητικό και βιομηχανικό πρωτότυπο.

Οι περισσότερες ερευνητικές προσπάθειες για την εγκατάσταση των διατάξεων πάνω σε εκσκαφείς δεν είχαν τα αναμενόμενα αποτελέσματα λόγω των ιδιαίτερων προκλήσεων κατά την ένταξή τους στις συνθήκες των ορυχείων και στις διαδικασίες της εξόρυξης, με αποτέλεσμα αυτό το ερευνητικό αντικείμενο να μην έχει τύχει συστηματικότερης διερεύνησης. Παρόλα αυτά η χρησιμοποίηση διατάξεων στην εξορυκτική βιομηχανία δεν είναι κάτι νέο, χρησιμοποιούνται ευρέως στον εμπλουτισμό των μεταλλευμάτων, κατά τη μεταφορά του μεταλλεύματος, αλλά και για τη διασφάλιση της υγείας και ασφάλειας των εργαζομένων.

Οι εφαρμογές διατάξεων που διαπιστώθηκαν βιβλιογραφικά και καλύπτουν τις ανάγκες του όρου «μεταλλευτική ακριβείας» σχετίζονται με τη χρήση γεωφυσικών διατάξεων σε εκσκαφείς καδοτροχού (Galetakis et al., 2018b; Kesting et al., 2008; Mathiak et al., 2011). Επίσης αφορά την εγκατάσταση υπερφασματικών οπτικών αισθητήρων πάνω σε εκσκαφείς για την αποτύπωση του μετώπου κατά την εξόρυξη (Job et al., 2017). Τέλος σχετίζονται με την εγκατάσταση γεωραντάρ στο κοπτικό ενός γεωτρύπανου για τη διάτρηση οριζόντιων γεωτρήσεων σε τεχνικά έργα (Manacorda et al., 2010; Pasculli et al., 2016).

Στη βιομηχανία εξόρυξης υδρογονανθράκων υπάρχουν περισσότερες εφαρμογές. Όσον αφορά τη γεωτρητική διαδικασία σκοπός είναι η βελτιστοποίηση της ανόρυξης της γεώτρησης. Υπάρχουν διάφορες εφαρμογές στις οποίες εγκαθίστανται ηλεκτρομαγνητικές γεωφυσικές διατάξεις για την ανίχνευση στόχων μπροστά από το εκάστοτε κοπτικό. Επίσης κατά την παραγωγική φάση του ταμειευτήρα διάφορες διατάξεις οπτικών ινών και γεωφώνων μπορούν να βελτιστοποιήσουν την παραγωγή με μεθόδους βελτίωσης της ανάκτησης του πετρελαίου (Kiyashchenko et al., 2020). Επιπρόσθετα λόγω της σχετικά περιορισμένης βιβλιογραφίας ελέγχθηκαν, πέρα από την εξορυκτική βιομηχανία, παρόμοιες εφαρμογές σε δύσκολα και απομακρυσμένα αλλά, συγγενικά περιβάλλοντα όπως, τα ναυπηγικά, τα στρατιωτικά, τα κατασκευαστικά και το διαστημικό περιβάλλον.

Αντί ιστορικής αναδρομής επειδή οι εφαρμογές είναι περιορισμένες για κάθε τομέα, παρουσιάζονται οι βασικές αρχές λειτουργίας των διατάξεων οι οποίες, εκτιμάται ότι θα αποτελέσουν τον πυρήνα εξέλιξης τέτοιων συστημάτων. Κριτήρια ένταξης μελετών με τέτοιες διατάξεις σε αυτή την διατριβή είναι:

- Να έχει πραγματοποιηθεί δοκιμή σε βιομηχανικό ή ερευνητικό στάδιο.

- Να είναι ανθεκτικές σε έντονες αλλαγές και απόλυτες τιμές θερμοκρασίας, πίεσης, υγρασίας, διαβρωτικών παραγόντων, να έχουν υψηλό βαθμό αξιοπιστίας και διαθεσιμότητας.
- Να πραγματοποιούν γρήγορα την καταγραφή και επεξεργασία των δεδομένων. ώστε σε πραγματικό χρόνο να γίνεται γεωλογική και μεταλλευτική μοντελοποίηση. Στόχος είναι να μην διαταράσσεται η γραμμή παραγωγής (production line) και οι διαδικασίες παραγωγής (workflow).
- Να μην είναι βλαπτικά για το περιβάλλον αλλά κυρίως για τον άνθρωπο.

Οι διατάξεις αποτελούνται από έναν πομπό, που διεγείρει τα γεωυλικά και ένα δέκτη, που λαμβάνει το σήμα της απόκρισης από το γεωυλικό. Σε πρώτη φάση η απόκριση του γεωυλικού καταγράφεται ως απόκριση του αισθητήρα και μετατρέπεται σε φυσικές ιδιότητες από τις οποίες προέρχονται τα γεωλογικά χαρακτηριστικά. Στη συνέχεια από τις φυσικές ιδιότητες εξάγονται οι τεχνικές-τεχνολογικές ιδιότητες οι οποίες καθορίζουν τον τρόπο εξόρυξης. Με αυτή τη διαδικασία αποκτώνται πληροφορίες για το κοίτασμα και το μέτωπο, όχι μόνο πάνω στις ελεύθερες επιφάνειες αλλά και πίσω από αυτές. Η επιλογή της κατάλληλης διάταξης μπορεί να γίνει αν ακολουθηθούν τα παρακάτω βήματα για την επιλογή των χαρακτηριστικών της μεθόδου που χρησιμοποιεί η διάταξη αλλά και των χαρακτηριστικών των διατάξεων. Τέτοια χαρακτηριστικά είναι:

1. Το είδος της ενέργειας που χρησιμοποιούν ο πομπός, ο δέκτης και η απόκριση του γεωυλικού.
2. Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των διατάξεων.
3. Η δυνατότητα γνώσης της θέσης του γεωυλικού.
4. Το σημείο τοποθέτησης της διάταξης.
5. Ο αριθμός και ο τρόπος τοποθέτησης των διατάξεων.

Το πρώτο βήμα είναι να επιλεγθεί το είδος της ενέργειας που χρησιμοποιείται από τον πομπό τον δέκτη αλλά και το γεωυλικό. Όσον αφορά τον πομπό, η «ενεργοποίηση» μπορεί να γίνει με φυσική ή τεχνητή διέγερση του γεωυλικού, εξαίρεση αποτελούν τα ραδιενεργά υλικά που παράγουν δικά τους ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Το γεωυλικό ανάλογα με τη δομή του αντιδρά και παράγει μία απόκριση η οποία δεν είναι απαραίτητο να ταυτίζεται με το είδος ενέργειας που εκπέμπει η πηγή, ούτε απαραίτητα να σχετίζεται άμεσα με την προς προσδιορισμό φυσική ιδιότητα. Στη συνέχεια η απόκρισή καταγράφεται με έναν αισθητήρα (δέκτη), η καταγραφή μπορεί να είναι είτε παθητική είτε ενεργητική ανάλογα με το αν η διέγερση πραγματοποιείται με φυσικό ή τεχνητό πεδίο. Η ενέργεια που χρησιμοποιείται συνήθως είναι μηχανική, ηλεκτρική, μαγνητική, ηλεκτρομαγνητική και πολύ σπάνια ενέργεια σε ατομικό επίπεδο. Αυτή η καταγεγραμμένη απόκριση συνήθως δεν αντιστοιχεί με άμεσο τρόπο στην επιθυμητή ιδιότητα αλλά πρώτα πρέπει να αντιστοιχηθεί σε μία φυσική ιδιότητα και τελικά σε πιο σύνθετες τεχνικές-τεχνολογικές ιδιότητες (αντίσταση στην κοπή, οπτικές ιδιότητες κτλ.).

Η μηχανική και η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια είναι οι σημαντικότερες καθώς αφενός, συναντώνται συχνότερα αφετέρου, είναι πιο πρακτικές. Η μηχανική ενέργεια μεταφέρεται με σεισμικά κύματα ενώ η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια με ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Μία αρκετά

περιεκτική ανασκόπηση των αισθητήρων που καταγράφουν τις αποκρίσεις των γεωυλικών παρουσιάζουν οι Kızıroglou et al. (2017) η οποία αφορά το σύνολο της μεταλλευτικής εκτός του τομέα εξόρυξης υδρογονανθράκων. Ακόμα οι Lemièrre και Uvarova (2020) σε μία ανασκόπηση αναλυτικών μεθόδων με φορητές συσκευές εστιάζουν σε διατάξεις για μέτρηση σε μικρά δείγματα ως μέθοδο μερικής υποκατάστασης των εργαστηριακών μετρήσεων.

Η καταγραφή της παραμόρφωσης και συνεπώς των μηχανικών ιδιοτήτων μπορεί να γίνει άμεσα και έμμεσα. Άμεσα μπορεί να γίνει με ένα δίκτυο γεωφώνων τα οποία μπορεί να είναι ενσύρματα ή ασύρματα. Ιδιαίτερη αναφορά αξίζει να γίνει στο ερευνητικό έργο METIS (Masoni et al., 2019) το οποίο είχε στόχο μεταξύ άλλων την τοποθέτηση με μη επανδρωμένα αεροσκάφη, γεωφώνων για τη διενέργεια γεωφυσικών ερευνών. Το έργο αυτό οδήγησε στην κατασκευή ενός εμπορικού συστήματος διασκόπησης από την εταιρεία SAExploration. Οι πιο συνηθισμένες διατάξεις για την καταγραφή μηχανικών ιδιοτήτων είναι τα κλισιόμετρα, μηκυσιόμετρα, κυψέλες πίεσης-φορτίου και άλλες διατάξεις οι οποίες χρησιμοποιούνται σε γεωτεχνικά έργα. Ωστόσο, η εγκατάστασή τους είναι δαπανηρή και οι περιορισμοί των υποδομών τους δεν παρέχει την ευελιξία άλλων μεθόδων.

Οι έμμεσοι τρόποι προέρχονται από τη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε κάποια μεταβολή ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας. Αυτό μπορεί να γίνει με την παραμόρφωση ενός καλωδίου οπτικών ινών και τελικά την καταγραφή διαφορετικών οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (Kiyashchenko et al., 2020). Ακόμα την τελευταία δεκαετία έχουν αναπτυχθεί λειτουργικά γεωφώνων τα οποία δεν έχουν ηλεκτρικά εξαρτήματα αλλά μόνο μηχανικά. Οι μεταβολές αυτών των μηχανικών εξαρτημάτων καταγράφονται με οπτικές μεθόδους (Optical seismometer). Αυτή η μεθοδολογία μειώνει σε μεγάλο βαθμό το κόστος λειτουργίας και την ανθεκτικότητά των διατάξεων σε περιβάλλοντα όπως αυτά των βαθιών ορυχείων και των ηφαιστειών (Feron et al., 2020). Επίσης άλλες έμμεσοι μέθοδοι είναι η συνεχή φωτογράφιση (οπτική φασματοσκοπία) του μετώπου ή καταγραφή με δονησιμετρία laser (vibrometry) του μετώπου ώστε να μετρηθούν οι εδαφικές μεταβολές (Heuvel et al., 2006; Weisbecker et al., 2010). Οι μέθοδοι ουσιαστικά αφορούν τις ηλεκτρομαγνητικές μετρητικές διατάξεις αφού η μηχανική παραμόρφωση μετατρέπεται σε ηλεκτρομαγνητική η οποία αναλύεται ώστε να υπολογιστεί η πραγματική μηχανική παραμόρφωση.

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ανιχνεύεται με οπτικούς αισθητήρες αν πρόκειται για περιοχές στο ορατό ή σχετικά κοντά στο ορατό φάσμα και με κεραίες αν πρόκειται μεγαλύτερα μήκη κύματος. Οι μέθοδοι οπτικής φασματοσκοπίας μέρος των οποίων είναι και η ανθρώπινη όραση, ανιχνεύουν διαταραχές οι οποίες οφείλονται σε διαδικασίες σε ατομική ή μοριακή κλίμακα. Είναι διαδεδομένες, με μεγάλο εύρος εφαρμογών από την πετρογραφία έως και το διαχωρισμό μεταλλευμάτων με οπτικές μεθόδους.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να επισημανθεί ότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που μπορούν να μεταφέρουν αρκετά αναλυτικές πληροφορίες εξασθενούν γρήγορα τόσο στον αέρα και πολύ περισσότερο στα γεωυλικά. Εξαίρεση αποτελούν μέθοδοι οι οποίες χρησιμοποιούν laser επειδή μπορούν να αναλύσουν δείγματα από σχετικά μεγάλη απόσταση μόνο όταν το μέσο που διαπερνούν είναι ο αέρας.

Όσον αφορά τον τρόπο διέγερσης, μπορεί να γίνει με διάσπαση με παλμό laser υψηλής ενέργειας (Laser induced breakdown spectroscopy). Με αυτή την τεχνική ένας συγκεντρωμένος παλμός laser υψηλής ενέργειας ionίζει τα πρώτα επιφανειακά επίπεδα των ορυκτών ή άλλων υλικών. Αυτή η μάζα μεταβαίνει σε κατάσταση πλάσματος το οποίο στη συνέχεια ψύχεται και εκπέμπει ένα ηλεκτρομαγνητικό φάσμα που περιλαμβάνει την υπογραφή κάθε χημικού στοιχείου του μερικώς ιονισμένου γεωυλικού. Ουσιαστικά πρόκειται για μία διάταξη φασματοσκοπίας ατομικής εκπομπής. Η εκπομπή μπορεί να γίνει στο οπτικό φάσμα ή στο υπεριώδες (laser induced fluorescence), παρόμοια τεχνική είναι φασματομετρία φθορισμού ακτίνων X (X-ray fluorescence). Ωστόσο δεν είναι κατάλληλη για ανίχνευση χημικών στοιχείων με ατομικό αριθμό  $Z \leq 16$  για εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο (Gaft et al., 2014). Η φασματοσκοπία Raman είναι μία μέθοδος που μετράει την απόκριση από το γεωυλικό και συγκεκριμένα κάνει δειγματοληψία σε διάφορα μήκη κύματος που παράγονται εξ' αιτίας του φαινομένου Raman και συνήθως πραγματοποιείται ταυτόχρονα με κάποια από τις προηγούμενες μεθόδους.

Η βασική πρόκληση σε αυτές τις τεχνικές, όταν εφαρμόζονται από απόσταση, είναι ότι όταν οι παράμετροι αλλάζουν και οι ζητούμενες περιεκτικότητες είναι μικρές, είναι αρκετά δύσκολο να ανιχνευτούν με αυτές τις μεθόδους αρκετά χημικά στοιχεία (Gaft et al., 2014). Αναλυτικές επισκοπήσεις για την εφαρμογή της μεθόδου διάσπασης με παλμό laser από απόσταση έχουν πραγματοποιήσει οι Sallé et al. (2007) και οι Li et al. 2020. Ο Beyssac (2020) κάνει μία σύντομη περιγραφή των διαφορών φορητών διατάξεων και των εφαρμογών τους που χρησιμοποιούν τη μέθοδο Raman. Ενδεικτική των δυνατοτήτων αυτών των τεχνικών είναι μία έρευνα των Sharma et al. (2009) οι οποίοι δημιούργησαν μία διάταξη που καταγράφει στο μήκος κύματος των 532nm από απόσταση 9m ταυτόχρονα με τα φάσματα Raman.

Οι γεωφυσικές ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι είναι μία άλλη κατηγορία μεθόδων που καταγράφει αποκρίσεις σε μικρότερες συχνότητες επομένως διεισδύει περισσότερο στο μέτωπο όμως ανιχνεύει και μεταφέρει λιγότερες πληροφορίες για το γεωυλικό. Μπορεί να χρησιμοποιήσει έναν παλμό ηλεκτρομαγνητικού κύματος όπως το γεωραντάρ ή ένα συνεχές κύμα όπως στη μέθοδο κινητού πομπού-δέκτη η οποία αναλύεται παρακάτω.

Καθώς η ακρίβεια των μετρήσεων εξαρτάται από την απόσταση διάταξης-μετώπου είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν τόσο η θέση της διάταξης όσο και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μετώπου ώστε να υπολογιστεί η απόσταση μεταξύ τους. Για τον προσδιορισμό της θέσης πρέπει να καθοριστούν οι συντεταγμένες του κοπτικού άκρου και της διάταξης κατά την εξόρυξη. Υπάρχουν δύο δυνατότητες η μία απαιτεί την διασύνδεση με δορυφόρους και σταθμούς βάσεις. Σε αυτή την κατηγορία συγκαταλέγονται διαδεδομένες μέθοδοι όπως dGPS (differential GPS), real time kinematic κτλ. οι οποίες προσδιορίζουν τις συντεταγμένες σε ένα γεωαναφερόμενο σύστημα. Η δεύτερη δυνατότητα αφορά τη χρήση τοπικών συστημάτων αναφοράς και ο προσδιορισμός συντεταγμένων πραγματοποιείται με τη χρήση γυροσκοπίων, γωνιόμετρων (Sládková et al., 2011; Vrublova et al., 2016), επιταχυνσιόμετρων (Dunn et al., 2015) και μαγνητόμετρων.

Για τον προσδιορισμό των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του μετώπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν γεωδαιτικές τεχνικές ή/και οπτικές μέθοδοι είτε άμεσα με laser (LiDAR: Light detection and ranging) είτε έμμεσα με φωτογραμμετρικές μεθόδους. Οι γεωδαιτικές μέθοδοι είναι διαδεδομένες ενώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν και μη επανδρωμένα ιπτάμενα μέσα (πχ.

UAVSAR: Unmanned aerial vehicle synthetic aperture radar) τα οποία όμως δεν έχουν τη δυνατότητα συνεχόμενης παροχής δεδομένων. Για αυτό το λόγο έχουν αναπτυχθεί εφαρμογές με διάφορες επίγειες μεθόδους όπως η LiDAR και η GB-DInSAR (Ground based differential interferometry synthetic aperture RADAR) (Wang et al., 2020).

Αφού επιλεγθεί ποια ιδιότητα και ποια κατηγορία διατάξεων είναι κατάλληλες για το συγκεκριμένο πρόβλημα επόμενο βήμα είναι να επιλεγθούν τα χαρακτηριστικά των μεθόδων όπως είναι το μέγεθος του δείγματος (μάζα, όγκος) που είναι ικανές να αναλύσουν, η διεισδυτικότητα, η ταχύτητα εξαγωγής των αποτελεσμάτων, το εύρος και η ακρίβεια σε αυτό το εύρος κτλ. Όσον αφορά το μέγεθος του δείγματος αυτό μπορεί να εκτείνεται χωροχρονικά από μία μακροσκοπική έως μία μικροσκοπική διάσταση.

Στη διατριβή αυτή διερευνώνται οι «μικροσκοπικές» χωρικές διαστάσεις από 4-5m έως μερικά μm οι οποίες σχετίζονται άμεσα με το μέτωπο εξόρυξης. Για παράδειγμα η μέθοδος με διάσπαση laser αναλύει ένα μικρό δείγμα του μετώπου σε βάθος μερικών μm ενώ η οπτική και υπερφασματική φασματοσκοπία (Hyperspectral imaging) ελέγχει πολύ μεγαλύτερο μέρος του μετώπου και πρακτικά σε μηδενικό βάθος. Άλλες μέθοδοι όπως το γεωραντάρ διεισδύουν σε μεγάλα βάθη αλλά δεν έχουν την αναλυτική ικανότητα των προηγούμενων. Όσον αφορά την ταχύτητα εξαγωγής, αυτή εξαρτάται από την ταχύτητα δειγματοληψίας, την ταχύτητα επεξεργασίας του «δείγματος» και την ταχύτητα της ερμηνείας των αποτελεσμάτων. Ένα παράδειγμα είναι η ορυκτολογική ανάλυση με περίθλαση των ακτίνων X κατά την οποία απαιτούνται αρκετές ώρες για την ανάλυση αρκετών δειγμάτων, τα οποία είναι ικανά να δημιουργήσουν μία λεπτομερή «εικόνα» του μετώπου. Αντίθετα τα δεδομένα του γεωραντάρ παράγονται γρήγορα αλλά η ερμηνεία τους απαιτεί αρκετό χρόνο και επεξεργαστική ισχύ.

Τα επόμενα βήματα για την επιλογή κατάλληλων διατάξεων σχετίζονται με την αλληλεπίδραση δείγματος-διάταξης κατά την εξόρυξη. Το τρίτο βήμα είναι να επιλεγθεί η κατάλληλη διάταξη ανάλογα με τη βεβαιότητα των συντεταγμένων των καταγραφόμενων δεδομένων του γεωυλικού. Από τη στιγμή στην οποία πραγματοποιείται η απόσπαση από τη φυσική θέση του γεωυλικού, λυθεί η συνέχεια του και τελικά αυτό ομογενοποιηθεί παύει να υπάρχει, ή δεν είναι βέβαιη πλέον, η συσχέτιση του υλικού που εξορύχθηκε με το περιβάλλον του. Χωρίς την πληροφορία της θέσης του δείγματος στον χώρο αλλά και στον χρόνο δεν είναι δυνατή η πρόβλεψη-παρεμβολή των επόμενων τιμών και ειδικά σε πραγματικό χρόνο. Ιδανικά το πρόβλημα θα επιλυόταν αν ήταν εφικτή η πλήρης καταγραφή ταυτόχρονα μίας ιδιότητας και της θέσης ενός δείγματος εντός του μετώπου, ωστόσο κάτι τέτοιο ενέχει δυσκολίες και σπανίως είναι εφικτό.

Αυτό που συμβαίνει κατά τη δειγματοληψία-διασκόπηση είναι ότι πραγματοποιείται μία ακούσια ομογενοποίηση. Αν πρόκειται για διασκόπηση τότε η ομογενοποίηση αφορά όλους τους σχηματισμούς τους οποίους διαπερνά το ηλεκτρομαγνητικό ή το μηχανικό κύμα. Αν πρόκειται για δειγματοληψία, τότε με τη φυσική απόσπαση του υλικού από το πρηνές, ομογενοποιούνται κόκκοι ή τμήματα του σχηματισμού τα οποία αποτελούν ένα δείγμα. Χωρίς ωστόσο να είναι γνωστή η ακριβής θέση αυτών μέσα στο αρχικό αδιατάρακτο δείγμα. Ισοδύναμο παράδειγμα σε μεγαλύτερη κλίμακα είναι η ανατίναξη ενός πρίσματος (block) κατά την οποία

χάνονται οι ιδιότητες (συντεταγμένες, αντοχή σε θλίψη κτλ.) κάθε θραύσματος αλλά όχι συνολικά του block. Με την παραπάνω θεώρηση υπάρχουν τρεις δυνατότητες όσον αφορά τη θέση και την κατάσταση των γεωυλικών όταν γίνεται η καταγραφή των ιδιοτήτων τους.

1. Η πρώτη αφορά τη διασκόπηση πριν την εξόρυξη των γεωυλικών (έως 10m) και εν γένει οι μέθοδοι είναι μη καταστρεπτικές.
2. Η δεύτερη αφορά την αναγνώριση κατά τη διάρκεια της εξόρυξης ή λίγο πριν είτε μετά και πάντως πριν χαθεί πλήρως η δυνατότητα προσδιορισμού των συντεταγμένων (50cm). Οι μέθοδοι αυτοί είναι είτε καταστρεπτικές είτε όχι.
3. Η τρίτη αφορά τη καταγραφή των ιδιοτήτων μετά την εξόρυξη, αφού έχει πραγματοποιηθεί ομογενοποίηση όλων των συντεταγμένων. Πάλι οι μέθοδοι αυτοί μπορεί να είναι καταστρεπτικές ή όχι.

Η εργασία επικεντρώνεται στις δύο πρώτες κατηγορίες, ειδικά στην πρώτη αλλά και τη δεύτερη, διότι ταυτίζονται με τα χαρακτηριστικά της «μεταλλευτικής ακριβείας». Η μελέτη της τρίτης κατηγορίας είναι εξαιρετικά χρήσιμη διότι δίνει τη δυνατότητα να ελεγχθούν οι τιμές που προηγουμένως είχαν καταγραφεί, αλλά τώρα η νέα καταγραφή πραγματοποιείται με μικρότερη χωροχρονική αβεβαιότητα και μεγαλύτερη αναλυτική ακρίβεια. Εδώ περιλαμβάνονται οι μετρήσεις που πραγματοποιούνται παράλληλα με την εξορυκτική διαδικασία και πάντως ενώ έχει ομογενοποιηθεί το δείγμα, πριν, κατά ή μετά την εξόρυξη. Τέτοιες εφαρμογές πραγματοποιούνται εντός της γεώτρησης (downhole), κατά την εκσκαφή ή τη μεταφορά εν υγρώ ή εν ξηρώ, στην κορυφή της γεώτρησης (top-of-hole), με την αρχειοθέτηση πυρήνων των γεωτρήσεων πυρηνοληψίας κτλ.

Πολλές από αυτές τις μεθόδους απαιτούν μηχανική προπαρασκευή (θραύση, λειοτρίβηση, ξήρανση) του δείγματος. Με τον τρόπο αυτό ενώ δεν διαταράσσεται η γραμμή παραγωγής, η εξαγωγή συμπερασμάτων είναι χρονοβόρα. Μία αναλυτικότερη περιγραφή αυτής της διαδικασίας γίνεται από τους Bar-Cohen και Zacny (2009) αλλά και σε μία ευρεσιτεχνία των Lawie et al. (2020). Εμπορικά υπάρχουν διαθέσιμα εργαλεία των εταιριών Reflex, Honeybees και Quantum RX για αυτό το σκοπό.

Το τέταρτο βήμα αφορά την επιλογή της τοποθεσίας της διάταξης ή τμήμα αυτής ανάλογα με τη σχετική κίνησή της. Η τοποθέτηση μπορεί να γίνει πάνω στο κοπτικό ή τον εκσκαφέα ή/και σε κάποιο τμήμα της βαθμίδας. Αυτό εξαρτάται από τη σχετική κίνηση μεταξύ διάταξης-ενδεχόμενου στόχου και τη δυνατότητα εγκατάστασης υποδομής για τις διατάξεις. Τέσσερις υποπεριπτώσεις είναι δυνατές η διάταξη μπορεί να είναι σταθερή και ο στόχος σταθερός, να μετακινείται μόνο ο στόχος, να μετακινούνται και οι δύο, να είναι σταθερός μόνο ο στόχος. Οι τρεις πρώτες υποπεριπτώσεις αφορούν κυρίως την εξόρυξη υδρογονανθράκων-γεωθερμικών ρευστών, τη μελέτη της ευστάθειας πρανών, την αναγνώριση στόχων σε στρατιωτικές περιοχές, τον εντοπισμό του επίκεντρου σεισμού κτλ. Η τέταρτη περίπτωση εξετάζεται στην διατριβή αυτή καθώς ο στόχος είναι σταθερός και η μετρητική διάταξη κινείται μαζί με τον εκσκαφέα. Σε αυτή την περίπτωση οι καταλληλότερες διατάξεις είναι οι ηλεκτρομαγνητικές διότι δεν είναι υποχρεωτική η εγκατάσταση του πομπού και του δέκτη σε άλλο σημείο εκτός του εκσκαφέα. Δηλαδή επιτυγχάνεται ανέπαφη διασκόπηση η οποία επιλύει αρκετά προβλήματα

καθότι η εγκατάσταση στοιχειώδους εξοπλισμού σε εν λειτουργία ορυχείο είναι αρκετά δύσκολη, δαπανηρή και τελικά δυσχεραίνει την εξορυκτική διαδικασία.

Το τελευταίο βήμα αφορά την επιλογή του αριθμού των διατάξεων και του τρόπου τοποθέτησης τους βάσει του είδους της ελεύθερης επιφάνειας. Καθώς η ελεύθερη επιφάνεια μπορεί να είναι πολύ μικρή συνεπώς ο διαθέσιμος χώρος να είναι περιορισμένος ή η γεωμετρία-μορφή της επιφάνειας (εδώ βαθμίδα) ακανόνιστη, ο αριθμός και το σημείο εγκατάστασης περιορίζονται από τις ελεύθερες επιφάνειες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εισαγωγή σημαντικών σφαλμάτων στις καταγραφές τα οποία όμως έχουν καθοριστικό ρόλο στην ερμηνεία των δεδομένων.

## **2.4. Βασικά στοιχεία της μεθόδου κινητού πομπού-δέκτη (Slingram)**

Όσον αφορά την εξεταζόμενη περίπτωση μπορούν να εξαχθούν οι περισσότερες πληροφορίες από το μέτωπο με την επιλογή διάταξης η οποία βασίζεται στη μέθοδο Slingram (Michalakopoulos et al., 2018). Εν συντομία η επιλογή αυτής της μεθόδου έγινε διότι:

- Δεν απαιτείται η επαφή ή η μικρή απόσταση του δέκτη και του πομπού από τον υπό εξέταση γεωλογικό σχηματισμό όπως στις σεισμικές μεθόδους ή το γεωραντάρ αντίστοιχα.
- Ο εξοπλισμός έχει μικρό σχετικά κόστος κτήσης, πολύ μικρό λειτουργικό κόστος και είναι εμπορικά διαθέσιμος.
- Ο εξοπλισμός είναι ανθεκτικός σε απαιτητικά περιβάλλοντα σε σχέση για παράδειγμα με ένα βαρυτόμετρο και τοποθετείται εύκολα στον εκσκαφέα.
- Είναι δυνατό να αναγνωρίσει στόχους σε αρκετά μεγάλη απόσταση μετά την ελεύθερη επιφάνεια και όχι μόνο σε μία κατεύθυνση, με αποτέλεσμα να μπορεί να αναγνωρίσει διαφορετικές γεωμετρίες σχηματισμών.
- Η επεξεργασία των παραγόμενων δεδομένων δεν απαιτεί υποχρεωτικά περίπλοκου και υπολογιστικά απαιτητικούς αλγόριθμους σε σχέση με αυτούς ενός γεωραντάρ.

Η μέθοδος συγκαταλέγεται στις ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης. Σε αυτές, με τη βοήθεια ενός πομπού (κεραίας) δημιουργείται ένα τεχνητό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο χαμηλής συχνότητας, το οποίο διεγείρει τους γεωλογικούς σχηματισμούς. Καθώς τους διαπερνά παράγονται επαγόμενα ή δευτερογενή κύματα με αντίθετη φορά από τα πρωτεύοντα (Σχήμα 2.2). Ουσιαστικά αυτό αντιστοιχεί σε ένα νέο πηνίο το οποίο παράγει κύματα με ίδια συχνότητα αλλά διαφορετικό πλάτος, φάση και διεύθυνση.

Τελικά το σύνολο των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων λαμβάνονται από τον δέκτη στο σήμα του οποίου (καταγραφή) περιλαμβάνεται η συμβολή τόσο των πρωτευόντων όσο και των επαγόμενων από το γεωυλικό κυμάτων. Η μέθοδος κινητού πομπού-δέκτη χρησιμοποιεί τη διαφορά φάσης μεταξύ των δύο ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και εξάγει χρήσιμες πληροφορίες κυρίως για την ηλεκτρική και σπανιότερα για την μαγνητική δομή των εξεταζόμενων σχηματισμών.

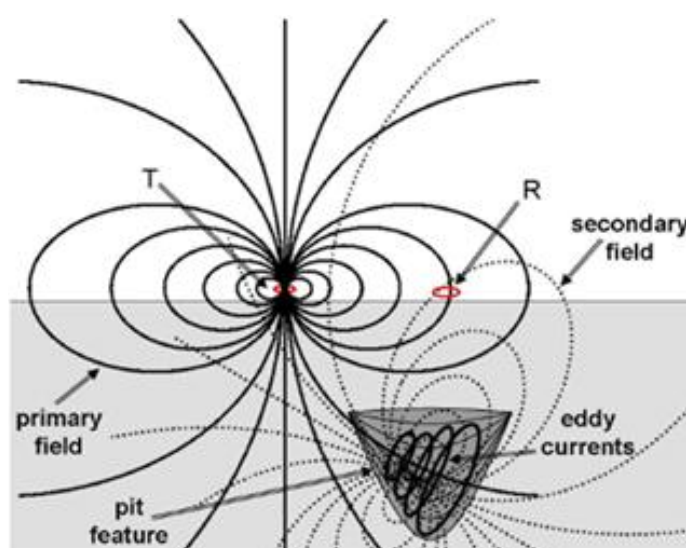
Βασικό χαρακτηριστικό της ηλεκτρικής δομής των σχηματισμών είναι η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα. Στη μέθοδο αυτή η επίδραση της αγωγιμότητας περιέχεται στην εκτός φάσης συνιστώσα η οποία προέρχεται από το δευτερεύον πεδίο, δηλαδή την απόκριση του γεωυλικού.

Επίσης από τις μετρήσεις της πραγματικής συνιστώσας μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για τη μαγνητική επιδεκτικότητα του γεωυλικού. Σε γενικές γραμμές τα γεωαγωγιμόμετρα μετρούν την εν φάσει ανιχνευόμενη συνιστώσα ως προς την εν φάσει εκπεμπόμενη εκπεφρασμένη σε μέρη τοις χιλίοις και την εκτός φάσης συνιστώσα βαθμολογημένη σε μονάδες ηλεκτρικής αγωγιμότητας [mS].

Η απόσβεση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων οφείλεται σε διάφορους μηχανισμούς, όσο ταχύτερη είναι αυτή τόσο περιορισμένα είναι διάφορα χαρακτηριστικά της μεθόδου όπως το βάθος διασκόπησης, πιο συγκεκριμένα αυτό είναι αντιστρόφως ανάλογο της αγωγιμότητας και εξαρτάται από:

- Τη διάταξη πομπού-δέκτη.
- Την απόσταση πομπού-δέκτη.
- Τη συχνότητα εκπομπής.
- Τις ιδιότητες του σχηματισμού και της υπόλοιπης περιεχόμενης ύλης στη μάζα που ελέγχεται.

Οι παραπάνω παράμετροι δημιουργούν ένα μη ομογενές ηλεκτρομαγνητικό πεδίο με αποτέλεσμα σε διαφορετικές αποστάσεις να υπάρχει διαφορετική ευαισθησία-απόκριση της μετρητικής διάταξης. Οι συνηθέστερες διατάξεις πομπού-δέκτη είναι η οριζόντια ομοεπίπεδη και η κατακόρυφη ομοεπίπεδη. Στην πρώτη περίπτωση πομπός και δέκτης λειτουργούν ως κατακόρυφα μαγνητικά δίπολα και επιτυγχάνεται μεγαλύτερο βάθος διασκόπησης. Στη δεύτερη περίπτωση πομπός και δέκτης λειτουργούν ως οριζόντια μαγνητικά δίπολα και είναι ευαίσθητη στα επιφανειακότερα χαρακτηριστικά του σχηματισμού. Η ακτίνα (βάθος) διασκόπησης είναι διπλάσιο και 1,5 φορά της απόστασης πομπού-δέκτη για την οριζόντια και την κατακόρυφη διάταξη αντίστοιχα. Η ακτίνα εγκάρσια στις δύο προηγούμενες και παράλληλα με τον άξονα του οργάνου είναι  $\frac{3}{4}$  της απόστασής τους (Τζάνης, 2016). Αυτές οι δραστικές ακτίνες είναι ενδεικτικές και όχι μέγιστες ενώ, το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο εντός αυτού του χώρου δεν είναι ομοιογενές.



Σχήμα 2.2: Προτεύοντα και δευτερεύοντα ηλεκτρομαγνητικά κύματα από τους Grant και West (1965) όπως τροποποιήθηκε από τον Reynold (1997).



Όσον αφορά τις υπόλοιπες παραμέτρους όσο μικρότερη είναι η απόσταση πομπού-δέκτη τόσο μικρότερο είναι το μέγιστο βάθος διασκόπησης και αντιστρόφως. Όταν η συχνότητα λειτουργίας είναι υψηλή τότε ο αριθμός επαγωγής (induction number) διατηρείται χαμηλός και υπάρχει αυξημένη ευαισθησία σε μικρές μεταβολές της αγωγιμότητας. Επίσης όσο χαμηλότερη είναι η συχνότητα τόσο αυξημένο είναι το βάθος διασκόπησης επομένως η επιλογή της συχνότητας πρέπει να σταθμίζει αυτές τις δύο παραμέτρους.

Αυτού του είδους οι διατάξεις είναι βαθμονομημένες για διασκοπήσεις με μικρές αποστάσεις από το έδαφος όπως αναλύεται στο τέταρτο κεφάλαιο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην είναι ενδεδειγμένη η λειτουργία τους για ανίχνευση στόχων σε πολύ μεγάλες αποστάσεις διότι εξασθενεί το σήμα το οποίο ενισχύεται βάσει της βαθμονόμησης για διασκόπηση κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια. Σε κάθε περίπτωση όταν η απόσταση από το μέτωπο είναι πολύ μεγάλη (πχ. 20-30m) ο δέκτης λαμβάνει ένα σήμα, το οποίο είναι πολύ εξασθενημένο (χαμηλότερης έντασης), έχει διεισδύσει λιγότερο στο μέτωπο, ενώ πλέον καθώς η ακτίνα του ελλειψοειδούς είναι μεγαλύτερη επηρεάζεται από μεγαλύτερο τμήμα του σχηματισμού. Συνεπώς δεν αντιπροσωπεύει μόνο το υποκείμενο γεωυλικό αλλά και την ευρύτερη γειτονιά του. Τελικά το μεγαλύτερο δείγμα αλλά και η «κλινθασμένη» βαθμονόμηση αλλοιώνουν τη μετρούμενη αγωγιμότητα.

Οι παραπάνω παράμετροι καθορίζουν μία μεταβαλλόμενη δραστική ακτίνα η οποία σχηματίζει ένα τριαξονικό ελλειψοειδές με κέντρο το ενδιαμέσο σημείο μεταξύ πομπού-δέκτη, μέσα στο οποίο δρα ένα ετερογενές ηλεκτρομαγνητικό πεδίο.

Η παραπάνω θεώρηση ισχύει όταν το πεδίο εφαρμόζεται σε ένα ομοιογενές μέσο όπως ο αέρας, τότε το βάθος διασκόπησης είναι τόσο μικρότερο όσο πιο αγωγίμος είναι ο σχηματισμός. Στην περίπτωση ενός σύνθετου ετερογενούς υλικού όπως τα γεωυλικά, ιδιαίτερα με την ταυτόχρονη παρεμβολή ενός «στρώματος» αέρα, η ανάλυση είναι πιο περίπλοκη. Τα γεωυλικά αποτελούνται από πολλές φάσεις οι οποίες συνθέτουν ένα ετερογενές σύνολο, αυτή η ετερογένεια αφορά και τις ηλεκτρικές ιδιότητες του υλικού. Η ετερογένεια διαταράσσει τη μορφή του τριαξονικού ελλειψοειδούς του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου η οποία προκύπτει σε ομοιογενή υλικά. Επίσης η επίδραση της όδευσης στον χώρο και στον χρόνο κατά την εξόρυξη παρουσιάζει πολλές ιδιαιτερότητες. Για παράδειγμα, συνήθως οι ρηχοί στόχοι είναι δύσκολα ανιχνεύσιμοι διότι αφενός η μορφή εμφάνισής τους εξαρτάται από τη διεύθυνση και τον τρόπο όδευσης (ταχύτητα, επιτάχυνση) αφετέρου η ένταση εμφάνισής τους καθορίζεται από τη ζεύξη πρωτεύοντος-στόχου το οποίο εξαρτάται από το βάθος ταφής και επομένως την όδευση στην τρίτη διάσταση.

Γίνεται αντιληπτό ότι το ελεγχόμενο κάθε φορά περιεχόμενο κατά την εξόρυξη δεν έχει σταθερό όγκο αλλά αυτός εξαρτάται από τη δομή των γεωυλικών αλλά και από την όδευση που επιλέγεται στις τρεις διαστάσεις και λιγότερο στην τέταρτη διάσταση (χρόνο).

Ο όγκος του ελλειψοειδούς εξαρτάται από την περιεχόμενη μάζα που ελέγχεται κάθε φορά και πιο συγκεκριμένα από το συνολικό ηλεκτρικό φορτίο της μάζας όπου διαπερνά το ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Η μάζα ελέγχου είναι δυναμική και εκτός από την απόσταση (δραστική εμβέλεια) καθορίζει και την ευαισθησία με την οποία μετριέται κάθε τμήμα του γεωλογικού σχηματισμού. Πολύ μεγάλος όγκος με πολύ μικρό «φορτίο» έχει μικρή συνεισφορά στη συνολική μετρούμενη αγωγιμότητα ενώ ταυτόχρονα επιτρέπει στο ηλεκτρομαγνητικό κύμα να διανύσει

μεγαλύτερη απόσταση με αποτέλεσμα ληφθούν υπόψη φορτία από μεγαλύτερες αποστάσεις δηλαδή, το ελλειψοειδές διαστέλλεται.

Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα συντίθεται από το σύνολο των φάσεων οι οποίες δομούν το γεωλογικό σχηματισμό και όχι μόνο το στόχο. Πιο συγκεκριμένα αποτελείται από το σταθμισμένο μέσο όρο του ηλεκτρικού φορτίου που βρίσκεται εντός του τριαξονικού ελλειψοειδούς. Δηλαδή από την πορεία του κύματος τόσο στο σύνθετο γεωυλικό (στρώσεις, μεταπτώσεις κτλ.) αλλά και από οποιοδήποτε άλλο υλικό παρεμβάλλεται στην πορεία του όπως ο αέρας. Επίσης αυτή η αγωγιμότητα προέρχεται και ανιχνεύεται από μία διάταξη με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά λειτουργίας όπως η συχνότητα.

Όταν η αγωγιμότητα προσδιορίζεται με εργαστηριακές μεθόδους οι ηλεκτρικές και μαγνητικές ιδιότητες ενός γεωυλικού είναι ακριβείς. Ωστόσο η εκτίμηση των ιδιοτήτων του ίδιου ομοιογενούς γεωυλικού, υπό την επίδραση ενός ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στο φυσικό περιβάλλον δεν αποτελεί γραμμικό συνδυασμό του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου των συστατικών του γεωυλικού οι οποίες έχουν προσδιοριστεί με εργαστηριακές μεθόδους, ειδικά αν η συχνότητα μέτρησης είναι διαφορετική. Τέλος πρέπει να σημειωθεί ότι η αγωγιμότητα επηρεάζεται και από την υπάρχουσα ροή ηλεκτρονίων. Για τους παραπάνω λόγους η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα που καταγράφεται στο πεδίο ονομάζεται φαινόμενη.

Η αναγνώριση στόχων με χαμηλότερη αντίσταση από το περιβάλλον τους και με μικρή μεταξύ τους διαφορά, στη μεταβλητή επιφάνεια του μετώπου και σε πραγματικό χρόνο αναβαθμίζει τις όποιες προκλήσεις ανακύπτουν και δημιουργεί την ανάγκη εισαγωγής ενός τρόπου με τον οποίο θα προτείνονται αυτοματοποιημένα οι πιθανές αιτίες από την οποία προέρχεται μία ηλεκτρομαγνητική ανωμαλία.

## Κεφάλαιο 3ο: Βασικά στοιχεία της μεθόδου FMECA

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται, η μέθοδος FMECA και οι αιτίες επιλογής της. Στόχος είναι η μέθοδος να χρησιμοποιείται ώστε αφενός, να διευκολύνει τον διαχωρισμό των γεωλογικών φάσεων εντός του μετώπου αφετέρου, να ελαχιστοποιεί την αβεβαιότητα η οποία παράγει αλληλεξαρτήσεις κατά την ανάλυση του συστήματος.

Πιο συγκεκριμένα στην Ενότητα [3.1] περιγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά της μεθόδου. Στην Ενότητα [3.2] γίνεται μία ιστορική αναδρομή των εφαρμογών της, αναφέρονται συγκεκριμένες εφαρμογές της μεθόδου στην εξορυκτική βιομηχανία, περιγράφονται τα μειονεκτήματα και τα πλεονεκτήματά της και παρουσιάζονται οι λόγοι επιλογής της μεθόδου βάσει των προκλήσεων της μεταλλευτικής ακριβείας και του εξεταζόμενου προβλήματος. Στην Ενότητα [3.3] αναλύονται τα βήματα για την εφαρμογή της μεθόδου. Τέλος στην Ενότητα [3.4] παρουσιάζεται αναλυτικά ο τρόπος εκτίμησης της διακινδύνευσης με τη μέθοδο αυτή.

### 3.1. Επιλογή μεθόδου εκτίμησης της διακινδύνευσης

Η εύρεση του σημείου και του τρόπου αστοχίας, για την εκτίμηση της διακινδύνευσης σε συστήματα που σχετίζονται με την εξορυκτική βιομηχανία δεν είναι πάντα απλή διαδικασία. Όσον αφορά τον κλάδο των γεωτρήσεων υδρογονανθράκων είναι σχετικά εύκολο και μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους. Οι πιο σύγχρονοι από τους οποίους είναι οι μέθοδοι μηχανικής μάθησης (Jiang et al., 2020). Αυτά τα συστήματα και γενικότερα όλα τα μηχανολογικά και ηλεκτρονικά συστήματα αναλύονται, εκ των υστέρων, με μεθόδους FDIR (Fault detection, isolation and recovery) οι οποίες είναι ευρέως διαδεδομένες. Βασικό μειονέκτημά για την εφαρμογή τους είναι ότι πρέπει να έχει δημιουργηθεί το σύστημα που αναλύεται και να παράγει αρκετά δεδομένα.

Το κριτήριο αυτό ισχύει ακόμα και για πρωτότυπα με την προϋπόθεση ότι δεν διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό από υπάρχοντα συστήματα. Τέτοια τυπικά παραδείγματα αφορούν κατασκευασμένα πρωτότυπα για την όρυξη οριζόντιων επιφανειακών γεωτρήσεων (Flessa et al., 2018) αλλά και για την αξιολόγηση ενός μη επανδρωμένου οχήματος (rover) με σκοπό τη μεταφορά ενός γεωραντάρ (Ireland et al., 2017). Χαρακτηριστικό των παραπάνω συστημάτων είναι ότι αφορούν υπάρχοντα υλικά συστήματα και όχι διαδικασίες υπό ανάπτυξη. Συνεπώς τα συστήματα είναι πολύ καλά ορισμένα, οι αστοχίες δεν έχουν συγγενικά χαρακτηριστικά και κατά τη λειτουργία των συστημάτων, τα είδη των σφαλμάτων τα οποία προκύπτουν είναι περιορισμένα, εύκολα ανιχνεύσιμα και υπάρχουν στατιστικά στοιχεία. Δηλαδή τα ίδια τα συστήματα και η συμπεριφορά τους είναι γνωστά.

Η μέθοδος FMECA είναι μία προδραστική μέθοδος και η αιτία επινοήσής της αφορούσε την εκ των προτέρων εφαρμογή της κατά τον σχεδιασμό και πριν την εκ νέου κατασκευή ενός συστήματος ώστε να αναλυθεί η αξιοπιστία του σε μία άγνωστη κατάσταση. Επίσης είναι εύλικτη και έχει την ικανότητα να αναλύει τόσο υλικά συστήματα όσο και διαδικασίες. Η αξιολόγηση ενός συστήματος με αυτή τη μέθοδο, στόχο έχει να περιγράψει τη μελλοντική λειτουργία του συστήματος ώστε να ελαχιστοποιηθεί η διακινδύνευση και ακολούθως να ελαττωθούν

οι δαπάνες από ενδεχομένως σοβαρότερες επιπτώσεις οι οποίες μπορεί να ανακύψουν σε επόμενα στάδια. Αυτό γίνεται καθώς ελαχιστοποιεί τη μετάδοση των επιπτώσεων από τα απλά εξαρτήματα σε πιο σύνθετα εξαρτήματα του συστήματος. Έτσι, βελτιστοποιείται ο τρόπος παραγωγής, συντήρησης του συστήματος καθώς και η ικανοποίηση του τελικού χρήστη. Αυτή η χρήση της μεθόδου είναι απαιτητική και χρειάζεται αρκετούς πόρους για να υλοποιηθεί ωστόσο μακροπρόθεσμα εξοικονομούνται πόροι με την αποτροπή πολλών αστοχιών. Τελικά μπορεί να «απαντήσει» εκ των προτέρων και με ακρίβεια στο ερώτημα, ποια είναι τα πιο ευάλωτα σημεία του συστήματος και να προτείνει δράσεις για τη μείωση της τρωτότητας αυτών. Στην ουσία είναι μία μέθοδος κυρίως ανάλυσης της αξιοπιστίας, η οποία μπορεί να επεκταθεί και να εφαρμοστεί σε όλες τις φάσεις του κύκλου ζωής ενός συστήματος ή και μίας διαδικασίας ώστε να αποτελέσει μία άτυπη μέθοδο διαχείρισης κινδύνων.

Η μέθοδος δεν είναι στατική αλλά εξελίσσεται δυναμικά μαζί με το σύστημα σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής του. Στην ουσία αποτελεί μία «ιστορική» καταγραφή του συνόλου των αρνητικών γεγονότων και μπορεί να εξελιχθεί σε μία μέθοδο διαχείρισης της ασφάλειας του εξεταζόμενου συστήματος, ώστε σε κάθε βήμα να βελτιστοποιείται το σύστημα. Η βασική μορφή του πίνακα ανάλυσης, είναι θεμιτό να είναι σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του προϊόντος ώστε να μην απαιτούνται εκτεταμένες αναθεωρήσεις.

Οι δύο στόχοι με τη χρήση της FMECA είναι αφενός μεν να δημιουργηθεί μία μεθοδολογία δημιουργίας πρωτοτύπων, τροποποιήσεων και βελτιώσεων συστημάτων για τη μεταλλευτική ακριβείας, αφετέρου δε να δημιουργηθεί μία μεθοδολογία με την οποία θα παράγονται τα κατάλληλα μηνύματα με τα αναγκαία μέτρα ανάληψης δράσης και μετριασμού των επιπτώσεων σε πραγματικό χρόνο ώστε σε περιπτώσεις υψηλής διακινδύνευσης κατά την εξόρυξη να μειωθεί η τρωτότητα του συστήματος.

Οι στόχοι αυτοί προσεγγίζονται καλύτερα με αυτή τη μέθοδο όπως τεκμηριώνεται από τα χαρακτηριστικά της μεθόδου και τις εφαρμογές που διαπιστώνονται βιβλιογραφικά παρακάτω. Συνοπτικά η επιλογή έγινε διότι:

- Μπορεί να αναλύσει την αξιοπιστία του συστήματος προδραστικά (εκ των προτέρων), τόσο κατά τη λειτουργία όσο και για τον σχεδιασμό του.
- Είναι ευέλικτη διότι μπορεί περιλαμβάνει πολλές διαφορετικές κατηγορίες οι οποίες μπορούν να αναλύσουν υλικά συστήματα αλλά και διαδικασίες όπως τις διαδικασίες που περιλαμβάνουν τα στάδια της αυτοματοποίησης κατά την εξόρυξη και την αλληλεπίδραση ανθρώπου αυτοματοποίησης, ανεξάρτητα με τον βαθμό αβεβαιότητας που εμπεριέχουν.
- Έχει πολύ μεγάλη προσαρμοστικότητα, καθώς έχει τη δυνατότητα να διαχειριστεί ποιοτικά, ημιποσοτικά και ποσοτικά δεδομένα ανάλογα με την ποσότητα και το είδος της πληροφορίας που έχει συλλεχθεί.
- Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό είναι η δυνατότητα αντιμετώπισης της αβεβαιότητας της απόκρισης των αισθητήρων μέσω της ανιχνευσιμότητας.
- Μπορεί χρησιμοποιηθεί ώστε να διακριθούν μικρές διαφορές των ιδιοτήτων του στόχου από τους υπόλοιπους σχηματισμούς όταν υπάρχει έντονη ανομοιογένεια των σχηματισμών που μπορεί να συνθέτουν την ίδια μετρούμενη τιμή.

- Προτείνει τρόπους μετριασμού των επιπτώσεων των αστοχιών οι οποίοι μπορεί να αποτελούν μηνύματα στο χειριστή. Με αποτέλεσμα να συνεργάζεται με μεθόδους λήψης αποφάσεων.

Παρά τα πλεονεκτήματα της μεθόδου το οποίο πιστοποιείται από την εφαρμογή της σε ακαδημαϊκό και βιομηχανικό επίπεδο για πάνω από 70 χρόνια έχει ορισμένα μειονεκτήματα τα οποία σχετίζονται με τους πόρους που απαιτούνται για να υλοποιηθεί, τον διαχωρισμό του τρόπου αστοχίας και της επίπτωσης του όταν αναλύονται συστήματα με μη ιεραρχική δομή ή διαδικασίες και τον υπολογισμό του RPN. Για αυτά έχουν προταθεί ορισμένοι τρόποι αντιμετώπισής τους οι οποίοι συνοψίζονται σε μία βιβλιογραφική επισκόπηση (Spreafico et al., 2017). Τα σημαντικότερα προβλήματα σχετίζονται με τον RPN και αναλύονται από τους Ciani et al. (2019), αυτά είναι:

- Οι μεγάλες και διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ των δυνατών RPN που προκύπτουν, δημιουργούν μία ανομοιόμορφη κατανομή των RPN. Με αποτέλεσμα στην κλίμακα να μην περιέχονται τιμές πέραν των δυνατών αριθμών.
- Αποδίδεται ίδιος αριθμός RPN για διαφορετικούς συνδυασμούς των τριών παραμέτρων οι οποίοι απαιτούνται για τον υπολογισμό του, ενώ μικρές αλλαγές στις παραμέτρους αυτές μεταβάλλουν σημαντικά τον RPN επειδή προκύπτει ως γινόμενο τους.
- Ο προσδιορισμός των τριών αυτών παραμέτρων περιέχει μεγάλο βαθμό υποκειμενικότητας (ανάλογα με τον μελετητή). Επίσης συνήθως η σημαντικότητα μίας αστοχίας έχει μεγαλύτερη βαρύτητα από τις άλλες παραμέτρους κάτι το οποίο δεν αποτυπώνεται στον RPN.

Στην ίδια εργασία προτείνονται οι τρόποι αντιμετώπισης αυτών των προβλημάτων ενώ, ο Liu (2016) επικεντρώνεται στις λύσεις που χρησιμοποιούν την ασαφή λογική και τις πολυκριτηριακές αποφάσεις.

### **3.2. Ιστορική εξέλιξη και εφαρμογές της FMECA στην εξορυκτική βιομηχανία**

Η μέθοδος FMECA εμφανίστηκε τη δεκαετία του 40' και του 50' στη στρατιωτική βιομηχανία. Αργότερα τη δεκαετία του 60' χρησιμοποιήθηκε από την αεροδιαστημική βιομηχανία για την εξέλιξη των διαστημικών σκαφών. Στο τέλος της ίδιας δεκαετίας και τη δεκαετία του 70' καθιερώθηκε στην αυτοκινητοβιομηχανία. Η βασική και πιο διαδεδομένη μορφή της μεθόδου είναι η εξέταση συστημάτων που αποτελούνται από μηχανικά ή ηλεκτρικά μέρη καθώς είναι γνωστοί οι ρυθμοί και οι τρόποι αστοχίας τους. Η μέθοδος εφαρμόζεται ευρέως στη βιομηχανία ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, στην ανάπτυξη του υλικού των υπολογιστών, την παραγωγή ημιαγωγών, ιατρικού εξοπλισμού και στην αυτοκινητοβιομηχανία (Stamatis, 2003). Ωστόσο, μπορεί και έχει χρησιμοποιηθεί σε διάφορες ερευνητικές και βιομηχανικές εφαρμογές σε όλα τα επιστημονικά πεδία από την πληροφορική, για την ανάπτυξη αλγορίθμων μέχρι την ιατρική και την εξορυκτική βιομηχανία.

Στην εξορυκτική βιομηχανία η μέθοδος συναντάται για την εκτίμηση της αξιοπιστίας του μηχανολογικού εξοπλισμού και σπανιότερα για την εκτίμηση της διακινδύνευσης από την αστοχία των γεωυλικών. Τέτοιες μελέτες είναι εξαιρετικά σημαντικές διότι η εξόρυξη τείνει να πραγματοποιηθεί σε όλο και πιο απομακρυσμένα και ακραία περιβάλλοντα όπου η αστοχία του εξοπλισμού αλλά και τμημάτων του ορύγματος θα έχουν καταστρεπτικές συνέπειες. Μία τέτοια περίπτωση είναι η ενάλια εξόρυξη πολυμεταλλικών κονδύλων η οποία πραγματοποιείται σε βάθη της τάξης των 6000 m, στα οποία η πίεση αποτελεί σημαντική πηγή κινδύνου. Η μελέτη της αξιοπιστίας σε αυτού του είδους τον εξορυκτικό εξοπλισμό μπορεί να περιορίσει την έκθεση σε τέτοιους κινδύνους όπως έχει διαπιστωθεί (Varshney et al., 2015). Η μέθοδος χρησιμοποιείται ευρύτερα σε πολλούς κλάδους της εξορυκτικής βιομηχανίας όπως κατά την προπαρασκευή και τον εμπλουτισμό του μεταλλεύματος (Jeffery, 2009), τη βιομηχανία υδρογονανθράκων αλλά και την κλασική μεταλλευτική βιομηχανία.

Όσον αφορά τον μηχανολογικό εξοπλισμό έχει εφαρμοστεί σε εκσκαφείς για τη βέλτιστη συντήρησή τους (Kumar και Kumar, 2016, 2017) και σε φορτηγά τύπου dumper των 100t (Narayana et al., 2013). Επίσης εφαρμόστηκε για τη μελέτη των βλαβών ενός εκσκαφέα καδοτροχού και τη συντήρησή του, όπως αναλύεται διεξοδικά στην εργασία των Pantelić et al. (2020). Αντίστοιχες αλλά λιγότερο λεπτομερείς εργασίες για εκσκαφείς καδοτροχού (Kumar και Srivastava, 2014) έχουν πραγματοποιηθεί αλλά σε αυτές τις περιπτώσεις δεν συνδέεται η βλάβη με συγκεκριμένες γεωλογικές συνθήκες. Όσον αφορά τα συστήματα συνεχούς εκσκαφής οι Petrović et al. (2014) μελετούν την ανάλυση της αξιοπιστίας του ταινιόδρομου ενός ανθρακωρυχείου και βελτιστοποιούν τα αποτελέσματα με μεθόδους ασαφούς λογικής. Μία άλλη εργασία συστημάτων συνεχούς εκσκαφής μελετά τις βλάβες σε έναν εκσκαφέα με τύμπανο σημειακής κοπής για επιφανειακά ορυχεία (Singh et al., 2019). Αντίστοιχα εφαρμόστηκε και σε έναν εκσκαφέα με τύμπανο σημειακής κοπής που λειτουργούσε σε ανθρακωρυχείο στο οποίο εφαρμόζονταν η μέθοδος επιμήκους μετώπου (Balaba et al., 2012). Ωστόσο σε καμία από αυτές τις εργασίες η μέθοδος δεν χρησιμοποιήθηκε ούτε για τη δημιουργία πρωτοτύπου, ούτε για τον χαρακτηρισμό των γεωυλικών με τη διακινδύνευση και τελικά ούτε για να καθοδηγούν τον χειριστή σε πραγματικό χρόνο για τη βέλτιστη εξόρυξη.

Με την ίδια λογική χρησιμοποιούν τη μέθοδο οι Balaraju et al. (2019) για την ανάλυση των λειτουργιών ενός φορτωτή υπογείων. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό σε αυτή την εργασία είναι ότι προσθέτουν και ένα επιπλέον βήμα επεξεργασίας της διακινδύνευσης με μεθόδους ασαφούς λογικής, με αυτόν τον τρόπο ενισχύουν τη σημαντικότητα μίας αστοχίας κάτι που εξομαλύνει τα προβλήματα της μεθόδου. Στο ερευνητικό έργο BEWEXMIN χρησιμοποιήθηκαν τεχνικές ασαφούς λογικής όχι όμως για την περαιτέρω επεξεργασία της διακινδύνευσης αλλά για τον προσδιορισμό των παραμέτρων της διακινδύνευσης (Galetakis et al., 2018c). Επίσης σε ένα φορτωτή υπογείων γίνεται μία ανάλυση με τη μέθοδο FMECA (Özfirat et al., 2019) η οποία αφορά τη συμπεριφορά του χειριστή κατά τη φόρτωση όχι όμως τον ίδιο τον φορτωτή. Βασικό μειονέκτημα σε αυτή τη μελέτη είναι ότι δεν παρουσιάζονται συγκεκριμένα στατιστικά απολογιστικά στοιχεία για την πιθανότητα, τη σοβαρότητα και την ανιχνευσιμότητα κάτι το οποίο είναι αναγκαίο για την ανάλυση τέτοιων συστημάτων. Η FMEA μπορεί να αποτελεί τμήμα και άλλων μεθοδολογιών όπως στην περίπτωση της RCM (Reliability centered maintenance), μία ευρύτερη ανάλυση εφαρμογής της μεθόδου αυτής παρουσιάζεται (Hoseinie et al., 2016) για τη

συντήρηση του εξοπλισμού σε υπόγεια ορυχεία με αυτοματισμούς. Τόσο σε αυτή την περίπτωση όσο και στις προηγούμενες δεν διερευνάται η αξιοπιστία της διαδικασίας της εξόρυξης κατά την εκσκαφή.

Η μέθοδος έχει προταθεί για την αξιολόγηση του εξοπλισμού στη βιομηχανία υδρογονανθράκων (de Wardt et al., 2011) ώστε να επιτευχθεί η διεύθυνση της αυτοματοποίησης αλλά δεν παρουσιάστηκε μία εφαρμογή με την οποία θα επιτυγχανόταν αυτό. Υπάρχουν εργασίες όπως του Okonji (2015) οι οποίες αναλύουν αποκλειστικά τον εξοπλισμό εξεδρών όπως του εξαρτήματος BOP (Blowout preventer) και αντίστοιχα των Nasruddin et al. (2018) και των Feili et al. (2013) για γεννήτριες σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμικά ρευστά, όλες αυτές οι μελέτες δεν αναλύουν τις γεωλογικές αιτίες από τις οποίες προέρχονται οι αστοχίες. Οι προσπάθειες για την προτυποποίηση των διαδικασιών στη βιομηχανία των γεωτρήσεων υδρογονανθράκων τουλάχιστον όσον αφορά τη FMECA είχαν ξεκινήσει από τις αρχές της δεκαετίας του 80' (Dyer et al., 1972), αλλά αυτό το εγχείρημα δεν έχει ολοκληρωθεί μέχρι και σήμερα καθώς αυτή η μέθοδος δεν είναι η σημαντικότερη υποψήφια για αυτό το σκοπό.

Όσον αφορά τη χρήση για τον χαρακτηρισμό με τη διακινδύνευση των γεωυλικών υπάρχουν ορισμένες έρευνες οι οποίες ωστόσο δεν αναλύουν συνολικά ένα σύστημα. Πιο συγκεκριμένα οι Oraee et al. (2011) εκτιμούν τη διακινδύνευση με τη μέθοδο fuzzy FMEA (FMECA) για ένα υπόγειο ορυχείο γαιάνθρακα. Στη μελέτη αυτή αναλύουν διάφορους περιβαλλοντικούς παράγοντες και παράγοντες υγείας και ασφάλειας μέσα στους οποίους περιλαμβάνονται και γεωλογικοί κίνδυνοι όπως κατάρρευση οροφής, διαφυγή μεθανίου κτλ. Η ανάλυση αυτή πραγματοποιείται εκ των υστέρων με στατιστικά στοιχεία και δεν λαμβάνει υπόψη τις γεωλογικές αιτίες αυτών των αστοχιών.

Οι Robertson και Shaw (2003) παρουσιάζουν το βασικό τρόπο χαρακτηρισμού ενός ορυχείου άρα και των γεωυλικών του κατά την προετοιμασία για το κλείσιμό του με τη μέθοδο FMEA. Η χρήση αυτή παρουσιάζει ενδιαφέρον γιατί αφορά τον σχεδιασμό μίας διαδικασίας και όχι ένα υπάρχον πρωτότυπο όπως στις προηγούμενες περιπτώσεις. Μία λεπτομερέστερη μελέτη εφαρμογής (O'Kane et al., 2016) αφορά την αποκατάσταση κυρίως του φράγματος τελμάτων του επιφανειακού ορυχείου McArthur river mine. Ωστόσο σε αυτή την περίπτωση η εφαρμογή ομοιάζει περισσότερο με έναν γενικό οδηγό παρά με μία εξειδικευμένη μελέτη καθώς το σύστημα δεν διαχωρίζεται σε υποσυστήματα και δεν χρησιμοποιεί το χαρακτηριστικό της ανίχνευσης (detection). Την ίδια λογική ακολουθούν οι Hutchison et al. (2016) για την αποκατάσταση ενός εγκαταλελειμμένου υπόγειου ορυχείου χαλκού μελετώντας κυρίως υδρογεωλογικά και υδρολογικά προβλήματα με μεγαλύτερη όμως λεπτομέρεια. Υδρογεωλογικά προβλήματα και προβλήματα που σχετίζονται με τη διαφυγή μεθανίου σε υπόγεια και υπαίθρια ανθρακωρυχεία μελετώνται από τους Ford et al. (2016). Οι μελετητές σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιούν το ακρωνύμιο IMEA (Impact modes and effects analysis) αντί του FMEA, η πρακτική αυτή διαπιστώνεται συχνότερα στη βιβλιογραφία που αναζητήθηκε σε περιπτώσεις άλλων βιομηχανικών κλάδων ωστόσο στη συγκεκριμένη περίπτωση εκτιμάται ότι δεν είναι εκτεταμένη. Η μέθοδος τροποποιημένη με ασαφή λογική έχει εφαρμοστεί και σε ένα υπόγειο

ορυχείο φωσφορίτη στο Ιράν (Shariati, 2014) ωστόσο σε αυτή την περίπτωση δεν χρησιμοποιείται μία χωρική κατανομή της διακινδύνευσης των γεωυλικών αλλά πραγματοποιείται μία στατιστική διερεύνηση των αστοχιών.

Μία άλλη κατηγορία έργων που έχουν μελετηθεί και αφορούν την αστοχία γεωυλικών είναι οι σήραγγες και τα σχετιζόμενα με αυτές υπόγεια έργα. Οι Rafie και Samimi Namin (2015) και οι Amini και Fazelinia (2018) μελετούν με τη μέθοδο αυτή τις καθιζήσεις για δύο σταθμούς του υπόγειου σιδηρόδρομου της Τεχεράνης και στη δεύτερη εργασία τα γεωμηχανικά χαρακτηριστικά μίας οδικής σήραγγας. Τόσο στην πρώτη όσο και στη δεύτερη περίπτωση αν και υπάρχει μία ξεκάθαρη σύνδεση των γεωυλικών με τη διακινδύνευση αυτή δεν εμφανίζει κάποια σαφή χωρική συνέχεια. Τέλος πρέπει να σημειωθεί ότι σε όλες τις περιπτώσεις που αφορούν την «αστοχία» των γεωυλικών, ο χαρακτηρισμός τους με τη διακινδύνευση πραγματοποιείται με ένα εμπειρικό τρόπο διακριτά και όχι με ένα συνεχή και αιτιοκρατικό τρόπο.

Από αυτή τη βιβλιογραφική ανασκόπηση γίνεται κατανοητό ότι η μέθοδος είναι κατάλληλη για την επίτευξη των στόχων που έχουν τεθεί. Βέβαια σε καμία εφαρμογή δεν διαπιστώθηκε ταυτόχρονα το σύνολο των απαιτήσεων του εξεταζόμενου συστήματος και πιο συγκεκριμένα την εκ των προτέρων εκτίμηση της διακινδύνευσης, την εφαρμογή σε υλικά και διαδικασίες τη χρήση της ανιχνευσιμότητας και την παραγωγή προτάσεων για τη βελτίωση του συστήματος.

### **3.3. Διαδικασία υλοποίησης της μεθόδου FMECA**

Η ανάλυση των επιπτώσεων των κρίσιμων τρόπων αστοχίας, που αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία ως Failure mode, effects and criticality analysis (FMECA) περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα όπως αναλύει ο Clifton (2005):

- A. Καθορισμός του συστήματος και κατασκευή των διαγραμμάτων των υποσυστημάτων ή των μερών που το απαρτίζουν (block diagrams).
- B. Σχεδιασμός της FMECA.
- Γ. Επιλογή της ομάδας εργασίας.
- Δ. Απόκτηση των δεδομένων.
- E. Υλοποίηση της FMECA.
- ΣΤ. Προτάσεις για διορθωτικά μέτρα.
- Z. Παρακολούθηση διορθωτικών μέτρων.
- H. Παρακολούθηση πηγών κινδύνου.
- Θ. Συμπλήρωση οριστικού πίνακα ανάλυσης FMECA.

Ουσιαστικά η όλη διαδικασία είναι επικεντρωμένη στην ορθή συμπλήρωση ενός πίνακα ανάλυσης FMECA ο οποίος εμπεριέχει το σύνολο των δομικών μονάδων του συστήματος και τα χαρακτηριστικά της αστοχίας τους. Όταν δεν αναλύεται ποιοτικά ή ποσοτικά η κρισιμότητα κάθε δομικής μονάδας και δεν αξιολογείται η δυσκολία για την ανίχνευσή τους τότε η μέθοδος απλοποιείται στην μέθοδο FMEA (Failure mode, effects and analysis).

Το πρώτο βήμα που πρέπει να γίνει είναι να περιγραφεί το σύστημα στο σύνολό του, δηλαδή να κατανοηθούν τα χαρακτηριστικά του συστήματος. Αρχικά περιγράφεται ο γενικός σκοπός του συστήματος, το λεπτομερές σχέδιό του και τα επιδιωκόμενα αποτελέσματα από



την εφαρμογή της μεθόδου. Καθορίζονται τα όρια του «στατικού» συστήματος, η υποδιαίρεση μαζί με τα επίπεδα στην ιεραρχική δομή του, τα στάδια-φάσεις εξέλιξης του αλλά και οι περιβαλλοντικές συνθήκες οι οποίες πρόκειται να επενεργήσουν σε αυτό.

Κάθε επιστημονικός κλάδος και βιομηχανία έχει τις δικές τις ανάγκες ανάλογα με τις απαιτήσεις του εκάστοτε προβλήματος που αντιμετωπίζεται. Για διαφορετικά συστήματα υπάρχουν διαφορετικοί τρόποι προσέγγισης και κατηγορίες της FMECA. Επόμενο βήμα λοιπόν είναι να επιλεχθούν ο ακριβής τύπος της μεθόδου και στη συνέχεια ο τύπος του πίνακα ανάλυσης FMECA η οποία προσεγγίζει με πιο λεπτομερή τρόπο τη δυναμική σχέση μεταξύ των οντοτήτων (συστήματος, υποσυστημάτων, εξαρτημάτων κτλ.) σε αυτή την ιεραρχική δομή.

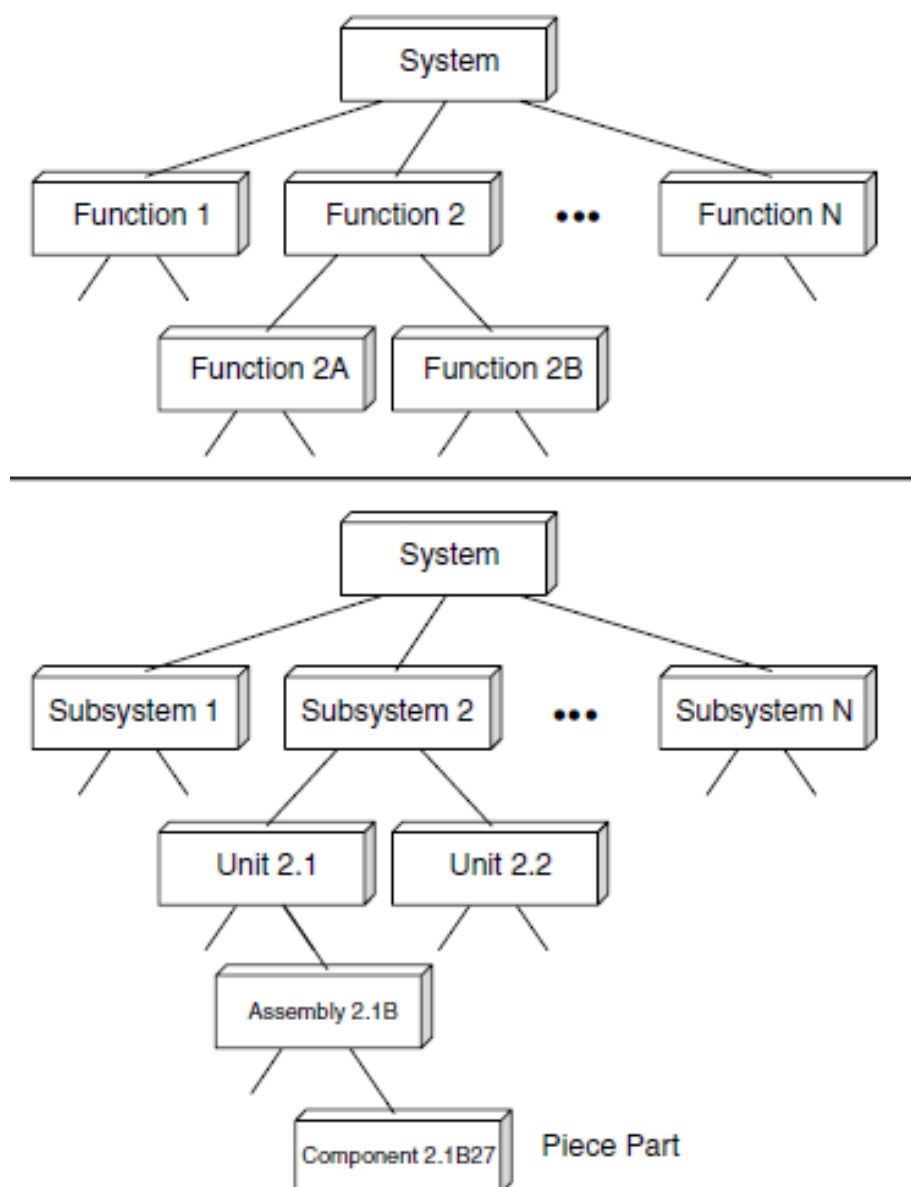
Μία δομική μονάδα του συστήματος μπορεί να «αστοχήσει» αν τα μέσα (υλικά ή άυλα) με τα οποία είναι κατασκευασμένη έχουν ατέλειες (faults) ή αν ο τρόπος με τον οποίο έχει σχεδιαστεί θεωρητικά και προβλέπεται να λειτουργεί δεν έχει τα αναμενόμενα αποτελέσματα και δεν είναι αρκετά κατάλληλος για το σκοπό που επιλέχθηκε σε αυτή τη θέση. Στην πρώτη περίπτωση επιχειρείται μία δομική προσέγγιση (Structural approach) η οποία είναι μία, κυρίως, ποσοτική ανάλυση της αξιοπιστίας των δομικών μονάδων του συστήματος. Στη δεύτερη περίπτωση επιχειρείται μία ανάλυση των λειτουργιών του (Functional approach) η οποία είναι συχνότερα μία ποιοτική ή ημιποσοτική ανάλυση (Σχήμα 3.1). Στην πράξη υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ του προϊόντος, των διαδικασιών παραγωγής του, συντήρησής και τελικής χρήσης του. Επομένως, το σύστημα στην ολότητά του περιλαμβάνει τόσο το ίδιο το προϊόν όσο και τις διαδικασίες παραγωγής δηλαδή καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από παράγοντες οι οποίοι περιέχουν αβεβαιότητα. Σε κάθε περίπτωση σπάνια απαιτείται μία τόσο ενδελεχής ανάλυση ώστε κάθε εξάρτημα του συστήματος να ερευνηθεί διεξοδικά με μία υβριδική προσέγγιση. Αυτό δεν συμβαίνει απαραίτητα σε διαφορετικά υποσυστήματα ή σύνθετα εξαρτήματα του συστήματος στα οποία πιθανόν να απαιτείται μία καλύτερη ανάλυση είτε μόνο με μία εκ των δύο είτε και με τις δύο προσεγγίσεις με αποτέλεσμα να δημιουργούνται υβριδικές μέθοδοι.

Από αυτές τις υβριδικές μεθόδους, δύο συναντώνται συχνότερα και έχουν επικρατήσει. Η πρώτη περίπτωση αφορά ένα προϊόν (Product FMECA) είτε αυτό είναι άυλο (λογισμικό) είτε υλικό και η δεύτερη μία διαδικασία (Process FMECA), η διαφοροποίηση στη δεύτερη περίπτωση έγκειται στο ότι στη διαδικασία αυτή υπεισέρχεται ο ανθρώπινος παράγοντας και άλλοι στοχαστικοί παράγοντες, οι οποίοι εισάγουν αβεβαιότητα στο σύστημα και διαταράσσουν την ιεραρχική δομή. Μπορεί να αφορά τη διαδικασία της παραγωγής αυτού του συστήματος, τη διαδικασία συντήρησης, και τη διαδικασία αξιολόγησης από τον τελικό χρήστη (Σχήμα 3.2).

Στην περίπτωση που η συμμετοχή του ανθρώπινου παράγοντα είναι σημαντική τότε η διαδικασία ονομάζεται human factor Process FMECA (HF-PFMECA) ή human FMECA (HFMECA) και απαιτείται μία ειδική διαδικασία για το προσδιορισμό της πιθανότητας καθώς υπεισέρχονται συμπεριφορικοί παράγοντες. Σε αυτού του τύπου τις αναλύσεις κάθε εργασία (Task) πρέπει να είναι καλά διαχωρισμένη από τις υπόλοιπες και τα σφάλματα πρέπει να οριστούν με σαφήνεια (Mei Rong et al., 2008). Παρά το ότι είναι δυσκολότερο να πραγματοποιηθούν τέτοιες μελέτες υπάρχουν έρευνες όπως των Shi et al. (2015), των Shirani και Demichela (2015) και των Chandler et al. (2011, 2007) οι οποίοι χρησιμοποιούν τη μέθοδο για την εκτίμηση της διακινδύνευσης τέτοιων συστημάτων. Αντίστοιχα κατά την εκτίμηση της διακινδύ-

νευσης για τη χρήση ενός λογισμικού επειδή υπεισέρχεται κατά τη λειτουργία του ο ανθρώπινος παράγοντας δεν είναι πάντα σαφές αν οι δομικές του μονάδες αναλύονται με τη δομική προσέγγιση ή τμήματα διαδικασιών προσεγγίζονται λειτουργικά.

Αφού επιλεγεί η κατηγορία της μεθόδου, το υπό μελέτη σύστημα αναλύεται συνήθως σε τρεις με τέσσερις διαφορετικές ιεραρχικές οντότητες ανάλογα με την πολυπλοκότητά του. Η πρώτη είναι τα υποσυστήματα του, η επόμενη/ες τα σύνθετα εξαρτήματα και τελικά οι δομικές μονάδες που αποτελούν τις στοιχειώδεις οντότητες (Σχήμα 3.1). Αυτός ο κάθετος τρόπος υποδιαίρεσης καθορίζει και τα ιεραρχικά επίπεδα του συστήματος. Συνεπώς ένα σύστημα με τρεις διαφορετικές οντότητες, συστήνεται από υποσυστήματα, το κάθε ένα από τα οποία έχει σύνθετα εξαρτήματα. Κάθε ένα σύνθετο εξάρτημα έχει τουλάχιστον δύο δομικές μονάδες.



Σχήμα 3.1: Λειτουργική (πάνω) και δομική (κάτω) προσέγγιση, διακρίνονται επίσης το επίπεδο ανάλυσης και τα ιεραρχικά επίπεδα. Τροποποιημένη από τον Clifton (2005).

Είδος προσέγγισης	Δομική		Λειτουργική	
			Υβριδική	
Είδος συστήματος	Προϊόν	<ul style="list-style-type: none"> <li>Εξάρτημα: Ηλεκτρικό, μηχανικό κτλ.</li> <li>Λογισμικό</li> </ul>	Διαδικασία	<ul style="list-style-type: none"> <li>Παραγωγή: Χημική, μηχανική κτλ.</li> <li>Συντήρηση: Αρχαιοθέτηση διαδικασιών, έλεγχος, εκπαίδευση κτλ.</li> <li>Τελική χρήση: Αρχαιοθέτηση διαδικασιών, αλληλεπίδραση με τον άνθρωπο, εκπαίδευση κτλ.</li> </ul>

Σχήμα 3.2: Δυνατές περιπτώσεις ανάλυσης του συστήματος με τη μέθοδο FMECA, ένα προϊόν ή μία διαδικασία αναλύεται είτε βάσει των δομικών του μονάδων είτε βάσει των λειτουργιών του.

Κάθε σύστημα έχει τις δικές του ιδιαιτερότητες και απαιτείται διαφορετικό επίπεδο ανάλυσης σύμφωνα με τους στόχους που έχουν τεθεί, η τελευταία δομική μονάδα στην οποία ολοκληρώνεται η ανάλυση ορίζει αυτό το επίπεδο ανάλυσης το οποίο σε κάθε σύστημα είναι διαφορετικό. Ορισμένοι παράγοντες που ορίζουν το επίπεδο ανάλυσης είναι η φάση ανάπτυξης του συστήματος, το είδος του, η επιδιωκόμενη ακρίβεια και τα διαθέσιμα δεδομένα τα οποία γενικότερα περιγράφονται από την υπάρχουσα αβεβαιότητα.

Κριτήριο επιλογής αυτού του επιπέδου είναι η ελαχιστοποίηση της αβεβαιότητας της ανάλυσης η οποία ακολουθεί. Γι' αυτό πρέπει να δίνεται η δέουσα προσοχή στη διαίρεση του συστήματος ώστε η ανάλυση που ακολουθεί να είναι απλούστερη. Επομένως το επίπεδο αυτό δεν είναι απαραίτητο να είναι ενιαίο σε όλα τα μέρη του συστήματος, έτσι όταν εκτιμάται ότι δεν υπάρχει ανάγκη, ή δεν είναι δυνατή μία πιο λεπτομερής ανάλυση σε ένα τμήμα του συστήματος αυτή σταματά εκεί. Για παράδειγμα σε ένα σύστημα αποτελούμενο μεταξύ άλλων από ένα λαμπτήρα τύπου LED (Light emitted diode) (δομική μονάδα), αν επιδιώκεται μεγαλύτερη λεπτομέρεια για την ανάλυση της αξιοπιστίας του λαμπτήρα μπορεί αυτή να διαιρεθεί περαιτέρω στις διόδους, στα ολοκληρωμένα κυκλώματα και άλλα στοιχεία από τα οποία αποτελείται.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η ανάλυση του τρόπου αστοχίας γίνεται αντίθετα από την ιεραρχική δομή του συστήματος (από κάτω προς τα πάνω), δηλαδή από τη δομική μονάδα η ανάλυση καταλήγει στο σύνολο του συστήματος.

Ανάλογα με το είδος της προσέγγισης της μεθόδου και για συγκεκριμένα συστήματα υπάρχουν διαφορετικά πρότυπα πινάκων ανάλυσης κατάλληλα για τη συγκεκριμένη ανάλυση με σκοπό να την απλοποιήσουν. Η διαφοροποίηση σχετίζεται με τη βιομηχανία στην οποία εφαρμόζεται η μέθοδος ενώ, υπάρχουν και γενικότερα πρότυπα-οδηγοί όπως το MIL-STD-1629 (United States Department of Defense, 1980) και το ISO 9001:2001. Πολλές φορές αυτά τροποποιούνται ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής καθώς είναι αδύνατο να περιγραφεί η ευελιξία και οι δυνατότητες της μεθόδου από ένα ή δύο υπάρχοντα πρότυπα. Συνεπώς αυτά τα πρότυπα αποτελούν άτυπα γενικούς κανόνες-οδηγίες για την εφαρμογή της μεθόδου σε συστήματα ελαφρώς έως αρκετά διαφοροποιημένα στα οποία η μέθοδος δεν εφαρμόζεται πολύ συχνά ώστε να απαιτείται η δημιουργία ξεχωριστού προτύπου.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η μέθοδος χρησιμοποιείται από τη βιομηχανία ωστόσο δεν υπάρχουν πολλές λεπτομερείς μελέτες με δημόσια πρόσβαση, διότι τέτοια βιομηχανικά έγγραφα είναι συνήθως διαβαθμισμένα. Επίσης, όσον αφορά την εξορυκτική βιομηχανία σπάνια υπάρχουν αναλυτικά δεδομένα που διευκολύνουν τέτοιες αναλύσεις διότι αφενός υπεισέρχονται σε

μεγάλο βαθμό ανθρώπινες εργασίες στο ύπαιθρο οι οποίες δεν είναι εύκολο να ελέγχονται συστηματικά, αφετέρου οι εργασίες αυτές δεν είναι επαναλαμβανόμενες όπως στην περίπτωση μιας βιομηχανίας κατασκευής μηχανολογικού εξοπλισμού.

Επόμενο βήμα είναι η επιλογή κατάλληλης ομάδας ειδικών. Στα μέλη της ομάδας δίνονται συγκεκριμένες αρμοδιότητες και η επιλογή τους γίνεται ώστε οι γνώσεις τους να καλύπτουν, όσο το δυνατόν, περισσότερα διαφορετικά τμήματα του συστήματος. Σημαντική είναι επίσης και η αλληλοεπικάλυψη γνώσεων προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα υποκειμενικών επιλογών κατά τη συμπλήρωση του πίνακα ανάλυσης. Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η καταγραφή των ιδεών σε μία σύσκεψη καθορίζει πολλές φορές το αποτέλεσμα και πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή. Σαφέστατα μία πολυπληθής ομάδα είναι αναγκαία για να ελαχιστοποιήσει την υποκειμενικότητα του συστήματος ωστόσο η σύστασή της είναι δαπανηρή. Έτσι ένα άτομο ή μία ολιγομελής ομάδα μπορεί να δημιουργήσει μία επαρκή εικόνα του συστήματος αν δεν υπάρχουν οι κατάλληλοι πόροι ειδικά, για συστήματα τα οποία δεν αναλύονται εκ των προτέρων.

Προκειμένου να μετρηθεί η μεταβλητότητα που οφείλεται στην υποκειμενικότητα που εισάγεται από τον μελετητή-ερευνητή, πραγματοποιήθηκε μία πειραματική έρευνα (Banghart et al., 2016) στην οποία διαφορετικοί εθελοντές, μελέτησαν ατομικά τρία διαφορετικά συστήματα με τη μέθοδο FMECA. Παρά το ότι παρατηρήθηκε ότι όταν δεν υπήρχαν επαρκή δεδομένα δημιουργούνταν η τάση να υποτιμηθεί η σημαντικότητα και έτσι τα μέτρα ανάληψης δράσης να είναι ελλιπή, δεν διαπιστώθηκαν λόγοι που να συνηγορούν ότι δεν μπορεί μόνο ένας ερευνητής να πραγματοποιήσει τέτοιες εκτιμήσεις με επαρκή ακρίβεια για ορισμένα συστήματα.

Ιδιαίτερη προσοχή είναι σημαντικό να δοθεί κατά την αναζήτηση και απόκτηση των δεδομένων η οποία είναι μία συνεχής διαδικασία κατά την εφαρμογή της μεθόδου. Αρχικά για να πραγματοποιηθούν τα προηγούμενα βήματα πρέπει να υπάρχουν κάποια αρχικά δεδομένα ενώ κατά τις αναθεωρήσεις ίσως απαιτηθούν περισσότερα δεδομένα. Σε αυτό το βήμα συλλέγονται όσο το δυνατό λεπτομερέστερα σχέδια και ανακαθορίζονται τα επίπεδα ανάλυσης. Διερευνώνται οι εφικτοί τρόποι αστοχίας και συλλέγονται δεδομένα τόσο περιγραφικά όσο και αριθμητικά για να συμπληρωθεί ο πίνακας ανάλογα με τους στόχους που έχουν τεθεί.

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου καταχωρούνται όλες οι πληροφορίες σε μία βάση δεδομένων (πίνακας ανάλυσης FMECA), υπολογίζεται η διακινδύνευση και ο αριθμός προτεραιότητας (RPN) και τελικά προτείνονται τροποποιήσεις του συστήματος. Αναλυτικότερα τα απαιτούμενα βήματα είναι:

- A. Αναγνώριση των αντικειμένων (δομικών μονάδων) και δημιουργία λίστας με αυτά.
- B. Επαλήθευση της λίστας με το διάγραμμα ροής ώστε να μην παρακαμφθούν βρόγχοι που περιέχουν άλλα αντικείμενα τα οποία δεν έχουν συμπεριληφθούν στη λίστα.
- Γ. Μεταφορά της λίστας στον πίνακα ανάλυσης FMECA.
- Δ. Συμπλήρωση όλων των «ερωτήσεων» στον πίνακα ανάλυσης.
- E. Έλεγχος του πίνακα ανάλυσης από έναν μηχανικό-επιστήμονα με εμπειρία σε παρόμοια συστήματα.

Η διαδικασία αυτή είναι δυναμική και ακολουθεί ολόκληρο τον κύκλο ζωής του συστήματος. Μία δεύτερη επανάληψη της διαδικασίας πραγματοποιείται όταν η αξιολόγηση της κάθε

εξεταζόμενης οντότητας (δομικής μονάδας, εξαρτήματος κτλ.) έχει έναν RPN ο οποίος έχει χαρακτηριστεί ως υψηλής διακινδύνευσης. Σε αυτή την περίπτωση προτείνονται μέτρα επέμβασης ή διορθωτικές δράσεις, οι οποίες εξαρτώνται από τη φάση ανάπτυξης του έργου και από την εκάστοτε παράμετρο της διακινδύνευσης που τροποποιείται και τελικά έχει ως αποτέλεσμα τον επανυπολογισμό του RPN. Οι επιδιορθώσεις που γίνονται στο σύστημα πρέπει να παρακολουθούνται ώστε να συγκρίνονται με τα προβλεπόμενα αποτελέσματα. Το ίδιο πρέπει να γίνει και με την παρακολούθηση των πηγών κινδύνου από τις οποίες προέρχονται οι αστοχίες. Αν υπάρξει επιδείνωση των αποτελεσμάτων τότε ελέγχονται οι τρόποι αστοχίας από την αρχή προκειμένου να αναθεωρηθεί ο πίνακας ανάλυσης ώστε να αντιπροσωπεύει το σύστημα. Το τελικό βήμα είναι να αποτυπωθεί η όλη διαδικασία μετά την αναθεώρηση στον τελικό πίνακα ανάλυσης.

### 3.4. Εκτίμηση διακινδύνευσης με τη μέθοδο FMECA

Η εκτίμηση της διακινδύνευσης πραγματοποιείται μέσω της διαφοροποιημένης έκφρασής της που είναι ο αριθμός RPN και υπολογίζεται ως γινόμενο των τριών παραμέτρων οι οποίοι εκτιμώνται από τα δεδομένα του πίνακα ανάλυσης (Πίνακας 3.1). Αρχικά για να γίνει κατανοητός ο τρόπος αστοχίας πρέπει να κατανοηθεί η έννοια της ατέλειας. Ατέλεια (fault) είναι μία παρέκκλιση στη δομή ή/και τη σύσταση ενός υλικού από τις προδιαγεγραμμένες ή αναμενόμενες τιμές. Η ατέλεια είναι η αναγκαία συνθήκη που σε συνδυασμό με ένα μηχανισμό οδηγούν στην αστοχία. Το γεγονός της αστοχίας (failure) οδηγεί στην αποκλίνουσα συμπεριφορά μιας δομικής μονάδας ενός συστήματος από τις θεσπισμένες προδιαγραφές της λειτουργίας του ή τις αναμενόμενες τιμές ανίχνευσής του. Στην περίπτωση του ανθρώπινου παράγοντα το σφάλμα (mistake) μπορεί να οδηγήσει σε λάθος (error). Αυτή η αποκλίνουσα συμπεριφορά προερχόμενη από την αστοχία ή το σφάλμα μπορεί να είναι:

- A. Πλήρης: Όταν η δομική μονάδα καταστρέφεται πλήρως και πιθανόν εμποδίζει τη λειτουργία του συστήματος, ώστε να είναι απαραίτητη η αντικατάστασή ή η επιδιόρθωσή της.
- B. Μερική-εκτός προδιαγραφών: Όταν η δομική μονάδα λειτουργεί με μειωμένη απόδοση, αποτελεί σημαντική πηγή κινδύνου αλλά δεν εμποδίζει τη λειτουργία του συστήματος.
- Γ. Μερική-διαλείπουσα: Όταν η δομική μονάδα λειτουργεί μεν αλλά όχι με συνεχή τρόπο. Οι διακοπές μπορεί να είναι προβλέψιμες ή στοχαστικές. Ανάλογα την περίπτωση το αντικείμενο πιθανόν να χρειάζεται αντικατάσταση.

Ο τρόπος αστοχίας είναι ο «μηχανισμός» με τον οποίο αστοχεί μία δομική μονάδα και αποτυπώνει μία κατάσταση μετά την αστοχία, η οποία είναι ανιχνεύσιμη. Μερικά παραδείγματα αστοχίας είναι τα παρακάτω:

- 1. Τιμές εκτός ορίων.
- 2. Διάβρωση.
- 3. Ραγισμένο.

Όσον αφορά τον τρόπο αστοχίας συμπληρώνεται στη Στήλη (6) του Πίνακα 3.1 ενώ η πιθανότητα ή ο ρυθμός αστοχίας ή η συχνότητα (occurrence, probability) στη Στήλη (7) και οι τιμές της μπορεί να αντιστοιχούν σε μία ημιποσοτική κλίμακα συνήθως δέκα κλιμάκων ή σε ποσοτικά στατιστικά δεδομένα. Πληροφορίες για τη συμπλήρωση των στηλών μπορούν να ανακτηθούν από ιστορικά δεδομένα, δεδομένα από τον κατασκευαστή, την εμπειρία, δοκιμές ή προσομοιώσεις για το συγκεκριμένο αντικείμενο ή τη διαδικασία. Στην περίπτωση της HF-PFMECA επειδή προκύπτουν με υποκειμενικό τρόπο οι ρυθμοί αστοχίας, απαιτείται μία διαδικασία προσδιορισμού της πιθανότητας του σφάλματος (Human error identification) και εκτίμησης του κινδύνου του (Human risk assessment) (Kirwan, 1992a, 1992b). Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή όταν συγκρίνονται οικονομικές επιπτώσεις με απώλειες οι οποίες σχετίζονται με τον ανθρώπινο παράγοντα διότι ανακύπτουν ηθικά ζητήματα.

Τα αίτια (Στήλη 8) της αστοχίας είναι απαραίτητο να καταγραφούν καθώς βοηθούν στην κατανόηση των τρόπων αστοχίας. Δεν υπάρχει συγκεκριμένη συσχέτιση με τις τρεις παραμέτρους της διακινδύνευσης αλλά αυτές καθορίζονται από τα αίτια. Επίσης πολλοί διαφορετικοί τρόποι αστοχίας μπορεί να έχουν κοινά αίτια οπότε η καταγραφή τους βοηθάει στην καλύτερη απόδοση προτεραιότητας στις δράσεις για την αντιμετώπιση των επιπτώσεων.

Αίτια και επιπτώσεις (Στήλη 9 & 10) τις περισσότερες φορές έχουν μία ισχυρή συσχέτιση, δηλαδή συγκεκριμένα αίτια οδηγούν συχνά σε συγκεκριμένου είδους αστοχίες, συνεπώς και επιπτώσεις στο σύστημα. Οι επιπτώσεις διαχωρίζονται με βάση την οντότητα όπου αναφέρονται. Οι άμεσες ή τοπικές επιπτώσεις (Στήλη 9) αφορούν τη συγκεκριμένη δομική μονάδα που αναλύεται και μπορεί να είναι η καταστροφή, η μερική λειτουργία, η διαρροή ρευστών κτλ. Σε ορισμένους πίνακες ανάλυσης FMECA όπως αυτός που παρουσιάζεται, δεν διαχωρίζονται οι επιπτώσεις στο αμέσως επόμενο πιο σύνθετο εξάρτημα κάτι το οποίο είναι απαραίτητο όταν αναλύονται πολύ σύνθετα και μεγάλα συστήματα. Οι υπόλοιπες επιπτώσεις αφορούν το σύνολο του συστήματος (Στήλη 10) και είναι εκείνες που συνεισφέρουν περισσότερο στην μέτρηση της σοβαρότητας της διακινδύνευσης. Αυτό είναι πρόδηλο καθώς όσο πιο σύνθετο είναι ένα εξάρτημα τόσο πιο δύσκολα επιδιορθώνεται και είναι μεγαλύτερη η αξία του. Πολλές φορές οι έμμεσες επιπτώσεις μίας αστοχίας παράγουν επιπρόσθετες πηγές κινδύνου (Στήλη 13). Αυτές οι πηγές κινδύνου σε συνδυασμό με τη λειτουργία ενός συγκεκριμένου μηχανισμού προκαλούν νέες αστοχίες με άλλο τρόπο στις οντότητες του συστήματος και τελικά προκύπτουν νέες έμμεσες επιπτώσεις. Η καταγραφή του συνόλου των επιπτώσεων είναι σημαντική για τη μετέπειτα παρακολούθηση και επιδιόρθωση του συστήματος.

Η εποπτεία και επιδιόρθωση (Στήλες 11,12,15) αφορά όλες εκείνες τις παραμέτρους για την παρακολούθηση της συμπεριφοράς των δομικών μονάδων του συστήματος καθώς και τους υπάρχοντες ή προτεινόμενους τρόπους επέμβασης-διορθωτικές δράσεις σε αυτό.

Η μέθοδος ανίχνευσης (Στήλη 11) εισάγεται για να παρουσιάσει τον τρόπο ανίχνευσης της αστοχίας αφού αυτή συμβεί και πριν προξενήσει κάποια σοβαρή επίπτωση. Στη διατριβή αυτή το κύριο χαρακτηριστικό είναι το δεύτερο, έτσι αν έχουν εγκατασταθεί διατάξεις οι οποίες καταγράφουν τις μεταβολές στη δομή των υλικών και ειδικότερα των γεωυλικών ο τρόπος ανίχνευσης μπορεί να αναφέρεται και πριν την πραγματοποίηση της αστοχίας. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η κόπωση των εξαρτημάτων του καδοτροχού και η ανίχνευση σκληρών σχηματισμών εντός του μετώπου.

Ανάλογα με την προσέγγιση, τον τύπο του πίνακα ανάλυσης και τον τρόπο υπολογισμού της διακινδύνευσης, υπολογίζεται ή όχι η ανιχνευσιμότητα της αστοχίας συνεπώς τότε είναι σημαντική η γνώση της μεθόδου ανίχνευσης. Σε αντίθεση με τη σοβαρότητα και την πιθανότητα της αστοχίας, η ανιχνευσιμότητα αν δεν εκτιμηθεί σωστά δεν επηρεάζει την πραγματική διακινδύνευση αλλά την υπολογιζόμενη. Έτσι με τη λανθασμένη ανιχνευσιμότητα είτε υπερεκτιμάται είτε υποεκτιμάται η πραγματική αστοχία τόσο όσον αφορά τη συχνότητά της όσο και την έντασή της. Αυτό τελικά, φαινομενικά, κάνει την αστοχία να εμφανίζεται πιο σπάνια και πιο συχνά αντίστοιχα. Αλλαγή στην πραγματική διακινδύνευση προκαλείται μόνο αν ληφθεί κάποιο μέτρο διόρθωσης με βάση τη λανθασμένη ανιχνευσιμότητα με αποτέλεσμα είτε να είναι υπερβολικά προστατευτικά τα μέτρα είτε να μην επαρκούν για την επίτευξη της επιθυμητής πραγματικής διακινδύνευσης.

Τα υπάρχοντα μέτρα ελέγχου (Στήλη 12) αφορούν τα μέτρα που έχουν ληφθεί προκειμένου να προληφθεί η αστοχία ή αν συμβεί τα μέτρα που μετριάζουν τις επιπτώσεις της. Σκοπός τους είναι να μειώσουν τη σοβαρότητα μίας επίπτωσης ή την ελάττωση της συχνότητας εμφάνισής της. Άρα η σοβαρότητα και η πιθανότητα είναι διορθωμένες σύμφωνα με τα υπάρχοντα μέτρα πρόληψης και μετριασμού των επιπτώσεων. Συνήθως δεν υπάρχει στήλη που να δείχνει ποια ήταν η σοβαρότητα πριν την εφαρμογή τους.

Τα προτεινόμενα μέτρα δράσης (Στήλη 15) είναι όλα εκείνα τα μέτρα που μπορούν να τροποποιήσουν το σύστημα ώστε να αναθεωρηθεί η τιμή του RPN. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων η αναθεωρημένη τιμή είναι μικρότερη από την αρχική αφού τα μέτρα δράσης μειώνουν τις παραμέτρους του RPN. Ωστόσο σε περιπτώσεις που διερευνάται η τροποποίηση των δομικών μονάδων του συστήματος η αλλαγή αυτή πιθανόν να μην οδηγήσει σε καλύτερα αποτελέσματα και τελικά να μειώσει την ασφάλεια του συστήματος, τότε η τροποποίηση δεν υλοποιείται.

Σε αυτό το σημείο είναι χρήσιμο να γίνουν μερικές επισημάνσεις σχετικά με τον εντοπισμό του τρόπου αστοχίας και την επιλογή της προσέγγισης και του επιπέδου ανάλυσης στο σύστημα.

Όταν αναλύονται διαδικασίες των οποίων οι δομικές μονάδες εμπεριέχουν παράγοντες μεγαλύτερης αβεβαιότητας τα συστήματα δεν ακολουθούν μία καλώς ορισμένη ιεραρχική δομή και το επίπεδο ανάλυσης είναι χαμηλό. Σε αυτά τα συστήματα δεν υπάρχουν προκαθορισμένοι τρόποι αστοχίας και αυτοί είναι βασισμένοι σε πιο υποκειμενικά κριτήρια των στοχαστικών παραγόντων. Συνακόλουθα γίνεται ιδιαίτερα περίπλοκη και εκτεταμένη η ανάλυση ενώ τα αποτελέσματα είναι συγκεχυμένα.

Σε τέτοιες εφαρμογές μίας περισσότερο λειτουργικής ανάλυσης διαφορετικές αιτίες μπορεί να ευθύνονται για ίδιους τρόπους αστοχίας και τελικά για διαφορετικές συνέπειες. Σε αντιδιαστολή παρατίθεται ο τρόπος δομικής ανάλυσης κατά τον οποίο ένα αντικείμενο έχει έναν αντικειμενικά καθορισμένο τρόπο αστοχίας ο οποίος οφείλεται σε δύο-τρεις αιτίες και οδηγεί σε συγκεκριμένες συνέπειες.

Στα συστήματα με υψηλότερη αβεβαιότητα σε μία δομική μονάδα οι τρόποι αστοχίας και τα στοιχεία του πίνακα ανάλυσης (αιτίες, συνέπειες κτλ.) δεν συσχετίζονται εύκολα. Συνεπώς μπορεί να υπάρξουν ταυτόχρονα πολλές αιτίες αστοχίας, επιπτώσεις (έμμεσες ή/και άμεσες), μέθοδοι ανίχνευσης, υπάρχοντα μέτρα ελέγχου, πηγές κινδύνου, προτεινόμενα μέτρα δράσης

κτλ. Δηλαδή μία αστοχία μπορεί να συμβεί από μία αλληλουχία ή συνδυασμό γεγονότων και όχι από μία αιτία μόνο. Οι επιπτώσεις μπορεί να είναι πολλές και διαφορετικές και να επιδρούν με διαφορετικό τρόπο η κάθε μία στη σοβαρότητα. Επίσης διαφορετικά μέτρα ελέγχου, για την ίδια αστοχία, έχουν διαφορετική επίπτωση στη σοβαρότητα, την ανιχνευσιμότητα κτλ.

Σε αυτές τις περιπτώσεις όσον αφορά το επίπεδο ανάλυσης και τα στοιχεία του πίνακα ανάλυσης είναι στην ευχέρεια του αναλυτή η επιλογή της δημιουργίας νέας ή περισσότερων νέων καταχωρήσεων με το ίδιο αντικείμενο ή/και αυτό να διασπαστεί σε απλούστερα ώστε να εισαχθούν αυτές τις διαφοροποιήσεις και να αναλυθεί με μεγαλύτερη λεπτομέρεια ο εκάστοτε τρόπος αστοχίας.

Σε περίπτωση όπου σε μία γραμμή του πίνακα καταχωρηθούν πολλές αιτίες, επιπτώσεις κτλ., λαμβάνονται υπόψη συνδυαστικές συνέργειες και το αποτέλεσμα είναι πιο αντιπροσωπευτικό αλλά λιγότερο σαφή τα τρωτά του σημεία. Όταν όμως το ίδιο αντικείμενο χωρίζεται σε πολλά ίδια τότε είναι πιο ευκρινές το σημείο που πρέπει να γίνει η επέμβαση και ποια αποτελεί την πιο αποτελεσματική επέμβαση. Ωστόσο είναι δυσκολότερη η ανάλυση γιατί πρέπει να ληφθούν υπόψη πιθανές συνέργειες που ανακύπτουν. Αν δεν συμβεί αυτό δημιουργείται μεροληψία στην αναθεώρηση της διακινδύνευσης. Μία τέτοια συμπεριφορά συνήθως υποδηλώνει ότι το υπό μελέτη εξάρτημα είναι σύνθετο και περιέχει πιο απλές δομικές μονάδες οι οποίες δεν έχουν αποτυπωθεί στο διάγραμμα ροής.

Αν η ανάλυση δεν γίνει στις βασικές μονάδες ενώ υπάρχουν τα απαιτούμενα δεδομένα τότε για έναν τρόπο αστοχίας θα υπάρχουν πολλές αιτίες και συνέπειες ταυτόχρονα. Οι παράμετροι της διακινδύνευσης θα είναι συνισταμένη, πιθανότατα μη γραμμική, των διακινδυνεύσεων των απλούστερων εξαρτημάτων. Αναλύοντας το σύστημα με αυτό τον φαινομενικά «μη βέλτιστο» τρόπο ή συνθέτοντάς το εκ νέου, εμφανίζονται διαφορετικού τύπου «κρυμμένοι» τρόποι αστοχίας. Καθίσταται έτσι εφικτό να αξιολογηθούν συνέργειες οι οποίες ήταν αδύνατο διακριθούν στις «εξατομικευμένες» αναλύσεις της κάθε δομικής μονάδας ακόμα και σε αυστηρά ιεραρχικά δομημένα συστήματα.

Μία σημαντική παρατήρηση για την ανάλυση συνθετότερων ή απλούστερων εξαρτημάτων είναι ότι ο τρόπος αστοχίας μίας οντότητας είναι η αιτία αστοχίας για την αμέσως συνθετότερη και ταυτόχρονα η επίπτωση από την αστοχία της κατώτερης ιεραρχικά ή απλούστερης οντότητας. Τελικά από την ανάλυση των αστοχιών των οντοτήτων μπορούν να συντεθούν οι επιπτώσεις στο σύνολο του συστήματος.



Πίνακας 3.1: Πίνακας ανάλυσης FMECA όπως συνήθως συναντάται στη βιβλιογραφία.

Σύστημα: (1)				Υποσύστημα: (2)				Φάση ανάπτυξης: (3)			
A/A	Αντικείμενο	Τρόπος αστοχίας	Ρυθμός αστοχίας	Αιτία αστοχίας	Άμεση επίπτωση	Επίπτωση στο σύστημα	Μέθοδος ανίχνευσης	Υπάρχον μέτρο ελέγχου	Πηγή κινδύνου	RPN	Προτεινόμενο μέτρο δράσης
(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)

1. Ονομασία του συστήματος που αναλύεται.
2. Ονομασία του υποσυστήματος που αναλύεται.
3. Φάση ανάπτυξης του έργου (ερευνητική, δοκιμαστική (πilotική), φάση ανάπτυξης κτλ.).
4. Αριθμός του αντικειμένου που αναλύεται και συνήθως αύξων αριθμός.
5. Ονομασία του αντικειμένου που αναλύεται.
6. Τρόπος αστοχίας του αντικείμενο.
7. Ρυθμός ή πιθανότητα αστοχίας ενός τρόπου αστοχίας.
8. Αιτίες του τρόπου αστοχίας.
9. Άμεση ή τοπική επίπτωση, το πολύ μέχρι το επόμενο πιο σύνθετο εξάρτημα.
10. Επίπτωση της αστοχίας στο σύνολο του συστήματος.
11. Μέθοδος ανίχνευσης της αστοχίας αφού αυτή έχει συμβεί και πριν προξενήσει προβλήματα στο υπόλοιπο σύστημα.
12. Υπάρχοντες τρόποι αποτροπής δημιουργίας της αστοχίας αλλά και μέτρα μετριασμού των επιπτώσεων.
13. Πηγές κινδύνου που εμφανίζονται λόγω της ύπαρξης της αστοχίας.
14. Υπολογισμός της διακινδύνευσης ή του RPN.
15. Μέτρα ανάληψης δράσης για την πρόληψη και τον μετριασμό των επιπτώσεων.

Πίνακας 3.2: Ποιοτική κλίμακα για τη σοβαρότητα και τον ρυθμό αστοχίας.

<u>Σοβαρότητα επιπτώσεων αστοχίας:</u>	<u>Ρυθμός αστοχίας:</u>
1. Καταστροφική.	A. Συχνός.
2. Σημαντική.	B. Πιθανός.
3. Ενδιάμεση.	Γ. Περιστασιακός.
4. Μικρή.	Δ. Σπάνιος.
5. Αμελητέα.	E. Απίθανος.

Αφού έχουν προσδιοριστεί οι τρεις παράμετροι, ο υπολογισμός της διακινδύνευσης και στη συνέχεια του RPN επιτυγχάνεται με τον πολλαπλασιασμό τους. Καθώς τα αρχικά δεδομένα, ανάλογα με τη γνώση της κάθε παραμέτρου, ποικίλουν από ποιοτικά έως ποσοτικά η διακινδύνευση μπορεί να αποκτήσει χαρακτήρα από αρκετά εμπειρικό έως αυστηρά «τεχνικό», να γίνει δηλαδή με τρόπο ποιοτικό, ημιποσοτικό ή ποσοτικό. Η ενδιάμεση περίπτωση είναι η πιο συνηθισμένη καθώς για ένα σύστημα δεν υπάρχουν αναλυτικά δεδομένα. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται κλίμακες συνήθως από το 5 έως το 10 που περιγράφουν τα συστήματα με εμπειρική εκτίμηση σε ημιποσοτική κλίμακα. Το άνω φράγμα της τιμής αυτού του αριθμού βάσει των παραπάνω κλιμάκων μπορεί να είναι από 125 έως 1000.

Ο αριθμός αυτός αποτελεί ουσιαστικά μία προσέγγιση της διακινδύνευσης διότι ανάλογα με την ακρίβεια της ανιχνευσιμότητας προσεγγίζεται με μεγαλύτερη ακρίβεια η πραγματική διακινδύνευση. Αυτός ο αριθμός δεν βοηθά στην εκτίμηση της ασφάλειας του συστήματος με ποιοτικό τρόπο (Clifton, 2005). Όταν απαιτείται τέτοιου είδους ανάλυση χρησιμοποιείται μία ποιοτική κλίμακα για τον χαρακτηρισμό του κόστους και της πιθανότητας της αστοχίας (Πίνακας 3.2), χωρίς τον υπολογισμό της ανιχνευσιμότητας.

Αν υπάρχουν αναλυτικά αριθμητικά δεδομένα για τους ρυθμούς αστοχίας των δομικών μονάδων, οι αριθμητικές τιμές δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα για σύγκριση με τις άλλες παραμέτρους (σοβαρότητα και ανιχνευσιμότητα). Τότε προστίθεται ένα επιπλέον βήμα, η ανάλυση κρισιμότητας (criticality analysis) το οποίο είναι μία έκφραση γινομένου της σοβαρότητας και της πιθανότητας. Η προσθήκη αυτή έχει στόχο αφενός, να δημιουργήσει μία ημιποσοτική κλίμακα αφετέρου, να βρεθούν οι πιο σημαντικές δομικές μονάδες του συστήματος. Η αναλυτική παρουσίαση της μεθοδολογίας ξεφεύγει από τον σκοπό αυτής της διατριβής. Πρέπει να σημειωθεί ότι σε αυτή την μεθοδολογία οφείλεται η αρχική ονομασία της μεθόδου FMECA. Η παραλλαγή της μεθόδου με τη χρήση της ανιχνευσιμότητας αποτελεί μία απλοποίηση ώστε να χρησιμοποιούνται πιο «μαλακά» δεδομένα, κάτι το οποίο έχει δώσει τη δυνατότητα να διαδοθεί ευρέως η μέθοδος σε πολλούς κλάδους, ιδιαίτερα για την εκ των υστέρων εκτίμηση της διακινδύνευσης. Οι δύο αυτές μεθοδολογίες δεν σχετίζονται ευθέως παρόλα αυτά αναφέρονται βιβλιογραφικά και οι δύο με την ονομασία FMECA.

Το επίπεδο διακινδύνευσης που είναι αποδεκτό όπως και σε όλες τις μεθόδους εκτίμησης διακινδύνευσης δεν είναι προκαθορισμένο. Ανάλογα με τις προδιαγραφές ασφάλειας κάθε εφαρμογής επιλέγονται διαφορετικά όρια, γι' αυτό δεν είναι δυνατό να προκαθοριστούν όρια με βάση τις μέγιστες δυνατές τιμές. Αυτά μπορεί να αφορούν τόσο μεμονωμένες παραμέτρους, τον συνδυασμό δύο, τη διακινδύνευση ή και κάποιο συνδυασμό των προηγούμενων.

## **Κεφάλαιο 4ο: Καθορισμός του συστήματος βάσει των αναγκών της μεθόδου FMECA**

Στο Κεφάλαιο 2 αναλύθηκε ο τρόπος με τον οποίο το σύστημα μπορεί να παρουσιαστεί ως διαδικασία (λειτουργική προσέγγιση) και στο Κεφάλαιο 3 ο τρόπος εφαρμογής της FMECA. Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται το εξεταζόμενο σύστημα ως διαδικασία η οποία περιέχει και υλικά εξαρτήματα με σκοπό την ανάλυσή της σε πραγματικό χρόνο βάσει των αναγκών της FMECA.

Πιο συγκεκριμένα στην Ενότητα [4.1] παρουσιάζονται τα γεωλογικά χαρακτηριστικά και κυρίως οι ηλεκτρικές ιδιότητες των σχηματισμών της περιοχής μελέτης με τις οποίες σχετίζονται οι αστοχίες και ταυτόχρονα είναι η αφετηρία ανάλυσης του συστήματος. Στην Ενότητα [4.2] παρουσιάζεται ο τρόπος επιλογής της διαμέρισης του συστήματος για να είναι συμβατός με τη μέθοδο FMECA.

Στις επόμενες τρεις ενότητες παρουσιάζεται το σύστημα αναλυτικά με βάση τις τρεις δομές που παρουσιάζονται και ταυτόχρονα αναλύονται τα προβλήματα που σχετίζονται με την κάθε αστοχία ξεχωριστά ώστε να κατανοηθεί η ακριβής δομή του συστήματος. Στην Ενότητα [4.3] περιγράφονται οι παράμετροι και οι αστοχίες του τελευταίου υποσυστήματος. Αυτές αφορούν κυρίως τα προβλήματα τα οποία προκύπτουν κατά την εξόρυξη όταν τύχει ένας σκληρός σχηματισμός. Στην Ενότητα [4.4] περιγράφονται το τρίτο και το δεύτερο υποσύστημα. Το τρίτο αφορά την αυτοματοποίηση του σταδίου της λήψης αποφάσεων όπου χρησιμοποιείται η μέθοδος FMECA. Το δεύτερο υποσύστημα σχετίζεται με την αυτοματοποίηση της πρόβλεψης, δηλαδή τον τρόπο με τον οποίο οι μετρούμενες τιμές χρησιμοποιούνται για να αποκτήσουν νόημα στον χώρο και στον χρόνο. Στην Ενότητα [4.5] παρουσιάζεται το πρώτο υποσύστημα και αναλύονται οι επιδράσεις από τα γεωυλικά, τη διάταξη και τις παραμέτρους εξόρυξης και εκμετάλλευσης στις μετρούμενες τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

Η αντίστροφη παρουσίαση επιλέχθηκε ώστε να παρουσιαστεί πρώτα η μέθοδος εξόρυξης και εκμετάλλευσης (τέταρτο υποσύστημα) η οποία καθορίζει τον τρόπο καταγραφής των τιμών αγωγιμότητας ο οποίος αποτελεί το πρώτο υποσύστημα και παρουσιάζεται τελευταίο.

### **4.1. Οι ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες και η περιγραφή της γεωλογίας της περιοχής μελέτης**

Στις επόμενες υποενότητες γίνεται μία προσπάθεια παρουσίασης της επιρροής της δομής των γεωλογικών σχηματισμών, σε μικροσκοπικό και μακροσκοπικό επίπεδο, στην ηλεκτρική αντίσταση. Στην Υποενότητα [4.1.1] αναλύονται οι βασικές ηλεκτρικές και μαγνητικές ιδιότητες των απλών υλικών. Στην Υποενότητα [4.1.2] περιγράφονται οι πιο σύνθετες ηλεκτρικές ιδιότητες των μεμονωμένων γεωυλικών. Στην Υποενότητα [4.1.3] πραγματοποιείται η σύνθεση όλων των προηγούμενων στους σχηματισμούς που συναντώνται, κυρίως στα υπερκείμενα, ενός πολυστρωματικού λιγνιτικού κοιτάσματος και παρουσιάζεται η δομή του.

Τα υλικά που συναντώνται στο εκάστοτε ορυχείο είναι ο εξοπλισμός του ορυχείου, ο αέρας και οι γεωλογικοί σχηματισμοί, πετρώματα ή ιζηματα. Οι τελευταίοι δομούνται από ένα σύνθετο τριφασικό σύστημα, συστατικά του οποίου είναι η αέρια, η υδατική και η στερεή φάση. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η στερεή αποτελείται μόνο από κρυσταλλικές φάσεις οι οποίες δομούν τα ορυκτά των γεωλογικών σχηματισμών ενώ οι άμορφες φάσεις εκλείπουν διότι απουσιάζουν ηφαιστειακά πετρώματα από την περιοχή μελέτης. Η υδατική φάση αποτελείται από το νερό το οποίο βρίσκεται σε διάφορες μορφές στο πορώδες του σχηματισμού ή προσροφημένο σε αυτόν. Τέλος ένα ποσοστό της αέριας φάσης (αέρας με διάφορα ποσοστά υγρασίας) βρίσκεται στο πορώδες όταν αυτό δεν είναι πληρωμένο με νερό και το υπόλοιπο πέρα από τις ελεύθερες επιφάνειες της βαθμίδας.

Η περιπλοκότητα αυτού του συστήματος έγκειται στο ότι αφενός οι φάσεις αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους, αφετέρου ότι η ίδια η στερεή φάση περιέχει αρκετές διαφορετικές κρυσταλλικές φάσεις σε κρίσιμη ποσότητα ώστε να μεταβάλλεται η ηλεκτρική αγωγιμότητα.

Όσο πιο περίπλοκο γίνεται το σύστημα τόσο δυσκολότερη είναι η «αποσυνέλιξη» των ηλεκτρομαγνητικών ιδιοτήτων από τη φαινόμενη ώστε τελικά να αποδοθούν στην κάθε φάση των σχηματισμών ξεχωριστά, γι' αυτό έχει σημασία η γνώση των μεμονωμένων ηλεκτρικών και μαγνητικών ιδιοτήτων των γεωυλικών.

#### **4.1.1. Οι ηλεκτρικές και μαγνητικές ιδιότητες των υλικών**

Οι ηλεκτρικές και μαγνητικές ιδιότητες των υλικών είναι η διηλεκτρική σταθερά, η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα ή αντίθετα αντίσταση και η μαγνητική επιδεκτικότητα. Η αγωγιμότητα είναι ευθέως αντιστρόφως ανάλογη με την αντίσταση και ανάλογη με τη σχετική διηλεκτρική σταθερά. Αμφότερες είναι εντατικές ιδιότητες συνεπώς ανεξάρτητες του όγκου και του σχήματος του σχηματισμού. Στα ορυκτά και γενικότερα στους γεωλογικούς σχηματισμούς οι κύριες «μορφές» εμφάνισης της αγωγιμότητας είναι (Βαφείδης, 2001):

- Ηλεκτρονική.
- Ηλεκτρολυτική.

Η ενέργεια που χάνεται εξαιτίας της αγωγιμότητας οφείλεται σε τρεις μηχανισμούς:

- A. τα ηλεκτρόνια για να κινηθούν απορροφούν ενέργεια,
- B. κατά την κίνηση τους μέσα στην μάζα του αγωγού συγκρούονται με άλλα σωματίδια και μέρος της ενέργειας τους μετατρέπεται σε θερμική,
- Γ. η μετακίνηση των ηλεκτρικών φορτίων δημιουργεί δευτερογενές ηλεκτρομαγνητικό πεδίο το οποίο αποσβένει μέρος της ενέργειας της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

Τα διηλεκτρικά υλικά έχουν μικρή ηλεκτρική αγωγιμότητα και οι παραπάνω τρεις μηχανισμοί λαμβάνουν χώρα σε μικρότερο βαθμό. Άρα, στα διηλεκτρικά υλικά η εξασθένιση είναι μικρότερη και οφείλεται κυρίως, στην ενέργεια την οποία καταναλώνουν τα ηλεκτρόνια για να υπερνικήσουν τις ηλεκτροστατικές δυνάμεις των μορίων και να προσανατολιστούν στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Οι απώλειες ενέργειας αυτού του τύπου και συνεπώς η συνεισφορά τους στη διαμόρφωση της ηλεκτρικής αντίστασης είναι μικρές και δεν αναλύονται περαιτέρω. Απώλειες ενέργειας που οφείλονται στη μαγνητική διαπερατότητα και στη μαγνητική υστέρηση δεν είναι σημαντικές εφόσον, τα γεωλογικά υλικά δεν είναι έντονα μαγνητικά. Η μαγνητική

εξασθένιση είναι αποτέλεσμα της περιστροφής των ηλεκτρονίων (spin) στα μοριακά τροχιακά και σχετίζεται με την παρουσία σιδήρου και άλλων μετάλλων. Οι απώλειες οι οποίες οφείλονται σε αυτές τις δύο μαγνητικές ιδιότητες είναι εξαιρετικά μικρές σε σχέση με τις ηλεκτρικές στις περισσότερες περιπτώσεις των ορυκτών. Οι απώλειες ενέργειας είναι περιορισμένες ακόμα και σε περιπτώσεις υλικών τα οποία περιέχουν σίδηρο όπως ο αγκερίτης και ο σερπεντίνης ή παρουσιάζουν κρυσταλλική δομή η οποία επιδέχεται ευκολότερα μαγνήτισης όπως αυτή των σπινέλιων. Υλικά με έντονη μαγνητική επιδεκτικότητα και υστέρηση εκλείπουν από την περιοχή μελέτης ενώ, οι μαγνητικές ιδιότητες του αέρα και του νερού είναι πρακτικά μηδενικές. Για τους παραπάνω λόγους η διηλεκτρική σταθερά και η μαγνητική επιδεκτικότητα δεν αναλύονται περαιτέρω.

Λεπτομερέστερα εξετάζεται μόνο η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα αφενός διότι είναι πιο έντονες οι μεταβολές της στους συγκεκριμένους σχηματισμούς αλλά και εν γένει στη φύση, αφετέρου γιατί η ηλεκτρική συνιστώσα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι μεγαλύτερη.

#### **4.1.2. Η επίδραση της δομής των γεωυλικών στην ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα**

Η ένταση της αγωγιμότητας οφείλεται στη δομή και το είδος των ορυκτών, το μέγεθος και το σχήμα των κρυστάλλων ή των κόκκων και των χημικών στοιχείων τα οποία περιέχονται στα ορυκτά. Σε επίπεδο σχηματισμού η αγωγιμότητα εξαρτάται από τη μικροδομή του η οποία ελέγχεται από τη μορφολογία, τη χωροταξία-γεωμετρική διεύθυνση των κόκκων, το ενεργό πορώδες, την ανισοτροπία κτλ.

Όσον αφορά την ηλεκτρονική αγωγιμότητα αυτή οφείλεται στην ύπαρξη ελεύθερων ηλεκτρονίων εντός του κρυσταλλικού πλέγματος και η κινητικότητά τους ελέγχεται από τον ρυθμό των συγκρούσεων τους με το πλέγμα. Βασική παράμετρος είναι η θερμοκρασία, όσο αυτή αυξάνεται, τόσο η συχνότητα των συγκρούσεων μεγαλώνει. Ταυτόχρονα όμως περισσότερα ηλεκτρόνια μπορούν να υπερπηδήσουν την τελευταία ενεργειακή στοιβάδα. Συνεπώς ανάλογα με το υλικό η αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να έχει διαφορετικά αποτελέσματα. Σε μία εφαρμογή ηλεκτρικής τομογραφίας σε ένα πρανές για τη μελέτη της ευστάθειάς του διαπιστώθηκε ότι η θερμοκρασία ήταν μία από τις βασικές παραμέτρους που επηρέαζαν τις καταγραφές (Holmes et al., 2020).

Η χωροταξία ειδικά στους μεταλλοφόρους σχηματισμούς όπου αναπτύσσονται διάφορα μείγματα αγωγίων και αντιστατικών ορυκτών, έχει ιδιαίτερο ρόλο καθώς για να υπάρξει ένα ανεπτυγμένο κύκλωμα πρέπει να υπάρχει σημαντική συγκέντρωση αγωγίων ορυκτών. Επιπρόσθετα το σχήμα των ορυκτών έχει σημασία, καθώς έχει παρατηρηθεί ότι γωνιώδης αιματίτης ελαττώνει την ηλεκτρική αντίσταση ενός πετρώματος πολύ περισσότερο απ' ότι ο κοκκώδης (Τζάνης, 2016). Όσον αφορά τη χημική σύσταση έχει παρατηρηθεί ότι τα υδροξείδια του σιδήρου είναι πιο αγωγία από αυτά του αργιλίου λόγω του περιεχόμενου σιδήρου. Επίσης τα ξηρά αργιλικά ορυκτά λόγω του φορτίου της κρυσταλλικής δομής είναι πολύ αγωγία, περισσότερο ακόμα και από τα υδροξείδια σιδήρου και αργιλίου.

Συχνά αναφέρονται σαν άργιλος τόσο τα αργιλικά ορυκτά όπως σμεκτίτες, ιλλίτης, καολίνης κτλ. όσο και το κοκκομετρικό κλάσμα οποιουδήποτε υλικού κάτω από τα 2  $\mu\text{m}$ . Η διαφορά

στις ηλεκτρικές ιδιότητες είναι μεγάλη όταν το αργιλικό κλάσμα δεν περιέχει σημαντική ποσότητα αργιλικών ορυκτών, τότε αυτό το κλάσμα παρουσιάζει μικρότερη ηλεκτρονική αγωγιμότητα από τα αργιλικά ορυκτά.

Όταν το περιεχόμενο ρευστό στο γεωυλικό είναι νερό τότε η υδατική φάση καθορίζει την αγωγιμότητα λόγω της αυξημένης ηλεκτρολυτικής αγωγιμότητας. Το σύνολο του όγκου της υδατικής φάσης (ακόμα και σε πολύ μικρές ποσότητες), η κατανομή της στον σχηματισμό, η αλατότητά της (το σύνολο των εν διαλύσει μορίων που έχουν φορτίο ανά λίτρο ρευστού), η συγκέντρωση και η κινητικότητα των ιόντων είναι αυτά που ρυθμίζουν την αγωγιμότητα. Αυτού του τύπου η αγωγιμότητα εξαρτάται από την κινητικότητα του ιόντος η οποία καθορίζεται από την τερματική ταχύτητα του ιόντος, υπό σταθερή επίδραση ηλεκτρικού πεδίου σύμφωνα με τον νόμο του Stokes (Τζάνης, 2016). Η ιξώδης τριβή που ασκείται στο ιόν είναι τόσο μεγαλύτερη όσο πιο λεπτόκοκκο και φορτισμένο είναι ένα γεωυλικό λόγω των δυνάμεων που ασκούνται από τα προσροφημένα στις επιφάνειες των ορυκτών μόρια του νερού και άλλων ιόντων.

Ιδιαίτερη συμπεριφορά παρουσιάζουν οι άργιλοι με την παρουσία υδατικής φάσης. Οι άργιλοι προσροφούν νερό στην επιφάνεια των κρυστάλλων με αποτέλεσμα την αύξηση *in situ* της αλατότητας και τη δημιουργία της διάχυτης διπλής στοιβάδας. Αυτή σχηματίζεται στο χώρο μερικών δεκάδων Å πάνω στα φύλλα των αργιλικών ορυκτών και δημιουργεί μία ζώνη στο ρευστό με πολύ μεγάλη περιεκτικότητα σε διαλυμένα κατιόντα στην οποία είναι πολύ αυξημένη η ηλεκτρική αγωγιμότητα. Ακόμα και στην ακραία περίπτωση μη ύπαρξης προϋπαρχόντων διαλυμένων ιόντων στην υδατική φάση, όπως στην περίπτωση του απεσταγμένου νερού, στη διάχυτη διπλή στοιβάδα αποδεσμεύονται ιόντα με σχεδόν ισοδύναμο αποτέλεσμα. Τέτοια φαινόμενα επιφανείας εμφανίζονται με μικρότερη ένταση σε όλα τα ορυκτά έτσι, η αλατότητα δεν είναι πάντα ομοιόμορφα κατανεμημένη εντός των καναλιών του πορώδους κυρίως των ιζηματογενών πετρωμάτων. Παρά το γεγονός αυτό, στις περισσότερες περιπτώσεις των ιζηματογενών πετρωμάτων προσεγγιστικά θεωρείται ότι η αλατότητα είναι ομοιογενώς κατανεμημένη εκτός, από τις περιπτώσεις με σημαντική παρουσία αργιλικών ορυκτών. Ρυθμιστής για την ένταση αυτών των φαινομένων είναι το πορώδες καθώς αυξάνει την ελεύθερη επιφάνεια μεταξύ υδατικής φάσης και κρυστάλλων ή μακρομορίων.

Η υδατική φάση, σε μία ελαφρώς μεγαλύτερη κλίμακα, βρίσκεται στην επιφάνεια των κόκκων προσροφημένη ή σχηματίζει υμένες μεταξύ των κόκκων είτε ακόμα λόγω διάχυσης, πολύ μικρή ποσότητα ύδατος μεταφέρεται στο μη ενεργό πορώδες. Όσο πιο μικρό είναι το μέγεθος των κόκκων του σχηματισμού αλλά κυρίως όσο μεγαλύτερο είναι το ενεργό του πορώδες, το γεωυλικό έχει τη δυνατότητα να συγκρατεί περισσότερο νερό άρα να είναι ηλεκτρικά πιο αγωγίμο. Οι ηλεκτρικές ιδιότητες των ρευστών, στη συγκεκριμένη περίπτωση του αέρα και του νερού, είναι ευρέως μελετημένες και δεν θα αναλυθούν εκτενέστερα. Ιδιαίτερη επισήμανση πρέπει να γίνει για την ηλεκτρική αντίσταση του αέρα καθώς δεν είναι σταθερή αλλά αλλάζει με τη μεταβολή των περιβαλλοντικών συνθηκών όπως βροχή, θερμοκρασία κτλ. κάτι το οποίο επηρεάζει τις χρονικά εκτεταμένες δοκιμές στο πεδίο.

#### 4.1.3. Η δομή των πολυστρωματικών κοιτασμάτων λιγνίτη

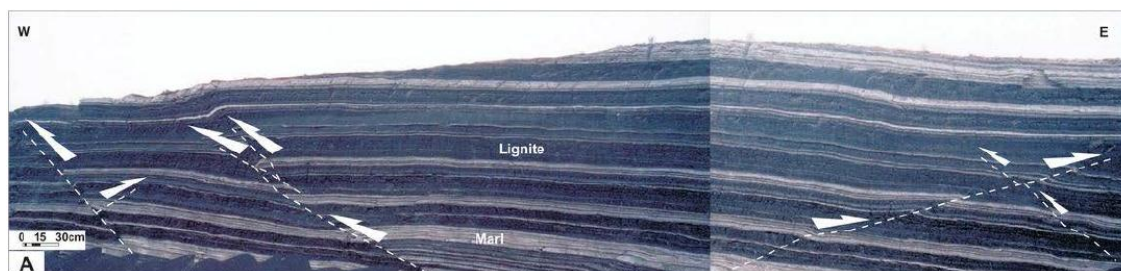
Τα κοιτάσματα λιγνίτη δημιουργούνται με τη συναπόθεση βιογενούς, οργανικού, φυτικού υλικού και κλαστικών ή/και χημικών ιζημάτων συνήθως σε ενδοηπειρωτικές λεκάνες με γλυκό νερό (χουμικοί γαιάνθρακες). Το οργανικό υλικό περνά από δύο διεργασίες την τυρφογένεση και την ενανθράκωση. Με αυτές τις διεργασίες αυξάνεται το ποσοστό άνθρακα και μειώνεται το ποσοστό υγρασίας. Λόγω της ποικιλίας της σύστασης των φυτών, του βαθμού διαγένεσης (ενανθράκωσης) και των συνθηκών απόθεσης οι οποίες επικρατούσαν, κάθε κοιτάσμα είναι ιδιαίτερο τόσο από ιζηματολογική άποψη όσο και από τεκτονική, υδρογεωλογική, παλαιοπεριβαλλοντική και παλαιοντολογική.

Το ιδιαίτερο ενδιαφέρον στα πολυστρωματικά κοιτάσματα εντοπίζεται στην εναλλαγή λιγνίτη με τα κλαστικά ιζήματα (Σχήμα 4.1) η οποία καθορίζεται από τη στάθμη των υδάτων και την ποσότητα οργανικού και ανόργανου υλικού το οποίο αποτίθεται. Αυτοί οι παράμετροι εξαρτώνται από την εναλλαγή ξηρών και υγρών περιόδων και περιγράφονται από τους κύκλους Milanković. Αντίστοιχα και στα υπερκείμενα εμφανίζονται τέτοιες εναλλαγές αλλά σε αυτή την περίπτωση τα μητρικά πετρώματα είναι αυτά τα οποία καθορίζουν τη σύστασή τους.

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί των υπερκείμενων και ενδιάμεσων του λιγνιτικού κοιτάσματος διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με την αντίσταση στην κοπή τους. Στους μαλακούς σχηματισμούς συγκαταλέγονται οι μάργες, οι άργιλοι και οι άμμοι. Αυτά είναι μηχανικά ιζήματα και αποτελούνται από λεπτόκοκκο ανθρακικό και πυριτικό υλικό διαφόρων κοκκομετριών μαζί με αργιλικά ορυκτά σμεκτίτες (ιλλίτης), χλωρίτες κτλ. (Kolovos et al., 2002). Η δομή αυτών των σχηματισμών είναι στρωματοειδής και είναι έντονα τεκτονισμένοι (Delogkos et al., 2020, 2018; Diamantopoulos et al., 2014).

Οι σκληροί σχηματισμοί είναι πιο σπάνιοι (Kavouridis et al., 2008) και σε αυτούς συγκαταλέγονται διάφοροι πετρολογικοί τύποι όπως συνεκτικά λατυποκροκαλοπαγή, ψαμμίτες κτλ. (Χωροπανίτης, 2006). Οι σχηματισμοί αυτοί είναι στρωματοκαθοριζόμενοι και παρουσιάζουν διάφορα σχήματα και μεγέθη (Σχήμα 4.2). Η απόθεση τέτοιων σχηματισμών μπορεί να γίνει κάτω από πολύ διαφορετικές συνθήκες. Χημικά από υπέρκορο ασβεστίτικο διάλυμα δημιουργούνται συνεκτικά λατυποκροκαλοπαγή. Επίσης μηχανικά αποτίθενται ιζήματα διαφόρων κοκκομετριών, το μεγαλύτερο από αυτούς το οποίο εμφανίζεται στην εξεταζόμενη περίπτωση είναι οι ολισθόλιθοι κυρίως ασβεστολιθικοί.

Όσον αφορά την ηλεκτρική αντίσταση στους άγονους μαλακούς σχηματισμούς αυτή εξαρτάται κυρίως από τον βαθμό διαγένεσης. Αυτός ρυθμίζεται κυρίως από το βάθος ταφής το οποίο είναι μικρό επομένως η συμπίεση και η θέρμανση των ιζημάτων είναι ηπιότερες. Οι σχηματισμοί σε αυτές τις συνθήκες βρίσκονται σε πιο οξειδωμένη μορφή και έχουν μικρότερη πυκνότητα συνεπώς, μεγαλύτερο πορώδες. Αυτό δίνει τη δυνατότητα ύπαρξης αυξημένου ποσοστού ρευστών στο τριφασικό μίγμα, όταν το ρευστό είναι αέρας τότε η αντίσταση αυξάνεται ενώ, όταν είναι μία υδατική φάση η αντίσταση μειώνεται.



Σχήμα 4.1: Χαρακτηριστική μορφή πολυστρωματικού λιγνιτικού κοιτάσματος (Delogos, 2016).

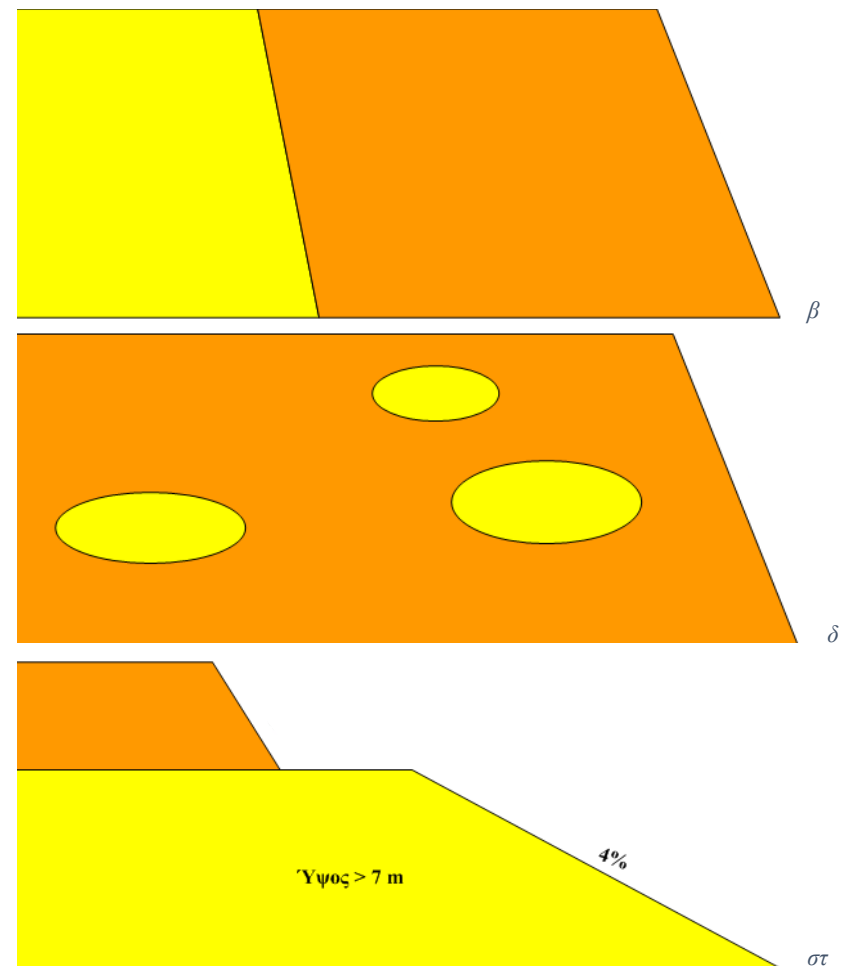
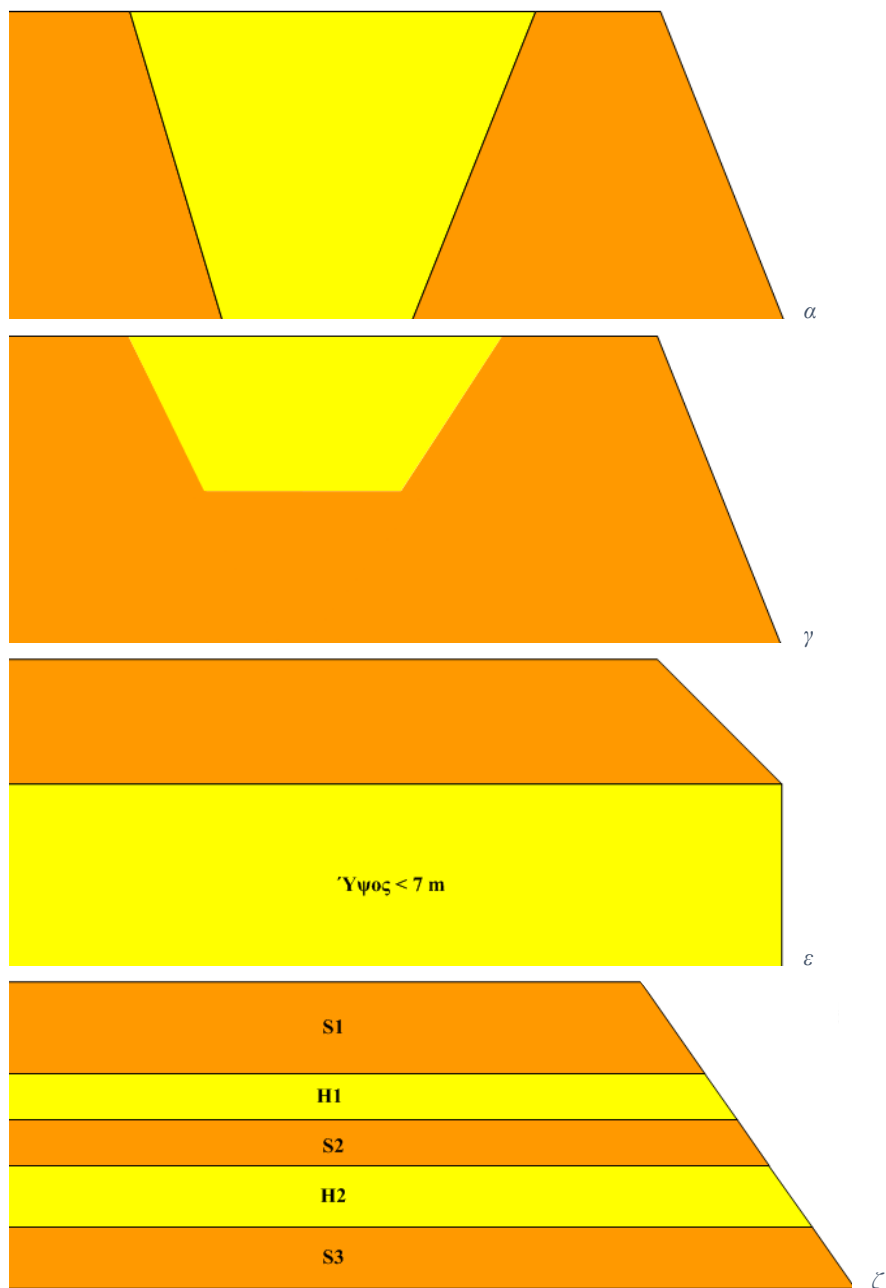
Πιο συγκεκριμένα τα μαλακά υπερκείμενα καθώς περιέχουν αργιλικά ορυκτά και έχουν μικρό πορώδες, η προσροφημένη υγρασία αποδεσμεύεται εξαιρετικά δύσκολα χωρίς ξήρανση. Αυτού του είδους η υγρασία μειώνει την ειδική ηλεκτρική αντίσταση η οποία κυμαίνεται μεταξύ 10 και 30  $\Omega\text{m}$  (Galetakis et al., 2016). Εξάιρεση αποτελούν οι άμμοι και οι χάλικες με καστανέρυθρη άργιλο.

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των σκληρών κυμαίνεται από 100 έως 800  $\Omega\text{m}$ . Ωστόσο ισοδύναμη τιμή μετρούμενης αντίστασης στο πεδίο έχουν τα διάφορα ασύνδετα κροκαλοπαγή (Σχήμα 4.3) τα οποία σχηματίζουν φακούς και άλλα στρώματα. Η άμμος επίσης έχει μεγαλύτερη ηλεκτρική αντίσταση τόσο λόγω του υλικού της όσο και του μεγαλύτερου πορώδους το οποίο συνεπάγεται αυξημένη αέρια φάση άρα και αντίσταση. Παρά το μεγάλο πορώδες στις άμμους, η άντληση των υδάτων στο ορυχείο δεν επιτρέπει την πλήρωσή τους με νερό, τουλάχιστον για μεγάλα χρονικά διαστήματα ώστε να μειώνεται η ηλεκτρική αντίσταση. Ακόμα, η αέρια φάση που υπέρκειται της βαθμίδας εξαιτίας της λειτουργίας της διάταξης αυξάνει τεχνητά τη φαινόμενη αντίσταση. Τόσο η αέρια φάση όσο και τα υπόλοιπα γεωολικά τα οποία έχουν ισοδύναμη αντίσταση με τα σκληρά γεωολικά στη διατριβή αυτή αναφέρονται ως ψευδοσκληροί ή εικονικοί σκληροί σχηματισμοί.

Με βάση την ειδική ηλεκτρική αντίσταση, η οποία δεν ταυτίζεται πάντα με την αντίσταση στην κοπή των γεωολικών, προκύπτουν δύο ακραίες καταστάσεις αποτελούμενες από υλικά χαμηλής ηλεκτρικής αντίστασης και υλικά υψηλής ηλεκτρικής αντίστασης. Η μελέτη των διαφορετικών «μειγμάτων» τους η οποία αποτελεί μία υπέρθεση των παραπάνω ακραίων καταστάσεων παρουσιάζει ενδιαφέρον. Για παράδειγμα, αν μειώνονται τα ποσοστά αργιλικών ορυκτών στον μαλακό σχηματισμό είναι «ηλεκτρικά» ισοδύναμο με την ύπαρξη ενός λεπτού στρώματος σκληρού σχηματισμού. Σε τέτοιες περιπτώσεις είναι δύσκολη η απόδοση της ακριβούς αιτίας μεταβολής της ηλεκτρικής αντίστασης. Αντίθετα ο διαχωρισμός είναι ευκρινέστερος όταν υπάρχουν απότομες μεταβολές.

Το σύνολο των σκληρών γεωολικών στα υπερκείμενα έχουν υψηλότερη αντίσταση από τους σχηματισμούς που τους περιβάλλουν όπως μετρούνται εργαστηριακά. Ωστόσο αυτή η αισθητή διαφορά στην αντίσταση των εργαστηριακών μετρήσεων δεν αποτυπώνεται με την ίδια ένταση στη, μετρούμενη στο πεδίο, φαινόμενη αντίσταση. Αυτές οι δύο παρατηρήσεις είναι εξαιρετικά σημαντικές διότι κατά τη συνήθη πρακτική εφαρμογής της μεθόδου κινητού πομπού-δέκτη οι στόχοι έχουν μικρότερη αντίσταση, οι περιβάλλοντές τους μεγαλύτερη και η διαφορά της αντίστασης μεταξύ στόχου και περιβάλλοντος είναι μεγαλύτερη.





Σχήμα 4.2: Τομές βαθμίδων με διαφορετικούς τρόπους εμφάνισης σκληρών (κίτρινο) και μαλακών σχηματισμών, τροποποιημένο από τον Χωροπανίτη (2006).

- α. Σκληροί σχηματισμοί μεγάλου μεγέθους ανάμεσα σε μαλακούς σχηματισμούς
- β. Απότομη μετάβαση από σκληρούς σε μαλακούς σχηματισμούς.
- γ. Σκληροί σχηματισμοί ανάμεσα σε μαλακούς.
- δ. Σκληροί σχηματισμοί σε μορφή φακών.
- ε. Στρώσεις μαλακών και σκληρών σχηματισμών μικρής έκτασης
- στ. Μαλακοί σχηματισμοί πάνω σε σκληρούς σχηματισμούς μεγάλης έκτασης.
- ζ. Έντονη εναλλαγή στρώσεων σκληρών και μαλακών σχηματισμών.

Η μη ταύτιση της ηλεκτρικής αντίστασης με την αντίσταση στην κοπή, η ισοδυναμία των καταστάσεων, οι μικρές διαφορές στις μετρούμενες αντιστάσεις και η αντίθετη κατάσταση από τη συνήθη διαδικασία διασκόπησης αποτελούν τις ιδιομορφίες της εξεταζόμενης περίπτωσης.

Για τις παραπάνω αιτίες καθίσταται εξαιρετικά δύσκολος ο προσδιορισμός της απόστασης, του σχήματος και του είδους του στόχου που ανακαλύπτεται κατά τη διασκόπηση. Επιπρόσθετες δυσκολίες στην ερμηνεία των καταγραφών ανακύπτουν με την εμφάνιση στοχαστικών ή άλλων σφαλμάτων τα οποία περιπλέκουν το εγχείρημα. Πρέπει να σημειωθεί ότι η «αποσυνέλιξη» των διαφορετικών αιτιών (καταστάσεων) οι οποίες δημιουργούν αυτήν την υπέρθεση είναι εφικτή, τουλάχιστον θεωρητικά, καθώς τα γεωλογικά χαρακτηριστικά παραμένουν σταθερά στο χώρο και το χρόνο. Συνεπώς είτε η υπέρθεση είναι αιτιοκρατική είτε στοχαστική μπορεί να απεικονισθεί.



Σχήμα 4.3: Ασύνδετοι χάλικες με καστανέρυθρη άργιλος (επάνω) καστανέρυθρη άργιλος (κάτω).

## 4.2. Η δομή του συστήματος και οι τρόποι αστοχίας του

Δύο εμπόδια ανακύπτουν κατά την προσπάθεια εφαρμογής της μεθόδου FMECA στο συγκεκριμένο σύστημα, το πρώτο αφορά τον τρόπο διαμέρισης του συστήματος και το δεύτερο αφορά τις αστοχίες των τμημάτων του συστήματος και πιο συγκεκριμένα, ποια τμήματα του συστήματος θεωρείται ότι αστοχούν και πως αυτά αστοχούν.

Όσον αφορά τον τρόπο διαμέρισης του συστήματος, αυτός εξαρτάται από τη δομή του η οποία είναι αναγκαίο να προσαρμοστεί τόσο στις ανάγκες της μεθόδου όσο και στους στόχους της διατριβής. Εξ' αιτίας αυτών των προσαρμογών προκύπτουν δύο διαφοροποιήσεις από τη συνήθη εφαρμογή της μεθόδου.

Η πρώτη αφορά την ανάλυση δύο διαφορετικών εκφάνσεων του συστήματος ως υλικό εξάρτημα και ως διαδικασία. Στη μία το σύστημα αναλύεται με δομικό (Structural FMECA) και αντίστοιχα με λειτουργικό τρόπο (Functional FMECA). Λόγω αυτής της πρώτης διαφοροποίησης προκύπτουν δύο διαφορετικές ιεραρχικές δομές των δύο εκδοχών, διαδικασίας και υλικού.

Η δεύτερη διαφοροποίηση αφορά την εφαρμογή της για την ανάλυση του συστήματος σε πραγματικό χρόνο, αυτή η διαφοροποίηση διασπά τις στατικές ιεραρχικές δομές (λειτουργική και δομική) και κάνει υποχρεωτική τη νέα περιγραφή της δομής του συστήματος ως ένα μεικτό σύστημα το οποίο αποτελείται από διαδικασίες εντός των οποίων εμπεριέχονται και τα υλικά εξαρτήματα. Το σύστημα αυτό, με έναν σειριακό τρόπο, ο οποίος ακολουθεί τις διαδοχικές και επαναλαμβανόμενες εργασίες της εξορυκτικής διαδικασίας, παράγει προϊόντα από τα γεωυλικά. Το σύνολο του συστήματος αυτού δεν μπορεί να αναλυθεί ξεχωριστά με λειτουργικό ή δομικό τρόπο αλλά απαιτείται μία μεικτή προσέγγιση.

Η, αρχικά και κατά τα φαινόμενα, λογική προσέγγιση είναι το σύστημα να θεωρηθεί ότι αποτελείται μόνο από τα μέσα εκτέλεσης δηλαδή, κυρίως τα υλικά του (Σχήμα 4.4.α). Βάσει αυτής της προσέγγισης το σύστημα περιλαμβάνει τρία υποσυστήματα τον εκσκαφέα μαζί με το υπολογιστικό σύστημα (υλικό και λογισμικό) και γενικότερα τους αυτοματισμούς, τις μετρητικές διατάξεις και τέλος το μέτωπο μαζί με το δάπεδο της βαθμίδας.

Το βασικό μειονέκτημα αυτής της ιεραρχικής δομής η οποία αποτελείται αποκλειστικά από υλικά είναι ότι απεικονίζει μία στατική εικόνα του συστήματος. Κατά την εφαρμογή της μεθόδου FMECA με στόχο την ανάλυση των διαδικασιών της εξόρυξης τα υποσυστήματα αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους εξ' αιτίας της υποκειμενικής θεώρησης για ύπαρξη μόνο υλικών εξαρτημάτων.

Για την ελαχιστοποίηση των αλληλεπιδράσεων επαναπροσεγγίστηκε το πρόβλημα και δημιουργήθηκε μία νέα διαμέριση σε υποσυστήματα τα οποία ακολουθούν τα στάδια αυτοματοποίησης, ταυτόχρονα η ανάλυση πραγματοποιείται με αφετηρία τους γεωλογικούς σχηματισμούς. Δηλαδή το σύστημα παρουσιάζεται ως διαδικασία, πάλι με ιεραρχική δομή (Σχήμα 4.4.β) και αποτελείται από τέσσερα υποσυστήματα της καταγραφής των ιδιοτήτων, της προσομοίωσης, της λήψης αποφάσεων και της εκτέλεσής τους.

Με τη δόμηση του συστήματος ως διαδικασία στην οποία περιλαμβάνονται τα υλικά του συστήματος πλέον είναι εφικτή η εκτίμηση της διακινδύνευσης, πλέον και των διαδικασιών

του. Ωστόσο και με αυτή την ανάλυση το σύστημα αφορά μία στατική εικόνα της εξορυκτικής διαδικασίας με αποτέλεσμα για μία συγκεκριμένη διαδικασία σε πραγματικό χρόνο να μην είναι δυνατό αυτή να βελτιστοποιηθεί με μεγάλη ακρίβεια.

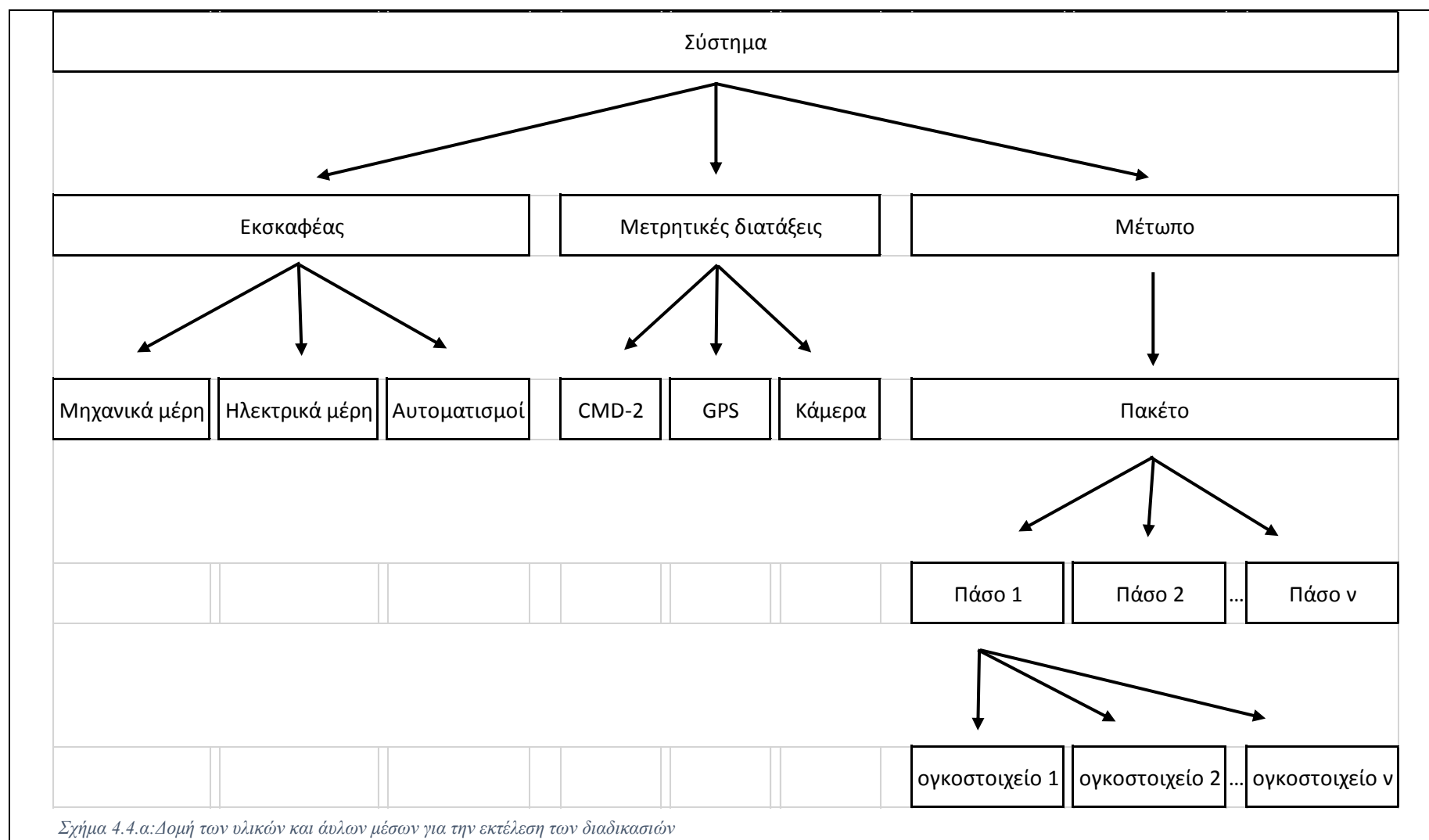
Μία βελτιωμένη έκδοση της δομής προκύπτει αν ληφθεί υπόψη ο χειριστής και το μέτωπο εξόρυξης σε κάθε στάδιο ξεχωριστά. Στην εξεταζόμενη περίπτωση αναλύονται μόνο οι γεωολογικοί σχηματισμοί που συναντήθηκαν και το σύστημα όπως προέκυψε κατά τη διάρκεια της τελικής δοκιμής στο Ορυχείο Νοτίου Πεδίου (ΟΝΠ). Επίσης δεν λαμβάνεται υπόψη η επίδραση του χειριστή στα περισσότερα υποσυστήματα εκτός από μία περίπτωση ενώ, η ανάλυση των δύο ενδιάμεσων σταδίων-υποσυστημάτων είναι σύντομη.

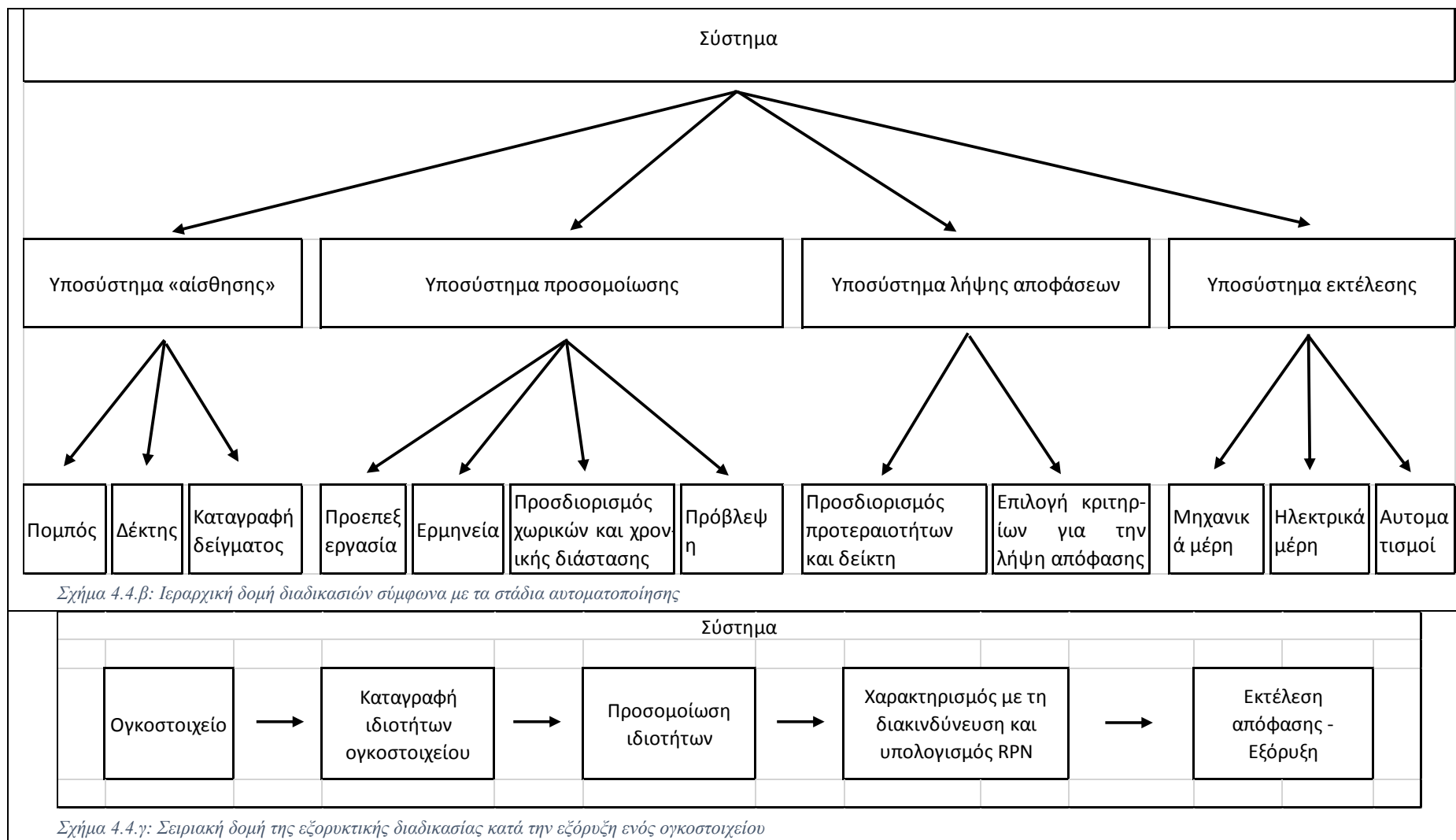
Με αυτές τις απλοποιήσεις περιορίζεται η ανάλυση και εστιάζεται η μελέτη στην παρουσίαση της ιδέας για την εκτίμηση της διακινδύνευσης του συστήματος με τη μέθοδο FMECA και παρακάμπτεται η ενδελεχής και χρονοβόρα ανάλυση ολόκληρου του συστήματος. Με βάση την παραπάνω λογική το σύστημα διαχωρίζεται ιεραρχικά στα εξής υποσυστήματα:

1. Μετώπου – Μετρητικής διάταξης – ~~Χειριστή~~.
2. ~~Μετώπου~~ – Προσομοίωσης – ~~Χειριστή~~.
3. ~~Μετώπου~~ – Λήψης αποφάσεων – ~~Χειριστή~~.
4. ~~Μετώπου~~ – Εκτέλεσης – Χειριστή.

Τα ισοδύναμα βιομηχανικά στάδια κανονικοποιούνται ως προς τον στόχο της εξορυκτικής βιομηχανίας που είναι η εξόρυξη των γεωολογικών σχηματισμών. Με κριτήριο την απόδοσή του συστήματος σε σχέση με το κοίτασμα κάθε κομμάτι του συστήματος αναλύεται με την προϋπόθεση ότι αναφέρεται στα γεωυλικά.

Για παράδειγμα δεν συμπεριλαμβάνονται στις μετρητικές διατάξεις οι αισθητήρες πίεσης λαδιού ή οι αισθητήρες μέτρησης της στάθμης του καυσίμου, αλλά αυτοί θεωρούνται ότι είναι υποσυστήματα των μηχανών. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται μία σειριακή δομή όχι απαραίτητα αυστηρά δομημένη (Σχήμα 4.4.γ) η οποία επιτρέπει την εφαρμογή της FMECA σε πραγματικό χρόνο. Σε αυτή τη δομή οι αστοχίες μεταφέρονται αλυσιδωτά από το πρώτο στο τελευταίο στάδιο, στο οποίο εμφανίζονται και οι σημαντικότερες επιπτώσεις. Η πορεία μετάδοσης των επιπτώσεων είναι αντίστροφη από τη χρονική ακολουθία της διαδοχής των σταδίων. Έτσι στα αρχικά στάδια οι επιπτώσεις δεν αφορούν υλικές και σοβαρές βλάβες αλλά αποτελούν πρώιμες αστοχίες των υποσυστημάτων, που σχεδόν βέβαια εξελίσσονται σε αστοχία ολόκληρου του συστήματος αν δεν ληφθούν μέτρα. Με μία περισσότερο γραφική προσέγγιση το Σχήμα 4.4.α και το Σχήμα 4.4.β αποτελούν δύο διαφορετικούς «χάρτες» του συστήματος και το Σχήμα 4.4.γ υποδεικνύει τη «διαδρομή» η οποία πρέπει να ακολουθηθεί προκειμένου να πραγματοποιηθεί μία διαδικασία.





Σχήμα 4.4: Ιεραρχική δομή των υλικών και άυλων μέσων του συστήματος (α). Ιεραρχική δομή των διαδικασιών του συστήματος (β). Σειριακή δομή του συστήματος (γ).

Το δεύτερο εμπόδιο προκύπτει σε αυτό το σημείο, διότι η μελλοντική εκτιμώμενη αστοχία του συνθετότερου εξαρτήματος και τελικά του συνόλου του συστήματος με τη μέθοδο FMECA σχετίζεται τόσο με γνωστούς ρυθμούς αστοχίας των εξαρτημάτων του όσο και με τις υπόλοιπες παραμέτρους της διακινδύνευσης, οι οποίες επίσης είναι γνωστές. Ωστόσο η αστοχία των γεωυλικών συνήθως θεωρείται η λύση της συνέχειας τους και δεν υπάρχει ένας κανόνας ο οποίος να συνδέει τις επιπτώσεις της μη αποδοτικής αστοχίας των γεωυλικών με τις αστοχίες της εξορυκτικής διαδικασίας και των μέσων που χρησιμοποιούνται.

Θεωρώντας ότι «εξαρτήματα» του συστήματος είναι και τα γεωυλικά και ότι μία λεπτομερής αποτύπωση του μετώπου δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί είναι απαραίτητο να εκτιμηθούν με κάποιο τρόπο παράμετροι όπως ο ρυθμός αστοχίας των «εξαρτημάτων». Μία καλή προσέγγιση για αυτές τις παραμέτρους είναι η αντικατάστασή τους από μία έμμεση εκτίμησή τους μέσω της ηλεκτρικής αγωγιμότητας ώστε να προκύψει μία καλή προσέγγιση. Η έκταση την οποία καταλαμβάνει αυτό το «εξάρτημα» προσδιορίζεται από το εκάστοτε μετρούμενο «δείγμα» το οποίο αντιστοιχεί σε ένα ογκοστοιχείο με συγκεκριμένες διαστάσεις. Με αυτή τη συλλογιστική η εκτίμηση και στη συνέχεια η πρόβλεψη της αγωγιμότητας αναφέρεται σε ένα ογκοστοιχείο το οποίο περιέχει γεωυλικά και πρόκειται να εξορυχθεί στο μέλλον.

Με αφετηρία αυτήν την εκτίμηση μπορεί να υπολογιστεί η διακινδύνευση σειριακά, με βάση τα στάδια αυτοματοποίησης, για κάθε συνθετότερο εξάρτημα του συστήματος και τελικά να χαρακτηρίζει την κατάσταση του συνόλου του συστήματος σε μία μελλοντική στιγμή. Αυτός ο χαρακτηρισμός με τη διακινδύνευση τόσο του εξαρτήματος, των συνθετότερων εξαρτημάτων αλλά και του συνόλου του συστήματος αναφέρεται και χαρακτηρίζει το ίδιο το ογκοστοιχείο. Αυτό γίνεται έμμεσα και με αρκετή βεβαιότητα παρά το γεγονός ότι δεν υπάρχει άμεση διασκόπηση-δειγματοληψία ώστε μία συγκεκριμένη αστοχία να αντιστοιχίζεται στη συγκεκριμένη αιτία τη στιγμή πραγματοποίησής της εκ των υστέρων.

Όταν η εκτιμώμενη τιμή της διακινδύνευσης ενός ογκοστοιχείου ξεπεράσει μία τιμή προδιαγραφών εκτιμάται, ότι θα εμφανιστεί μία αστοχία σε κάποιο εξάρτημα του συστήματος μελλοντικά κατά την εξόρυξή του. Στην εξεταζόμενη περίπτωση υπέρβαση εμφανίζεται κάθε φορά όπου υπάρχει αλλαγή από υψηλή αγωγιμότητα σε υψηλή αντίσταση ώστε να διαπιστωθεί μία μετάβαση από μαλακό σε σκληρό σχηματισμό. Τότε, διερευνώνται οι αιτίες διαφοροποίησης της αγωγιμότητας ώστε να διαπιστωθεί αν η εκτίμηση είναι ορθή και αντιστοιχεί σε σκληρό γεωυλικό ή εσφαλμένη. Το ενδεχόμενο μη εμφάνισης προειδοποίησης για σκληρό γεωυλικό ενώ αυτό υφίσταται, δεν αναλύεται διότι δεν έχουν αναπτυχθεί διατάξεις με κατάλληλες δυνατότητες.

Αυτή η ενδεχόμενη αστοχία αντιστοιχίζεται με το συγκεκριμένο ογκοστοιχείο και τότε εμφανίζεται μία πρώτη αστοχία-προειδοποίηση η οποία κατά τη μελλοντική εξόρυξη του ογκοστοιχείου θα προκαλέσει αστοχίες στο σύστημα.

Τέτοιες προδιαγραφές μπορεί να αφορούν μία αστοχία των γεωυλικών, μία αστοχία της διαδικασίας της εξόρυξης, μία αστοχία του εξοπλισμού για την εξόρυξη και μία αστοχία των υποδομών τις οποίες δομούν τα γεωυλικά. Δηλαδή τα μέσα με τα οποία έρχεται σε επαφή το γεωυλικό. Η πρώτη αστοχία αποτελεί άμεση αστοχία, η οποία μεταβάλλει τις ιδιότητες του γεωυλικού όπως μηχανικές ιδιότητες (θραύση), χημικές ιδιότητες (οξείδωση) κτλ. τέτοιες μεταβολές τις περισσότερες φορές είναι θεμιτές και αποτελούν αντικειμενικό στόχο της εξόρυξης.

Αντίθετα οι υπόλοιπες τρεις αστοχίες είναι έμμεσες, έχουν σοβαρές επιπτώσεις και αφορούν μία μελλοντική κατάσταση.

Η εκτιμώμενη κατάσταση του συστήματος η οποία θα προκύψει, από τη μερική και εκτός προδιαγραφών υπέρβαση της τιμής των έμμεσων αστοχιών θεωρείται ως πρόιμη αστοχία. Αυτό το όριο διαχωρίζει τις αστοχίες οι οποίες πρόκειται να συμβούν εξ' αιτίας ενός συγκεκριμένου γεωυλικού από αστοχίες που προκύπτουν από τη γεωλογική στοχαστικότητα και δεν είναι δυνατό να αποδοθούν σε συγκεκριμένη αιτία καθώς σωρευτικά με τυχαίο τρόπο προκαλούν έμμεσες αστοχίες. Αυτά τα όρια διαχωρίζουν την, εν δυνάμει κατάσταση αστοχίας η οποία προκαλείται από τη μη κανονική λειτουργία, από τις φυσιολογικές φθορές της κανονικής λειτουργίας του συστήματος. Αυτή δεν είναι μία συνηθισμένη πρακτική όσον αφορά τους τομείς της μηχανολογίας και της ηλεκτρονικής ωστόσο στον οικονομικό και στον ιατρικό τομέα και συγκεκριμένα στον χρηματοπιστωτικό και στον διαγνωστικό κλάδο αντίστοιχα συνηθίζεται ακραίες τιμές να αποτελούν δείκτες για αστοχίες διαδικασιών του συστήματος, πριν η αστοχία επεκταθεί στο σύστημα.

Σε αυτό το σημείο είναι χρήσιμο να επισημανθεί η διαφορά αιτιοκρατικών και στοχαστικών συνιστωσών στις καταγραφές. Συνοπτικά οι στοχαστικές συνιστώσες μπορεί να αφορούν τις μετρητικές διατάξεις, τις παραμέτρους εξόρυξης και τις ιδιότητες του σχηματισμού. Μία διάταξη παράγει τιμές γύρω από ένα μέσο όρο, αυτή η διακύμανση μπορεί να ενσωματώνεται στη μετρούμενη τιμή και να μεταφέρεται σε όλους τους επόμενους υπολογισμούς. Αντίστοιχα συμβαίνει και με την πορεία του καδοτροχού καθώς μικρομετακινήσεις μεταξύ της διάταξης τύπου CMD-2, του δέκτη του GPS και καδοτροχού μπορεί να μεταφέρουν σημαντικά σφάλματα. Μία ακόμη στοχαστική συνιστώσα είναι η αβεβαιότητα της ορυκτολογίας και της δομής των σχηματισμών το οποίο τελικά οδηγεί στη διαφοροποίηση της αγωγιμότητας. Ωστόσο δεν πραγματοποιείται περαιτέρω ανάλυση του θέματος των στοχαστικών αστοχιών καθώς εκτιμάται ότι είναι πολύ δύσκολο να οδηγήσουν σε «αστοχία» κατά τη δοκιμαστική λειτουργία. Η μοναδική αξιόλογη συνιστώσα που αποτελεί εξαίρεση και χρήζει ανάλυσης είναι η παραγωγή σφαλμάτων από τη διασύνδεση του δέκτη του GPS με το σταθμό βάσης και αναλύεται παρακάτω. Σε κάθε περίπτωση κύριο μέλημα είναι η μελέτη των αιτιοκρατικών σχέσεων προκειμένου να αφαιρεθεί η τάση και σε επόμενο στάδιο να διερευνηθούν οι στοχαστικές σχέσεις.

### **4.3. Περιγραφή των παραμέτρων του υποσυστήματος εκτέλεσης**

Αυτό το υποσύστημα περιλαμβάνει όλα τα υλικά ή άυλα μέσα για την εκτέλεση των αποφάσεων. Αποτέλεσμα της χρήσης αυτών είναι η εξόρυξη κατά την οποία εμφανίζονται οι τελικές και σημαντικότερες επιπτώσεις στο σύστημα. Επίσης οι παράμετροι λειτουργίας του εκσκαφέα, που ανήκουν σε αυτό το υποσύστημα, περιγράφουν τον τρόπο αλληλεπίδρασης του υποσυστήματος διάταξης-μετώπου. Για τους λόγους αυτούς έχει ιδιαίτερη σημασία η ανάλυσή αυτού του υποσυστήματος σε αυτό το σημείο και πριν αναλυθούν τα υπόλοιπα.

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται, στις Υποενότητες [4.3.1] και [4.3.2] οι επιπτώσεις των αστοχιών στο σύστημα της μεθόδου εξόρυξης και της μεθόδου εκμετάλλευσης αντίστοιχα. Στην Υποενότητα [4.3.3] εξετάζεται η αστοχία των υπόλοιπων μέσων για την εκτέλεση των



αποφάσεων στα οποία συγκαταλέγονται ο υπολογιστής, η διάταξη και η διασύνδεσή τους. Τέλος στην ίδια υποενότητα εξετάζονται συνοπτικά «συμπεριφορικά» σφάλματα του χειριστή.

#### **4.3.1. Οι παράμετροι της μεθόδου εκμετάλλευσης και οι επιπτώσεις των αστοχιών της**

Με βάση τη γεωλογική δομή του κοιτάσματος επιλέγεται η μέθοδος εκμετάλλευσης και εξόρυξης ώστε να πραγματοποιηθεί η καλύτερη δυνατή αξιοποίηση του κοιτάσματος, αυτό μεταξύ άλλων περιλαμβάνει και τη βέλτιστη ανάκτηση του χρήσιμου συστατικού. Επεκτείνοντας την έννοια της ανάκτησης, σκοπός της επιλογής αυτών των μεθόδων είναι ο καλύτερος διαχωρισμός των φάσεων του κοιτάσματος που πέρα από το χρήσιμο-άγονο μπορεί να περιλαμβάνει τα σκληρά-μαλακά και γενικότερα όλα τα γεωυλικά τα οποία απαιτούν διαφορετική διαχείριση.

Οι λιγνίτες αυτού του τύπου αλλά και τα υπόλοιπα άγονα γεωυλικά εξορύσσονται με υπαίθρια εκμετάλλευση συνήθως κλειστής εκσκαφής με τη μέθοδο συνεχούς λειτουργίας. Για την εξόρυξη με αυτή τη μέθοδο στην εξεταζόμενη περίπτωση χρησιμοποιούνται εκσκαφείς καδοτροχού ενώ, για τη μεταφορά και την απόθεση χρησιμοποιούνται ταινιόδρομοι και αποθέτες αντίστοιχα. Με αυτόν τον εξοπλισμό διαχωρίζονται τα άγονα από τα λιγνιτικά στρώματα με αρκετή ακρίβεια αλλά κυρίως με μεγάλη παραγωγικότητα. Η εξόρυξη γίνεται παράλληλα με το μέτωπο προχώρησης της εκμετάλλευσης και αυτό το μέτωπο πραγματοποιεί μία στροφική ή μία παράλληλη προχώρηση. Αυτά τα χαρακτηριστικά είναι σημαντικά διότι καθορίζουν το σχήμα του block εκμετάλλευσης, το πλήθος και την έκταση των ελεύθερων επιφανειών του.

Τα ανόργανα ενδιάμεσα ιζήματα και οι σκληροί σχηματισμοί δυσχεραίνουν την εξόρυξη του λιγνίτη σε σημείο όπου δεν είναι εφικτό να εξορυχθούν ειδικά με σχετικά μικρούς εκσκαφείς καδοτροχού. Στη διατριβή αυτή διερευνάται η περίπτωση των σκληρών σχηματισμών των οποίων η συχνότητα εμφάνισης βαίνει συνεχώς αυξανόμενη τα τελευταία χρόνια στα Ευρωπαϊκά ορυχεία (Huss, 2015; Kavouridis et al., 2008). Αυτό συνεπάγεται ότι συχνότερα είναι αναγκαία η διακοπή της συνεχούς λειτουργίας και ανάλογα με την έκτασή τους απαιτείται η χρήση μεθόδων διαλείπουσας λειτουργίας όπως εκσκαφή με εκσκαφείς ανεστραμμένου πτύου, προχαλάρωση με διάτρηση και ανατίναξη, προχαλάρωση με προωθητές γαιών (girping) ή χρήση άλλων μέσων. Αυτή η εναλλαγή μεθόδων καθυστερεί την εκμετάλλευση και αυξάνει τον μη παραγωγικό χρόνο. Η ex ante γνώση της ύπαρξης αλλά και της έκτασης των σκληρών σχηματισμών βοηθά στον καλύτερο προγραμματισμό της παραγωγής με αποτέλεσμα να ελαχιστοποιούνται οι βλάβες και οι νεκροί χρόνοι.

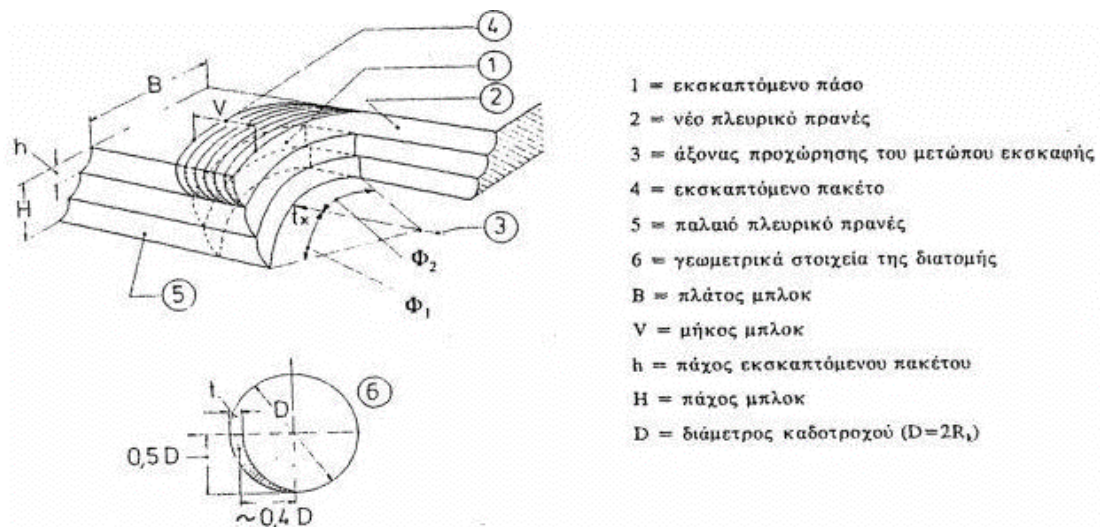
Σε αυτή την περίπτωση η διακινδύνευση υπολογίζεται από την πιθανότητα να συμβεί μία τέτοια αστοχία και σχετίζεται με την πιθανότητα ύπαρξης σκληρών ενώ η σοβαρότητα μίας αστοχίας μπορεί να προσδιοριστεί ημιποσοτικά ή και ποσοτικά ανάλογα με τον χρόνο που δεν λειτουργεί ο εκσκαφέας αλλά και το είδος του εξοπλισμού ο οποίος χρησιμοποιείται για την εξόρυξη.

#### 4.3.2. Οι παράμετροι της μεθόδου εξόρυξης και οι επιπτώσεις των αστοχιών της

Ενώ η μέθοδος εκμετάλλευσης καθορίζει τις γενικές κατευθύνσεις (στρατηγικές) για τον τρόπο λειτουργίας του εξοπλισμού η μέθοδος εξόρυξης καθορίζει τον ακριβή τρόπο λειτουργίας (τακτικές). Πιο αναλυτικά όσον αφορά την εξόρυξη με εκσκαφέα καδοτροχού ο βραχίονας του διαγράφει μία ημικυκλική τροχιά η οποία περιγράφεται από το τόξο ενός κύκλου στο οποίο υπάρχει επαφή με το μέτωπο και καθορίζεται από τις γωνίες  $\varphi_1$  και  $\varphi_2$  (Σχήμα 4.5). Αφού ολοκληρωθεί μία περιφορά έχει εξορυχθεί ένα πάσο, τότε ο εκσκαφέας προχωράει μερικές δεκάδες εκατοστά παράλληλα με τον άξονα πορείας του και το νέο πλευρικό πρηνές (Σχήμα 4.5). Αυτή η κίνηση αποτελεί την εντομή ( $t$ ) ή το βάθος κοπής.

Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου να μην μπορεί να προχωρήσει άλλο ο εκσκαφέας είτε, διότι ο βραχίονας συναντά το υποκείμενο πακέτο είτε, γιατί έχει δημιουργηθεί υποσκαφή από το υπερκείμενο πακέτο είτε, γιατί οι ερπύστριες προσέγγισαν το τελευταίο πακέτο. Όταν ολοκληρωθεί η εξόρυξη ενός πακέτου η ίδια διαδικασία ακολουθείται για το υποκείμενο πακέτο, όταν ολοκληρωθεί η εξόρυξή του τελευταίου πακέτου έχει εξορυχθεί ένα block. Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι κατά τη διάρκεια περιφοράς του βραχίονα το βάθος της εντομής δεν παραμένει ίδιο με αποτέλεσμα η πλήρωση των κάδων να μην είναι ίδια σε όλες τις γωνίες  $\varphi_1$  και  $\varphi_2$ . Η γεωμετρία του εξορυσσόμενου όγκου σε κάθε σημείο του μετώπου εξαρτάται από τις υπάρχουσες γωνίες και την εντομή. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η γωνία και μικρότερη η εντομή τόσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό αέρα στον κάδο κατά την εκσκαφή.

Ανάλογα με τη τακτική η οποία ακολουθείται κατά την εξόρυξη επιλέγονται διαφορετικοί παράμετροι λειτουργίας που έχουν το ίδιο παραγωγικό αποτέλεσμα. Αυτές οι τακτικές καθορίζουν αφενός τη μετρούμενη τιμή αγωγιμότητας όπως αναλύεται στην επόμενη υποενότητα αφετέρου, τη συχνότητα και τη σοβαρότητα των βλαβών και συνεπώς τον μη παραγωγικό χρόνο και το κόστος επιδιόρθωσης των βλαβών του εκσκαφέα. Καθώς υπάρχει μεγάλη αβεβαιότητα στον καθορισμό των παραμέτρων οι οποίες επηρεάζουν την αποδοτικότητα ενός εκσκαφέα, η εφαρμογή μεθόδων όπως αυτή της ασαφούς λογικής (Menegaki et al., 2019) μπορεί να αποτελέσει μία ενδιαφέρουσα λύση για αυτό τον σκοπό. Εδώ μελετώνται κυρίως ο ρόλος της αντίστασης στην κοπή και της ηλεκτρομηχανολογικής αξιοπιστίας. Έχει παρατηρηθεί ότι σε γεωλογικούς σχηματισμούς με μεγάλη αντίσταση στην κοπή και μεγάλης εξάπλωσης όπως οι σκληροί σχηματισμοί στο ορυχείο Νοτίου πεδίου στη Δυτική Μακεδονία, η εξόρυξή τους μειώνει την παραγωγικότητα των εκσκαφών καδοτροχού σε ποσοστά της τάξης του 10-15% (Roumpou et al., 2018).



Σχήμα 4.5: Μέθοδος εκλεκτικής εξόρυξης (Durst και Vogt, 1988; Γαλετάκης, 1996).

Ο καδοτροχός είναι το πρώτο σύνθετο εξάρτημα που έρχεται σε επαφή με το γεωλογικό σχηματισμό, γι' αυτό και έχει σημαντικές φθορές. Οι κάδοι του καδοτροχού και τα κοπτικά άκρα του (δόντια) φθείρονται με μεγαλύτερο ρυθμό όσο μεγαλύτερη είναι αντοχή των πετρωμάτων-ιζημάτων, αυτή η φθορά ρυθμίζεται κυρίως από τον τρόπο και την ταχύτητα προσβολής τους. Οι μηχανισμοί φθοράς των κοπτικών άκρων είναι (Παναγιώτου, 1989):

- Φθορά λόγω τριβής με τον σχηματισμό.
- Αποκόλληση μικροσκοπικών τεμαχίων μετάλλου.
- Αποκόλληση/θραύση μεγάλων τεμαχίων μετάλλου.
- Ρωγμάτωση του κοπτικού λόγω υπερθέρμανσης.

Επίσης στα υπόλοιπα εξαρτήματα του καδοτροχού υπάρχουν καταπονήσεις σχετικές με δονήσεις από περιοδικά μεταβαλλόμενα φορτία κτλ. τα οποία σε μεγάλο βαθμό εξαρτώνται από την πλήρωση των κάδων και τις μεταβολές στη μηχανική αντίσταση κατά την εξόρυξη σκληρών σχηματισμών (Andras et al., 2017, 2018; Huss, 2015). Όλες αυτές οι καταπονήσεις τελικά οδηγούν σε κόπωση των εξαρτημάτων, ιδιαίτερα αν υπάρχουν κατασκευαστικές ατέλειες η αστοχία τους γίνεται συχνότερη, η μελέτη τέτοιου τύπου αστοχιών απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή (Moczko et al., 2019).

Με παρόμοιους μηχανισμούς καταπονούνται και τα υπόλοιπα μέρη του εκσκαφέα αλλά με μικρότερη ένταση. Οι επιπτώσεις στα μηχανικά μέρη του εκσκαφέα είναι ένα σημαντικό κομμάτι της σοβαρότητας ενός τρόπου αστοχίας και περιγράφεται σε μεγάλο βαθμό από τις δαπάνες επιδιόρθωσης. Πέρα από το κεφαλαιουχικό κόστος το οποίο σχετίζεται με την κόπωση των υλικών υπάρχει και το λειτουργικό, σημαντική συνιστώσα σε αυτό είναι η ηλεκτρική ενέργεια (Lazăr et al., 2017). Η παράμετρος της ειδικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας κατά την εξόρυξη, επειδή αποτελεί το 60-90% της κατανάλωσης ενέργειας είναι σημαντικό να καταγράφεται (Nan et al., 2008). Το άλλο κομμάτι που συνθέτει το λειτουργικό κόστος σχετίζεται με τον προγραμματισμό παραγωγής και την παραγωγικότητα του εκσκαφέα. Βασικό βήμα σε αυτή τη διαδικασία είναι η καταγραφή της καταπόνησης του εκσκαφέα ώστε να προγραμματιστεί η συντήρησή του, αυτό μπορεί να γίνει με την εγκατάσταση αισθητήρων στην υπερδομή του εκσκαφέα (Alenowicz και Huss, 2017; Bajcar et al., 2018; Jiang et al., 2018; Risteiu et al.,

2017a, 2017b) αλλά και με την εφαρμογή άλλων μεθόδων παρακολούθησης οι οποίες λειτουργούν με διαλείποντα τρόπο (Andras et al., 2018; András et al., 2020; Risteiu et al., 2017c).

Οι παραπάνω παράμετροι της σοβαρότητας εξαρτώνται από την αντίσταση στην κοπή του εκάστοτε γεωυλικού. Ο έμμεσος προσδιορισμός της με μία μέθοδο γεωφυσικής διασκόπησης ή τηλεπισκόπησης και στη συνέχεια η συσχέτισή της καταγραφής με έναν δείκτη (RMR, Q κτλ.) είναι μία δύσκολη διαδικασία καθώς όσο σκληρότερο είναι το πέτρωμα τόσο ο τρόπος εξόρυξης βασίζεται στη θραύση του γεωυλικού παρά στη κοπή του. Επομένως υλικά με ισοδύναμες φυσικές ιδιότητες κατά τη διασκόπηση του μετώπου είναι πιθανόν να έχουν διαφορετικό τρόπο λύσης της συνέχειας τους.

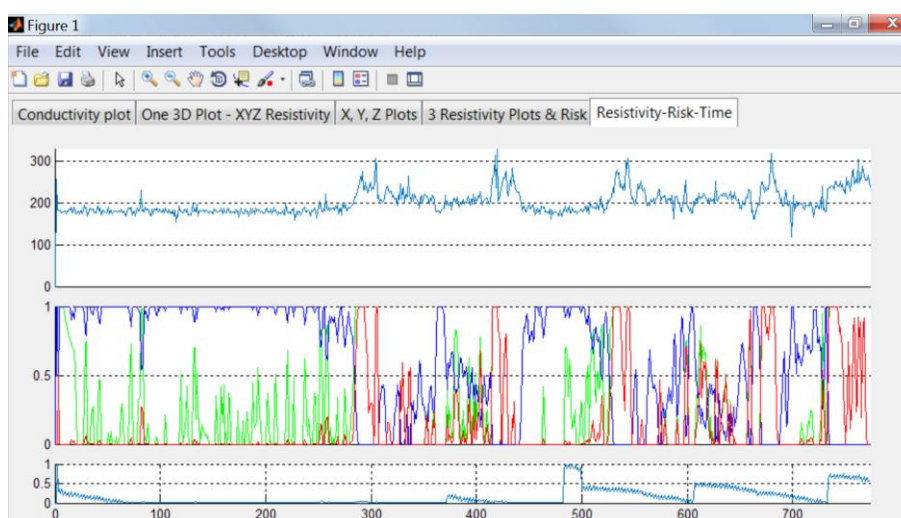
Ο τρόπος λύσης της συνέχειας του γεωυλικού έχει ιδιαίτερη σημασία διότι καθορίζει την ειδική κατανάλωση ενέργειας για την εξόρυξη, πιο συγκεκριμένα καθορίζει την κατανομή της ενέργειας η οποία δαπανάται για τη λύση της συνέχειας του γεωυλικού, τη μεταφορά του με το πτύο, την ενέργεια που διαχέεται στο περιβάλλον αλλά και την ενέργεια η οποία αποσβένεται στον εξοπλισμό. Η κατανομή της καταναλωθείσας ενέργειας και το απόλυτο μέγεθός της καθορίζουν έμμεσα και άμεσα τις λειτουργικές και κεφαλαιουχικές δαπάνες. Οι Machniak και Koziol (2017) δημιούργησαν μία μέθοδο εκτίμησης της αντίστασης στην κοπή η οποία βασίζεται στη θραύση του πετρώματος μετρώντας διάφορες ιδιότητες όπως τη σεισμική ταχύτητα. Με την εκτίμηση των παραπάνω δεδομένων των τριών παραμέτρων της διακινδύνευσης μπορεί να υπολογιστεί εκείνο το τμήμα της το οποίο σχετίζεται με τη μέθοδο εξόρυξης.

#### **4.3.3. Τα μέσα καταγραφής και διαχείρισης των δεδομένων και οι αστοχίες τους**

Αυτό το τμήμα του υποσυστήματος περιλαμβάνει τον υπολογιστή, τις μετρητικές διατάξεις και τη διασύνδεσή τους. Συνοπτικά η εγκατάσταση της διάταξης έγινε πάνω σε ένα στήριγμα (Σχήμα 4.6) το οποίο κατασκευάστηκε και ενσωματώθηκε στον βραχίονα (μπούμα) του εκσκαφέα, 7.5 m μακριά από τον καδοτροχό. Κατά την εξόρυξη ο αισθητήρας ανά χρονικό διάστημα 1s καταγράφει τις μετρήσεις και μέσω διασυνδέσεων, αυτές μεταφέρονται στον υπολογιστή και καταχωρούνται σε μία βάση δεδομένων (Σχήμα 4.7). Μετά την επεξεργασία των δεδομένων από το λογισμικό το οποίο αναπτύχθηκε, διαπιστώνεται η ύπαρξη ή όχι σκληρού σχηματισμού, αν υφίσταται προειδοποιείται ο χειριστής με κατάλληλο ηχητικό και οπτικό σήμα (Σχήμα 4.6), επίσης είναι δυνατή η αναπαράσταση των δεδομένων και των επεξεργασμένων δεδομένων εντός του λογισμικού (Σχήμα 4.7).

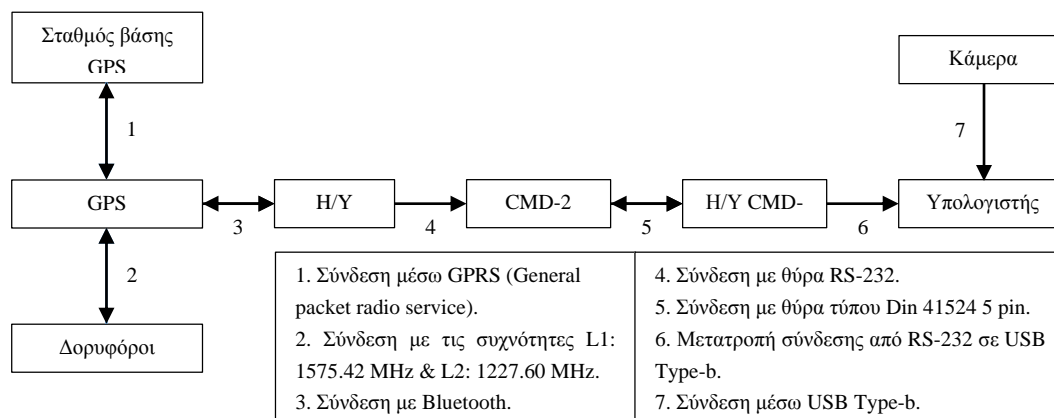


Σχήμα 4.6: Διεπαφή ανθρώπου υπολογιστή μαζί με κατάλληλες προειδοποιήσεις (Risk Panel), σε περίπτωση που υψηλές τιμές παραμένουν για πάνω από 5s αναδύεται ξεχωριστό μήνυμα. Επίσης στην εικόνα της κάμερας φαίνεται το μέτωπο εξόρυξης με το στήριγμα και τη μετρητική διάταξη.



Σχήμα 4.7: Απεικόνιση βάσης δεδομένων των καταγραφόμενων τιμών. Χρονοσειρά ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με μονάδες  $[\Omega m]$  επάνω. Χρονοσειρά διακινδύνευσης (κόκκινο) σύγκρουσης με σκληρά μαζί την πιθανότητα (πράσινο) και την αντίσταση στη κοπή (μπλε), όλα αυτά τα μεγέθη είναι αδιάστατα. Χρονική διάρκεια με μονάδες  $[s]$  εκτέλεσης υπολογισμών για κάθε καταγραφή (κάτω).

Αυτό το τμήμα του συστήματος περιλαμβάνει δύο βασικά μέρη το υλικό και το λογισμικό. Όσον αφορά τα υλικά μέρη σε αυτά περιλαμβάνονται οι διατάξεις, οι διασυνδέσεις (ασύρματες και ενσύρματες, Σχήμα 4.8) και τα υπολογιστικά συστήματα. Οι διατάξεις που χρησιμοποιούνται είναι η διάταξη τύπου CMD-2 αποτελούμενη από έναν πομπό και έναν δέκτη ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, μία κάμερα και έναν δέκτη GPS για τον προσδιορισμό των συντεταγμένων και του χρονικού στίγματος κάθε μέτρησης. Οι διασυνδέσεις αποτελούνται από τα καλώδια και τις κάρτες (adapters) των διασυνδέσεων με τα οποία αποστέλλονται τα δεδομένα στους περιφερειακούς και τελικά στον κεντρικό υπολογιστή, αναλυτικότερα ο τρόπος διασύνδεσης απεικονίζεται στο Σχήμα 4.8. Επίσης στα υλικά περιλαμβάνεται το υλικό (hardware) του υπολογιστή αλλά και αυτό που είναι ενσωματωμένο στους περιφερειακούς υπολογιστές των διατάξεων.



Σχήμα 4.8: Διασυνδέσεις μεταξύ των διατάξεων και του υπολογιστή.

Το λογισμικό περιλαμβάνει το λειτουργικό σύστημα του υπολογιστή (windows), την εφαρμογή σε περιβάλλον Matlab (HaRoR: Hard rock reconnaissance) η οποία έχει δύο λειτουργικές δυνατότητες όσον αφορά την επεξεργασία των δεδομένων (advance and simple) και τα λογισμικά των διατάξεων. Η εφαρμογή HaRoR μαζί με τον πίνακα ελέγχου του εκσκαφέα ουσιαστικά αποτελούν τη διεπαφή (GUI: Graphical user interface) για την αλληλεπίδραση ανθρώπου-αυτοματισμών. Όλοι οι αλγόριθμοι οι οποίοι δημιουργήθηκαν για την εφαρμογή ελέγχονται από τη διεπαφή της εφαρμογής. Αρχικά τα δεδομένα καταχωρούνται από τις διατάξεις στον Η/Υ και προεπεξεργάζονται για ακραίες τιμές. Επόμενο στάδιο είναι ο διαχωρισμός των δεδομένων σε διαφορετικές τροχιές ώστε να αντιπροσωπεύουν επάλληλα πάσα κατά την εξόρυξη, διαφορετικά πακέτα και διαφορετικά block. Εκτός από τον αυτοματοποιημένο διαχωρισμό των πάσων προστέθηκε μία δυνατότητα για χειροκίνητο διαχωρισμό κατά την εξόρυξη ώστε σε περίπτωση μη διαθεσιμότητας του δέκτη του GPS να είναι εφικτός ο ex post διαχωρισμός των δεδομένων.

Οι αστοχίες αυτών των τμημάτων του συστήματος σχετίζονται με τη μη λειτουργία των υλικών τμημάτων του συστήματος και την μη αποδοτική λειτουργία του λογισμικού. Όσον αφορά τις αστοχίες, των υλικών των διατάξεων οφείλονται είτε στην απόσπαση τμήματος του μετώπου και επομένως την αστοχία κάποιου τμήματος του συστήματος είτε στην αστοχία των στηριγμάτων με αποτέλεσμα να αποσπαστούν από το σώμα του εκσκαφέα οι διατάξεις. Η πρώτη περίπτωση είναι σπάνια αφενός, λόγω της περιορισμένης διάρκειας της δοκιμαστικής λειτουργίας σε σχέση με την πραγματική αφετέρου, λόγω της εξόρυξης με μικρή εντομή και αργή περιφορά του καδοτροχού και του βραχίονα κατά τη δοκιμή αυτή. Σε κάθε περίπτωση κατασκευάστηκε προστατευτικό κάλυμμα το οποίο μειώνει τις φθορές από αποσπάσεις τεμαχίων από το πρανές (Σχήμα 4.9 και Σχήμα 4.10). Η δεύτερη περίπτωση είναι και η πιο πιθανή καθώς τα στηρίγματα (Σχήμα 4.9) είναι πρόσθετα εξαρτήματα στον εκσκαφέα και λόγω των δυσμενών συνθηκών στο μέτωπο εξόρυξης αυξάνεται η κόπωση σε αυτά, συνεπώς είναι πιθανό να αστοχήσουν (Σχήμα 4.10 και Σχήμα 4.11).





Σχήμα 4.9: Στήριγμα διατάξεων τοποθετημένο πάνω στον βραχίονα του εκσκαφέα. Διακρίνεται επίσης η μικρή απόσταση της διάταξης από το πρανές.



Σχήμα 4.10: Διάταξη τύπου CMD-2 εντός του προστατευτικού καλύμματος και της α-στοχία βάσης του δέκτη του GPS.



Σχήμα 4.11: Νέα θέση του δέκτη του GPS μετά την αστοχία του στηρίγματος.

Αυτή η πιθανότητα σχετίζεται άμεσα με την ύπαρξη σκληρών σχηματισμών και εντάσσεται στο πλαίσιο ανάλυσης της προηγούμενης υποενότητας. Οι αστοχίες των διασυνδέσεων είναι το πιο τρωτό σημείο του συστήματος καθώς υπάρχει μεγάλη πιθανότητα αστοχίας των ασύρματων διασυνδέσεων οι οποίες εμφανίζονται ως παρεμβολές ή ασθενές σήμα από το σταθμό βάσης. Αυτή η διεργασία παραγωγής σφαλμάτων είναι στοχαστική και είναι ο μοναδικός τύπος αστοχίας ο οποίος αναλύεται και δεν εξαρτάται από τη γεωλογία. Η πιστοποίηση ότι τα δεδομένα των συντεταγμένων είναι εντός των προδιαγραφών είναι εξαιρετικά σημαντικό να εξακριβώνεται καθώς όπως αναλύθηκε είναι βασικό στοιχείο προσδιορισμού της απόστασης μετώπου-διάταξης άρα και της διαδικασίας της διασκόπησης.

Επίσης υπάρχει περίπτωση αστοχίας των εξαρτημάτων των υπολογιστών αφενός λόγω πιθανής πτώσης ή σύγκρουσης αφετέρου λόγω της εισαγωγής μεγάλης ποσότητας αιωρούμενων σωματιδίων στη μονάδα. Παρά τη μικρή πιθανότητα μίας τέτοιας αστοχίας η σοβαρότητα είναι εξαιρετικά μεγάλη γι' αυτό χρειάζεται να ληφθούν μέτρα.

Τέλος τα λογισμικά τόσο του H/Y όσο και των διατάξεων είναι εξαιρετικά απίθανο να μην λειτουργήσουν καθώς είναι εμπορικά λογισμικά τα οποία δοκιμάζονται καθημερινά για εκτεταμένο χρονικό διάστημα. Όσον αφορά την εφαρμογή λογισμικού HaRoR, πραγματοποιήθηκαν πολλές δοκιμές και προσομοιώσεις ώστε να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα μη λειτουργίας της.

Σε αυτή τη φάση του κύκλου ζωής του συστήματος επιλέχθηκε να μην γίνει ανάλυση σε πιο απλές δομικές μονάδες (συγκεκριμένα εξαρτήματα του υπολογιστή, τμήματα των αλγορίθμων) γιατί αυτό κάνει εξαιρετικά πολύπλοκη την ανάλυση.

Ο άνθρωπος παράγοντας αποτελεί ένα ξεχωριστό «υποσύστημα» καθώς σφάλματα του χειριστή και οι επιπτώσεις τους, σωματικές και συμπεριφορικές, επηρεάζουν αυτόν και την εξορυκτική διαδικασία. Στη διατριβή αυτή αναλύονται μόνο οι «εργασίες» του χειριστή οι οποίες σχετίζονται με την παρατήρηση. Όσο αυξάνεται η περιπλοκότητα της γεωλογίας του κοιτάσματος αλλά και όσο πιο αυτοματοποιημένο είναι ένα σύστημα οι προειδοποιήσεις αυξάνονται. Αυτό συμβαίνει διότι απαιτούνται περισσότερες διατάξεις για να απεικονισθεί το μέτωπο ενώ και το ίδιο το σύστημα παράγει περισσότερες προειδοποιήσεις λόγω της αυτοματοποίησης. Ο αυξημένος αριθμός προειδοποιήσεων μειώνει την επίγνωση της κατάστασης και αυξάνει τον φόρτο εργασίας του χειριστή με αποτέλεσμα τελικά την αυξημένη πιθανότητα πρόκλησης βλαβών και ακολούθως την αύξηση της διακινδύνευσης σε τέτοια αυτοματοποιημένα συστήματα.

#### **4.4.Υποσυστήματα λήψης αποφάσεων και προσομοίωσης**

Το στάδιο λήψης αποφάσεων έχει μία ιδιαιτερότητα όσον αφορά τον σχεδιασμό και τη λειτουργία του συστήματος. Κατά τη λειτουργία το στάδιο αυτό είναι αυτοτελές και το τρίτο που συναντάται χρονικά σε ένα αυτοματοποιημένο σύστημα. Ωστόσο κατά τον σχεδιασμό η προετοιμασία της εκάστοτε μεθόδου διακινδύνευσης απαιτεί να υπεισέλθει σε όλα τα στάδια προκειμένου να χαρακτηριστούν τα «εξαρτήματα» με τη διακινδύνευση. Αυτό τελικά δημιουργεί αναδρομικές σχέσεις στο σύστημα διότι ενώ αναλύονται, για παράδειγμα οι ενόργανες διατάξεις, παρεμβάλλεται η εκτίμηση της διακινδύνευσης κάτι το οποίο περιπλέκει την ανάλυση.



Η εκτίμηση της διακινδύνευσης έχει ήδη αναλυθεί ενώ η ακριβής εφαρμογή της στο εξεταζόμενο σύστημα παρουσιάζεται παρακάτω γι' αυτό δεν πραγματοποιείται περαιτέρω ανάλυση στο σημείο αυτό.

Η υποστήριξη του επιτελικού ρόλου του χειριστή στα αυτοματοποιημένα συστήματα υλοποιείται μέσω της εκτίμησης της διακινδύνευσης με δύο τρόπους. Αφενός παράγονται δύο ειδών σήματα, το ένα αφορά προειδοποιήσεις για μία επικείμενη σύγκρουση και το άλλο ενημερωτικά μηνύματα με προτεινόμενες τακτικές και ελιγμούς ως μέτρα δράσης για την ορθότερη εξόρυξη. Κατά την ερευνητική φάση παράχθηκαν προειδοποιήσεις του πρώτου σήματος με βάση την υπολογιζόμενη τιμή της διακινδύνευσης. Όταν αυτή υπερβεί το όριο του 60% ενεργοποιείται ο συναγερμός. Στο επόμενο κεφάλαιο προτείνεται μία μεθοδολογία παραγωγής προτάσεων για τη βελτίωση της εξόρυξης σε πραγματικό χρόνο.

Το υποσύστημα προσομοίωσης αφορά αφενός τη διαδικασία ερμηνείας-πρόβλεψης των καταγραφών, αφετέρου τον υπολογισμό των συντεταγμένων του «δείγματος» κάθε καταγραφής. Η ερμηνεία των τιμών αγωγιμότητας των γεωυλικών προκύπτει από το χαρακτηρισμό των τριών παραμέτρων με δεδομένα από το μέτωπο, πιο συγκεκριμένα:

- της πιθανότητας σύγκρουσης με σκληρούς σχηματισμούς η οποία αντιστοιχεί στη συχνότητα εμφάνισης του σκληρού ή μαλακού, και υπολογίζεται από τη βραχυπρόθεσμη μεταβλητότητα της μετρούμενης αγωγιμότητας (Galetakis et al., 2018a).
- της σοβαρότητας η οποία αντιστοιχεί στην αντίσταση κοπής, δηλαδή στη δυσκολία εξόρυξης ή αντίθετα στην εκσκαψιμότητα και υπολογίζεται από το απόλυτο μέγεθος της μετρούμενης αγωγιμότητας (Galetakis et al., 2018a).
- της ανιχνευσιμότητας η οποία υπολογίζεται εκ των υστέρων από τις καμπύλες ευαισθησίας της διάταξης και αφορά την ακρίβεια της μέτρησης των προηγούμενων.

Στη συνέχεια υπολογίζεται η διακινδύνευση ως γινόμενο των δύο πρώτων, με τον πολλαπλασιασμό του τρίτου προκύπτει ο RPN. Καθώς οι οπτικές καταγραφές και οι καταγραφές θέσης δεν πραγματοποιούνταν σε πραγματικό χρόνο, η σύνθεση του συνόλου των δεδομένων πραγματοποιήθηκε σε δεύτερο χρόνο όπου και έγινε μία ολοκληρωμένη ερμηνεία της γεωολογικής εικόνας του block.

Μία χωρική πρόβλεψη κατ' αρχήν απαιτεί τον προσδιορισμό της έκτασης του χώρου στον οποίο αυτή αναφέρεται. Αυτός ο χώρος στην εξεταζόμενη περίπτωση αποτελεί ταυτόχρονα ένα και εξάρτημα-δομική μονάδα (assembly, part, component) του συστήματος. Περιλαμβάνεται σε ένα ακανόνιστο ογκοστοιχείο (voxel) το οποίο δημιουργείται κάθε φορά όπου υπάρχει αστοχία όπως αυτή προηγούμενως ορίστηκε. Το μέγεθος του ογκοστοιχείου καθορίζεται από το διάστημα το οποίο αυτή η ανωμαλία διαρκεί και το περιεχόμενο του προβλέπεται από τις προηγούμενες καταγραφές.

Σε αυτή τη φάση της δοκιμαστικής λειτουργίας κύριος στόχος είναι να τεκμηριωθεί η δυνατότητα εφαρμογής της μεθοδολογίας και όχι να πραγματοποιηθεί ακριβής πρόβλεψη των τιμών. Επομένως δεν χρησιμοποιούνται υπολογιστικά απαιτητικές μέθοδοι όπως η αντιστροφή για την πρόβλεψη της αγωγιμότητας. Αντίθετα πραγματοποιείται μία βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη βάσει ενός μικρού αριθμού (20) παρελθόντων τιμών-δειγμάτων (Galetakis et al., 2018a).

## 4.5. Υποσύστημα μετώπου–μετρητικής διάταξης

Στην ενότητα αυτή περιγράφεται το πρώτο υποσύστημα, το οποίο αφορά την αλληλεπίδραση μετρητικής διάταξης-μετώπου. Πιο συγκεκριμένα αναλύονται αφενός, η συμπεριφορά του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου αφετέρου, η στρατηγική της δειγματοληψίας του για την καταγραφή της ιδιότητας της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Αυτοί οι δύο παράγοντες περιγράφουν μερικώς το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο το οποίο αποτυπώνεται στην πράξη με τις καταγραφόμενες τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Δηλαδή δεν αναλύονται τα υλικά και άυλα μέσα τα οποία χρησιμοποιούνται για την καταγραφή, αλλά παρουσιάζεται η θεωρητική συμπεριφορά του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου όπως πειραματικά διαπιστώνεται κατά την αλληλεπίδραση αυτών των μέσων.

Ο μηχανισμός δράσης τριών παραμέτρων παρουσιάζεται στις παρακάτω υποενότητες προκειμένου να διαπιστωθεί ο τρόπος με τον οποίο διαμορφώνεται η καταγραφόμενη τιμή της αγωγιμότητας. Στην Υποενότητα [4.5.1] περιγράφεται ο ρόλος της γεωλογίας. Στην Υποενότητα [4.5.2] παρουσιάζονται οι επιδράσεις από τα χαρακτηριστικά της διάταξης. Στην Υποενότητα [4.5.3] αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο επιδρούν οι μεταλλευτικές παράμετροι.

### 4.5.1. Η επίδραση των γεωλογικών παραμέτρων στη μέτρηση

Η ειδοποιός διαφορά σε αυτή την περίπτωση είναι ότι οι ιδιότητες δεν τροποποιούνται κατά την εξόρυξη αλλά παραμένουν σταθερές. Συνεπώς δεν είναι δυνατό να κάνουν πιο αποδοτικό το ίδιο το σύστημα εξόρυξης ωστόσο μπορεί με την καλύτερη περιγραφή τους να βελτιώσουν την εξορυκτική διαδικασία. Οι σημαντικότερες γεωλογικές παράμετροι, όπως αποτυπώθηκαν κατά τη δοκιμαστική λειτουργία είναι:

- Το πλήθος των σκληρών σχηματισμών.
- Η θέση των σκληρών σχηματισμών στο μέτωπο.
- Το μέγεθος, το σχήμα και η ανομοιογένεια των ιδιοτήτων των σχηματισμών.



Σχήμα 4.12: Τοποθέτηση σκληρών σχηματισμών στη βαθμίδα



Σχήμα 4.13: Η θέση των σκληρών (πάσσαλοι) στη βαθμίδα κατά την εκσκαφή.



Σχήμα 4.14: Σκληρός σχηματισμός τοποθετημένος πριν την ταφή.



Σχήμα 4.15: Ψευδοσκληρός σχηματισμός ο οποίος επηρεάζει τις μετρήσεις.

Όσον αφορά το πλήθος οι σκληροί σχηματισμοί που συναντώνται είναι ο πραγματικός σκληρός ο οποίος τοποθετήθηκε στο μέτωπο και οι ψευδοσκληροί σχηματισμοί. Στο εξεταζόμενο μέτωπο υπάρχει ένας μόνο σκληρός σχηματισμός του οποίου η θέση ταφής διακρίνεται στο Σχήμα 4.12, στο Σχήμα 4.13 και στο Σχήμα 4.14. Η ερμηνεία των δεδομένων από αυτή τη σκοπιά είναι απλή γιατί δεν ανέκυψαν άλλοι σκληροί σχηματισμοί πολύ κοντά σε αυτόν ώστε να αλλοιώσουν την εικόνα βραχυπρόθεσμα. Υπήρξαν ωστόσο ψευδοσκληροί σχηματισμοί, σε μικρότερη από τη δραστική εμβέλεια του αισθητήρα οι οποίοι επηρέαζαν τη μετρούμενη αγωγιμότητα (Σχήμα 4.15) όμως λόγω της μεθόδου πρόβλεψης δεν επηρεάζουν το αποτέλεσμα της πρόβλεψης.

Η θέση ενός σχηματισμού καθορίζει την απόσταση του από τη διάταξη αλλά και την απόσταση του από άλλους σχηματισμούς, εικονικούς ή πραγματικούς. Όσον αφορά τη δεύτερη περίπτωση ενδέχεται, αν βρίσκονται σε κοντινή μεταξύ τους απόσταση, να είναι ανέφικτος ο διαχωρισμός τους στο καταγραφόμενο σήμα. Ειδική περίπτωση είναι η εγγύτητα του πραγματικού σκληρού σχηματισμού σε ένα «εικονικό» όπως τις ελεύθερες επιφάνειες του μετώπου με την ατμόσφαιρα οι οποίες διαμορφώνονται κάθε στιγμή κατά την εξόρυξη. Τότε «κρύβεται» ο σκληρός σχηματισμός και είναι δυσκολότερο να ανιχνευτεί. Στη συγκεκριμένη περίπτωση ο σκληρός σχηματισμός τοποθετήθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να σταθμιστούν τρεις παράγοντες.

Πρώτον να μην υπάρξει έντονη διαταραχή κατά την εκσκαφή του σχηματισμού. Δεύτερον να είναι στο κέντρο του εκσκαπτόμενου πακέτου ώστε η ακτίνα του τριαξονικού ελλειψοειδούς να είναι μέγιστη ώστε να ανιχνευθεί νωρίτερα ο σκληρός. Τρίτον να διατηρηθεί μία απόσταση της τάξης των 7-8 m ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι επιδράσεις από άλλους σκληρούς σχηματισμούς το οποίο επετεύχθει με τη χαρτογράφηση της βαθμίδας πριν την εκσκαφή.

Οι ποσοτικές και ποιοτικές ιδιότητες του εκάστοτε σκληρού σχηματισμού έχουν ιδιαίτερη σημασία γιατί καθορίζουν το μέγεθος της αβεβαιότητας, η οποία δημιουργείται κατά τη διασκόπηση. Οι ποιοτικές διαφοροποιήσεις στις ιδιότητες των γεωυλικών, το σχήμα και το μέγεθος των σχηματισμών και η γεωμετρία του μετώπου όπως απεικονίζονται στο Σχήμα 4.16. Όσον αφορά το είδος του σκληρού σχηματισμού είναι ασβεστολιθικής σύστασης και έχει ωοειδή μορφή (Σχήμα 4.14), η ηλεκτρομαγνητική ανωμαλία την οποία δημιουργεί αποτυπώνεται στο Σχήμα 4.17. Όσον αφορά τους ψευδοσκληρούς σχηματισμούς έχουν φακοειδές σχήμα και αποτελούνται από καστανέρυθρη άργιλο με υψηλό ποσοστό χαλίκων. Τέλος οι περιβαλλοντικές διαφοροποιήσεις στο εγγύτερο μετεωρολογικό σταθμό εικονίζονται στο Σχήμα 4.18 ενώ, οι επιπτώσεις του αέρα αναλύονται στην επόμενη υποενότητα.





Σχήμα 4.16: Απεικόνιση μετώπου πριν τη διασκόπηση.



Σχήμα 4.17: Καταγραφή ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (επάνω) για το πάσο 25R0 όπως αποτυπώνεται στο Σχήμα 4.15 και παράμετροι διακινδύνευσης (κάτω).

## MONTHLY CLIMATOLOGICAL SUMMARY for MAY. 2018

NAME: Notio

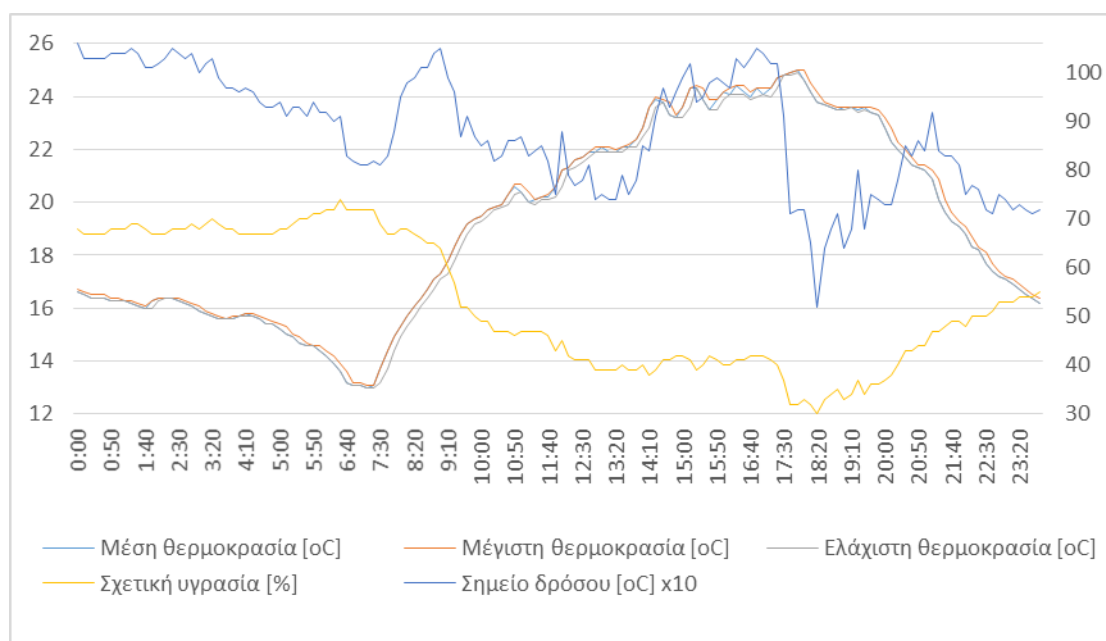
ELEV: 760 m

LAT: 40deg 30min

LONG: 21deg 48min

TEMPERATURE (°C), RAIN (mm), WIND SPEED (km/hr)

DAY	MEAN TEMP	HIGH	TIME	LOW	TIME	MAX RH	MIN RH	RAIN	AVG WIND SPEED	HIGH	TIME	DOM DIR
01	18.5	26.3	17:40	11.1	07:00	80	31	0.0	2.0	20.9	16:30	NE
02	18.8	25.2	14:40	12.3	07:10	81	36	0.0	2.5	25.7	13:10	SE
03	16.8	21.1	17:40	12.9	06:10	75	47	0.0	3.7	29.0	17:40	ESE
04	18.8	24.2	15:10	12.3	06:50	81	41	0.0	2.9	19.3	19:00	SE
05	15.2	18.2	00:00	12.5	23:10	88	62	2.0	1.8	20.9	11:20	NNW
06	14.1	21.0	16:40	11.4	05:10	92	59	20.6	3.9	22.5	10:00	NNW
07	15.2	20.8	15:50	12.6	06:40	91	63	8.6	4.7	33.8	01:50	NNW
08	15.0	18.7	17:20	12.4	05:30	92	64	0.2	1.0	20.9	13:10	SE
09	15.2	21.4	18:40	11.4	03:30	91	53	18.6	1.9	32.2	20:10	NW
10	12.8	16.8	17:40	10.7	04:00	92	68	5.4	2.4	27.4	10:30	N
11	15.4	19.5	13:40	11.8	03:00	89	55	0.0	4.3	29.0	12:50	NNW
12	16.9	22.9	15:20	11.4	07:00	85	39	0.0	2.0	17.7	14:20	NE
13	16.4	22.7	13:40	10.9	06:50	88	45	9.2	2.1	24.1	20:00	NNE
14	16.8	22.4	13:20	11.2	07:00	88	49	0.6	1.8	32.2	15:30	ENE
15	17.7	21.4	13:10	14.1	05:10	85	50	1.2	3.4	24.1	15:10	SE
16	18.5	23.7	14:50	13.6	06:40	85	40	0.0	3.4	22.5	12:50	ESE
17	19.2	25.0	17:50	13.0	07:10	74	30	0.0	2.4	27.4	14:20	SE
18	16.7	23.6	13:00	11.9	06:40	86	42	2.4	2.8	27.4	14:40	NE
19	15.8	21.0	17:30	12.3	02:50	89	60	0.0	4.3	20.9	09:40	NNW
20	17.0	24.1	14:00	13.3	21:50	91	49	24.6	3.6	25.7	19:30	N
21	15.4	19.6	18:00	12.4	06:40	93	68	0.8	0.4	11.3	16:00	SE
22	18.6	25.1	17:50	12.9	06:30	84	46	0.8	1.5	19.3	13:30	ESE
23	17.2	22.1	12:20	14.1	06:20	91	59	9.2	1.2	19.3	13:50	SE
24	16.5	21.1	15:20	12.4	06:40	93	58	0.4	2.7	20.9	14:40	N
25	18.0	24.4	15:10	13.0	04:10	87	41	0.0	3.2	19.3	09:40	N
26	19.7	25.8	18:30	13.9	04:40	78	25	0.0	3.1	25.7	12:40	ENE
27	19.2	25.1	17:50	14.0	06:40	77	44	0.6	3.3	33.8	15:30	N
28	18.9	24.6	15:00	13.2	07:00	86	49	0.4	1.8	27.4	15:10	NNE
29	19.2	24.8	17:00	15.9	04:30	87	52	0.0	2.3	17.7	10:20	SE
30	19.5	25.1	14:30	13.5	07:00	80	41	1.2	1.7	17.7	11:30	NE
31	20.1	25.4	13:50	14.2	06:30	83	44	0.0	2.0	22.5	12:50	ENE
<hr/>												
	17.2	26.3	1	10.7	10	85.9	48.7	106.8	2.6	33.8	7	SE



Σχήμα 4.18: Μετεωρολογικά δεδομένα Μαΐου (πάνω). Μέση θερμοκρασία και υγρασία ανά 10 min για την 17/05/2018 (κάτω) από το σταθμό του Νοτίου Πεδίου (Lagounardos et al., 2017). Ο νετός των 15 προηγούμενων ημερών ήταν 68.4 mm.

#### 4.5.2. Η επίδραση των παραμέτρων της μετρητικής διάταξης στις καταγραφές

Με τη ρύθμιση των παραμέτρων της διάταξης είναι δυνατό να ελαχιστοποιηθούν οι αβεραιότητες που εμφανίζονται στις καταγραφές προκειμένου η γεωλογική δομή να αποτυπωθεί ευκρινώς. Τρεις είναι οι κατηγορίες παραμέτρων οι οποίες είναι δυνατό να τροποποιηθούν:

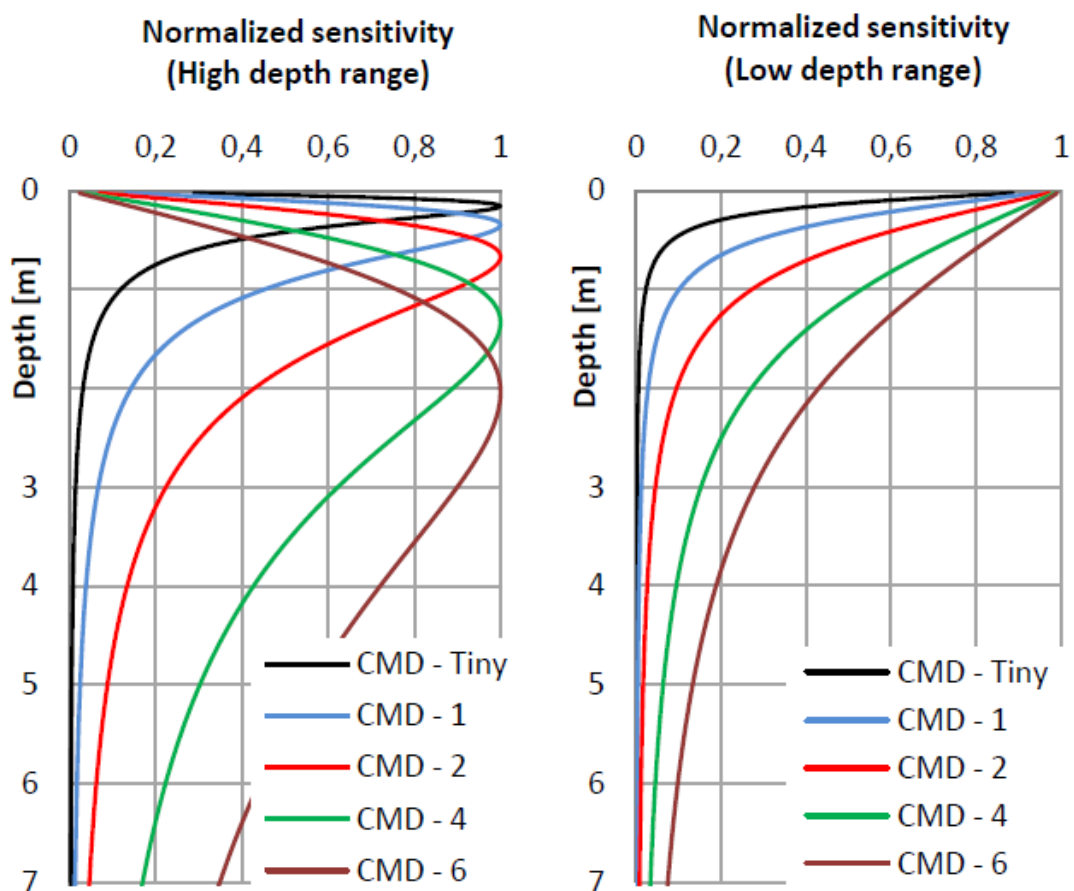
- η θέση και η απόσταση του οργάνου από το μέτωπο,
- η στερεή γωνία με το μέτωπο και
- οι παράμετροι που αφορούν τον πομπό και τον δέκτη.
  - Η διάταξη πομπού-δέκτη,
  - η απόσταση πομπού-δέκτη και
  - η συχνότητα εκπομπής.

Μία ποιοτική ανάλυση των παραμέτρων πομπού-δέκτη παρουσιάστηκε στην Ενότητα 2.4, εδώ πραγματοποιείται η ανάλυση της συγκεκριμένης διάταξης η οποία χρησιμοποιήθηκε. Η ενόργανη διάταξη τύπου CMD-2 (Σχήμα 4.19) της εταιρείας Geonics λειτουργεί στη συχνότητα 9,8 kHz και όταν η διεύθυνση των πηνίων είναι ομοεπίπεδη (high depth range) και ο υπό μελέτη σχηματισμός έχει ειδικές αγωγιμότητες, τάξης μεγέθους των 20 mS/m, το βάθος διασκόπησης φτάνει τα 6 m (Σχήμα 4.20). Αναλυτικότερα στο Σχήμα 4.20 παρουσιάζονται οι θεωρητικές καμπύλες λειτουργίας της διάταξης. Οι βασικότεροι παράμετροι λειτουργίας βάσει των στοιχείων του κατασκευαστή είναι:

- Ελάχιστη ταχύτητα καταγραφής: 0.1 s.
- Μέγιστη καταγραφόμενη αγωγιμότητα: 1000 mS/m, με ανάλυση 0.1 mS/m.
- Μέγιστη μέτρηση της εντός φάσης συνιστώσα:  $\pm 80$  ppt, με ανάλυση 10 ppm.
- Ακρίβεια μέτρησης:  $\pm 4\%$  στα 50 mS/m.
- Επίδραση της θερμοκρασίας:  $\pm 0.1$  mS/m/ $^{\circ}\text{C}$ .
- Απόσταση μεταξύ πηνίων: 1.89m.
- Θερμοκρασία λειτουργίας:  $-10^{\circ}\text{C}$  to  $+50^{\circ}\text{C}$ .



Σχήμα 4.19: Μετρητική διάταξη τύπου CMD-2 μαζί με το κάλυμμα, κατά τη διάρκεια διασκόπησης.



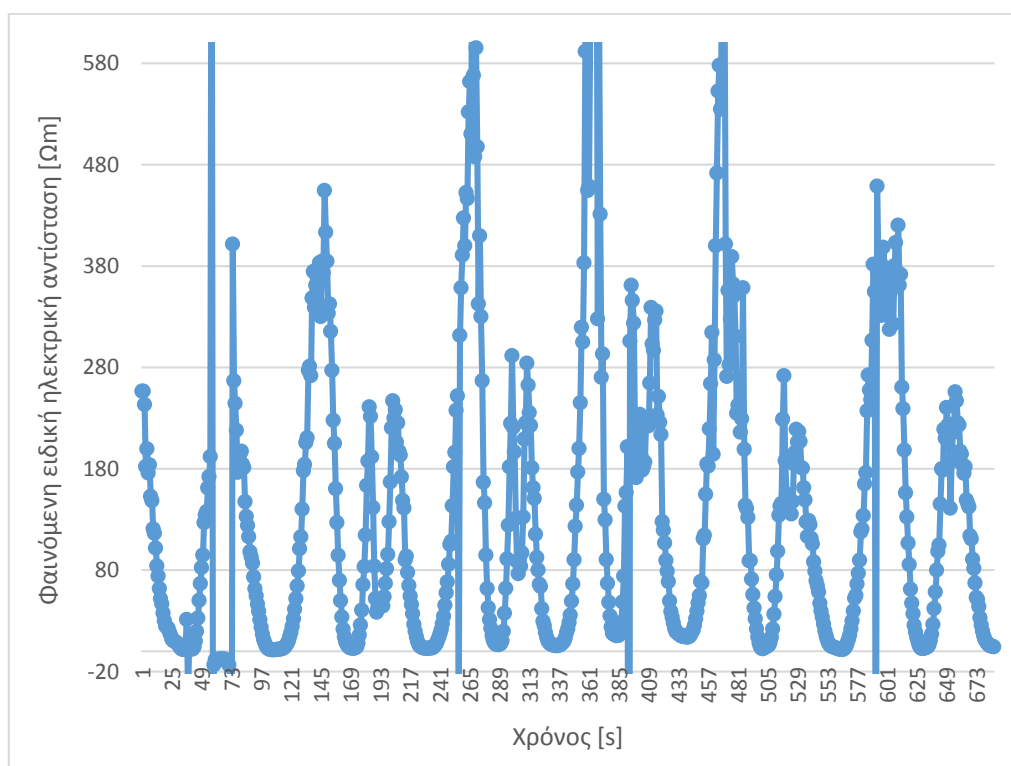
Σχήμα 4.20: Ευαισθησία μετρητικών διατάξεων για διάφορες διευθύνσεις πηνίων της εταιρείας Geonics.

Προκειμένου να μετρηθεί πειραματικά, η παραπάνω θεωρητικά υπολογισμένη, επίδραση της απόστασης από το μέτωπο στη δραστική ακτίνα της διάταξης πραγματοποιήθηκαν τρεις δοκιμές μία εκτός ορυχείου και δύο εντός, με εγκατεστημένη τη διάταξη πάνω στον εκσκαφέα. Όσον αφορά την πρώτη περίπτωση πραγματοποιήθηκε μία δοκιμή πάνω από έναν πεζόδρομο κάτω από τον οποίο διέρχονται υποδομές όπως καλώδια και σωλήνες και πλευρικά αυτών υπάρχουν σχηματισμοί υψηλότερης αγωγιμότητας. Οι γεωλογικές συνθήκες αυτές είναι αντίθετες με αυτές υπάρχουν στο ορυχείο όπως έχει αναλυθεί. Παρά αυτές τις διαφορές εξάγονται σημαντικά συμπεράσματα σχετικά με τη βέλτιστη απόσταση από την ελεύθερη επιφάνεια κατά τη διασκόπηση.

Η πρώτη παρατήρηση σχετίζεται με την αύξηση της απόστασης κατά 1.6 m από το έδαφος. Με αυτό τον τρόπο αυξάνεται το ποσοστό αέρα στο ελλειψοειδές, αυξάνονται οι ελάχιστες μετρούμενες αντιστάσεις περίπου 10 Ωm, αυξάνεται η μέγιστη μετρούμενη αντίσταση κατά δύο τάξεις μεγέθους και οι ελάχιστες αντιστάσεις κατά μία τάξη μεγέθους (Σχήμα 4.21 και Πίνακας 4.1). Επίσης παρατηρείται ότι μειώνεται η διακριτική ικανότητα του αισθητήρα είτε γιατί παραμένει σταθερή η εμβέλεια (ίδιο βάθος) αλλά με μικρότερη ευαισθησία είτε γιατί η εμβέλεια μειώνεται και αυξάνεται η ευαισθησία. Σε κάθε περίπτωση ρόλο έχει και η βαθμονόμηση η οποία έχει πραγματοποιηθεί για συγκεκριμένη απόσταση από το έδαφος.



Το γεγονός ότι οι τέσσερις διαδοχικές μετρήσεις πάνω στην ίδια γραμμή όδευσης είναι διαφορετικές φανερώνει ότι η ηλεκτρομαγνητική ανωμαλία από την επίδραση της διαφορετικής απόστασης από την ελεύθερη επιφάνεια είναι σημαντική με αποτέλεσμα οι μετρούμενες τιμές να χρειάζονται διόρθωση. Αν αυτή πραγματοποιηθεί με τους θεωρητικούς υπολογισμούς (Σχήμα 4.20) τότε η απόκλιση μειώνεται σημαντικά (Πίνακας 4.1). Μία άλλη επιλογή είναι η διόρθωση με εμπειρικούς συντελεστές κάτι το οποίο απαιτεί ένα μεγάλο αρχείο διαφορετικών καταγραφών. Καθώς δεν υπάρχει μία διάταξη που να καταγράφει την απόσταση μεταξύ κάδου-μετώπου σε πραγματικό χρόνο μία τέτοια διόρθωση μπορεί να εφαρμοστεί μόνο εκ των υστέρων.

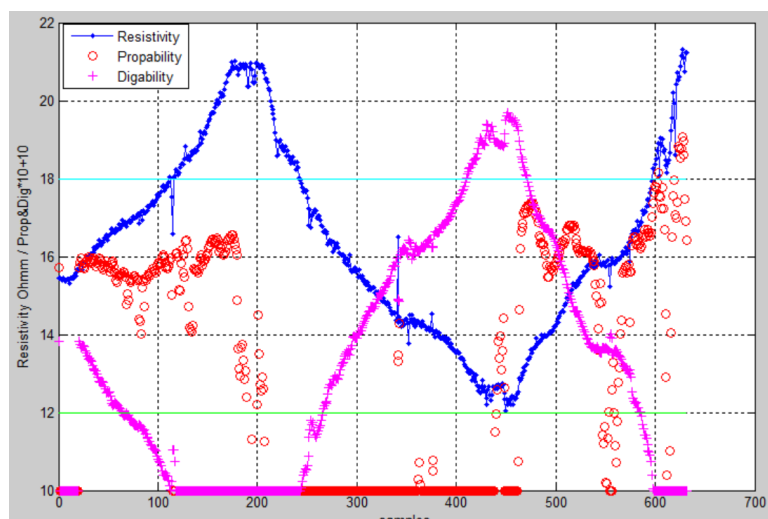


Σχήμα 4.21: Δεδομένα από τις καταγραφές από τη δοκιμή εκτός του ορυχείου. Οι μετρήσεις στον Πίνακα 4.1 ορίζουν και τις τελευταίες μετρήσεις για τις τέσσερις πρώτες χρονοσειρές.

Πίνακας 4.1: Επίδραση της απόστασης διάταξης μετώπου στη μετρούμενη τιμή και ο συντελεστής διόρθωσής της.

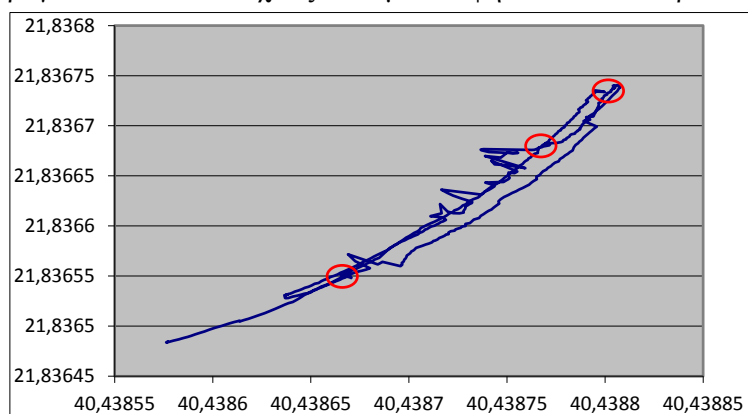
Αριθμός μέτρησης	Αριθμός πειράματος	Απόσταση από το έδαφος	Αντίσταση	Συντελεστής απόστασης	Διορθωμένη αντίσταση
[-]	[-]	[m]	[Ωm]	[-]	[Ωm]
110	1	0.5	1.4	0.9	1.3
230	2	1.05	2.8	0.85	2.4
340	3	1.5	5.4	0.6	3.2
440	4	2.1	13.7	0.375	5.1





Σχήμα 4.22: Πειραματικά δεδομένα από την πρώτη δοκιμή στο ορυχείο Νοτίου πεδίου.

Όσον αφορά τις δοκιμές στο ορυχείο στην πρώτη δοκιμή έγιναν τρεις περιστροφές του βραχίονα ενώ η δεύτερη και τελική δοκιμή 30. Όσον αφορά αποτελέσματα της πρώτης δοκιμής αυτά παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.22. Σε αυτό από το πρώτο μέχρι τις μετρήσεις 170-180 πραγματοποιείται η πρώτη διασκόπηση χωρίς εκσκαφή. Για περίπου 30 δευτερόλεπτα (μετρήσεις πλησίον της 200) ο βραχίονας κινείται με πολύ μικρή ταχύτητα (Σχήμα 4.23) και καταγράφεται μία μικρή περιοχή για περισσότερο χρονικό διάστημα από ότι άλλες περιοχές έτσι εμφανίζεται ένα μέγιστο στη μετρούμενη αντίσταση. Στη συνέχεια, περίπου στη μέτρηση 210 αρχίζει μία ομαλή μείωση της μετρούμενης αντίστασης, σε αυτή την περιφορά ο εκσκαφέας πλησιάζει το μέτωπο και πραγματοποιεί εκσκαφή με μικρή εντομή. Κατά την εκσκαφή η περιφορά είναι πιο αργή με αποτέλεσμα να καταγράφονται αραιότερες μετρήσεις και η καμπύλη να έχει μικρότερη κλίση. Αυτή διαρκεί μέχρι τη μέτρηση 450 περίπου. Κατά την επιστροφή στην οποία δεν πραγματοποιείται εξόρυξη παρουσιάζεται ένα σημείο καμπής περίπου στη μέτρηση 550 και από τα δεδομένα τα οποία καταγράφηκαν με το δέκτη GPS (Σχήμα 4.23) εκτιμάται ότι αυτό οφείλεται στην πολύ μικρή ταχύτητα περιφοράς του βραχίονα. Στη συνέχεια οι ηλεκτρικές αντιστάσεις φτάνουν τη μέγιστη που είχε παρατηρηθεί καθώς η διάταξη απομακρύνεται ακόμα περισσότερο από την ακμή του block. Πιθανόν η συνεισφορά των σκληρών στη διαμόρφωση της τιμής της αντίστασης να είναι μικρότερη και να υπάρχει μεγαλύτερη βαρύτητα άλλων παραγόντων οι οποίοι σχετίζονται με το υψηλό ποσοστό αέρα.



Σχήμα 4.23: Δεδομένα συντεταγμένων από την πρώτη δοκιμή στο ορυχείο Νοτίου Πεδίου στα οποία έχουν επισημανθεί τα σημεία όπου παραμένει σταθερός ο βραχίονας.

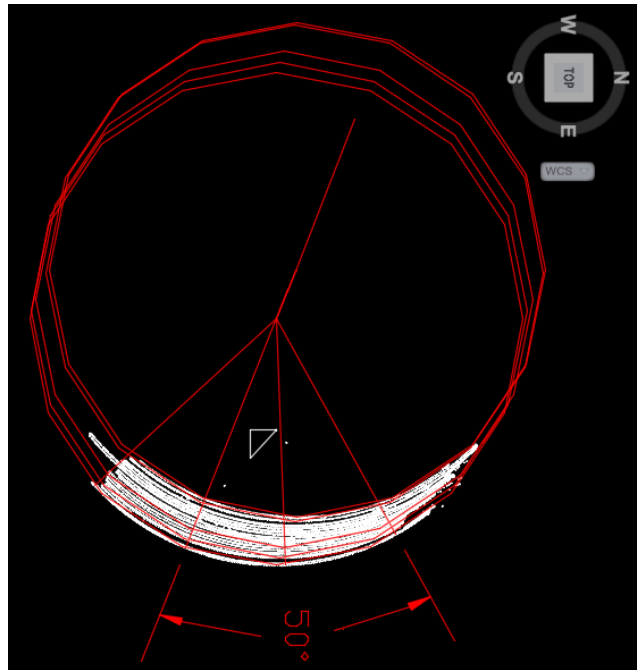
Η ίδια μορφή της καμπύλης βρέθηκε και στην τελική δοκιμή (Σχήμα 4.24, Σχήμα 4.25 και Σχήμα 4.26), στις μετρήσεις (300-500) κατά την επιστροφή στο εσωτερικό της βαθμίδας, στα οποία δεν πραγματοποιείται εξόρυξη. Στην κατοπτρική εικόνα της καμπύλης (μετρήσεις 50-300), η χρονοσειρά των δεδομένων είναι εκτενέστερη λόγω βραδύτερης περιφοράς του βραχίονα εξ' αιτίας της εκσκαφής, όμως η μορφή παραμένει ίδια. Η διαφορά των δύο κλάδων εμπεριέχει αφενός τη συνεισφορά στη μετρούμενη τιμή του πάσου το οποίο εξορύχθηκε, αφετέρου την επίπτωση του αυξημένου ποσοστού αέρα στη μετρούμενη τιμή. Επειδή η συνεισφορά του πάσου που εξορύχθηκε είναι πολύ μικρή θεωρείται μηδενική επομένως η δημιουργούμενη ανωμαλία αποδίδεται εξολοκλήρου στη συνεισφορά του «στρώματος» αέρα στις μετρήσεις. Από το Σχήμα 4.25 εκτιμάται ότι η αύξηση είναι υπαρκτή με μία τάξη μεγέθους των 1-2  $\Omega\text{m}$  όπως είχε προβλεφθεί από τις προηγούμενες δοκιμές.

Νέα ερωτήματα δημιουργούνται καθώς σε αυτή την περίπτωση η μέγιστη εντομή εμφανίζεται περίπου στη μέτρηση 200, συνεπώς μέχρι εκεί έπρεπε να υπάρχει μία σταθερή ηλεκτρική αντίσταση ή ακόμα και αύξηση. Ωστόσο αντί σταδιακά να αυξάνεται κατά 1-2  $\Omega\text{m}$  παρατηρείται μείωση η οποία υποδηλώνει ότι υπάρχουν πρόσθετες συνεισφορές που μειώνουν την ηλεκτρική αντίσταση. Αυτές αποδίδονται στη δομή του block και καθορίζονται από τις υπόλοιπες μεταλλευτικές παραμέτρους οι οποίες αναλύονται στην επόμενη υποενότητα.

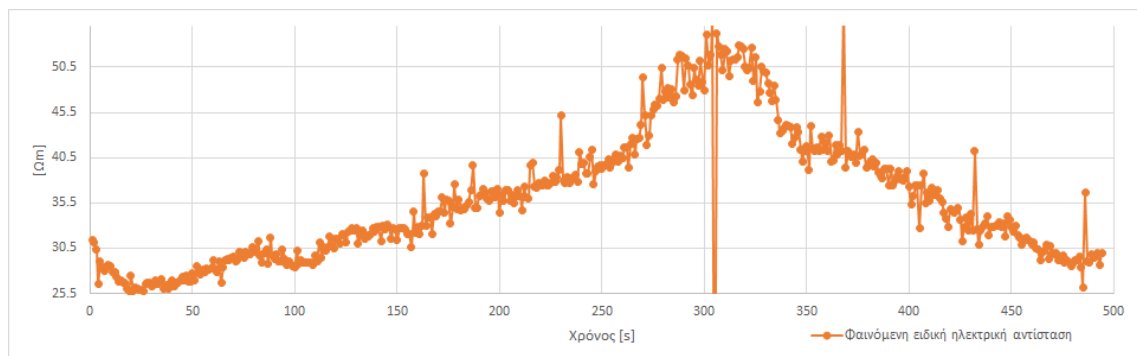
Όσον αφορά τη θέση εγκατάστασης της διάταξης επειδή το μήκος της διάταξης είναι 2m και η διάμετρος του καδοτροχού 12m υπάρχουν πολλές διαφορετικές θέσεις στις οποίες μπορεί αυτή να τοποθετηθεί. Πρόδηλο είναι ότι επίδραση της θέσης της διάταξης στις καταγραφές εξαρτάται ταυτόχρονα και από τις μεταλλευτικές παραμέτρους, έτσι ενώ ο τρόπος επίδρασης αναλύεται εδώ λεπτομερέστερη περιγραφή για την τροποποίησή τους γίνεται παρακάτω. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η θέση του οργάνου δεν είναι στο κέντρο του πακέτου αλλά στο ανώτερο σημείο (Σχήμα 4.26).

Λόγω της μορφής του τριαξονικού ελλειψοειδούς και ανάλογα το ύψος του εξορυσσόμενου πακέτου η διάταξη δεν μπορεί να ανιχνεύσει σχηματισμούς σε μεγάλα βάθη εντός του κατώτερου τμήματος του ίδιου πακέτου. Αυτό το τμήμα εξ' αιτίας της ιδιαίτερης κυκλικής μορφής του μετώπου αποτελείται από δύο τμήματα, ένα τμήμα το οποίο υπόκειται και ένα οποίο αντίκειται στη διάταξη, σε αυτά οι σκληροί σχηματισμοί ανιχνεύονται δύσκολα. Επιπρόσθετα σε αυτό το ανώτερο σημείο εμφανίζεται η μέγιστη εντομή κατά το ύψος του πακέτου (Σχήμα 4.5) με αποτέλεσμα η συνεισφορά του «στρώματος» αέρα να είναι η μέγιστη.

Σημαντικό ρόλο έχει και η τοποθέτηση δεξιά ή αριστερά σε σχέση με τον καδοτροχό, καθώς ο εκσκαφέας εξορύσσει κάθε πάσο είτε με δεξιόστροφη περιστροφή είτε με αριστερόστροφη πορεία του βραχίονα, αν είναι δεξιά στη δεξιόστροφη περιστροφή πραγματοποιεί διασκόπηση αφού έχει γίνει ήδη η εκσκαφή και απέχει περισσότερο από το μέτωπο, ενώ στην αριστερόστροφη πορεία πριν την εκσκαφή απέχει λιγότερο από το μέτωπο. Αν η τοποθέτηση γίνει αριστερά η απόσταση από το μέτωπο παρουσιάζει τα αντίθετα χαρακτηριστικά.



Σχήμα 4.24: Θέση διενέργειας πειράματος, άξονας πορείας και γωνία άξονα πορείας από τους θαμμένους σκληρούς σχηματισμούς. Το μήκος του τελευταίου τόξου είναι 50 m.



Σχήμα 4.25: Καταγραφή του ένατου πάσου κατά την εξόρυξη (R0) και την επιστροφή (R1) στο εσωτερικό της βαθμίδας.



Σχήμα 4.26: Πάσο 25R0 περίπου 1 m μακριά από τη θέση των σκληρών.

Σημαντική είναι επίσης και η σχετική θέση πομπού και δέκτη καθώς καθορίζει τον τρόπο ζεύξης με τον στόχο. Αυτή καθορίζεται από τη διεύθυνση της διάταξης σε σχέση με την ελεύθερη επιφάνεια (μέτωπο, έδαφος κτλ.) και ρυθμίζει αφενός, την ευκολία ερμηνείας των δεδομένων ώστε να αναγνωριστούν οι σκληροί σχηματισμοί αφετέρου, την ένταση των καταγραφόμενων μεταβολών.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση (Σχήμα 4.27) η κατακόρυφη στο έδαφος τοποθέτηση του οργάνου κάνει ευκρινέστερη την αναγνώριση των παραμέτρων της καμπύλης η οποία δημιουργείται από την ηλεκτρομαγνητική ανωμαλία από το σκληρό σχηματισμό όμως οι απόλυτες μεταβολές είναι ήπιες. Στην τοποθέτηση του οργάνου παράλληλα με το έδαφος οι μεταβολές είναι εντονότερες αλλά η αναγνώριση του προφίλ πολύ δυσκολότερη.

Ένα ενδεχόμενο είναι η γωνία αυτή ( $\omega_1$ ) να μην είναι  $0^\circ$  ή  $90^\circ$  μοίρες αλλά μία ενδιάμεση αυτών, πιθανόν  $45^\circ$ . Σε αυτή την περίπτωση η παραγόμενη μορφή της καμπύλης είναι ίσως δυσκολότερη στην ερμηνεία αλλά επειδή οι μεταβολές είναι πιο έντονες από την οριζόντια διάταξη εντοπίζονται ευκολότερα. Επίσης η στερεή γωνία ορίζεται και από τη γωνία ( $\omega_2$ ) σε αυτή τη περίπτωση η απόσταση πομπού και δέκτη από το μέτωπο διαφέρει αισθητά. Τέλος η μεταβολή αυτών των γωνιών εξ' αιτίας της ιδιαίτερης μορφής του μετώπου μεταβάλλει την απόσταση της διάταξη από το μέτωπο.



Σχήμα 4.27: Γωνίες διεύθυνσης  $\omega_1$  και  $\omega_2$  της ενόργανης διάταξης με τις δύο επιφάνειες κάθετα στην επιφάνεια της γης.



#### 4.5.3. Η επίδραση των μεταλλευτικών παραμέτρων στη μέτρηση

Μία ακόμη διαφορά με τη συνήθη πρακτική εφαρμογής της μεθόδου κινητού πομπού-δέκτη είναι ότι κατά την εξόρυξη υπάρχει κίνηση με αποτέλεσμα η συνεχόμενη μεταβολή του μετώπου να μεταβάλλει τη στατική εικόνα η οποία παράγεται σε άλλες εφαρμογές της μεθόδου κατά τη διασκόπηση σε επίπεδες ελεύθερες επιφάνειες. Πιο αναλυτικά καθώς μεταβάλλεται η ελεύθερη επιφάνεια κατά την εξόρυξη η βαθμίδα αποκτά ποικίλες γεωμετρίες με αποτέλεσμα να τροποποιούνται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του τριαξονικού ελλειψοειδούς άρα και της δραστικής του ακτίνας. Αυτές οι μεταβολές τροποποιούν το φορτίο εντός του ελλειψοειδούς και επομένως την καταγραφόμενη τιμή ηλεκτρικής αντίστασης. Τελικά αυτός ο μηχανισμός παράγει μία σειρά ηλεκτρομαγνητικών ανωμαλιών οι οποίες επιδρούν στις καταγραφές. Όσο περισσότερο αιτιοκρατικά είναι τα χαρακτηριστικά των ελεύθερων επιφανειών, παρά το γεγονός ότι μπορεί να έχουν μία ιδιαίτερη και συνεχώς μεταβλητή γεωμετρία, τόσο ευκολότερη είναι η αποσύνθεση αυτών των ανωμαλιών από τις καταγραφές ώστε να αποτυπωθεί η πραγματική εικόνα του μετώπου.

Αυτές οι γεωμετρίες μεταβάλλονται ανάλογα με τη μέθοδο εκμετάλλευσης και κυρίως ανάλογα με τη μέθοδο εξόρυξης. Η παραγωγή αυτών των επιφανειών έχει μία περισσότερο κανονική-αιτιοκρατική μορφή όσο οι μέθοδοι είναι συνεχούς λειτουργίας. Όσο περισσότερο εφαρμόζονται μέθοδοι ασυνεχούς λειτουργίας τόσο η κανονική μορφή αποκλίνει διότι ο χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός είναι μικρότερος και δημιουργεί ακανόνιστες επιφάνειες με στοχαστικά χαρακτηριστικά. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η χρήση εκσκαφέα καδοτροχού δημιουργεί επιφάνειες που παράγονται με αιτιοκρατικό τρόπο ωστόσο η εξόρυξη της υπερκείμενης βαθμίδας με μεθόδους ασυνεχούς λειτουργίας έχει δημιουργήσει μία μεικτή μορφή του μετώπου (Σχήμα 4.28).



Σχήμα 4.28: Άποψη της γεωμετρικής μορφής του block εκμετάλλευσης στην οποία διακρίνεται η ακανόνιστη μορφή του δαπέδου της βαθμίδας και η «γεωμετρική» μορφή του μετώπου.

Όσο μεγαλύτερη είναι η ειδική επιφάνεια αυτών των επιφανειών τόσο εντονότερες είναι και οι ηλεκτρομαγνητικές ανωμαλίες. Αύξηση της ειδικής επιφάνειας παρατηρείται στις ακμές (φρύδι, πόδι), τις γωνίες και γενικότερα τα όρια των βαθμίδων. Οι ηλεκτρομαγνητικές ανωμαλίες στην πιο απλή μορφή τους εξαρτώνται κυρίως από τη δραστική ακτίνα και από την απόσταση διάταξης-μετώπου. Σε μία πληρέστερη και γενικότερη θεώρηση περιγράφεται από τη συστολή και διαστολή του τριαξονικού ελλειψοειδούς εξ' αιτίας της μεταβολής του φορτίου εντός αυτού.

Η παραπάνω θεωρητική περιγραφή προσεγγίζεται στην πράξη από τον τρόπο καταγραφής καθώς αυτός καθορίζει τη χωρική-χρονική ανάλυση της δειγματοληψίας στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και τελικά τη δυνατότητα πρόβλεψης των τιμών αγωγιμότητας. Ακόμα πρέπει να σημειωθεί ότι οι μεταλλευτικές παράμετροι επιδρούν στην αντοχή της διάταξης και του στηρίγματός της διότι μεταβάλουν το ηλεκτρικό φορτίο (έργο) στο καδοτροχό.

Περίληπτικά οι παραπάνω παράμετροι διασκόπησης είναι:

- η απόσταση διάταξης μετώπου,
- η συστολή-διαστολή του ελλειψοειδούς,
- ο τρόπος δειγματοληψίας και
- οι φθορές του εξοπλισμού.

Αυτές οι παράμετροι εξαρτώνται από τις παρακάτω μεταλλευτικές παραμέτρους:

- Γωνίες  $\phi_1$  και  $\phi_2$ .
- Πάχος εντομής.
- Ύψος και θέση πακέτου.
- Ταχύτητα κοπής (περιφοράς του βραχίονα) και όδευση.

Οι γωνίες  $\phi_1$  και  $\phi_2$  καθορίζονται από τον τρόπο με τον οποίο εφαρμόζεται η μέθοδος εκμετάλλευσης και κυρίως από την υπάρχουσα προπορεία. Η διάταξη του εκσκαφέα σε σχέση με το μέτωπο ορίζει το μήκος του τόξου που διαγράφει ο καδοτροχός και τελικά το πλήθος των καταγραφόμενων δεδομένων κατά την εξόρυξη. Στα άκρα του τόξου μεταξύ των δύο γωνιών μεταβάλλεται η αγωγιμότητα. Πιο συγκεκριμένα στην ακμή της βαθμίδας το ποσοστό του αέρα στο ελλειψοειδές είναι το μέγιστο και επομένως έχει τις μέγιστες διαστάσεις. Αντίθετα στο εσωτερικό της βαθμίδας το ποσοστό των αγωγίμων σχηματισμών είναι μεγαλύτερο και συνεπώς μικρότερο το ελλειψοειδές. Όσο μεγαλύτερο είναι το τόξο τόσο το φαινόμενο στα όρια έχει μικρότερη επιρροή στο σύνολο των μετρήσεων.

Το βάθος κοπής (εντομή) εξαρτάται από την προχώρηση που πραγματοποιεί ο εκσκαφέας και από τις γωνίες  $\phi_1$  και  $\phi_2$  οι οποίες καθορίζουν τον τρόπο επαφής του καδοτροχού με το μέτωπο. Η εντομή ρυθμίζει τη μάζα του εκσκαπτόμενου υλικού και συνεπώς τις ταλαντώσεις στην υπερδομή του εκσκαφέα από τα περιοδικά μεταβαλλόμενα φορτία. Ακόμα ρυθμίζει τον αριθμό των πάσων μέχρι την επαφή με το σκληρό γεωυλικό δηλαδή, τη χωρική ανάλυση της διασκόπησης και την ένταση της απόκρισης του γεωυλικού κατά τη διασκόπηση. Όσο μικρότερη είναι η εντομή τόσο μικρότερες μεταβολές δημιουργούνται στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο με αποτέλεσμα να μην είναι εύκολα ανιχνεύσιμα τα σκληρά. Ωστόσο, μειώνονται οι μεταβολές

της ηλεκτρομαγνητικής ανωμαλίας από το «στρώμα» αέρα, επιτυγχάνεται λεπτομερέστερη χωρική ανάλυση και η κόπωση του στηρίγματος περιορίζεται.

Η απόσταση μετώπου-διάταξης αποτελείται από ένα μεταβλητό τμήμα, το οποίο είναι το βάθος του κάδου (κάδος μαζί με τη στεφάνη) μείον το πάχος εντομής και μία σταθερή απόσταση που είναι η απόσταση της ενόργανής διάταξης από τη στεφάνη (Σχήμα 4.29). Αυτή η απόσταση μεταβάλλεται όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.5 και δημιουργεί ένα «στρώμα» αέρα μεταξύ μετώπου-διάταξης, με μεταβλητό πάχος. Εμφανίζεται με αυτή τη μορφή όσο η εξόρυξη γίνεται κανονικά, όταν πραγματοποιούνται μετακινήσεις των ερπυστριών κάθετα στην προχώρηση της εκμετάλλευσης είτε, τακτική της εξόρυξης είναι να μη πραγματοποιείται πάντα εκσκαφή σε όλο το μήκος του τόξου αλλά και σε άλλες παρόμοιες περιπτώσεις, τότε αυτή η απόσταση μεταβάλλεται. Τελικά αυτό το «στρώμα» αέρα εισάγει μία ηλεκτρομαγνητική ανωμαλία στις καταγραφές.

Ο τρόπος ρύθμισης της απόστασης αυτής είναι η αλλαγή θέσης της διάταξης ώστε να εγκατασταθεί πλησιέστερα στην προβολή της διάταξης πάνω στην επιφάνεια που διαγράφει η στεφάνη του καδοτροχού κατά την εξόρυξη (Σχήμα 4.29). Με την ελαχιστοποίηση αυτής της απόστασης ελαχιστοποιείται και η απόσταση της διάταξης-μετώπου.



Σχήμα 4.29: Στεφάνη καδοτροχού (μικρός κύκλος), δόντια καδοτροχού (μεγάλος κύκλος) και απόσταση διάταξης από την προβολή της στεφάνης (πράσινο). Η ρύθμιση πραγματοποιείται με τον μεταλλικό βραχίονα.



Το πάχος και η θέση του πακέτου στο block ρυθμίζει την ένταση των καταγραφών. Μικρό πάχος πακέτου αυξάνει την αναλογία σκληρών προς μαλακών σχηματισμών με αποτέλεσμα να κάνει πιο εύκολη την αναγνώρισή τους. Το παραπάνω συμβαίνει διότι για γεωλογικές αιτίες ο όγκος των μεταφερόμενων σκληρών βράχων δεν μπορεί να είναι πολύ μεγάλος. Έτσι σε μικρού ύψους πακέτα οι βράχοι καταλαμβάνουν μεγαλύτερο ποσοστό του ύψους του πακέτου με αποτέλεσμα η συνεισφορά των σκληρών στη φαινόμενη αγωγιμότητα να είναι μεγαλύτερη το οποίο δημιουργεί εντονότερες μεταβολές στη μετρούμενη αγωγιμότητα. Ακόμα επειδή το αγωγίμο τμήμα μειώνεται και το ποσοστό του αέρα στο ελλειψοειδές αυξάνεται, αυτό διαστέλλεται ελέγχοντας μεγαλύτερο τμήμα του σχηματισμού το οποίο τελικά συνεπάγεται αυξημένες φαινόμενες αντιστάσεις. Επίσης, σε πάχη μεγαλύτερα από τη μικρή ακτίνα του τριαξονικού ελλειψοειδούς ( $2 \times 0.75 \times$  την απόσταση των πηνίων), εισέρχονται σε αυτό σχηματισμοί από υποκείμενα πακέτα ή το δάπεδο της βαθμίδας μειώνοντας τη μετρούμενη αγωγιμότητα.

Πρέπει να σημειωθεί ότι κατά την εξόρυξη του πρώτου πακέτου το ύψος του εξαρτάται από τη κατάσταση του δαπέδου. Στην εξεταζόμενη περίπτωση το φρύδι της βαθμίδας δεν είναι επίπεδο αλλά παρουσιάζει μία κλιμακωτή γεωμετρία (Σχήμα 4.28), πιο συγκεκριμένα το ύψος του πακέτου μειώνεται όσο πλησιάζει την ακμή της βαθμίδας και σε αυτή την περίπτωση όσο μειώνεται ο αγωγίμος σχηματισμός εμφανίζονται φαινόμενα τα οποία δημιουργούν εντονότερες ηλεκτρομαγνητικές ανωμαλίες στα γεωμετρικά όρια της βαθμίδας.

Διαφορετική είναι η μορφή της καμπύλης της χρονοσειράς ανάλογα με την τακτική του εκάστοτε χειριστή ή τις συγκεκριμένες ανάγκες τις οποίες επιβάλλουν γεωλογικές ή άλλες συνθήκες στο μέτωπο. Η τακτική μπορεί να αφορά την επιλογή διαφορετικής ταχύτητας κοπής σε διαφορετικά σημεία. Αυτός ορίζει τον αριθμό των μετρήσεων σε κάθε πάσο όταν αυτός είναι υψηλός υπάρχει καλύτερη χωρική ανάλυση. Πιο συγκεκριμένα καθώς κάθε πάσο δεν εκσκάπτεται με την ίδια ταχύτητα ούτε έχει το ίδιο μήκος τόξου με το προηγούμενο, διαφορετικές χρονοσειρές δεν είναι απαραίτητα συγκρίσιμες. Επίσης οι αλλαγές στην ταχύτητα περιφοράς ουσιαστικά εξαναγκάζουν σε μεροληπτική δειγματοληψία υπέρ των τμημάτων τα οποία εκσκάπτονται με χαμηλότερη ταχύτητα δηλαδή, σε γεωυλικά με μεγαλύτερη αντίσταση κατά την εκσκαφή. Ακόμα σε υψηλές ταχύτητες ή μεταβολή αυτών (επιτάχυνση και επιβράδυνση), αυξάνονται οι ταλαντώσεις στο στήριγμα και τελικά στις μετρητικές διατάξεις με αποτέλεσμα να υπάρχει αυξημένη πιθανότητα αστοχίας. Τέλος όσο χαμηλότερες είναι οι ταχύτητες περιφοράς τόσο πιο έγκαιρη και έγκυρη είναι η ένδειξη της προειδοποίησης.

Όλες οι παραπάνω παράμετροι καθορίζουν την όδευση του καδοτροχού και επομένως της μετρητικής διάταξης στο μέτωπο, αυτή η όδευση τελικά καθορίζει τις διαμορφούμενες ηλεκτρομαγνητικές ανωμαλίες.



## Κεφάλαιο 5ο: Εφαρμογή της μεθόδου FMECA για την εκτίμηση της αξιοπιστίας του συστήματος

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η εφαρμογή της μεθοδολογίας ελαχιστοποίησης της διακινδύνευσης με τη μέθοδο FMECA κατά τη φάση ανάπτυξης πρωτοτύπων αλλά και την κανονική λειτουργία αυτοματοποιημένων εξορυκτικών συστημάτων. Πιο αναλυτικά όσον αφορά τη μόνιμη λειτουργία ανάλογα με τον αριθμό προτεραιότητας παράγονται προειδοποιητικά μηνύματα-σήματα για την καθοδήγηση του χειριστή οι οποίες αφορούν τους κατάλληλους ελιγμούς για την αποφυγή των σκληρών σχηματισμών. Δημιουργείται δηλαδή ένας εικονικός τεχνικός «σύμβουλος» ο οποίος υποστηρίζει τη λήψη αποφάσεων για τεχνικοοικονομικά θέματα με κατανοητό τρόπο σε μη εξειδικευμένο εργατικό προσωπικό. Όσον αφορά την κατασκευή πρωτοτύπων προτείνονται βελτιώσεις που αφορούν την πρόσθεση διάφορων μετρητικών διατάξεων για τον καλύτερο εντοπισμό των σκληρών σχηματισμών. Η μεθοδολογία αφορά την πιστοποίηση των αυτοματοποιημένων εξορυκτικών διαδικασιών και δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην καταγραφή των γεωλογικών ιδιοτήτων.

Κατά τη φάση λειτουργίας του ερευνητικού πρωτοτύπου εκτιμήθηκε αυτοματοποιημένα η πιθανότητα και η σοβαρότητα των αστοχιών λόγω της ύπαρξης σκληρών που αφορούσαν μόνο το πρώτο υποσύστημα. Με βάση αυτά τα δεδομένα και την εμπειρία που αποκτήθηκε από την πειραματική δοκιμή εφαρμόζεται εκ των υστέρων η μέθοδος FMECA με τη συμπλήρωση της ανιχνευσιμότητας από την ανάλυση των χωρικών δεδομένων ενώ, αναλύεται και το τέταρτο υποσύστημα.

Με βάση τις καταγραφές από την ενόργανη διάταξη τύπου CMD-2, την κάμερα και το δέκτη GPS γίνεται η κατηγοριοποίηση των μετρήσεων χειρωνακτικά στους πίνακες ανάλυσης (Πίνακας 5.1 και Πίνακας 5.2). Η ανάλυση αυτή πραγματοποιείται με καταγραφές που αντιστοιχούν σε πάσα λίγο πριν την ανίχνευση του σκληρού κατά τη δοκιμή.

Αρχικά προσδιορίζεται ο τρόπος αστοχίας (Στήλη 6) και αποδίδεται μία αιτία αστοχίας (Στήλη 7). Αναφέρονται οι πιθανές επιπτώσεις (Στήλη 8), τα υπάρχοντα μέτρα πρόληψης (Στήλη 9) και ο τρόπος ανίχνευσης της αστοχίας (Στήλη 10). Σε αυτό το σημείο γίνονται προτάσεις για τη βελτίωση του συστήματος κατά την εξόρυξη (Στήλες 11 Σ, 11 Π, 11 Α) ώστε να ελαχιστοποιηθεί η μετρούμενη διακινδύνευση. Επίσης προτείνονται τρόποι μείωσης της διακινδύνευσης κατά την ανάπτυξη ενός βιομηχανικού πρωτοτύπου (Στήλες 12 Σ, 12 Π, 12 Α). Σε κάθε πρόταση πραγματοποιείται επιμερισμός των μέτρων για τη μείωση της σοβαρότητας, της πιθανότητας και την αύξηση της ανιχνευσιμότητας της αστοχίας. Στη συνέχεια πραγματοποιείται ο χαρακτηρισμός με τη διακινδύνευση προσδιορίζοντας τη σοβαρότητα μίας αστοχίας (Στήλη 13), την πιθανότητα να συμβεί (Στήλη 14) και τη δυνατότητα να ανιχνευθεί έγκαιρα (Στήλη 15), σε μία κλίμακα εφτά βαθμών και υπολογίζεται ο αριθμός προτεραιότητας (RPN) (Στήλη 16).

Στην περίπτωση του πρώτου υποσυστήματος όπου παράγονται αυτοματοποιημένα οι τιμές, οι οποίες είναι κανονικοποιημένες στη μονάδα πραγματοποιήθηκε ένας μετασχηματισμός με βάση την επταβάθμια κλίμακα. Επίσης υπολογίζονται οι αναθεωρημένοι αριθμοί προτεραιότητας για τη δοκιμαστική λειτουργία (Στήλη 16 ΔΟΚ) και για το βιομηχανικό πρωτότυπο (Στήλη

16 BIO) αντίστοιχα. Η αναθεώρηση των RPN γίνεται με βάση τα μέτρα δράσης και τις προτάσεις βελτίωσης των οποίων οι τρεις παράμετροι εκτιμώνται στις στήλες 13, 14 και 15. Η αναθεώρηση, κατά τη μόνιμη λειτουργία του συστήματος και του βιομηχανικού πρωτοτύπου, έχει στόχο να βελτιώσει δύο ανεξάρτητες μεταξύ τους διαδικασίες. Συνεπώς οι παράμετροι του ενός δεν υπεισέρχονται στην ανάλυση του άλλου.

Πιο συγκεκριμένα όσον αφορά το πρώτο υποσύστημα τα μέτρα δράσης για την παραγωγή μηνυμάτων έχουν σκοπό να αναθεωρήσουν τις παραμέτρους της διακινδύνευσης κατά την εξόρυξη βάσει των τιμών της ανιχνευσιμότητας, ανεξάρτητα με το αν οι αρχικές καταγραφές αποτυπώνουν με πιστότητα την πραγματικότητα. Τα μέτρα δράσης για την τροποποίηση του πρωτοτύπου έχουν στόχο να βελτιώσουν την πιστότητα με την οποία καταγράφονται τα δεδομένα.

Όσον αφορά το άλλο υποσύστημα το οποίο αναλύεται, στόχος είναι να μειωθεί η τρωτότητα με τις βέλτιστες τακτικές κατά την εξόρυξη ενώ, τα μέτρα δράσης για το πρωτότυπο αφορούν τη δημιουργία ενός συστήματος το οποίο θα έχει μειωμένη τρωτότητα κατά τη λειτουργία του ανεξάρτητα με την τακτική της εξόρυξης.

Παρακάτω ακολουθεί η υλοποίηση της μεθόδου FMECA, όσον αφορά την καθοδηγούμενη εξόρυξη με τον εκσκαφέα. Το Σχήμα 5.1 απεικονίζει τις καταγραφές που αντιστοιχούν στην εκσκαφή του τελευταίου πάσου, με βάση τις καταγραφές οι οποίες απεικονίζονται στο σχήμα αυτό έχει συμπληρωθεί ο πίνακας ανάλυσης (Πίνακας 5.1) για το υποσύστημα μετρητικής διάταξης-μετώπου για τις τέσσερις αστοχίες (υπερβάσεις ορίων ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας) που αναγνωρίστηκαν και αντίστοιχα στον πίνακα ανάλυσης (Πίνακας 5.2) έχουν συμπληρωθεί τα πεδία για το υποσύστημα εκτέλεσης το οποίο αντιστοιχεί στο ογκοστοιχείο «25-30» του προηγούμενου πίνακα (υποσυστήματος).

Ένα ογκοστοιχείο δημιουργείται κάθε φορά όπου καταγράφεται μία εκτός προδιαγραφών τιμή. Η έκταση του ογκοστοιχείου δεν είναι σταθερή αλλά μεταβλητή και εξαρτάται από τη διάρκεια της υπέρβασης και τις ακτίνες του ελλειψοειδούς. Καθώς κάθε μέτρηση δεν αντιστοιχεί σε ίσα χρονικά τμήματα και η ταχύτητα περιφοράς είναι γνωστή μόνο ως μέσος όρος για κάθε πάσο, το πλάτος του ογκοστοιχείου περιγράφεται από τη χρονική διάρκεια της υπέρβασης η οποία σχετίζεται με το πλάτος του. Αυτές οι χρονικές περίοδοι υπέρβασης χαρακτηρίζονται με το χρονικό στίγμα με την εκκίνηση εκσκαφής κάθε πάσου.

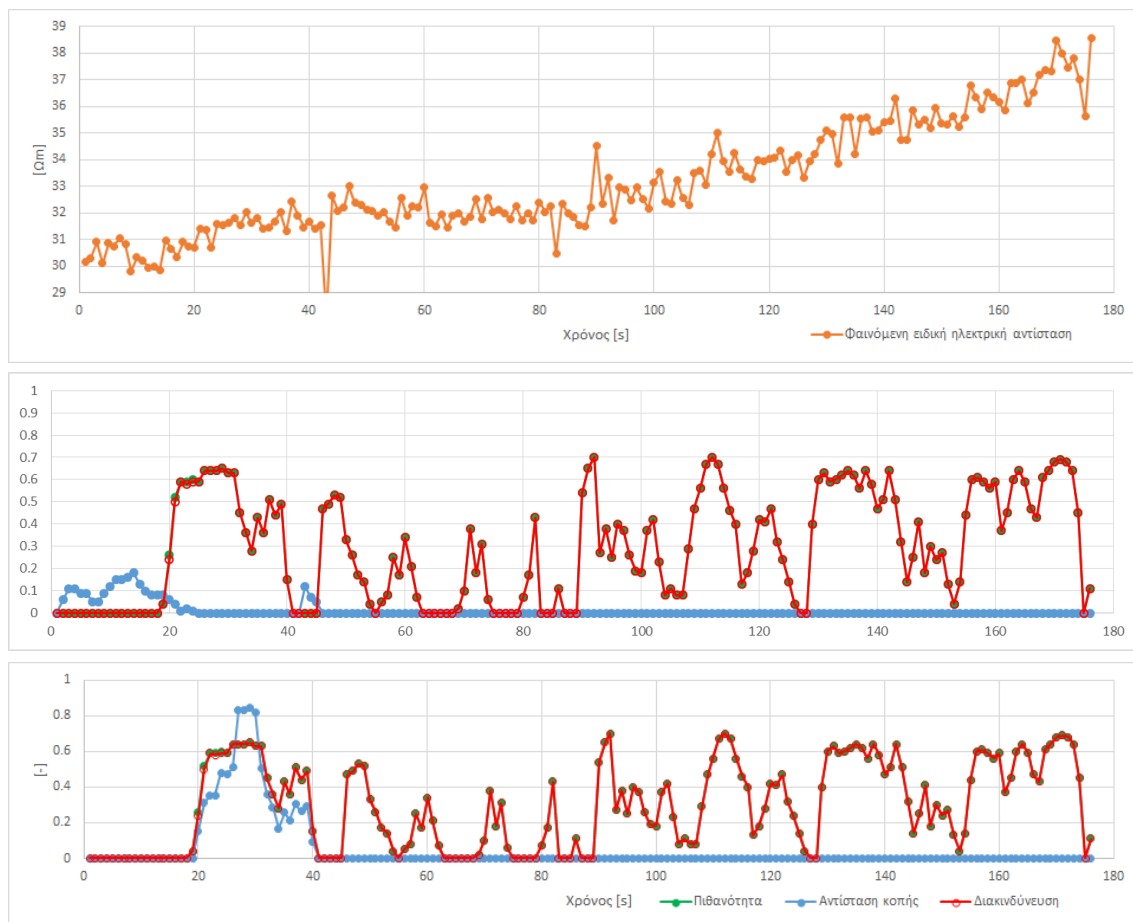
Όσον αφορά το υποσύστημα μετώπου-μετρητικής διάταξης ιδιαίτερη επισήμανση πρέπει να γίνει για την εκτίμηση της ανιχνευσιμότητας. Πιο αναλυτικά αυτή αποτελείται από δύο τμήματα ένα με μέγιστο δυο από τα επτά και το υπόλοιπο με πέντε από τα επτά. Το πρώτο αποδίδεται στην απόσταση μετώπου διάταξης και βασίζεται στα χωρικά δεδομένα (Σχήμα 4.24) από τα οποία μπορεί να εκτιμηθεί η απόσταση διάταξης-μετώπου. Το δεύτερο οφείλεται σε άλλους παράγοντες οι οποίοι αυξάνουν το ποσοστό αέρα στο ελλειψοειδές όπως αναλύθηκε. Τα μηνύματα τα οποία αφορούν την ανιχνευσιμότητα προτρέπουν για αναθεώρηση της σύμφωνα με την απόσταση μετώπου-διάταξης. Αυτή η τροποποίηση οδηγεί στις αναθεωρήσεις της σοβαρότητας και της πιθανότητας σύμφωνα με τις καμπύλες ευαισθησίας της ενόργανης διάταξης (Σχήμα 4.20).

Στο υποσύστημα μετώπου-μετρητικής διάταξης αναλύονται τέσσερις αστοχίες. Στο πρώτο ογκοστοιχείο «25-30» παρατηρείται απότομη αύξηση των αντιστάσεων το οποίο υποδεικνύει μετάβαση από μαλακά γεωυλικά (άργιλος) σε σκληρά (ασβεστόλιθος). Η απότομη αυτή αύξηση αποδίδεται αφενός στη μεγάλη διαφορά αντιστάσεων αφετέρου στο σχήμα των σκληρών που τοποθετήθηκαν. Αυτή η μεταβολή συσχετίζεται με την αύξηση της αντίστασης στην κοπή των υλικών και ο τρόπος ανίχνευσης είναι η ενόργανη διάταξη. Βάσει των τιμών (Σχήμα 5.1) η σοβαρότητα (αντίσταση στην κοπή ή το αντίθετο μέγεθος η εκσκαψιμότητα) και η πιθανότητα εκτιμώνται με ένα και πέντε αντίστοιχα. Η ανιχνευσιμότητα εκτιμάται στην κλίμακα με τρία, ένα όσον αφορά την απόσταση από το μέτωπο συν δύο εξ' αιτίας του ύψους του πακέτου. Η ανιχνευσιμότητα δείχνει ότι πρέπει να αναθεωρηθούν (ελαττωθούν) οι τιμές ηλεκτρικής αντίστασης και με βάση τις καμπύλες ευαισθησίας της ενόργανης διάταξης επιλέγεται ένας συντελεστής 0,6, εξ' αιτίας αυτής της αλλαγής μειώνεται και η ανιχνευσιμότητα στο δύο. Αυτή η μεταβολή οδηγεί ταυτόχρονα στην αναθεώρηση της σοβαρότητας και της πιθανότητας στο εφτά και έξι αντίστοιχα. Κατά τη λειτουργία βάσει αυτών των παραμέτρων ο αριθμός προτεραιότητας αυξάνεται από 15 στο 84.

Η αύξηση αυτή υποδεικνύει την πιστότερη απεικόνιση της πραγματικότητας και όχι την επιδείνωση της κατάστασης του συστήματος και τη δημιουργία ενός υποδεέστερου συστήματος με την τροποποίησή του. Όσον αφορά το βιομηχανικό πρωτότυπο οι βελτιώσεις αφορούν την εγκατάσταση της διάταξης παράλληλα με το δάπεδο της βαθμίδας ώστε να βελτιωθεί η εκτίμηση της σοβαρότητας. Η συχνότερη δειγματοληψία θα βελτιώσει την πιθανότητα ανίχνευσης ενώ η ανιχνευσιμότητα θα βελτιωθεί με την πραγματοποίηση οπτικής ανάλυσης των εικόνων και την εγκατάσταση μίας διάταξης τύπου LiDAR προκειμένου να ανιχνεύεται καλύτερα η απόσταση από το μέτωπο. Επίσης περισσότερο δαπανηρές λύσεις είναι η δοκιμή σε εκσκαφέα καδοτροχού με τηλεσκοπικό βραχίονα και η κατασκευή ενός τηλεσκοπικού βραχίονα για τη μετρητική διάταξη ώστε η απόσταση διάταξης μετώπου να διατηρείται σταθερή. Με αυτές τις τροποποιήσεις η σοβαρότητα, η πιθανότητα και η ανιχνευσιμότητα μπορούν να μειωθούν σε τέσσερα, τρία και ένα αντίστοιχα βελτιώνοντας την αξιοπιστία των μετρήσεων κατά τη λειτουργία.

Όσον αφορά το δεύτερο ογκοστοιχείο «45-50» παρατηρείται μία σταδιακή αύξηση των ηλεκτρικών αντιστάσεων με ενδιάμεσες απόλυτες ηλεκτρικές αντιστάσεις το οποίο αποδίδεται στη μετάβαση από την άργιλο σε ασύνδετο κροκαλοπαγές. Σε αυτή την περίπτωση η εκτίμηση των τριών παραμέτρων είναι ένα, τέσσερα και τρία αντίστοιχα και ο αριθμός προτεραιότητας RPN είναι ίσος με 12. Η αναθεώρηση έχει τον ίδιο μηχανισμό με την προηγούμενη περίπτωση και εδώ λόγω της χαμηλότερης πιθανότητας (τέσσερα) ο RPN υπολογίζεται σε 70.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον εδώ παρουσιάζει η ανάπτυξη του βιομηχανικού πρωτοτύπου. Η βελτίωση της ανίχνευσης της σοβαρότητας (αντίσταση στην κοπή) μπορεί να γίνει όπως στην προηγούμενη περίπτωση, όμως εδώ θα προκύψει μία διαφορετική καμπύλη με πιο ήπιες μεταβολές λόγω του φακοειδούς σχήματος του σχηματισμού. Με αυτή την αλλαγή η αντίσταση στην κοπή αναθεωρείται σε τρία ενώ η πιθανότητα και η ανιχνευσιμότητα τόσο όσον αφορά τον τρόπο βελτίωσης όσο και τον βαθμό βελτίωσης παραμένουν ίδιες με την προηγούμενη περίπτωση και ο RPN ο οποίος προκύπτει είναι εννιά.



Σχήμα 5.1: Μεταβολή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης των καταγραφών για το πάσο 26R0 (επάνω). Παράμετροι διακινδύνευσης πριν τη λήψη μέτρων δράσης (κέντρο). Υπολογισμός RPN μετά από την εφαρμογή των διορθωτικών προτάσεων (κάτω), αν δεν εφαρμοστούν αυτά τα μέτρα τότε ο RPN θα αυξηθεί στο επίπεδο της αντίστασης στην κοπή.

Όσον αφορά το ογκοστοιχείο «112-117» και το «155-175» η αστοχία οφείλεται αφενός στην απότομη αύξηση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, αφετέρου στις υψηλές και πολύ υψηλές αντιστοιχα για κάθε ογκοστοιχείο, απόλυτες τιμές ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων. Οι παράμετροι διακινδύνευσης όσον αφορά τη σοβαρότητα και την πιθανότητα είναι ένα και πέντε αντιστοιχα, ίδιο και για της δύο περιπτώσεις. Η ανιχνευσιμότητα διαφοροποιείται λόγω πλήρους απομάκρυνσης από το μέτωπο της διάταξης στη δεύτερη περίπτωση και εκτιμάται σε εφτά ενώ για την πρώτη περίπτωση σε έξι. Με αυτές τις παραμέτρους οι αριθμοί προτεραιότητας είναι 30 και 35. Ο συντελεστής από την καμπύλη ευαισθησίας είναι 0,85 στην πρώτη περίπτωση ενώ στη δεύτερη δεν υπάρχει διότι η διάταξη έχει απομακρυνθεί πλήρως από τη βαθμίδα. Σε αυτές τις περιπτώσεις όπου υπάρχει πολύ μεγάλη συνεισφορά του αέρα επιλέχθηκε μία εμπειρική διόρθωση για τη σοβαρότητα και την πιθανότητα σε δύο και έξι αντιστοιχα και για τις δύο περιπτώσεις. Με αυτές τις παραμέτρους οι αριθμοί προτεραιότητας είναι 126 και 168 για την πρώτη και τη δεύτερη περίπτωση αντιστοιχα.

Αυτοί οι αριθμοί είναι εξαιρετικά υψηλοί και δεν αντιπροσωπεύουν την πραγματικότητα στην οποία δεν υπάρχουν σκληροί σχηματισμοί επομένως, η σοβαρότητα και η πιθανότητα είναι εικονικά υψηλές. Η ανάπτυξη ενός πρωτοτύπου στον οποίο θα υπάρχει αυτοματοποιη-

μένη οπτική ανάλυση ή/και μία διάταξη τύπου LiDAR θα υπάρχει η δυνατότητα να αναγνωρίζονται οι αιτίες αυτών των μεταβολών. Συνεπώς η ανιχνευσιμότητα θα είναι χαμηλή γιατί είναι εύκολη η διαδικασία προσδιορισμού της απόστασης και δεν θα αυξάνει τεχνητά τον RPN.

Στο υποσύστημα εκτέλεσης αναλύονται τα εξαρτήματα στα οποία εκτιμάται ότι θα επηρεασθούν από μία σύγκρουση με σκληρά. Τα ακριβή χαρακτηριστικά της ενδεχόμενης αστοχίας, η σοβαρότητα και η πιθανότητά της υποδεικνύεται από την ανάλυση του πρώτου υποσυστήματος. Αφενός, επειδή ήταν γνωστό ότι μόνο μία πραγματική αστοχία θα υπάρξει και αφετέρου, προκειμένου να μην πραγματοποιηθεί μία εξαιρετικά λεπτομερής ανάλυση, αναλύθηκε μόνο ένα ογκοστοιχείο. Στο ογκοστοιχείο «25-30» υπήρξε απότομη αύξηση αντιστάσεων και είναι το μοναδικό στο οποίο μπορεί να αποδοθεί σύγκρουση με σκληρά. Στην εφαρμογή ενός τέτοιου συστήματος σε πραγματικό χρόνο με κάθε εμφάνιση ενός τρόπου αστοχίας στο πρώτο υποσύστημα θα ελέγχονται όλοι οι τρόποι αστοχίας του τέταρτου υποσυστήματος. Δηλαδή οι εξεταζόμενοι τρόποι αστοχίας θα είναι ίδιοι για όλα τα ογκοστοιχεία αλλά θα τροποποιείται η τιμή και οι παράμετροι της διακινδύνευσης.

Υπάρχουν τρεις κατηγορίες αιτιών οι οποίες παράγουν αστοχίες. Οι στοχαστικές οι οποίες είναι ανεξάρτητες της γεωλογίας αλλά υπεισέρχονται στην ανάλυση κάθε ογκοστοιχείου. Οι παραγόμενες αστοχίες οι οποίες οφείλονται στο ογκοστοιχείο που εξορύσσεται εκείνη τη στιγμή. Σε αυτή την περίπτωση υπάρχει η τιμή της πρόβλεψης ενώ είναι εφικτό να βρεθεί και η πραγματική τιμή καθώς το υλικό εξορύσσεται. Η αντίσταση στην κοπή σε αυτή τη περίπτωση επηρεάζει τον τρόπο καταγραφής και όχι άμεσα τη σύγκρουση με σκληρά. Ανάλογα με την εκσκαψιμότητα αυξάνεται ή μειώνεται η ταχύτητα κοπής με αποτέλεσμα να παράγονται εσφαλμένα λανθασμένες υπερβάσεις των προδιαγραφών. Τέλος στην τρίτη κατηγορία συγκαταλέγονται οι υπερβάσεις οι οποίες οφείλονται σε πραγματικά καταγραφόμενη, υψηλή τιμή ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Με βάση αυτή την ανάλυση επτά τρόποι αστοχίας μπορεί να προκύψουν και επιπλέον ένας διαφορετικός τρόπος αντιμετώπισης της θραύσης του κάδου. Μία αστοχία σχετίζεται με την απώλεια δοντιών του κάδου κάτι το οποίο μειώνει την απόδοση της εξόρυξης. Για αυτή την επίπτωση η σοβαρότητα εκτιμάται με τον βαθμό πέντε καθώς δεν σταματά η παραγωγή και υπάρχει ευελιξία για τον προγραμματισμό της επιδιόρθωσης η οποία δεν είναι πολύ δαπανηρή. Η πιθανότητα να αποκοπούν δόντια όταν γίνει σύγκρουση με σκληρούς σχηματισμούς είναι μεγάλη και εκτιμάται με πέντε και εξαρτάται από τις ιδιότητες του σκληρού σχηματισμού αλλά και από το φορτίο στον καδοτροχό. Η ανιχνευσιμότητα εκτιμάται με δύο διότι ο χειριστής έχει οπτική επαφή με τον κάδο και μπορεί να διαπιστώσει αν έχουν αστοχήσει τα δόντια. Ο RPN με τα παραπάνω δεδομένα υπολογίζεται σε 50 και είναι δυνατό να μειωθεί στο 24 κατά τη λειτουργία, αν επιλεγεί μικρότερη εντομή (20cm) και μικρότερη ταχύτητα περιφοράς του βραχίονα (5m/min). Με αυτά τα μέτρα μειώνεται το φορτίο στον καδοτροχό σε βάρος βέβαια της παραγωγικότητας. Από αυτά τα δεδομένα η συνεισφορά στη σοβαρότητα και στην πιθανότητα της αστοχίας εκτιμάται με τρία και τέσσερα αντίστοιχα. Όσον αφορά το βελτιωμένο πρωτότυπο η επιλογή δοντιών με καλύτερο σχεδιασμό και πιο ανθεκτικά υλικά μειώνει τη σοβαρότητα και την πιθανότητα σε τέσσερα και τρία αντίστοιχα. Ακόμα μπορεί να εγκατασταθούν αισθητήρες για τη μέτρηση της κόπωσης των δοντιών (Risteiu et al., 2017b) κάτι που αυξάνει

τις κεφαλαιουχικές δαπάνες αλλά βοηθά στη χρονική πρόβλεψη της αστοχίας και τη βελτίωση της εξόρυξης. Με αυτό το μέτρο μπορεί να ελαχιστοποιηθεί η διακινδύνευση στο 12.

Αντίστοιχα με τον ίδιο τρόπο εκτιμάται η διακινδύνευση για τη θραύση του κάδου, η διαφορά με την προηγούμενη περίπτωση είναι η υψηλή σοβαρότητα (7) λόγω της μεγάλης απώλειας παραγωγικού χρόνου το οποίο οδηγεί σε ένα RPN 70. Η πιθανότητα αστοχίας τόσο κατά τη λειτουργία όσο και για το πρωτότυπο περιορίζονται περισσότερο διότι οι κάδοι είναι μεγαλύτερα εξαρτήματα και μπορούν ευκολότερα να ενισχυθούν. Με αυτές τις διαφοροποιήσεις ο RPN είναι 24 και οχτώ αντίστοιχα.

Καθώς προκύπτουν διαφορετικά μέτρα δράσης προστίθεται μία νέα γραμμή προκειμένου να αποτυπωθεί η αναθεωρημένη τιμή του RPN και να γίνει καλύτερη ανάλυση. Αν πραγματοποιηθούν εκτεταμένοι ελιγμοί όταν ανιχνευθεί ο σκληρός σχηματισμός και αυτός απομακρυνθεί με εναλλακτικά μέσα εξόρυξης η διακινδύνευση μειώνεται δραστικά (από 70 σε 6) διότι αποφεύγονται σοβαρές αστοχίες, ωστόσο αυξάνεται το κόστος εξ' αιτίας της χρησιμοποίησης άλλου είδους εξοπλισμού για την προχαλάρωση ή/και την εξόρυξη των σκληρών.

Η τρίτη αστοχία αφορά το στήριγμα των διατάξεων λόγω της κόπωσης από την ύπαρξη σκληρών. Οι επιπτώσεις εδώ αφορούν την πιθανότητα καταστροφής των δαπανηρών διατάξεων, την απώλεια του παραγωγικού χρόνου για την επιδιόρθωση της βλάβης και την αδυναμία λειτουργίας του συστήματος καθοδήγησης. Προκειμένου να αποφευχθεί κάποια αστοχία τοποθετήθηκε προστατευτικό κάλυμμα γύρω από την ενόργανη διάταξη ενώ ο έλεγχος της αστοχίας του στηρίγματος είναι οπτικός. Με βάση τα παραπάνω η σοβαρότητα βαθμολογείται με έξι. Η πιθανότητα επειδή, δεν υπάρχει επαφή με το μέτωπο και η αστοχία οφείλεται είτε, σε απόσπαση του πρανούς είτε, σε κόπωση από τα περιοδικά μεταβαλλόμενα φορτία, βαθμολογείται με δύο. Η ανιχνευσιμότητα παραμένει ίδια με τις προηγούμενες αστοχίες επομένως ο αριθμός ανέρχεται σε 24. Η αναθεώρησή του αφορά την επιλογή μικρότερου φορτίου στον καδοτροχό κατά τη λειτουργία και τη δημιουργία ενός ανθεκτικότερου στηρίγματος για το βιομηχανικό πρωτότυπο. Με αυτά τα μέτρα η διακινδύνευση αναθεωρείται σε 20 και τρία αντίστοιχα.

Η τέταρτη αστοχία αφορά την αδυναμία σύνδεσης του δέκτη του GPS με το σταθμό βάσης με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η μεταφορά δεδομένων και να μην λειτουργεί το σύστημα καθοδήγησης. Η σημαντικότητα αυτού του γεγονότος είναι μεγάλη και βαθμολογείται με πέντε. Η πιθανότητα είναι επίσης πολύ μεγάλη (έξι) διότι είναι εξαιρετικά συχνό φαινόμενο η απώλεια αυτής της σύνδεσης. Όσον αφορά την ανιχνευσιμότητα υπάρχουν κατάλληλες προειδοποιήσεις στον υπολογιστή του δέκτη του GPS οι οποίες δείχνουν την ποιότητα του σήματος γι' αυτό είναι ανιχνεύσιμη αστοχία. Ο RPN υπολογίζεται σε 30, κατά τη λειτουργία η ύπαρξη δυνατότητας διαχωρισμού (χειροκίνητης ή αυτοματοποιημένης) των δεδομένων αγωγιμότητας χωρίς τα δεδομένα συντεταγμένων μειώνει τη σοβαρότητα σε τρία και το τελικό αριθμό προτεραιότητας σε 18.

Με την ανάπτυξη βιομηχανικού πρωτοτύπου μπορεί να κατασκευαστεί ένα σύστημα ακριβούς μέτρησης της γωνίας του βραχίονα σε σχέση με τον άξονα πορείας του εκσκαφέα ώστε να περιοριστεί η χρήση του δέκτη του GPS. Αυτό το μέτρο μαζί με την ύπαρξη εφεδρικού δέκτη ελαχιστοποιεί τη σοβαρότητα. Η πιθανότητα επίσης μειώνεται στο δύο λόγω της μειωμένης χρήσης του δέκτη συνεπώς και της μείωσης της συχνότητας απώλειας σήματος ενώ, η ανιχνευσιμότητα παραμένει ίδια. Με αυτές τις εκτιμήσεις ο RPN υπολογίζεται σε 18 και δυο

κατά τη μόνιμη λειτουργία του υπάρχοντος συστήματος και για το βιομηχανικό πρωτότυπο αντίστοιχα.

Το σύστημα αστοχεί επίσης με την καθυστέρηση επεξεργασίας των δεδομένων. Αιτία της αστοχίας είναι η ανεπάρκεια της επεξεργαστικής ισχύος και η πολύ μεγάλη παραγωγή δεδομένων από τους αισθητήρες. Η άμεση επίπτωση αφορά την καθυστέρηση της πρόβλεψης το οποίο συνεπάγεται αδυναμία καθοδήγησης και η επίπτωσή βαθμολογείται με τέσσερα καθώς υπάρχει ένα σύστημα ψύξης με αέρα το οποίο ελαττώνει τη σοβαρότητα. Καθώς δεν είναι πολύ συχνό η ταχύτητα του βραχίονα να είναι τόσο μεγάλη η πιθανότητα αυτής της αστοχίας βαθμολογείται με τρία και η ανιχνευσιμότητα λόγω της ύπαρξης κατάλληλης προειδοποίησης με ένα. Ο αριθμός προτεραιότητας για αυτή την αστοχία είναι 12 και ελαττώνεται η πιθανότητα σε δύο αν μειωθεί η ταχύτητα περιφοράς του βραχίονα κατά την εξόρυξη, έτσι ο αναθεωρημένος αριθμός είναι οχτώ. Για την ανάπτυξη του βιομηχανικού πρωτοτύπου, ένα ταχύτερο επεξεργαστικό σύστημα και ταχύτεροι αλγόριθμοι ελαχιστοποιούν περαιτέρω την πιθανότητα και ο αναθεωρημένος RPN είναι τέσσερα.

Η έκτη αστοχία αφορά τους λανθασμένους χειρισμούς του χειριστή και οφείλονται στη μειωμένη επίγνωση της κατάστασης και το υψηλό φόρτο εργασίας. Η σοβαρότητα και η πιθανότητα τέτοιων σφαλμάτων δεν είναι πολύ μεγάλη και εκτιμώνται με τρία και δύο αντίστοιχα. Σε αυτή την περίπτωση δεν υπάρχουν τρόποι ανίχνευσης τέτοιων σφαλμάτων και μόνο ο ίδιος ο χειριστής μπορεί να «αισθανθεί» τότε κάνει λάθος γι' αυτό εκτιμάται με πέντε η ανιχνευσιμότητα. Τελικά ο RPN υπολογίζεται σε 30, κατά τη λειτουργία δεν μπορεί να υπάρξει κάποιο μήνυμα για την προειδοποίηση του χειριστή ενώ για το βιομηχανικό πρωτότυπο υπάρχουν αρκετές βελτιώσεις. Πιο αναλυτικά ο σχεδιασμός ενός αυτόματου συστήματος καθοδήγησης αντίστοιχο με τα συστήματα αυτόματου πιλότου τα οποία συναντώνται στην αεροπλοΐα, για κάποιες διαδικασίες και για περιορισμένο χρονικό διάστημα εκτιμάται ότι θα μειώσει τη σοβαρότητα στο δύο ενώ η παραγωγή προειδοποιήσεων ελαχιστοποιεί την πιθανότητα. Όσον αφορά την ανιχνευσιμότητα η εγκατάσταση αισθητήρων κόπωσης του χειριστή την αυξάνουν και έτσι εκτιμάται με δύο ενώ δίνουν και τη δυνατότητα παραγωγής μηνυμάτων. Με αυτές τις τροποποιήσεις ο RPN αναθεωρείται σε τέσσερα για ένα νέο πρωτότυπο.

Η τελευταία αστοχία που αναλύεται αφορά τα εξαρτήματα του υπολογιστή, κύριες αιτίες των οποίων είναι η υπερθέρμανση, το βραχυκύκλωμα λόγω μεγάλης ποσότητας αιωρούμενων σωματιδίων, η αστοχία των εξαρτημάτων και η πτώση του υπολογιστή από κραδασμούς. Αποτέλεσμα αυτών είναι η αδυναμία καθοδήγησης, του οποίου η σοβαρότητα εκτιμάται με τέσσερα. Η πιθανότητα είναι μικρή (δύο) διότι αυτές οι πηγές κινδύνου (θερμότητα, σκόνη, κραδασμοί) μειώνονται εντός του θαλάμου χειρισμού του εκσκαφέα. Επίσης η ανιχνευσιμότητα είναι μειωμένη διότι υπάρχουν διαγνωστικά του λειτουργικού συστήματος τα οποία βοηθούν στην εκτίμηση της κατάστασης των τμημάτων του υπολογιστή γι' αυτό και η ανιχνευσιμότητα είναι η ελάχιστη. Για αυτή την αστοχία ο αριθμός προτεραιότητας υπολογίζεται σε οχτώ ενώ με την ύπαρξη εφεδρικής μονάδας υπολογιστή στο πρωτότυπο η σοβαρότητα αναθεωρείται στο δύο. Η επιλογή πιο αξιόπιστων εξαρτημάτων και η εγκατάσταση σταθερής μονάδας μειώνουν και την πιθανότητα εμφάνισης της. Τελικά με τις νέες εκτιμήσεις αναθεωρείται ο RPN στο δύο.

Πίνακας 5.1: Πίνακας ανάλυσης FMECA για το υποσύστημα μετώπου-μετρητικής διάταξης κατασκευασμένο από τα δεδομένα των μετρήσεων του Σχήματος 6.1.

Σύστημα			1	25R0 (Πάσο)																						
Υποσύστημα			2	Μετώπου - Μετρητικής διάταξης																						
Φάση ανάπτυξης			3	Δοκιμαστική																						
					Παρακολούθηση και επιδιόρθωση								Χαρακτηρισμός με διακινδύνευση													
					Υπάρχοντα		Ανάλυση δράσης σε φάση ανάπτυξης																			
A/A	Ογκοστ οιχείο	Τρόπος αστοχίας	Πιθανές αιτίες αστοχίας	Άμεσες ή Τοπικές επιπτώσεις	Μέτρα πρόληψης ή μετριασμού	Τρόπος ανίχνευσης	Μόνιμη λειτουργία/ Μηνύματα καθοδήγησης			Βιομηχανικό πρωτότυπο			Σοβαρότητα - εκσκαψιμότητ α			Πιθανότητα			Ανιχνευσιμότη τα			RPN			Παρατηρ ήσεις - Σχόλια	
4	5	6	7	8	9	10	11 Σ	11 Π	11 A	12 Σ	12 Π	12 A	13	ΔΟΚ	BIO	14	ΔΟΚ	BIO	15	ΔΟΚ	BIO	16	16 ΔΟΚ	16 BIO	17	
1	25-30	Απότομη αύξηση αντιστάσεων	Άργιλος- σκληρά	Αύξηση εκσκαψιμότητας	-	CMD-2	Αναθεώρηση και μήνυμα "Σύγκρουση με σκληρά ή δυσκολία εξόρυξης"		Αναθεώρηση 30cm -> 0,6	Εγκατάσταση διάταξης παράλληλα με το έδαφος	Συχνότερη δειγματοληψ ία	Οπτική ανάλυση και LiDAR	1	7	4	5	6	3	3	2	1	15	84	12		
2	45-50	Σταδιακή αύξηση αντιστάσεων με ενδιάμεσες απόλυτες αντιστάσεις	Άργιλος- κροκαλοπ αγή	-	-	CMD-2	Αναθεώρηση		30cm -> 0,6	Εγκατάσταση διάταξης παράλληλα με το έδαφος	Συχνότερη δειγματοληψ ία	Οπτική ανάλυση και LiDAR	1	7	3	4	5	3	3	2	1	12	70	9		
3	112-117	Απότομη αύξηση αντιστάσεων με υψηλές αντιστάσεις	Μείωση ύψους πακέτου	-	-	CMD-2	Αναθεώρηση		60cm -> 0,85	Τροποποίησ η κριτηρίου	Συχνότερη δειγματοληψ ία	Οπτική ανάλυση και LiDAR	1	7	2	5	6	2	6	3	1	30	126	4		
4	155-175	Απότομη αύξηση αντιστάσεων με πολύ υψηλές αντιστάσεις	Απομάκρ υνση από το μέτωπο	-	-	CMD-2	Αναθεώρηση		60cm -> 0,85	Τροποποίησ η κριτηρίου	Συχνότερη δειγματοληψ ία	Οπτική ανάλυση και LiDAR	1	7	2	5	6	2	7	4	1	35	168	4		



Πίνακας 5.2: Πίνακας ανάλυσης FMECA για το υποσύστημα εκτέλεσης για το ογκοστοιχείο «25-30» του Πίνακα 6.1.

Σύστημα			1	25R0 (Πάσο)																					
Υποσύστημα			2	Εκτέλεσης																					
Φάση ανάπτυξης			3	Δοκιμαστική																					
					Παρακολούθηση και επιδιόρθωση								Χαρακτηρισμός με διακινδύνευση												
					Υπάρχοντα		Ανάλυση δράσης σε φάση ανάπτυξης																		
A/A	Ογκοστ οιχείο	Τρόπος αστοχίας	Πιθανές αιτίες αστοχίας	Άμεσες ή Τοπικές επιπτώσεις	Μέτρα πρόληψης ή μετριασμού	Τρόπος ανίχνευσης	Μόνιμη λειτουργία/ καθοδήγησης			Βιομηχανικό πρωτότυπο			Σοβαρότητα			Πιθανότητα			Ανιχνευσιμότητ α			RPN			Παρατηρ ήσεις - Σχόλια
4	5	6	7	8	9	10	11			12			13			14			15			16			17
							Σ	Π	A	Σ	Π	A		ΔΟΚ	BIO		ΔΟΚ	BIO		ΔΟΚ	BIO		ΔΟΚ	BIO	
1	25-30	Απώλεια δοντιών κάδου	Υπαρξη σκληρών	Μείωση απόδοσης της εξόρυξης	-	οπτικός	Μικρότερο φορτίο στον καδοτροχό	Μικρότερο φορτίο στον καδοτροχό & τακτική	-	Σχεδιασμός και Ανθεκτικότερ α	Ανθεκτικότερ α	Αισθητήρας επιτάχυνσης	<div>5</div> <div>5</div>	3	4	<div>1</div> <div>5</div>	4	3	<div>2/3</div> <div>2</div>	2	1	<div>1 1/9</div> <div>50</div>	24	12	
2α	25-30	Θραύση κάδου	Υπαρξη σκληρών	Απώλεια παραγωγικού χρόνου	-	οπτικός	Μικρότερο φορτίο στον καδοτροχό	Μικρότερο φορτίο στον καδοτροχό	-	-	Ανθεκτικότερ α	Αισθητήρας επιτάχυνσης	<div>7</div> <div>7</div>	4	4	<div>1</div> <div>5</div>	3	2	<div>2/3</div> <div>2</div>	2	1	<div>1 5/9</div> <div>70</div>	24	8	
2β	25-30	>>	Υπαρξη σκληρών	Απώλεια παραγωγικού χρόνου	-	-	Εκτεταμένοι ελιγμοί και χρήση εναλλακτικών μέσων		-	-	-	-	<div>7</div>	3	-	<div>1</div>	2	-	<div>2/3</div>	1	-	<div>1 5/9</div>	6	-	
													<div>7</div> <div>7</div>			<div>5</div>			<div>2</div> <div>2</div>			<div>70</div>			
3	25-30	Αστοχία στηρίγματος διατάξεων	Υπαρξη σκληρών	Απώλεια παραγωγικού χρόνου και αδυναμία επαρκούς	Κάλυμμα για το CMD-2	οπτικός	-	Μικρότερο φορτίο στον καδοτροχό	-	-	Ανθεκτικότερ α	-	<div>6</div>	5	3	<div>2/5</div>	2	1	<div>2/3</div>	2	1	<div>8/15</div>	20	3	
													<div>6</div> <div>2</div>			<div>2</div> <div>2</div>			<div>24</div>						
4	25-30	Μη επαρκές σήμα GPS με το σταθμό βάσης	Απώλεια σήματος	Μη πραγματοποίηση επαρκούς πρόβλεψης	-	Γραφικός-οπτικός	Χειροκίνητος διαχωρισμός των δεδομένων	-	-	Σύστημα με γωνιόμετρα-επιταχυνσιόμετρα και	Ταυτόχρονη δειγματοληψία με δυο GPS	-	<div>5</div>	3	1		6	2	<div>1/3</div>	1	1	<div>0</div>	18	2	
													<div>5</div> <div>6</div>			<div>1</div> <div>30</div>									
5	25-30	Καθυστέρηση επεξεργασίας δεδομένων	Ανεπάρκεια επεξεργαστικής Φόρτος εργασίας, μείωση της	Καθυστέρηση πρόβλεψης	Ψύξη υπολογιστή	-	-	Μικρότερη ταχύτητα περιφοράς	-	-	-	-	<div>4</div>	4	4	<div>3/5</div>	2	1	<div>1/3</div>	1	1	<div>4/15</div>	8	4	
													<div>4</div> <div>3</div>			<div>1</div> <div>12</div>									
6	25-30	Λανθασμένοι χειρισμοί	Φόρτος εργασίας, μείωση της	Μη αποδοτική εξόρυξη	-	-	-	-	-	Καθοδήγηση σε περίπτωση κόπωσης	Μηνύματα για λανθασμένους	Αισθητήρες κόπωσης	<div>3</div>	-	2	<div>2/5</div>	-	1	<div>1 2/3</div>	-	2	<div>2/3</div>	-	4	
													<div>3</div> <div>2</div>			<div>5</div> <div>30</div>									
7	25-30	Αστοχία εξαρτημάτων υπολογιστή	Υπερθέρμανση, βραχυκύκλωμα	Αδυναμία καθοδήγησης	Διαγνωστικό λειτουργικό ύ	Διαγνωστικό λειτουργικό ύ	-	-	-	Εφεδρική μονάδα	Εξαρτήματα υπολογιστή με μεγαλύτερη	-	<div>4</div>	-	2	<div>2/5</div>	-	1	<div>1/3</div>	-	1	<div>8/45</div>	-	2	
													<div>4</div> <div>2</div>			<div>1</div> <div>8</div>									

## Κεφάλαιο 6ο: Συμπεράσματα και προτάσεις

### 6.1. Συμπεράσματα

Στη διατριβή αυτή πραγματοποιήθηκε η ανάλυση αξιοπιστίας με τη μέθοδο FMECA ενός συστήματος εξόρυξης με εκσκαφέα καδοτροχού. Το πειραματικό αυτό σύστημα αναπτύχθηκε για να εντοπίζει την παρουσία σκληρών σχηματισμών κατά την εξόρυξη με αυτού του τύπου τον εκσκαφέα και να ειδοποιεί έγκαιρα τον χειριστή έτσι ώστε να αποφευχθεί μια καταστροφική σύγκρουση καδοτροχού-σκληρού σχηματισμού.

Στόχος της ανάλυσης ήταν δημιουργηθεί μία μεθοδολογία η οποία να εντοπίσει τα σημεία που χρήζουν αλλαγών-βελτιώσεων τόσο κατά τη φάση λειτουργίας όσο και στη φάση του σχεδιασμού του πειραματικού αυτού συστήματος έτσι ώστε, να εξελιχθεί σε ένα λειτουργικό βιομηχανικό καθοδηγούμενο σύστημα το οποίο θα συμβάλει στην αυτοματοποίηση της εξορυκτικής διαδικασίας στο απαιτητικό και διαρκώς μεταβαλλόμενο μέτωπο εξόρυξης.

Η εκτεταμένη βιβλιογραφική επισκόπηση που πραγματοποιήθηκε πριν την ανάλυση έδειξε ότι το σημαντικότερο εμπόδιο για την αυτοματοποίηση των εξορυκτικών διαδικασιών είναι η δυσκολία-αδυναμία πρόβλεψης των γεωλογικών ιδιοτήτων εντός του μετώπου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να καθίσταται εξαιρετικά δύσκολη η εκ των προτέρων επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων εξόρυξης ώστε να πραγματοποιηθεί τόσο η λύση της συνέχειας του γεωολογικού στη φυσική του θέση (κοπή) όσο και η φόρτωσή του στον κάδο με πλήρως αυτοματοποιημένο τρόπο. Η επιλογή αυτών των παραμέτρων απαιτεί την ανέπαφη καταγραφή των γεωλογικών ιδιοτήτων εντός του μετώπου κάτι το οποίο αποτελεί βασικό ανασταλτικό παράγοντα λόγω της υψηλής αβεβαιότητας των γεωλογικών παραμέτρων. Για τον λόγο αυτό προτάθηκε μία μεθοδολογία επιλογής τέτοιων ενόργανων μετρητικών διατάξεων με έμφαση στην ακρίβεια των μετρήσεων ώστε αυτές να είναι κατάλληλες για την επιλογή των παραμέτρων εξόρυξης σε πραγματικό χρόνο. Με τον τρόπο αυτό ουσιαστικά διενεργείται διασκόπηση υπεδάφους τη στιγμή της εξόρυξης ενώ εργαστηριακές διαδικασίες μεταφέρονται στο μέτωπο εκσκαφής.

Σε αυτό το πλαίσιο αναλύθηκαν οι επιπτώσεις διάφορων παραμέτρων στις καταγραφές με την ηλεκτρομαγνητική γεωφυσική μέθοδο κινητού πομπού-δέκτη. Πιο συγκεκριμένα μελετήθηκε η συμπεριφορά των γεωλογικών παραμέτρων, των παραμέτρων της διάταξης και των μεταλλευτικών παραμέτρων σε πραγματικό χρόνο κατά την εξόρυξη.

Διαπιστώθηκε ότι η ανάλυση της αξιοπιστίας τέτοιων συστημάτων αυτοματοποίησης απαιτεί την εξέταση τόσο του υλικού μέρους τους, όσο και των διαδικασιών που επιτελούνται καθώς, η μεμονωμένη εξέτάσή τους εισάγει αλληλεξαρτήσεις μεταξύ των υλικών και των διαδικασιών οι οποίες περιπλέκουν την ανάλυση. Επιπρόσθετα η μελέτη της αυτοματοποίησης μίας εξορυκτικής διαδικασίας και των σταδίων της έδειξε ότι η μέθοδος FMECA είναι κατάλληλη για την ανάλυση της αξιοπιστίας τους, αφού είναι ευέλικτη, μπορεί να εφαρμοστεί σε μεικτά συστήματα αποτελούμενα από υλικά και διαδικασίες και είναι δυνατό να εφαρμοστεί

κατά το σχεδιασμό του συστήματος αλλά και κατά τη λειτουργία του. Επιπλέον κατά την εκτίμηση της διακινδύνευσης λαμβάνει υπόψη και τη δυνατότητα έγκαιρου εντοπισμού και διόρθωσης αστοχιών (ανιχνευσιμότητα αστοχιών) το οποίο είναι απαραίτητο για την αξιολόγηση και διόρθωση των καταγραφών των μετρητικών διατάξεων οι οποίες χρησιμοποιούνται σε συστήματα αυτοματισμού.

Με βάση τα παραπάνω έγινε κατάλληλη διαμέριση του πειραματικού συστήματος και εφαρμόστηκε η μέθοδος FMECA για την ανάλυση της αξιοπιστίας του κατά τη λειτουργία αλλά και το σχεδιασμό του. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αξιοπιστίας του υλικού μέρους του συστήματος έδειξαν ότι σημαντικά προβλήματα προκύπτουν και από τις αστοχίες των εξαρτημάτων του συστήματος. Καθώς το σύστημα λειτουργεί σε αντίξοες συνθήκες θερμοκρασίας, πίεσης και άλλων βλαπτικών παραγόντων (αιωρούμενα σωματίδια, δονήσεις) είναι εξαιρετικά σημαντικό τα εξαρτήματα τόσο των μετρητικών διατάξεων όσο και των υπολογιστικών διατάξεων να έχουν σχεδιαστεί ώστε να αντέχουν για αρκετό χρονικό διάστημα σε αυτές τις συνθήκες.

Προστατευτικά μέτρα για τον περιορισμό της διακινδύνευση σε τέτοιες περιπτώσεις κατά το σχεδιασμό τέτοιων συστημάτων είναι η ελαχιστοποίηση του υψηλού ποσοστού αιωρούμενων σωματιδίων η οποία επηρεάζει τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα. Ο περιορισμός των κραδασμών οι οποίοι μειώνουν τη διάρκεια ζωής των μηχανικών εξαρτημάτων και η προστασία των ενόργανων μετρητικών διατάξεων από αστοχίες του πρανούς. Η εγκατάσταση αισθητήρων (επιταχυνσιόμετρων, μηχανισιόμετρων και άλλων διατάξεων) στους κάδους, τα κοπτικά άκρα και το σώμα του εκσκαφέα βελτιώνουν την εκτίμηση της σοβαρότητας των αστοχιών αλλά και τη συχνότητα εμφάνισης (πρόβλεψη) των αστοχιών κάνοντας εφικτή την προληπτική συντήρηση (predictive maintenance). Κατά τη λειτουργία του συστήματος η αποφυγή των σκληρών σχηματισμών και η μείωση του ρυθμού εξόρυξης είναι τα βασικά μέτρα που ελαχιστοποιούν τη διακινδύνευση.

Τα αποτελέσματα από την ανάλυση αξιοπιστίας της διαδικασίας έδειξαν ότι η αρχική «αστοχία» του συστήματος είναι οι ηλεκτρομαγνητικές ανωμαλίες οι οποίες δεν οφείλονται στην ύπαρξη στόχου-σκληρού σχηματισμού. Κύρια αιτία δημιουργίας τέτοιων ανωμαλιών είναι η διαρκώς μεταβαλλόμενη απόσταση της μετρητικής διάταξης από το μέτωπο και η μεταβολή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της βαθμίδας, της θερμοκρασίας και της υγρασίας του περιβάλλοντος.

Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος εισάγεται ένας συντελεστής διόρθωσης του σήματος από βαθύτερους στόχους στο μέτωπο ανάλογα με την απόσταση του οργάνου από το πρανές το οποίο βελτιώνει την παράμετρο της ανιχνευσιμότητας στον RPN. Προτείνεται κατά τον σχεδιασμό ενός νέου πρωτοτύπου να ενσωματωθούν μετρητικές διατάξεις μέτρησης της απόστασης διάταξης-μετώπου και αποτύπωσης του μετώπου (όπως LiDAR) ώστε η διόρθωση των ηλεκτρομαγνητικών ανωμαλιών να γίνει αποτελεσματικότερη. Επίσης η εγκατάσταση αισθητήρων για τη καταγραφή των τοπικών περιβαλλοντικών συνθηκών θα δώσει την δυνατό-

τητα διόρθωσης των καταγραφόμενων τιμών απαλείφοντας ημερήσιες περιοδικότητες ή περιοδικότητες μεγαλύτερης διάρκειας κάνοντας εφικτή τη μακροχρόνια εγκατάσταση της διάταξης στον εκσκαφέα.

Μία επιπλέον πιθανή αστοχία είναι η καθυστέρηση της επεξεργασίας των δεδομένων. Παρά το γεγονός ότι στη διατριβή αυτή δεν χρησιμοποιήθηκαν απαιτητικοί αλγόριθμοι, ούτε δεδομένα από μεγάλο πλήθος αισθητήρων ώστε να απαιτούνται αυξημένοι υπολογιστικοί πόροι, σε μία βιομηχανική εφαρμογή θα είναι απαραίτητο να επεξεργάζονται περισσότερα δεδομένα ταυτόχρονα, από περίπλοκους υπολογιστικά αλγόριθμους. Αυτό κάνει τη διαχείριση και επεξεργασία των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, συνήθως 1s, μία αρκετά σύνθετη διαδικασία. Τα μέτρα δράσης για την αντιμετώπιση τέτοιων προβλημάτων είναι η χρήση ταχύτερων αλγόριθμων και εξοπλισμού του ηλεκτρονικού υπολογιστή για την αύξηση της ταχύτητας της επεξεργασίας των δεδομένων. Κατά τη φάση λειτουργίας η μείωση του ρυθμού εξόρυξης αυξάνει το διαθέσιμο χρόνο στον οποίο μπορούν τέτοιοι υπολογισμοί να πραγματοποιηθούν.

Αστοχία για την εξορυκτική διαδικασία αποτελούν οι λανθασμένοι χειρισμοί λόγω φόρτου εργασίας και μειωμένης επίγνωσης της κατάστασης. Σε αυτή την περίπτωση η εγκατάσταση αισθητήρων κόπωσης του χειριστή και προειδοποίησής για πιθανότητα υπερβολικής κόπωσης αλλά και αυξημένου φόρτου εργασίας μειώνει τη διακινδύνευση από τέτοια συμπεριφορικά σφάλματα.

Τέλος μία σημαντική αστοχία των διαδικασιών είναι αυτή που σχετίζεται με τη μη διαθεσιμότητα του δέκτη του GPS. Με την εγκατάσταση άλλων διατάξεων όπως γωνιόμετρων, επιταχυνσιόμετρων και μαγνητόμετρων μειώνεται η χρήση αυτής της διασύνδεσης άρα είναι πιο σπάνιες αυτές οι αστοχίες.

Συνολικά η διακινδύνευση, όσον αφορά τον σχεδιασμό ενός νέου βιομηχανικού πρωτοτύπου, εκτιμήθηκε ότι μειώνεται σημαντικά για όλα τα υλικά εξαρτήματα σε σχέση με το πειραματικό σύστημα όπως διαμορφώθηκε κατά τις τελικές δοκιμές. Επίσης με αυτή τη μεθοδολογία δημιουργούνται μηνύματα με αυτοματοποιημένο τρόπο ώστε να υποβοηθείται ο χειριστής προκειμένου να λάβει τις βέλτιστες αποφάσεις. Μία τέτοια λειτουργία είναι εξαιρετικά χρήσιμη επειδή στα αυτοματοποιημένα συστήματα ο χειριστής καλείται να λάβει συχνότερα και ταχύτερα αποφάσεις σε συστήματα τα οποία γίνονται συνεχώς πιο περίπλοκα.

## 6.2. Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Για τη βελτίωση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης αξιοπιστίας του συστήματος που εξετάστηκε με τη μέθοδο FMECA προτείνεται η πρόσκτηση επιπλέον δεδομένων. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τρεις τρόπους με εκτέλεση περισσότερων δοκιμών πεδίου, με προσομοιώσεις σε φυσικά ομοιώματα και τέλος με προσομοιώσεις σε ψηφιακά ομοιώματα. Οι δύο τελευταίοι τρόποι έχουν χαμηλό σχετικά κόστος και έτσι θα καταστεί εφικτό να καθοριστούν με μεγαλύτερη αντικειμενικότητα οι παράμετροι της μεθόδου και να υπολογιστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια ο δείκτης RPN.

Επίσης ο συνδυασμός της μεθόδου FMECA με άλλες μεθόδους ανάλυσης κινδύνου, όπως η δένδρική ανάλυση σφαλμάτων (Fault Tree Analysis) ή τα διαγράμματα Bowtie, θα μπορούσε να βελτιώσει την ανάλυση αξιοπιστίας του συστήματος.

Τέλος, η συμπερίληψη μεθόδων ασαφούς λογικής στη διαδικασία της FMECA μπορεί να κάνει αποτελεσματικότερη την ενσωμάτωση της υποκειμενικότητας των εκτιμήσεων για την πιθανότητα, τη σοβαρότητα και την ανιχνευσιμότητα των τρόπων αστοχίας και να συμβάλλει στη βελτίωση της ανάλυσης της αξιοπιστίας του συστήματος.

## Αναφορές

- Agioutantis, Z., Delmadorou, S., Steiakakis, N., Steiakakis, C., Papaterpos, S., 2018. A Real-Time Event-Driven Database System for Maintenance Planning and Productivity Analysis in Continuous Surface Mining Operations.
- Alenowicz, J., Huss, W., 2017. Fatigue Life Estimation in Bucket-Wheel Excavators Maintenance, in: Rusiński, E., Pietrusiak, D. (Eds.), Proceedings of the 13th International Scientific Conference. Springer International Publishing, Cham, pp. 9–17. doi:10.1007/978-3-319-50938-9\_2
- Amini, A., Fazelinia, M., 2018. Risk assessment of Namaklan road tunnel using Failure Mode and Effect Analysis (FMEA).
- Andras, I., Lazăr, M., Andras, A., 2017. The correlation between physical-mechanical properties and the cutting characteristics in the case of unmineable rock formations from Husnicioara lignite open pit.
- Andras, I., Lazar, M., Andras, A., Radu, S.-M., Vîlceanu, F., Dinescu, S., 2018. New Method of Residual Lifetime Assessment of Bucket Wheel Excavator Operating in Romanian Lignite Open Pits. Presented at the 14 th International Symposium of Continuous Surface Mining, ISCSM2018.
- András, J., Kovács, J., Andras, I., Kertész, I., Tomus, O.-B., 2020. Remaining Lifetime Assessment of Bucket Wheel Excavator's Boom Structure by Using Non-destructive Method. Acta Mater. Transylvanica 3, 10–14. doi:10.33924/amt-2020-01-02
- Androulakis, V., Sottile, J., Schafrik, S., Agioutantis, Z., 2020. Concepts for Development of Autonomous Coal Mine Shuttle Cars. IEEE Trans. Ind. Appl. 56, 3272–3280. doi:10.1109/TIA.2020.2972786
- Androulakis, V., Sottile, J., Schafrik, S., Agioutantis, Z., 2019. Elements of Autonomous Shuttle Car Operation in Underground Coal Mines, in: 2019 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. Presented at the 2019 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, pp. 1–7. doi:10.1109/IAS.2019.8912014
- Bajcar, A., Onichimiuk, M., Nowak-Szpak, A., Wygoda, M., 2018. Methods Of Decreasing Of Bucket Wheel Excavators Failures Working In Soils Including Unmineable Intrusions, in: Proceedings of the 14th International Symposium of Continuous Surface Mining.
- Balaba, B., Ibrahim, M.Y., Gunawan, I., 2012. Utilisation of data mining in mining industry: Improvement of the shearer loader productivity in underground mines, in: IEEE 10th International Conference on Industrial Informatics. Presented at the IEEE 10th International Conference on Industrial Informatics, pp. 1041–1046. doi:10.1109/INDIN.2012.6301364
- Balaraju, J., Govinda Raj, M., Murthy, C.S., 2019. Fuzzy-FMEA risk evaluation approach for LHD machine-A case study. J. Sustain. Min. 18, 257–268. doi:10.1016/j.jsm.2019.08.002
- Banghart, M., Babski-Reeves, K., Bian, L., 2016. Human induced variability during failure mode effects analysis, in: 2016 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS). Presented at the 2016 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), pp. 1–7. doi:10.1109/RAMS.2016.7448000
- Bar-Cohen, Y., Zacny, K., 2009. Drilling in extreme environments: penetration and sampling on Earth and other planets. Wiley-VCH, Weinheim.
- Benndorf, J., 2020. Closed Loop Management in Mineral Resource Extraction: Turning Online Geo-Data into Mining Intelligence, SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology. Springer International Publishing.

- Beyssac, O., 2020. New Trends in Raman Spectroscopy: From High-Resolution Geochemistry to Planetary Exploration. *Elements* 16, 117–122. doi:10.2138/gselements.16.2.117
- Bird, D., Beal, C., Thomson, A., Vinson, C., 2019. New Technology & Innovation Report 2 – Autonomous Mining Equipment. RFCAmbrian.
- Bradshaw, J.M., Feltovich, P.J., Jung, H., Kulkarni, S., Taysom, W., Uszok, A., 2004. Dimensions of Adjustable Autonomy and Mixed-Initiative Interaction, in: Nickles, M., Rovatsos, M., Weiss, G. (Eds.), *Agents and Computational Autonomy*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 17–39. doi:10.1007/978-3-540-25928-2\_3
- Burgess-Limerick, R., 2020. Human-Systems Integration for the Safe Implementation of Automation. *Min. Metall. Explor.* doi:10.1007/s42461-020-00248-z
- Burgess-Limerick, R., Horberry, T., Steiner, Lisa J, 2019. Mining automation human-systems integration – CMOC-Northparkes case study, in: *AusIMM Bulletin*.
- Buxton, M., Benndorf, Jörg, Donner, R., Nawotyta, W., Lohsträter, O., Lindig, M., Rosenberg, H., Asmus, S., 2019. Real-time reconciliation and optimization in large open pit coal mines (RTRO-Coal) - final report.
- Chandler, F.T., Valentino, W.D., Philippart, M.F., Relvini, K.M., Bessette, C.I., Shedd, N.P., 2011. Human factors process failure modes and effects analysis (HF PFMEA) software tool. US7904407B2.
- Chandler, F.T., Valentino, W.D., Philippart, M.F., Relvini, K.M., Bessette, C.I., Shedd, N.P., 2007. Human factors process failure modes and effects analysis (HF PFMEA) software tool. US7263510B2.
- Ciani, L., Guidi, G., Patrizi, G., 2019. A critical comparison of alternative Risk Priority Numbers in Failure Modes, Effects and Criticality Analysis. *IEEE Access* PP, 1–1. doi:10.1109/ACCESS.2019.2928120
- Clifton, A.E.I., 2005. *Hazard Analysis Techniques for System Safety*. John Wiley & Sons.
- Crane, R.A., Sapsford, D.J., 2018. Towards “Precision Mining” of wastewater: Selective recovery of Cu from acid mine drainage onto diatomite supported nanoscale zerovalent iron particles. *Chemosphere* 202, 339–348. doi:10.1016/j.chemosphere.2018.03.042
- Dammers, M., Deppe, C., 2018. Model-based Investigations of Hybrid Mining Systems Using Cutting, Crushing and Conveying Technology in Medium Hard Rock. Presented at the International Symposium of Continuous Surface Mining, ISCSM2018.
- de Wardt, J., DiFiore, A., Dow, B., Flannigan, C., Araujo, M., Melancon, D.D.C., Tovar, E., Cayeux, E., Macpherson, J., Andersen, M., Laing, M., Mutch, R., Macmillan, R., Hbaieb, S., Loftis, T., Zamora, M., 2019. Drilling Systems Automation Roadmap 2019 – 2025 Phase II Stage II Report.
- de Wardt, J.P., Moore, T., McKenzie, A., 2011. FMECA and Commissioning - Guidelines to reliably deliver technology and systems for successful Drilling Automation. Presented at the SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/140231-MS
- de Wardt, J.P., Sheridan, T.B., DiFiore, A., 2016. Human Systems Integration: Key Enabler for Improved Driller Performance and Successful Automation Application. Presented at the IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/178841-MS
- Delogkos, E., Manzocchi, T., Childs, C., Camanni, G., Roche, V., 2020. The 3D structure of a normal fault from multiple outcrop observations. *J. Struct. Geol.* 136, 104009. doi:10.1016/j.jsg.2020.104009

- Delogkos, S., Papanikolaou, V., Manzocchi, T., Childs, C., Roche, V., Camanni, G., Schöpfer, M., Walsh, J.J., Pavlides, S., Chatzipetros, A., Sachanidis, C., Barbas, T., 2018. Structural Geology of the Lignite Mines in the Ptolemais Basin, NW Greece.
- Diamantopoulos, A., Krohe, A., Dimitrakopoulos, D., 2014. Deformation partitioning in a transtension-dominated tectonic environment: The illustrative kinematic patterns of the Neogene-Quaternary Ptolemais Basin (northern Greece). *J. Geol. Soc.* 171, 65–81. doi:10.1144/jgs2012-138
- Dudley, J., Mcaree, P., 2013. Why the mining industry needs a reference architecture for automation initiatives. pp. 1792–1797. doi:10.1109/AIM.2013.6584357
- Dunn, M., Reid, D., Ralston, J., 2015. Control of Automated Mining Machinery Using Aided Inertial Navigation. pp. 1–9.
- Durst, W., Vogt, W., 1988. Bucket wheel excavator [WWW Document]. Trove. URL <http://trove.nla.gov.au/version/22614770> (accessed 3.12.17).
- Dyer, M.K., Little, D.G., Hoard, E.G., Taylor, A.C., Campbell, R., 1972. Applicability of NASA contract quality management and failure mode effect analysis procedures to the USGS Outer Continental Shelf oil and gas lease management program.
- Eustes, A.W., 2007. The Evolution of Automation in Drilling. Presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/111125-MS
- Feili, H.R., Akar, N., Lotfizadeh, H., Bairampour, M., Nasiri, S., 2013. Risk analysis of geothermal power plants using Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) technique. *Energy Convers. Manag. Complete*, 69–76. doi:10.1016/j.enconman.2012.10.027
- Feron, R., Bernard, P., Feuilloy, M., Ménard, P., Nercessian, A., Deroussi, S., Kitou, T., Plantier, G., 2020. First Optical Seismometer at the Top of La Soufrière Volcano, Guadeloupe. *Seismol. Res. Lett.* 91, 2448–2457. doi:10.1785/0220200126
- Ferrell, W.R., 1965. Remote manipulation with transmission delay. *IEEE Trans. Hum. Factors Electron. HFE-6*, 24–32. doi:10.1109/THFE.1965.6591253
- Ferrell, W.R., Sheridan, T.B., 1967. Supervisory control of remote manipulation. *IEEE Spectr.* 4, 81–88. doi:10.1109/MSPEC.1967.5217126
- Flessa, T., Worrall, K., Firstbrook, D., McGookin, E., Thomson, D., Harkness, P., 2018. FDIR for a Biologically Inspired Trenchless Drilling Device, in: 2018 UKACC 12th International Conference on Control (CONTROL). Presented at the 2018 UKACC 12th International Conference on Control (CONTROL), pp. 387–387. doi:10.1109/CONTROL.2018.8516893
- Ford, J., Hayes, K., Henderson, B., Lewis, S., Baker, P., Schmidt, B., 2016. Systematic analysis of water-related hazards associated with coal resource development Submethodology M11 from the Bioregional Assessment Technical Programme.
- Gaft, M., Nagli, L., Groisman, Y., Barishnikov, A., 2014. Industrial Online Raw Materials Analyzer Based on Laser-Induced Breakdown Spectroscopy. *Appl. Spectrosc.* 68, 1004–1015. doi:10.1366/13-07382
- Galetakis, M., 2017. Real-time mine-face inspection system, based on geophysical methods, capable to detect hard rock inclusions and geological formations which are difficult to be excavated by bucket-wheel excavators, in: BEWEXMIN 4th Progress Meeting. Technical University of Crete, Kozani.
- Galetakis, M., 2016. Report on field tests for the selection of the most appropriate geophysical method. Chania.



- Galetakis, M.J., Alevizos, G., Pavloudakis, F., Roumpos, C., Kavouridis, C., 2009. Prediction of the Performance of On-line Ash Analyzers Used in the Quality Control Process of a Coal Mining System. *Energy Sources Part Recovery Util. Environ. Eff.* 31, 1115–1130. doi:10.1080/15567030802089078
- Galetakis, M.J., Pavloudakis, F.F., 2009. The effect of lignite quality variation on the efficiency of on-line ash analyzers. *Int. J. Coal Geol.* 80, 145–156. doi:10.1016/j.coal.2009.09.002
- Galetakis, M.J., Vafidis, A., Kritikakis, G., Deligiorgis, V., Michalakopoulos, T., Apostolopoulos, G., Roumpos, C., Pavloudakis, F., 2018a. Automatic detection of unmineable inclusions while bucket wheel excavator digging, using electromagnetic (EM) sensor and GPS. *Gór. Odkryw. R.* 59, nr 4.
- Galetakis, M.J., Vafidis, A., Michalakopoulos, T., Apostolopoulos, G., Roumpos, C., Pavloudakis, F., Vasiliou, A., Deligiorgis, V., Soultana, A., 2018b. Development of a Real-Time Mine-Face Inspection System for the Early Detection of Hard Rock Formations during Mining by Bucket-Wheel Excavators.
- Galetakis, M.J., Vafidis, A., Vasiliou, A., Kritikakis, G., Deligiorgis, V., Michalakopoulos, T., Apostolopoulos, G., Roumpos, C., Pavloudakis, F., 2018c. Development of a fuzzy inference system for avoiding collision of bucket wheel excavator equipped with electromagnetic (EM) sensors with hard rock inclusions. *Gór. Odkryw. R.* 59, nr 4.
- Ghodrati, B., Hoseinie, S.H., Garmabaki, A.H.S., 2015. Reliability considerations in automated mining systems. *Int. J. Min. Reclam. Environ.* 29, 404–418. doi:10.1080/17480930.2015.1091617
- Giroux, J., Consuegra, F.-A., Fillion, M., Fortin, G., Horth, D., Michaud, D., 2020. In-truck ore grade estimation using apparent density measurements. *J. South. Afr. Inst. Min. Metall.* 120, 327–332. doi:10.17159/2411-9717/880/2020
- Grafe, B., Drebenstedt, C., Shepel, T., Yadav, V.V., 2018. . Presented at the 14 th International Symposium of Continuous Surface Mining, ISCSM2018.
- Grant, F.S., West, G.F., 1965. Interpretation theory in applied geophysics. McGraw-Hill, New York.
- Ha, Q.P., Yen, L., Balaguer, C., 2019. Robotic autonomous systems for earthmoving in military applications. *Autom. Constr.* 107, 102934. doi:10.1016/j.autcon.2019.102934
- Heuvel, J., Koersel, A., van Putten, F., Schleijpen, H., 2006. Landmine Detection using Laser Vibrometry 61.
- Holmes, J., Chambers, J., Meldrum, P., Wilkinson, P., Boyd, J., Williamson, P., Huntley, D., Sattler, K., Elwood, D., Sivakumar, V., Reeves, H., Donohue, S., 2020. Four-dimensional electrical resistivity tomography for continuous, near-real-time monitoring of a landslide affecting transport infrastructure in British Columbia, Canada. *Surf. Geophys.* 18, 337–351. doi:10.1002/nsg.12102
- Hoseinie, S.H., Kumar, U., Ghodrati, B., 2016. Reliability Centered Maintenance (RCM) for Automated Mining Machinery. Luleå tekniska universitet.
- Huss, W., 2015. Problems of Bucket-Wheel Excavators Body in Hardly-Workable Grounds in Polish Open Pit Mines. pp. 59–71.
- Hutchins, J., Oppelaar, S., 2016. Precision Surface Mining, the Next Steps. *Procedia Eng.* 138, 40–48. doi:10.1016/j.proeng.2016.02.050
- Hutchison, I., Hadj-Hamou, T., Dougherty, R., Fietze, C., Boeckeler, A., Kay, B., Kierstead, M., 2016. FMEA at Ely Copper Mine Superfund Site. SLR.

- Ireland, M.L., Worrall, K.J., Mackenzie, R., Flessa, T., McGookin, E., Thomson, D., 2017. A Comparison of Inverse Simulation-Based Fault Detection in a Simple Robotic Rover with a Traditional Model-Based Method.
- Jeffery, S., 2009. Review of failure mode, effect and criticality analysis (FMECA) on major equipment of the crushing and screening plant at the BORAL Quarry at Ormeau, Queensland (USQ Project). Toowoomba, Australia.
- Jiang, H., Liu, G., Li, J., Zhang, T., Wang, C., 2020. Drilling fault classification based on pressure and flowrate responses via ensemble classifier in Managed pressure drilling. *J. Pet. Sci. Eng.* 190, 107126. doi:10.1016/j.petrol.2020.107126
- Jiang, Y.Z., Liu, C.J., Li, X.J., He, K.F., Xiao, D.M., 2018. Low-Frequency Vibration Testing of Huge Bucket Wheel Excavator Based on Step-Decay Signals. *Shock Vib.* 2018, e6182156.
- Job, A., Edgar, M., Mcaree, P., 2017. Real-time shovel mounted coal or ore sensing. Presented at the Iron ore conference, Perth.
- Job, A., Mcaree, P., 2017. Three case studies on the implementation of new technology in the mining industry. Presented at the Iron ore conference, Perth.
- Kaber, D.B., 2018. Issues in Human–Automation Interaction Modeling: Presumptive Aspects of Frameworks of Types and Levels of Automation. *J. Cogn. Eng. Decis. Mak.* 12, 7–24. doi:10.1177/1555343417737203
- Kaber, D.B., Endsley, M.R., 2004. The effects of level of automation and adaptive automation on human performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. *Theor. Issues Ergon. Sci.* 5, 113–153. doi:10.1080/1463922021000054335
- Kalakuda, L., Shapiro, A., 2020. Investigation of Tool-Soil Interaction and Autonomous Front-Loader Motion Planning. *Asp. Min. Miner. Sci.* 5, 3.
- Kavouridis, K., Galetakis, M., Roumpos, C., Pavloudakis, F., 2008. Methods and technological improvements for the efficient removal of the overburden hard rock formations at South field lignite mine, Ptolemais, Greece.
- Kesting, M., Niemeyer, J., Mathiak, T., 2008. Integration of Sensor Technologies at a Bucket Wheel Excavator for Identification of Material Type and Detection of Interface Layers. MPES 2008.
- Kirwan, B., 1992a. Human error identification in human reliability assessment. Part 1: Overview of approaches. *Appl. Ergon.* 23, 299–318. doi:10.1016/0003-6870(92)90292-4
- Kirwan, B., 1992b. Human error identification in human reliability assessment. Part 2: Detailed comparison of techniques. *Appl. Ergon.* 23, 371–381. doi:10.1016/0003-6870(92)90368-6
- Kiyashchenko, D., Mateeva, A., Duan, Y., Johnson, D., Pugh, J., Geisslinger, A., Lopez, J., 2020. Frequent 4D monitoring with DAS 3D VSP in deep water to reveal injected water-sweep dynamics. *Lead. Edge* 39, 471–479. doi:10.1190/tle39070471.1
- Kiziroglou, M.E., Boyle, D.E., Yeatman, E.M., Cilliers, J.J., 2017. Opportunities for Sensing Systems in Mining. *IEEE Trans. Ind. Inform.* 13, 278–286. doi:10.1109/TII.2016.2636131
- Kolovos, N., Georgakopoulos, A., Filippidis, A., Kavouridis, C., 2002. Environmental Effects of Lignite and Intermediate Steriles Coexcavation in the Southern Lignite Field Mine of Ptolemais, Northern Greece. *Energy Sources* 24, 561–573. doi:10.1080/00908310290086563

- Kumar, P., Kumar, A., 2016. Methods for Risk Management of Mining Excavator through FMEA and FMECA. *Int. J. Eng. Sci.* 5, 57–63.
- Kumar, P., Srivastava, R.K., 2014. Risk Management Using FMEA and FMECA Method for Bucket Wheel Excavator.
- Kumar, V., Kumar, P., 2017. Optimal Maintainability of Hydraulic Excavator Through Fmea/Fmeca.
- Lagouvardos, K., Kotroni, V., Bezes, A., Koletsis, I., Kopania, T., Lykoudis, S., Mazarakis, N., Papagiannaki, K., Vougioukas, S., 2017. The automatic weather stations NOANN network of the National Observatory of Athens: operation and database. *Geosci. Data J.* 4, 4–16. doi:<https://doi.org/10.1002/gdj3.44>
- Lawie, D.C., Stevens, A.M., Blaine, F.A., Carey, M., Baensch, A., Uvarova, Y.A., Cleverley, J., Sarrazin, P., 2020. Sampling and analysis system and method for use in exploration drilling. US10570732B2.
- Lazăr, M., Andras, I., Faur, F., Andras, A., 2017. INFLUENCE OF PHYSICAL, MECHANICAL AND TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS OF COAL AND OVERBURDEN ROCKS ON THE EXCAVATION PROCESS.
- Lemière, B., Uvarova, Y.A., 2020. New developments in field-portable geochemical techniques and on-site technologies and their place in mineral exploration. *Geochem. Explor. Environ. Anal.* doi:10.1144/geochem2019-044
- Leonida, C., 2019. Drilling in the Digital Age. *Eng. Min. J.* 220, 34–38.
- Li, J., Zhan, K., 2018. Intelligent Mining Technology for an Underground Metal Mine Based on Unmanned Equipment. *Engineering* 4. doi:10.1016/j.eng.2018.05.013
- Li, W., Li, Xiangyou, Li, Xin, Hao, Z., Lu, Y., Zeng, X., 2020. A review of remote laser-induced breakdown spectroscopy. *Appl. Spectrosc. Rev.* 55, 1–25. doi:10.1080/05704928.2018.1472102
- Liu (auth.), H.-C., 2016. FMEA Using Uncertainty Theories and MCDM Methods, 1st ed. Springer Singapore.
- Machniak, Ł., Koziół, W., 2017. Method of Assessment of Hard Rock Workability using Bucket Wheel Excavators. *Arch. Min. Sci.* 62. doi:10.1515/amsc-2017-0006
- Manacorda, G., Miniati, M., Bracciali, S., Dei, D., Scott, H.F., Koch, E., Pinchbeck, D., Murgier, S., 2010. Development of a bore-head GPR for Horizontal Directional Drilling (HDD) equipment, in: *Proceedings of the XIII International Conference on Ground Penetrating Radar*. Presented at the Proceedings of the XIII International Conference on Ground Penetrating Radar, pp. 1–6. doi:10.1109/ICGPR.2010.5550228
- Marshall, J., Barfoot, T., Larsson, J., 2008. Autonomous underground tramming for center-articulated vehicles. *J. Field Robot.* 25, 400–421. doi:<https://doi.org/10.1002/rob.20242>
- Marshall, J., Daneshmend, L., 2001. Automated loading of fragmented rock in mining : A literature and technology survey.
- Marshall, J.A., Murphy, P.F., Daneshmend, L.K., 2008. Toward Autonomous Excavation of Fragmented Rock: Full-Scale Experiments. *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.* 5, 562–566. doi:10.1109/TASE.2007.912709
- Masoni, I., Pagliccia, B., Thalmann, G., 2019. The Use of Drones for Innovative Seismic Acquisition: A Change of Paradigm for HSE. Presented at the International Petroleum Technology Conference, International Petroleum Technology Conference. doi:10.2523/IPTC-19258-MS

- Mathiak, T., Kesting, M., Overmeyer, L., Gau, V., 2011. Methodology for automatic boundary layer detection using ground penetrating radar. 2011 6th Int. Workshop Adv. Ground Penetrating Radar IWAGPR 2011. doi:10.1109/IWAGPR.2011.5963891
- McAree, R., 2018. Mining automation: Enhancing precision. AusIMM Bull. 48.
- Mei Rong, Tingdi Zhao, Yang Yu, 2008. Advanced human factors Process Failure Modes and Effects analysis, in: 2008 Annual Reliability and Maintainability Symposium. Presented at the 2008 Annual Reliability and Maintainability Symposium, pp. 365–370. doi:10.1109/RAMS.2008.4925823
- Menegaki, M., Michalakopoulos, T., Roumpos, C., 2019. Exploring the effect of physical, human and technical factors on bucket wheel excavators' efficiency: a fuzzy cognitive map approach. Int. J. Min. Miner. Eng. 10, 189–204. doi:10.1504/IJMME.2019.104447
- Michalakopoulos, T., Apostolopoulos, G., Kofakis, P., Voulgarakis, A., Menegaki, M., Amolochitis, G., Galetakis, M., Roumpos, C., 2018. Requirements of a hard formations early detection system in opencast lignite mines. Gór. Odkryw. R. 59, nr 4.
- Moczko, P., Pietrusiak, D., Rusinski, E., 2019. Design and approval third party audit of material handling and mining equipment. Int. J. Min. Miner. Eng. 10, 205. doi:10.1504/IJMME.2019.104452
- Morton, J., 2020. Data-driven Drilling Diminishes Deviation. E&MJ.
- Nan, M., Kovacs, I., Andras, I., Jula, D., 2008. Study of the working regime of the bucket wheel excavators in the conditions of Romanian open pit lignite mines. pp. 83–88.
- Narayana, N.L., Raju, D.N., Chaithanya, K., Reddy, D.P.R., 2013. Failure Mode, Effects and Criticality Analysis of Load Haul Dump Vehicles (100t) in Open Cast Mines. Glob. J. Res. Eng.
- Nasruddin, Kurniawan, N., Prasetyadi, D., Sherly, 2018. Critical analysis using FMEA fuzzy logic on geothermal steam turbine system. AIP Conf. Proc. 1983, 020031. doi:10.1063/1.5046227
- Nettleton, E., Thrun, S., Durrant-Whyte, H., Sukkarieh, S., 2006. Decentralised SLAM with Low-Bandwidth Communication for Teams of Vehicles, in: Yuta, S., Asama, H., Prassler, E., Tsubouchi, T., Thrun, S. (Eds.), Field and Service Robotics: Recent Advances in Reserch and Applications. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 179–188.
- O'Kane, M., Scott, P., Garneau, P., 2016. McArthur River Mine Overburden Management Project - Appendix F, FMEA. O'Kanes consultants.
- Okonji, S.C., 2015. Multi criteria risk analysis of a subsea BOP system.
- Onnasch, L., Wickens, C.D., Li, H., Manzey, D., 2013. Human Performance Consequences of Stages and Levels of Automation: An Integrated Meta-Analysis. Hum. Factors. doi:10.1177/0018720813501549
- Oppelaar, S., Hutchins, J., 2014. Recent Advances in Precision Surface Mining Techniques. Procedia Eng. 83, 76–85. doi:10.1016/j.proeng.2014.09.016
- Oraee, K., Yazdani-Chamzini, A., Basiri, M.H., 2011. Evaluating Underground Mining Hazards by Fuzzy FMEA. Presented at the 2011 SME Annual Meeting & Exhibit and CMA 113th National Western Mining Conference "Shaping a Strong Future Through Mining," Society for Mining, Metallurgy & Exploration, pp. 255–259.
- Özfirat, M., Yetkin, M., Özfirat, P., 2019. Risk Management for Truck-LHD Machine Operations in Underground Mines Using Failure Modes and Effects Analysis. Int. J. Ind. Oper. Res. 2. doi:10.35840/ijior/6503

- Pantelić, M.P., Bošnjak, S.M., Misita, M.Z., Gnjatović, N.B., Stefanović, A.Z., 2020. Service FMECA of a bucket wheel excavator. *Eng. Fail. Anal.* 108, 104289. doi:10.1016/j.eng-failanal.2019.104289
- Parasuraman, R., Sheridan, T.B., Wickens, C.D., 2000. A model for types and levels of human interaction with automation. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. - Part Syst. Hum.* 30, 286–297. doi:10.1109/3468.844354
- Pasculli, D., Manacorda, G., Morandi, D., Hamers, M., Schauerte, T., Dei, D., Scott, H.F., Morey, M., 2016. GPR based real-time obstacle detection system for horizontal directional drilling, in: 2016 16th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR). Presented at the 2016 16th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), pp. 1–6. doi:10.1109/ICGPR.2016.7572647
- Petrović, D.V., Tanasijević, M., Milić, V., Lilić, N., Stojadinović, S., Svrkota, I., 2014. Risk assessment model of mining equipment failure based on fuzzy logic. *Expert Syst. Appl.* 41, 8157–8164. doi:10.1016/j.eswa.2014.06.042
- Rafie, M., Samimi Namin, F., 2015. Prediction of subsidence risk by FMEA using artificial neural network and fuzzy inference system. *Int. J. Min. Sci. Technol.* 25, 655–663. doi:10.1016/j.ijmst.2015.05.021
- Ralston, J.C., Strange, A.D., 2013. Developing selective mining capability for longwall shearers using thermal infrared-based seam tracking. *Int. J. Min. Sci. Technol.* 23, 47–53. doi:10.1016/j.ijmst.2013.01.008
- Reynold, J.M., 1997. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*.
- Risteiu, M., Dobra, R., Andras, I., Roventa, M., Lorincz, A., 2017a. Investigation of Bucket Wheel Excavator Lattice Structure Internal Stress in Harsh Environment through a Remote Measurement System. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 209, 012065. doi:10.1088/1757-899X/209/1/012065
- Risteiu, M., Dobra, R., Andras, I., Roventa, M., Lorincz, A., 2017b. Designing a Validation Method for Remote Measurements Dedicated To Investigation of Bucket Wheel Excavator Lattice Structure Internal Stress in Harsh Environment. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 209, 012066. doi:10.1088/1757-899X/209/1/012066
- Risteiu, M., Lorincz, A., Dobra, R., Dasic, P., Andras, I., Roventa, M., 2017c. Designing Pattern Recognition-Based Method for Fast Visual Inspection of the Bucket Wheel Excavator Lattice Structure. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 209, 012067. doi:10.1088/1757-899X/209/1/012067
- Robertson, A., Shaw, S., 2003. *Mine Closure*. Infomine e-book, Vancouver.
- Rogers, W.P., Kahraman, M.M., Drews, F.A., Powell, K., Haight, J.M., Wang, Y., Baxla, K., Sobalkar, M., 2019. Automation in the Mining Industry: Review of Technology, Systems, Human Factors, and Political Risk. *Min. Metall. Explor.* 36, 607–631. doi:10.1007/s42461-019-0094-2
- Roumpos, C., Sideri, D., Pavloudakis, F., Kolovs, N., Michalakopoulos, T., Apostolopoulos, G., Galetakis, M., Vafidis, A., 2018. Possibilities for improving work efficiency of continuous surface mining systems operating in rocks with excessive digging resistance. *Gór. Odkryw. R.* 59, nr 4.
- Rylnikova, M., Radchenko, D., Klebanov, D., 2017. Intelligent Mining Engineering Systems in the Structure of Industry 4.0. *E3S Web Conf.* 21, 01032. doi:10.1051/e3sconf/20172101032

- Sallé, B., Mauchien, P., Maurice, S., 2007. Laser-Induced Breakdown Spectroscopy in open-path configuration for the analysis of distant objects. *Spectrochim. Acta Part B At. Spectrosc.* 62, 739–768. doi:10.1016/j.sab.2007.07.001
- Schönhofer, M., Kasapidis, D., Spanidis, D., Dougalis, E., 2018. PPC Excavator Production improvement of 20% by iBelt 2D Radar Control. Presented at the 14 th International Symposium of Continuous Surface Mining, ISCSM2018.
- Shariati, S., 2014. Underground mine risk assessment by using FMEA in the presence of uncertainty. *Decis. Sci. Lett.* 3, 295–304. doi:10.5267/j.dsl.2014.4.002
- Sharma, S.K., Misra, A.K., Lucey, P.G., Lentz, R.C.F., 2009. A combined remote Raman and LIBS instrument for characterizing minerals with 532 nm laser excitation. *Spectrochim. Acta. A. Mol. Biomol. Spectrosc.* 73, 468–476. doi:10.1016/j.saa.2008.08.005
- Sheridan, T.B., Verplank, W.L., 1978. Human and computer control of undersea teleoperators. Massachusetts Inst of Tech Cambridge Man-Machine Systems Lab.
- Shi, Z., Xie, L., Li, X., 2015. Research of human error evaluation technique of production system based on PFMEA, in: 2015 IEEE 10th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). Presented at the 2015 IEEE 10th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), pp. 1815–1820. doi:10.1109/ICIEA.2015.7334406
- Shirani, M., Demichela, M., 2015. Integration of FMEA and human factor in the food chain risk assessment. *Int. J. Soc. Behav. Educ. Econ. Bus. Ind. Eng.* 12, 4103–4106.
- Sidhu, A.S., 2018. Application of STPA-Sec for analyzing cybersecurity of autonomous mining systems (Thesis). Massachusetts Institute of Technology.
- Singh, A., Rai, P., Sharma, N., Pandey, J., 2019. Failure Analysis and Performance Improvement Using Surface Miner on Field Breakdown Data: A case study. *Ind. Eng. J.* 12. doi:10.26488/IEJ.12.9.1198
- Sládková, D., Kapica, R., Vrabel, M., 2011. Global navigation satellite system (GNSS) technology for automation of surface mining. *Int. J. Min. Reclam. Environ.* 25, 284–294. doi:10.1080/17480930.2011.608879
- Spreafico, C., Russo, D., Rizzi, C., 2017. A state-of-the-art review of FMEA/FMECA including patents. *Comput. Sci. Rev.* 25, 19–28. doi:10.1016/j.cosrev.2017.05.002
- Stamatis, H., D., 2003. Failure Mode and Effect Analysis - FMEA from Theory to Execution, 2nd Edition Revised and Expanded. ed. American Society for Quality (ASQ).
- Thrun, S., Thayer, S., Whittaker, W., Baker, C., Burgard, W., Ferguson, D., Hahnel, D., Montemerlo, D., Morris, A., Omohundro, Z., Reverte, C., Whittaker W, 2004. Autonomous exploration and mapping of abandoned mines. *IEEE Robot. Autom. Mag.* 11, 79–91. doi:10.1109/MRA.2004.1371614
- United States Department of Defense, 1980. Procedures for performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis Military standard. United States Department of Defense, Washington.
- Varshney, N., Rajesh, S., Aarthi, A.P., Ramesh, N.R., Vedachalam, N., Ramadass, G.A., Atmanand, M.A., 2015. Estimation of Reliability of Underwater Polymetallic Nodule Mining Machine.
- Vogt, D., 2016. A review of rock cutting for underground mining: past, present, and future. *J. South. Afr. Inst. Min. Metall.* 116, 1011–1026. doi:10.17159/2411-9717/2016/v116n11a3

- Vrublova, D., Kapica, R., Gibesova, B., Mudruňka, J., Struś, A., 2016. Application of GNSS technology in surface mining. *Geod. Cartogr.* 42, 122–128. doi:10.3846/20296991.2016.1268433
- Wang, J., Huang, Z., 2017. The Recent Technological Development of Intelligent Mining in China. *Engineering* 3, 439–444. doi:10.1016/J.ENG.2017.04.003
- Wang, J., Ju, N., He, C., Cai, J., Zheng, D., 2020. Assessment of the accuracy of several methods for measuring the spatial attitude of geological bodies using an android smartphone. *Comput. Geosci.* 136, 104393. doi:10.1016/j.cageo.2019.104393
- Wedge, D., Hartley, O., McMickan, A., Holden, E.-J., Green, T., 2019. Machine assisted drill-hole interpretation of iron ore resource evaluation holes in the Pilbara. *ASEG Ext. Abstr.* 2019, 1–5. doi:10.1080/22020586.2019.12072931
- Weisbecker, H., Cazzolato, B., Wildy, S., Marburg, S., Codrington, J., Kotousov, A., 2010. Surface Strain Measurements Using a 3D Scanning Laser Vibrometer. *Exp. Mech.* 52, 1–11. doi:10.1007/s11340-011-9545-5
- Βαφείδης, Α., 2001. Εφαρμοζόμενη γεωφυσική II. Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Γαλετάκης, Μ., 1996. Προσδιορισμός της ποιότητας λιγνίτη που εξορύσσεται με τη συνεχή μέθοδο εκμετάλλευσης από πολυστρωματικά κοιτάσματα (Διδακτορική διατριβή). Πολυτεχνείο Κρήτης. Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων.
- Δελγιώργης, Β., 2017. Καθορισμός βέλτιστων ορίων εκμετάλλευσης πολυστρωματικών λιγνιτικών κοιτασμάτων. Πολυτεχνείο Κρήτης::Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων.
- Μέβοραχ, Ρ., Φυντικάκης, Π., 1993. Δημιουργία μοντέλου για τον υπολογισμό της αραίωσης και των απωλειών λιγνίτη κατά την εκλεκτική εξόρυξη. *Μεταλλειολογικά Και Μεταλλευτικά Χρονικά* 3.
- Παναγιώτου, Γ., 1989. Παράμετροι που επηρεάζουν την εξορυξημότητα των πετρωμάτων με καδοφόρο εκσκαφέα (Διδακτορική Διατριβή). Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ), Αθήνα.
- Τζάνης Α., 2016. Στοιχεία από τον Γεωηλεκτρομαγνητισμό. ΕΚΠΑ, Αθήνα.
- Χωροπανίτης, Ι., 2006. Ανάλυση συνδυασμένης λειτουργίας καδοφόρου εκσκαφέα και ντιζελοκίνητου εξοπλισμού στο ορυχείο του Νοτίου Πεδίου" (Μεταπτυχιακή Διατριβή). Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, Ελλάς.

