



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

"Πρόβλεψη επιφανειακών καθιζήσεων λόγω υπογείων εκμεταλλεύσεων  
ανθρακοφόρων κοιτασμάτων με τη μέθοδο συναρτήσεων επιρροής"

ΤΡΙΚΚΑΛΗΣ ΒΑΣΙΛΗΣ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

ΖΑΧΑΡΙΑΣ ΑΓΙΟΥΤΑΝΤΗΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ-ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΕΞΑΔΑΚΤΥΛΟΣ, ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΜΙΧΑΛΗΣ ΓΑΛΕΤΑΚΗΣ, ΛΕΚΤΟΡΑΣ



ΧΑΝΙΑ, 2002

Στον πατέρα μου

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι επιφανειακές καθιζήσεις αποτελούν σημαντικό αντικείμενο μελέτης τόσο στις ενεργές, όσο και στις εγκαταλελειμμένες περιοχές εκμετάλλευσης. Τα προβλήματα που αποδίδονται στις επιφανειακές καθιζήσεις περιλαμβάνουν εδαφικές μετακινήσεις και δημιουργία ρωγματώσεων, δομικές καταστροφές σε κτίρια και εγκαταστάσεις, καθώς και διαρρήξεις υπόγειων ταμιευτήρων νερού. Η πρόβλεψη των εδαφικών κινήσεων λόγω υπογείων εκσκαφών, η αποτίμηση της επίδρασής τους στην επιφάνεια καθώς και ο έλεγχός τους εντός αποδεκτών περιβαλλοντικών ορίων αποτελούν θέματα κυρίαρχης σημασίας των υπόγειων εκσκαφών γαιάνθρακα.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η βαθμονόμηση του προγράμματος πρόβλεψης επιφανειακών καθιζήσεων (SDPS), ώστε στη συνέχεια το πρόγραμμα αυτό να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη όλων των τύπων των επιφανειακών καθιζήσεων (κατακόρυφη μετατόπιση, οριζόντια μετατόπιση, ανηγμένη παραμόρφωση κ.α.) σε παρόμοιες περιοχές με τις συγκεκριμένες περιοχές που εξετάζονται. Το πρόγραμμα (SDPS) είναι ένα εύχρηστο και ευέλικτο λογισμικό πακέτο, το οποίο εκμεταλλεύεται όλα τα πλεονεκτήματα του περιβάλλοντος των Windows, έχει άμεση σύνδεση με το AutoCad και για την πρόβλεψη των επιφανειακών παραμορφώσεων χρησιμοποιεί συναρτήσεις επιρροής (influence function methods).

Εξετάζονται τρεις περιοχές:

- ✓ Τα ανθρακωρυχεία του York Canyon, New Mexico, USA.
- ✓ Τα ανθρακωρυχεία Sufco, Utah, USA.
- ✓ Τα ανθρακωρυχεία Skyline, Utah, USA.

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Θα ήθελα να εκφράσω την εκτίμησή μου και τις θερμές μου ευχαριστίες στον Επιβλέποντα Καθηγητή κ. Ζαχαρία Αγιουτάντη, που μου ανέθεσε την ενδιαφέρουσα αυτή διπλωματική εργασία και με στήριξε καθ' όλη τη διάρκεια της προσπάθειάς μου, καθώς επίσης και για την άριστη συνεργασία μας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Γεώργιο Εξαδάκτυλο και τον Λέκτορα κ. Μιχάλη Γαλετάκη, για το χρόνο που αφιέρωσαν για την ανάγνωση της εργασίας αυτής και τις παρατηρήσεις τους.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω το επιστημονικό προσωπικό του Εργαστηρίου Μηχανικής Πετρωμάτων, κ. Σπύρο Κλεφτάκη και κ. Στέλιο Μαυριγιαννάκη και ιδιαίτερα την κ. Ειρήνη Καλογήρου για την πολύτιμη βοήθεια και συμπαράσταση κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας.



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	
Εισαγωγή	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	
“Υπόγειες εκμεταλλεύσεις με τη μέθοδο των ευθύγραμμων επιμήκων μετώπων”	3
2.1 Γενικά στοιχεία	3
2.2 Περιγραφή της μεθόδου	5
2.3 Εκμετάλλευση με προχωρούντα επιμήκη ευθύγραμμο μέτωπο	6
2.4 Εκμετάλλευση με οπισθοχωρούντα επιμήκη ευθύγραμμο μέτωπο	9
2.5 Εξοπλισμός της μεθόδου των ευθύγραμμων επιμήκων μετώπων	11
2.5.1 Το κοπτικό σύστημα	13
Ο εγκοπήρας	14
Ο αποξεστήρας	15
2.5.2 Το σύστημα υποστήριξης	16
2.5.3 Το σύστημα μεταφοράς	18
2.6 Περιβαλλοντικά προβλήματα – Ασφάλεια	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	
“Μέθοδοι πρόβλεψης καθιζήσεων”	22
3.1 Γενικά στοιχεία	22
3.2 Βασικά χαρακτηριστικά της λεκάνης καθίζησης	22
3.3 Βασικές αρχές και ορισμοί	27
3.4 Συναρτήσεις επιρροής	30
3.5 Η συνάρτηση επιρροής του Gauss	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	
4.1 Εφαρμογή 1	36
4.1.1 Γενικά στοιχεία	36
4.1.2 Στάδια της μελέτης	38
4.2 Παραμετρική ανάλυση	42
4.2.1 Βόρεια εγκάρσια γραμμή μελέτης N6E-N6W	43
4.2.2 Κεντρική γραμμή μελέτης C7-C15	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	
5.1 Εφαρμογή 2	50
5.1.1 Γενικά στοιχεία	50
5.1.2 Στάδια της μελέτης	52
5.2 Παραμετρική ανάλυση	54
5.2.1 Γραμμή μελέτης Tomi 1	55
5.2.2 Γραμμή μελέτης Tomi 2	57
5.2.3 Γραμμή μελέτης Tomi 3	58
5.2.4 Συμπεράσματα	60

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

6.1 Εφαρμογή 3	61
6.1.1 Γενικά στοιχεία	61
6.1.2 Στάδια της μελέτης	63
6.2 Παραμετρική ανάλυση	66
6.2.1 Βαθμονόμηση της υπό μελέτης περιοχής	67
6.2.2 Βαθμονόμηση της γραμμής μελέτης μεταξύ των σημείων 48-56	71
6.2.3 Βαθμονόμηση της γραμμής μελέτης μεταξύ των σημείων 36-47	73

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Συμπεράσματα	76
Βιβλιογραφία	80

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### Εισαγωγή

Οι επιπτώσεις των υπόγειων εκσκαφών στην επιφάνεια του εδάφους επηρεάζουν τόσο την άδεια εκμετάλλευσης, όσο τον σχεδιασμό και την παρακολούθηση επιχειρήσεων παραγωγής γαιανθράκων. Συνεπώς, η ανάπτυξη αυστηρών και αποδεκτών τεχνικών πρόβλεψης επιφανειακών παραμορφώσεων αποτελεί ένα σημαντικό θέμα στον έλεγχο καθιζήσεων για την αποτίμηση των επιπτώσεων των υπόγειων μεταλλείων στις επιφανειακές κατασκευές και εγκαταστάσεις. Το γεγονός αυτό όμως, είναι εξαιρετικά σύνθετο εξαιτίας τόσο του αριθμού, όσο και της φύσης των παραγόντων που επηρεάζουν την παραμόρφωση του εδάφους λόγω υπόγειων εκσκαφών. Οι παράγοντες αυτοί περιλαμβάνουν παραμέτρους καθίζησης, επιφανειακής μορφολογίας, σχεδιασμού εκμετάλλευσης, χαρακτηριστικά δομής γαιάνθρακα, υπερκείμενη λιθολογία κ.α.

Ως εκ τούτου, για την πρόβλεψη των επιφανειακών καθιζήσεων, που σχετίζονται κυρίως με την εκμετάλλευση γαιανθρακοφόρων κοιτασμάτων, χρησιμοποιήθηκαν πολυάριθμες μέθοδοι πρόβλεψης και εφαρμόστηκαν ποικίλες θεωρητικές μελέτες λόγω της καίριας σημασίας του θέματος. Οι συναρτήσεις επιρροής αποτελούν ένα σημαντικό εργαλείο για την πρόβλεψη επιφανειακών καθιζήσεων, ενώ το κυριότερο πλεονέκτημα είναι η ικανότητά τους να προβλέπουν επιφανειακές κινήσεις, σε κάθε σημείο πάνω από εκσκαφές οποιασδήποτε πρακτικής μορφής (Whittaker and Reddish, 1989).

Κατά την πραγματοποίηση της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα SDPS (Surface Deformation Prediction System). Το πρόγραμμα SDPS αποτελεί ένα ολοκληρωμένο λογισμικό πακέτο για τον υπολογισμό πληθώρας δεικτών επιφανειακής παραμόρφωσης χρησιμοποιώντας, τόσο με την μέθοδο της συνάρτησης τομής (profile function method), όσο και με την μέθοδο των συναρτήσεων επιρροής (influence function method). Στην παρούσα εργασία όλα τα μοντέλα που εξετάζονται από το πρόγραμμα SDPS αφορούν τις μεθόδους πρόβλεψης παραμορφώσεων με τη βοήθεια συναρτήσεων επιρροής. Αυτοί οι υπολογισμοί βασίζονται σε ορισμένες εμπειρικές σχέσεις, οι οποίες αναπτύχθηκαν κατά τη στατιστική ανάλυση δεδομένων που αντλήθηκαν από ένα μεγάλο αριθμό πραγματικών μελετών (Agioutantis and Karmis, 2002).

Επιπρόσθετα, το λογισμικό πακέτο SDPS είναι πάρα πολύ εύχρηστο γιατί εκμεταλλεύεται όλα τα πλεονεκτήματα του περιβάλλοντος των Windows, ενώ έχει παράλληλα και άμεση σύνδεση με το λογισμικό AutoCad καθώς και άλλα σχεδιαστικά πακέτα με αποτέλεσμα να επιτρέπει την είσοδο και έξοδο δεδομένων προς και από αυτό αντίστοιχα. Παράλληλα το λογισμικό πακέτο εμπεριέχει ρουτίνες βαθμονόμησης, ούτως ώστε να έχει τη δυνατότητα να δώσει προβλέψεις καθίζησης σε συγκεκριμένες περιοχές.

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η βαθμονόμηση του προγράμματος πρόβλεψης επιφανειακών καθιζήσεων (SDPS), ώστε στη συνέχεια το πρόγραμμα αυτό να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη όλων των τύπων των επιφανειακών καθιζήσεων (κατακόρυφη μετατόπιση, οριζόντια μετατόπιση, ανηγμένη παραμόρφωση κ.α.) σε παρόμοιες περιοχές με τις συγκεκριμένες περιοχές που εξετάζονται. Οι υπό εξέταση περιοχές είναι:

- ✓ Τα ανθρακωρυχεία του York Canyon, New Mexico, USA.
- ✓ Τα ανθρακωρυχεία Sufco, Utah, USA.
- ✓ Τα ανθρακωρυχεία Skyline, Utah, USA.

Οι παράμετροι βαθμονόμησης είναι ο συντελεστής καθίζησης, η εφαπτόμενη της γωνίας επιρροής και η μετατόπιση του σημείου καμπής της επιφανειακής καμπύλης καθίζησης.

Τα απαιτούμενα δεδομένα για την εφαρμογή του πακέτου SDPS είναι:

- ✓ Η γεωμετρία της περιοχής εκμετάλλευσης καθώς και οι σχετικές ιδιότητες, όπως είναι το πάχος της εκσκαφής και ο συντελεστής καθίζησης.
- ✓ Οι συντεταγμένες των σημείων της επιφάνειας, στα οποία αναφέρεται η πρόβλεψη των διαφόρων δεικτών παραμόρφωσης.
- ✓ Οι εμπειρικοί παράμετροι που αριθμητικά αντιπροσωπεύουν τη συμπεριφορά των υπερκείμενων πετρωμάτων.

Τέλος, συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εργασία αυτή για κάθε μία περίπτωση.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### “Υπόγειες εκμεταλλεύσεις με τη μέθοδο των ευθύγραμμων επιμήκων μετώπων”

#### 2.1 Γενικά στοιχεία

Αν και η μέθοδος εκμετάλλευσης των ευθύγραμμων επιμήκων μετώπων έχει μεγάλη ιστορία εκτός Β.Αμερικής, στην Β.Αμερική η παραπάνω μέθοδος εκμετάλλευσης πρέπει να άρχισε συστηματικά το 1960, όπου υπήρξε και η πρώτη εγκατάσταση αυτοπροωθούμενων υποστηρίξεων σε ένα μεταλλείο άνθρακα στην νότια Βιρτζίνια (Stefanko, 1983).

Στην Ευρώπη, εξαιτίας των διαφορετικών φυσικών συνθηκών, η μέθοδος των ευθύγραμμων επιμήκων μετώπων ήταν συχνά η μόνη πρακτική μέθοδος στην εκμετάλλευση άνθρακα, αλλά απεναντίας στην Β.Αμερική η μέθοδος αυτή έπρεπε να ανταγωνιστεί σε οικονομικό επίπεδο με την υψηλής παραγωγικότητας μέθοδο εκμετάλλευσης των θαλάμων και στύλων. Βέβαια η μέθοδος εκμετάλλευσης των ευθύγραμμων επιμήκων μετώπων, λόγω της συνέχειας της, έχει μεγαλύτερη δυναμικότητα παραγωγής από την μέθοδο των θαλάμων και στύλων. Καθώς το βάθος της εκμετάλλευσης αυξάνει, η εκσκαφή πρέπει να γίνει στενότερη και οι στύλοι πιο μεγάλοι έτσι ώστε να ελαχιστοποιήσουν τις καταστροφικές τάσεις. Τελικά όμως θα επέλθει το σημείο, στο οποίο η εκσκαφή θα είναι τόσο στενή έτσι ώστε δεν θα μπορεί να γίνει η κατάλληλη εκμετάλλευση, ή η δυσκολία υποστήριξης μίας στοάς μεταλλεύματος θα είναι πολύ μεγάλη και δαπανηρή ανεξαρτήτως από το πόσο ευρεία θα είναι η στοά. Συνεπώς καθώς η εκμετάλλευση εξελίσσεται βαθύτερα και πρέπει να γίνεται κάτω από φτωχές φυσικές συνθήκες, τόσο περισσότερο θα φθίνει η χρησιμοποίηση της μεθόδου των θαλάμων και στύλων και θα πρέπει να χρησιμοποιείται μία άλλη μέθοδος, η οποία δεν είναι άλλη από την μέθοδο των ευθύγραμμων επιμήκων μετώπων (Stefanko, 1983).

Εκτός από το γεγονός ότι η μέθοδος των ευθύγραμμων επιμήκων μετώπων είναι συνεχής, παρουσιάζει και άλλα πλεονεκτήματα (Stefanko, 1983), όπως:

- Βελτιωμένη ασφάλεια, η οποία οφείλεται στο ολοκληρωμένο σύστημα υποστήριξης του μετώπου και στην ελάχιστη κίνηση του εξοπλισμού.

- Μεγαλύτεροι λόγοι απόληψης μεταλλεύματος.
- Μεγαλύτερη ευελιξία στην εκμετάλλευση μεταλλείων, τα οποία χαρακτηρίζονται από οροφή με φτωχές μηχανικές ιδιότητες σε μεγάλα βάθη.
- Καλύτερος έλεγχος των καθιζήσεων.
- Πολλά δευτερεύοντα οφέλη ελλείπει της ανάγκης κοχλίωσης στο μέτωπο της εκμετάλλευσης, καθώς και καλύτερος έλεγχος του εξαιρισμού.

Βέβαια η μέθοδος εκμετάλλευσης των ευθύγραμμων επιμήκων μετώπων έχει και ορισμένα μειονεκτήματα, όπως:

- Περισσότερο έντονες και συνεπώς πιο κρίσιμες καθυστερήσεις.
- Μεγαλύτερες δαπάνες κεφαλαίου για τον εξοπλισμό.
- Υψηλό κόστος μεταφοράς του εξοπλισμού στις θέσεις εκμετάλλευσης.
- Μη ευελιξία της μεθόδου, όπου υπάρχουν φτωχές περιοχές μεταλλεύματος, σε κοιτάσματα μεταβλητού πάχους καθώς και όπου το πάτωμα και η οροφή του κοιτάσματος αποτελούνται από υλικό χαμηλών μηχανικών ιδιοτήτων.
- Πιθανή μη πραγματοποίηση της μεθόδου κάτω από μεγάλο όγκο υπερκειμένων σε μικρά βάθη, εξαιτίας του μεγέθους και του κόστους της υποστήριξης που απαιτείται.

Επί του παρόντος, η μέθοδος εκμετάλλευσης των ευθύγραμμων επιμήκων μετώπων αντιπροσωπεύει το 20 % της παραγωγής άνθρακα της Β.Αμερικής υπογείως (WVU, 2002). Από την εφαρμογή της έχει αποδειχτεί ότι αποτελεί μία πολύ παραγωγική και πολύ πιο ασφαλής μέθοδος από τη μέθοδο των θαλάμων και στύλων. Η παραγωγικότητα της μεθόδου των ευθύγραμμων επιμήκων μετώπων είναι το λιγότερο 5 φορές μεγαλύτερη από αυτή της μεθόδου των θαλάμων και στύλων, ενώ είναι το λιγότερο 200 φορές ασφαλέστερη από την άποψη θανατηφόρων ή μη ατυχημάτων (WVU, 2002).

Παρόλα αυτά, η ανάπτυξη της μεθόδου των ευθύγραμμων επιμήκων μετώπων έχει επιβραδυνθεί από ορισμένους παράγοντες, οι οποίοι περιλαμβάνουν οικονομικές και περιβαλλοντικές ανησυχίες. Η μέθοδος των ευθύγραμμων επιμήκων μετώπων απαιτεί μία μεγάλη επένδυση κεφαλαίου, η οποία περιπλέκεται από μία υπάρχουσα αβεβαιότητα

όσον αφορά την εφαρμοσιμότητα της τεχνικής και των περιβαλλοντικών της επιπτώσεων. Συνεπώς, θα πρέπει να αναπτυχθούν κριτήρια για την εφαρμοσιμότητα της μεθόδου, έτσι ώστε να υπάρξει μία δραστική μείωση του επενδυτικού κινδύνου, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος.

Στα κύρια περιβαλλοντικά προβλήματα της μεθόδου αναφέρονται η αναπνεύσιμη σκόνη, οι επιφανειακές καθιζήσεις καθώς και η αποστράγγιση του υδροφόρου ορίζοντα και των υπόγειων ρευμάτων. Το πρόβλημα της σκόνης αποτελεί τροχοπέδη για την παραγωγή μεταλλεύματος, ενώ οι επιφανειακές καθιζήσεις και η αποστράγγιση προκαλούν δημόσιες ανησυχίες. Για να μειωθεί η έκθεση σκόνης προς τους ανθρακωρύχους, τα περισσότερα συστήματα των ευθύγραμμων επιμήκων μετώπων χρησιμοποιούν εγκοπτήρες μονής κατεύθυνσης, ενώ άλλη μία λύση είναι να μειωθεί ο χρόνος βάρδιας υψηλού κινδύνου του προσωπικού (UOW, 2002).

Εξαιτίας της έλλειψης κριτηρίων για την πρόβλεψη των επιφανειακών καθιζήσεων, ορισμένα μεταλλεία αφήνουν μεγάλα τμήματα από άνθρακα ως υποστήριξη. Τέλος, δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις, που οι μεταλλευτικές εταιρείες έρχονται σε νομικές συγκρούσεις με τους ιδιοκτήτες της γης, η οποία επηρεάζεται από τις υπόγειες μεταλλευτικές διεργασίες.

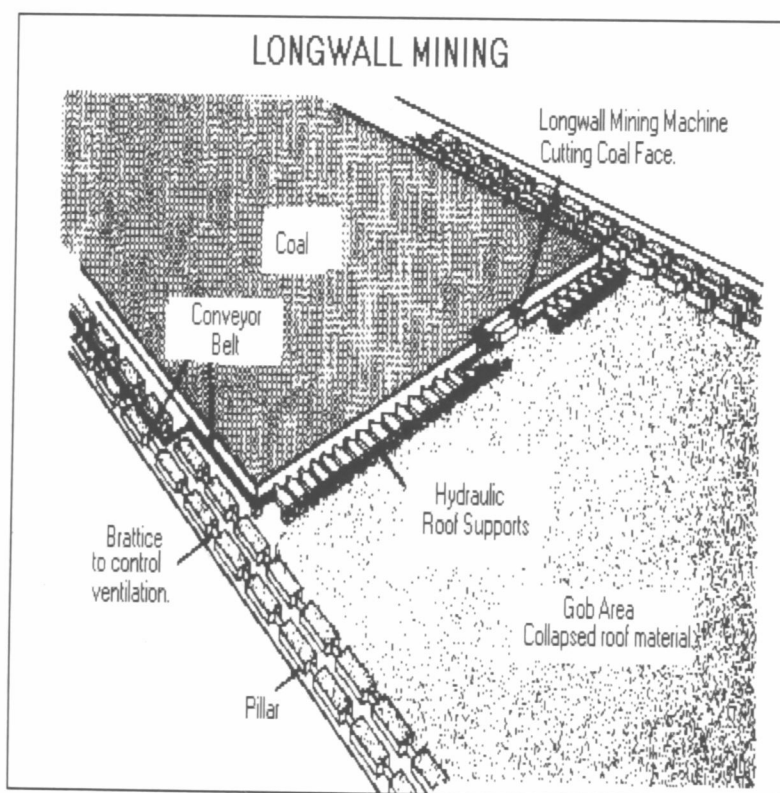
## **2.2 Περιγραφή της μεθόδου**

Το Σχήμα 2.1 περιγράφει την μεταλλευτική δραστηριότητα με τη μέθοδο των ευθύγραμμων επιμήκων μετώπων. Η μέθοδος των ευθύγραμμων επιμήκων μετώπων αντιπροσωπεύει περίπου το 31% του άνθρακα που παράγεται κατά τις υπόγειες εκμεταλλεύσεις. Υπάρχουν περίπου 100 εκμεταλλεύσεις με την παραπάνω μέθοδο στην Β.Αμερική, οι περισσότερες από τις οποίες αναφέρονται σε μεταλλεία στα Απαλάτσια. Σύμφωνα με την μέθοδο των ευθύγραμμων επιμήκων μετώπων, κατά το στάδιο της ανάπτυξης, ορίζονται μεγάλες ορθογώνιες περιοχές εκμετάλλευσης άνθρακα (panels), οι οποίες στην συνέχεια αποσπώνται κατά μία απλή και συνεχή λειτουργία. Μία κοπτική κεφαλή κινείται μπρος-πίσω κατά μήκος μίας ορθογωνίου επί το πλείστον περιοχής εκμετάλλευσης άνθρακα με μέσο πλάτος 800 ft (244m), ενώ το μέσο μήκος ανέρχεται στα 7.000 ft (2133m). Ο θραυσμένος άνθρακας πέφτει πάνω σε ένα ευέλικτο σύστημα από ταινιόδρομους και απομακρύνεται από το μέτωπο της εκμετάλλευσης. Η υποστήριξη

της οροφής γίνεται υδραυλικά με ειδικά τμήματα υποστήριξης τις λεγόμενες ασπίδες (shields), οι οποίες προχωρούν παράλληλα με την προχώρηση του μετώπου, ενώ η οροφή στις περιοχές που έχει ήδη γίνει εκμετάλλευση υποχωρεί, καθώς οι ασπίδες προχωρούν.

Οι κυριότερες μέθοδοι εκμετάλλευσης των ευθύγραμμων επιμήκων μετώπων είναι δύο (UOW, 2002):

- Εκμετάλλευση με προχωρούντα επιμήκη ευθύγραμμο μέτωπα.
- Εκμετάλλευση με οπισθοχωρούντα επιμήκη ευθύγραμμο μέτωπα.



Σχήμα 2.1: Μεταλλευτική δραστηριότητα με τη μέθοδο των ευθύγραμμων επιμήκων μετώπων (UOW, 2002).

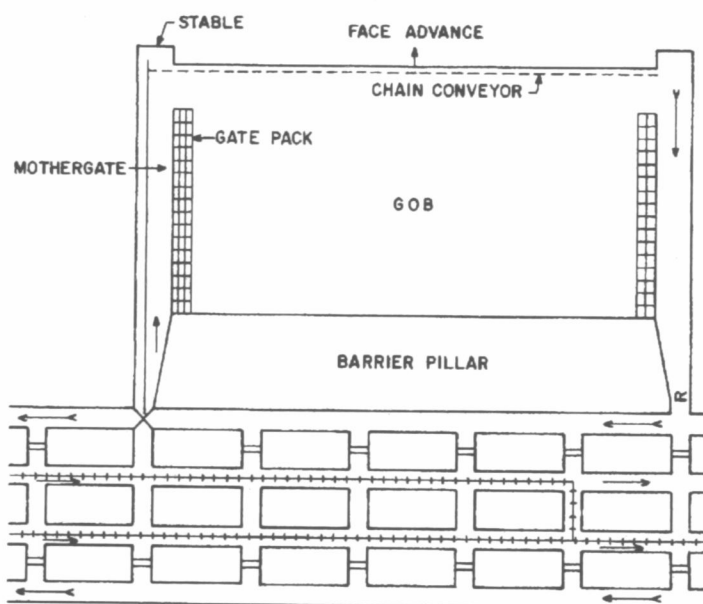
### 2.3 Εκμετάλλευση με προχωρούντα επιμήκη ευθύγραμμο μέτωπα

Η μέθοδος αυτή εκμετάλλευσης χρησιμοποιείται περισσότερο εκτός των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής, ενώ αντίθετα στις Ηνωμένες Πολιτείες χρησιμοποιείται η μέθοδος εκμετάλλευσης με οπισθοχωρούντα επιμήκη ευθύγραμμο μέτωπα.

Εκτός Β.Αμερικής και σε μεγάλα βάθη εκσκαφής μέχρι και 4000 ft (1219m) είναι αδύνατον να εξορυχτούν και να διατηρηθούν στοές του απαιτούμενου πλάτους. Συνεπώς δύο στοές μεταλλεύματος διατηρούνται καθώς το μέτωπο προχωρεί, η κύρια στοά, η οποία περιέχει τον μεταφορέα μεταλλεύματος και παρέχει τον καθαρό αέρα και η



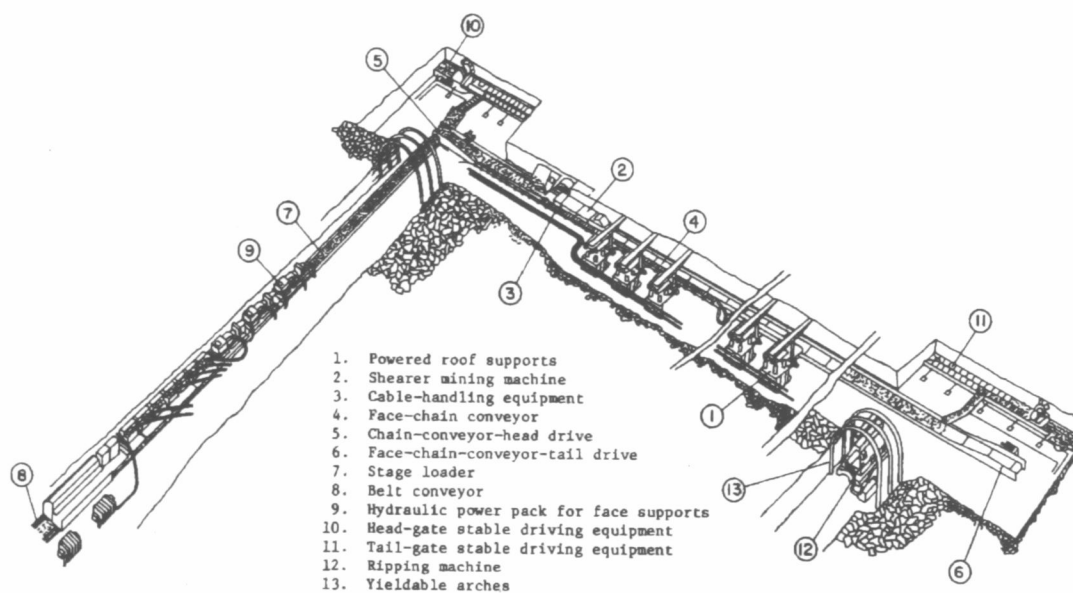
δευτερεύουσα στοά, η οποία κλείνει το κύκλωμα εξαερισμού. Τρεις μεταλλευτικές μηχανές λειτουργούν σ' αυτήν την περίπτωση. Οι δύο μηχανές έχουν ειδικούς προτεταμένους βραχίονες, που προωθούν τις στοές μπροστά από το μέτωπο εκμετάλλευσης, ενώ η τρίτη μεταλλευτική μηχανή εκσκάπτει το μέτωπο κατά το συμβατικό τρόπο. Στο Σχήμα 2.2 απεικονίζεται η μέθοδος εκμετάλλευσης με προχωρούντα επιμήκη ευθύγραμμα μέτωπα.



Σχήμα 2.2: Μέθοδος εκμετάλλευσης με προχωρούντα επιμήκη ευθύγραμμα μέτωπα (Stefanko, 1983).

Στην περίπτωση που το ύψος του κοιτάσματος είναι μικρό, τότε δημιουργείται η ανάγκη απόξεσης τόσο της οροφής, όσο και του πατώματος του μετώπου εκμετάλλευσης, έτσι ώστε να δημιουργηθεί ικανοποιητικός χώρος για εξαερισμό και μεταφορά του μεταλλεύματος. Συνεπώς, απαιτείται επιπλέον μηχανική υποστήριξη καθώς και επιπρόσθετο εργατικό δυναμικό, διαδικασία που περιπλέκει το σύστημα ακόμα πιο πολύ ενώ αυξάνεται παράλληλα και το ενδεχόμενο των καθυστερήσεων της παραγωγής.

Στη συνέχεια, δίνεται μία ιδέα για την πολυπλοκότητα του συστήματος εκμετάλλευσης με την μέθοδο των προχωρούντων επιμήκων ευθύγραμμων μετώπων και το σύστημα που χρησιμοποιείται (Σχήμα 2.3).



Σχήμα 2.3: Το σύστημα που χρησιμοποιείται κατά τη μέθοδο των προχωρούντων επιμήκων ευθύγραμμων μετώπων (Stefanko, 1983).

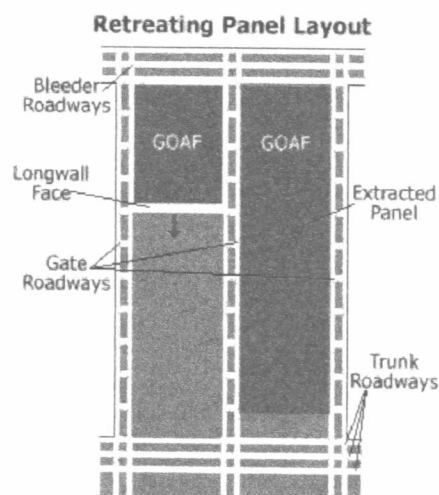
Ο τρόπος με τον οποίο θα σχηματιστούν οι στοές προχώρησης εξαρτάται από την διαστρωμάτωση της οροφής. Έτσι λοιπόν, όταν η οροφή αποτελείται από εύθρυπτο υλικό τα έργα υποστήριξης, όπως οι σύνθετες ξύλινες υποστηρίξεις και η αγκύρωση της οροφής είναι ικανοποιητικά. Η οροφή θα υποστεί κατακρήμνιση καθώς το μέτωπο προχωρεί, ενώ οι υποστηρίξεις θα αντέξουν το φορτίο από την κατακρήμνιση και οι στοές θα παραμείνουν ακέραιες. Στην περίπτωση όμως, που η οροφή αποτελείται από ομοιόμορφο και συμπαγές υλικό, απαιτείται πολύ μεγαλύτερη αντίσταση από αυτή που δύναται να προσφέρουν οι σύνθετες ξύλινες υποστηρίξεις για τη διατήρηση των στοών προχώρησης. Έτσι λοιπόν, κατασκευάζεται ένα στενό τοίχωμα από τσιμέντο ταχείας πήξεως. Αυτός ο τύπος ανάπτυξης στοών είναι αρκετά συνηθισμένος στην Ευρώπη, ενώ η τεχνική είναι επιδεκτική σε υψηλό βαθμό μηχανοποίησης. Για την υποστήριξη των στοών προχώρησης, οι κοχλιώσεις της οροφής δεν επαρκούν και κατασκευάζονται υποχωρούντα τοξοειδή υποστηρίγματα καθώς και άλλοι μηχανισμοί υποστήριξης παρόμοιας μορφής, οι οποίες συνεχώς συντηρούνται, εφόσον οι στοές υπόκεινται σε διαρκείς πιέσεις λόγω της κατακρήμνισης της οροφής. Έτσι λοιπόν το κόστος υποστήριξης είναι υπερβολικά υψηλό, τόσο από άποψη εργασίας, όσο και από την άποψη υλικών. Ο εξαερισμός αποτελεί μία δύσκολη περίπτωση, διότι ο αέρας δεν ακολουθεί την προδιαγεγραμμένη πορεία διαμέσου των δύο στοών προχώρησης και του μετώπου, αλλά απεναντίας έχει την τάση να κόβει δρόμο διαμέσου της περιοχής που έχει

εκσκαφτεί. Τέλος, επειδή οι στοές προχώρησης υπόκεινται σε αιφνίδιες εκλύσεις αερίων του ορυχείου, κατά την κατακρήμνιση της οροφής απαιτούνται ορισμένες μέθοδοι αποστράγγισης του μεθανίου (Stefanko, 1983).

Το πλεονέκτημα της μεθόδου εκμετάλλευσης με προχωρούντα επιμήκη ευθύγραμμο μέτωπα, είναι ότι η παραγωγή γαιάνθρακα πραγματοποιείται σχεδόν απευθείας και επομένως δεν υπάρχουν δαπάνες έργων ανάπτυξης της μεθόδου. Παρόλα αυτά, οι συνολικές δαπάνες θα είναι αυξημένες, εξαιτίας του μεγάλου κόστους συντήρησης των στοών προχώρησης κατά την διάρκεια της ζωής της περιοχής εκμετάλλευσης. Από τη στιγμή που η πρώτη περιοχή εκμετάλλευσης εξορύσσεται, μία δεύτερη περιοχή εκμετάλλευσης αρχίζει να εκσκάπτεται, με την κύρια στοά προχώρησης της πρώτης περιοχής εκμετάλλευσης να γίνεται δευτερεύουσα στοά της δεύτερης περιοχής εκμετάλλευσης. Αυτή η τεχνική προφανώς εξοικονομεί χρόνο και χρήμα, διότι μόνο μία στοά προχώρησης θα πρέπει να εξορυχτεί για να γίνει η εκμετάλλευση της δεύτερης και κάθε επακόλουθης περιοχής εκμετάλλευσης. Εντούτοις, αν οι προκαλούμενες πιέσεις από την πτώση της οροφής είναι τόσο μεγάλες, έτσι ώστε να καταστήσουν αδύνατη αυτή τη διαδικασία, τότε αφήνεται ένας συμπαγής όγκος προστασίας από γαιάνθρακα με πλάτος ίσο με το 1/10 του ύψους του κοιτάσματος και η δεύτερη περιοχή εκμετάλλευσης εξορύσσεται παρόμοια με την πρώτη (Stefanko, 1983).

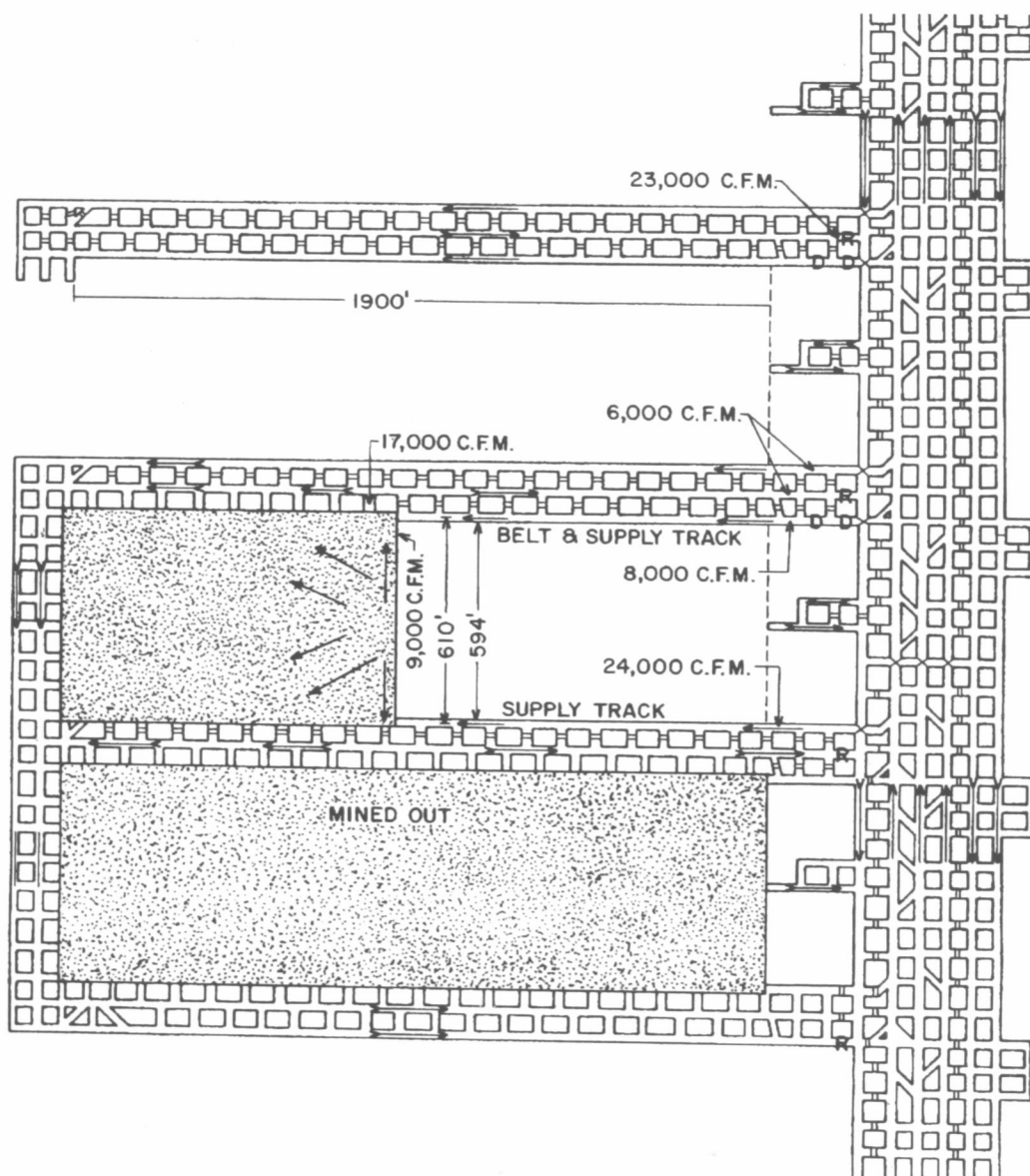
## 2.4 Εκμετάλλευση με οπισθοχωρούντα επιμήκη ευθύγραμμο μέτωπα

Στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής οι στοές προχώρησης δεν διατηρούνται. Στην πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδο που φαίνεται και στο Σχήμα 2.4, η εξόρυξη των στοών είναι μία εντελώς ξεχωριστή διεργασία από τις εργασίες του μετώπου, ενώ οι στοές δεν διατηρούνται, απλοποιώντας έτσι την υποστήριξη και τον έλεγχο του εξαερισμού.



Σχήμα 2.4: Μέθοδος εκμετάλλευσης με οπισθοχωρούντα επιμήκη ευθύγραμμο μέτωπα (UOW, 2002).

Ειδικότερα, στην μέθοδο των οπισθοχωρούντων επιμήκων ευθύγραμμων μετώπων εξορύσσονται δύο παράλληλες, ως επί το πλείστον, στοές εκμετάλλευσης με απόσταση μεταξύ τους από 150-250m, η κύρια και η δευτερεύουσα, όπως προαναφέρθηκε. Όταν οι στοές αυτές αποκτήσουν ένα προκαθορισμένο μήκος, συνδέονται και σχηματίζεται έτσι ένα μεγάλων διαστάσεων ορθογώνιο τμήμα άνθρακα. Στη συνέχεια, εγκαθίσταται ο εξοπλισμός στο πίσω μέρος του όγκου άνθρακα και αρχίζει η εκμετάλλευση με κατεύθυνση προς την αρχική στοά βάσης. Καθώς η εκμετάλλευση προχωρεί, επιτρέπεται η κατάρρευση των ανοιγμάτων, τα οποία βρίσκονται πίσω από την γραμμή του μετώπου (UOW, 2002). Στο Σχήμα 2.5 παρουσιάζεται η μέθοδος πιο αναλυτικά.



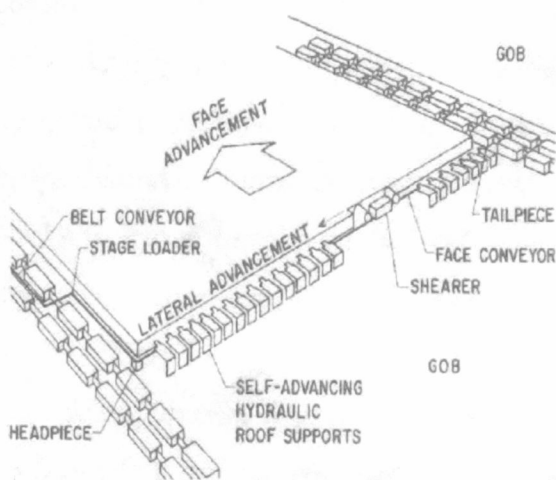
Σχήμα 2.5: Αναλυτική παρουσίαση της μεθόδου εκμετάλλευσης με οπισθοχωρούντα επιμήκη ευθύγραμμα μέτωπα (Stefanko, 1983).

## 2.5 Εξοπλισμός της μεθόδου των ευθύγραμμων επιμήκων μετώπων

Ο εξοπλισμός της μεθόδου εκμετάλλευσης των ευθύγραμμων επιμήκων μετώπων αποτελείται από τρία βασικά συστήματα:

- Το κοπτικό σύστημα.
- Το σύστημα υποστήριξης.
- Το σύστημα μεταφοράς.

Τα Σχήματα 2.6 και 2.7 δείχνουν τη διάταξη του παραπάνω εξοπλισμού, τόσο από συνολική άποψη, καθώς και από πιο εξειδικευμένη σκοπιά αντίστοιχα. Παρατηρείται, ότι η συνεχής μεταφορά του γαιάνθρακα γίνεται από έναν αλυσιδωτό μεταφορέα, ο οποίος ενεργεί επίσης και σαν οδηγός για την κοπτική μηχανή του γαιάνθρακα. Η κοπτική μηχανή κινείται μπρος και πίσω πάνω σε μία σταθερή αλυσίδα, αποσπώντας τμήματα γαιάνθρακα από το μέτωπο εκμετάλλευσης. Το μέτωπο εκμετάλλευσης είναι ασφαλής περιοχή, η οποία δημιουργείται από τους προβαλλόμενους δοκούς οροφής, που προεκτείνονται από τις μηχανικές υποστηρίξεις.



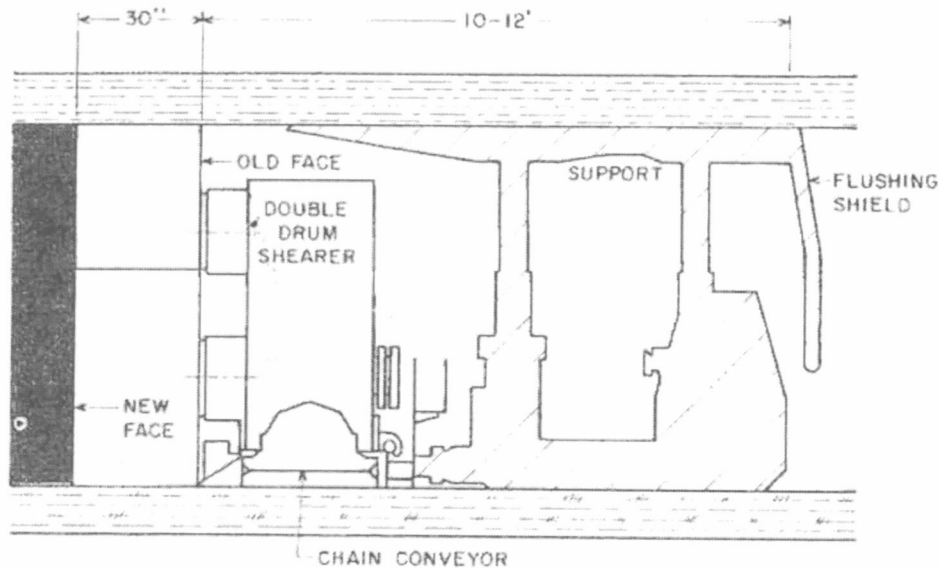
Σχήμα 2.6: Γενική παρουσίαση του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται κατά τη μέθοδο των ευθύγραμμων μετώπων (Stefanko, 1983).



Σχήμα 2.7: Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται στο μέτωπο κατά την μέθοδο των ευθύγραμμων μετώπων (UOW, 2002).

Εξαιτίας των εξαιρετικά υψηλών πιέσεων της οροφής, απαιτούνται ογκώδη συστήματα υποστήριξης με αρκετά μεγάλη αντοχή, γεγονός που υλοποιείται σε περιορισμένο χώρο εργασίας, της τάξης του 10-12ft (3-3.65m). Η διαπίστωση αυτή κατανοείται καλύτερα,

παρατηρώντας την τομή ενός κοπτικού μηχανισμού και το σύστημα υποστήριξης στο Σχήμα 2.8.



Σχήμα 2.8: Τομή μηχανισμού κοπής που χρησιμοποιείται κατά τη μέθοδο των ευθύγραμμων επιμήκων μετώπων (Stefanko, 1983).

Προφανώς τόσο ο χειριστής του εγκοπήρα, όσο και οι υπόλοιποι ανθρακωρύχοι περιορίζονται στο χώρο που ορίζεται από τις αυτοπροωθούμενες υποστηρίξεις. Βέβαια ο σχεδιασμός εξοπλισμού υψηλής παραγωγικότητας, που να προσαρμόζεται σε περιορισμένο χώρο, να παρέχει κατάλληλη υποστήριξη καθώς και να παρέχει επαρκή κίνηση του ανθρώπινου εργατικού δυναμικού δεν αποτελεί απλή υπόθεση. Ωστόσο, υπάρχουν ποικίλες διατάξεις συστημάτων υποστήριξης, εκ των οποίων όλες λειτουργούν υδραυλικά, έχουν μεγάλο αριθμό σκελών που απαρτίζονται από υποστάτες οροφής και δαπέδου, και είναι αυτοπροωθούμενα συστήματα, που χρησιμοποιούν διπλής ενέργειας υδραυλικό έμβολο.

Τέλος, επειδή ο μεταφορέας μετώπου πρέπει να κινείται οφιοειδώς, γι' αυτό το λόγο δεδομένης της ευκινήσιάς του, χρησιμοποιείται ο θωρακισμένος-αλυσιδωτός τύπος μεταφορέα. Το χαρακτηριστικό και συνηθισμένο όμως, πρόβλημα των αλυσιδωτών μεταφορέων είναι τα μεγάλα μήκη της αλυσού, που απαιτούνται για την εφαρμογή της εκμετάλλευσης με τη μέθοδο των ευθύγραμμων επιμήκων μετώπων. Μέχρι πρόσφατα, ο αλυσιδωτός μεταφορέας ήταν ο πιο αδύνατος σύνδεσμος σε τέτοια συστήματα εκμετάλλευσης, περιορίζοντας το μέγεθος των περιοχών εκμετάλλευσης καθώς και την παραγωγικότητα του συστήματος. Βέβαια το πρόβλημα αυτό ξεπεράστηκε με τη

χρησιμοποίηση βαρειάς κατασκευής μεταφορέων μετώπου, με απλή ή διπλή άλυσο ενισχυμένου μεγέθους (Stefanko, 1983).

### **2.5.1 Το κοπτικό σύστημα**

Για να αποσπαστεί ο γαιάνθρακας από το μέτωπο της εκμετάλλευσης κατά την εφαρμογή της μεθόδου των ευθύγραμμων επιμήκων μετώπων χρησιμοποιούνται δύο μεθοδοί:

✓ **Η μέθοδος μονής κατεύθυνσης κοπής.**

Κατά την μέθοδο αυτή, ο εγκοπτήρας αποσπά τμήματα γαιάνθρακα από το μέτωπο της εκμετάλλευσης, κινούμενος κατά το μέτωπο της περιοχής εκμετάλλευσης από τη μία ως την άλλη της πλευρά. Κατόπιν επανέρχεται στην αρχική του θέση, χωρίς να αποσπά γαιάνθρακα κατά την αντίθετη κατεύθυνση και καθαρίζεται το μέτωπο από τον ήδη αποσπασμένο γαιάνθρακα χωρίς επιπλέον προχώρηση των κινούμενων μηχανικά υποστηρίξεων.

✓ **Η μέθοδος διπλής κατεύθυνσης κοπής.**

Στην μέθοδο αυτή, ο εγκοπτήρας αποσπά τμήματα γαιάνθρακα από το μέτωπο της εκμετάλλευσης κάθε φορά που διασχίζει την περιοχή εκμετάλλευσης από την μία ως την άλλη πλευρά και αντίστροφα.

Υπάρχουν γενικά δύο τύποι κοπτικών μηχανών, που χρησιμοποιούνται με την εφαρμογή της μεθόδου εκμετάλλευσης των ευθύγραμμων επιμήκων μετώπων:

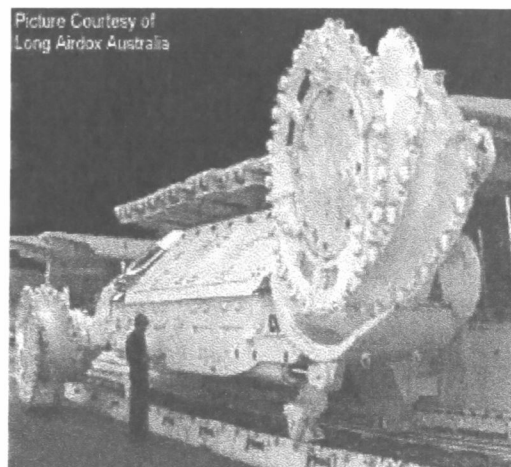
- Ο εγκοπτήρας (shearer).
- Ο αποξεστήρας (plow).

Ο εγκοπτήρας σε σύγκριση με τον αποξεστήρα είναι πιο περίπλοκη κοπτική μηχανή, ενώ επί του παρόντος ο εγκοπτήρας χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά σε εκμεταλλεύσεις με τη μέθοδο των ευθύγραμμων επιμήκων μετώπων.



### Ο εγκοπτήρας

Ένας τυπικός εγκοπτήρας μπορεί να έχει μήκος 15m και να ζυγίζει παραπάνω από 90tn. Παρόλο που στην Αυστραλία οι ταχύτητες κίνησης του εγκοπτήρα κυμαίνονται μεταξύ 10-14 m/min, οι ταχύτητες αυτές συνεχώς αυξάνονται καθώς η μεθοδος εξελίσσεται. Μάλιστα υπάρχει αναφορά για ταχύτητα κίνησης εγκοπτήρα της τάξης του 45m/min σε ένα ανθρακωρυχείο στις ΗΠΑ. Το μέγεθος του γαιάνθρακα που



Σχήμα 2.9: Τυπικός εγκοπτήρας (UOW, 2002).

εξάγεται από το μέτωπο της εκμετάλλευσης καθορίζεται από το πλάτος του τυμπάνου του εγκοπτήρα. Μία τυπική τιμή αποσπασμένου γαιάνθρακα είναι μεταξύ 0,8-1m. Ο γαιάνθρακας εξάγεται από το μέτωπο με κοπτικές μηχανές που έχουν ένα ή δύο περιστροφικά τύμπανα προσαρμοσμένα πάνω τους. Κάθε κοπτικό τύμπανο είναι τοποθετημένο στην άκρη ενός εκτατού βραχίονα. Η διάμετρος των τύμπανων ποικίλει ανάλογα με τις ανάγκες της εκμετάλλευσης και μπορεί να υπερβαίνει ακόμα και τα 2m (UOW, 2002).

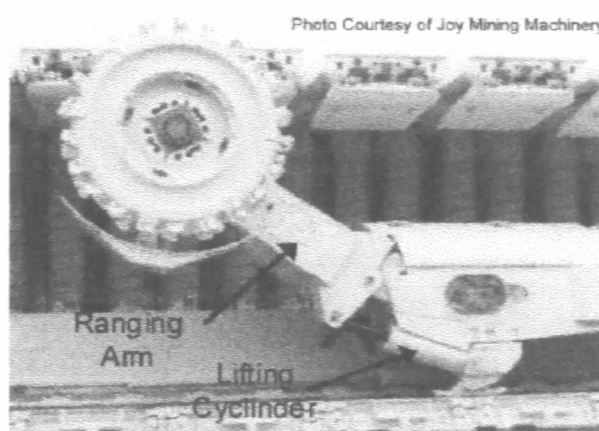
Επίσης, υπάρχουν κοπτικές μηχανές τα τύμπανα των οποίων είναι προσαρμοσμένα πάνω στο κύριο σώμα τους και συνεπώς δεν υπάρχει παρουσία εκτατών βραχιόνων. Τέτοιου είδους εγκοπτήρες χρησιμοποιούνται κατά την εκμετάλλευση στρωμάτων γαιάνθρακα μικρού πάχους.

Ο σχεδιασμός του τυμπάνου του εγκοπτήρα, αποτελεί περίπλοκη διαδικασία, η οποία εξαρτάται από τον τύπο του γαιάνθρακα που εκμεταλλευόμαστε, από το πάχος του κοιτάσματος καθώς και από την ισχύ της μηχανής κοπής. Ο εγκοπτήρας έχει παραταγμένα τα κοπτικά του άκρα γύρω από την περιφέρεια των ελικοειδών πτερυγίων του τύμπανου. Τα πτερύγια κατασκευάζονται γύρω από την κεντρική πλήμνη του τύμπανου και χρησιμεύουν αφενός για να φέρουν τα κοπτικά άκρα και αφετέρου για να μεταφέρουν τον γαιάνθρακα που αποκόπτεται από το μέτωπο στον μεταφορέα του μετώπου, που βρίσκεται ακριβώς από κάτω. Ο αριθμός των πτερυγίων που φέρει κάθε



τύμπανο ποικίλει από 2 έως 6 για να εξυπηρετεί την γεωμετρία και την ταχύτητα του τυμπάνου. Γενικά, τύμπανα που έχουν από 3 και πάνω πτερύγια χρησιμοποιούνται σε κοιτάσματα άνθρακα τα οποία δεν θραύονται εύκολα, ενώ τα τύμπανα που έχουν από 3 και κάτω πτερύγια χρησιμοποιούνται γενικά σε περιπτώσεις γαιανθράκων που εύκολα αποσπώνται από το μέτωπο. Τα κοπτικά άκρα τοποθετούνται πάνω στο τύμπανο του εγκοπήρα ακτινικά ή εφαπτομενικά. Τα σύγχρονα τύμπανα φέρουν κοπτικά άκρα, τα οποία είναι εφαπτομενικά τοποθετημένα. Επίσης παρέχεται νερό στο τύμπανο με καταιονισμό, ούτως ώστε να μειωθεί η εκπομπή σκόνης κατά την απόσπαση του γαιάνθρακα από το μέτωπο.

Ο ρόλος του εκτατού βραχίονα που αναφέρθηκε προηγουμένως, είναι να καταστήσει δυνατή την εκμετάλλευση κοιτασμάτων, των οποίων το πάχος είναι μεγαλύτερο από τη διάμετρο του τύμπανου. Η θέση του βραχίονα ελέγχεται και ρυθμίζεται από τον χειριστή του εγκοπήρα. Όπως παρατηρείται και στο Σχήμα 2.10, το ανέβασμα και το κατέβασμα του



Σχήμα 2.10: Ο εκτατός βραχίονας και ο υδραυλικός κύλινδρος ανύψωσης του εγκοπήρα (UOW, 2002).

βραχίονα επιτυγχάνεται με τη χρησιμοποίηση υδραυλικού κυλίνδρου ανύψωσης. Οι σημερινοί εγκοπήρες ελέγχονται με τη βοήθεια τηλεχειρισμού, έτσι ώστε να μπορεί ο μεταλλωρύχος να κάνει τη δουλειά του από ασφαλές περιβάλλον εργασίας (UOW, 2002).

### Ο αποξεστήρας

Ο αποξεστήρας, σαν μηχανή αποκοπής άνθρακα έχει αρχίσει να χρησιμοποιείται όλο και λιγότερο και να αποσύρεται σταδιακά από τις διάφορες εκμεταλλεύσεις με τη μέθοδο των ευθύγραμμων επιμήκων



Σχήμα 2.11: Ο αποξεστήρας (UOW, 2002).

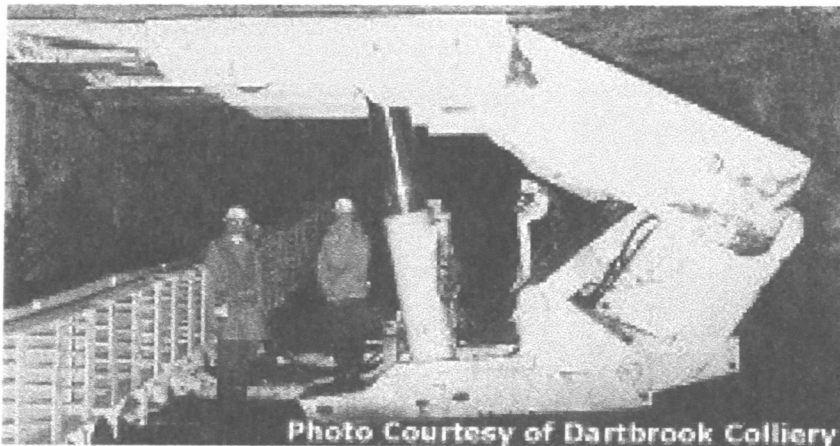
μετώπων. Στις ΗΠΑ για παράδειγμα ο αποξεστήρας αποσύρθηκε το 1999. Όσον αφορά το μηχανικό μέρος, ο αποξεστήρας δεν έχει περιστροφικά τμήματα. Αντίθετα, αποτελείται από μία σειρά κοπτικών άκρων, τα οποία κινούνται κατά μήκος του μετώπου εκμετάλλευσης και αποξένουν το γαιάνθρακα. Γενικά, ο αποξεστήρας είναι κατάλληλος για την εκμετάλλευση γαιανθρακοφόρων κοιτασμάτων, που αποτελούνται από σχετικά μαλακό υλικό (UOW, 2002).

### **2.5.2 Το σύστημα υποστήριξης**

Όπως έχει αναφερθεί, οι υδραυλικές μηχανικές υποστηρίξεις της οροφής είναι αυτοπροωθούμενες κατασκευές, που διασυνδέονται κατά μήκος του μετώπου εκμετάλλευσης. Ο κύριος ρόλος τους είναι (UOW, 2002):

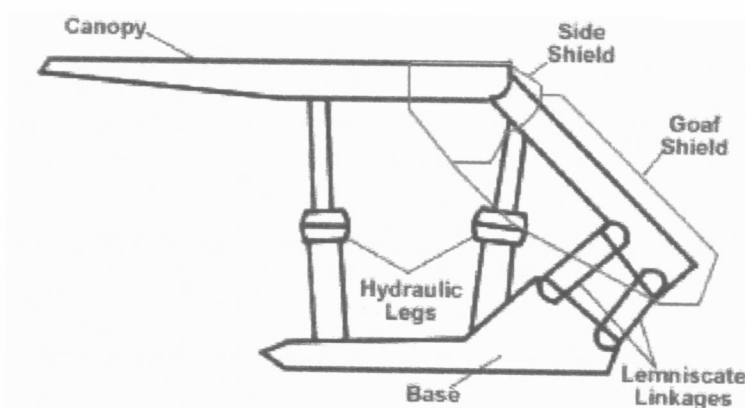
- Να ελέγξουν την παραμόρφωση, τη ρωγμάτωση και την κίνηση των στρωμάτων γύρω από το μέτωπο της εκμετάλλευσης.
- Να διατηρήσουν ένα ασφαλές περιβάλλον εργασίας παραγωγής γαιάνθρακα.
- Να περιορίσουν το ποσοστό σύγκλισης μεταξύ της οροφής και του δαπέδου της εκμετάλλευσης.
- Να εμποδίσουν το θραυσμένο πέτρωμα να εισχωρήσει στο περιβάλλον εργασίας.
- Να διασφαλίσουν και να προχωρήσουν τον εξοπλισμό έναντι του μετώπου.

Υπάρχουν διάφορα είδη υδραυλικών αυτοπροωθούμενων υποστηρίξεων, που χρησιμοποιούνται σε εκμεταλλεύσεις ευθύγραμμων επιμήκων μετώπων. Θα γίνει αναφορά κυρίως στις υποστηρίξεις τύπου «ασπίδας», οι οποίες κυριαρχούν έναντι των άλλων τύπων υποστήριξης. Κάθε μονάδα υποστήριξης αποτελείται από ένα προστατευτικό περίβλημα οροφής καθώς και από πλευρικά καλύμματα, για να εμποδίσει την κατακρήμνιση θραυσμάτων κατά την προχώρηση έναντι του μετώπου. Το προστατευτικό αυτό κάλυμμα της οροφής, συνδέεται διαμέσου κεκλιμένων υδραυλικών σκελών και συνδέσμων με τη βάση της μονάδας υποστήριξης. Η χρησιμοποίηση των κεκλιμένων υδραυλικών σκελών είναι σκόπιμη για να μην λυγίζουν λόγω της υπερβολικής φόρτισης από την πίεση της οροφής. Στο Σχήμα 2.12 παρουσιάζεται ένας τέτοιος μηχανισμό υποστήριξης (UOW, 2002).



Σχήμα 2.12: Μηχανισμός υποστήριξης τύπου «ασπίδας» (UOW, 2002).

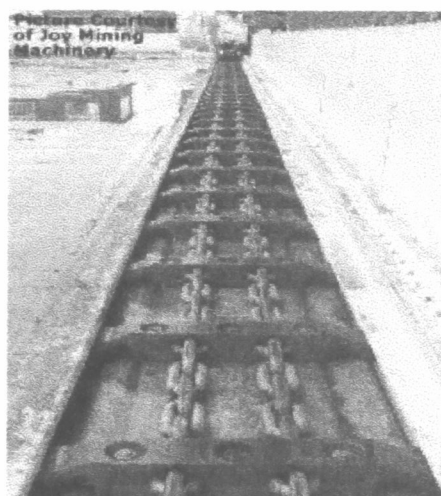
Το κύριο τους πλεονέκτημα είναι ότι προσφέρουν υψηλό βαθμό ασφάλειας, λόγω του γεγονότος ότι απομονώνουν και διασφαλίζουν καλύτερα το περιβάλλον εργασίας από τις άλλες μορφές υποστήριξης. Επιπλέον, οι ασπίδες κατά την διάρκεια της προχώρησης τους εντός του μετώπου διατηρούν συνεχή επαφή με την επιφάνεια της οροφής, με αποτέλεσμα κατά την κίνησή τους να μην αφήνουν την οροφή να εκτονωθεί. Στα μειονεκτήματα τους συγκαταλέγεται το κόστος τους. Όσο μεγαλύτερο είναι το βάρος τους τόσο μεγαλύτερο είναι και το κόστος τους, όπως άλλωστε ισχύει και για κάθε μεταλλευτικό μηχάνημα. Στο εμπόριο υπάρχουν ασπίδες με δύο και με τέσσερα σκέλη. Στο Σχήμα 2.13 φαίνεται η τομή μιας ασπίδας με τέσσερα σκέλη. Τα φορτία υποστήριξης ποικίλουν και εξαρτώνται τόσο από γεωλογικούς, όσο και από γεωπεριβαλλοντικούς παράγοντες. Γενικά, η δυναμικότητα υποστήριξης των ασπίδων κυμαίνεται από 650tn έως 1000tn.



Σχήμα 2.13: Τομή ασπίδας με τέσσερα σκέλη (UOW, 2002).

### 2.5.3 Το σύστημα μεταφοράς

Για να διατηρηθεί ένα ασφαλές περιβάλλον εργασίας κατά την εφαρμογή της μεθόδου εκμετάλλευσης των ευθύγραμμων επιμήκων μετώπων, οι μηχανοκίνητες υποστηρίξεις πρέπει να προχωρούν εντός του μετώπου διαδοχικά. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρησιμοποίηση ενός αρθρωτού, αλυσιδωτού, θωρακισμένου μεταφορέα μετώπου, ο οποίος κινείται κατά μήκος του μετώπου και ο εγκοπήρας είναι τοποθετημένος πάνω του. Ο θωρακισμένος μεταφορέας αποτελείται από



Σχήμα 2.14: Το σύστημα μεταφοράς (UOW, 2002).

αρθρωτά τμήματα, τα οποία του επιτρέπουν να κινείται οφιοειδώς κατά μήκος του μετώπου καθώς οι μηχανοκίνητες υποστηρίξεις προχωρούν προοδευτικά. Κάθε μηχανοκίνητη υποστήριξη είναι συνδεδεμένη πάνω στα αρθρωτά τμήματα του μεταφορέα, το συνηθισμένο μήκος των οποίων είναι 1,5m. Βέβαια στις μέρες μας, το μήκος τους έχει φτάσει τα 2m, ούτως ώστε να μπορούν να ανταπεξέλθουν στο συνεχώς αυξανόμενο πλάτος των μηχανοκίνητων συστημάτων υποστήριξης, τα οποία προσαρμόζονται πάνω τους. Η κίνηση του θωρακισμένου μεταφορέα παρέχεται από κινητήριες μονάδες, που βρίσκονται είτε στην κύρια είτε στη δευτερεύουσα στοά της εκμετάλλευσης. Η αλυσίδα του μεταφορέα κινείται κατά μήκος του μετώπου, με τη βοήθεια διάταξης οδοντωτών τροχών και μεταφέρει τον άνθρακα με ταχύτητα γύρω στο 1m/sec. Υπάρχουν ωστόσο και μεταφορείς μετώπου που κινούνται με ταχύτητα 1,6m/sec. Γενικά, η ισχύς και η δυναμικότητα του θωρακισμένου μεταφορέα εξαρτάται από το μέγεθος του κινητήρα, το πλάτος των αρθρωτών τμημάτων του και από το μέγεθος της αλυσίδας.

Υπάρχουν ουσιαστικά τρεις διαφορετικές διατάξεις των αλυσίδων στον αρθρωτό θωρακισμένο μεταφορέα μετώπου:

- Ο θωρακισμένος μεταφορέας με δύο εσωτερικές αλυσίδες.
- Ο θωρακισμένος μεταφορέας με δύο εξωτερικές αλυσίδες.
- Ο θωρακισμένος μεταφορέας με μία εσωτερική αλυσίδα.

Η πρώτη διάταξη που φαίνεται και στο Σχήμα 2.15, είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη στις σύγχρονες εκμεταλλεύσεις, ενώ η δεύτερη διάταξη διαφέρει από την πρώτη μόνο στο γεγονός ότι οι δύο αλυσίδες βρίσκονται στην εξωτερική άκρη των αρθρωτών τμημάτων του μεταφορέα. Τέλος, ο θωρακισμένος μεταφορέας, με μία αλυσίδα, που βρίσκεται στο κέντρο του, χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις μικρών περιοχών εκμετάλλευσης.

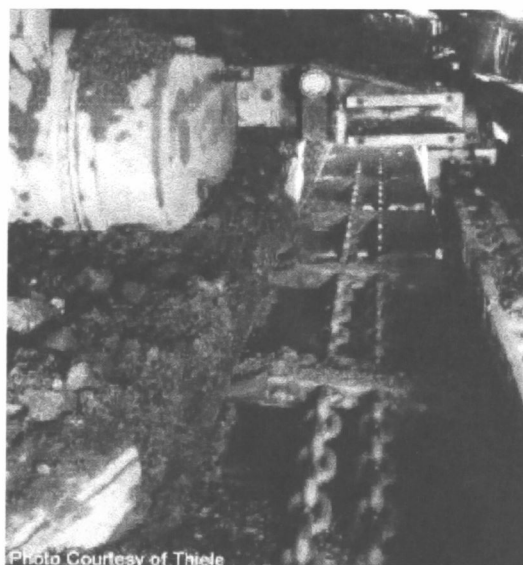


Photo Courtesy of Thiele

Σχήμα 2.15: Θωρακισμένος μεταφορέας με δύο εσωτερικές αλυσίδες (UOW, 2002).

Καθώς ο άνθρακας μεταφέρεται από τον αλυσιδωτό θωρακισμένο μεταφορέα κατά μήκος του μετώπου, συναντά το μεταφορέα μεταφόρτωσης στο τέλος του μετώπου. Ο μεταφορέας μεταφόρτωσης δεν είναι τίποτα άλλο, παρά ένας αλυσιδωτός μεταφορέας που μεταφέρει τον άνθρακα από το μεταφορέα μετώπου στον κύριο ταινιόδρομο της εκμετάλλευσης. Επίσης στο μεταφορέα μεταφόρτωσης ενδεχομένως να περιλαμβάνεται ένας μικρός σπαστήρας για να μειώσει το μέγεθος των σωματιδίων του γαιάνθρακα, έτσι ώστε να γίνεται ευκολότερη μεταφορά. Υπάρχουν γενικά δύο τρόποι μεταφοράς του γαιάνθρακα στο μεταφορέα μεταφόρτωσης, από το μεταφορέα του μετώπου. Είτε με πτώση είτε με πλευρική μεταφορά. Ο πρώτος τρόπος χρησιμοποιείται κυρίως για επίπεδες μάζες γαιάνθρακα, ενώ ο δεύτερος που είναι και πιο σύγχρονος, μεταφέρει πλευρικά το γαιάνθρακα στο μεταφορέα μεταφόρτωσης. Ο τρόπος αυτός ενδείκνυται για μεγάλες και ακανόνιστες μάζες άνθρακα, ενώ έχει και μεγαλύτερη δυναμικότητα μεταφοράς. Το Σχήμα 2.16 περιγράφει μία τέτοιου είδους διάταξη. Όταν μεταφερθεί ο άνθρακας στον κύριο ταινιόδρομο

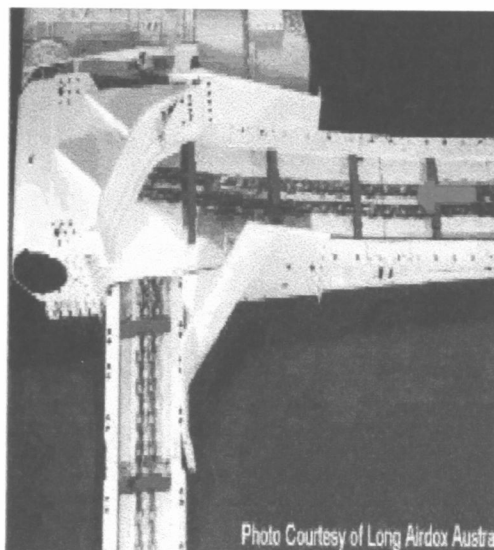


Photo Courtesy of Long Airdox Australia

Σχήμα 2.16: Ο μεταφορέας πλευρικής μεταφόρτωσης (UOW, 2002).

της εκμετάλλευσης, στη συνέχεια μεταφέρεται στην επιφάνεια, όπου και αρχίζει η επεξεργασία του (UOW, 2002).

## **2.6 Περιβαλλοντικά προβλήματα – Ασφάλεια**

Μία από τις περιβαλλοντικές ανησυχίες που παρουσιάζονται κατά τις υπόγειες εκμεταλλεύσεις, είναι η σκόνη που δημιουργείται από τη θραύση του γαιάνθρακα. Η σκόνη δεν πρέπει να εισπνευθεί, διότι αν φτάσει στους πνεύμονες μπορεί να προκαλέσει προβλήματα υγείας. Έτσι λοιπόν ορίζονται επιτρεψίμα όρια σκόνης εντός του χώρου εργασίας από τις αρμόδιες αρχές. Υπάρχουν ορισμένες τεχνικές προκειμένου να ελεγχθούν και να ρυθμιστούν τα προβλήματα που προκύπτουν από την ποσότητα σκόνης, που δημιουργείται κατά την εκμετάλλευση των γαιανθράκων. Αυτές είναι (UOW, 2002):

- Μείωση της παραγωγής σκόνης με τη χρήση των εκσκαπτικών μηχανών.
- Διάλυση της πυκνότητας της σκόνης με την επαρκή χρήση εξαερισμού.
- Καταστολή της σκόνης με καταιονισμό νερού και διάφορες άλλες τεχνικές.
- Χρησιμοποίηση τηλεχειρισμού για την λειτουργία ορισμένου εξοπλισμού.
- Χρησιμοποίηση αναπνευστήρων για την προστασία του προσωπικού.

Άλλη μία περιβαλλοντική ανησυχία συνιστούν και τα αέρια που εκλύονται κατά τη διάρκεια της εκμετάλλευσης. Το πιο συνηθισμένο αέριο, που εκλύεται κατά την εκμετάλλευση γαιανθρακοφόρων κοιτασμάτων είναι το μεθάνιο. Το μεθάνιο είναι πολύ εύφλεκτο αέριο όταν βρίσκεται σε περιεκτικότητες μεταξύ 5-14%. Η περιεκτικότητα του μεθανίου εντός του χώρου εργασίας, μετρείται με ειδικούς μετρητές μεθανίου, οι οποίοι βρίσκονται σε διάφορα σταθερά σημεία του μετώπου της εκμετάλλευσης. Επίσης παράλληλα με το μεθάνιο ( $\text{CH}_4$ ), παρακολουθούνται και άλλα αέρια, όπως το διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) και το υδρόθειο ( $\text{H}_2\text{S}$ ).

Ορισμένες εκμεταλλεύσεις στην προσπάθεια τους να ελέγξουν το παραγόμενο μεθάνιο που εκλύεται, χρησιμοποιούν ένα πρόγραμμα αποστράγγισης αερίων. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει τη διάνοιξη διατρημάτων στην περιοχή εκμετάλλευσης, από τα

οποία αποστραγγίζεται το μεθάνιο και διοχετεύεται στη συνέχεια στην ατμόσφαιρα. Μάλιστα ορισμένα ορυχεία χρησιμοποιούν το μεθάνιο για να παράγουν ηλεκτρισμό.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### “Μέθοδοι πρόβλεψης καθιζήσεων”

#### 3.1 Γενικά στοιχεία

Ο βασικός σκοπός όλων των μεθόδων πρόβλεψης καθιζήσεων είναι να παράγουν μία γενικώς αποδεκτή και ακριβή μέθοδο εκτίμησης των επιφανειακών καθιζήσεων εξαιτίας υπογείων εκσκαφών και σε ορισμένες περιπτώσεις να προβλέπουν τις σχετικές επιπτώσεις στις επιφανειακές κατασκευές. Οι περισσότερες έρευνες για την ανάπτυξη των μεθόδων πρόβλεψης επιφανειακών καθιζήσεων βασίζονται σε περιπτώσεις εκμετάλλευσης κοιτασμάτων γαιανθράκων. Η ιδιαίτερης σημασίας ιδιότητα των κοιτασμάτων γαιάνθρακα, να έχουν ομοιόμορφο πάχος και σχετικά μεγάλο οριζόντιο μήκος, αποτέλεσε τη βάση πάνω στην οποία αναπτύχθηκαν οι μέθοδοι πρόβλεψης επιφανειακών καθιζήσεων.

Σε πολλές χώρες παραγωγής γαιάνθρακα έχουν γίνει προσπάθειες για να αναπτυχθούν τεχνικές πρόβλεψης επιφανειακών καθιζήσεων και γενικά το σημείο αναφοράς ήταν να εξασφαλιστεί, ότι οι τεχνικές αυτές παρακολουθούν στενά την καθίζηση, όπως αυτή παρατηρείται στην πράξη. Υπάρχει πληθώρα δημοσιευμάτων που σχετίζονται με την πρόβλεψη επιφανειακών καθιζήσεων και καλύπτουν τόσο τις θεωρητικές αρχές, όπως επίσης και εμπειρικά μοντέλα πρόβλεψης (Whittaker and Reddish, 1989).

#### 3.2 Βασικά χαρακτηριστικά της λεκάνης καθίζησης

Οι μέθοδοι πρόβλεψης καθιζήσεων στην ουσία προσανατολίζονται προς την θεώρηση της δημιουργίας επιφανειακής λεκάνης καθίζησης πάνω από μία ευρείας έκτασης εκσκαφή. Η μέγιστη τιμή καθίζησης στην επιφανειακή λεκάνη καθίζησης σχετίζεται με το πάχος του εκσκαπτόμενου κοιτάσματος γαιάνθρακα. Θεωρείται ότι η εκμετάλλευση έχει προχωρήσει επαρκώς, έτσι ώστε να επιτευχθεί η ανάπτυξη της μέγιστης καθίζησης, γεγονός που θα επιτρέψει τη διδιάστατη θεώρηση του προβλήματος. Επιπρόσθετα, σημειώνεται ότι εξετάζεται μόνο μία περιοχή εκμετάλλευσης στην ανάπτυξη του βασικού μοντέλου καθίζησης.



Υπάρχουν τρεις θεμελιώδεις καταστάσεις που επηρεάζουν τον τρόπο ανάπτυξης της καμπύλης καθίζησης στην επιφάνεια (Whittaker and Reddish, 1989).

- ✓ **Υποκρίσιμη κατάσταση (subcritical extraction).** Ο λόγος του πλάτους προς το βάθος της εκμετάλλευσης ( $W/h$ ), είναι ανεπαρκής να επιτρέψει την ανάπτυξη της πλήρους καμπύλης καθίζησης γεγονός που οφείλεται σε ένα βαθμό φυσικών τόξων του πετρώματος κατά μήκος της εκσκαφής. Αποτελεί μία κατάσταση που παρατηρείται συχνά σε εκμεταλλεύσεις μεγάλου βάθους. Για τις συνθήκες εκμετάλλευσης γαιάνθρακα στο Ηνωμένο Βασίλειο ο λόγος ( $W/h$ ) είναι:

$$W/h < 1.4$$

- ✓ **Κρίσιμη κατάσταση (critical extraction).** Ο λόγος του πλάτους προς το βάθος της εκμετάλλευσης ( $W/h$ ), είναι μόλις επαρκής να επιτρέψει την ανάπτυξη της πλήρους καμπύλης καθίζησης. Για τις συνθήκες εκμετάλλευσης γαιάνθρακα στο Ηνωμένο Βασίλειο ο λόγος ( $W/h$ ) είναι:

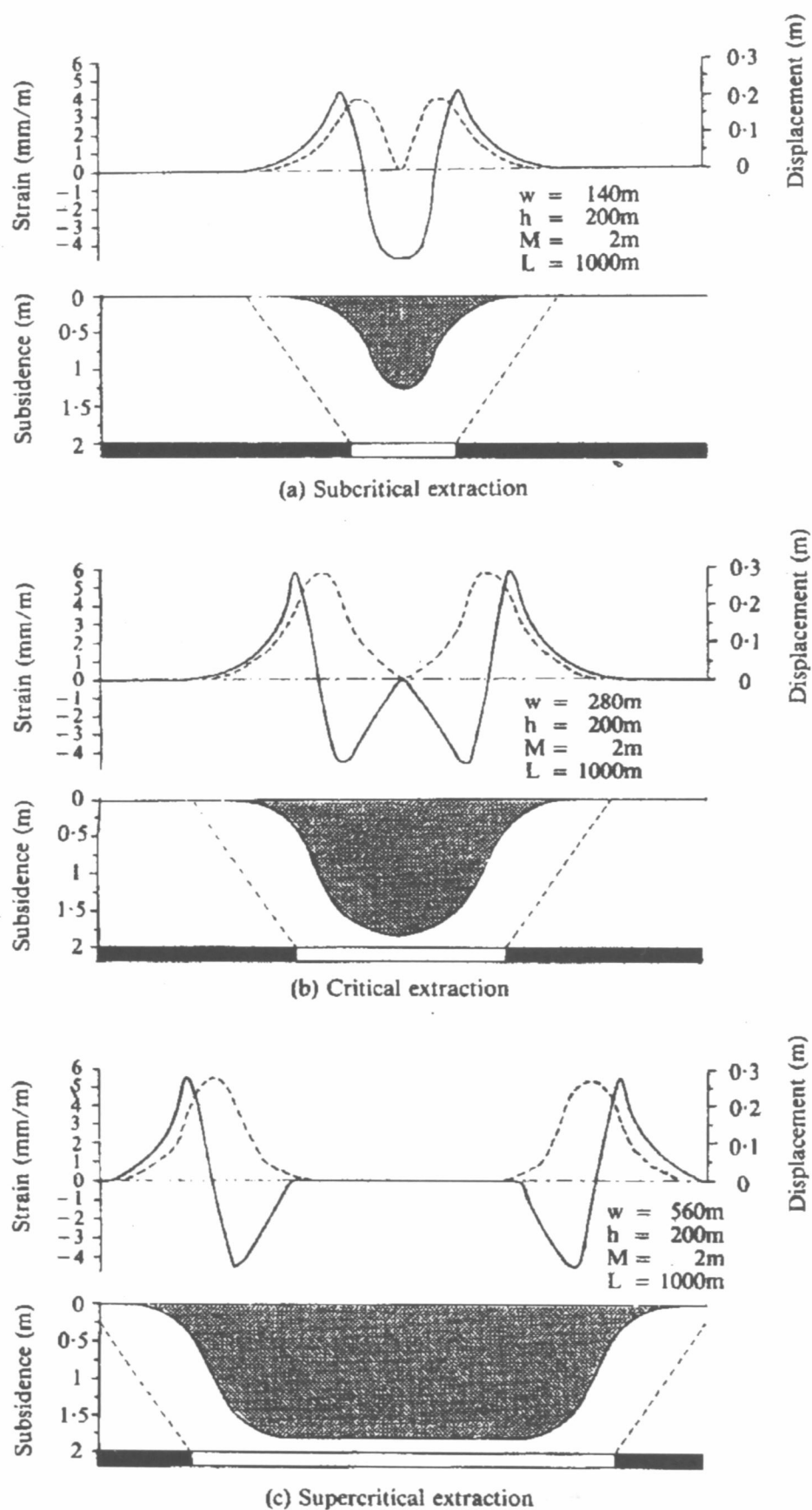
$$W/h = 1.4$$

- ✓ **Υπερκρίσιμη κατάσταση (supercritical extraction).** Ο λόγος του πλάτους προς το βάθος της εκμετάλλευσης ( $W/h$ ), επιτρέπει την ανάπτυξη της πλήρους καμπύλης καθίζησης. Ο λόγος του πλάτους της περιοχής εκμετάλλευσης είναι πολύ μεγάλος σε σχέση με το βάθος της εκμετάλλευσης, έτσι ώστε να επιτρέψει τον σχηματισμό φυσικών τόξων κατά μήκος των πλευρών της εκμετάλλευσης σε κάθε πλευρά της εκσκαφής. Για τις συνθήκες εκμετάλλευσης γαιάνθρακα στο Ηνωμένο Βασίλειο ο λόγος ( $W/h$ ) είναι:

$$W/h > 1.4$$

(Για τις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής η αντίστοιχη τιμή του λόγου ( $W/h$ ) είναι 1.2 (Agioutantis and Karmis, 2002).

Το Σχήμα 3.1 παρουσιάζει την υποκρίσιμη, κρίσιμη και υπερκρίσιμη κατάσταση για καθιζήσεις λόγω υπόγειων εκσκαφών σε οριζόντια κοιτάσματα γαιάνθρακα. Η καμπύλη καθίζησης περιορίζεται μεταξύ των οριακών γραμμών που φαίνονται στο Σχήμα 3.1. Η επιφανειακή καθίζηση συνοδεύεται από οριζόντιες μετατοπίσεις οι οποίες δρουν κατά μήκος της περιοχής μέγιστης καθίζησης. Το μέγεθος των οριζόντιων μετατοπίσεων είναι κατά προσέγγιση συνάρτηση της κλίσης του προφίλ καθίζησης.



Σχήμα 3.1: Σύγκριση μεταξύ υποκρίσιμης, κρίσιμης και υπερκρίσιμης κατάστασης καθίζησης (Whittaker and Reddish, 1989).

Στη συνηθισμένη γεωμετρική διαμόρφωση εκμετάλλευσης που φαίνεται στο Σχήμα 3.1, η μέγιστη καθίζηση συμβαίνει πάνω από το κέντρο της εκσκαπτόμενης περιοχής και οι οριζόντιες μετατοπίσεις είναι μηδενικές σ' αυτό το σημείο. Υπάρχει συνεπώς μία κατάσταση συμμετρίας όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1. Οι οριζόντιες μετατοπίσεις καταλήγουν σε διαφορικές κινήσεις, οι οποίες δημιουργούν την πρόκληση καταστάσεων παραμόρφωσης κατά μήκος των τμημάτων του προφίλ καθίζησης. Οι καταστάσεις παραμόρφωσης αντιστοιχούν τόσο σε θλίψη όσο και σε εφελκυσμό. Το προφίλ καθίζησης μπορεί να εισάγει σημαντικά στοιχεία κλίσης και καμπύλωσης, τα οποία είναι δυνατόν να έχουν σημαντική επίδραση στις επιφανειακές κατασκευές κάτω από ορισμένες συνθήκες.

Μία θεμελιώδης θεώρηση όλων των μεθόδων πρόβλεψης επιφανειακών καθιζήσεων είναι ότι η επιφανειακή καθίζηση δεν μπορεί να υπερβεί το εκσκαπτόμενο πάχος του κοιτάσματος. Παρατηρήσεις που έχουν συμβεί στο πεδίο εκμετάλλευσης υποδηλώνουν ότι η μέγιστη τιμή επιφανειακής καθίζησης είναι 0.9m (m: το εκσκαπτόμενο ύψος του κοιτάσματος), όπου οι συνθήκες εκμετάλλευσης επιτρέπουν την ανάπτυξη της. Υπάρχουν βέβαια μεμονωμένες περιπτώσεις, όπου η επιφανειακή καθίζηση έχει υπερβεί το εκσκαπτόμενο πάχος του κοιτάσματος, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις, όπου μεγάλες ποσότητες νερού εκρέουν από εκσκαπτόμενα στρώματα καθώς και σε περιπτώσεις πολλαπλών περιοχών εκμετάλλευσης και συγκεκριμένα σε παλιές περιοχές εκμετάλλευσης, οι οποίες έχουν εκσκαφτεί και προκαλούν την επαναδραστηριοποίηση της καθίζησης. Η δεύτερη περίπτωση ενέχει εξαιρετική σημασία στις εκμεταλλεύσεις γαιανθρακοφόρων κοιτασμάτων με τη μέθοδο των ευθύγραμμων επιμήκων μετώπων, οι οποίες λαμβάνουν χώρα κάτω από προγενέστερες εγκαταλελειμμένες εκμεταλλεύσεις με τη μέθοδο των θαλάμων και στύλων και υπάρχουν σε μικρά βάθη.

Το μέγεθος της πλήρους καμπύλης καθίζησης αποτελεί γραμμική συνάρτηση του εκσκαπτόμενου πάχους του κοιτάσματος. Μία απλή εκσκαφή δεδομένου πάχους θεωρείται ότι παράγει την ίδια επιφανειακή καθίζηση με αυτή που προκαλούν δύο εκσκαφές με πάχος ίσο με το μισό της προηγούμενης περίπτωσης, οι οποίες βρίσκονται σε ίδιο βάθος. Η εξίσωση 3.1 χρησιμοποιείται συχνά σε προβλέψεις καθιζήσεων:

$$S_{\max} = a m \quad [3.1]$$

Όπου,  $S_{\max}$  : Μέγιστη τιμή επιφανειακής καθίζησης

$m$  : Εκσκαπτόμενο πάχος κοιτάσματος

$a$  : Συντελεστής καθίζησης

Ο συντελεστής καθίζησης ( $a$ ) είναι αδιάστατο μέγεθος και εξαρτάται από τη φύση των υπερκείμενων στρωμάτων καθώς και από τον τύπο επεξεργασίας των αγόνων, όπως ολική κατακρήμνιση ή κάποιου είδους στοίβαξης. Η τιμή του συντελεστή καθίζησης προκύπτει από παρατηρήσεις σε διαφορετικές συνθήκες και σε αρκετές χώρες. Στην πράξη η τιμή του συντελεστή καθίζησης αντιστοιχεί σε 0.9, από παρατηρήσεις που έλαβαν χώρα σε Γαλλία, Γερμανία και Ηνωμένο Βασίλειο για περιπτώσεις πλήρους καθίζησης, ενώ σε περιπτώσεις πνευματικής λιθογόμωσης η τιμή του συντελεστή καθίζησης είναι γενικά περί τα 0.4 μέχρι 0.5, ενώ είναι ακόμη χαμηλότερη (γύρω στα 0.12), σε περίπτωση υδραυλικής λιθογόμωσης. Η τελευταία τιμή του συντελεστή καθίζησης παρατηρήθηκε στην Πολωνία, σύμφωνα με τον Bräuner (1973a). Ο Πίνακας 3.1 δίνει το εύρος τιμών για το συντελεστή καθίζησης όπως παρατηρείται σε διάφορες χώρες.

Πίνακας 3.1: Παρατηρούμενες τιμές του συντελεστή καθίζησης σύμφωνα με το Bräuner (1973b).

Coalfield and form of goaf treatment	Subsidence factor ( $a$ )
British coalfields (1)	
Solid stowing	0.45
Caving or strip-packing	0.90
Ruhr coalfield, Germany (2)	
Pneumatic stowing	0.45
Other solid stowing	0.50
Caving	0.90
North and Pas de Calais coalfield, France (3)	
Hydraulic stowing	0.25 — 0.35
Pneumatic stowing	0.45 — 0.55
Caving	0.85 — 0.90
Upper Silesia, Poland (4)	
Hydraulic stowing	0.12
Caving	0.70
USSR (5)	
Caving, Donets and Kizelov coalfields	0.60
Caving, Kuznetsk and Karaganda coalfields	0.70
Caving, Chelybinsk coalfield	0.90
USA, Pennsylvania (6)	
Caving	0.50 — 0.60

Data sources:

1. NCB (1966)
2. Fläschenträger (1957), Schulte (1957)
3. Grard (1969)
4. Knothe (1953)
5. GIMS (1958)
6. Maize, Thomas and Greenwald (1941)

Ο Bräuner (1973b) εστιάζει την προσοχή του στις βασικές θεωρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν στις προβλέψεις επιφανειακών καθιζήσεων και κυρίως στην αρχή της υπέρθεσης των επιφανειακών μετατοπίσεων (superposition). Τα προφίλ καθιζήσεων τα οποία παρουσιάζουν επικάλυψη θεωρείται ότι παράγουν μία συνισταμένη καθίζηση, που προκύπτει από το άθροισμα των κατακόρυφων μετατοπίσεων. Μία επιπλέον σημαντική θεώρηση είναι η αρχή της ισοδυναμίας των εκσκαπτόμενων περιοχών σε σχέση με την επιφάνεια. Η αρχή της ισοδυναμίας θεωρεί ότι όταν από τα άκρα της εκσκαφής της περιοχής εκμετάλλευσης προβάλλονται ευθείες γραμμές σε ένα σημείο της επιφάνειας, τότε εάν σε περιοχές εκμετάλλευσης που βρίσκονται σε διαφορετικά βάθη αλλά οι αντίστοιχες προβαλλόμενες προς το ίδιο σημείο γραμμές ταυτίζονται, τότε οι εν λόγω εκσκαφές θα παράγουν τις ίδιες μετατοπίσεις στο δεδομένο σημείο της επιφάνειας.

### 3.3 Βασικές αρχές και ορισμοί

Η περιοχή πάνω από μία υπόγεια εκσκαφή, εντός της οποίας οι εδαφικές κινήσεις είναι σημαντικές και έχουν τη δυναμική να προκαλέσουν ζημιά σε επιφανειακές κατασκευές και εγκαταστάσεις ονομάζεται επιφάνεια επιρροής. Για να οριστεί η επιφάνεια επιρροής χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθες χαρακτηριστικές γωνίες:

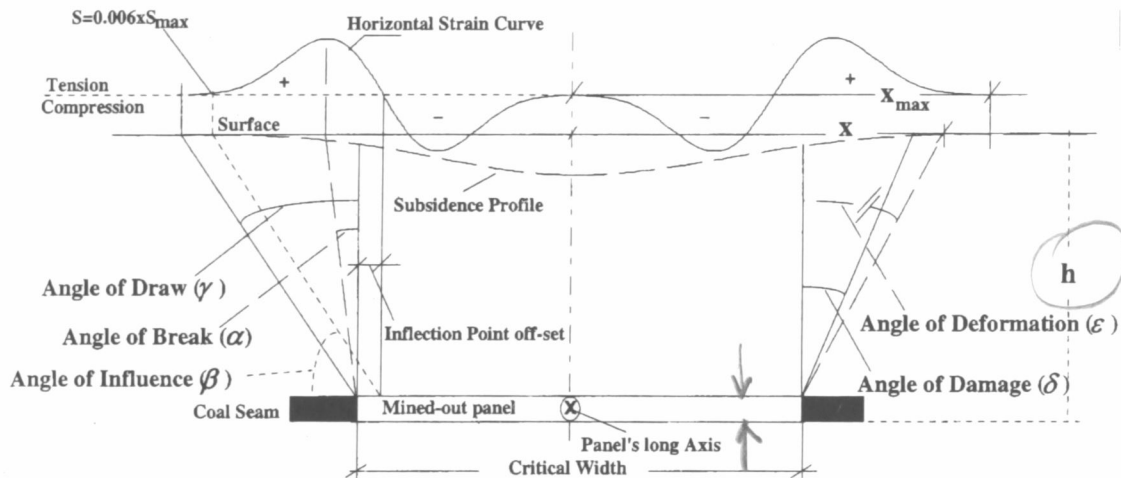
- ✓ **Γωνία οριακής επιρροής (angle of draw,  $\gamma$ ).** Είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της κατακόρυφης στην πλευρά της εκσκαφής και της γραμμής που ενώνει την πλευρά της εκσκαφής με το σημείο της επιφάνειας, στο οποίο η καθίζηση μηδενίζεται. Εφόσον το προφίλ της καθίζησης μειώνεται σε εξαιρετικά μικρές τιμές προτού φτάσει στο σημείο μηδενικής καθίζησης, έπεται ότι η γωνία απόκλισης είναι περιορισμένης σημασίας όσον αφορά στον έλεγχο των επιφανειακών καθιζήσεων (Peng, 1992). Επιπρόσθετα, η έννοια της μηδενικής καθίζησης είναι δύσκολο να μετρηθεί ή να πραγματοποιηθεί. Υπό την έννοια αυτή ίσως να ήταν σωστότερο να καθοριστεί ένα ελάχιστο, μετρήσιμο επίπεδο καθίζησης σαν σημείο αναφοράς.
- ✓ **Γωνία θραύσης (angle of break,  $\alpha$ ).** Είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της κατακόρυφης στην πλευρά της εκσκαφής και της γραμμής που ενώνει την πλευρά της εκσκαφής με το σημείο της επιφάνειας, στο οποίο εμφανίζεται η μέγιστη εφελκυστική οριζόντια ανηγμένη παραμόρφωση.

- ✓ **Γωνία επιρροής (angle of influence,  $\beta$ ).** Είναι η γωνία που σχηματίζεται από την οριζόντια γραμμή και την γραμμή που ενώνει το σημείο τομής της προβολής του σημείου καμπής της καμπύλης καθίζησης στο επίπεδο του κοιτάσματος και το σημείο της επιφάνειας, στο οποίο η καθίζηση είναι ίση με 0.6% της μέγιστης τιμής επιφανειακής καθίζησης (VPI&SU, 1987). Η γωνία επιρροής αποτελεί μία από τις πιο βασικές παραμέτρους που χρησιμοποιούνται στην πρόβλεψη επιφανειακών καθιζήσεων με τη μέθοδο των συναρτήσεων επιρροής (VPI&SU, 1987, Karmis et al., 1990).
- ✓ **Η γωνία αστοχίας (angle of damage,  $\delta$ ).** Είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της κατακόρυφης στην πλευρά της εκσκαφής και της γραμμής που ενώνει την πλευρά της εκσκαφής με το σημείο της επιφάνειας, το οποίο αποτελεί το όριο της μέγιστης επιτρεπόμενης παραμόρφωσης, πάνω από το οποίο επέρχεται η αστοχία (Karmis et al., 1995). Η γωνία αστοχίας κυμαίνεται μεταξύ της γωνίας οριακής επιρροής και της γωνίας θραύσης.

Οι επιφανειακές κινήσεις που προκαλούνται λόγω υπογείων εκμεταλλεύσεων συνήθως περιγράφονται από ένα αριθμό παραμέτρων, οι πιο βασικοί από τους οποίους είναι:

- ✓ Η μέγιστη επιφανειακή καθίζηση ( $S_{max}$ ).
- ✓ Το σημείο καμπής (inflection point). Το σημείο καμπής αντιστοιχεί σε επιφανειακή καθίζηση  $s=S_{max}/2$  στο προφίλ της καθίζησης, ή σε μηδενική ανηγμένη παραμόρφωση στο προφίλ της παραμόρφωσης και επομένως αποτελεί το σημείο, στο οποίο το προφίλ της καθίζησης μετατρέπεται από κοίλο σε κυρτό. Το σημείο καμπής συνήθως μετατείνεται από τη πλευρά της εκσκαφής κατά μία απόσταση  $d$  προς το κέντρο της περιοχής εκμετάλλευσης.
- ✓ Οι μέγιστες εφελκυστικές και θλιπτικές παραμορφώσεις ( $E_{max}$ ).

Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζονται ορισμένες από τις προαναφερόμενες παραμέτρους, το οποίο αποτελεί ένα ιδανικό προφίλ καθιζήσεων και παραμορφώσεων.



Σχήμα 3.2: Ορισμός των βασικών μηχανικών παραμέτρων επιφανειακής καθίζησης (Agioutantis and Karmis, 1998).

Οι επιφανειακές καθιζήσεις αποτελούν ένα κυρίαρχο πρόβλημα που σχετίζεται με τις υπόγειες εκσκαφές γαιάνθρακα καθώς προκαλούν ζημιά στις επιφανειακές κατασκευές. Για να αποφευχθούν οι επιζήμιες επιπτώσεις της επιφανειακής καθίζησης μία αξιόπιστη μέθοδο πρόβλεψης καθιζήσεων είναι απαραίτητη. Πολλοί επιστήμονες από το Ηνωμένο Βασίλειο, τις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, την Κίνα, την Αυστραλία και άλλες χώρες προσπάθησαν να προβλέψουν την επιφανειακή καθίζηση λόγω υπογείων εκσκαφών χρησιμοποιώντας πολυάριθμες μεθόδους. Ορισμένες από αυτές είναι:

- ✓ Η μέθοδος των συναρτήσεων τομής (profile function methods) (King and Whetton, 1957, Hoffman, 1964, Kumar et al., 1983).
- ✓ Η μέθοδος των συναρτήσεων επιρροής (influence function methods) (Zenc, 1969, Knothe, 1957, Kochmanski, 1959, Ren et al., 1987, 1989).
- ✓ Η μέθοδος διάδοσης του κενού (void diffusion method) (Hao and Ma, 1990).
- ✓ Στοχαστικές μέθοδοι (stochastic methods) (Litwiniszyn, 1964).
- ✓ Ελαστικές μέθοδοι (elastic methods) (Salamon, 1974, 1977, Berry, 1977).
- ✓ Βισκοελαστικές μέθοδοι (visco-elastic methods) (Astin, 1968, Berry, 1977, Zeng and Kou, 1992).
- ✓ Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (finite-element method) (Reddish, 1984, Fitzpatrick, 1987, Jones and Kohli, 1985, Siriwardne and Amanat, 1983, 1988).
- ✓ Η μέθοδος των συνοριακών στοιχείων (boundary-element method) (McNabb, 1987).

- ✓ Η μέθοδος των διακριτών στοιχείων (distinct element method) (Coulthard and Dutton, 1988).

### 3.4 Συναρτήσεις επιρροής

Ο τρόπος αυτός πρόβλεψης των επιφανειακών καθιζήσεων με τις συναρτήσεις επιρροής περιέχει μεθόδους που υπολογίζουν την καθίζηση σε σημεία της επιφάνειας. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην θεωρία ότι υπάρχει μία περιοχή επιρροής γύρω από ένα σημείο εξαιτίας της εκσκαφής ενός μικρού στοιχείου, εντός της σφαίρας επιρροής του σημείου της επιφάνειας. Μία τυπική συνάρτηση επιρροής παρακολουθεί δακτυλιοειδείς ζώνες γύρω από ένα σημείο και χρησιμοποιεί εξισώσεις για να συσχετίσει το ποσοστό εκσκαφής σε κάθε περιοχή με την καθίζηση αυτού του σημείου. Η επιφάνεια επιρροής θεωρείται ότι είναι γενικά κυκλική, αν και έχουν χρησιμοποιηθεί σποραδικά εξαγωνικές μορφές για να απλοποιηθούν μεταγενέστεροι υπολογισμοί. Οι συχνά χρησιμοποιούμενες συναρτήσεις μπορούν να υποδιαιρεθούν ως εξής (Whittaker and Reddish, 1989).

- ✓ Εμπειρικά παραγόμενες συναρτήσεις, οι οποίες χρησιμοποιούν πολλές αυθαίρετες σταθερές για να παράγουν την επιθυμητή τιμή και σχήμα της καθίζησης.
- ✓ Συναρτήσεις οι οποίες σχετίζονται κυρίως με τις ιδιότητες του πετρώματος και την μηχανική του προβλήματος και όχι με αυθαίρετες σταθερές.

Η δεύτερη υποκατηγορία συναρτήσεων είναι περισσότερο δημοφιλής αλλά είναι λιγότερο ευέλικτη κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης. Το κυριότερο πλεονέκτημα των συναρτήσεων επιρροής είναι η ικανότητά τους να προβλέπουν επιφανειακές κινήσεις σε κάθε σημείο πάνω από εκσκαφές οποιασδήποτε πρακτικής μορφής. Το κύριο μειονέκτημα των συναρτήσεων επιρροής είναι ότι είναι αρκετά πιο δύσκολη η εφαρμογή τους από ότι είναι η εφαρμογή των συναρτήσεων τομής ενώ είναι και πολύ πιο δύσκολος ο έλεγχος και η διαδικασία βαθμονόμησης.

Η βασική αρχή της μεθόδου των συναρτήσεων επιρροής είναι η εφαρμογή του νόμου της υπέρθεσης (superposition) έτσι ώστε να καθορίσει την συνολική επιρροή μίας περιοχής εκσκαφής, η οποία θεωρείται ότι αποτελείται από απειροελάχιστα τμήματα.

Το Σχήμα 3.3 απεικονίζει την αρχή της υπέρθεσης των καμπυλών καθιζήσεων που παράγονται από την εκσκαφή των απειροελάχιστων τμημάτων, από τα οποία αποτελείται ένα οριζόντιο κοίτασμα ομοιόμορφου πάχους. Το άθροισμα των ατομικών στοιχειωδών

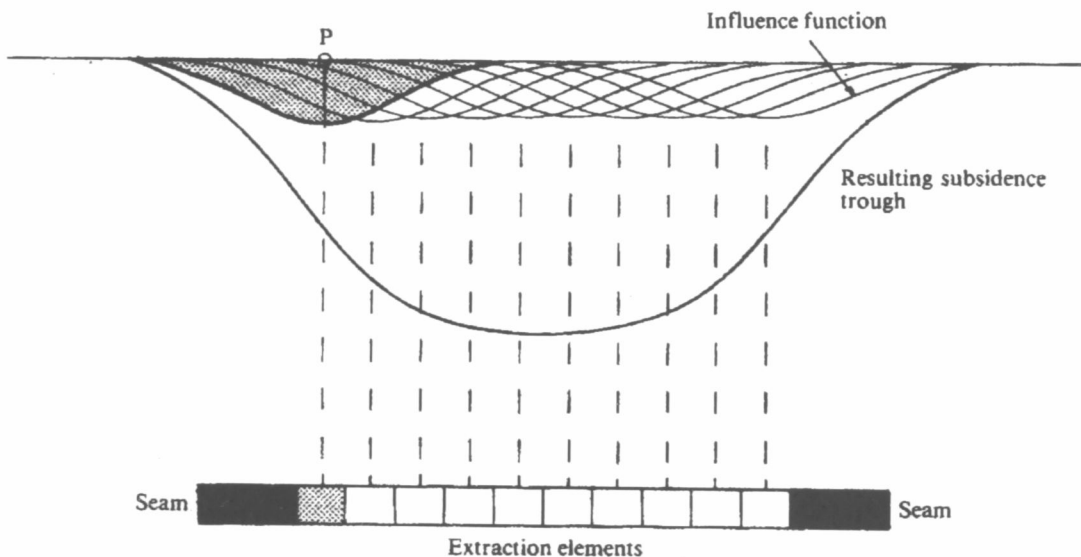


καμπυλών δίνει την συνισταμένη καθίζηση του σημείου P (Σχήμα 3.3) για την συνολική εκσκαφή. Κάθε στοιχειώδες τμήμα εκσκαφής επιφάνειας  $dA$  θεωρείται ότι συνεισφέρει στη συνολική καθίζηση της επιφάνειας σύμφωνα με την εξίσωση 3.2.

$$K_Z = f(r) \quad [3.2]$$

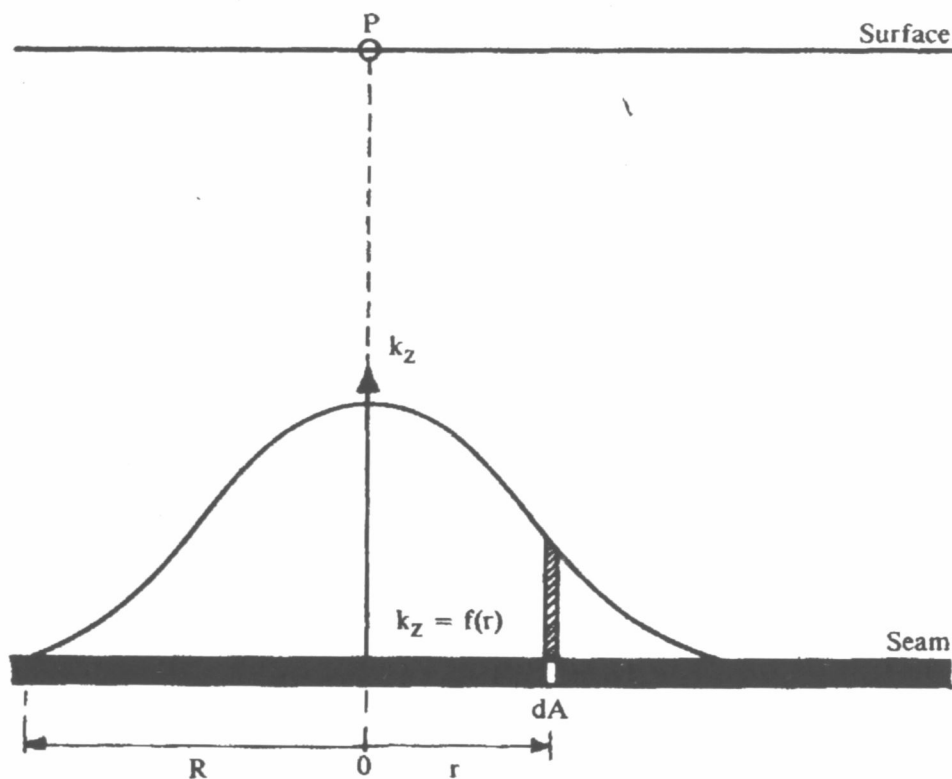
Όπου,  $K_Z$  : Το μέγεθος επιρροής του στοιχειώδους τμήματος επιφάνειας  $dA$  στο σημείο P.

$r$  : Η οριζόντια απόσταση μεταξύ της θέσης του σημείου P και του απειροελάχιστου στοιχειώδους τμήματος  $dA$ .



Σχήμα 3.3: Περιγραφή της αρχής της επίθεσης των επιρροών απειροελάχιστων τμημάτων εκσκαφής και η συμβολή τους στη συνισταμένη καμπύλη καθίζησης σύμφωνα με το Bräuner (1973b) (Πηγή: Whittaker and Reddish, 1989).

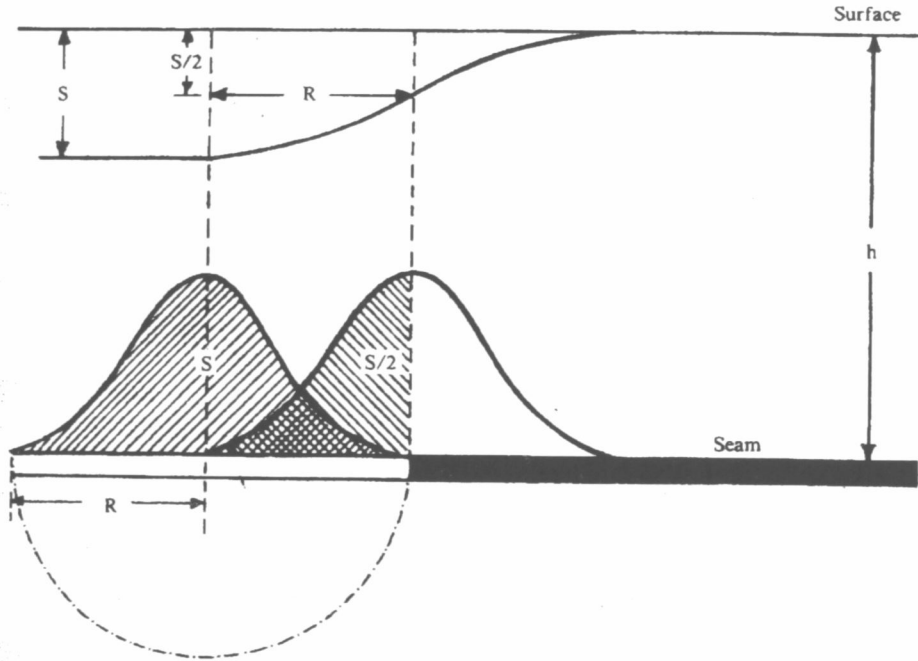
Η εξίσωση 3.2 αποτελεί την πρότυπη μορφή των συναρτήσεων επιρροής που σχετίζονται με την επιφανειακή καθίζηση. Το στοιχειώδες τμήμα εκσκαφής επιφάνειας  $dA$  και η συνάρτηση επιρροής  $K_Z$  παρέχουν την συνεισφορά του στοιχειώδους σημείου εκσκαφής στην καθίζηση ενός σημείου της επιφάνειας. Αυτή η αρχή παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4: Περιγραφή της βασικής αναπαράστασης των συναρτήσεων επιρροής, σύμφωνα με το Bräuner (1973b) (Πηγή: Whittaker and Reddish, 1989).

Η θέση του σημείου της επιφάνειας  $P$  επιλέγεται ως η αρχή των αξόνων του  $r$  (ακτινική μεταβλητή σε πολικές συντεταγμένες) καθώς η συνάρτηση επιρροής  $K_z$  αποδίδει την επίδραση στο σημείο  $P$ . Επομένως, το στοιχειώδες τμήμα της εκσκαφής, το οποίο βρίσκεται ακριβώς κάτω από το σημείο  $P$  συνεισφέρει τη μεγαλύτερη επιρροή στην καθίζηση, το οποίο μαθηματικά εκφράζεται από το γεγονός ότι η συνάρτηση  $k_z(r)$  παίρνει τη μέγιστη τιμή της όταν  $r = 0$ . Στο Σχήμα 3.4 παρατηρείται ότι όταν το σημείο  $P$  βρίσκεται στο κέντρο ενός κρίσιμου πλάτους εκσκαφής, τότε το σημείο  $P$  επηρεάζεται από όλα τα στοιχειώδη τμήματα εκσκαφής εντός της ακτίνας που διέπεται από τη συνάρτηση επιρροής και αυτό το γεγονός αποφέρει την μέγιστη καθίζηση. Αναφορικά με το Σχήμα 3.4 η μέγιστη καθίζηση  $S$  αποδίδεται από το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη  $k_z(r)$ . Όσον αφορά την περίπτωση που το σημείο  $P$  βρίσκεται ακριβώς πάνω από την άκρη της εκσκαφής, τότε υφίσταται μόνο μισή από τη δυνατή επιρροή και επομένως η επιφανειακή καθίζηση είναι ακριβώς ίση με τη μισή της μέγιστης (Σχήμα 3.5). Το σημείο καμπής συμπίπτει με τη θέση για την οποία έχουμε καθίζηση ίση με  $S/2$ . Από παρατηρήσεις που έχουν γίνει στο χώρο εκμετάλλευσης αποδεικνύεται, ότι η θέση για

την οποία έχουμε καθίζηση ίση με  $S/2$  δεν συμπίπτει πάντα με την άκρη της εκσκαφής και συνεπώς χρειάζεται η χρησιμοποίηση ενός συντελεστή διόρθωσης.



Σχήμα 3.5: Συσχετισμός μεταξύ των συναρτήσεων επιρροής και της επιφανειακής καθίζησης σύμφωνα με το Bräuner (1973b) (Πηγή: Whittaker and Reddish, 1989).

Μολαταύτα, σύμφωνα με την αρχή της υπέρθεσης η εκσκαφή μίας περιοχής  $A$  αποφέρει καθίζηση  $s$  σε ένα σημείο της επιφάνειας, η οποία δίνεται από την εξίσωση 3.3.

$$s = \iint_A k_z(r) dA \quad [3.3]$$

Η εξίσωση 3.3 λαμβάνει υπόψη τη γενική παραμορφωσιακή συμπεριφορά του πετρώματος λόγω του τύπου που χρησιμοποιείται για να εκφράσει τη συνάρτηση επιρροής  $k_z(r)$ , ενώ η έκταση και η μορφή της μεταλλευτικής εκσκαφής εμπεριέχεται εντός της περιοχής απόσπασης  $A$ .

Το Σχήμα 3.5 μπορεί να θεωρηθεί σε τρεις διαστάσεις αφού η πλήρης καθίζηση εκφράζεται από τον όγκο που προκύπτει περιστρέφοντας την καμπύλη  $k_z(r)$  γύρω από τον άξονα  $z$ . Για την συνθήκη της ακτίνας του στερεού εκ περιστροφής που αντιστοιχεί στην κρίσιμη ακτίνα  $R$ , το όριο ολοκλήρωσης είναι  $r = R$  όπου η συνάρτηση  $k_z(r)$  παίρνει την τιμή μηδέν (θα έπρεπε η συνάρτηση  $k_z(r)$  να τείνει ασυμπτωτικά προς το

μηδέν, με αποτέλεσμα το όριο ολοκλήρωσης να είναι  $r = \infty$ ), (Whittaker and Reddish, 1989). Έτσι λοιπόν η πλήρης καθίζηση εκφράζεται με μία από τις εξισώσεις 3.4 και 3.5 σύμφωνα με τα παραπάνω:

$$S = 2\pi \int_0^R r k_z(r) dr \quad [3.4]$$

$$S = 2\pi \int_0^\infty r k_z(r) dr \quad [3.5]$$

Οι συναρτήσεις επιρροής μπορούν να προσδιοριστούν από παρατηρούμενες τιμές καθίζησης ( $s$ ), οι οποίες προκύπτουν από μία περιοχή εκσκαφής ( $A$ ). Χρησιμοποιώντας δεδομένα από το χώρο εκμετάλλευσης, η εξίσωση 3.3 μπορεί να επιλυθεί ως προς το  $k_z$  χρησιμοποιώντας αριθμητικές μεθόδους. Από θεωρητικές μελέτες έχει παραχθεί μία μεγάλη γκάμα αναλυτικών συναρτήσεων  $k_z$ , αλλά η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη συνάρτηση επιρροής είναι εκθετική και δίνεται από την εξίσωση 3.6.

$$k_z = \frac{S}{R^2} e^{-\pi(r/R)^2} \quad [3.6]$$

### 3.5 Η συνάρτηση επιρροής του Gauss

Η συνάρτηση επιρροής που χρησιμοποιήθηκε στο πρόγραμμα πρόβλεψης των επιφανειακών καθιζήσεων (SDPS) είναι η συνάρτηση του Gauss (bell-shaped Gaussian function). Η μέθοδος αυτή θεωρεί ότι η συνάρτηση επιρροής για τη διδιάστατη περίπτωση δίνεται από την εξίσωση 3.7 (Agioutantis and Karmis, 2002).

$$g(x, s) = \frac{S_o(x)}{r} \exp \left[ -\pi \frac{(x-s)^2}{r^2} \right] \quad [3.7]$$

Όπου,  $r = h / \tan(\beta)$ : Η ακτίνα επιρροής.

$h$  : Το ύψος των υπερκείμενων στρωμάτων.

$\beta$ : Η γωνία επιρροής.

$s$ : Η συντεταγμένη του σημείου  $P$  στο οποίο θεωρείται η καθίζηση.

$x$  : Η συντεταγμένη του απειροελάχιστου εκσκαπτόμενου τμήματος.

$So(x)$ : Η σύγκλιση της οροφής του απειροελάχιστου εκσκαπτόμενου τμήματος.

Συνεπώς, η καθίζηση σε οποιοδήποτε σημείο  $P(s)$  βάση του παραπάνω μοντέλου δίνεται από την εξίσωση 3.8.

$$S(x, s) = \frac{1}{r} \int_{-\infty}^{+\infty} So(x) \exp \left[ -\pi \frac{(x-s)^2}{r^2} \right] \quad [3.8]$$

Όπου,  $So(x) : m(s) a(x)$

$m(s)$  : Το εκσκαπτόμενο πάχος του κοιτάσματος.

$a(x)$  : Ο συντελεστής καθίζησης.

Έτσι λοιπόν η διατύπωση της συνάρτησης επιρροής μπορεί να εφαρμοστεί για να υπολογίσει επιφανειακές παραμορφώσεις όπως είναι η καθίζηση, η ανηγμένη παραμόρφωση, η κλίση, η καμπύλωση και οι μετατοπίσεις λόγω εκσκαπτικών διεργασιών, τόσο με τη μέθοδο των θαλάμων και στύλων, όσο και με τη μέθοδο των ευθύγραμμων επιμήκων μετώπων. Τα απαιτούμενα δεδομένα για την επίτευξη του στόχου είναι:

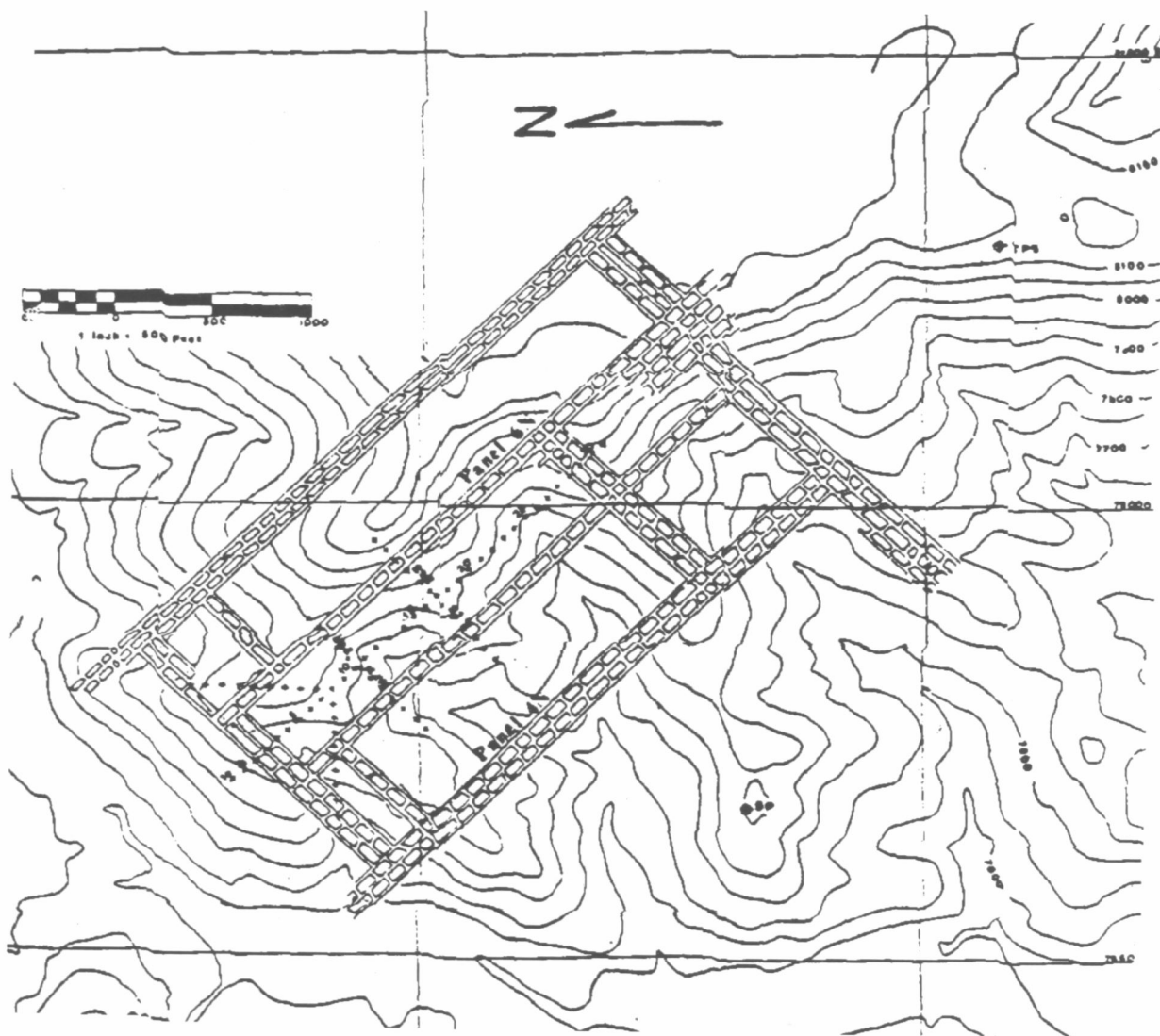
- ✓ Η γεωμετρία της περιοχής εκμετάλλευσης καθώς και οι σχετικές ιδιότητες όπως είναι το πάχος της εκσκαφής και ο συντελεστής καθίζησης.
- ✓ Οι συντεταγμένες των σημείων της επιφάνειας, στα οποία αναφέρεται η πρόβλεψη των διαφόρων δεικτών παραμόρφωσης.
- ✓ Οι εμπειρικοί παράμετροι που αριθμητικά αντιπροσωπεύουν τη συμπεριφορά των υπερκείμενων πετρωμάτων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### 4.1 Εφαρμογή 1

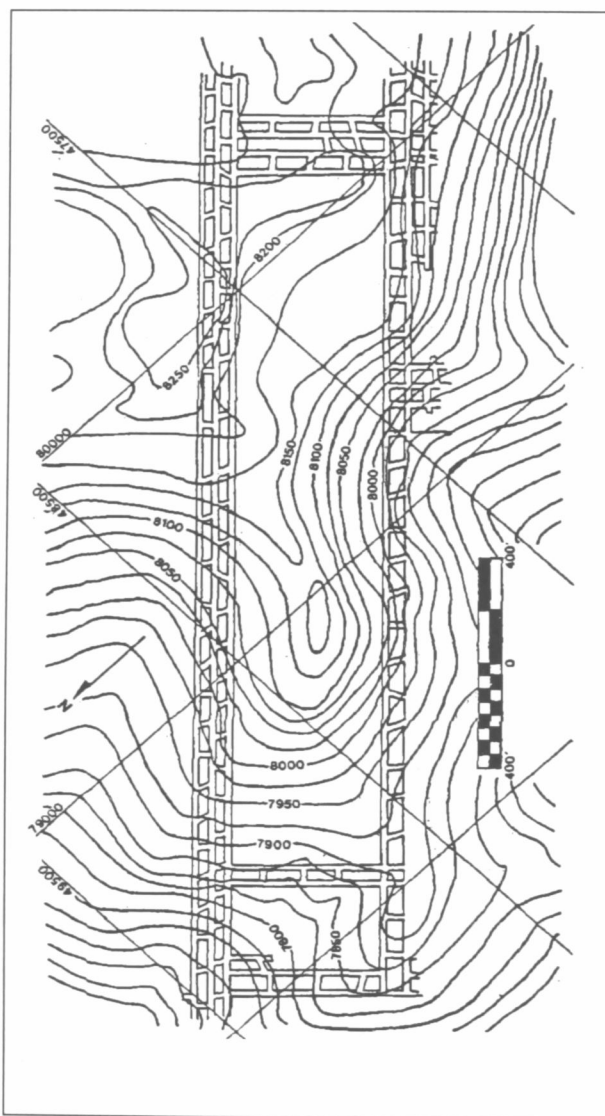
#### 4.1.1 Γενικά στοιχεία

Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν έχουν ληφθεί από το συγκρότημα ανθρακωρυχείων του York Canyon, στην περιοχή Raton του New Mexico, USA κατά τη διεκπεραίωση μιας βραχομηχανικής μελέτης που έγινε για λογαριασμό της εταιρείας Keizer Steel (Gentry and Abel, 1977). Η εκμετάλλευση του ανθρακωρυχείου έγινε με τη μέθοδο των ευθύγραμμων επιμήκων μετώπων. Στο Σχήμα 4.1 φαίνεται η υπό εξέταση περιοχή εκμετάλλευσης.

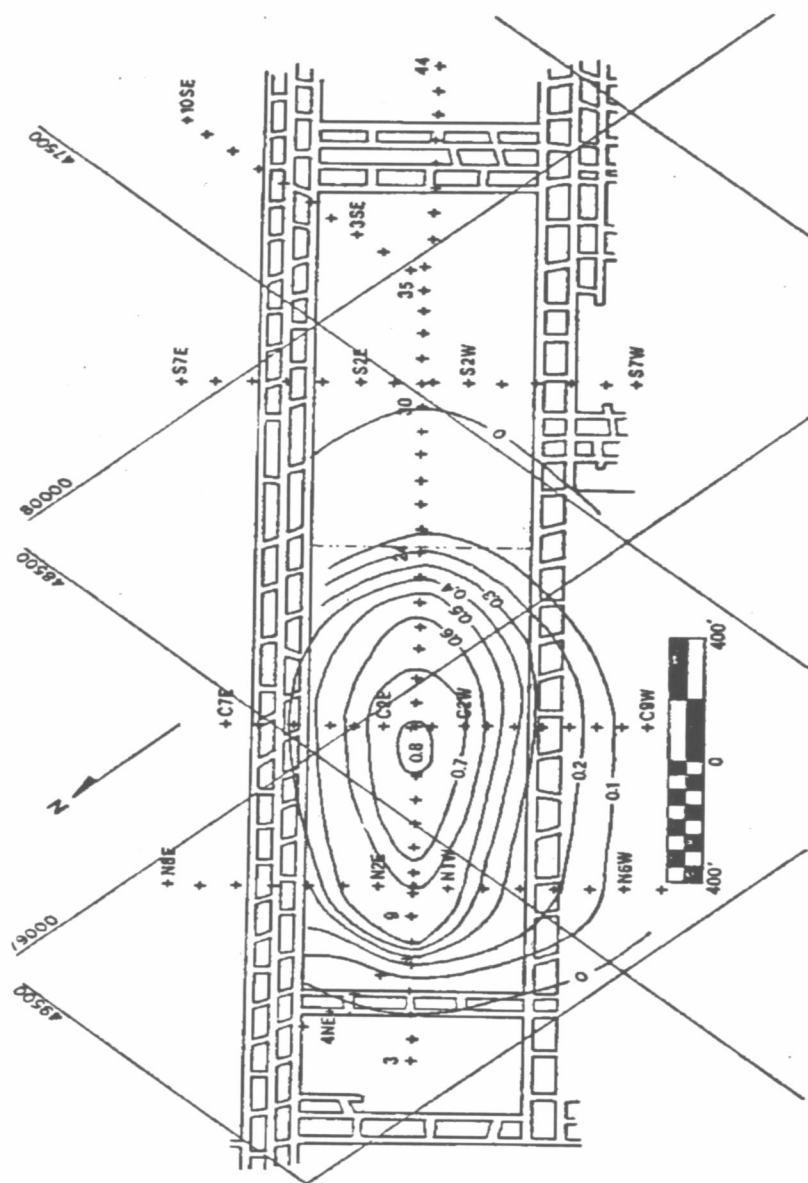


Σχήμα 4.1: Γενική τοπογραφική απεικόνιση της υπό μελέτης περιοχής Panel 6N (Gentry and Abel, 1977).

Παρατηρούνται τρεις περιοχές εκμετάλλευσης (Panel 4N, 5N, 6N). Η μελέτη εστιάζεται στην περιοχή εκμετάλλευσης Panel 6N. Η περιοχή εκμετάλλευσης, όπως άλλωστε φαίνεται, είναι ορθογώνιου σχήματος και οι διαστάσεις της είναι γύρω στα 530 ft σε πλάτος και περί τα 2600 ft σε μήκος (162m x 792m). Τα Σχήματα 4.2 και 4.3 παρουσιάζουν τις τοπογραφικές ισοψείς καμπύλες και τις καμπύλες καθίζησης με τα σημεία μέτρησης των επιφανειακών παραμορφώσεων αντίστοιχα.



Σχήμα 4.2: Τοπογραφική απεικόνιση της περιοχής εκμετάλλευσης για το Panel 6N (Gentry and Abel, 1977).



Σχήμα 4.3: Καμπύλες καθίζησης και σημεία μέτρησης των επιφανειακών παραμορφώσεων για το Panel 6N (Gentry and Abel, 1977).

#### 4.1.2 Στάδια της μελέτης

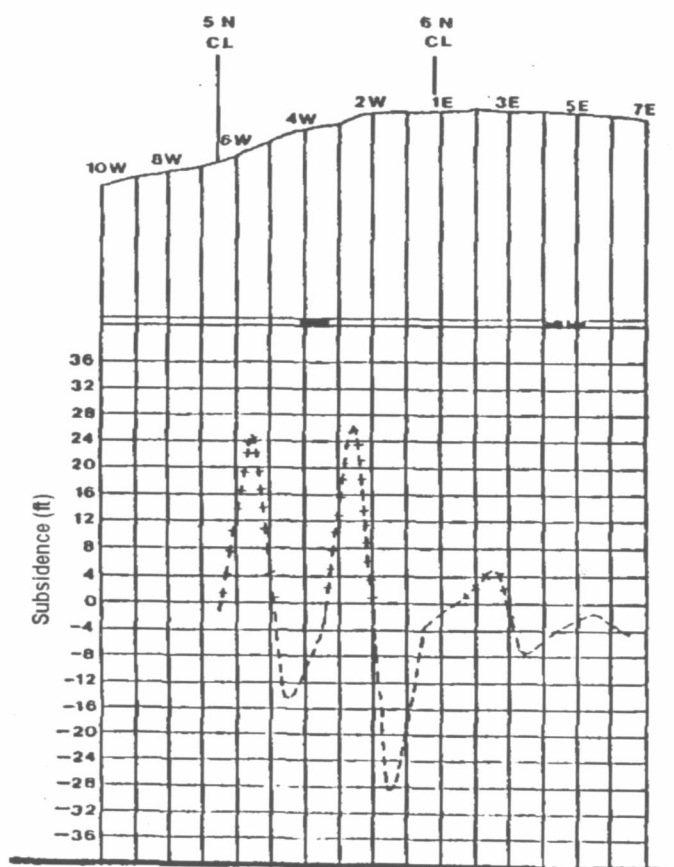
Καταρχήν πραγματοποιήθηκε ψηφιοποίηση των Σχημάτων 4.2 και 4.3, δηλαδή τόσο της τοπογραφικής απεικόνισης, όσο και των καμπυλών της κατακόρυφης καθίζησης και των σημείων μέτρησης πάνω από την περιοχή εκμετάλλευσης, στον ψηφιοποιητή του εργαστηρίου Τεχνικής Γεωλογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης. Έτσι τα δεδομένα με την



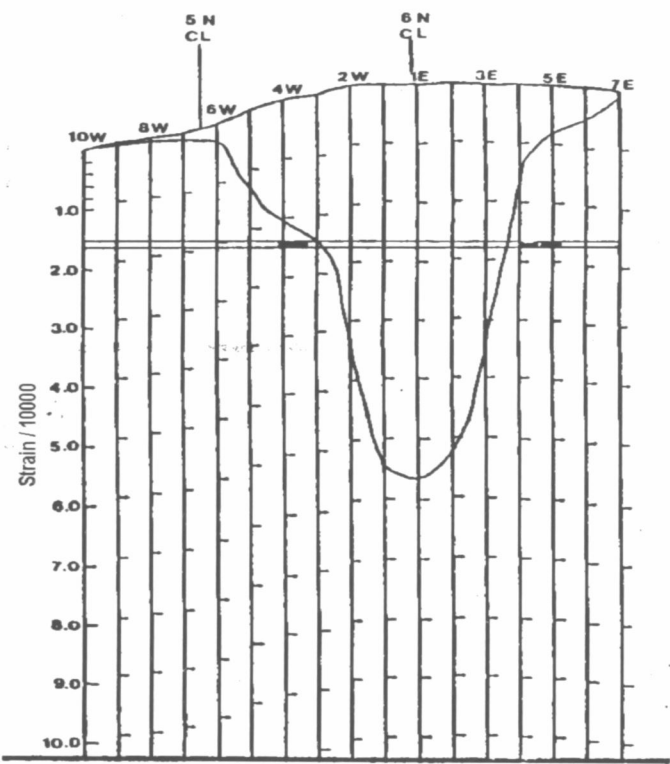
ψηφιακή πλέον μορφή τους εισήχθησαν στο πρόγραμμα AutoCAD 2000. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε εισαγωγή, τόσο του σχεδίου της εκμετάλλευσης, όσο και των σημείων μέτρησης των επιφανειακών καθιζήσεων από το AutoCAD 2000 στο πρόγραμμα πρόβλεψης των επιφανειακών καθιζήσεων (SDPS). Εξετάστηκαν δύο γραμμές μελέτης:

- ✓ Η βόρεια εγκάρσια γραμμή μελέτης N6E-N6W
- ✓ Η κεντρική γραμμή μελέτης C7-C15, παράλληλη προς τον άξονα προχώρησης της εκμετάλλευσης

Οι πραγματικές τιμές της κατακόρυφης καθίζησης και της παραμόρφωσης των σημείων πρόβλεψης, οι οποίες μετρήθηκαν με τοπογραφικές μεθόδους (Gentry and Abel, 1977) στην επιφάνεια φαίνονται στα Σχήματα 4.4 και 4.5:



Σχήμα 4.4: Μετρημένες τιμές της κατακόρυφης καθίζησης στην βόρεια εγκάρσια γραμμή μελέτης N6E-N6W (Gentry and Abel, 1977).



Σχήμα 4.5: Μετρημένες τιμές της παραμόρφωσης στη βόρεια εγκάρσια γραμμή μελέτης N6E-N6W (Gentry and Abel, 1977).

Ανάλογες μετρήσεις υπάρχουν και για την τοπογραφική γραμμή C7-C15. Από την επεξεργασία αυτών των μετρήσεων προκύπτουν οι πίνακες 4.1 και 4.2 για κάθε μία τοπογραφική γραμμή μελέτης.

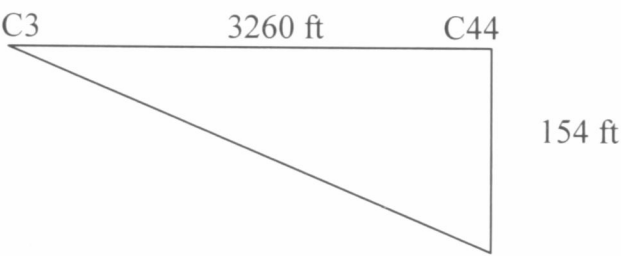
Πίνακας 4.1: Μετρημένα μεγέθη πάνω στη γραμμή μελέτης N6E-N6W

Σημεία πρόβλεψης	N6E	N5E	N4E	N3E	N2E	N1E
Κατακόρυφη καθίζηση (ft)	0.56	0.81	1.63	4.41	6.22	6.67
Αν. Παραμόρφωση ( $\times 10^{-3}$ )	-2.92	-2.19	-5.475	-1.82	2.92	-1.46
Υψόμετρο (ft)	7949	7963	7980.5	7987.5	7987	7986
Σημεία πρόβλεψης	N1W	N2W	N3W	N4W	N5W	N6W
Κατακόρυφη καθίζηση (ft)	6.44	4.44	2.48	2.07	1.33	0.3
Αν. Παραμόρφωση ( $\times 10^{-3}$ )	-19.3	-2	13.87	-9.85	4	12.77
Υψόμετρο (ft)	7979	7964	7944	7924	7903	7875

Πίνακας 4.2: Μετρημένα μεγέθη πάνω στη γραμμή μελέτης C7-C15

Σημεία πρόβλεψης	C7	C8	C9	C10	C11
Κατακόρυφη καθίζηση (ft)	2.15	5.7	6.48	6.64	7.26
Αν. Παραμόρφωση (x 10 <sup>-3</sup> )	-5.11	-13.14	-10.95	-9.49	-8.39
Υψόμετρο (ft)	7900	7928	7953	7979	8000
Σημεία πρόβλεψης	C12	C13	C14	C15	
Κατακόρυφη καθίζηση (ft)	8.6	8.15	7.81	7.78	
Αν. Παραμόρφωση (x 10 <sup>-3</sup> )	-2.55	3.65	8.76	10.59	
Υψόμετρο (ft)	8035	8071	8105	8121	

Η απόσταση μεταξύ των ακριανών σημείων πρόβλεψης της κεντρικής γραμμής μελέτης (C3-C48) είναι περίπου 3260 ft. Το τελευταίο βορειοδυτικό σημείο πρόβλεψης (C3) έχει υψόμετρο 7825 ft, ενώ τα υπερκείμενα έχουν βάθος 450 ft στο σημείο αυτό. Συνεπώς, στο συγκεκριμένο σημείο το βάθος της εκμετάλλευσης είναι περί τα 7375 ft και προκύπτει από την αφαίρεση μεταξύ του υψομέτρου και του βάθους των υπερκειμένων. Ομοίως, το τελευταίο βορειοανατολικό σημείο πρόβλεψης (C44) έχει υψόμετρο 8225 ft, ενώ το βάθος των υπερκειμένων στο σημείο αυτό είναι 696 ft. Επομένως, το βάθος της εκμετάλλευσης στο συγκεκριμένο σημείο είναι 7529 ft. Η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των δύο αυτών σημείων είναι (7529-7375)=154 ft.



Σχήμα 4.6: Κλίση της περιοχής εκμετάλλευσης Panel 6N.

Από το Σχήμα 4.6 παρατηρείται ότι η κλίση της περιοχής εκμετάλλευσης είναι περίπου 5%, αρκετά μικρή γεγονός που επιτρέπει την οριζόντια θεώρηση της περιοχής εκμετάλλευσης σε ένα μέσο βάθος της τάξης των 7445.5 ft, χωρίς να υπάρχει σημαντικό σφάλμα. Το πάχος του κοιτάσματος είναι γύρω στα 10 ft (3m).

## 4.2 Παραμετρική ανάλυση

Η ενότητα αυτή έχει ως κύριο στόχο την βαθμονόμηση του προγράμματος πρόβλεψης επιφανειακών καθιζήσεων (SDPS), ώστε στη συνέχεια το πρόγραμμα αυτό να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη όλων των τύπων των επιφανειακών καθιζήσεων (κατακόρυφη μετατόπιση, οριζόντια μετατόπιση, ανηγμένη παραμόρφωση, κλπ) σε παρόμοιες περιοχές, σαν την υπό εξέταση περιοχή. Οι παράμετροι βαθμονόμησης είναι οι ακόλουθες:

✓ **Συντελεστής καθιζήσεων (subsidence factor).**

Ο συντελεστής αυτός μπορεί να μεταβάλλεται από 0 έως 100 και το πρόγραμμα βαθμονόμησης έχει τη δυνατότητα να εστιάζει σε οποιοδήποτε εύρος μεταξύ των ακραίων τιμών.

✓ **Εφαπτομένη της γωνίας επιρροής (tangent of influence angle).**

Επίσης το πρόγραμμα έχει τη δυνατότητα να ερευνήσει μεγάλο εύρος τιμών για τη γωνία αυτή. Οι συνηθέστερες τιμές της γωνίας αυτής κυμαίνονται μεταξύ 60° και 72°.

✓ **Μετατόπιση του σημείου καμψής της επιφανειακής καμπύλης καθίζησης.**

Η θέση του σημείου καμψής σε σχέση με το πλευρό της εκμετάλλευσης (rib) ονομάζεται πλευρική επίδραση (edge effect). Στην περίπτωση αυτή, ο χρήστης πρέπει να επιλέξει σε ποιες από τις εξωτερικές πλευρές του τμήματος εκσκαφής θεωρείται ότι εφαρμόζεται πλευρική επίδραση και επιλέγοντας αυτές το πρόγραμμα θα διερευνήσει μόνο τις συγκεκριμένες πλευρές. Συνήθως, στις περιπτώσεις διαδοχικών επιμήκων μετώπων, οι ενδιαμέσοι στύλοι θεωρούνται ότι καταρρέουν και επομένως δεν λογίζεται πλευρική επίδραση προς τις πλευρές των ενδιάμεσων στύλων. Λογίζεται όμως πλευρική επίδραση, προς τις πλευρές των σταθερών στύλων ασφαλείας στην αρχή και στο τέλος των τμημάτων εκσκαφής, καθώς και στις πλευρές των τμημάτων, οι οποίες γειτονεύουν με μη εξορυγμένο υλικό.

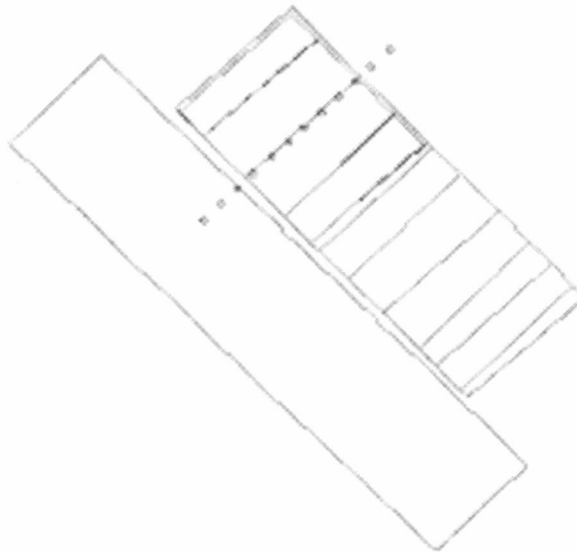
Η παραμετρική ανάλυση στο εν λόγω τμήμα εκμετάλλευσης, έγινε για δύο γραμμές μέτρησης επιφανειακών παραμορφώσεων. Μία βόρεια εγκάρσια με χαρακτηριστικά N6E-N6W και μία κατά μήκος του τμήματος εκμετάλλευσης με χαρακτηριστικά C7-C27. Για την παραμετρική ανάλυση και των δύο γραμμών δόθηκαν τα παρακάτω εύρη μεταβολής των παραμέτρων βαθμονόμησης:

- ✓ Εφαπτομένη της γωνίας επιρροής: 2-4 με βήμα 0.1
- ✓ Συντελεστής καθίζησης: 10-80 με βήμα 5
- ✓ Πλευρική επίδραση: 0-200 με βήμα 5

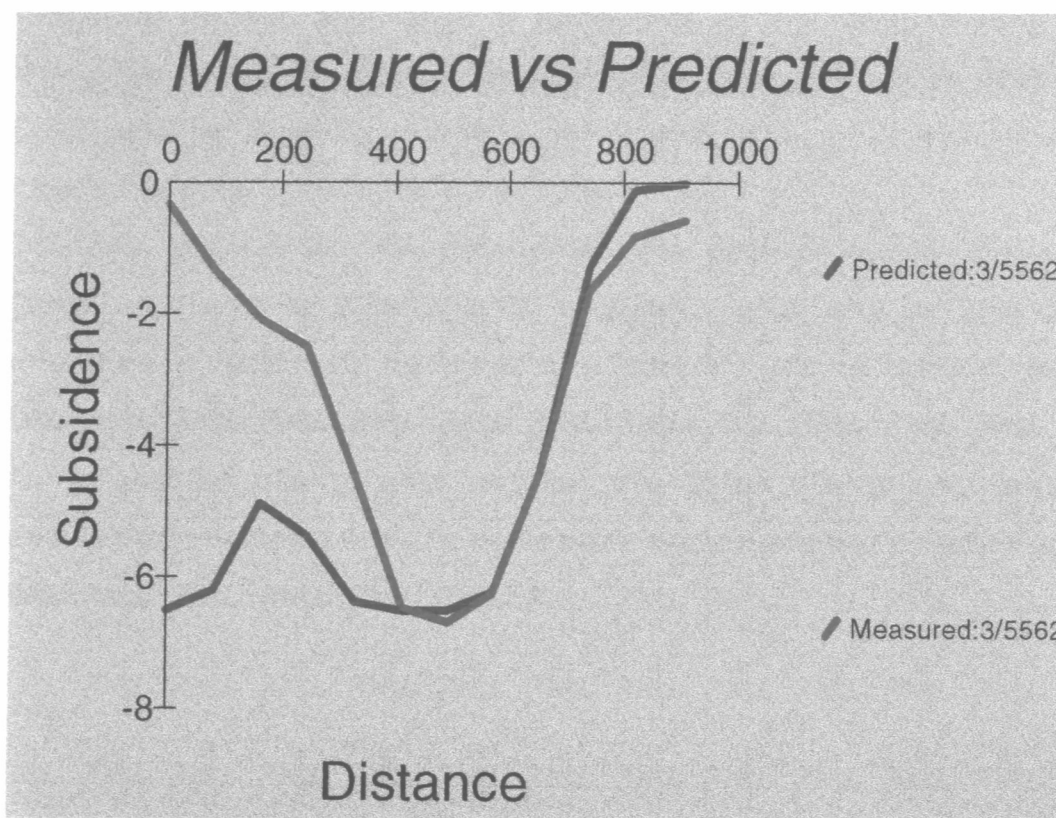
Στην συνέχεια ακολουθούν οι επιμέρους παρατηρήσεις, για τις διαδικασίες βαθμονόμησης των δύο παραπάνω τομών.

#### 4.2.1 Βόρεια εγκάρσια γραμμή μελέτης N6E-N6W

Στο Σχήμα 4.7 παρουσιάζονται οι πλευρές του Panel 6N, στις οποίες θεωρείται ότι υφίσταται πλευρική επίδραση σε συνδυασμό με την παρουσία και τη συμμετοχή του Panel 5N. Παρατηρείται, ότι η πλευρική επίδραση σε μία από τις δύο πλευρές δεν εμφανίζεται σε όλο το μήκος της πλευράς. Αυτό γίνεται, διότι για τα δεδομένα σημεία πρόβλεψης αρκεί μόνο η ρύθμιση της πλευρικής επίδρασης στα υποφαινόμενα τμήματα.



Σχήμα 4.7: Οι πλευρές του Panel 6N που επηρεάζονται από την πλευρική επίδραση με την παρουσία του Panel 5N.



Σχήμα 4.8: Σύγκριση μεταξύ μετρημένων και προβλεπόμενων τιμών καθίζησης κατά μήκος της γραμμής μελέτης N6E-N6W.

Στο Σχήμα 4.8 παρουσιάζεται σύγκριση μεταξύ μετρημένων και προβλεπόμενων τιμών κατά μήκος της γραμμής μελέτης. Το πρώτο σημείο στο διάγραμμα αυτό είναι το πρώτο νοτιοδυτικό σημείο του Σχήματος 4.7. Η προβλεπόμενη καμπύλη καθίζησης, που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.8 είναι η θεωρητικά καλύτερη καμπύλη προσέγγισης των μετρημένων τιμών επιφανειακής καθίζησης, αλλά εν τούτοις παρουσιάζει μεγάλο συνολικό σφάλμα της τάξεως του 31.6.

Από την παραμετρική ανάλυση προέκυψαν, ότι οι καταρχήν παράμετροι βαθμονόμησης είναι οι ακόλουθες:

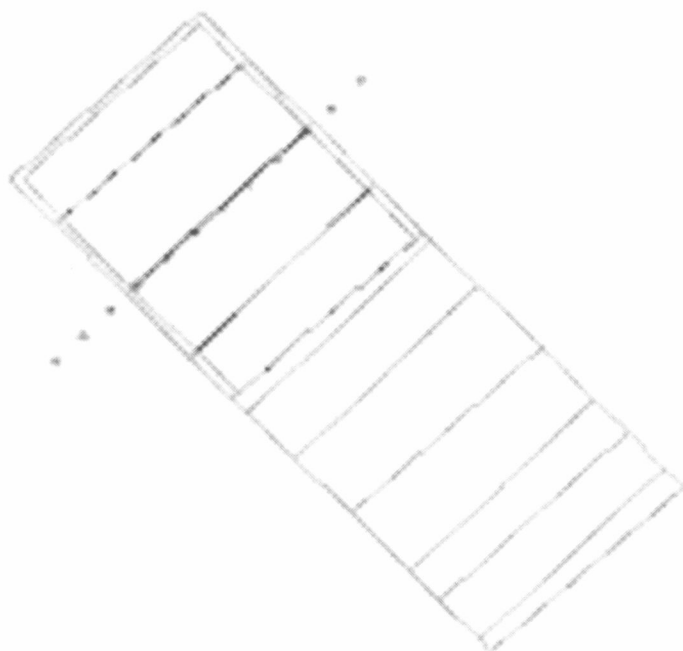
Πίνακας 4.3: Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων βαθμονόμησης

Γωνία επιρροής	73.14°
Εφαπτομένη της γωνίας επιρροής	3.30
Συντελεστής καθίζησης	65%
Πλευρική επίδραση (ft)	85
Συνολικό σφάλμα	31.56

Παρατηρείται, ότι στο δεξί τμήμα η πραγματική με την προβλεπόμενη καμπύλη καθίζησης ταυτίζονται, γεγονός που αποδεικνύει ότι έχουν γίνει σωστές προβλέψεις σ' αυτό το τμήμα της καμπύλης. Αντίθετα, στο αριστερό τμήμα, οι προβλεπόμενες τιμές καθίζησης είναι πολύ μεγαλύτερες από τις πραγματικές.

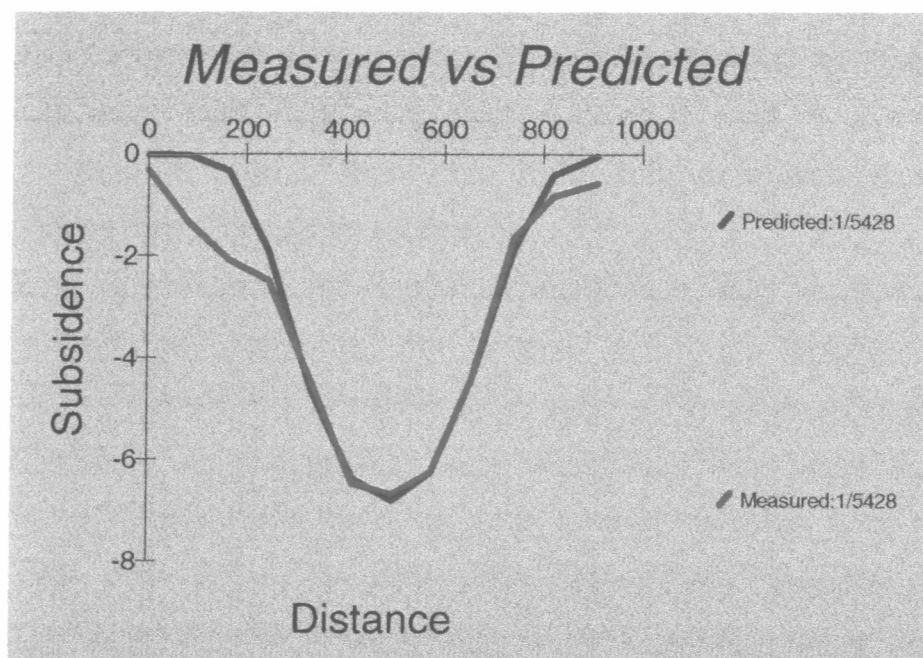
Λόγω του ότι, δεν υπάρχει ταύτιση στο αριστερό τμήμα των καμπυλών πρόβλεψης και μέτρησης θεωρήθηκε ότι η αρχική γραμμή μέτρησης μπορεί να μην αντιστοιχούσε σε μηδενικές καθιζήσεις στο Panel 5N. Με το σκεπτικό αυτό έγινε επανάληψη της διαδικασίας βαθμονόμησης αναιρώντας την επίδραση του Panel 5N.

Το μοντέλο που τρέχτηκε φαίνεται στο Σχήμα 4.9 και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.10. Τα συνοπτικά αποτελέσματα από τη βαθμονόμηση του μοντέλου παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.4.



Σχήμα 4.9: Οι πλευρές του Panel 6N που επηρεάζονται από την πλευρική επίδραση, χωρίς την παρουσία του Panel 5N.

Στο Σχήμα 4.9 παρουσιάζονται οι πλευρές του Panel 6N, οι οποίες υφίστανται πλευρική επίδραση, χωρίς όμως την παρουσία και την ενεργό συμμετοχή του Panel 5N στην πρόβλεψη των καθιζήσεων.



Σχήμα 4.10: Σύγκριση μεταξύ μετρημένων και προβλεπόμενων τιμών καθίζησης κατά μήκος της γραμμής μελέτης N6E-N6W χωρίς την παρουσία του Panel 5N.

Πίνακας 4.4: Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων βαθμονόμησης

Γωνία επιρροής	67.38°
Εφαπτομένη της γωνίας επιρροής	2.40
Συντελεστής καθίζησης	70%
Πλευρική επίδραση (ft)	85
Συνολικό σφάλμα	11.15

Από το Σχήμα 4.10 παρατηρείται, ότι τόσο στο δεξί τμήμα, όσο και σε μεγάλο ποσοστό του αριστερού τμήματος οι προβλεπόμενες τιμές καθίζησης συμπίπτουν με τις πραγματικές τιμές. Απλά, υπάρχει ένα τμήμα στα αριστερά της καμπύλης καθίζησης, όπου οι μετρημένες τιμές καθίζησης είναι μεγαλύτερες από αυτές που προβλέπονται από το πρόγραμμα (SDPS). Από τη σύγκριση των καμπυλών καθίζησης των Σχημάτων 4.8 και 4.10, όπου στο ένα υπάρχει και στο άλλο δεν υπάρχει αντίστοιχα η παρουσία του Panel 5N παρατηρείται, ότι υπάρχει καλύτερη ταύτιση μεταξύ των μετρημένων και των προβλεπόμενων τιμών καθίζησης στην δεύτερη περίπτωση, όπου δεν θεωρείται η

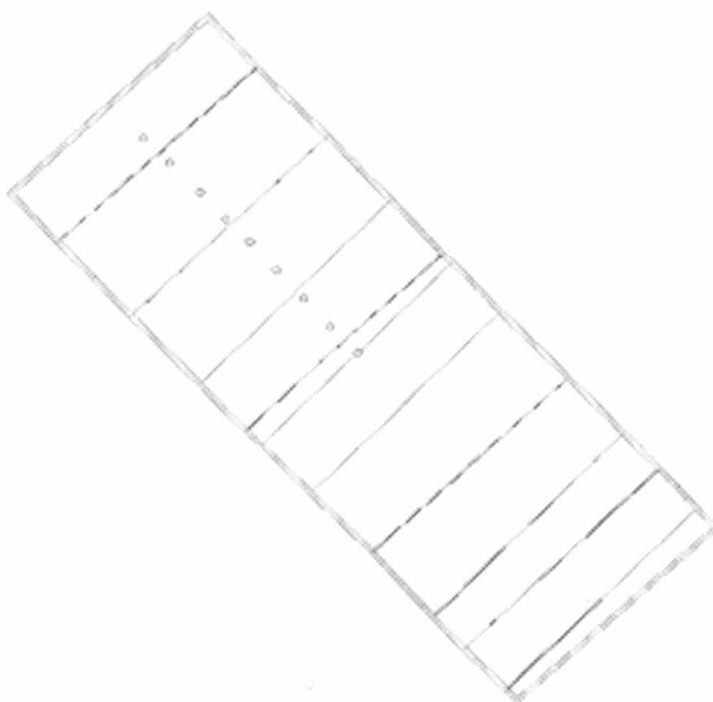


παρουσία του Panel 5N. Επίσης, το συνολικό σφάλμα μειώνεται από 31.56 σε 11.15 δηλαδή κατά 65% σε αυτή την περίπτωση. Προφανώς επομένως, έχει ολοκληρωθεί ένα πολύ μεγάλο τμήμα της καθίζησης εξαιτίας του Panel 5N κατά την εξέταση του Panel 6N, με αποτέλεσμα το Panel 5N να μην έχει σχεδόν καθόλου συμμετοχή στην πρόβλεψη των καθιζήσεων στην εξεταζόμενη εφαρμογή.

Τέλος, η απόκλιση που παρατηρείται μεταξύ των μετρημένων και των προβλεπόμενων τιμών καθίζησης, στο αριστερό τμήμα στο Σχήμα 4.10 οφείλεται πιθανότατα στο γεγονός, ότι τα σημεία πρόβλεψης στο τμήμα αυτό εξακολουθούν να κινούνται, εφόσον οι μετρημένες τιμές καθίζησης είναι μεγαλύτερες από τις προβλεπόμενες. Επιπρόσθετοι λόγοι για τους οποίους συμβαίνει αυτή η κατάσταση, πιθανώς να είναι η μη ψηφιοποιημένη μορφή των δεδομένων, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν κατά την εφαρμογή της εν λόγω μελέτης, καθώς και η οριζόντια θεώρηση του κοιτάσματος, παρόλο που είχε μία κλίση της τάξης του 5%.

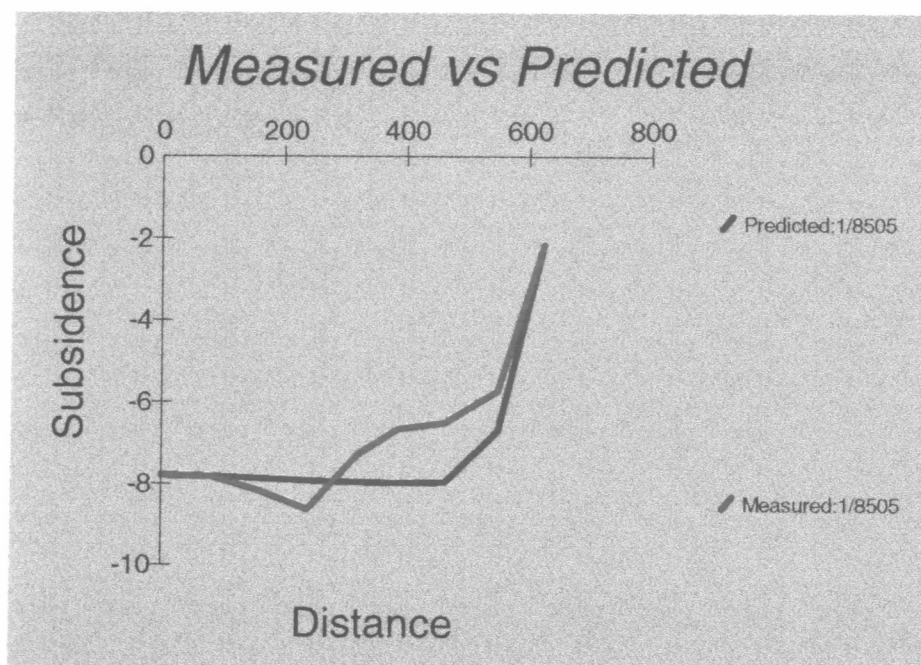
#### 4.2.2 Κεντρική γραμμή μελέτης C7-C15

Στο Σχήμα 4.11 φαίνονται το Panel 6N και οι πλευρές που υφίστανται πλευρική επίδραση. Προφανώς από τα προηγούμενα δεδομένα, κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης της συγκεκριμένης γραμμής μελέτης η επίδραση του Panel 5N θα αναιρεθεί.



Σχήμα 4.11: Οι πλευρές του Panel 6N που υφίστανται πλευρική επίδραση κατά τη βαθμονόμηση της κεντρικής γραμμής μελέτης C7-C15.

Το Σχήμα 4.12 παρουσιάζει τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη σύγκριση μεταξύ των μετρημένων και των προβλεπόμενων τιμών καθίζησης, ενώ τα συνοπτικά αποτελέσματα από τη βαθμονόμηση του μοντέλου του Σχήματος 4.11 παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.5.



Σχήμα 4.12: Σύγκριση μεταξύ της βέλτιστης καμπύλης πρόβλεψης κατακόρυφης καθίζησης με την πραγματική καμπύλη καθίζησης.

Πίνακας 4.5: Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων βαθμονόμησης.

Γωνία επιρροής	75.96°
Εφαπτομένη της γωνίας επιρροής	4.00
Συντελεστής καθίζησης	80%
Πλευρική επίδραση (ft)	130
Συνολικό σφάλμα	22.3

Το πρώτο σημείο στο διάγραμμα του Σχήματος 4.12 είναι το πρώτο νοτιοανατολικό σημείο του Σχήματος 4.11. Στο Σχήμα 4.12 φαίνεται, ότι οι προβλεπόμενες καμπύλες καθίζησης δεν ταυτίζονται πλήρως με τις πραγματικές, αν και στα ακριανά σημεία της γραμμής μελέτης παρατηρείται μία ταύτιση. Προφανώς, οι λόγοι για την ασυμφωνία αυτή να οφείλονται, αφενός στη μη ψηφιοποιημένη μορφή των δεδομένων που

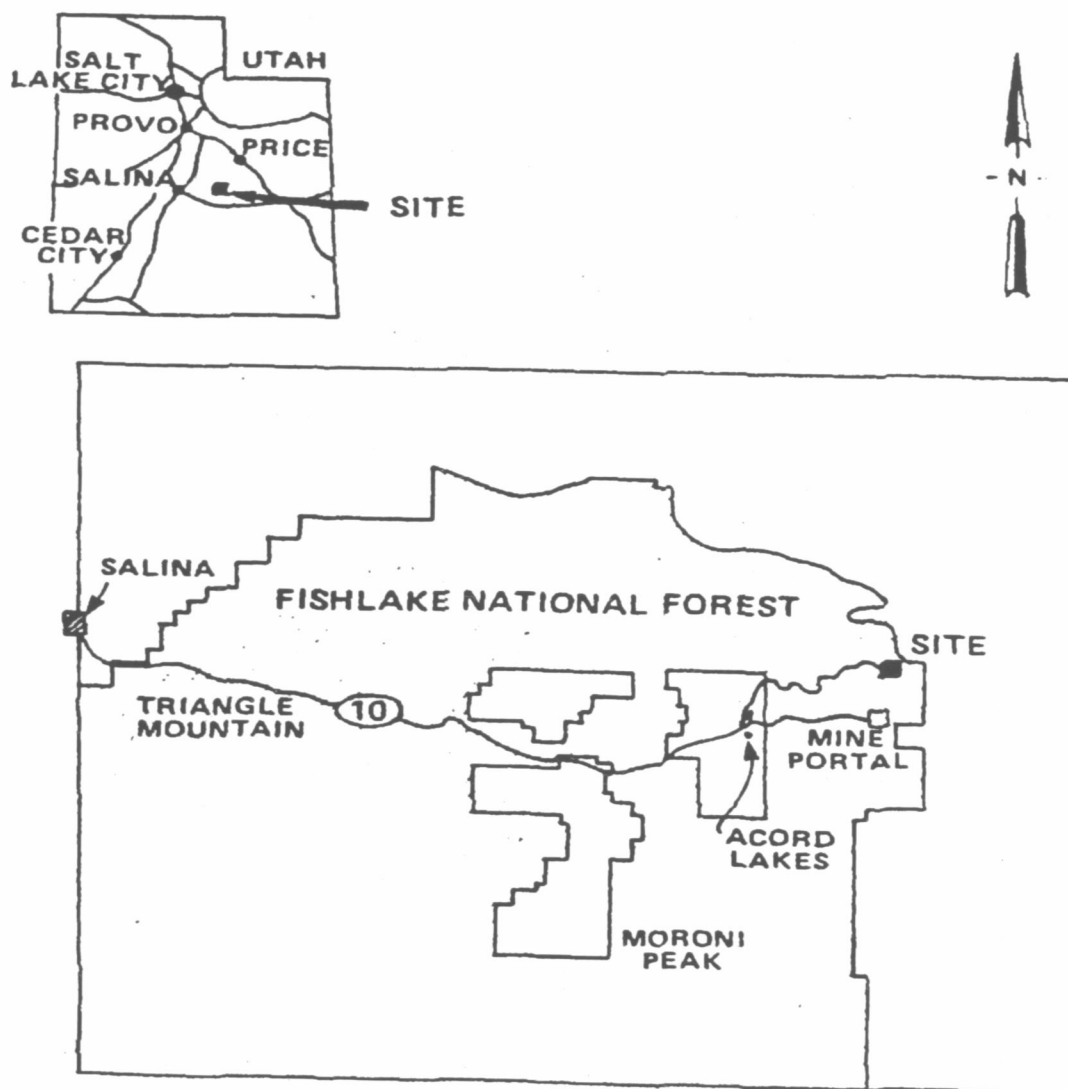
χρησιμοποιήθηκαν κατά την εφαρμογή της εν λόγω μελέτης, και αφετέρου στην οριζόντια θεώρηση του κοιτάσματος, παρόλο που είχε μία κλίση της τάξης του 5%. Επίσης, η ασυνέπεια αυτή μεταξύ των πραγματικών μετρήσεων και των προβλεπόμενων τιμών της κατακόρυφης καθίζησης μπορεί να οφείλεται σε τοπογραφικό λάθος, σε ασταθή σημεία αναφοράς καθώς και σε τοπικούς παράγοντες, μη σχετιζόμενους με τις υπόγειες εκσκαφές, όπως η βαθμιαία παραμόρφωση των αποσαρθρωμένων πετρωμάτων, οι κατολισθήσεις λόγω βροχής κ.α.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### 5.1 Εφαρμογή 2

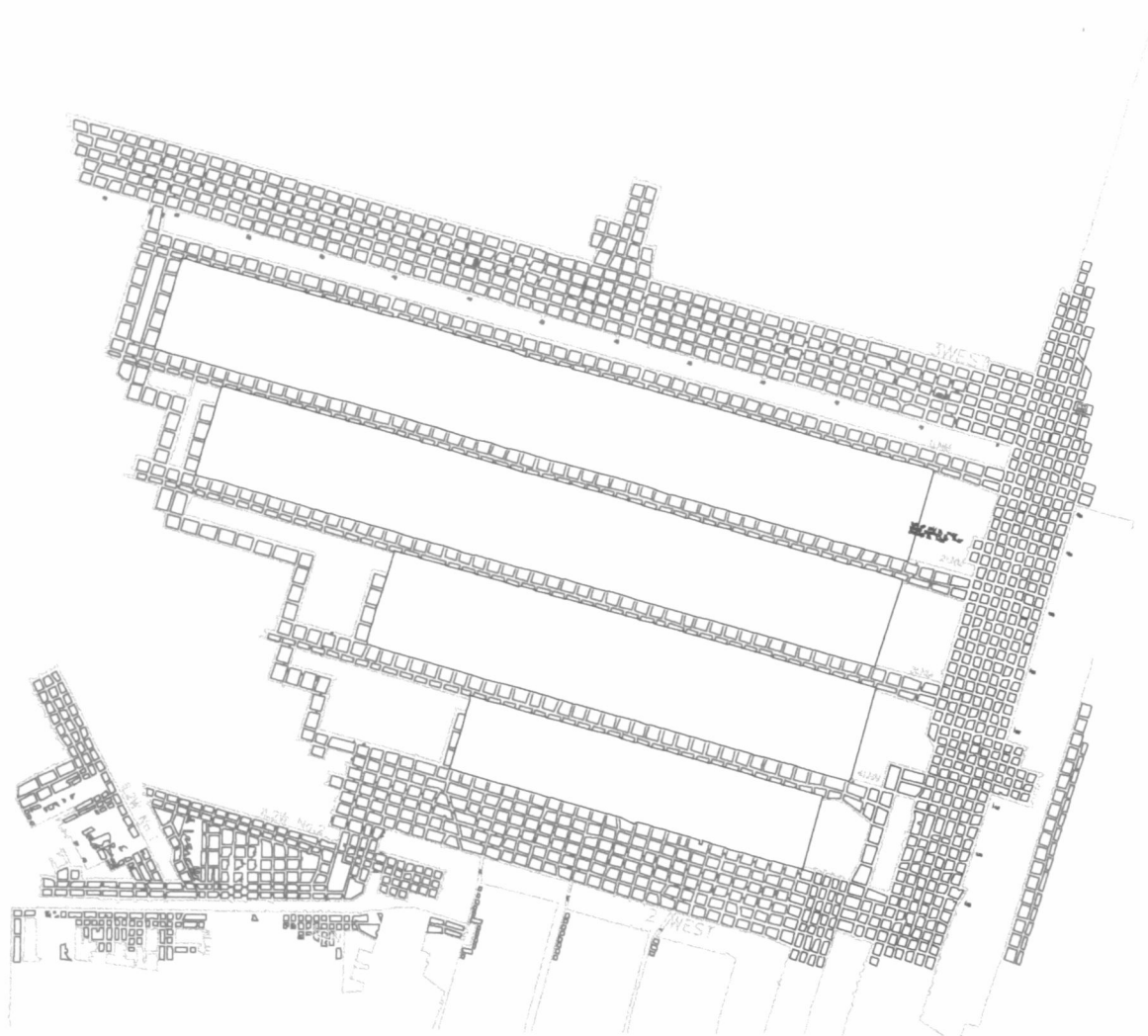
#### 5.1.1 Γενικά στοιχεία

Η εν λόγω μελέτη έχει πραγματοποιηθεί στο ανθρακωρυχείο No.1 Sufco, που βρίσκεται κοντά στην πόλη Salina, στην πολιτεία της Utah (Γιούτα). Στο Σχήμα 5.1 φαίνεται το ανθρακωρυχείο No.1 Sufco.



Σχήμα 5.1: Τοπογραφικός χάρτης του ανθρακωρυχείου No.1 Sufco.

Στο Σχήμα 5.2 παρουσιάζεται η υπό μελέτη περιοχή εκμετάλλευσης.



Σχήμα 5.2: Τοπογραφική απεικόνιση της υπό μελέτης περιοχής εκμετάλλευσης (Panels 1LNM, 2LNM, 3LNM, 4LNM).

Η εκμετάλλευση του ανθρακωρυχείου έγινε με τη μέθοδο των επιμήκων μετώπων. Παρατηρούνται τέσσερις διαφορετικές περιοχές εκμετάλλευσης (Panels 1LNM, 2LNM, 3LNM, 4LNM). Οι περιοχές αυτές είναι ορθογώνιου σχήματος και οι μέσες διαστάσεις τους, όπως προέκυψαν από το Autocad 2000, φαίνονται στον πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1: Μέσες διαστάσεις των περιοχών εκμετάλλευσης.

Panel	1LNM	2LNM	3LNM	4LNM
Μήκος (ft)	6139	5558	3923	2869
Πλάτος (ft)	767	748	787	613

Το μέσο υψόμετρο της επιφάνειας κυμαίνεται γύρω στα 7425 ft (2263m). Στην επιφάνεια του εδάφους υπάρχει φράγμα και επομένως η επιφάνεια του εδάφους καλύπτεται από νερό. Το μέσο υψόμετρο της επιφάνειας του νερού είναι 7432 ft (2265m).

### 5.1.2 Στάδια της μελέτης

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν είχαν ψηφιακή μορφή και ειδικότερα αποτελούσαν σχέδια του Autocad 2000. Τα σχέδια αυτά περιελάμβαναν το ανθρακωρυχείο No.1 Sufco, το υψόμετρο των υπερκειμένων, το πάχος του κοιτάσματος στις περιοχές εκμετάλλευσης καθώς και τις μετρημένες καθιζήσεις από το έτος 1993 έως το έτος 2000. Στην παρούσα εφαρμογή χρησιμοποιήθηκαν οι καθιζήσεις του έτους 2000 (του τελευταίου έτους, στο οποίο μετρήθηκαν οι καθιζήσεις). Στη συνέχεια ορίστηκαν τρεις γραμμές μελέτης, η Tomi 1, η Tomi 2, και η Tomi 3, με τα σημεία τομής των καμπυλών καθίζησης με τις ισουψείς των υπερκειμένων να αποτελούν τα σημεία πρόβλεψης των δεικτών παραμόρφωσης. Με τη βοήθεια του Autocad 2000 προέκυψαν οι πίνακες 5.2, 5.3 και 5.4 για κάθε μία γραμμή μελέτης.

Πίνακας 5.2: Μετρημένα μεγέθη πάνω στη γραμμή μελέτης Tomi 1.

Σημεία πρόβλεψης	1	2	3	4	5	6	7
Κατακόρυφη καθίζηση (ft)	1	2	3	3	4	4	4
Υψόμετρο υπερκειμένων (ft)	1600	1500	1500	1600	1600	1700	1600
Σημεία πρόβλεψης	8	9	10	11	12	13	14
Κατακόρυφη καθίζηση (ft)	4	3	4	4	3	2	2
Υψόμετρο υπερκειμένων (ft)	1500	1500	1500	1500	1500	1400	1300
Σημεία πρόβλεψης	15	16	17	18	19	20	21
Κατακόρυφη καθίζηση (ft)	3	2	1	2	1	1	1
Υψόμετρο υπερκειμένων (ft)	1200	1200	1200	1100	1100	1100	1100

Πίνακας 5.3: Μετρημένα μεγέθη πάνω στη γραμμή μελέτης Tomi 2.

Σημεία πρόβλεψης	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Κατακόρυφη καθίζηση (ft)	1	2	3	3	4	4	3	2	2
Υψόμετρο υπερκείμενων (ft)	1400	1400	1400	1400	1500	1600	1700	1800	1800
Σημεία πρόβλεψης	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Κατακόρυφη καθίζηση (ft)	2	2	3	2	3	2	2	1	1
Υψόμετρο υπερκείμενων (ft)	1600	1500	1400	1500	1400	1400	1300	1200	1000

Πίνακας 5.4: Μετρημένα μεγέθη πάνω στη γραμμή μελέτης Tomi 3.

Σημεία πρόβλεψης	1	2	3	4	5	6	7	8
Κατακόρυφη καθίζηση (ft)	2	4	5	4	3	5	4	4
Υψόμετρο υπερκείμενων (ft)	1500	1400	1500	1400	1400	1500	1500	1500
Σημεία πρόβλεψης	9	10	11	12	13	14	15	
Κατακόρυφη καθίζηση (ft)	3	3	3	3	4	2	2	
Υψόμετρο υπερκείμενων (ft)	1300	1400	1500	1700	1600	1700	1800	

Από την επεξεργασία του σχεδίου που απεικονίζει το πάχος των περιοχών εκμετάλλευσης στο Autocad 2000, προέκυψαν οι ακόλουθες μέσες τιμές πάχους του κοιτάσματος που φαίνονται στον πίνακα 5.5:

Πίνακας 5.5: Μέσες τιμές του πάχους των περιοχών εκμετάλλευσης.

Panel	1LNM	2LNM	3LNM	4LNM
Πάχος (ft)	13.7	13.7	14.3	14.3

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε εισαγωγή, τόσο του σχεδίου της εκμετάλλευσης, όσο και των σημείων μέτρησης των επιφανειακών καθιζήσεων από το AutoCAD 2000 στο πρόγραμμα πρόβλεψης των επιφανειακών καθιζήσεων (SDPS).

## 5.2 Παραμετρική ανάλυση

Η ενότητα αυτή έχει ως κύριο στόχο την βαθμονόμηση του προγράμματος πρόβλεψης επιφανειακών καθιζήσεων (SDPS), ώστε στη συνέχεια το πρόγραμμα αυτό να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη όλων των τύπων των επιφανειακών καθιζήσεων (κατακόρυφη μετατόπιση, οριζόντια μετατόπιση, ανηγμένη παραμόρφωση, κλπ) σε παρόμοιες περιοχές, σαν την υπό εξέταση περιοχή. Οι παράμετροι βαθμονόμησης είναι οι ακόλουθες:

- **Συντελεστής καθιζήσεων (subsidence factor).**

Ο συντελεστής αυτός μπορεί να μεταβάλλεται από 0 έως 100 και το πρόγραμμα βαθμονόμησης έχει τη δυνατότητα να εστιάζει σε οποιοδήποτε εύρος μεταξύ των ακραίων τιμών.

- **Εφαπτομένη της γωνίας επιρροής (tangent of influence angle).**

Επίσης το πρόγραμμα έχει τη δυνατότητα να ερευνήσει μεγάλο εύρος τιμών για τη γωνία αυτή. Οι συνηθέστερες τιμές της γωνίας αυτής κυμαίνονται μεταξύ 60° και 72°.

- **Μετατόπιση του σημείου καμπής της επιφανειακής καμπύλης καθίζησης.**

Η θέση του σημείου καμπής σε σχέση με το πλευρό της εκμετάλλευσης (rib) ονομάζεται πλευρική επίδραση (edge effect). Στην περίπτωση αυτή, ο χρήστης πρέπει να επιλέξει σε ποιες από τις εξωτερικές πλευρές του τμήματος εκσκαφής θεωρείται ότι εφαρμόζεται πλευρική επίδραση και επιλέγοντας αυτές το πρόγραμμα θα διερευνήσει μόνο τις συγκεκριμένες πλευρές. Συνήθως, στις περιπτώσεις διαδοχικών επιμήκων μετώπων, οι ενδιάμεσοι στύλοι θεωρούνται ότι καταρρέουν και επομένως δεν λογίζεται πλευρική επίδραση προς τις πλευρές των ενδιάμεσων στύλων. Λογίζεται όμως πλευρική επίδραση, προς τις πλευρές των σταθερών στύλων ασφαλείας στην αρχή και στο τέλος των τμημάτων εκσκαφής, καθώς και στις πλευρές των τμημάτων, οι οποίες γειτονεύουν με μη εξορυγμένο υλικό.

Η παραμετρική ανάλυση στην συγκεκριμένη εφαρμογή έγινε για τρεις γραμμές μέτρησης επιφανειακών παραμορφώσεων:

- Τη γραμμή μελέτης με το χαρακτηρισμό Tomi 1.
- Τη γραμμή μελέτης με το χαρακτηρισμό Tomi 2.



- Τη γραμμή μελέτης με το χαρακτηρισμό Tomi 3.

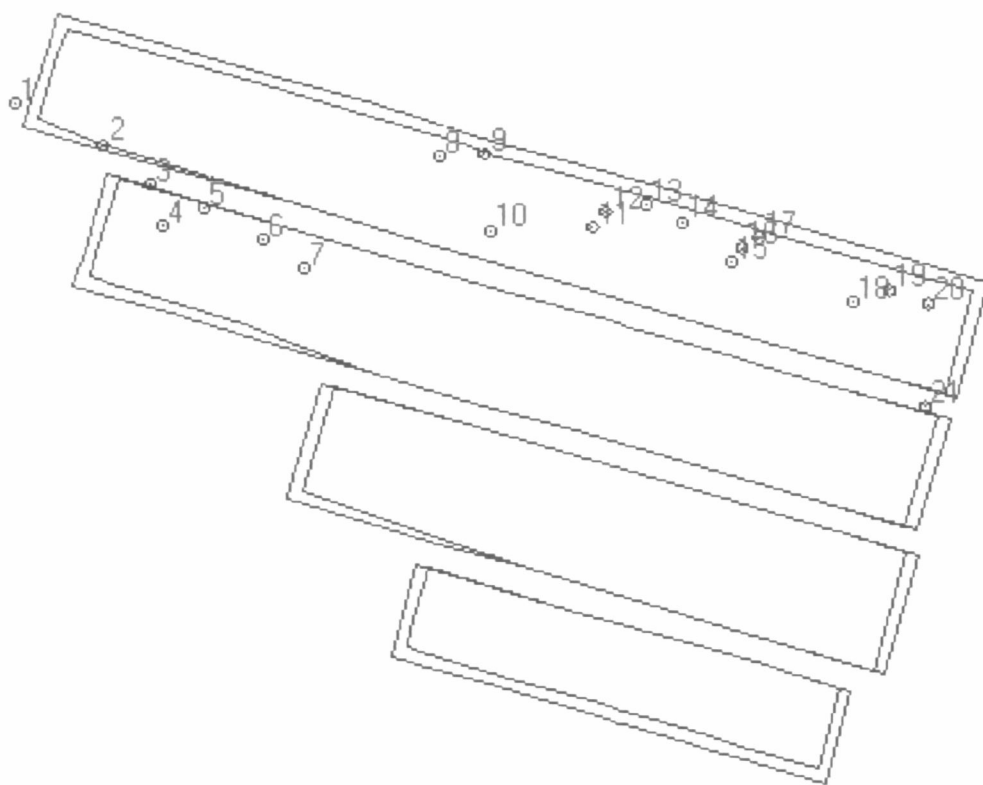
Για την παραμετρική ανάλυση και των τριών γραμμών μελέτης δόθηκαν τα παρακάτω εύρη μεταβολής των παραμέτρων βαθμονόμησης:

- Εφαπτομένη της γωνίας επιρροής: 2-4 με βήμα 0.1
- Συντελεστής καθίζησης: 10-80 με βήμα 5
- Πλευρική επίδραση: 0-200 με βήμα 5

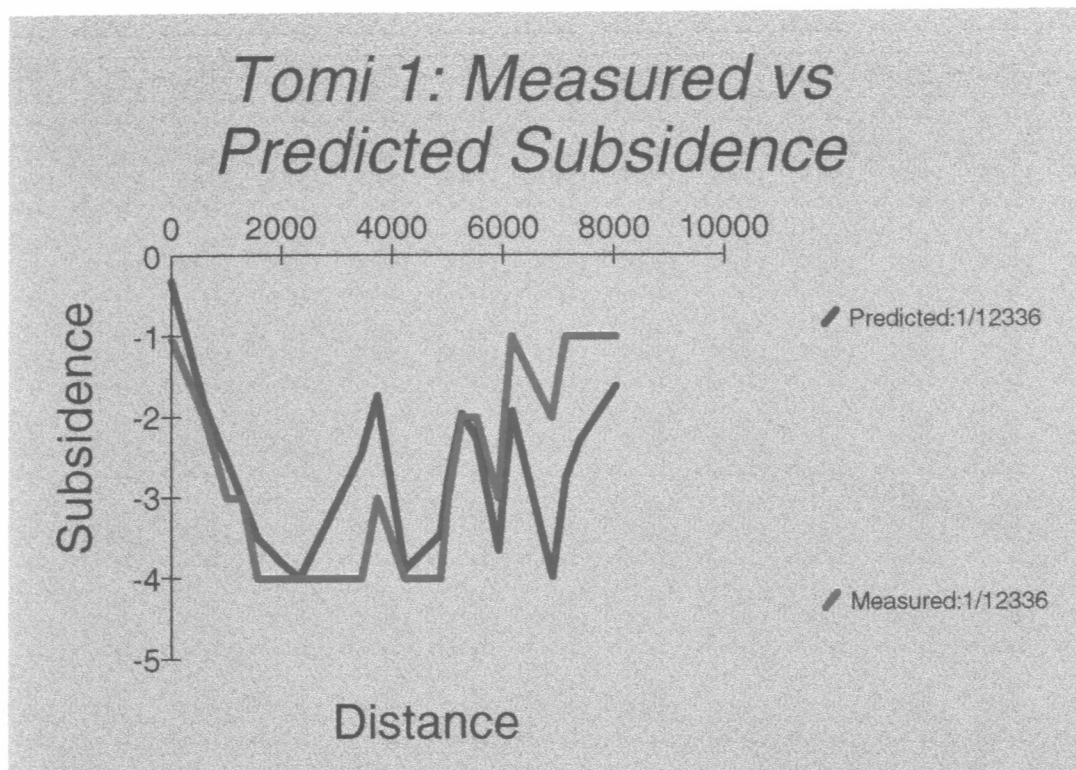
Στη συνέχεια ακολουθούν οι επιμέρους παρατηρήσεις, για τις διαδικασίες βαθμονόμησης των τριών παραπάνω γραμμών μελέτης.

### 5.2.1 Γραμμή μελέτης Tomi 1

Στο Σχήμα 5.3 παρουσιάζονται οι πλευρές της υπό μελέτης περιοχής, στις οποίες θεωρείται ότι υφίσταται πλευρική επίδραση.



Σχήμα 5.3: Οι πλευρές της υπό μελέτης περιοχής που επηρεάζονται από την πλευρική επίδραση κατά τη βαθμονόμηση της γραμμής μελέτης Tomi 1.



Σχήμα 5.4: Σύγκριση μεταξύ μετρημένων και προβλεπόμενων τιμών καθίζησης κατά μήκος της γραμμής μελέτης Tomi 1.

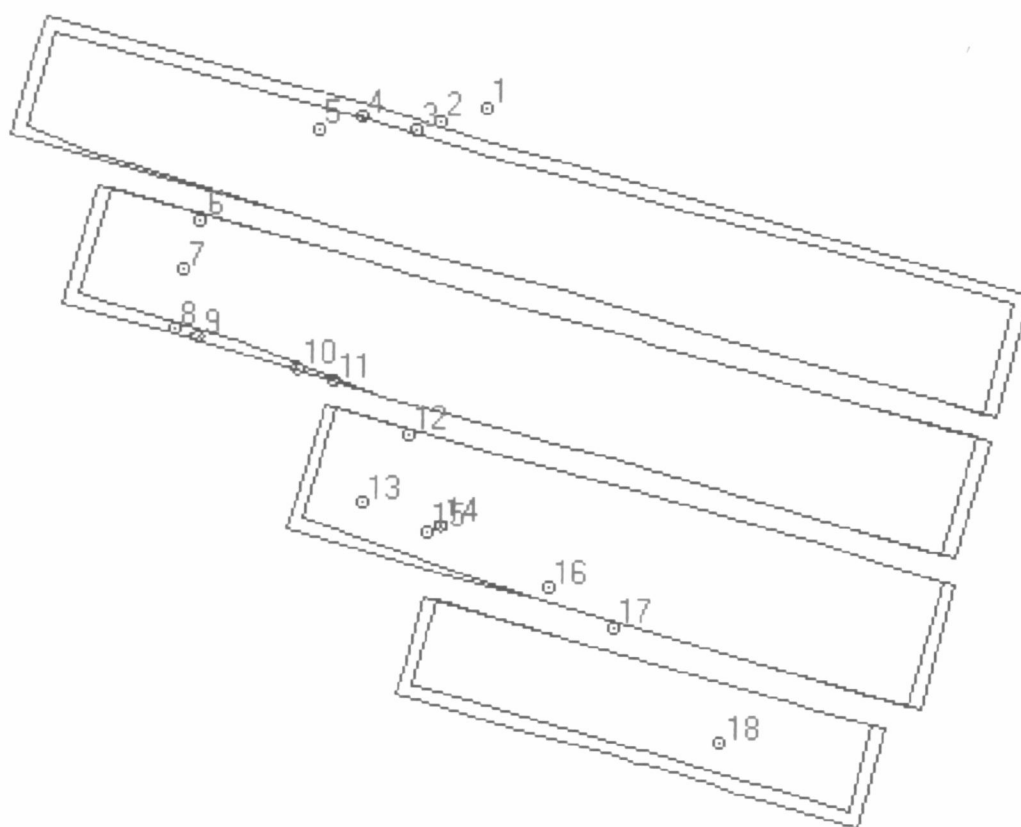
Στο Σχήμα 5.4 παρουσιάζεται σύγκριση μεταξύ μετρημένων και προβλεπόμενων τιμών κατά μήκος της γραμμής μελέτης. Το πρώτο σημείο στο διάγραμμα αυτό είναι το σημείο 1 του Σχήματος 5.3. Η προβλεπόμενη καμπύλη καθίζησης, που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.4 είναι η θεωρητικά καλύτερη καμπύλη προσέγγισης των μετρημένων τιμών επιφανειακής καθίζησης, αλλά εν τούτοις παρουσιάζει μεγάλο συνολικό σφάλμα της τάξεως του 33. Από την παραμετρική ανάλυση προέκυψαν οι παράμετροι βαθμονόμησης που φαίνονται στον πίνακα 5.6.

Πίνακας 5.6: Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων βαθμονόμησης.

Γωνία επιρροής	65.5°
Εφαπτομένη της γωνίας επιρροής	2.3
Συντελεστής καθίζησης	35%
Πλευρική επίδραση (ft)	195
Συνολικό σφάλμα	33.06

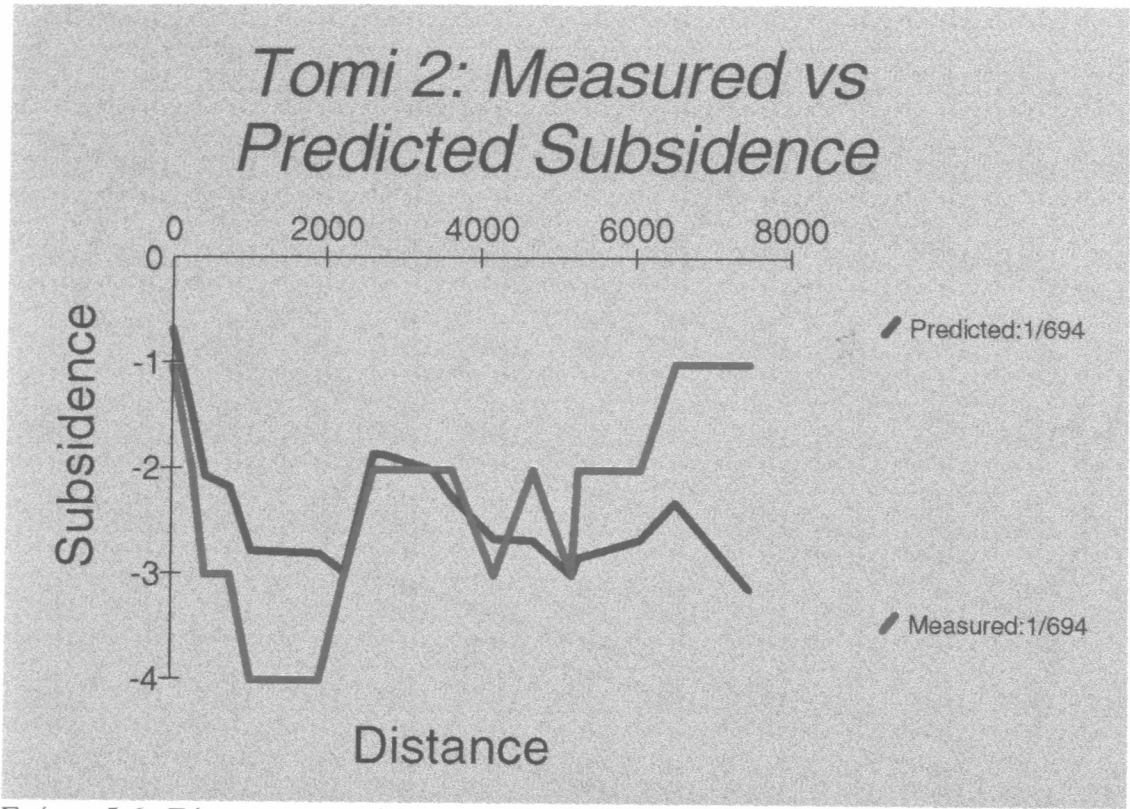
### 5.2.2 Γραμμή μελέτης Tomi 2

Στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζονται οι πλευρές της υπό μελέτης περιοχής, στις οποίες θεωρείται ότι υφίσταται πλευρική επίδραση.



Σχήμα 5.5: Οι πλευρές της υπό μελέτης περιοχής που επηρεάζονται από την πλευρική επίδραση κατά τη βαθμονόμηση της γραμμής μελέτης Tomi 2.

Στο Σχήμα 5.6 φαίνεται η σύγκριση μεταξύ των μετρημένων και των προβλεπόμενων τιμών κατακόρυφης καθίζησης κατά μήκος της γραμμής μελέτης. Το πρώτο σημείο στο διάγραμμα αυτό είναι το σημείο 1 του Σχήματος 5.5. Η προβλεπόμενη καμπύλη καθίζησης, που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.6 είναι η θεωρητικά καλύτερη καμπύλη προσέγγισης των μετρημένων τιμών επιφανειακής καθίζησης, αλλά εν τούτοις παρουσιάζει μεγάλο συνολικό σφάλμα της τάξεως του 27. Επιπλέον στον πίνακα 5.7 παρουσιάζονται τα συνοπτικά αποτελέσματα, τα οποία προέκυψαν από τη βαθμονόμηση του μοντέλου.



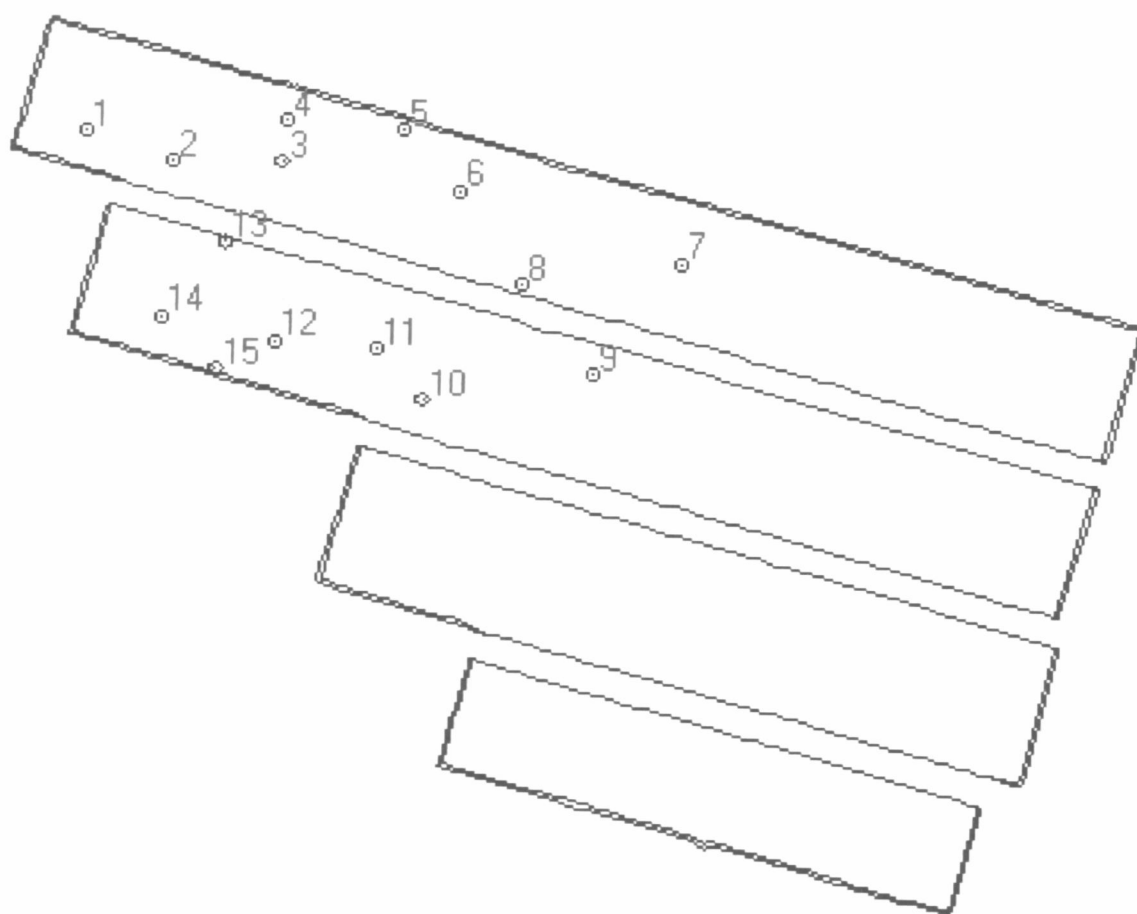
Σχήμα 5.6: Σύγκριση μεταξύ μετρημένων και προβλεπόμενων τιμών καθίζησης κατά μήκος της γραμμής μελέτης Tomi 2.

Πίνακας 5.7: Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων βαθμονόμησης.

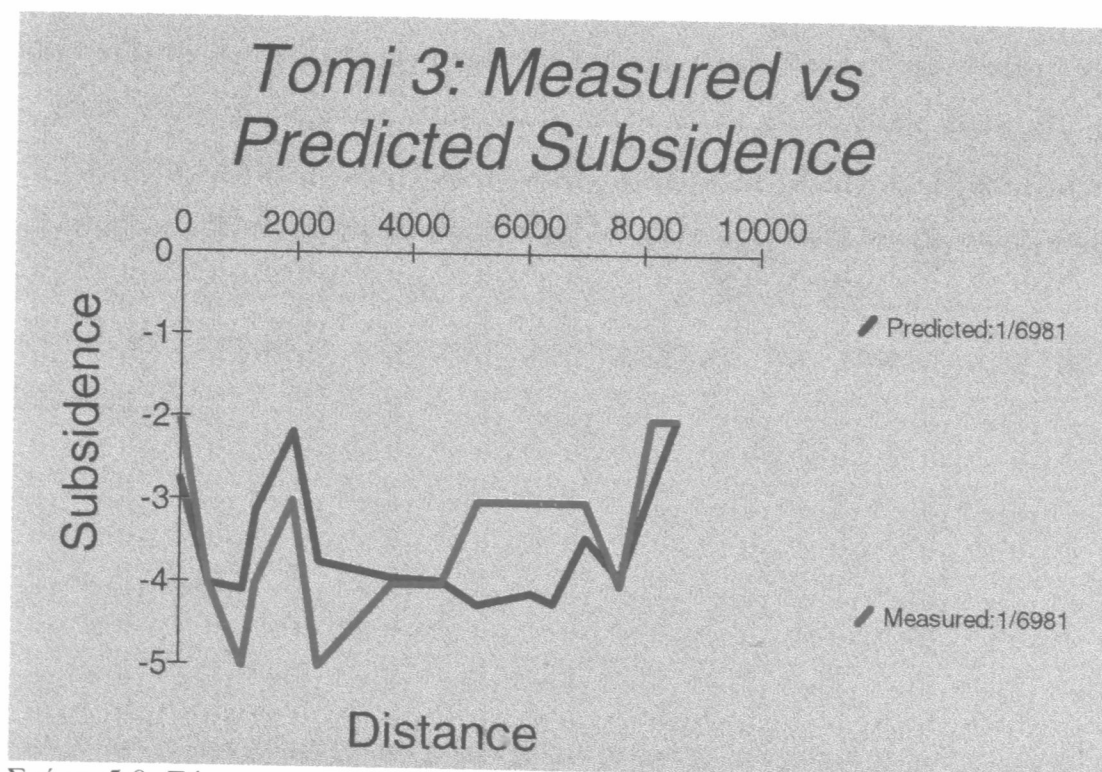
Γωνία επιρροής	67.38°
Εφαπτομένη της γωνίας επιρροής	2.4
Συντελεστής καθίζησης	25%
Πλευρική επίδραση (ft)	10
Συνολικό σφάλμα	27.18

5.2.3 Γραμμή μελέτης Tomi 3

Το μοντέλο που τρέχτηκε κατά την μελέτη της συγκεκριμένης γραμμής μελέτης παρατίθεται στο Σχήμα 5.7, ενώ τα αποτελέσματα από τη σύγκριση μεταξύ μετρημένων και προβλεπόμενων τιμών επιφανειακής καθίζησης παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.8. Τα συνοπτικά αποτελέσματα από τη βαθμονόμηση του μοντέλου παρουσιάζονται στον πίνακα 5.8.



Σχήμα 5.7: Οι πλευρές της υπό μελέτης περιοχής που επηρεάζονται από την πλευρική επίδραση κατά τη βαθμονόμηση της γραμμής μελέτης Tomi 3.



Σχήμα 5.8: Σύγκριση μεταξύ μετρημένων και προβλεπόμενων τιμών καθίζησης κατά μήκος της γραμμής μελέτης Tomi 3.

Πίνακας 5.8: Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων βαθμονόμησης.

Γωνία επιρροής	66.5°
Εφαπτομένη της γωνίας επιρροής	2.3
Συντελεστής καθίζησης	35%
Πλευρική επίδραση (ft)	110
Συνολικό σφάλμα	27.6

### 5.2.4 Συμπεράσματα

Σε κάθε μία από τις τρεις γραμμές μελέτης Tomi 1, Tomi 2 και Tomi 3 παρατηρείται ότι δεν υπάρχει μεγάλη ταύτιση μεταξύ των μετρημένων και των προβλεπόμενων τιμών επιφανειακής καθίζησης. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή δεν παρατηρείται καλή προσέγγιση των προβλεπόμενων τιμών επιφανειακής παραμόρφωσης με τις πραγματικές τιμές, αν και η μορφολογία των καμπυλών αυτών έχει αρκετές ομοιότητες.

Το γεγονός αυτό πιθανώς να οφείλεται, στο ότι η επιφάνεια του εδάφους καλύπτεται από νερό λόγω της παρουσίας φράγματος, με αποτέλεσμα οι μετρήσεις στα σημεία πρόβλεψης των επιφανειακών παραμορφώσεων να μην είναι ακριβείς. Επίσης δεν θα πρέπει να αγνοηθεί και η περίπτωση ενδεχόμενου τοπογραφικού λάθους (πολύ περισσότερο στην προκειμένη περίπτωση, λόγω της παρουσίας του φράγματος) καθώς και οι τοπικοί παράγοντες, οι οποίοι δεν σχετίζονται με τις υπόγειες εκσκαφές, όπως είναι η βαθμιαία παραμόρφωση των αποσαθρωμένων πετρωμάτων, οι κατολισθήσεις λόγω βροχής κ.α. Τέλος αξίζει να σημειωθεί, ότι κατά τις περιόδους Οκτωβρίου-Μαΐου υπήρχαν άσχημες καιρικές συνθήκες λόγω χιονιού. Το γεγονός αυτό, συνιστά άλλον ένα παράγοντα που επηρεάζει αρνητικά στην πρόβλεψη των επιφανειακών δεικτών παραμόρφωσης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### 6.1 Εφαρμογή 3

#### 6.1.1 Γενικά στοιχεία

Η παρούσα μελέτη αναφέρεται σε ένα τμήμα των εργασιών της εταιρείας Utah Fuel Company στα ανθρακωρυχεία Skyline Mines, τα οποία βρίσκονται έξω από την πόλη Helper, στην πολιτεία της Utah (Γιούτα). Τα ανθρακωρυχεία Skyline Mines, στα οποία η εκμετάλλευση έγινε με τη μέθοδο των ευθύγραμμων επιμήκων μετώπων, αποτελούνται από τρία μεταλλεία:

- Το μεταλλείο No. 1: Upper O' Conner Seam
- Το μεταλλείο No. 2: Lower O' Conner "B" Seam
- Το μεταλλείο No. 3: Lower O' Conner "A" Seam

Τα μεταλλεία (No. 1: Upper O' Conner Seam) και (No. 2: Lower O' Conner "B" Seam) υπερκαλύπτονται και συνεπώς η έρευνα για την πρόβλεψη των επιφανειακών καθιζήσεων στις συγκεκριμένες περιοχές καθίσταται αρκετά δύσκολη. Για το λόγο αυτό η μελέτη περιορίστηκε στο μεταλλείο (No. 3: Lower O' Conner "A" Seam), προκειμένου να υπολογιστούν οι επιφανειακές καθιζήσεις εξαιτίας των υπόγειων εκσκαφών.

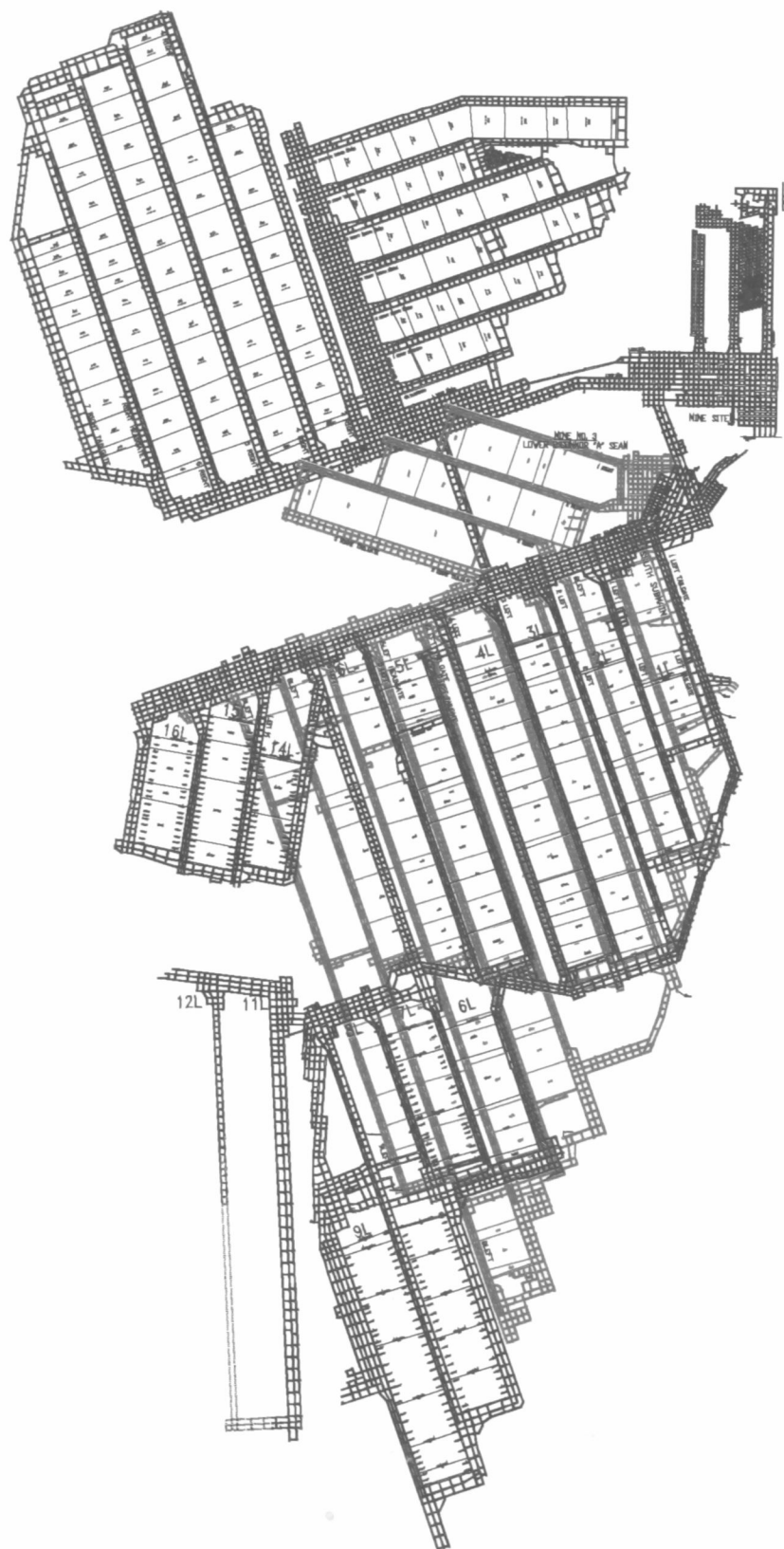
Στον πίνακα 6.1 παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των περιοχών εκμετάλλευσης (Panels) σε καθένα από τα μεταλλεία Skyline Mines. Όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς, στοιχεία για τα μέσα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των Panels στο Μεταλλείο No. 2 δεν υπάρχουν.

Πίνακας 6.1: Μέσα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των Panels στα μεταλλεία Skyline Mines

	Μεταλλείο No. 1	Μεταλλείο No. 2	Μεταλλείο No. 3
Μήκος (ft)	9400		7400
Πλάτος (ft)	730		700
Ύψος (ft)	8.5-10		13.5

Στο Σχήμα 6.1 παρουσιάζεται μία γενική εικόνα των ανθρακωρυχείων Skyline Mines.



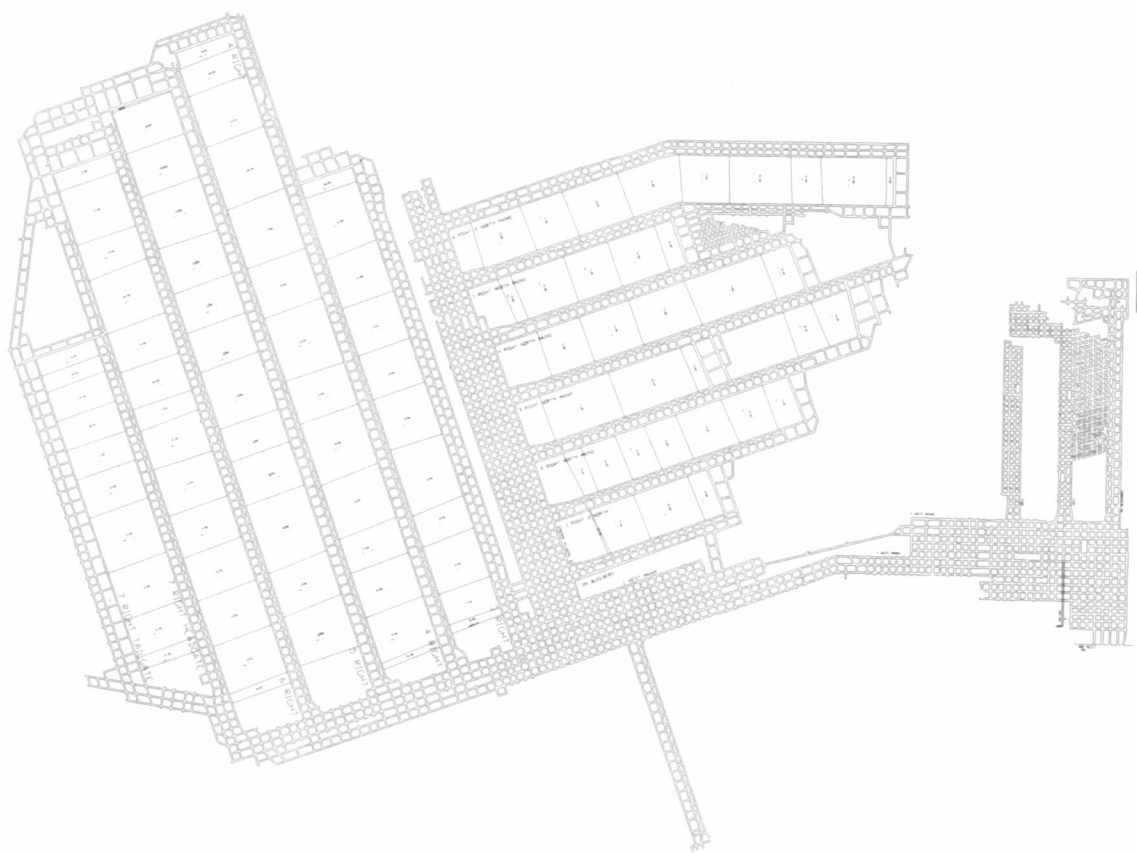


Σχήμα 6.1: Συνοπτική παρουσίαση των ανθρακωρυχείων Skyline Mines.



Το μεταλλείο No. 3: Lower O' Conner "A" Seam, που αποτελεί την περιοχή μελέτης, φαίνεται στο πάνω μέρος του Σχήματος 6.1, ενώ τα αλληλεπικαλυπτόμενα μεταλλεία No. 1 και No. 2 απεικονίζονται στο κάτω μέρος του Σχήματος 6.1.

Στο Σχήμα 6.2 παρουσιάζεται ευκρινώς, η υπό μελέτη περιοχή εκμετάλλευσης, το μεταλλείο No. 3: Lower O' Conner "A" Seam.



Σχήμα 6.2: Μεταλλευτικός χάρτης του μεταλλείου No. 3: Lower O' Conner "A" Seam.

### 6.1.2 Στάδια της μελέτης

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν είχαν ψηφιακή μορφή και ειδικότερα αποτελούσαν σχέδια του Autocad 2000. Τα σχέδια αυτά περιελάμβαναν τα ανθρακωρυχεία Skyline Mines, το υψόμετρο των υπερκειμένων, το πάχος του κοιτάσματος στις περιοχές εκμετάλλευσης καθώς και τις μετρημένες καθιζήσεις από το έτος 1986 έως το έτος 1993 καθώς και από το έτος 1995 έως το έτος 2000. Στην παρούσα εφαρμογή χρησιμοποιήθηκαν οι καθιζήσεις του έτους 2000 (του τελευταίου έτους, στο οποίο

μετρήθηκαν οι καθιζήσεις). Μετά από την επεξεργασία των σχεδίων του Autocad προέκυψε η περιοχή μελέτης, η οποία αποτελείται από 62 panels και 56 σημεία πρόβλεψης. Τα σημεία πρόβλεψης των δεικτών παραμόρφωσης αποτελούν τα σημεία τομής των καμπυλών καθίζησης με τις ισουψείς των υπερκειμένων. Στον πίνακα 6.2 φαίνονται τα μεγέθη που προέκυψαν για την υπό μελέτη περιοχή, με τη βοήθεια του Autocad 2000. Οι τιμές του πάχους των περιοχών εκμετάλλευσης (panels), είναι ορισμένες για κάθε ένα panel στο αντίστοιχο σχέδιο του Autocad.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε εισαγωγή, τόσο του σχεδίου της εκμετάλλευσης, όσο και των σημείων μέτρησης των επιφανειακών καθιζήσεων από το AutoCAD 2000 στο πρόγραμμα πρόβλεψης των επιφανειακών καθιζήσεων (SDPS).

Πίνακας 6.2: Μετρημένα μεγέθη πάνω στην υπό μελέτη περιοχή.

Σημεία πρόβλεψης	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Κατακόρυφη καθίζηση (ft)	2	2	2	2	2	4	4	2	2	2	4	4	4	2
Υψόμετρο υπερκειμένων (ft)	1600	1300	1400	1800	1800	1800	1800	1500	1500	1500	1500	1500	1400	1300
Σημεία πρόβλεψης	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Κατακόρυφη καθίζηση (ft)	4	2	2	4	4	6	6	6	4	4	6	4	6	4
Υψόμετρο υπερκειμένων (ft)	1500	1500	1900	1800	1700	1700	1800	1800	1500	1400	1400	1300	1300	1300
Σημεία πρόβλεψης	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
Κατακόρυφη καθίζηση (ft)	6	6	8	8	6	2	0	2	2	2	4	4	4	6
Υψόμετρο υπερκειμένων (ft)	1300	1400	1500	1600	1600	1600	1300	1900	1800	1700	1600	1600	1700	1800
Σημεία πρόβλεψης	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56
Κατακόρυφη καθίζηση (ft)	4	4	4	6	6	4	4	4	4	6	6	6	2	2
Υψόμετρο υπερκειμένων (ft)	1700	1500	1400	1400	1600	1600	1500	1400	1300	1300	1400	1500	1400	1300

## 6.2 Παραμετρική ανάλυση

Η ενότητα αυτή έχει ως κύριο στόχο την βαθμονόμηση του προγράμματος πρόβλεψης επιφανειακών καθιζήσεων (SDPS), ώστε στη συνέχεια το πρόγραμμα αυτό να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη όλων των τύπων των επιφανειακών καθιζήσεων (κατακόρυφη μετατόπιση, οριζόντια μετατόπιση, ανηγμένη παραμόρφωση, κλπ) σε παρόμοιες περιοχές, σαν την υπό εξέταση περιοχή. Οι παράμετροι βαθμονόμησης είναι οι ακόλουθες:

✓ **Συντελεστής καθιζήσεων (subsidence factor).**

Ο συντελεστής αυτός μπορεί να μεταβάλλεται από 0 έως 100 και το πρόγραμμα βαθμονόμησης έχει τη δυνατότητα να εστιάζει σε οποιοδήποτε εύρος μεταξύ των ακραίων τιμών.

✓ **Εφαπτομένη της γωνίας επιρροής (tangent of influence angle).**

Επίσης το πρόγραμμα έχει τη δυνατότητα να ερευνήσει μεγάλο εύρος τιμών για τη γωνία αυτή. Οι συνηθέστερες τιμές της γωνίας αυτής κυμαίνονται μεταξύ 60° και 72°.

✓ **Μετατόπιση του σημείου καμπής της επιφανειακής καμπύλης καθίζησης.**

Η θέση του σημείου καμπής σε σχέση με το πλευρό της εκμετάλλευσης (rib) ονομάζεται πλευρική επίδραση (edge effect). Στην περίπτωση αυτή, ο χρήστης πρέπει να επιλέξει σε ποιες από τις εξωτερικές πλευρές του τμήματος εκσκαφής θεωρείται ότι εφαρμόζεται πλευρική επίδραση και επιλέγοντας αυτές το πρόγραμμα θα διερευνήσει μόνο τις συγκεκριμένες πλευρές. Συνήθως, στις περιπτώσεις διαδοχικών επιμήκων μετώπων, οι ενδιάμεσοι στύλοι θεωρούνται ότι καταρρέουν και επομένως δεν λογίζεται πλευρική επίδραση προς τις πλευρές των ενδιάμεσων στύλων. Λογίζεται όμως πλευρική επίδραση, προς τις πλευρές των σταθερών στύλων ασφαλείας στην αρχή και στο τέλος των τμημάτων εκσκαφής, καθώς και στις πλευρές των τμημάτων, οι οποίες γειτονεύουν με μη εξορυγμένο υλικό.

Η παραμετρική ανάλυση στη συγκεκριμένη εφαρμογή έγινε για την προαναφερόμενη υπό μελέτη περιοχή. Για την παραμετρική ανάλυση δόθηκαν τα παρακάτω εύρη μεταβολής των παραμέτρων βαθμονόμησης:

✓ Εφαπτομένη της γωνίας επιρροής: 2-4 με βήμα 0.1

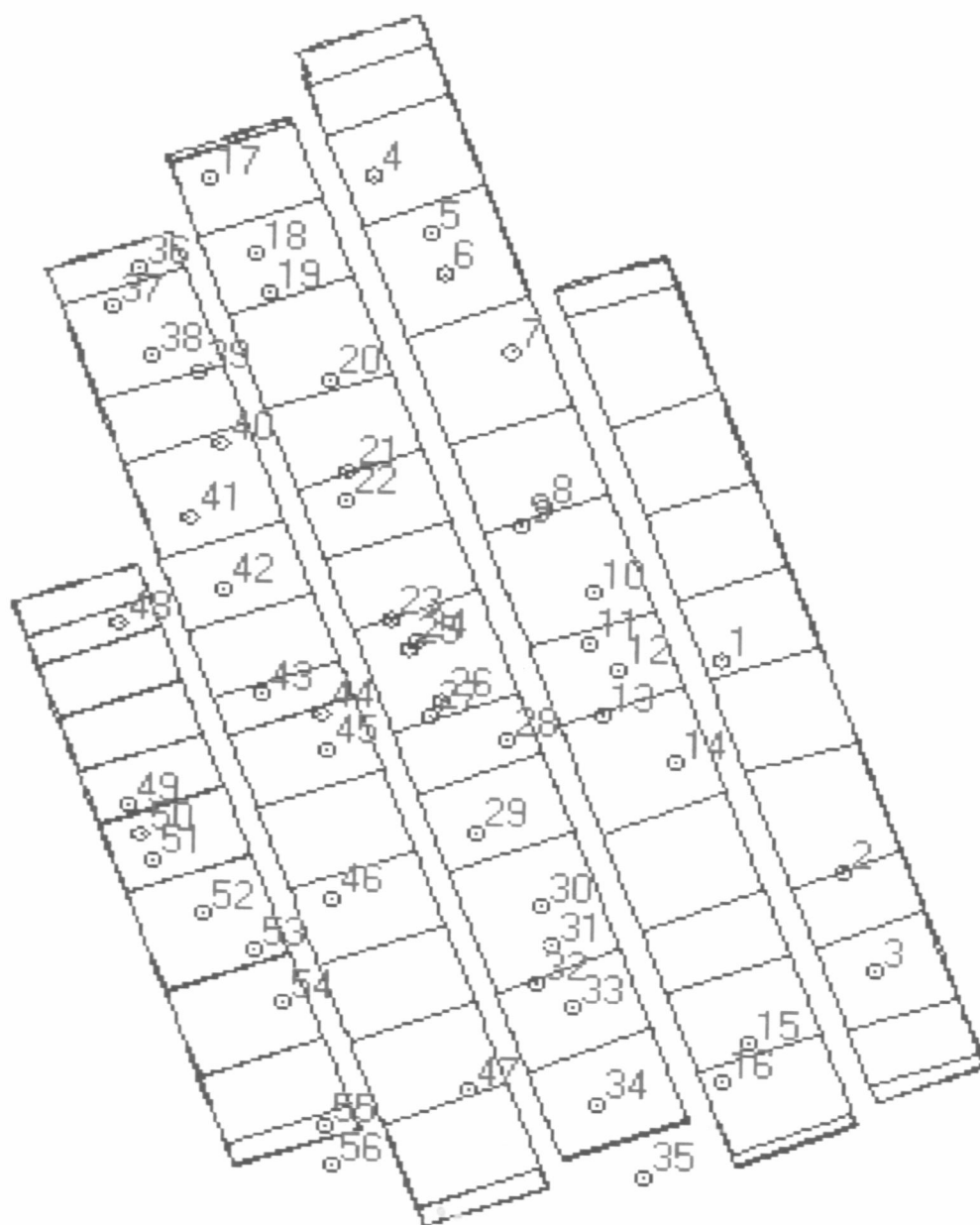
✓ Συντελεστής καθίζησης: 10-80 με βήμα 5

✓ Πλευρική επίδραση: 0-200 με βήμα 5

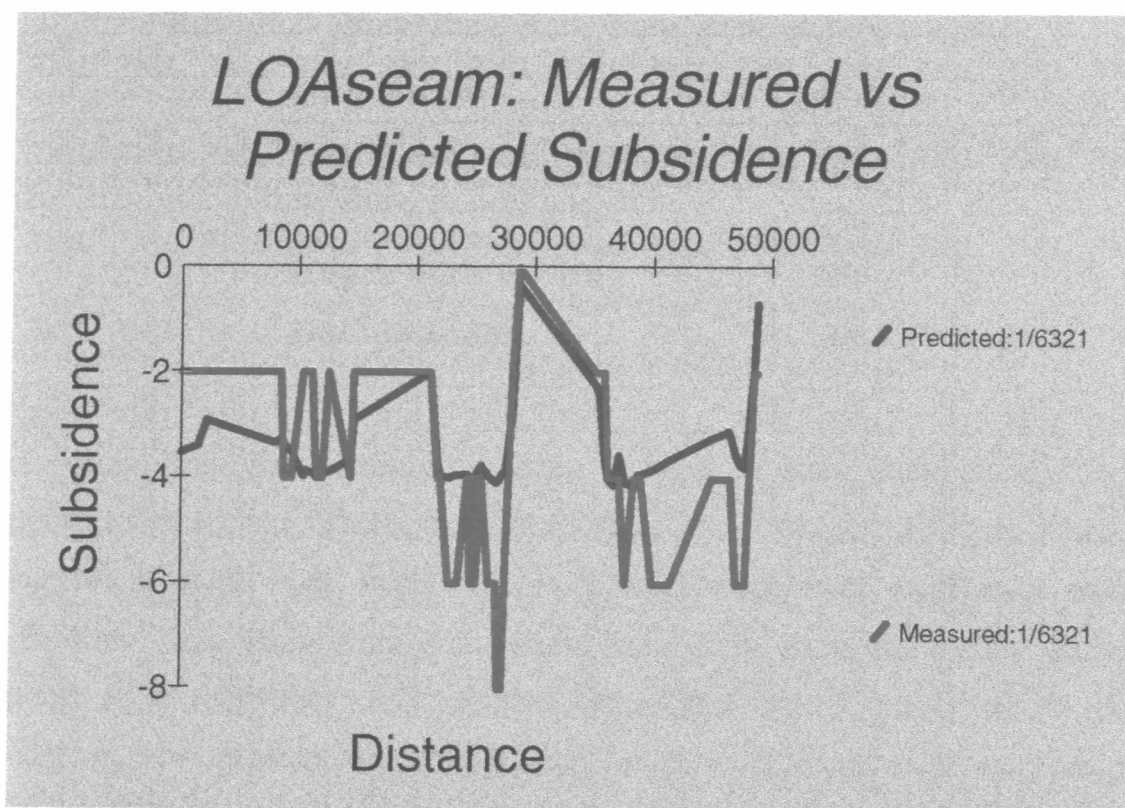
Στη συνέχεια ακολουθούν οι επιμέρους παρατηρήσεις, για τις διαδικασίες βαθμονόμησης.

### 6.2.1 Βαθμονόμηση της υπό μελέτης περιοχής

Στο Σχήμα 6.3 παρουσιάζεται η υπό μελέτη περιοχή με τις πλευρές της, στις οποίες θεωρείται ότι υφίσταται πλευρική επίδραση.



Σχήμα 6.3: Οι πλευρές της υπό μελέτης περιοχής που επηρεάζονται από την πλευρική επίδραση κατά την βαθμονόμηση.



Σχήμα 6.4: Σύγκριση μεταξύ μετρημένων και προβλεπόμενων τιμών καθίζησης της υπό μελέτης περιοχής.

Στο Σχήμα 6.4 παρουσιάζεται σύγκριση μεταξύ μετρημένων και προβλεπόμενων τιμών καθίζησης της υπό μελέτης περιοχής. Το πρώτο σημείο στο διάγραμμα αυτό είναι το σημείο 1 του Σχήματος 6.3. Η προβλεπόμενη καμπύλη καθίζησης, που παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.4 είναι η θεωρητικά καλύτερη καμπύλη προσέγγισης των μετρημένων τιμών επιφανειακής καθίζησης, αλλά παρόλα αυτά παρουσιάζει μεγάλο συνολικό σφάλμα της τάξεως του 144.

Στο Σχήμα 6.4, αν και γενικά δεν παρατηρείται καλή προσέγγιση των προβλεπόμενων τιμών επιφανειακής καθίζησης με τις πραγματικές τιμές, παρόλα αυτά η μορφολογία των δύο καμπυλών έχει αρκετές ομοιότητες. Γενικά παρατηρείται, ότι όπου υπάρχει απόκλιση μεταξύ των μετρημένων με τις προβλεπόμενες καμπύλες καθίζησης, η απόκλιση αυτή κυμαίνεται μεταξύ των 2 ft, με τις προβλεπόμενες καμπύλες καθίζησης να είναι υποεκτιμημένες ως επί το πλείστον.

Από την παραμετρική ανάλυση προέκυψαν, ότι οι παράμετροι βαθμονόμησης είναι οι ακόλουθες:

Πίνακας 6.3: Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων βαθμονόμησης.

Γωνία επιρροής	64.54°
Εφαπτομένη της γωνίας επιρροής	2.10
Συντελεστής καθίζησης	35%
Πλευρική επίδραση (ft)	100
Συνολικό σφάλμα	144

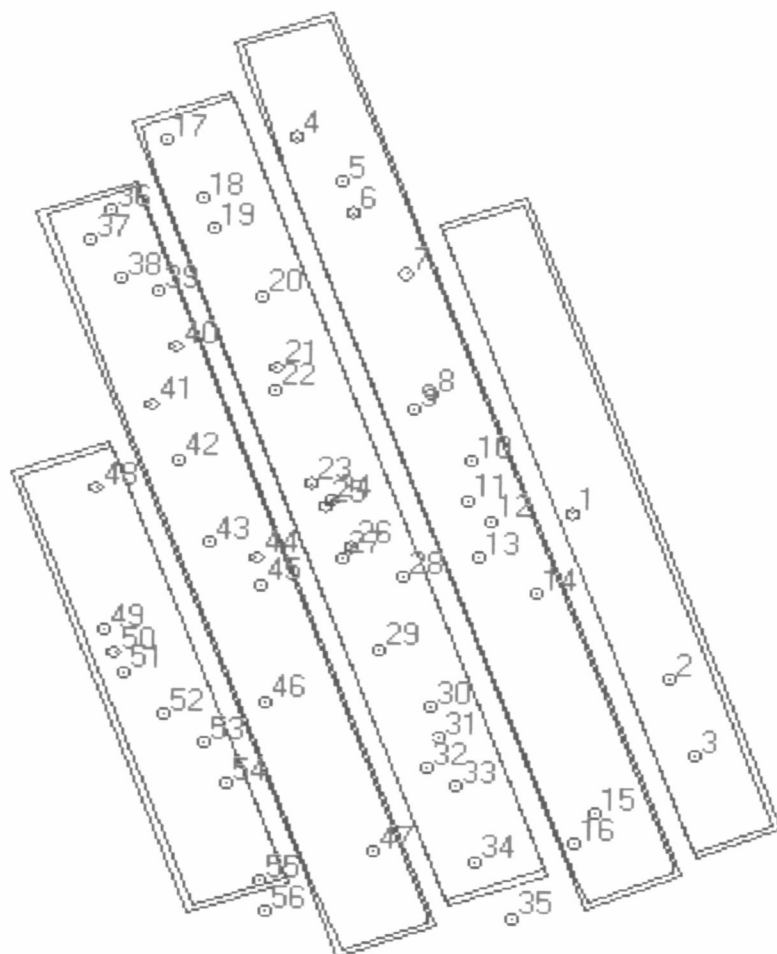
Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε το εξής σενάριο. Η μοντελοποίηση του σχεδίου εκμετάλλευσης της υπό μελέτης περιοχής έγινε με όσο το δυνατόν λιγότερα σημεία (της τάξης του δέκα για κάθε νοητή περιοχή εκμετάλλευσης), ενώ παράλληλα μειώθηκε αισθητά και ο αριθμός των περιοχών εκμετάλλευσης. Με τον τρόπο αυτό η υπό μελέτη περιοχή μοντελοποιήθηκε, έτσι ώστε να αποτελείται από 5 panels και 56 σημεία πρόβλεψης των επιφανειακών καθιζήσεων. Τα μέσα πάχη εκμετάλλευσης των πέντε νοητών panels που προέκυψαν, παρουσιάζονται στον πίνακα 6.4. Ο υπολογισμός τους έγινε με τη χρησιμοποίηση του αριθμητικού μέσου.

Πίνακας 6.4: Μέσα πάχη εκμετάλλευσης των πέντε panels.

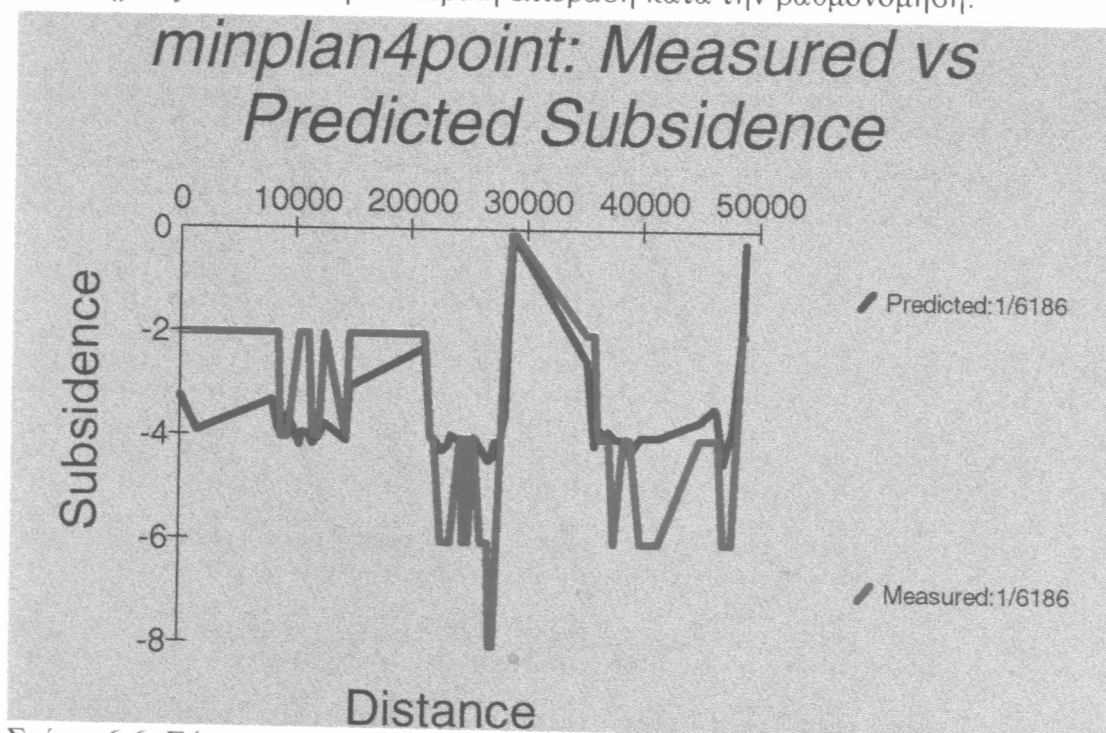
	Panel 1	Panel 2	Panel 3	Panel 4	Panel 5
Πάχος (ft)	13.35	13.2	13.046	12.557	12.082

Τα panels αριθμούνται από το 1 έως το 5 από τα δυτικά προς τα ανατολικά, όπως φαίνονται στο Σχήμα 6.3.

Το μοντέλο που τρέχτηκε κατά την μελέτη της συγκεκριμένης περίπτωσης, με την υπό μελέτη περιοχή και τις πλευρές στις οποίες θεωρείται ότι υφίσταται πλευρική επίδραση παρατίθεται στο Σχήμα 6.5, ενώ τα αποτελέσματα από τη σύγκριση μεταξύ μετρημένων και προβλεπόμενων τιμών επιφανειακής καθίζησης παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.6. Τα συνοπτικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τη βαθμονόμηση του μοντέλου παρουσιάζονται στον πίνακα 6.5.



Σχήμα 6.5: Οι πλευρές της υπό μελέτης περιοχής που επηρεάζονται από την πλευρική επίδραση κατά την βαθμονόμηση.



Σχήμα 6.6: Σύγκριση μεταξύ μετρημένων και προβλεπόμενων τιμών καθίζησης της υπό μελέτης περιοχής.



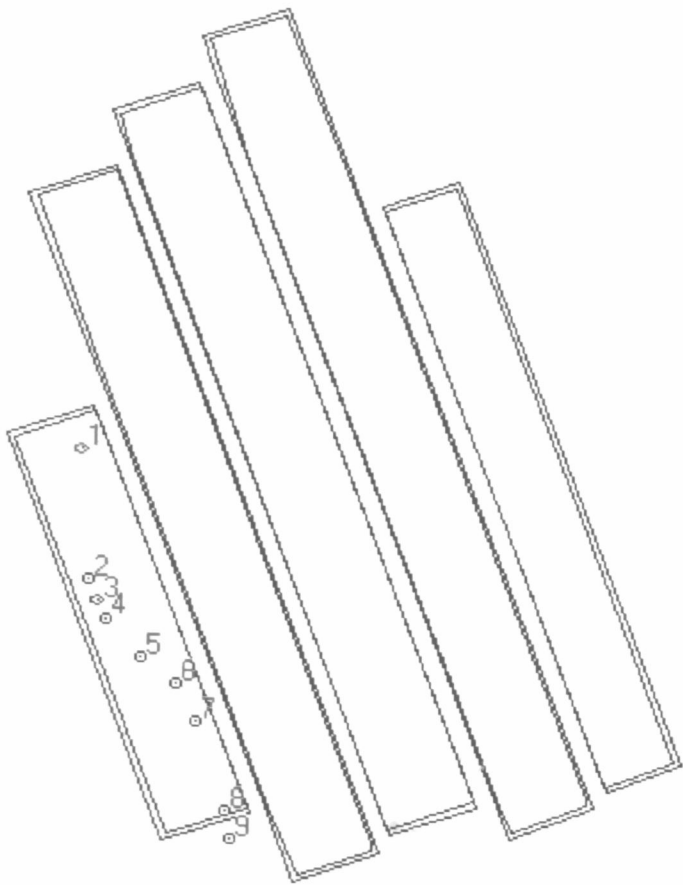
Πίνακας 6.5: Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων βαθμονόμησης.

Γωνία επιρροής	73.14°
Εφαπτομένη της γωνίας επιρροής	3.3
Συντελεστής καθίζησης	35%
Πλευρική επίδραση (ft)	95
Συνολικό σφάλμα	142

Από τα Σχήματα 6.4 και 6.6, φαίνεται να μην υπάρχει ουσιαστική διαφορά ανάμεσα στις καμπύλες καθίζησης των δύο περιπτώσεων. Το γεγονός αυτό σημαίνει, ότι δεν υπάρχει ουσιαστική διαφορά στο πλήθος των σημείων ορισμού του σχεδιασμού της περιοχής μελέτης στη συγκεκριμένη εφαρμογή, όσον αφορά τις καμπύλες καθίζησης.

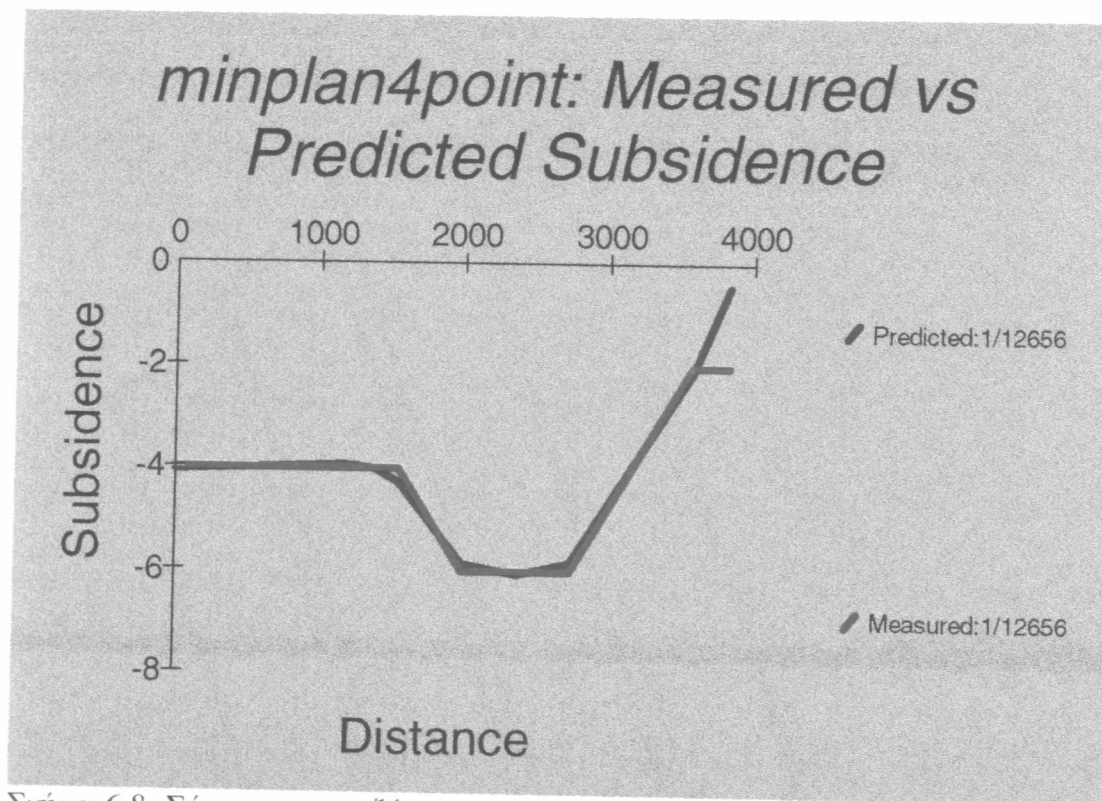
6.2.2 Βαθμονόμηση της γραμμής μελέτης μεταξύ των σημείων 48-56

Στο Σχήμα 6.7 παρουσιάζεται η υπό μελέτη περιοχή με τις πλευρές της, στις οποίες θεωρείται ότι υφίσταται πλευρική επίδραση μαζί με τα σημεία πρόβλεψης.



Σχήμα 6.7: Οι πλευρές της υπό μελέτης περιοχής που επηρεάζονται από την πλευρική επίδραση κατά την βαθμονόμηση.

Το σημείο 48 αντιστοιχεί στο σημείο 1 και το σημείο 56 αντιστοιχεί στο σημείο 9 του Σχήματος 6.7 αντίστοιχα.



Σχήμα 6.8: Σύγκριση μεταξύ μετρημένων και προβλεπόμενων τιμών καθίζησης της υπό μελέτης περιοχής.

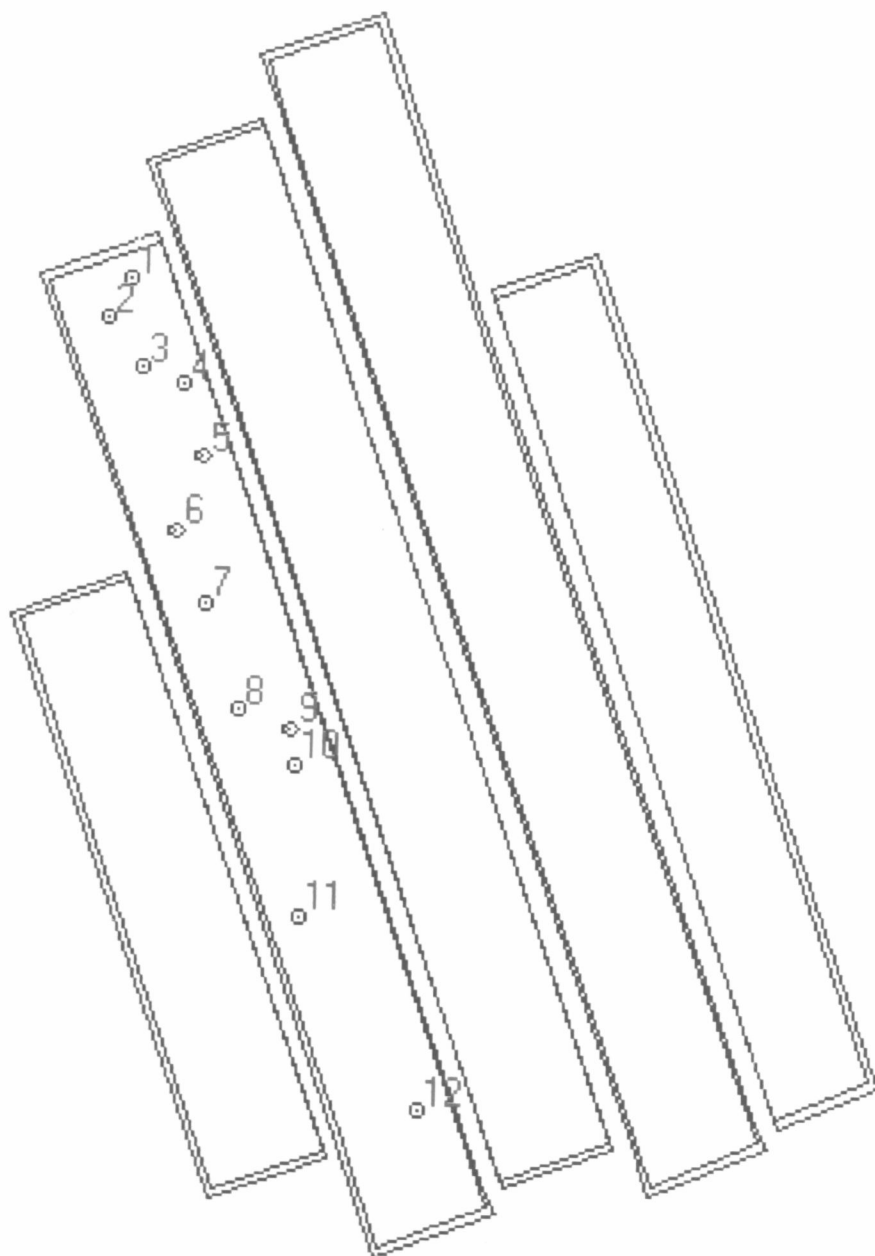
Στο Σχήμα 6.8 φαίνεται η σύγκριση μεταξύ των μετρημένων και των προβλεπόμενων τιμών κατακόρυφης καθίζησης κατά μήκος γραμμής μελέτης μεταξύ των σημείων 48-56. Το πρώτο σημείο στο διάγραμμα αυτό είναι το σημείο 1 του Σχήματος 6.7. Η προβλεπόμενη καμπύλη καθίζησης, που παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.8 είναι η θεωρητικά καλύτερη καμπύλη προσέγγισης των μετρημένων τιμών επιφανειακής καθίζησης. Στην συγκεκριμένη γραμμή μελέτης παρατηρείται σχεδόν άριστη ταύτιση των προβλεπόμενων τιμών καθίζησης με τις πραγματικές. Οι παράμετροι βαθμονόμησης που προέκυψαν από την παραμετρική ανάλυση παρουσιάζονται στον πίνακα 6.6:

Πίνακας 6.6: Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων βαθμονόμησης.

Γωνία επιρροής	66.5°
Εφαπτομένη της γωνίας επιρροής	2.3
Συντελεστής καθίζησης	60%
Πλευρική επίδραση (ft)	200
Συνολικό σφάλμα	9.27

### 6.2.3 Βαθμονόμηση της γραμμής μελέτης μεταξύ των σημείων 36-47

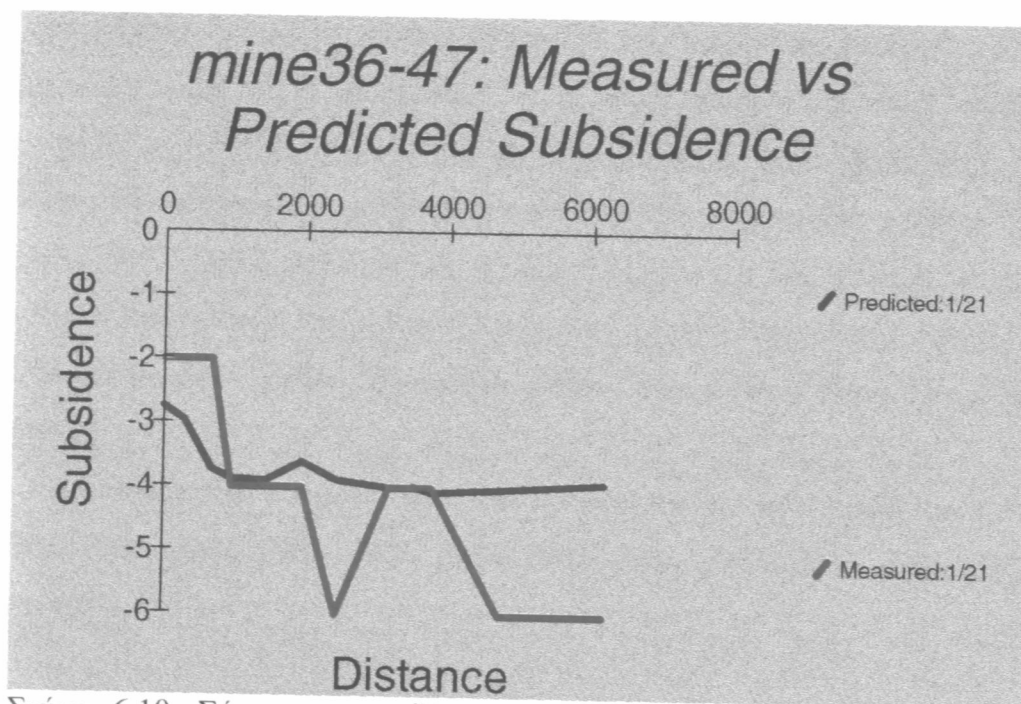
Στο Σχήμα 6.9 παρουσιάζεται η υπό μελέτη περιοχή με τις πλευρές της, στις οποίες θεωρείται ότι υφίσταται πλευρική επίδραση μαζί με τα σημεία πρόβλεψης.



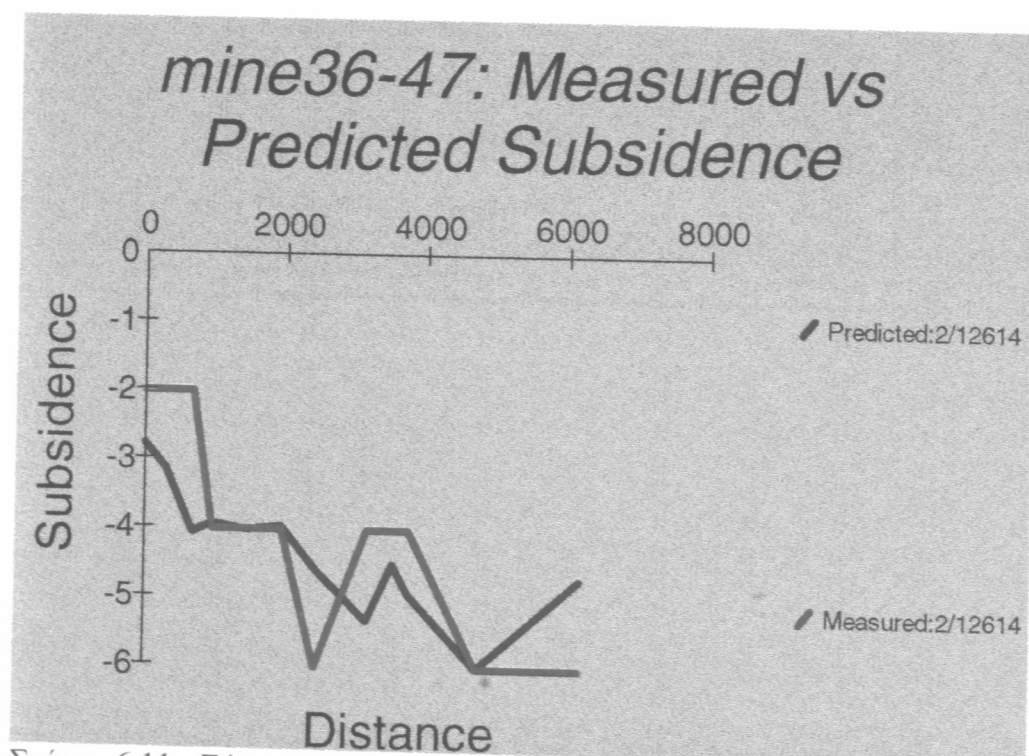
Σχήμα 6.9: Οι πλευρές της υπό μελέτης περιοχής που επηρεάζονται από την πλευρική επίδραση κατά την βαθμονόμηση.

Το σημείο 36 αντιστοιχεί στο σημείο 1 και το σημείο 47 αντιστοιχεί στο σημείο 12 του Σχήματος 6.9 αντίστοιχα.

Στα Σχήματα 6.10 και 6.11 φαίνεται η σύγκριση μεταξύ των μετρημένων και των προβλεπόμενων τιμών κατακόρυφης καθίζησης κατά μήκος γραμμής μελέτης μεταξύ των σημείων 36-47. Το πρώτο σημείο στα διαγράμματα αυτά είναι το σημείο 1 του Σχήματος 6.9.



Σχήμα 6.10: Σύγκριση μεταξύ μετρημένων και προβλεπόμενων τιμών καθίζησης της υπό μελέτης περιοχής.



Σχήμα 6.11: Σύγκριση μεταξύ μετρημένων και προβλεπόμενων τιμών καθίζησης της υπό μελέτης περιοχής.

Η προβλεπόμενη καμπύλη καθίζησης, που παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.10 είναι η θεωρητικά καλύτερη καμπύλη προσέγγισης των μετρημένων τιμών επιφανειακής καθίζησης, όπως προκύπτει από το πρόγραμμα SDPS. Αντίθετα, η προβλεπόμενη καμπύλη καθίζησης, που παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.11 αποτελεί την δεύτερη επιλογή του προγράμματος. Από τη σύγκριση μεταξύ των καμπυλών καθίζησης ανάμεσα στα Σχήματα 6.10 και 6.11 προκύπτει, ότι η προβλεπόμενη καμπύλη καθίζησης, που παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.11, παρόλο που αποτελεί δεύτερη επιλογή, προσεγγίζει καλύτερα τις μετρημένες καθιζήσεις κατά μήκος της γραμμής μελέτης μεταξύ των σημείων 36-47. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.11, αν και δεν υπάρχει μεγάλη ταύτιση μεταξύ των μετρημένων και των προβλεπόμενων τιμών επιφανειακής καθίζησης, παρόλα αυτά παρατηρείται μεγάλη ομοιότητα, όσον αφορά στη μορφολογία αυτών των καμπυλών.

Οι παράμετροι βαθμονόμησης που προέκυψαν από την παραμετρική ανάλυση για την περίπτωση του Σχήματος 6.11 (αυτή επιλέγεται ως καλύτερη) παρουσιάζονται στον πίνακα 6.7:

Πίνακας 6.7: Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων βαθμονόμησης.

Γωνία επιρροής	63.43°
Εφαπτομένη της γωνίας επιρροής	2
Συντελεστής καθίζησης	75%
Πλευρική επίδραση (ft)	200
Συνολικό σφάλμα	25.67

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Συμπεράσματα

Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την βαθμονόμηση κάθε μίας περιοχής που εξετάστηκε έχουν ως εξής:

✓ **Ανθρακωρυχεία York Canyon, New Mexico, USA.**

Οι δύο γραμμές μελέτης που εξετάστηκαν, η βόρεια εγκάρσια γραμμή μελέτης N6E-N6W και η κεντρική γραμμή μελέτης C7-C15, αφού πρώτα αποδείχτηκε ότι το panel 5N δεν επιδρά σχεδόν καθόλου κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης του panel 6N, έδωσαν τα ακόλουθα αποτελέσματα βαθμονόμησης.

Πίνακας 7.1: Συνοπτικά αποτελέσματα βαθμονόμησης γραμμής μελέτης N6E-N6W.

Γωνία επιρροής	67.38°
Εφαπτομένη της γωνίας επιρροής	2.40
Συντελεστής καθίζησης	70%
Πλευρική επίδραση (ft)	85
Συνολικό σφάλμα	11.15

Πίνακας 7.2: Συνοπτικά αποτελέσματα βαθμονόμησης γραμμής μελέτης C7-C15.

Γωνία επιρροής	75.96°
Εφαπτομένη της γωνίας επιρροής	4.00
Συντελεστής καθίζησης	80%
Πλευρική επίδραση (ft)	130
Συνολικό σφάλμα	22.3

Στα μειονεκτήματα της συγκεκριμένης εφαρμογής συγκαταλέγεται:

- Η μη ψηφιοποιημένη μορφή των δεδομένων.
- Η οριζόντια θεώρηση του κοιτάσματος (Πραγματική κλίση γύρω στο 5%).

Αν προσπαθήσει κανείς να βγάλει ένα μέσο όρο τιμών βαθμονόμησης, φαίνεται ότι υπάρχει αρκετή διακύμανση των παραμέτρων.

✓ Τα ανθρακωρυχεία Sufco, Utah, USA.

Οι τρεις γραμμές μελέτης που εξετάστηκαν , η Tomi 1, η Tomi 2 και η Tomi 3 έδωσαν τα ακόλουθα αποτελέσματα βαθμονόμησης.

Πίνακας 7.3: Συνοπτικά αποτελέσματα βαθμονόμησης γραμμής μελέτης Tomi 1.

Γωνία επιρροής	65.5°
Εφαπτομένη της γωνίας επιρροής	2.3
Συντελεστής καθίζησης	35%
Πλευρική επίδραση (ft)	195
Συνολικό σφάλμα	33.06

Πίνακας 7.4: Συνοπτικά αποτελέσματα βαθμονόμησης γραμμής μελέτης Tomi 2.

Γωνία επιρροής	67.38°
Εφαπτομένη της γωνίας επιρροής	2.4
Συντελεστής καθίζησης	25%
Πλευρική επίδραση (ft)	10
Συνολικό σφάλμα	27.18

Πίνακας 7.5: Συνοπτικά αποτελέσματα βαθμονόμησης γραμμής μελέτης Tomi 3.

Γωνία επιρροής	66.5°
Εφαπτομένη της γωνίας επιρροής	2.3
Συντελεστής καθίζησης	35%
Πλευρική επίδραση (ft)	110
Συνολικό σφάλμα	27.6

Στα μειονεκτήματα της συγκεκριμένης εφαρμογής συγκαταλέγεται:

- Το γεγονός ότι η επιφάνεια του εδάφους καλύπτεται από νερό λόγω παρουσίας φράγματος.
- Η μεγάλη διάρκεια των άσχημων καιρικών συνθηκών (χιόνι).

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή μπορεί να βγει μέσος αριθμητικός όρος τόσο για την γωνία επιρροής, όσο και για το συντελεστή καθίζησης και είναι 66.46° και 2.33 αντιστοίχως. Αντίθετα, όσον αφορά την πλευρική επίδραση δεν μπορεί να βρεθεί αριθμητικός μέσος γιατί υπάρχει αρκετή διακύμανση των τιμών της.

✓ Τα ανθρακωρυχεία Skyline, Utah, USA.

Αρχικά βαθμονομήθηκε η υπό μελέτη περιοχή, η οποία αποτελείται από 62 panels και 56 σημεία πρόβλεψης. Στη συνέχεια ακολούθησε η βαθμονόμηση των γραμμών μελέτης, που αποτελούνται από τα σημεία 48-56 και 36-47 αντίστοιχα και προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα.

Πίνακας 7.6: Συνοπτικά αποτελέσματα βαθμονόμησης της υπό μελέτη περιοχής.

Γωνία επιρροής	73.14°
Εφαπτομένη της γωνίας επιρροής	3.3
Συντελεστής καθίζησης	35
Πλευρική επίδραση (ft)	95
Συνολικό σφάλμα	142

Πίνακας 7.7: Συνοπτικά αποτελέσματα βαθμονόμησης γραμμής μελέτης 48-56.

Γωνία επιρροής	66.5°
Εφαπτομένη της γωνίας επιρροής	2.3
Συντελεστής καθίζησης	60
Πλευρική επίδραση (ft)	200
Συνολικό σφάλμα	9.27

Πίνακας 7.8: Συνοπτικά αποτελέσματα βαθμονόμησης γραμμής μελέτης 36-47.

Γωνία επιρροής	63.43°
Εφαπτομένη της γωνίας επιρροής	2
Συντελεστής καθίζησης	75
Πλευρική επίδραση (ft)	200
Συνολικό σφάλμα	25.67



Ομοίως, αν προσπαθήσει κανείς να βγάλει ένα μέσο όρο τιμών βαθμονόμησης, φαίνεται ότι υπάρχει αρκετή διακύμανση των παραμέτρων.

Σε γενικές γραμμές τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εξέταση των τριών περιπτώσεων που μελετήθηκαν, κρίνονται ικανοποιητικά. Παράλληλα δεν θα πρέπει να αγνοηθεί το γεγονός του τοπογραφικού λάθους, που δεν ταυτίζονται οι προβλεπόμενες με τις μετρημένες καμπύλες καθίζησης, καθώς επίσης και οι τοπικοί παράγοντες, οι οποίοι δεν σχετίζονται με τις υπόγειες εκσκαφές, όπως είναι η βαθμιαία παραμόρφωση των αποσαθρωμένων πετρωμάτων, οι κατολισθήσεις λόγω βροχής κ.α.

Παρατηρείται, ότι η βαθμονόμηση επιτυγχάνεται ως επί το πλείστον σε γραμμές μελέτης, ενώ αποφεύγεται η εφαρμογή της σε περιοχές όπου παρατηρείται υπερκάλυψη. Όπως φαίνεται, το πρόγραμμα SDPS δίνει μία πάρα πολύ καλή εκτίμηση των πραγματικών επιφανειακών καθιζήσεων και αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο, όσον αφορά την πρόβλεψη αυτών.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Agioutantis, Z. and M. Karmis, (2002). "Surface Deformation Prediction System for Windows version 5.2". Quick Reference Manual, Department of Mining and Minerals Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University.
2. Agioutantis, Z. and M. Karmis (1998). "Correlation of the Subsidence Parameters and Damage Assessment due to Underground Mining". Proceedings, Environmental Issues and Waste Management in Energy and Mineral Production, Ankara, Turkey, pp. 195-291.
3. Bräuner, G. (1973a). "Calculation of ground movement in European coalfields". Proc. Symp. Subsidence in Mines, Australasian Inst. Min. Met., 10/1-10/8.
4. Bräuner, G. (1973b). "Subsidence due to underground mining". Part 1 Theory and practices in predicting surface deformation. US Department of the Interior, Bureau of Mines, 56pp.
5. Donnelly, L. J., H. De La Cruz, I. Asmar, O. Zapata and J. D. Perez (2001). "The monitoring and the prediction of mining subsidence in the Amaga, Angelopolis, Venecia and Bolombolo Regions, Antioquia, Colombia". Engineering Geology 59, pp. 103-114.
6. Gentry, D. W. and Abel J. F. Jr. (1977). "Rock mechanics instrumentation program for Kaiser Steel Corporation's demonstration of shield-type longwall supports at York Canyon mine". Raton. New Mexico. USBM Contract S0144066. Colorado School of Mines.
7. <http://www.uow.edu.au/eng/current/longwall/>
8. <http://www.wvu.edu/~minengin/text/longctr.htm>.
9. Karmis, M., J. Mastoris and Z. Agioutantis (1995). "Potential of the 'damage angle' concept for assessing surface impacts of the underground mining".

Transactions, Society for Mining Metallurgy and Exploration, Inc, Vol. 296, pp. 1883-1886.

10. Newman, D., Z. Agioutantis and M. Karmis "SDPS for Windows: An Integrated Approach to Ground Deformation Prediction". 20<sup>th</sup> International Conference on Ground Control in Mining.
11. Singh, R. P and R. N. Yadav (1995). "Prediction of subsidence due to coal mining in Raniganj coalfield, West Bengal, India". Engineering Geology 39, pp. 103-111.
12. Stefanco, R. (1983). "Coal Mining Technology Theory and Practice". Society of Mining Engineers, New York.
13. Whittaker, B. N. and D. J. Reddish, (1989). "Subsidence Occurrence, Prediction and Control". Department of Mining Engineering, The University of Nottingham, U.K.

