

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα υπόγεια έργα (Πολιτικού Μηχανικού ή άλλα γεωτεχνικά) είναι ο λόγος ανακατανομής των τάσεων και παραμορφώσεων στη μάζα των γεωυλικών. Το αποτέλεσμα της ανακατανομής είναι η καθίζηση στην επιφάνεια της γης, η οποία δημιουργεί ανεπιθύμητες συνέπειες για τη λειτουργία των κατασκευών.

Οι παραπάνω συλλογισμοί δημιουργούν τα ακόλουθα ερωτήματα:

- Πώς να προβλεφθεί η επίδραση των υπόγειων εργασιών στην επιφάνεια της γης;
- Πώς να εκτελεστούν οι υπόγειες εργασίες (σχήματα και διαστάσεις των έργων) έτσι ώστε τα υπάρχοντα κτίρια και εξοπλισμοί στην επιφάνεια να μπορούν να διατηρήσουν την ύπαρξη και την λειτουργία τους;

Αυτά είναι τα προβλήματα τα οποία θα μελετηθούν σε αυτή την εργασία. Οι λύσεις των προβλημάτων που δίνονται παρακάτω μπορεί να χρησιμοποιηθούν για τις ποσοτικές και τις ποιοτικές μελέτες μερικών φυσικών φαινομένων. Για παράδειγμα, όταν η λάβα εκρήγνυται από τον κρατήρα ενός ηφαιστείου, σχηματίζονται κενά στη μάζα της λάβας, σαν αποτέλεσμα της εξάπλωσης του αερίου, η οποία με κάποιο μηχανισμό που περιγράφεται στο 1^ο Κεφάλαιο της εργασίας αυτής μπορεί να δημιουργήσει σημαντική καθίζηση στην επιφάνεια της γης.

Επίσης, αξίζει να αναφερθεί ότι οι επιχειρήσεις διάσωσης στο Τσερνομπίλ περιελάμβαναν τη κατασκευή σήραγγας κάτω από το σταθμό του πυρηνικού σταθμού, ο οποίος τότε ήταν γεμάτος με σκυρόδεμα (συμπαγής - άκαμπτο)[1]. Η έλλειψη γνώσης σχετικά με την επίδραση της σήραγγας (υπόγειος δρόμος) στην επιφάνεια της γης θα μπορούσε να οδηγήσει σε ακόμα περισσότερο καταστροφικές συνέπειες. Αυτό το γεγονός μόνο τονίζει την σπουδαιότητα των προβλημάτων που μελετούνται σε αυτή την εργασία.

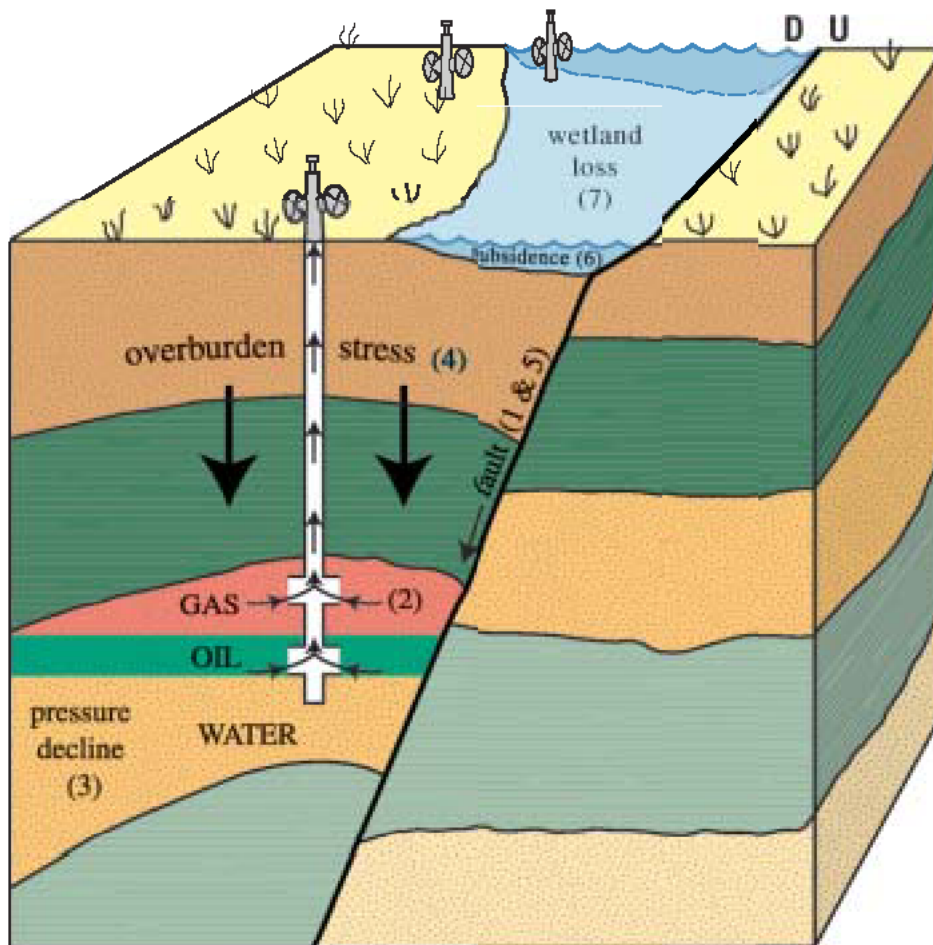
Τέλος, πολύ σημαντικές τόσο κατά μέτρο όσο και σε οικονομικά μεγέθη είναι οι συνέπειες των καθιζήσεων που προκύπτουν από την άντληση πετρελαίου, οι οποίες μελετώνται αναλυτικότερα στην επόμενη παράγραφο.

ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ ΚΑΘΙΖΗΣΕΩΝ – ΑΝΤΛΗΣΗ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ

Η άντληση πετρελαίου έχει οδηγήσει σε προβλήματα συμπύκνωσης και καθίζησης εδαφών σε διάφορες περιοχές. Η καθίζηση σε περιοχές γεωδεξαμενών πετρελαίου όπως το Wilmington και το Ekofisk είναι δύο από τις πιο γνωστές περιοχές λόγω του μεγέθους της καθίζησης και του κόστους της ανάταξης τόσο των εγκαταστάσεων άντλησης και μεταφοράς, όσο και των υποδομών, οικοσυστημάτων των περιοχών αυτών. Εκτός από τις παραπάνω αναφερόμενες περιοχές, καθίζηση έχουν υποστεί σε μικρότερο βαθμό και άλλες περιοχές με γεωδεξαμενές¹ πετρελαίου, όπως η Βενεζουέλα όπου λόγω της σημαντικής καθίζησης υπήρξε πλυμμήρα γύρω από τις όχθες της Λίμνης Maracaibo. Στην Ολλανδία, παρατηρήθηκε σημαντική καθίζηση στη περιοχή Groningen [2], πάνω από μία αρκετά μεγάλη σε χωρητικότητα γεωδεξαμενή πετρελαίου. Η καθίζηση, η οποία μπορούσε να μετρηθεί σε δεκάδες εκατοστών, δημιουργεί προβληματισμούς, αφού σημαντικά τμήματα των Κάτω

¹ Αγγλ. *Reservoir*

Χωρών βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας και προστατεύονται από φράγματα. Παρακάτω θα περιγράψουμε αναλυτικότερα ορισμένες από τις περιπτώσεις σημαντικών καθιζήσεων λόγω άντλησης πετρελαίου.



Εικόνα 1: Συνέπειες παραγωγής πετρελαίου στη γεωμορφολογία

Όλα τα προβλήματα δεξαμενών πετρελαίου περιλαμβάνουν δύο βασικά στοιχεία: ρευστά και βράχο. Τα στοιχεία αυτά συσχετίζονται μέσω δύο διαδικασιών [3]: τη μηχανική των ρευστών καθώς και τη γεωμηχανική. Η μηχανική των ρευστών είναι ουσιώδης σε μία μελέτη δεξαμενής πετρελαίου. Η γεωμηχανική πιστεύεται ότι είναι σημαντική σε προβλήματα όπως η ευστάθεια των γεωτρήσεων, υδραυλική διάβρωση και παραγωγή πετρελαίου οι οποίες δημιουργούν συμπύκνωση και καθίζηση. Η γεωμηχανική διαδραματίζει σημαντικό ρόλο όταν παράγεται πετρέλαιο και αέριο σε γεωδεξαμενές με υψηλή συμπίεστικότητα και παραμορφωσιμότητα. Πρακτικά προβλήματα που αφορούν τη γεωμηχανική στις γεωδεξαμενές, περιλαμβάνουν την καθίζηση της επιφάνειας και γενικότερα τη πιθανή παραμόρφωση που προκαλείται από την συμπύκνωση της γεωδεξαμενής, η οποία οδηγεί σε αναγκαστική μείωση της παραγωγής, με τεράστιο κόστος.

Στη Εικόνα 1 [4] εμφανίζονται οι πιθανές συνέπειες παραγωγής πετρελαίου στη γεωμορφολογία μιας περιοχής: Η αυξημένη παραγωγή πετρελαίου, φυσικού αερίου αλλά και νερού (Φάση 2) προκαλεί την πτώση της πίεσης πόρων στο υπέδαφος¹

¹ Αγγλ. *Subsurface*

(Φάση 3). Ο υποβιβασμός της πίεσης πόρων (Φάση 3) προκαλεί αύξηση των ενεργών τάσεων στη γεωκατασκευή¹ (Φάση 4) πάνω από τη γεωδεξαμενή πετρελαίου με συνέπεια την συμπύκνωση και καθίζηση της βραχώμαζας της γεωκατασκευής ή/και ενεργοποίηση ενεργών (Φάση 1) ή ανενεργών ρηγμάτων της περιοχής (Φάση 5). Η συμπύκνωση ή/και η ολίσθηση κατά μήκος των ρηγμάτων μπορεί να προκαλέσει επιφανειακή καθίζηση² (Φάση 6). Στις κορεσμένες περιοχές όπου υπάρχει καθίζηση και ενεργοποίηση ρηγμάτων εμφανίζεται καταβύθιση των περιοχών και αλλαγές στην περίμετρο τους (Φάση 7).

ΣΥΜΠΙΕΣΗ-ΠΡΟΚΛΗΣΗ ΚΑΘΙΖΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΣΤΟΧΙΑ ΤΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ

Κατά την άντληση πετρελαίου, είναι πιθανή η συμπίεση της γεωδεξαμενης. Το βάρος των υπερκείμενων εδαφικών στρωμάτων υποστηρίζεται εν μέρη από το πέτρωμα του βράχου και εν μέρει από το ροή ρευστού υπό πίεση μέσα στο πορώδες του βράχου. Όταν η πίεση του ρευστού ελαττώνεται τότε όλο και περισσότερο από το φορτίο μεταφέρεται στο πέτρωμα της γεωδεξαμενής το οποίο συμπιέζεται.

Η συμπύκνωση του βράχου προκαλεί προβλήματα με πολλαπλές συνέπειες. Για παράδειγμα, η συμπύκνωση μπορεί να μειώσει το πορώδες και τη διαπερατότητα, επηρεάζοντας την μακροπρόθεσμη παραγωγή υδρογονανθράκων από την δεξαμενή. Η συμπύκνωση μπορεί επίσης να προκαλέσει σημαντική παραμορφώση στις γεωτρήσεις, δημιουργώντας σοβαρά προβλήματα τόσο στη λειτουργία, όσο ακόμα και στην ύπαρξη των γεωτρήσεων άντλησης. Αν η συμπύκνωση είναι σημαντική, μπορεί να προκαλέσει ακόμα και καθίζηση του βυθού της θάλασσας, οδηγώντας πιθανώς σε δριμύτατα προβλήματα ασφάλειας για τις εξέδρες άντλησης.

Τα προβλήματα που προκαλούνται από την συμπύκνωση της γεωκατασκευής στις τοποθεσίες δεξαμενών άντλησης πετρελαίου μπορεί να είναι πολύ δαπανηρά. Τέτοια προβλήματα έχουν καταχωρηθεί για τοποθεσίες στη Νορβηγία, Ρωσία, Ιταλία, Βενεζουέλα, Ιαπωνία και στις Η.Π.Α., στην Καλιφόρνια, στο Τέξας και στον Κόλπο του Μεξικού [3]. Για παράδειγμα, κατά τη διάρκεια 1935-65 η επιφάνεια πάνω από τη γεωδεξαμενή πετρελαίου στο Wilmington στην Καλιφόρνια υπέστη καθίζηση της τάξεως των 33ft (10m). Το κόστος για την ανύψωση, την προστασία και την επισκευή διαφόρων εγκαταστάσεων έφτασε το ύψος των 100 εκατομμυρίων δολλαρίων (\$ 100*10⁶) από το 1962. Η καθίζηση προκάλεσε αστοχία σε εκατοντάδες γεωτρήσεις. Στη περιοχή Ekofisk, στην Βόρεια θάλασσα, η καθίζηση του βυθού της θάλασσας, έως το 1987 ήταν περίπου 13ft (περίπου 4m). Το πλήρες σχέδιο για την ανύψωση στις πλατφόρμες πετρελαίου και την προστασία των εγκαταστάσεων αποθήκευσης σε αυτή την σημαντική περιοχή άντλησης πετρελαίου στοίχισαν 400 εκατομμύρια δολάρια (\$400*10⁶). Λόγω της καθιζήσεως υπήρξε αστοχία σε περισσότερες από τα 2/3 των γεωτρήσεων. Σήμερα η καθίζηση του βυθού της θάλασσας ξεπερνάει τα 10m και χρειάστηκε εκ νέου σχεδιασμός και ανάπτυξη του κοιτάσματος.

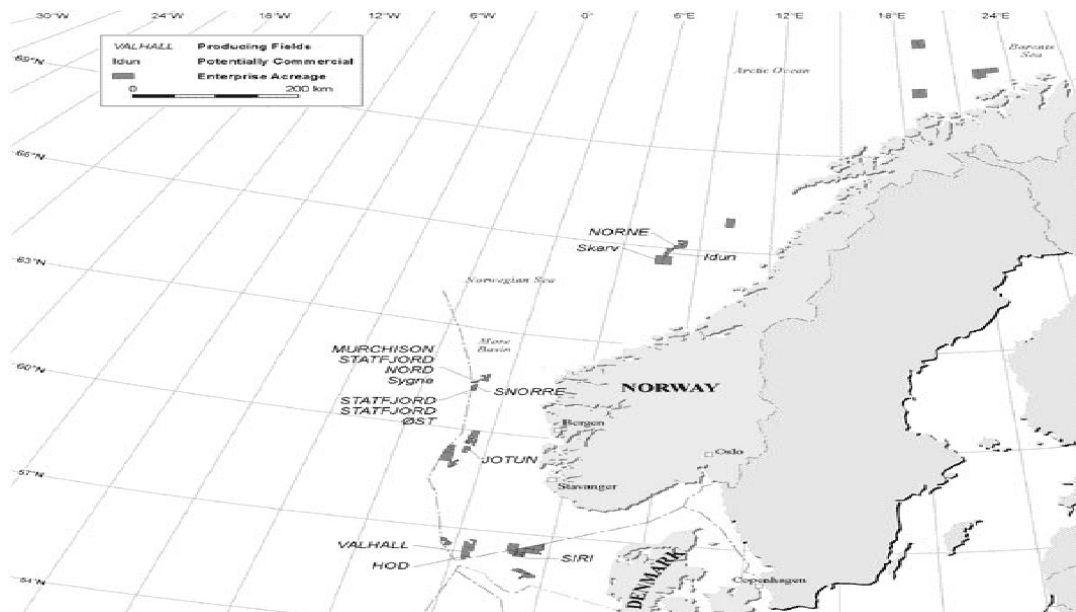
Η συμπύκνωση της γεωδεξαμενής έχει επίσης θετικά αποτελέσματα στην αποληψιμότητα του πετρελαίου. Στο Ekofisk είχαμε μία παράταση ζωής του κοιτάσματος για πάνω από 20 χρόνια, έως το 2025.

¹ Αγγλ. *Overburden*

² Αγγλ. *Land surface subsidence*

Παρακάτω, θα παρουσιάσουμε μερικές περιπτώσεις πεδίων, που έχουν σημαντική συμπύκνωση βράχου και προβλήματα καθίζησης, τις οποίες και θα αντιμετωπίσουμε με περισσότερη λεπτομέρεια.

Τοποθεσία Valhall



Εικόνα 2: Χάρτης με τη θέση της τοποθεσίας Valhall

Η τοποθεσία Valhall είναι μία ασβεστολιθική γεωδεξαμενή πετρελαίου, η οποία τοποθετείται στο κέντρο περίπου του Νορβηγικού τομέα της Βόρειας Θάλασσας.



Εικόνα 3: Πλατφόρμα παραγωγής πετρελαίου στην τοποθεσία Valhall

Αρχικά η γεωδεξαμενή βρισκόταν υπό πίεση και ήταν μη κορεσμένη. Η γεωδεξαμενή είναι σε βάθος κατά προσέγγιση 2400m από την επιφάνεια της θάλασσας και

αποτελείται από κιμωλία, ασβεστόλιθους οργανικής προέλευσης. Οι ασβεστόλιθοι στη περιοχή αυτή παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές στο πορώδες και την διαπερατότητα.

Η παραγωγή πετρελαίου και φυσικού αερίου από την τοποθεσία Valhall ξεκίνησε τον Οκτώβριο του 1982. Η συμπύκνωση της γεωδεξαμενής αναγνωρίστηκε πρώτα το 1986 όταν εντοπίστηκε η καθίζηση των εγκαταστάσεων της επιφάνειας. Σε ένα σημείο της γεωδεξαμενής ο υπολογισμός της πίεσης ήταν μόνο 3.4Μρα, κατά πολύ λιγότερη από 48.3Μρα, που είναι η πίεση των υπερκειμένων γαιών, συνεπάγοντας συμπίεση της γεωκατασκευής [3].

Με την άντληση του πετρελαίου, η γεωδεξαμενή συμπίεστηκε σημαντικά, συνεπάγοντας αστοχίες γεωτρήσεων στην γεωδεξαμενή και στη γεωκατασκευή και καθίζηση στην επιφάνεια. Πειραματικές και αριθμητικές μελέτες πραγματοποιήθηκαν για να προβλέψουν την συμπίεση της δεξαμενής και την καθίζηση του βυθού στο Valhall.

Τοποθεσία Ekofisk



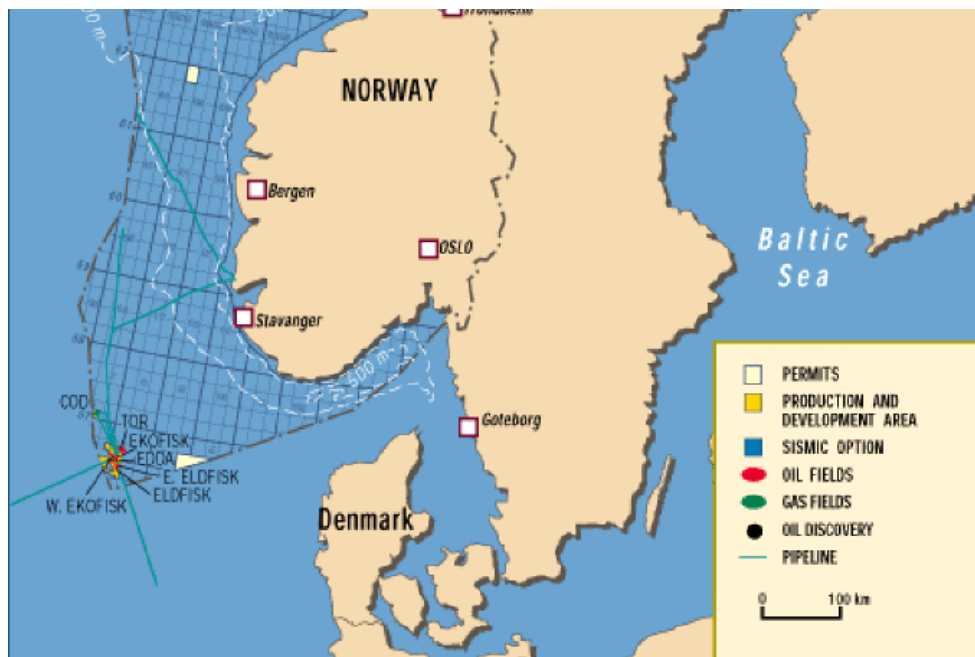
Εικόνα 4: Μία όψη της τοποθεσίας Ekofisk

Το κοίτασμα Ekofisk είναι μία γεωδεξαμενή η οποία τοποθετείται νότια στο Νορβηγικό τομέα της Βόρειας Θάλασσας. Αποτελείται από κιμωλία επίσης,



Εικόνα 5: Η πλατφόρμα παραγωγής πετρελαίου στην τοποθεσία Ekofisk

πορώδους και βρίσκεται αρχικά υπό υψηλή πίεση και φυσικό κορεσμό ο οποίος δημιουργεί ικανοποιητική διαπερατότητα. Η τοποθεσία Ekofisk βρίσκεται περίπου 9834 ft [περίπου 3000m] κάτω από την θάλασσα, καλύπτει 12000 παραγωγικά στρέμματα και προσδιορίζεται κατά μέσο όρο στα 600 ft (~180m) πάχος δεξαμενής. Η παραγωγή από το Ekofisk ξεκίνησε τον Ιούλιο του 1971. Όλο το φυσικό αέριο της γεωδεξαμενής είχε αντληθεί έως το 1977. Μετά το 1977 το φυσικό αέριο το οποίο παραγόταν επανεγχυνόταν στη γεωδεξαμενή, για την αποφυγή υποπίεσεων στη δεξαμενή, ενώ η έγχυση νερού στη γεωδεξαμενή ξεκίνησε το 1987. Η καθίζηση της επιφάνειας αρχικά παρατηρήθηκε στο Ekofisk το 1984. Κατά προσέγγιση 3 μέτρα της επιφανειακής καθίζησης είχαν παρατηρηθεί στη κορυφή της τοποθεσίας.



Εικόνα 6: Χάρτης με τη θέση της τοποθεσίας Ekofisk [5]

Η ταχύτητα καθίζησης στη περιοχή είχε μετρηθεί περίπου στα 33cm/ χρόνο. Αυτή τη στιγμή, η υποπίεση της γεωδεξαμενής υπολογίζεται να είναι η κύρια αιτία για την συμπίεση της γεωκατασκευής.

Η εισαγωγή νερού σε περιορισμένη κλίμακα, ξεκίνησε το 1987. Η βαθμιαία αύξηση της πίεσης του νερού, που πραγματοποιήθηκε με σκοπό την διατήρηση και την βαθμιαία επανάκτηση της πίεσης στη γεωδεξαμενή, αναμενόταν να μειώσει και τελικά να σταματήσει την καθίζηση στις πλατφόρμες άντλησης πετρελαίου. Έτσι καθώς η πίεση άρχισε να σταθεροποιείται το 1993, στις αρχές του 1994 υπήρξε μικρή επιρροή στη ταχύτητα της καθίζησης. Η τιμή της καθίζησης παρέμεινε ουσιαστικά ίδια κατά την διάρκεια του 1998, με την συνολική καθίζηση να πλησιάζει τα 7.8 μέτρα. Η συνεχόμενη καθίζηση μετά την αρχή του 1994, σε συνδυασμό με εργαστηριακές και επιτόπου μετρήσεις, έδειξαν ότι με τη μείωση της πίεσης πόρων είχε γίνει ένας σημαντικός μηχανισμός συμπίεσης της γεωκατασκευής.

Τοποθεσία Belridge

Το Lost Hills και το Belridge είναι τοποθεσίες πετρελαίου που βρίσκονται στην δυτική πλευρά του San Joaquin Valley, 40 μίλια Βορειοδυτικά του Bakersfield. Οι περιοχές αυτές αντιμετωπίζουν σοβαρά προβλήματα καθιζήσεων τα οποία οφείλονται στην άντληση σημαντικών ποσοτήτων πετρελαίου.



Εικόνα 7: Χάρτης με τη θέση της τοποθεσίας Belridge, ΗΠΑ

Η τοποθεσία Belridge βρίσκεται περίπου 100 χλμ. δυτικά του Bakersfield, Καλιφόρνια, ΗΠΑ. Το πετρέλαιο αντλείται μέσω στρωμάτων άμμου με υψηλό πορώδες (45% έως 70%), το οποίο οδηγεί σε υψηλή συμπίεστικότητα της γεωκατασκευής. Η παραγωγή μειώνει την πίεση της γεωδεξαμενής, επιταχύνει την καθίζηση της επιφάνειας και αυξάνει τον αριθμό των δαπανηρών αποτυχημένων γεωτρήσεων στην δεκαετία του 1980. Κατά το 1987, 10 με 15 ft (3m-5m) σωρευτικής καθίζησης της επιφάνειας υπολογίστηκε σε διάφορα μέρη της τοποθεσίας και περισσότερες από 100 γεωτρήσεις εγκαταλείφθηκαν. Στα τέλη της δεκαετίας του '80 χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος εισροής νερού υπό πίεση, για να μετριαστεί η καθίζηση και να ελαττωθεί η πιθανότητα πρόσθετων αποτυχημένων γεωτρήσεων.

Οι τιμές της καθίζησης είναι τώρα κοντά στο μηδέν. Το ποσοστό αποτυχημένων γεωτρήσεων, παρότι είναι χαμηλότερο από τη δεκαετία του 1980 είναι ακόμη σημαντικό οικονομικά και υπολογίζεται σε 2% έως 6% των ενεργών γεωτρήσεων τον χρόνο. Περίπου 1000 γεωτρήσεις έχουν αστοχήσει κατά την διάρκεια των τελευταίων 20 χρόνων παραγωγής πετρελαίου. Το κόστος των αντικαταστάσεων ανέρχεται σε εκατομμύρια δολάρια τον χρόνο και οι αντικαταστάσεις μπορούν να σταματήσουν την παραγωγή πετρελαίου προσωρινά.

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΕΦΑΛΑΙΩΝ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Στο 1^ο Κεφάλαιο της εργασίας αυτής γίνεται μία γενική θεωρητική περιγραφή του φαινομένου των καθιζήσεων από Κλασικές Θεωρίες τόσο για το ευθύ όσο και για το αντίστροφο πρόβλημα βαθιάς καθίζησης.

Στο 2^ο Κεφάλαιο της παρούσης εργασίας ασχολείται με τη μελέτη του προβλήματος βαθιάς καθίζησης, αρχικά με τη θεώρηση Litwiniszyn. Χρησιμοποιώντας τη θεώρηση Litwiniszyn για τη σχέση της κατανομής καθίζησης σε διαφορετικά οριζόντια επίπεδα της γεωκατασκευής, καταλήγουμε στη διαφορική εξίσωση Einstein-Kolmogorov, όπου η ανεξάρτητη χρονική μεταβλητή περιγράφεται από το βάθος, και με μαθηματικούς μετασχηματισμούς στο αντίστοιχο επίπεδο πρόβλημα αρχικών και συνοριακών τιμών. Το πρόβλημα επιλύεται αριθμητικά με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών για δεδομένη γεωμετρία και εδαφικά χαρακτηριστικά. Χρησιμοποιώντας την διαφορική εξίσωση Einstein – Kolmogorov σε πολικές συντεταγμένες και κατάλληλους μαθηματικούς μετασχηματισμούς επιλύεται και το αξονοσυμμετρικό πρόβλημα βαθιάς καθίζησης με τη θεώρηση Litwiniszyn. Στο δεύτερο μέρος του Κεφαλαίου 2 για την επίλυση του προβλήματος βαθιάς καθίζησης χρησιμοποιείται η Θεώρηση της Ελαστικότητας. Το επίπεδο και αξονοσυμμετρικό πρόβλημα βαθιάς καθίζησης επιλύονται αντίστοιχα χρησιμοποιώντας τη Θεωρία της Ελαστικότητας. Οι ολοκληρωτικές λύσεις που προκύπτουν υπολογίζονται αριθμητικά και συγκρίνονται με τα αποτελέσματα της Θεωρίας Litwiniszyn. Στο Παράρτημα του Κεφαλαίου εμφανίζεται μελέτη των αριθμητικών αλγορίθμων πεπερασμένων διαφορών που χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση του προβλήματος με τη θεώρηση Litwiniszyn.

Στο 3^ο Κεφάλαιο τοποθετείται το αντίστροφο πρόβλημα βαθιάς καθίζησης βασισμένο στο επίπεδο πρόβλημα αρχικών και συνοριακών τιμών της Θεωρίας Litwiniszyn. Τα αντίστροφα προβλήματα γενικά είναι μη καλώς μαθηματικά ορισμένα. Για να επιλυθούν με ευθύ τρόπο είναι απαραίτητη η χρήση κανονικοποιήσεων. Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται δύο κανονικοποιήσεις με χρήση τελεστών κανονικοποίησης: α. Η μέθοδος Lions χρήση του διαφορικού τελεστή u_{xxxx} και β. Η μέθοδος μεικτής παραγώγου που προτείνεται σε αυτή την εργασία με χρήση του διαφορικού τελεστή u_{xxxz} . Η επίλυση των αντίστροφων προβλημάτων αρχικών και συνοριακών τιμών που προκύπτουν, γίνεται αριθμητικά με χρήση κατάλληλου αλγορίθμου πεπερασμένων διαφορών. Η καλή τοποθέτηση¹ του αντιστρόφου προβλήματος μελετάται στη μορφή της γραμμικοποιημένης ανάλυση ευστάθειας διαφορικής εξίσωσης².

Στο 4^ο Κεφάλαιο μελετάται η ευστάθεια και η σύγκλιση του αριθμητικού αλγορίθμου για το αντίστροφο πρόβλημα. Στην αρχή του Κεφαλαίου γίνεται θεωρητική αναφορά γενικά στην μελέτη ευστάθειας αριθμητικών αλγορίθμων αλλά και ειδικά στη γενικευμένη συνθήκη ευστάθειας von Neumann. Χρησιμοποιώντας τη συνθήκη ευστάθειας von Neumann, μελετάται η ευστάθεια του αριθμητικού αλγορίθμου για το αντίστροφο πρόβλημα βαθιάς καθίζησης και για τις δύο κανονικοποιήσεις που αναφέρθηκαν στη προηγούμενη παράγραφο. Η μελέτη σύγκλισης αριθμητικής και ακριβούς λύσης μελετάται στη βάση της Θεωρίας του σφάλματος προσέγγισης³. Στο τελευταίο μέρος του Κεφαλαίου παρουσιάζεται η θεωρητική αναφορά του σφάλματος προσέγγισης καθώς και μελέτη αυτού που αφορά στο αντίστροφο πρόβλημα και για τις δύο μεθόδους κανονικοποίησης.

Στο τέλος της εργασίας, συνοψίζονται τα αποτελέσματα της έρευνας στο πρόβλημα βαθιάς καθίζησης αλλά και πιθανοί ερευνητικοί προβληματισμοί για το μέλλον. Στο Παράρτημα εμφανίζονται οι κώδικες λογισμικού για την αριθμητική επίλυση ή την αριθμητική ολοκλήρωση αντίστοιχων εκφράσεων αναλυτικών επιλύσεων.

¹ Αγγλ. *Well-posedness*

² Αγγλ. *Linear Stability Analysis*

³ Αγγλ. *Truncation Error*

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ

1. **Dimova, V.L.**, *Some Direct and Inverse Problems in Applied Geomechanics*, University of Mining & Geology, Sofia, 1990.
2. **Cales G. et al** (2001), *Subsidence remediation – Extending Well life through the Use of Solid Expandable Casing systems*, 2001 National AADE Technical Conference, Houston, Texas. <http://www.aade.org/technicalpapers/2001-conference/emerging/AADE%2024.pdf>
3. **Tao Shu's Research** (2002), *Project report – Introduction*, Stanford University. <http://pangea.stanford.edu/~tshu/section1.pdf>
4. **Morton R., Purcell N.** (2002), *Wetland Subsidence, Fault Reactivation, and Hydrocarbon Production in the U.S. Gulf Coast Region*, U.S. Geological Survey Fact Sheet FS-091-01. <http://pubs.usgs.gov/fs/fs091-01/>
5. **Eni** – Exploration and Production – Norway. <http://www.eni.it/english/strategie/esplorazione/norvegia.html>

