Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑΣ-ΠΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ-ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΓΕΩΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΒΙΡΓΙΝΙΑ ΚΑΡΑΓΙΑΝΝΑΚΟΥ

Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΑΣ ΤΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΣΤΙΣ ΚΑΘΙΖΗΣΕΙΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ ΑΠΟ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2024

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

ΒΙΡΓΙΝΙΑ ΚΑΡΑΓΙΑΝΝΑΚΟΥ
Φοιτητής Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ: 5992

Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΑΣ ΤΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΣΤΙΣ ΚΑΘΙΖΗΣΕΙΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ ΑΠΟ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας, Τομέα Ορυκτολογία- Πετρολογία- Κοιτασματολογία

Επιβλέπων

Ερνέστος Σαρρής, Επίκουρος Καθηγητής

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

© Βιργινία Καραγιαννάκου, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Ορυκτολογίας- Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας, 2024
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.
Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΑΣ ΤΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΣΤΙΣ ΚΑΘΙΖΗΣΕΙΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ ΑΠΟ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ– *Διπλωματική Εργασία*

© Virginia Karagiannakou, School of Geology, Dept. of Minerology- Petrology- Economic Geology, 2024
All rights reserved.
THE INFLUENCE OF STRESS ANISOTROPY ON RESERVOIR COMPACTION FROM HYDROCARBON PRODUCTION – *Bachelor Thesis*

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.

Εικόνα Εξωφύλλου: https://www.energia.gr/article/145666/to-diethnes-symvatiko-plaisio-ths-ereynas-kai-exoryxhs-ton-ypothalassion-koitasmaton-ydrogonanthrakon

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
ΑΠΘ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ 8

ABSTRACT 9

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ 10

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ-ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ 11

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ 14

1.1 Γενικά 14

1.2 Σημαντικότητα προβλήματος 14

1.3 Σκοπός 15

1.4 Μεθοδολογία Πεπερασμένων στοιχείων 15

1.5 Περιγραφή Διπλωματικής Εργασίας 15

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ 17

2.1: Εισαγωγή 17

2.2 Γένεση, δομή παγίδευσης υδρογονανθράκων και μηχανισμοί κίνησης ρευστών. 17

2.3 Δυνάμεις που ασκούνται κατά τον μηχανισμό κίνησης συμπιεστότητας 20

2.4: Συντελεστής τοξοειδής τάσης και μορφολογία τόξου 23

2.5 Επιρροή θερμότητας 24

2.6: Σημαντικές θεωρίες που αναπτύχθηκαν 24

2.7: Σχέση τάσης- καταπόνηση και αντοχή 27

2.8: Συντελεστής κάθετης συμπύκνωσης 28

2.9 Η αλλαγή συμπίεσης ανάλογα με την κοκκομετρία 29

2.10 Βαθμός συμπίεσης εδαφών 29

2.11 Δευτερεύον μηχανισμοί Συμπύκνωσης 30

2.12 Στρωματογραφία της λεκάνης Πρίνου-Καβάλας 31

2.13 Γεωτεκτονική εξέλιξη της λεκάνη Πρίνου-Καβάλας 34

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
ΑΠΘ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ 35

3.1 Εισαγωγή 35

3.2: Συντελεστής Young 35

3.3: Λόγος Poisson 36

3.4: Πρόγραμμα Πεπερασμένων Στοιχείων 37

3.5: Τιμές Παραμέτρων 39

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ 43

4.1: Εισαγωγή 43

4.2: Ανάλυση αποτελεσμάτων σε συνθήκες κανονικού ρήγματος. 43

4.3: Ανάλυση Αποτελεσμάτων σε συνθήκες ανάστροφου ρήγματος. 50

4.4: Προτάσεις για εξέλιξη εργασίας. 58

Αγγλική Βιβλιογραφία 59

Ελληνική Βιβλιογραφία 63

Πηγές διαδικτύου 64

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΑΣ ΤΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΣΤΙΣ ΚΑΘΙΖΗΣΕΙΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ ΑΠΟ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ

Καραγιαννάκου Βιργινία

Με την χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS δημιουργήθηκε ένα μοντέλο ανάλυσης μετακινήσεων συνεπεία άντλησης ρευστών. Στο μοντέλο προσομοιώθηκε η καθίζηση του εδάφους κατά την παραγωγή υδρογονανθράκων βασιζόμενοι στη θεωρία της ελαστικότητας. Συγκεκριμένα το πεδίο παραγωγής βρίσκεται στον Ελλαδικό χώρο, στο θαλάσσιο τμήμα μεταξύ του νησιού της Θάσος και της μάζας Ροδόπης. Η παραγωγή υδρογονανθράκων έγινε από ψαμμιτικό ταμιευτήρα που βρίσκεται κάτω από τρείς εβαποριτικές σειρές υπερκειμένων πετρωμάτων. Η ανάλυση έγινε σε δυο συνθήκες, για συνθήκες κανονικού ρήγματος και για συνθήκες ανάστροφου ρήγματος. Για κάθε συνθήκη εφαρμόστηκαν τρεις διαφορετικές παραδοχές ανάλογα με τον όγκο παραγωγής ρευστού, η κάθε μια αναλύθηκε για διαφορετικούς λόγους ανισοτροπίας, από ισότροπο έως πολύ ανίσοτροπο.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

ABSTRACT

THE INFLUENCE OF STRESS ANISOTROPY ON RESERVOIR COMPACTION FROM HYDROCARBON PRODUCTION

Karagiannakou Virginia

A finite element geomechanical model was created using ABAQUS software to analyze the compaction over a hydrocarbon reservoir at Prinos field. The model simulated the subsidence of the rocks as a result of hydrocarbon production. Specifically, the production field is located in Greece, in the sea area between the island of Thasos and the well-known Rhodope mass. Hydrocarbon production was simulated from a sandstone reservoir and three overburden evaporite series. The analysis was performed for two cases, for normal fault and for reverse fault stress conditions. For each case, three different assumptions were applied depending on the volume of fluid production, each one analyzed for different anisotropy ratios, from isotropic to very anisotropic.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
ΑΠΘ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για την πολύτιμη συμβολή του καθηγητή και επιβλέπων της εργασίας μου, τον κύριο Ερνέστο Σαρρή, υπάρχει η ανάγκη να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου. Η βοήθεια του να βρούμε το θέμα της εργασίας μου, η διαρκής καθοδήγηση του, οι γνώσεις και ο χρόνος που παρείχε ήταν καθοριστικοί παράγοντες που συνέδραμαν στην ερευνητική εργασία. Τέλος η βοήθεια του με την παροχή του εμπορικού πακέτου ABAQUS συνέβαλε σημαντικά και αν δεν υπήρχε αυτή η βοήθεια δεν θα ήταν εφικτή η ολοκλήρωση της εργασίας.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
ΑΠΘ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ-ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ

Γράφημα 2.1: Ταξινόμηση ρευστών εντός του πετρώματος ταμιευτήρα 19

Γράφημα 2.2: Οι τάσεις που ασκούνται σε ένα κορεσμένο πορώδες πέτρωμα. 21

Γράφημα 2.3: Φαινόμενο τοξοειδούς τάσης, αναπαράσταση τάσεων που ασκούνται και καθιζήσεις. 22

Γράφημα 2.4: Στρωματογραφική Στήλη λεκάνης Πρίνου- Καβάλας. 33

Γράφημα 2.5: Στρωματογραφική Στήλη λεκάνης Πρίνου- Καβάλας. 33

Γράφημα 3.1: Απεικόνιση μοντέλου σε μορφή πλέγματος. 38

Γράφημα 3.2: Απεικόνιση μοντέλου σε μορφή υλικών..... 38

Γράφημα 3.3: Απεικόνιση μοντέλου σε μορφή συνοριακών συνθηκών. 39

Γράφημα 3.4: Αποτύπωση τομών των διαγραμμάτων και της έκτασης της λεκάνης 41

Γράφημα 4.1: Καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους για ΔΗ=0,01 m για διαφορετικούς λόγους ανισοτροπίας σε συνθήκες κανονικού ρήγματος. 43

Γράφημα 4.2: Καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους για ΔΗ=0,05m για διαφορετικούς λόγους ανισοτροπίας σε συνθήκες κανονικού ρήγματος. 44

Γράφημα 4.3: : Καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους για ΔΗ=0,1 m για διαφορετικούς λόγους ανισοτροπίας σε συνθήκες κανονικού ρήγματος. 44

Γράφημα 4.4: Μετακινήσεις στο κεντρικό τμήμα του ταμιευτήρα έως την επιφάνεια για ΔΗ=0,01 m για διαφορετικούς λόγους ανισοτροπίας σε συνθήκες κανονικού ρήγματος. 46

Γράφημα 4.5: Μετακινήσεις στο κεντρικό τμήμα του ταμιευτήρα έως την επιφάνεια για ΔΗ=0,05 m για διαφορετικούς λόγους ανισοτροπίας σε συνθήκες κανονικού ρήγματος 46

Γράφημα 4.6: Μετακινήσεις στο κεντρικό τμήμα του ταμιευτήρα έως την επιφάνεια για ΔΗ=0,1 m για διαφορετικούς λόγους ανισοτροπίας σε συνθήκες κανονικού ρήγματος. 47

Γράφημα 4.7: Μετακινήσεις στην επαφή του ταμιευτήρα με τα γύρω πετρώματα για ΔΗ=0,01 m για διαφορετικούς λόγους ανισοτροπίας σε συνθήκες κανονικού ρήγματος. 48

Γράφημα 4.8 : Μετακινήσεις στην επαφή του ταμιευτήρα με τα γύρω πετρώματα για ΔΗ=0,05 m για διαφορετικούς λόγους ανισοτροπίας σε συνθήκες κανονικού ρήγματος. 48

Γράφημα 4.9: Μετακινήσεις στην επαφή του ταμιευτήρα με τα γύρω πετρώματα για ΔΗ=0,1 m για διαφορετικούς λόγους ανισοτροπίας σε συνθήκες κανονικού ρήγματος. 49

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Γράφημα 4.10: Καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους για ΔΗ=0,01 m για διαφορετικούς λόγους ανισοτροπίας σε συνθήκες ανάστροφου ρήγματος. 50

Γράφημα 4.11: Καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους για ΔΗ=0,05 m για διαφορετικούς λόγους ανισοτροπίας σε συνθήκες ανάστροφου ρήγματος. 51

Γράφημα 4.12: Καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους για ΔΗ=0,1 m για διαφορετικούς λόγους ανισοτροπίας σε συνθήκες ανάστροφου ρήγματος. 51

Γράφημα 4.13: Μετακινήσεις στο κεντρικό τμήμα του ταμιευτήρα έως την επιφάνεια για ΔΗ=0,01 m για διαφορετικούς λόγους ανισοτροπίας σε συνθήκες ανάστροφου ρήγματος. 53

Γράφημα 4.14: Μετακινήσεις στο κεντρικό τμήμα του ταμιευτήρα έως την επιφάνεια για ΔΗ=0,05 m για διαφορετικούς λόγους ανισοτροπίας σε συνθήκες ανάστροφου ρήγματος. 53

Γράφημα 4.15: Μετακινήσεις στο κεντρικό τμήμα του ταμιευτήρα έως την επιφάνεια για ΔΗ=0,1 m για διαφορετικούς λόγους ανισοτροπίας σε συνθήκες ανάστροφου ρήγματος. 54

Γράφημα 4.16: Μετακινήσεις στην επαφή του ταμιευτήρα με τα γύρω πετρώματα για ΔΗ=0,01 m για διαφορετικούς λόγους ανισοτροπίας σε συνθήκες ανάστροφου ρήγματος. 55

Γράφημα 4.17: Μετακινήσεις στην επαφή του ταμιευτήρα με τα γύρω πετρώματα για ΔΗ=0,05 m για διαφορετικούς λόγους ανισοτροπίας σε συνθήκες ανάστροφου ρήγματος. 56

Γράφημα 4.18: Μετακινήσεις στην επαφή του ταμιευτήρα με τα γύρω πετρώματα για ΔΗ=0,1 m για διαφορετικούς λόγους ανισοτροπίας σε συνθήκες ανάστροφου ρήγματος. 56

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
ΑΠΘ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1: Τιμές γεωφυσικών και γεωμηχανικών παραμέτρων. 40

Πίνακας 3.2: Τιμές πυκνότητας, σταθεράς Poisson και συντελεστή Young για τον ταμιευτήρα και τα γύρω πετρώματα. 40

Πίνακας 3.3: Τιμές Ανισοτροπίας σε συνθήκη κανονικού ρήγματος. 41

Πίνακας 3.4: Τιμές Ανισοτροπίας σε συνθήκη Ανάστροφου Ρήγματος. 42

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Η εξόρυξη υδρογονανθράκων είναι απαραίτητη αφού η χρήση της είναι κομμάτι της καθημερινότητας, αποτελώντας κύρια πηγή ενέργειας για την παραγωγή καυσίμων. Στην Ελλάδα υπάρχουν αρκετά κοιτάσματα, τα περισσότερα από τα οποία είναι ανεκμετάλλευτα, ένα κοίτασμα στο οποίο κατά την διάρκεια εικοσαετίας γίνετε εκμετάλλευση είναι στην λεκάνη Πρίνου-Καβάλας στο θαλάσσιο τμήμα του Βόρειου Αιγαίου. Στην εργασία θα εξετασθεί η καθίζηση του εδάφους στην περιοχή που αναφέρθηκε η οποία προκαλείται από την εξόρυξη υδρογονανθράκων σε σχέση με την μεταβολή συγκεκριμένων παραγόντων στην περιοχή αυτή με την βοήθεια του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων, ABAQUS.

1.2 Σημαντικότητα προβλήματος

Η εκμετάλλευση των υδρογονανθράκων, παρόλο την αναγκαιότητα της, επιφέρει σημαντικά προβλήματα στο περιβάλλον κατά συνέπεια και στον άνθρωπο, ιδίως όταν η περιοχή εκμετάλλευσης επηρεάζει μια αστική περιοχή, απαραίτητο είναι κατά την διαδικασία να έχει πραγματοποιηθεί λεπτομερής έρευνα και να έχουν ληφθεί τα απαραίτητα μέτρα πρόληψης. Μια σημαντική επίπτωση της διαδικασίας αυτής είναι η καθίζηση του εδάφους με τον μηχανισμό κίνησης συμπιεστότητας. Στον μηχανισμό αυτόν αφαιρούνται τα ρευστά που υπάρχουν στο πορώδες πέτρωμα του ταμιευτήρα και ανεβαίνουν στην επιφάνεια με τις γεωτρήσεις και ως αποτέλεσμα της διαδικασίας δημιουργείται κενός χώρος εντός των πόρων του πετρώματος, αλλάζοντας το καθεστώς των τάσεων και έτσι το έδαφος οδηγείται σταδιακά σε καθίζηση, συγκεκριμένα μειώνεται η πίεση πόρων του πετρώματος και αυξάνονται οι ενεργές τάσεις, δηλαδή οποιαδήποτε παράμετρος αλλάξει θα επηρεάσει και την ισορροπία των τάσεων που ασκούνται. Η μεταβολή του ανάγλυφου μπορεί να συνεχιστεί αφού έχει σταματήσει η εξόρυξη και έχει εγκαταλειφτεί η γεώτρηση, γεγονός που καθιστά την περιοχή επικίνδυνη και θα πρέπει να υπάρχει διαρκής παρακολούθηση αυτής.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

1.3 Σκοπός

Ο κύριος σκοπός της εργασίας είναι η δημιουργία μοντέλου της καθίζησης του εδάφους και η καθίζηση και οι μετακινήσεις που θα διαμορφωθούν στο έδαφος ανάλογα με τις συνθήκες που θέσαμε, ως κάθετη τάση μεγαλύτερη από την οριζόντια και έπειτα με την οριζόντια τάση μεγαλύτερη από την κάθετη τάση. Οι σχέσεις αυτές αναλύθηκαν ως προς τον όγκο ρευστού που θα αντληθεί από τον ταμιευτήρα και έπειτα η μορφή του εδάφους που θα λάβει σε κάθε συνθήκη ανάλογα με τον λόγο ανισοτροπίας.

1.4 Μεθοδολογία Πεπερασμένων στοιχείων

Η χρήση των μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων είναι ένα σημαντικό εργαλείο για την επίλυση προβλημάτων του κλάδου της γεωμηχανικής και άλλων κλάδων. Αποτελεί μια δισδιάστατη και τρισδιάστατη απεικόνιση του μοντέλου επίλυσης. Το σώμα που έχει σχεδιαστεί, μέσω της διακριτοποίησης, αποτελείται από μικρότερα σωματίδια, <<στοιχεία>>, τα οποία έχουν καθορισμένο γεωμετρικό σχήμα, είτε τριγωνικό είτε τετραγωνικό, στο σημείο σύνδεσης τους βρίσκεται, κατά πλειοψηφία, στα άκρα των στοιχείων και ονομάζονται <<κόμβοι>>, ο αριθμός τους πρέπει να είναι συγκεκριμένος. Όσο περισσότερα είναι τα στοιχεία, κατά συνέπεια και οι κόμβοι, τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια επιτυγχάνεται στην μέθοδο. Έπειτα γίνετε η δημιουργία του προσομοιώματος, επιλέγονται οι κατάλληλες συναρτήσεις και γίνετε προσθήκη των χαρακτηριστικών και των συνοριακών συνθηκών. Έπειτα επιλύεται το μαθηματικό σκέλος με την εύρεση αποτελεσμάτων από τις εξισώσεις και τον υπολογισμό των μεταβλητών στους κόμβους. Τελικό στάδιο της διαδικασίας είναι η τελική επεξεργασία και η εύρεση αποτελεσμάτων των τάσεων- παραμορφώσεων, η μορφή τους είναι ως αριθμητική και ως γραφική. (Σολωμού, 2018)

1.5 Περιγραφή Διπλωματικής Εργασίας

Στο τμήμα του Βόρειου Αιγαίου της Ελλάδος ανάμεσα στο νησί της Θάσου και στην μάζα της Ροδόπης εξελίσσεται παραγωγή υδρογονανθράκων. Στην περιοχή αυτή, μέσω της εφαρμογής πεπερασμένων στοιχείων, ABAQUS, σχεδιάζεται με υπολογιστικά μέσα το μοντέλο με τον,

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
ΑΠΘ

κατά βάση, ψαμμιτικό ταμιευτήρα κυκλικού σχήματος και τα υπερκείμενα εβαποριτικά στρώματα της εβαποριτικής ομάδας ως πέτρωμα- κάλυμμα και με την βοήθεια διάφορων γραφημάτων θα αξιολογηθεί η σχέση ορισμένων παραμέτρων που θα θέσουμε και τον τρόπο με τον οποίο θα επηρεαστεί το μοντέλο που έχει σχεδιαστεί.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1: Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται ο τρόπος δημιουργίας των κοιτασμάτων υδρογονανθράκων, την αλληλουχία των στρωμάτων και κάποιες ιδιότητες που πρέπει να πληρούν ώστε να μπορούν τα κοιτάσματα να αποθηκευτούν και να παραμείνουν στο υπέδαφος, χωρίς να μετακινούνται στα πλευρικά και στα ανώτερα πετρώματα. Έπειτα εξηγούνται οι μηχανισμοί κίνησης ρευστών και αναλύεται ο μηχανισμός κίνησης συμπιεστότητας. Συγκεκριμένα, η άσκηση δυνάμεων γίνεται από εξωτερικούς και από εσωτερικούς παράγοντες, πραγματοποιείται μια νέα κατάσταση ισορροπίας, στην οποία αλλάζει η τιμή των δυνάμεων σε σχέση με τις αρχικές, συνέπεια αυτών είναι να εμφανίζεται μια καινούργια δομή του εδάφους ως αποτέλεσμα της καθίζησης. Εκτός από την αλλαγή των τάσεων αναλύονται μερικές θεωρίες και οι συντελεστές τοξοειδούς παραμορφώσεις και συμπύκνωσης. Επίσης εξηγούνται και μερικοί παράγοντες που επηρεάζουν τα πετρώματα και τον βαθμό συμπίεσης και περιγράφεται ο δευτερεύον μηχανισμός κίνησης. Τέλος αναφέρονται τα πετρώματα της στρωματογραφικής στήλης στην λεκάνη Πρίνου-Καβάλας, η οποία είναι η περιοχή μελέτης της εργασίας και αναλύεται η γεωτεκτονική εξέλιξη της περιοχής κατά τον γεωλογικό χρόνο.

2.2 Γένεση, δομή παγίδευσης υδρογονανθράκων και μηχανισμοί κίνησης ρευστών.

Οι υδρογονάνθρακες είναι από τους σημαντικότερους πόρους της Γης αφού αποτελεί την σπουδαιότερη πηγή παραγωγής ενέργειας. Το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο είναι υδρογονάνθρακες οι οποίο προέρχονται από την αποσύνθεση της οργανικής ύλης σε κηρογόνο. Το κηρογόνο καταβυθίζεται με ιζήματα μεγάλου πάχους σε ιζηματογενείς λεκάνες, κατ' επέκταση με σταδιακή αύξηση της πίεσης και της θερμοκρασίας. Τα ιζήματα που αποθηκεύουν το κηρογόνο ονομάζονται μητρικά πετρώματα και συνήθως είναι πηλόλιθοι και ιλυόλιθοι. Στο περιβάλλον που θα αποτεθεί θα πρέπει εκτός από την παρουσία υδρογονανθράκων να υπάρχει ο επαρκής χρόνος για τον σχηματισμό τους, έλλειψη οξυγόνου και κατάλληλες θερμοκρασίες. Για την δημιουργία πετρελαίου οι θερμοκρασίες κυμαίνονται στους 60°C-160°C και για το φυσικό αέριο 160°C-200°C, ονομάζονται «παράθυρο πετρελαίου» και «παράθυρο φυσικού αερίου»

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

αντίστοιχα, με την άνοδο της θερμοκρασίας και της πίεσης το πέτρωμα περνάει από τα στάδια της διαγένεσης, της μεταγένεσης και της καταγένεσης και το αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής είναι η ωρίμανση, δηλαδή το κηρογόνο μετατρέπεται είτε σε πετρέλαιο είτε σε φυσικό αέριο. Εξαιτίας του μεγαλύτερου όγκου που καταλαμβάνει ο υδρογονάνθρακας σε σχέση με το κηρογόνο μεταναστεύει στα γειτονικά πετρώματα (Γεωργακόπουλος, 2022)

Απαραίτητο για την ύπαρξη κοιτάσματος υδρογονανθράκων είναι η ύπαρξη μιας συγκεκριμένης δομής στο πέτρωμα που φιλοξενεί το κοίτασμα και στα γύρω πετρώματα. Οι υδρογονάνθρακες μετακινούνται από το μητρικό πέτρωμα μέχρι να αποθηκευτούν σε ένα πορώδη και διαπερατό πέτρωμα, πρωτογενή μετανάστευση, το οποίο μπορεί να περιέχει νερό και ο διαχωρισμός τους γίνετε με βάση την πυκνότητα τους, στο κατώτερο μέρος βρίσκεται το νερό, στο ανώτερο βρίσκεται το φυσικό αέριο και ενδιάμεσα το πετρέλαιο (Σχήμα 1). Το πέτρωμα που αποθηκεύει αυτά τα ρευστά ονομάζεται πέτρωμα ταμιευτήρας και συνήθως είναι ψαμμίτες, ασβεστόλιθοι, κροκαλοπαγή. Μέσα στον ταμιευτήρα τα ρευστά κινούνται λόγω της διαπερατότητας τους, δευτερογενής μετανάστευση, και για να μην διαφύγουν στα ανώτερα στρώματα ή στην επιφάνεια και πλευρικά καλύπτονται από αδιαπέρατα ή πολύ χαμηλής διαπερατότητας στρώματα, το στρώμα που βρίσκεται πάνω από τον ταμιευτήρα ονομάζεται πέτρωμα κάλυμμα για παράδειγμα σχιστόλιθοι και εβαπορίτες. Η ακολουθία του διαπερατού ταμιευτήρα και του αδιαπέρατου πετρώματος καλύμματος, ονομάζεται στρωματογραφική παγίδευση υδρογονανθράκων. Τα αντίκλινα, τα ρήγματα και οι δομές πυρήνων άλατος είναι δομική παγίδευση υδρογονανθράκων. (Γεωργακόπουλος, 2022)

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Γράφημα 2.1: Ταξινόμηση ρευστών εντός του πετρώματος ταμιευτήρα

Η δομή παγίδευσης εμποδίζει την άνοδο των ρευστών, ο τρόπος με τον οποίο ο άνθρωπος εξορύσσει το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο στην επιφάνεια είναι μέσω γεωτρήσεων. Αρχικό στάδιο είναι η έρευνα, τα μέσα για να πραγματοποιηθεί είναι με τηλεπισκόπηση, με γεωφυσικές μεθόδους και με ερευνητικές γεωτρήσεις. Έπειτα είναι το παραγωγικό στάδιο με την λειτουργία παραγωγικών γεωτρήσεων (Γεωργακόπουλος, 2022). Η ροή των ρευστών από τον ταμιευτήρα στην γεώτρηση γίνετε μέσω μηχανισμών κίνησης, οι σπουδαιότεροι είναι η κίνηση νερού, η κίνηση αέριου διαλύματος, η κίνηση διαχωρισμού καλύμματος αερίου και η κίνηση βαρύτητας, σπανιότερα σε ένα μικρό ποσοστό είναι η κίνηση συμπίεσης πετρώματος. Αναλυτικότερα:

- Κίνηση νερού: προέρχεται από τον υδροφόρο ορίζοντα, δηλαδή το νερό που έχει συσσωρευτεί υπόγεια. Κατά την εξόρυξη υδρογονανθράκων, μειώνεται η ποσότητα τους δημιουργώντας ένα κενό που συμπληρώνεται από νερό το οποίο προέρχεται είτε στο κάτω μέρος του πετρώματος είτε από τις περιφερειακές πηγές είτε περικυκλώνοντας τον ταμιευτήρα.
- Κίνηση αέριου διαλύματος: Όταν η πίεση εντός του ταμιευτήρα είναι μεγαλύτερη από την πίεση στο σημείο των φυσαλίδων τότε στους πόρους του κοιτάσματος υπάρχει μόνο η υγρή φάση. Όταν η πίεση πέφτει κάτω από το σημείο των φυσαλίδων υπάρχει η αέρια και η υγρή φάση μέσα στο διάλυμα, έτσι μειώνεται το ιξώδες και μπορεί να αυξηθεί ο ρυθμός παραγωγής.
- Κίνηση καλύμματος αερίου: Πρωτογενές κάλυμμα αερίου ονομάζεται όταν η πίεση του ταμιευτήρα είναι μικρότερη από την πίεση του σημείου φυσαλίδων και υπάρχει το αέριο κάλυμμα κατά την αρχική παραγωγή.

  Δευτερογενής κάλυμμα αερίου: Δεν υπάρχει το αέριο κάλυμμα κατά την αρχική παραγωγή. Το αέριο και το υγρό βρίσκονταν ταυτόχρονα στο διάλυμα, με την συνέχεια της πτώσης της πίεσης του ταμιευτήρα το αέριο διαχωρίζεται από το υγρό και καταλαμβάνει τον ανώτερο χώρο.
- Κίνηση βαρύτητας: Λόγω διαφοράς πυκνότητας σχηματίζεται διφασική περιοχή μεταξύ της αέριας φάσης, που καταλαμβάνει τα ανώτερα σημεία και της υγρής φάσης.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

- Κίνηση Συμπιεστότητας Πετρώματος: Η παραγωγή ρευστών προκαλεί μείωση της πίεσης του ταμιευτήρα με αποτέλεσμα να μειώνεται ο όγκος των πόρων.

Συνήθως οι μηχανισμοί αυτοί λειτουργούν συνδυαστικά, δηλαδή με περισσότερο από έναν μηχανισμό, ο καθένας παράγει με δικό του ρυθμό εξαρτώμενοι από τον χρόνο και την θέση του φρέατος.

2.3 Δυνάμεις που ασκούνται κατά τον μηχανισμό κίνησης συμπιεστότητας

Ο μηχανισμός κίνησης συμπιεστότητας πετρώματος αν και είναι σπάνιος σε πολλές περιπτώσεις έχει δημιουργήσει σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα λόγο ανθρωπογενών αίτιων όπως δημιουργία ή επανενεργοποίηση ρηγμάτων, καθίζηση εδάφους, ρωγμάτωση και μείωση ακεραιότητας πετρώματος καλύμματος, κατάρρευση του περιβλήματος. Σημαντικές επιπτώσεις έχει όταν τα φαινόμενα αυτά συμβαίνουν σε αστική περιοχή. Κάποια προβλήματα μπορεί να εμφανιστούν και αφού τελειώσει η παραγωγή και εγκαταλειφτεί η γεώτρηση όπως η καθυστερημένη καθίζηση του εδάφους, παρ' όλο που σταματάει η ροή ρευστών του ταμιευτήρα στην επιφάνεια η μείωση πίεσης πόρων εξακολουθεί να συμβαίνει σε μικρότερο βαθμό. (Khurshid et al., 2015)

Οι εξωτερικές δυνάμεις που ασκούνται στον ταμιευτήρα είναι η κατακόρυφη ή λιθοστατική τάση σ_v η οποία αντιπροσωπεύει την δύναμη που ασκεί το βάρος των υπερκείμενων και υπολογίζεται:

$$\sigma_v = \gamma * h \qquad (2.1)$$

όπου γ συμβολίζει τον λόγο της τοξοειδής τάσης και h: το ύψος του ταμιευτήρα από την επιφάνεια και ο υπολογισμός της γίνετε με την μέτρηση πυκνότητας με την βοήθεια καλωδιακών καταγραφών. Ακόμη ασκείται η ελάχιστη οριζόντια τάση σ_h η οποία λογαριάζεται με τον τύπο

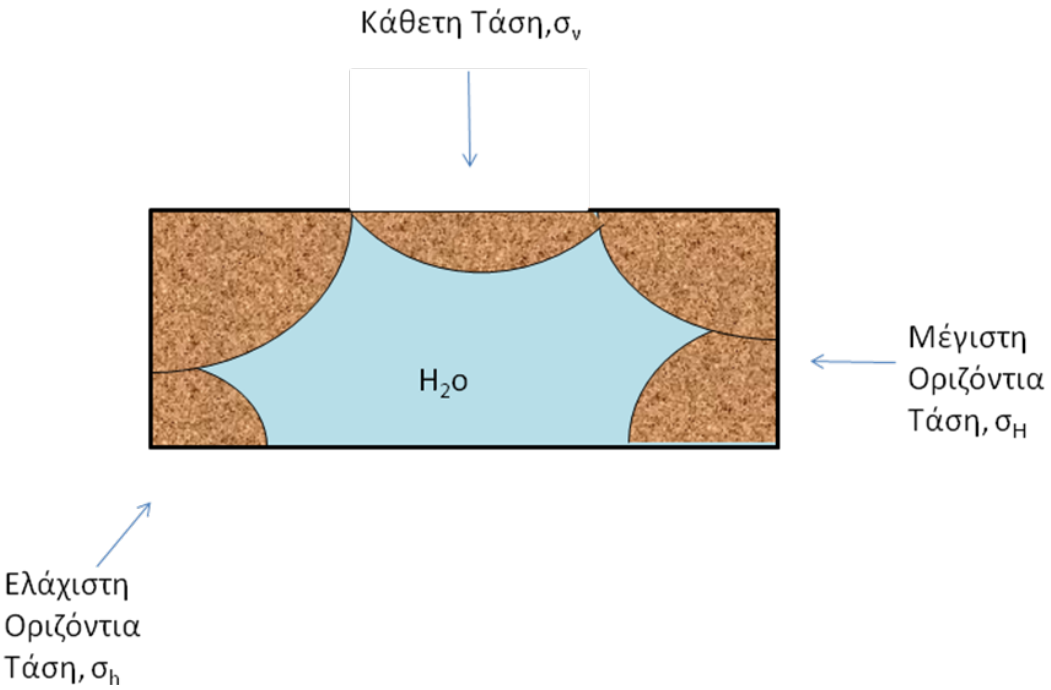
$$\sigma_h = \sigma_v * K \qquad (2.2)$$

K ονομάζεται ο συντελεστής πλευρικών ωθήσεων και βρίσκεται από μετρήσεις υδραυλικής ρωγμάτωσης. Τέλος, η μέγιστη οριζόντια τάση σ_H όπου ο λόγος της με την οριζόντια ελάχιστη τάση είναι ίσος με μια σταθερά. Παρατηρείται μια εξάρτηση μεταξύ των δυνάμεων και ονομάζεται συνοριακές συνθήκες και οι τάσεις πάνω στο πέτρωμα αναπαριστώνται στο Σχήμα 2. Οι δυνάμεις αυτές πραγματοποιούνται στην αρχική κατάσταση του πετρώματος, όπου η

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

ανθρώπινη παράμετρος δεν υπάρχει και το σύστημα δέχεται τις φυσικές τάσεις από τα γύρω πετρώματα. Οι τάσεις δεν παραμένουν ίδιες με την διατάραξη της ισορροπίας, συγκεκριμένα θα δημιουργηθούν νέες τάσεις, αντίστοιχες με αυτές που αναφέρθηκαν η διαφορά τους έγκειτε στην αλλαγή της τιμής τους, τις καινούργιες τιμές τάσεων αναπτύχθηκε μια θεωρία από τους Biot και Wills το 1957, η οποία θα εξηγηθεί παρακάτω.



Γράφημα 2.2: Οι τάσεις που ασκούνται σε ένα κορεσμένο πορώδες πέτρωμα.

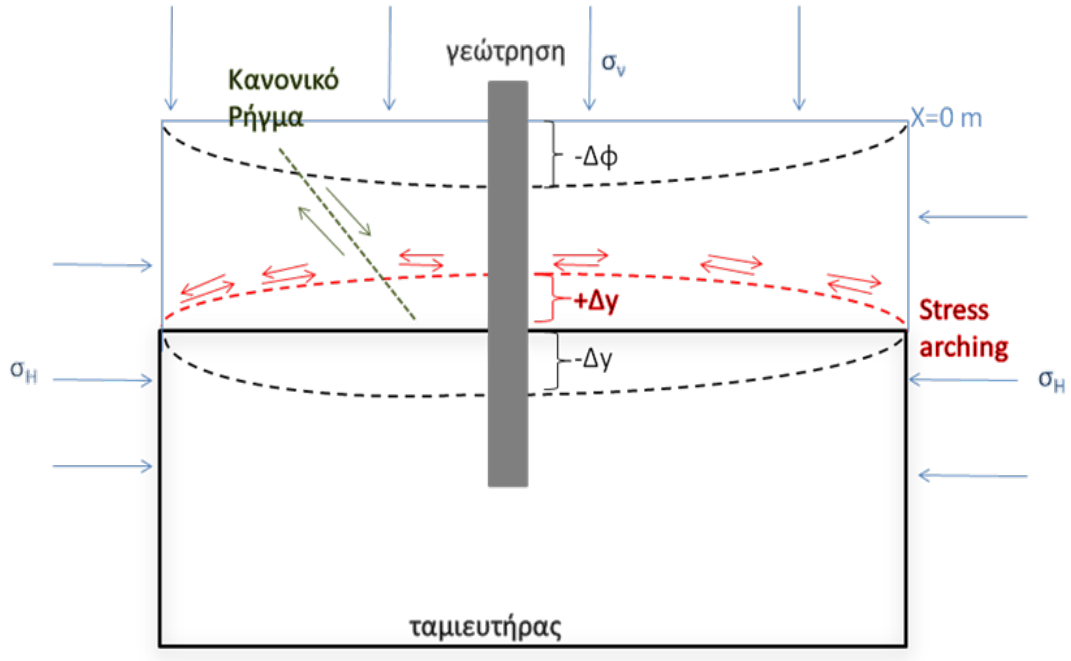
Όταν ασκούνται μεγάλες δυνάμεις στο πέτρωμα, οδηγείται σε ανακατανομή των κόκκων και προκαλεί μετακίνηση από το σταθερό υπόβαθρο, τότε αναπτύσσονται δυνάμεις διάτμησης μεταξύ της μάζας που κινείται και του εδάφους που ολισθαίνει ώστε να συγκρατήσει την μάζα που μετακινείται στο αρχικό της σημείο, οι δυνάμεις αυτές οφείλονται στην αύξηση της εσωτερικής δύναμης και της δύναμης τριβής. Ανάλογα με την φορά της κίνησης, θα κινηθεί προς τα κάτω ή προς τα πάνω, η διατμητική αντίσταση θα δράσει αντίθετα και η πίεση θα μειωθεί και θα αυξηθεί αντίστοιχα (Tien, 1996).

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
ΑΠΘ

Μεταβολές κατά την άσκηση δυνάμεων αναμένονται και εντός του πετρώματος. Η αύξηση των τάσεων κατά την εξόρυξη υδρογονανθράκων προκαλεί απώλεια ρευστών εντός του ταμιευτήρα, με αποτέλεσμα την μείωση όγκου των πόρων και αλλαγές της τάσης σκελετού του πετρώματος, ενεργές τάσεις. Με την μεταβολή των δυο παραπάνω τάσεων διαφοροποιείται η συνολική τάση στον ταμιευτήρα και στα περιβάλλοντα πετρώματα. Κατά την παραγωγή αυξάνεται η κάθετη ενεργή τάση, σ'_v, τότε μειώνεται η πίεση των πόρων και η ενεργή ελάχιστη οριζόντια τάση, σ'_h αυξάνεται αλλά με μικρότερο ρυθμό, ενώ μειώνεται η ολική οριζόντια τάση, σ_h (Asaei et al., 2017; Hillis, 2011).

Οι δυο παραπάνω λόγοι που αναφέρθηκαν είναι αιτίες δημιουργίας του φαινόμενου της τοξοειδής παραμόρφωσης. Το δημιουργούμενο σχήμα, κατά την υποχώρηση του ταμιευτήρα από το πέτρωμα που τον περιβάλλει κατά την διαδικασία συμπιεστότητας, είναι ημικυκλικό (Σχήμα 3). Στην διαδικασία αυτή ένα μέρος των υπερκείμενων ωθείται και μεταφέρεται στα πλευρικά σημεία του ταμιευτήρα, το βάρος των υπερκείμενων του ταμιευτήρα μειώνεται άρα μειώνεται και ο βαθμός συμπιεστότητας με αντίκτυπο τον μικρότερο ρυθμό παραγωγής υδρογονανθράκων.



Γράφημα 2.3: Φαινόμενο τοξοειδούς τάσης, αναπαράσταση τάσεων που ασκούνται και καθιζήσεις.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
ΑΠΘ

2.4: Συντελεστής τοξοειδής τάσης και μορφολογία τόξου

Η αλλαγή της πίεσης των υπερκείμενων συνδέεται με την αλλαγή της πίεσης των πόρων και ο λόγος τους ονομάζεται συντελεστής τοξοειδής τάσης. Ορίστηκαν οι λόγοι:

$$\gamma_v = \Delta\sigma_v/\Delta p_v,$$
$$\gamma_h = \Delta\sigma_h/\Delta p_h, \quad (2.3)$$
$$\gamma_H = \Delta\sigma_H/\Delta p_H$$

όπου γ_v, γ_h και γ_H είναι ο συντελεστής της κατακόρυφης, ελάχιστης οριζόντιας και μέγιστης οριζόντιας τοξοειδής τάσης, $\Delta\sigma_v$, $\Delta\sigma_h$, και $\Delta\sigma_H$ είναι η κάθετη, η ελάχιστη οριζόντια και η μέγιστη οριζόντια αλλαγή τάσης αντίστοιχα και η Δp_p είναι η αλλαγή στην πίεση των πόρων (Asaei et al., 2017; Hettema et al. 2001).

Οι τιμές του συντελεστή τοξοειδής τάσης κυμαίνονται από μηδέν έως ένα. Η τιμή μηδέν αντιπροσωπεύει έναν ταμιευτήρα στον οποίο δεν εμφανίζεται η τοξοειδή παραμόρφωση, τέτοια πετρώματα έχουν υψηλή σκληρότητα σε σχέση με τα γύρω, είναι σχεδόν άκαμπτα και η παραμόρφωση είναι ελαστική, με μικρό λόγο διαστάσεων, η πίεση των πόρων αλλάζει με σταθερή πίεση υπερκείμενων. Την τοξοειδή δομή εμφανίζουν τα πετρώματα με τον συντελεστή μεγαλύτερο του μηδέν έως την μονάδα με τα χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα αντίθετα από όσα αναφέρθηκαν. (Wang et al., 2014)

Την μορφολογία τόξου κατά την εξόρυξη επηρεάζει σημαντικά η σκληρότητα μεταξύ των πετρωμάτων. Εάν ο ταμιευτήρας είναι πιο μαλακός, κατά συνέπεια πιο συμπιεστός, από το γύρω έδαφος σχηματικά θα είναι κυρτός και αυτό οφείλεται στις δυνάμεις διάτμησης που αναπτύχθηκαν, οι μικρότερες βρίσκονται στα άκρα και οι μεγαλύτερες στο κέντρο και ονομάζεται ενεργό τόξο. Εάν ο ταμιευτήρας είναι πιο σκληρός, άρα λιγότερο συμπιεστός, από τα περιβάλλοντα πετρώματα αναπτύσσονται οι ίδιες δυνάμεις κατά την μετακίνηση του όμως πλευρικά οι δυνάμεις είναι μεγαλύτερες από το κέντρο σχηματίζοντας κοίλη καμπύλη. Για την δημιουργία αυτών των μορφολογιών απαραίτητη είναι η ομοιόμορφη παραμόρφωση. Τα περιμετρικά πετρώματα επηρεάζονται σε μικρότερο βαθμό από τις δυνάμεις και διαμορφώνουν το ανάλογο σχήμα (Tien, 1996).

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

2.5 Επιρροή θερμότητας

Ένας παράγοντας που συνδέεται στενά με την αλλαγή στην πίεση των πόρων είναι η θερμότητα. Η θερμότητα δημιουργεί θερμικές τάσεις, οι οποίες εξαρτώνται και από την σκληρότητα του πετρώματος, συντελεστή Young, όσο αυξάνεται η σκληρότητα αυξάνονται και οι θερμικές τάσεις, η ανάπτυξη των τάσεων απαιτεί να μην υπάρχει μετακίνηση του πετρώματος τουλάχιστον σε μια κατεύθυνση. Επιπρόσθετα, αλλάζει το μέγεθος και η μορφή της μάζας του πετρώματος, αναδιαμορφώνεται ο όγκος του, και προκαλεί διαφοροποίηση στην διαπερατότητα, για παράδειγμα στην περίπτωση έγχυσης ρευστών, τα οποία βρίσκονται σε ψυχρότερη φάση από αυτά του ταμιευτήρα έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνεται η διαπερατότητα. Σημαντική επιρροή στην θερμοκρασία του πετρώματος έχουν διάφορα χαρακτηριστικά του πετρώματος όπως η αντίσταση του κατά την άσκηση τάσεων, η αλλαγή της κατάστασης του ρευστού, ο τρόπος ένωσης και η χημική αντίδραση των στοιχείων και ο βαθμός που αποκρίνονται τα υλικά κατά την αύξηση θερμοκρασία. (Uribe-Patiño et al., 2017)

2.6: Σημαντικές θεωρίες που αναπτύχθηκαν

Πολλές θεωρίες αναπτύχθηκαν με επικρατέστερη την αρχή ενεργών τάσεων του Terzaghi στην οποία αναφέρει ότι:

$$\sigma_{ολ} = \sigma' + P \qquad (2.4)$$

όπου $\sigma_{ολ}$ είναι η ολική τάση, σ΄ είναι οι ενεργές τάσεις και P είναι η πίεση ρευστού. Κατά την διαδικασία συμπιεστότητας μέσα στο πέτρωμα του ταμιευτήρα αυξάνεται η ενεργή τάση και παράγονται ρευστά άρα μειώνεται ο όγκος της πίεσης των πόρων με την ολική τάση να παραμένει σταθερή. Οι αλλαγές της κατάστασης των τάσεων και της διαπερατότητας του ταμιευτήρα επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την διαδικασία. Ο νόμος αυτός υπακούει σε συγκεκριμένες συνθήκες, οι υποθέσεις που θέτει είναι οι εξής:

- Το έδαφος να έχει ίδιες ιδιότητες προς όλες τις κατευθύνσεις.
- Να μην υπάρχουν κενά ανάμεσα στους κόκκους και να περιέχουν ρευστά.
- Τα σώματα να έχουν την ικανότητα συμπίεσης με την άσκηση δυνάμεων.
- Μονοδιάστατη συμπίεση και ροή.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
ΑΠΘ

- Η καταπόνηση να είναι μικρή.
- Η ροή των ρευστών στα πορώδη μέσα να υπακούνε στον νόμο Darcy.
- Αμετάβλητος συντελεστής διαπερατότητας και συντελεστής όγκου συμπιεστότητας.
- Η χρονικά ανεξάρτητη σχέση μεταξύ της τιμής του λόγου κενών η οποία αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη τιμή των ενεργών τάσεων.

Η μονοδιάστατη θεωρία του Terzaghi εξελίχθηκε σε τρισδιάστατη από τον Biot (1941) προσθέτοντας και την παράμετρο της αλληλεπίδρασης του στερεού σκελετού με τα ρευστά που βρίσκονται κορεσμένα εντός του ταμιευτήρα. Είναι πολύπλοκη μαθηματική θεωρία κατά την οποία περιγράφει την συνεχή εξάρτηση της πίεσης των πόρων και της παραμόρφωσης και ονομάζεται ποροελαστικό σύστημα, βασιζόμενη στην βασική ισοθερμική θεωρία (Zheng et al., 2003; Biot, 1941).

Εισήχθη μια καινούργια παράμετρος, ο συντελεστής Biot, α (Biot and Willis, 1957). Είναι απαραίτητος για την μέτρηση της ενεργής τάσης σε συνάρτηση με την ολική τάση και την μείωση των πόρων. Η δυνατότητα εύρεσης του συντελεστή είναι με τρεις τρόπους. Έχουν αναπτυχθεί διάφορες εμπειρικές σχέσεις μεταξύ του συντελεστή και των κενών του πετρώματος, σε ισοτροπικό πέτρωμα ο Cheng (1997) ανακάλυψε την υπολογιστική σχέση κατά την οποία

$$\alpha=1- K_{b\text{πετρώματος}}/K_{b\text{στερεού}} \quad (2.5)$$

όπου α είναι ο συντελεστής Biot, K_b είναι ο συντελεστής όγκου με μονάδα μέτρησης MPa. Οι επόμενες μέθοδοι γίνονται με την προσθήκη ενός καινούργιου συντελεστή, του δυναμικού συντελεστή όγκου του πετρώματος και του στερεού χρησιμοποιώντας τις αντίστοιχες ταχύτητες κυμάτων. Η ταχύτητα των εγκάρσιων κυμάτων διαδίδεται μόνο μέσω του στερεού σώματος του πετρώματος και όχι από τα ρευστά σε αντίθεση με τα διαμήκη κύματα που ταξιδεύουν και στις δυο φάσεις. Ο εργαστηριακός τρόπος είναι πολύπλοκος και με μεγάλο κόστος. (Luo et al., 2015; Cheng, 1997; Biot & Willis, 1957)

Ο συντελεστής Biot, α, εκφράζει τον λόγο κατά την παραγωγή ρευστών που χάνεται από το πέτρωμα και φτάνει στην επιφάνεια ή την ποσότητα ρευστών που εγχέεται από την επιφάνεια προς την αλλαγή του όγκου του ταμιευτήρα. Εξαρτάται κυρίως από το πορώδες, όσο μεγαλύτερο είναι το πορώδες τόσο πιο εύκολη θα είναι και η ροή ρευστού. Οι τιμές του κυμαίνονται από μηδέν έως ένα, πρακτικά όμως το εύρος ενδιάμεσα στις τιμές είναι μικρότερο. Οι εξισώσεις που συνδέουν τις ενεργές τάσεις με τον συντελεστή Biot είναι:

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
ΑΠΘ

$$\Delta\sigma'_v = \Delta\sigma_v - \alpha^* \Delta p,$$
$$\Delta\sigma'_h = \Delta\sigma_h - \alpha^* \Delta p \text{ και} \quad (2.6)$$
$$\Delta\sigma'_H = \Delta\sigma_H - \alpha^* \Delta p$$

τα $\Delta\sigma_v$, $\Delta\sigma_h$, και $\Delta\sigma_H$ είναι η κάθετη, η ελάχιστη οριζόντια και η μέγιστη οριζόντια αλλαγή τάσης αντίστοιχα, α είναι ο συντελεστής Biot και $\Delta\sigma'_v$, $\Delta\sigma'_h$ και $\Delta\sigma'_H$ είναι η ενεργή κάθετη, η ελάχιστη οριζόντια και η μέγιστη οριζόντια αλλαγή τάσης ανάλογα και η Δp είναι η αλλαγή στην πίεση των πόρων. Στην περίπτωση όπου και ο συντελεστής Biot και ο συντελεστής τοξοειδούς τάσης είναι ίσα με την μονάδα υποδηλώνουν ότι η ενεργή τάση είναι σταθερή. (Segura et al. 2011)

Ο Geertsma (1973) θέτοντας κάποιες απλοποιήσεις, κατά τις οποίες δεν παρατηρείται τοξοειδή παραμόρφωση, το βάρος των υπερκείμενων και η κάθετη τάση ακλόνητη, τότε η ενεργή κάθετη τάση

$$\Delta\sigma'_v = -\alpha^* \Delta p \quad (2.7)$$

όπου $\Delta\sigma'_v$ η ενεργή κάθετη τάση, α συντελεστής Biot και Δp η αλλαγή πίεσης πόρων. Επιπλέον, υποθέτοντας ότι η μεταβολή της ελάχιστης και της μέγιστης οριζόντιας ενεργής τάσης στον ταμιευτήρα έχουν ίδια τιμή, δηλαδή σε ταμιευτήρα που ασκείται ισοτροπική παραμόρφωση, ενώ παράλληλα συνεχίζεται η παραγωγή υδρογονανθράκων με την συνεπαγόμενη αύξηση της κάθετης ενεργής τάσης τότε υπολογιστικά ισχύει

$$\Delta\sigma'_h = \Delta\sigma'_H = K^* \Delta\sigma'_v \quad (2.8)$$

όπου $\Delta\sigma'_v$, $\Delta\sigma'_h$ και $\Delta\sigma'_H$ είναι η ενεργή κάθετη, η ελάχιστη οριζόντια και η μέγιστη οριζόντια αλλαγή τάσης και K συμβολίζει την αποκλίνουσα παράμετρο διαδρομής τάσης. (Taherynia et Al., 2013; Geertsma, 1973)

Έπειτα ο Skempton επέκτεινε την θεωρία του Terzaghi προσθέτοντας έναν όρο α_c που απευθύνεται στην σύνδεση μεταξύ των επαφών των κόκκων. Ο όρος αυτός εξαρτάται από το εμβαδόν της περιοχής σύνδεσης των κόκκων μεταξύ τους προς την συνολική επιφάνεια που ασκείται η τάση. Η εξίσωση εξελίχθηκε ως:

$$\sigma' = \sigma - (1 - \alpha_c)^* u \quad (2.9)$$

με σ΄ την ενεργή τάση, σ την τάση και u την πίεση.

Την ίδια χρονιά μια καινούργια θεωρία ανέπτυξε ο Bishop για τα πετρώματα που περιέχουν νερό και αέρα στους πόρους τους, συγκεκριμένα

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

$$\sigma' = \sigma - u_\alpha + \chi^*(u_\alpha - u_w) \quad (2.10)$$

με u_a και u_w είναι η πίεση του αέρα και του νερού αντίστοιχα, σ΄ η ενεργή τάση, σ η τάση και χ είναι μια παράμετρος η οποία εκφράζει τον λόγο α_w/α δηλαδή ο χώρος που καταλαμβάνει το νερό προς το άθροισμα των εμβαδών των σημείων επαφών στα οποία ασκούνται χημικές και φυσικοχημικές δυνάμεις και σ η τάση που ασκείται και σ΄ η ενεργή τάση. (Osipov, V.I. 2015)

Στην περίπτωση που δεν συμβαίνει στο πέτρωμα τοξοειδής παραμόρφωσης, η αποκλίνουσα παράμετρος διαδρομής είναι η οριζόντια τάση και εκφράζεται με τον τύπο:

$$K= \gamma_h= \alpha^*(1-2\nu)/(1-\nu) \quad (2.11)$$

Με Κ την αποκλίνουσα παράμετρο διαδρομής, γ_h την οριζόντια τάση, α τον συντελεστή Biot και ν τον λόγο Poisson. (Segura et al., 2011)

Πολλές θεωρίες έχουν αναπτυχθεί σε πιο απλή μορφή, όπως οι Terzaghi και Richart (1952), όταν κατά την εξόρυξη ρευστών ο ταμιευτήρας υπακούει στην ποροελαστικότητα και στην μονοαξονική παραμόρφωση, σε έναν υγιές ταμιευτήρα

$$K= \nu/ (1-\nu) \quad (2.12)$$

με την ισοδύναμη σχέση να την ανακαλύπτει ο Fjar

$$K= (\alpha-\gamma_h)/ (\alpha-\gamma_v) \quad (2.13)$$

ενώ με βάση τον Addis σε έναν ρωγματωμένο ταμιευτήρα

$$K= (1-\sin\varphi)/ (1+\sin\varphi) \quad (2.14)$$

ν είναι ο λόγος Poisson, φ είναι η γωνία εσωτερικής τριβής, α συμβολίζεται ο συντελεστής Biot και γ_h και γ_v ο συντελεστής οριζόντιας και κάθετης τοξοειδής τάσης αντίστοιχα. (Taherynia et al., 2013; Taherynia et al., 2021; Terzaghi & Richart, 1952)

2.7: Σχέση τάσης- καταπόνηση και αντοχή

Η διαδικασία της συμπύκνωσης εκτός από την μείωση των πόρων ελέγχει την σχέση της τάσης με την καταπόνηση και την αντοχή. Η σχέση της τάσης με την καταπόνηση είναι χρονικά εξαρτώμενη παράμετρος και με την συνεχόμενη πτώσης της τάσης σε ένα αμετάβλητο επίπεδο τάσης- παραμόρφωσης προκαλείται χαλάρωση τάσεων. Το γραμμικό μοντέλο του Maxwell εκφράζει τον χρόνο χαλάρωσης των τάσεων και εξαρτάται από την ιδιότητα του υλικού να ενεργεί ως ιξώδες, η, προς τον ελαστικό συντελεστή, Ε, και σύμφωνα με το αποτέλεσμα

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
ΑΠΘ

συμπεριφέρεται ανάλογα, όταν το υλικό παρουσιάζεται ως ελαστικό και η ιδιότητα του ιξώδους εμφανίζεται με την πάροδο του χρόνου. (Fokker & Orlic, 2006)

Η αντοχή υπολογίζεται από το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb σε ισότροπο μέσο, το οποίο περιγράφει την αστοχία ενός σώματος όταν ξεπεραστεί η διατμητική αντοχή μεταξύ της γραμμικής σχέσης ορθής τάσης, σ_n, με την διατμητική τάση, τ, και υπολογίζεται με τον τύπο:

$$\tau = c + \sigma_n * \varepsilon\varphi_\varphi \quad (2.15)$$

όπου c: συνεκτικότητα και φ:κλίση. Στους άξονες σ_n-τ σχηματίζονται οι κύκλοι Mohr, όταν αλλάζει μόνο η πίεση των πόρων, με σταθερή ολική τάση δηλαδή σε ισότροπο μέσο, προκαλείται μετακίνηση των κύκλων Mohr πάνω στον άξονα χ, η δεξιά κατεύθυνση μετατόπισης των κύκλων συμβολίζει την εξάντληση ρευστών και η αριστερή αλλαγή κατεύθυνσης των κύκλων απευθύνεται στην διαδικασία έγχυσης ρευστών. Στην περίπτωση που συμβαίνει τοξοειδή παραμόρφωση με ταυτόχρονη αλλαγή της πίεσης των πόρων τότε αλλάζει η θέση του κύκλου και η διάμετρος του. Συμπερασματικά, όσο συνεχίζεται η διαδικασία συμπύκνωσης βελτιώνονται οι ιδιότητες του πετρώματος με αύξηση την αντοχής του, μείωση συμπιεστότητας, μείωση διαπερατότητας και βελτιώνει την ομοιομορφία των κόκκων. (Asaei, 2017; Στουρνάρας & Σταυροπούλου, 2010; Σοφιανός & Νομικός, 2008).

Το μεταβαλλόμενο μέγεθος των κύκλων Mohr αντιπροσωπεύει η αποκλίνουσα παράμετρος διαδρομής τάσης, K, και την μετακίνηση των κύκλων εκφράζει ο συντελεστής τοξοειδής τάσης γ_v. Συγκεκριμένα, η παράμετρος K φανερώνει την ανισοτροπία και κατ' επέκταση την πιθανότητα για αστοχία του πετρώματος ταυτόχρονα μικραίνει η τιμή της ολικής οριζόντιας τάσης ενώ μειώνεται η πίεση των πόρων. Μικρές τιμές K υποδηλώνουν μεγάλη ανισοτροπία τάσεων, δηλαδή υψηλότερες τιμές κάθετης ενεργής τάσης και εμφανίζεται το φαινόμενο τοξοειδής τάσης και προσδιορίζεται ως ο λόγος αλλαγής της οριζόντιας ενεργής τάσης $\Delta\sigma'_h$ προς την αλλαγή της κάθετης ενεργής τάσης $\Delta\sigma'_v$, δηλαδή

$$K = \Delta\sigma'_h / \Delta\sigma'_v \quad (2.16)$$

(Segura et al., 2017)

2.8: Συντελεστής κάθετης συμπύκνωσης

Η αλλαγή της πίεσης των πόρων και η σκληρότητα σε συνδυασμό με τις διαστάσεις του ταμιευτήρα και με τον συντελεστή κάθετης συμπίεσης C_m καθορίζουν το ποσό συμπύκνωσης.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Συντελεστής κάθετης συμπύκνωσης αυξάνεται αντιστρόφως ανάλογα με το βάθος και υπολογίζεται εργαστηριακά με οδομετρικές και τριαξονικές μεθόδους, αν και το αποτέλεσμα τους είναι συνήθως υψηλότερο από την πραγματική του τιμή. Κατά το 1999 και σύμφωνα με τον Gambolati το ποσό συμπύκνωσης (δ) υπολογίζεται με τον τύπο:

$$\delta = C_m * h * \Delta_p \quad (2.17)$$

το h χαρακτηρίζει το πάχος ταμιευτήρα και το Δ_p την μείωση πίεσης πόρων ρευστού (Gambolati et al., 2006)

2.9 Η αλλαγή συμπίεσης ανάλογα με την κοκκομετρία

Η συμπίεση διαφοροποιείται ανάλογα με το είδος του εδάφους και την διαπερατότητα του. Τα συνεκτικά εδάφη όταν υποστούν συμπίεση γίνονται μη διαπερατά, τέτοια εδάφη είναι με λεπτόκοκκα ιζήματα, άμμος και άργιλος. Τα λιγότερο συμπιεστά εδάφη αποτελούν τα πιο ανδρόκοκκα εδάφη τα οποία ακόμη και αν υποστούν συμπίεση εξακολουθεί να επιτρέπεται η ροή ρευστών. Οι μέθοδοι συμπίεσης γίνετε με πολλές μεθόδους η επιλογή τους γίνετε ανάλογα με το είδος του εδάφους και την σύνδεση των κόκκων. (Xia, 2014)

2.10 Βαθμός συμπίεσης εδαφών

Συνήθως τα εδάφη συμπεριφέρονται ως υπερσυμπιεσμένα, δηλαδή η πίεση που ασκείται στο παρόν είναι μικρότερη από την μέγιστη πίεση που είχε υποστεί στο παρελθόν, τέτοια εδάφη είναι πιο συμπαγή με μεγαλύτερη αντοχή. Όταν στο έδαφος η ενεργή τάση που ασκείται είναι ισοδύναμη με την μεγαλύτερη ενεργή τάση που είχε ασκηθεί το έδαφος βρίσκεται σε ισορροπία και η διαδικασία αυτή ονομάζεται κανονική συμπίεση. Μέχρι να φτάσει στο σημείο ισορροπίας η τιμή ενεργής τάσης του εδάφους δεν έχει φτάσει στο μέγιστο, ανάλογη περίπτωση παρουσιάζουν τα εδάφη που ο ρυθμός συμπίεσης είναι μικρότερος από τον ρυθμό απόθεσης υπερκείμενων στρωμάτων. Τα πετρώματα που βρίσκονται σε μικρό βάθος μπορεί να έχουν υποστεί κανονική συμπίεση ενώ στα βαθύτερα στρώματα να είναι υπερσυμπιεσμένα δηλαδή στην ίδια στρωματογραφική στήλη να συνυπάρχουν παραπάνω από μια καταστάσεις πίεσης του σχηματισμού. (Mitchel & Soga, 2005)

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
ΑΠΘ

2.11 Δευτερεύον μηχανισμοί Συμπύκνωσης

Οι πρωτεύοντες μηχανισμοί συμπύκνωσης γίνονται με φυσικούς τρόπους και συνήθως συνδυαστικά με τον δευτερεύον τρόπο για την ανάκτηση υδρογονανθράκων. Η μέθοδος αυτή πραγματοποιείται τεχνητά από τον άνθρωπο με την προσθήκη ρευστών, συγκεκριμένα διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), άζωτο, αέρια και χημικά ενεργά ρευστά, τα πιο συνηθισμένα είναι το CO_2, τα απόβλητα, το μεθάνιο και το άζωτο. Το μεθάνιο αποθηκεύεται στο υπέδαφος, όταν η κοινωνία το χρειαστεί το εξορύσσει πάλι, σε αντίθεση με το διοξείδιο του άνθρακα και τα απόβλητα τα οποία παραμένουν διαρκώς στο υπέδαφος χωρίς την ανάγκη εξόρυξης τους. Επιπλέον βελτιώνει την επιρροή σε ενεργειακά θέματα όπως η εκπομπή μεγάλων ποσών διοξειδίου του άνθρακα, η οποία δυσχεραίνει το φαινόμενο του θερμοκηπίου. (Bachu, 2008)

Η γεώτρηση κατά την οποία γίνετε η έγχυση είναι η ίδια με της εξόρυξης αφού έχει ολοκληρωθεί η παραγωγή υδρογονανθράκων με τις προϋπάρχουσες εγκαταστάσεις, διαφορετικά με καινούργιες γεωτρήσεις στον ίδιο ταμιευτήρα είτε κατά την διαδικασία παραγωγής είτε αφού τελειώσει η εξόφληση του κοιτάσματος. Η δομή, στρωματογραφική και δομική, που συγκρατεί τα νέα ρευστά είναι παρόμοια με την δομή των υδρογονανθράκων, όμως θα πρέπει να εξετασθεί αν το πέτρωμα που αποτελεί φραγμό για τους υδρογονάνθρακες αποτελεί και για το εγχεόμενο ρευστό. (Gaurina- Međimurec & Novak Mavar, 2017).

Με την διαδικασία έγχυσης επιτυγχάνεται μείωση του ιξώδους και η ροή μέσα στον ταμιευτήρα και στις γεωτρήσεις είναι πιο εύκολη με αποτέλεσμα τον γρηγορότερο ρυθμό παραγωγής. Η προσθήκη ρευστών στους κενούς χώρους του ταμιευτήρα αυξάνει την πίεση των πόρων και κατά συνέπεια μειώνεται η πραγματική τάση, άρα αν και το πέτρωμα έχει ελαστική συμπεριφορά, έρχεται προς την αρχική του μορφή χωρίς να είναι ακριβώς η ίδια. Σημαντικό είναι το είδος του ρευστού που θα εγχυθεί να είναι το κατάλληλο σύμφωνα με το περιβάλλον του πετρώματος ώστε να μην υπάρχουν χημικές μεταβολές, δηλαδή το ρευστό που εγχύθηκε να μην αντιδράει με τον ταμιευτήρα και τα ρευστά του, ώστε μην μεταβληθεί το πορώδες. (Schimmel et al, 2019; Gaurina- Međimurec & Novak Mavar, 2017)

Η προσθήκη ρευστών μειώνει κάποιες επιπτώσεις της διαδικασίας συμπίεσης, αλλά είναι δυνατό να προκληθούν προβλήματα και κατά την έγχυση. Η πιθανότητα εμφάνισης των προβλημάτων έχει ρίσκο και σε επίπεδο περιβαλλοντικό και γεωλογικό. Οι συχνότερες επιπτώσεις είναι το άνοιγμα οπής και η άνοδος ρευστών είτε στα ανώτερα στρώματα είτε στην

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

επιφάνεια, η αλλοίωση της μορφής του ταμιευτήρα και η ενεργοποίηση σεισμών. (Schimel et al, 2019)

Απαραίτητες προϋποθέσεις για να πραγματοποιηθεί η εισαγωγή ρευστών είναι στο πέτρωμα είναι να εμποδίζεται πλευρικά η διαρροή, να υπάρχει επαρκές κενός χώρος για την ποσότητα που θα εισέλθει και την ικανότητα έκχυσης. Ακόμη και με την υπάρχουσα επαρκή τεχνολογική γνώση και υποδομή, η διαδικασίες αυτές είναι δύσκολο να πραγματοποιηθούν λόγω υψηλού κόστους, ανάλογα με το ρευστό και τον τρόπο εισαγωγής διαφοροποιείται η κοστολόγηση. Η ανεπαρκής νομοθέτηση δυσχεραίνει την μέθοδο αυτή. (Bachu, 2008)

2.12 Στρωματογραφία της λεκάνης Πρίνου-Καβάλας

Στην θαλάσσια περιοχή του Βόρειου Αιγαίου, Βόρεια των νησιών Θάσος και Θασοπούλα και σε ένα μικρό χερσαίο τμήμα κοντά στο Δέλτα του ποταμού Νέστου, στην λεκάνη Πρίνου- Καβάλας βρίσκεται ένας ταμιευτήρας, κυρίως ψαμμιτικής σύστασης, εντός του οποίου περιέχεται πετρέλαιο και φυσικό αέριο, η μέχρι τώρα εξάντληση του πραγματοποιείται στην διάρκεια είκοσι ετών. (Κολέτσης, 2016)

Κατά το Παλαιογενές η δημιουργία ταφρογενετικών λεκανών εξαιτίας των μετά-αλπικών ορογενετικών κινήσεων, οι οποίες αναπτύσσονταν πάνω από την στάθμη της θάλασσας έως τις αρχές του Μέσου Μειοκαίνου χωρίστηκαν οι λεκάνες, Βόρεια η λεκάνη του Νέστου και Νότια του Πρίνου, μέσω ενός υβώματος, ενώ περιμετρικά χωρίζεται από κανονικά ρήγματα με παράταξη ΒΑ-ΝΔ και ΒΔ-ΝΑ. (Κολέτσης, 2016)

Η λεκάνη Πρίνου-Καβάλας με βάση μεταμορφωμένα πετρώματα, γνεύσιοι, χαλαζίτες και μάρμαρα, στα οποία αποτέθηκαν τρεις εβαποριτικές σειρές, την προ-εβαποριτική, την εβαποριτική και την μέτα-εβαποριτική ακολουθία. Η προ-εβαποριτική ακολουθία η οποία βρίσκεται στο κατώτερο τμήμα και αποτελείται από κλαστικές αποθέσεις οι οποίες στο κατώτερο μέρος αποτελούνται από ασβεστόλιθους, οι οποίοι υπόκεινται τους ταμιευτήρες υδρογονανθράκων, το πέτρωμα στο οποίο αποθηκεύονται είναι ψαμμίτες, συμπαγείς και πολυστρωματικοί, διαιρούνται σε τέσσερα μέρη από τα ανώτερα στρώματα σχιστόλιθων εμποδίζοντας την άνοδο των υδρογονανθράκων, η σύσταση τους είναι κυρίως αργιλική και κατά τόπους παρατηρείται ιλύς, οι μορφές και οι επαφές που αναφέρθηκαν είναι χαρακτηριστικά τουρβιδιτών. (Κολέτσης, 2016)

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

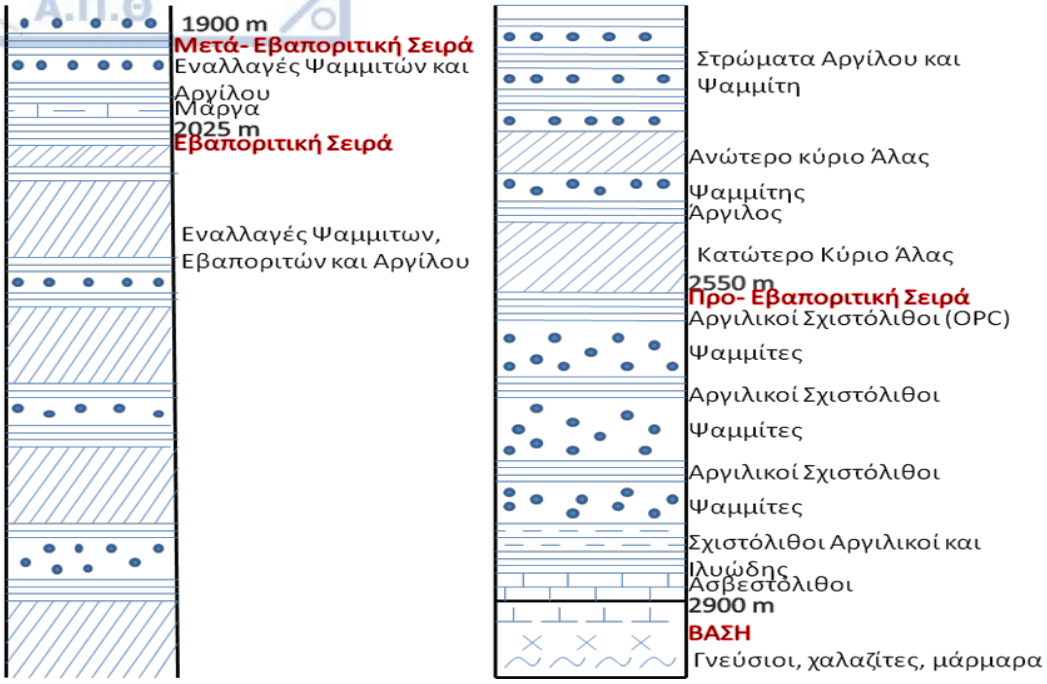
Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
ΑΠΘ

Κατά το Μειόκαινο, την περίοδο της κρίσης αλμυρότητας του Μεσσηνίου, δημιουργείται η εβαποριτική σειρά, το ανώτερο στρώμα αποτελείται από έναν μικρής συνεκτικότητας ανυδρίτη με ένα στρώμα άμμου, ακολουθεί ένα αργιλικό πέτρωμα και έπειτα ένα στρώμα αλίτη, ο οποίος χαρακτηρίζεται ως <<Πρώτος Εβαπορίτης>>. Κάτω από τον σχηματισμό αυτό παρατηρούνται εναλλαγές αργίλου, άμμου και τρία, από τα συνολικά τέσσερα, εβαποριτικά στρώματα σύστασης κυρίως αλίτη και σε πολύ μικρό ποσοστό ανυδρίτη, κάτω από τους οποίους βρίσκεται στρώμα αργίλου και έπειτα το <<Ανώτερο Κύριο Άλας>> κυρίως από αλίτη. Κάτωθεν βρίσκεται άργιλος και άμμος οι οποίες υπέρκειται το <<Κατώτερο Κύριο Άλας>> με το στρώμα της <<υπερσυμπιεσμένης αργίλου (OPC)>>, σχιστολιθικού πετρώματος να διαχωρίζει την προ-εβαποριτική σειρά με την εβαποριτική. Οι εβαπορίτες αποτελούν το πέτρωμα-κάλυμμα των πετρελαιοφόρων ψαμμιτών της προ-εβαποριτικής σειράς. (Κολέτσης, 2016)

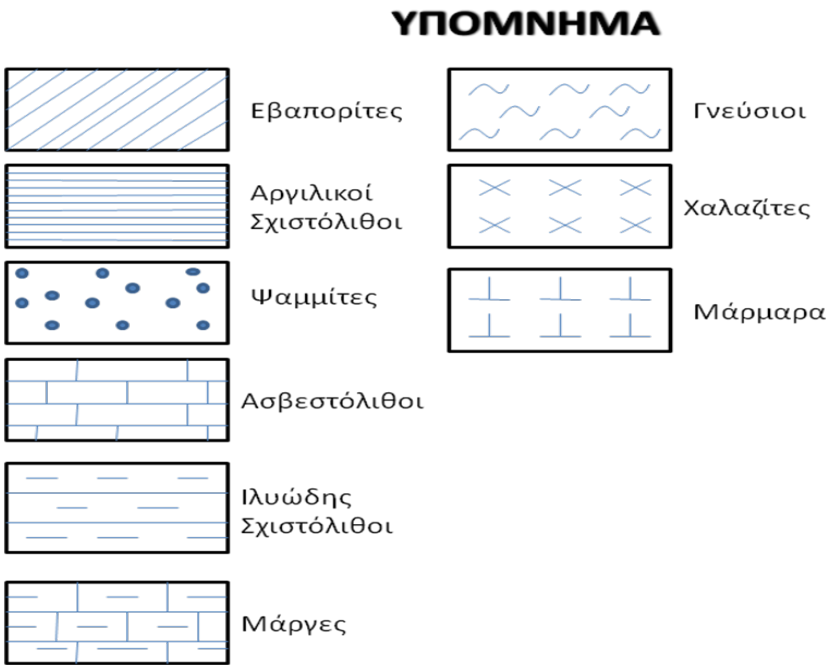
Τέλος η ανώτερη σειρά, η μέτα-εβαποριτική, κατά το Πλειόκαινο-Πλειστόκαινο, είναι κλαστική ακολουθία που συγκροτείται από ψαμμίτες και άργιλο, ενώ παρατηρείται ελάχιστο ποσοστό ασβεστόλιθου και δολομίτη, στο κατώτερο σημείο της στήλης υπάρχει το χαρακτηριστικό στρώμα μάργας, << Brown Marker >>, δηλαδή από σχιστόλιθους. Η στρωματογραφία που μόλις περιγράφηκε δίνετε στο παρακάτω σχήμα (Γράφημα 2.4), παραθέτοντας και το υπόμνημα (Γράφημα 2.5). (Κολέτσης, 2016)

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.



Γράφημα 2.4: Στρωματογραφική Στήλη λεκάνης Πρίνου- Καβάλας.



Γράφημα 2.5: Στρωματογραφική Στήλη λεκάνης Πρίνου- Καβάλας.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
ΑΠΘ

2.13 Γεωτεκτονική εξέλιξη της λεκάνη Πρίνου-Καβάλας

Η γεωτεκτονική πορεία της περιοχής εξελίσσεται κατά τα Παλαιογενές ως συνεχόμενες ταφρογενετικές λεκάνες, οι οποίες βρίσκονταν σε υψόμετρο πάνω από την στάθμη της θάλασσας. Η βύθιση της προ-αλπικής μάζας κάτω από το υψόμετρο μηδέν πραγματοποιείται στο μέσο Μειόκαινο, χάρις τον μεταλπικό τεκτονισμό και την θραύση της πλάκας του Αιγαίου. Η τεκτονική που αναπτύχθηκε σχημάτισε συζυγή ρήγματα και δημιούργησε μορφολογίες τεκτονικού βυθίσματος και τεκτονικού κέρατος με παράταξη ΒΑ-ΝΔ και ΒΔ-ΝΑ και την δημιουργία ενός υβώματος το οποίο χωρίζει τις δυο λεκάνες, την Βόρεια του Νέστου και την Νότια την λεκάνη του Πρίνου η οποία βρίσκεται σε αρκετά μεγαλύτερα βάθη από την προηγούμενη λεκάνη. Επιπλέον η ύπαρξη λυστρικών κανονικών ρηγμάτων οδήγησε στην διαμόρφωση αντικλινικής πτυχής στο χώρο μεταξύ των συζυγών ρηγμάτων, λόγω της μετακίνησης ιζημάτων από την Βόρεια περιοχή του κοιτάσματος προς την Νότια. Το ΒΑ τμήμα του κοιτάσματος θεωρείται ως κλειστή λεκάνη, ενώ στο ΝΔ τμήμα η άνοδος της υποθαλάσσια ράχης ξεκίνησε κατά το Μεσσήνιο και με την πάροδο των χρόνων εξελίχθηκε σε λιμνοθάλασσα. (Κολέτσης, 2016)

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
ΑΠΘ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό ακολουθεί η εξήγηση συντελεστών που είναι χρήσιμοι για την δημιουργία μοντέλου. Επιπλέον περιγράφεται σύντομα το μοντέλο που αναπτύχθηκε με την παροχή μερικών εικόνων του μοντέλου σε διάφορες μορφές. Αποτυπώνεται σχηματικά οι διαστάσεις του μοντέλου και οι τομές στις οποίες βρέθηκαν τα αποτελέσματα. Τέλος αποτυπώνονται οι τιμές των παραμέτρων που υπολογίστηκαν για την πραγμάτωση της προσομοίωσης του ταμιευτήρα.

3.2: Συντελεστής Young

Η επίδραση της σκληρότητας του ταμιευτήρα, όπως αναφέρθηκε, έχει ουσιαστική επιρροή στον βαθμό παραμόρφωσης του κατά την άσκηση τάσεων. Η παράμετρος που αντιπροσωπεύει την σκληρότητα του ταμιευτήρα σε σχέση με τα γύρω πετρώματα είναι ο συντελεστής Young. Απευθύνεται σε ομογενές έδαφος που η παραμόρφωση του είναι αντιστρεπτή και η δυνατότητα υπολογισμού του είναι μόνο εργαστηριακά με δυο διαφορετικούς τρόπους για την εύρεση δυο διαφορετικών κατηγοριών ελαστικού συντελεστή, τον στατικό και τον δυναμικό. (Serasa et al., 2022)

Η εύρεση του στατικού ελαστικού συντελεστή γίνετε με μονοαξονική φόρτιση όπου ένας πυρήνας γεώτρησης υπόκεινται σε μονοαξονική φόρτιση στον άξονα σ_1 με συνεχόμενο αυξανόμενο ρυθμό. Σε ένα διάγραμμα τάσεων-παραμόρφωσης σχηματίζεται ένα καμπύλο σχήμα με τον τύπο διαφορά τάσης προς την διαφορά παραμόρφωσης υπολογίζεται ο συντελεστής. Για το εφαπτομενικό μέτρο είναι η κλίση σε ένα συγκεκριμένο σημείο της οριακής αντοχής, συνήθως στο 50%, στο οποίο φέρεται η εφαπτομένη. Για το μέσο μέτρο ελαστικότητας, οι τιμές που εφαρμόζονται στον τύπο είναι στην καμπύλη του διαγράμματος πάνω στο, κατά προσέγγιση, ευθύγραμμο τμήμα που σχηματίζει. Τέλος το δευτερεύον μέτρο ελαστικότητας οι τιμές που εφαρμόζονται στον τύπο είναι από την αρχή των αξόνων έως ένα συγκεκριμένο ποσοστό, συνήθως το 50% της οριακής αντοχής. Για τον υπολογισμό του συντελεστή E_1 βρίσκεται η παραμόρφωση μέσω ραδιενεργών σημάτων σε αρχικές συνθήκες κατά την φόρτιση σε συνάρτηση με το βάθος, τότε υπολογίζεται με εξισώσεις της μονοαξονικής θλίψης σε

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

συνάρτηση με την κάθετη ενεργή τάση. Για τον συντελεστή E_2 ασκείται μία ακόμη τάση και η παραμόρφωση κατά την εκφόρτιση της είναι μεγαλύτερη από τον συντελεστή E_1. Ο λόγος E_1/E_2 είναι το τελικό αποτέλεσμα. (Serasa et al., 2022)

Ο δυναμικός ελαστικός συντελεστής, μέσω της κυκλοφορίας εγκάρσιων ή διαμηκών κυμάτων υπολογίζεται και η ταχύτητα τους σε ένα δείγμα πετρώματος. Επηρεάζεται από τρεις παράγοντες, την μορφή, το μάκρος και την κοκκομετρία του. Ανάλογα με το είδος του κύματος χρησιμοποιείται και ο ανάλογος τύπος, για τα εγκάρσια κύματα:

$$V_s = d^* t_s^{-1} \quad (3.15)$$

και για τα διαμήκη κύματα:

$$V_p = d^* t_p \quad (3.16)$$

όπου V_s και V_p και είναι η ταχύτητα εγκάρσιου και διαμήκη κύματος αντίστοιχα, d είναι το μήκος και t_s και t_p ο χρόνος διαδρομής των εγκάρσιων και διαμηκών κυμάτων μέχρι να φτάσουν στο σημείο d. Τα αποτελέσματα της διαδικασίας μεταξύ του στατικού και του δυναμικού συντελεστή ελαστικότητας έχουν αποκλίσεις. Εξαιτίας των αποκλίσεων, λογαριάζονται ξεχωριστά το ποσοστό διαφοράς μεταξύ του μέσου, του εφαπτομενικού και του δευτερεύον συντελεστή σε αντιστοιχία με τον δυναμικό ελαστικό συντελεστή και γίνετε η χρήση μεταξύ του ζεύγους με την μικρότερη διαφορά απόκλισης και σχηματίζεται σε ένα διάγραμμα με άξονες τις ελαστικές παραμέτρους η γραμμική τους σχέση. Ο συντελεστής με τις τιμές που πλησιάζουν την πραγματικότητα είναι ο στατικός για αυτό και προτιμάται. (Serasa et al., 2022)

3.3: Λόγος Poisson

Ελαστική παράμετρος που περιγράφει την καταπόνηση του εδάφους σε σχέση με το ποσό άσκησης τάσεως είναι ο λόγος Poisson, ν. Ορίζεται ως ο λόγος της εγκάρσιας παραμόρφωσης προς τον οριζόντιο άξονα παραμόρφωσης, αποτέλεσμα αυτού είναι η μεγέθυνση ή σμίκρυνση του υλικού που μορφοποιείται. Οι τιμές σε ισοτροπικό μέσο κυμαίνονται από -1 έως 0,5 σύμφωνα με τους περιορισμούς των υπόλοιπων ελαστικών παραμέτρων. Πρακτικά όμως οι τιμές που συναντώνται είναι με θετικό πρόσημο, η μεγαλύτερη τιμή αντιπροσωπεύει πετρώματα με πολύ μικρή συμπίεση ενώ δέχονται μεγαλύτερες διατμητικές δυνάμεις δεν αλλάζει ο όγκος του πετρώματος, δηλαδή ο συντελεστής διάτμησης, είναι μικρότερος από τον συντελεστή όγκου, τέτοια υλικά είναι το καουτσούκ. Ακόμη δεν έχει βρεθεί υλικό με αρνητικές τιμές, το υποθετικό

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
ΑΠΘ

υλικό ονομάζεται βοηθητικό, στην περίπτωση αυτή η συμπεριφορά του θα είναι αντίθετη από αυτή του καουτσούκ. Η μικρότερη τιμή που έχει βρεθεί είναι το μηδέν στον φελλό, η τιμή αυτή αναπαριστά μηδενική μετακίνηση πλάγια του πυρήνα κατά την ανεμπόδιστη θλίψη. (Gercek, 2007)

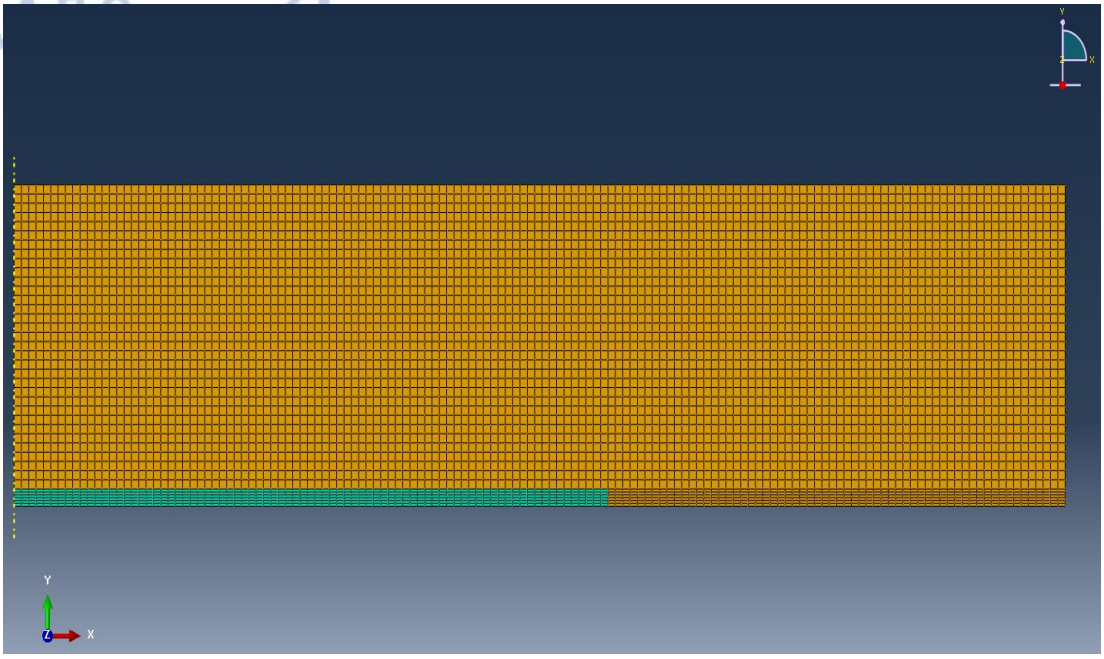
3.4: Πρόγραμμα Πεπερασμένων Στοιχείων

Ένα ευρέος χρήσιμο εργαλείο για την μελέτη κάθε περίπτωσης είναι η προσομοίωση του ταμιευτήρα, με την χρήση προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS, βοηθάει για την επίλυση προβλημάτων όπως το ποσό παραγωγής ή έγχυσης υδρογονανθράκων, η καθίζηση του εδάφους και είναι ωφέλιμο και σε διάφορα προβλήματα της γεωμηχανικής και άλλων κλάδων. Το μοντέλο μπορεί να δημιουργηθεί και στις τρεις διαστάσεις και το σχήμα του ταμιευτήρα αποτυπώνεται προσεγγιστικά, όπως ελλειψοειδές, κυλινδρικό. Απαιτείται καλή γνώση φυσικής, μαθηματικών και προγραμματισμού. Για την ανάπτυξη της προσομοίωσης ταμιευτήρα επιλέγεται η μέθοδος του μερικώς συζευγμένου μοντέλου με την χρήση μόνο των τάσεων και κατ' επέκταση και της παραμόρφωσης, ο οποίος είναι ο πιο διαδεδομένος τρόπος, ή η μέθοδος του πλήρως συζευγμένου μοντέλου που αφορά την επιρροή των τάσεων αλλά και την ροή ρευστών, με πιο πολύπλοκες σχέσεις και κώδικες.

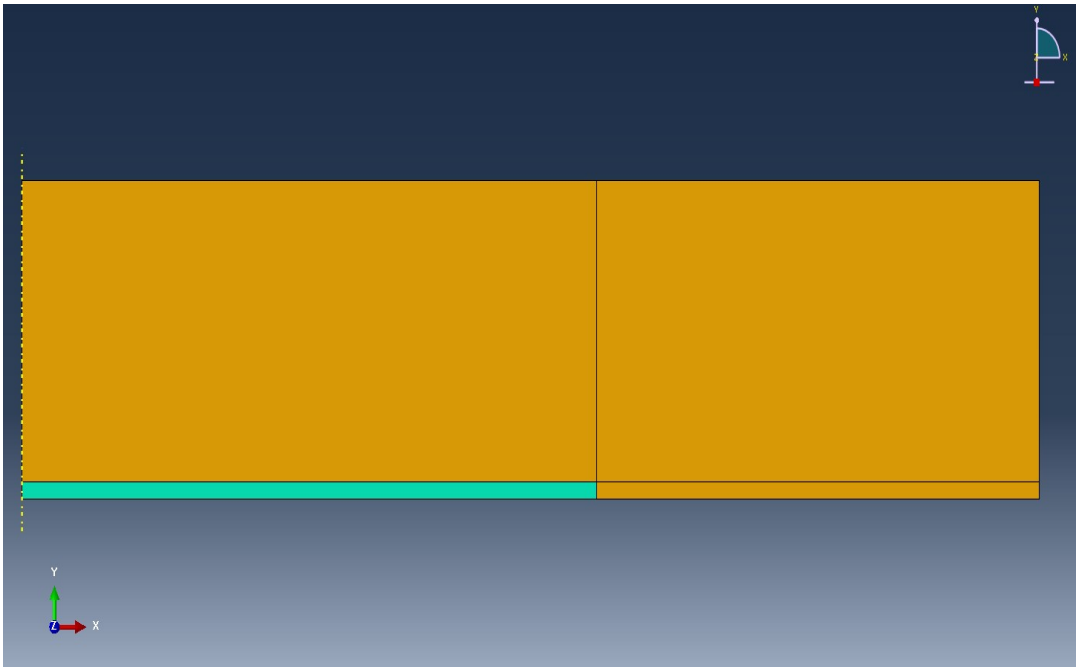
Στην περίπτωση της λεκάνης Πρίνου-Καβάλας επιλέχθηκε να σχεδιαστεί ένα μερικώς συζευγμένο μοντέλο σε έναν δισδιάστατο ταμιευτήρα κυκλικού σχήματος. Στα γραφήματα 3.1, 3.2 και 3.3 αποτυπώνεται το μοντέλο σε μορφή πλέγματος (mesh), υλικών (materials) και συνοριακών συνθηκών αντίστοιχα.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας



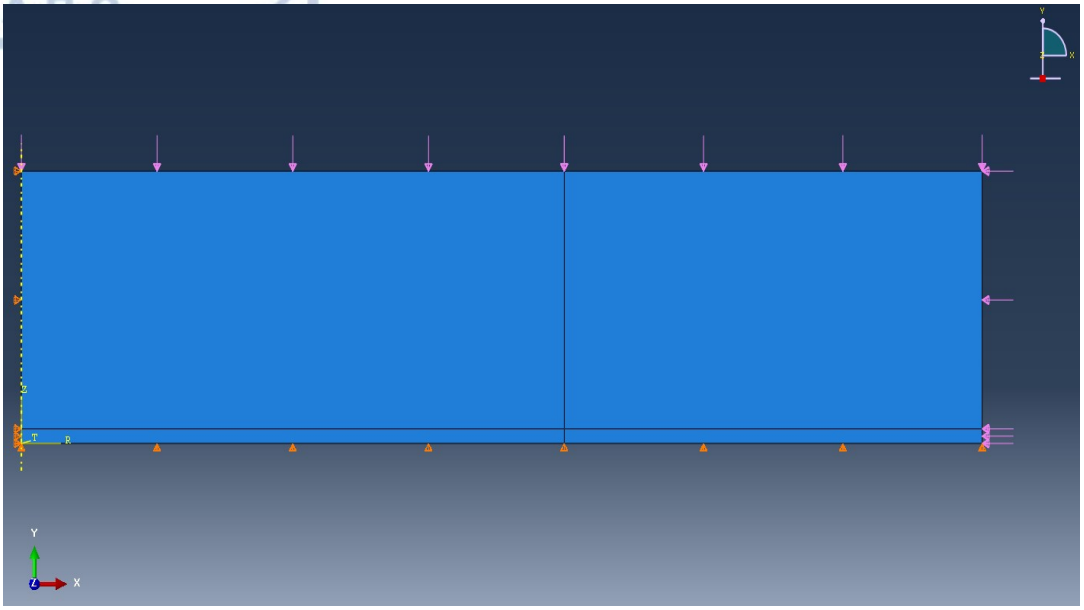
Γράφημα 3.1: Απεικόνιση μοντέλου σε μορφή πλέγματος.



Γράφημα 3.2: Απεικόνιση μοντέλου σε μορφή υλικών.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας



Γράφημα 3.3: Απεικόνιση μοντέλου σε μορφή συνοριακών συνθηκών.

3.5: Τιμές Παραμέτρων

Από την γεωφυσική ερμηνεία δεδομένων των γραφημάτων (Choustoulakis, 2015) και με την εφαρμογή τύπων Από το βιβλίο των: Fjaer, E., Holt, R. M. , Horsrud, P., & Raaen, A. M. (2008). Petroleum related rock mechanics. Elsevier

$$E_{dyn}= (\rho*v_s^2*(3*v_p^2-4*v_s))/(v_p^2-v_s^2) \quad (3.18)$$

$$v_{dyn}= (v_p^2-2*v_s^2)/(2* (v_p^2-v_s^2)) \quad (3.19)$$

Στη προσομοίωση όμως δεν εισάγονται οι δυναμικές αλλά οι στατικές ιδιότητες όσον αφορά το μέτρο ελαστικότητας. Αυτό γίνεται με την παρακάτω συσχέτιση Από τη δημοσίευση: Koukouzas, N., Ziogou, F., & Gemeni, V. (2009). Preliminary assessment of CO2 geological storage opportunities in Greece. International Journal of Greenhouse Gas Control, 3(4), 502-513

$$E_s=0,932*E_d-3,421 \quad (3.20)$$

Όπου $E_{dyn,}$ E_s είναι ο δυναμικός και ο στατικός ελαστικός συντελεστής αντίστοιχα, v_p και v_s είναι η ταχύτητα εγκάρσιων και διαμηκών κυμάτων, v_{dyn} είναι ο λόγος Poisson και ρ αντιστοιχεί στην πυκνότητα. Τα αποτελέσματα των τύπων αναγράφονται στον ακόλουθο πίνακα:

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Πίνακας 3.1: Τιμές γεωφυσικών και γεωμηχανικών παραμέτρων.

Vs (m/sec)	Vp (m/sec)	ρ (kg/m^3)	Edyn (MPa)	Esta (MPa)	Gdyn (MPa)	ν (-)
2300	3750	2470	27,79805	24,35078	12,4315	0,19849

Για την δημιουργία του μοντέλου χρειάστηκαν διαφορετικές τιμές πυκνότητας, σταθεράς Poisson και συντελεστή Young για τον ταμιευτήρα και για τα γύρω πετρώματα. Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν αποτυπώνονται στο παρακάτω πίνακα, Πίνακας 3.2.

Πίνακας 3.2: Τιμές πυκνότητας, σταθεράς Poisson και συντελεστή Young για τον ταμιευτήρα και τα γύρω πετρώματα.

	Πυκνότητα,ρ (kg/m^3)	**Σταθερά Poisson, ν (-)**	**Συντελεστής Young, E (GPa)**
Ταμιευτήρα	2470	0,271	8,4895
Γύρω Πετρώματα	2360	0,32	6,73

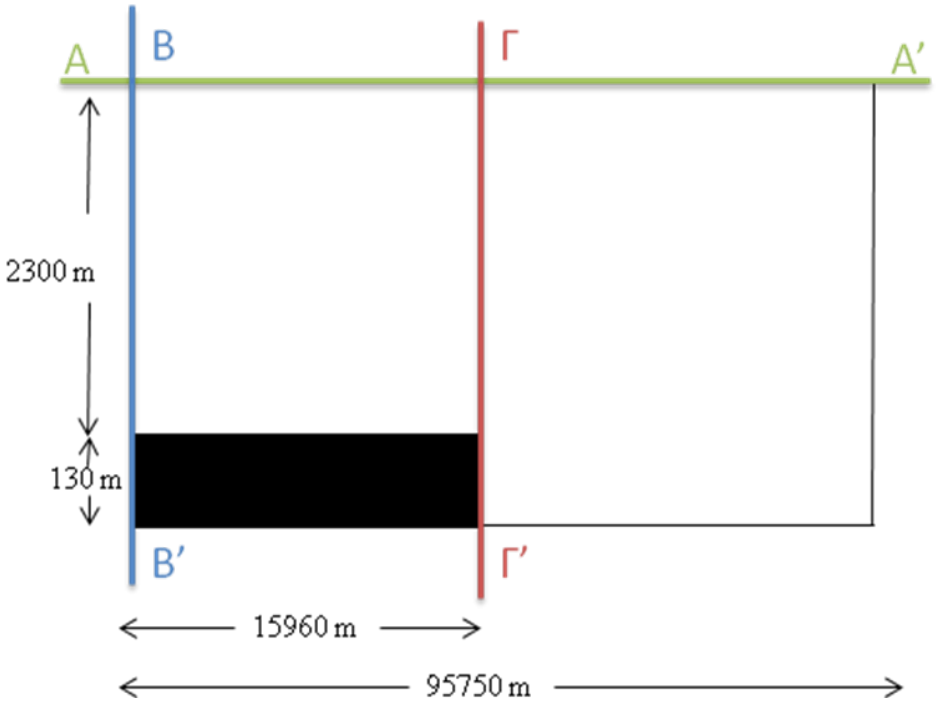
3.6: Μεθοδολογία μοντέλου

Το συνολικό πάχος του ταμιευτήρα στην λεκάνη Πρίνου- Καβάλας είναι 260 m, ενώ στο μοντέλο αποτυπώνεται το μισό πάχος στα 130m, σε βάθος 2,3 km από την επιφάνεια, η ακτίνα του υπολογίστηκε 15,96 km και η ακτίνα της περιοχής είναι 95,75 km.

Τα γραφήματα δημιουργήθηκαν σε τρείς τομές Α-Α', Β-Β' και Γ-Γ', οι οποίες αποτυπώνονται στο γράφημα 3.4. Το μοντέλο αναλύθηκε για τρεις περιπτώσεις καθίζησης οροφής του ταμιευτήρα (ΔΗ). Οι τιμές των ΔΗ για καθίζηση στην οροφή του ταμιευτήρα είναι για 0.01, 0,05 και 0,1 με διαφορετικούς λόγους ανισοτροπίας, R_1, $R_{1,25}$, $R_{2,5}$, R_5 από ισότροπο έως ισχυρά ανισότροπο εντατικό πεδίο, περιπτώσεις αποτυπώνονται αναλυτικά στον Πίνακα 3.2 και στον Πίνακα 3.3, όπου αναγράφονται και οι τιμές οριζόντιας και κάθετης τάσης. Τα αποτελέσματα βρέθηκαν για δυο συνθήκες, κανονικού ρήγματος όπου η κάθετη τάση είναι μεγαλύτερη από την οριζόντια τάση και ανάστροφου ρήγματος στην οποία η κάθετη τάση είναι μικρότερη από την οριζόντια τάση.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ



Γράφημα 3.4: Αποτύπωση τομών των διαγραμμάτων και της έκτασης της λεκάνης

Πίνακας 3.3: Τιμές Ανισοτροπίας σε συνθήκη κανονικού ρήγματος.

Κατακόρυφη Τάση (σ_v) > Οριζόντια Τάση (σ_h) (Συνθήκες Κανονικού Ρήγματος-Normal Fault)			
Κατακόρυφη Τάση (σ_v)	Οριζόντια Τάση (σ_h)	Λόγος Ανισοτροπίας (R)	Χαρακτηρισμός
53250	53250	1	Ισότροπο Εντατικό Πεδίο
53250	42600	1,25	Ελαφριά Ανισότροπο Εντατικό Πεδίο
53250	21300	2,5	Ενδιάμεσα Ανισότροπο Εντατικό Πεδίο
53250	10650	5	Ισχυρά Ανισότροπο Εντατικό Πεδίο

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

Πίνακας 3.4: Τιμές Ανισοτροπίας σε συνθήκη Ανάστροφου Ρήγματος.

Κατακόρυφη Τάση (σ_v)< Οριζόντια Τάση (σ_h) (Συνθήκες Ανάστροφου Ρήγματος- Strike Slip Fault)			
Κατακόρυφη Τάση (σ_v)	Οριζόντια Τάση (σ_h)	Λόγος Ανισοτροπίας (R)	Χαρακτηρισμός
53250	53250	1	Ισότροπο Εντατικό Πεδίο
42600	53250	1,25	Ελαφριά Ανισότροπο Εντατικό Πεδίο
21300	53250	2,5	Ενδιάμεσα Ανισότροπο Εντατικό Πεδίο
10650	53250	5	Ισχυρά Ανισότροπο Εντατικό Πεδίο

3.7: Παραδοχές

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων έγινε με βάση τις παραδοχές που λήφθηκαν. Αρχικά τέθηκε ότι ο ταμιευτήρας είναι οριζόντιος σε όλη την έκταση του. Επιπλέον η μετακίνηση του ανώτερου τμήματος του ταμιευτήρα γίνετε προς την βάση εξαιτίας της άντλησης ρευστών και κατά συνέπεια της αλλαγής όγκου του ταμιευτήρα. Τέλος η υψομετρική αλλαγή σε όλη την έκταση του εδάφους γίνετε ομοιόμορφα.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
ΑΠΘ

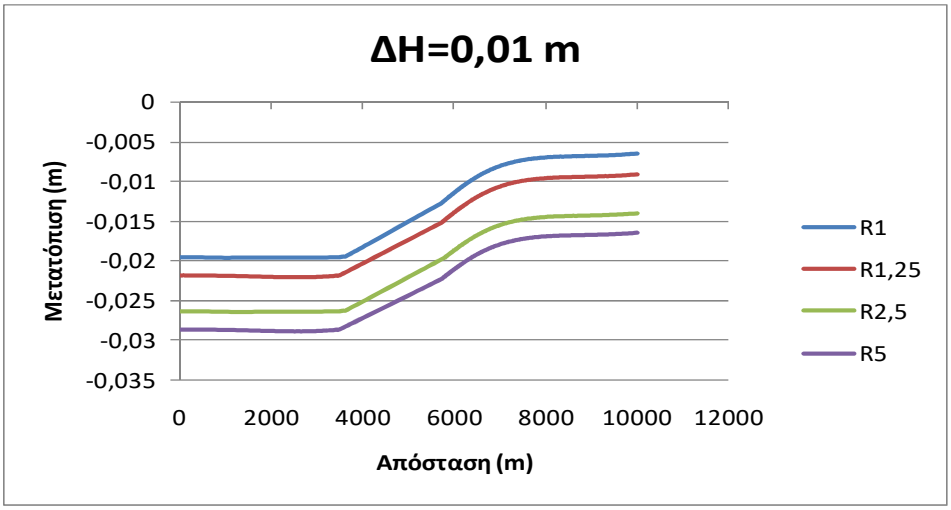
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

4.1: Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα πραγματοποιηθεί ανάλυση των αποτελεσμάτων σύμφωνα με τα γραφήματα που εξήχθη από το μοντέλο για την καθίζηση και τις μετακινήσεις κατά την εξάντληση υδρογονανθράκων στην λεκάνη του Πρίνου- Καβάλας. Αρχικά για συνθήκες κανονικού ρήγματος και έπειτα για συνθήκες ανάστροφου ρήγματος. Τα γραφήματα ομαδοποιήθηκαν σύμφωνα με το σημείο όπου λήφθηκαν τα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα οριζόντια της επιφάνειας, τομή Α-Α', στο κεντρικό σημείο του ταμιευτήρα, τομή Β-Β' και στο σημείο τομής του ταμιευτήρα με τα περιβάλλοντα πετρώματα, τομή Γ-Γ', όπως αποτυπώνονται στο γράφημα 3.4. Τέλος αναγράφονται πιθανές προτάσεις για την συνέχεια μελέτης της εργασίας.

4.2: Ανάλυση αποτελεσμάτων σε συνθήκες κανονικού ρήγματος.

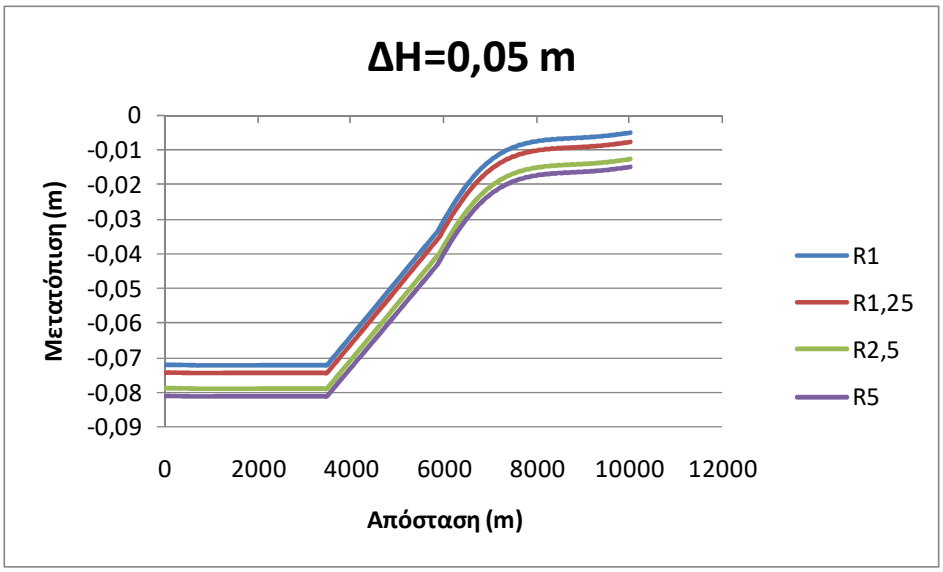
Στην περίπτωση όπου η άντληση ρευστών από τον ταμιευτήρα πραγματοποιείται σε συνθήκες κανονικού ρήγματος, δηλαδή η κάθετη τάση είναι μεγαλύτερη της οριζόντιας τάσης, $\sigma_v > \sigma_h$. Η ανάλυση του ταμιευτήρα γίνετε για τους διαφορετικούς λόγους ανισοτροπίας στην κάθε τομή ξεχωριστά. Στα γραφήματα 4.1, 4.2, 4.3 απεικονίζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις στην επιφάνεια του εδάφους για ΔΗ=0,01, ΔΗ=0,05, ΔΗ=0,1 m.



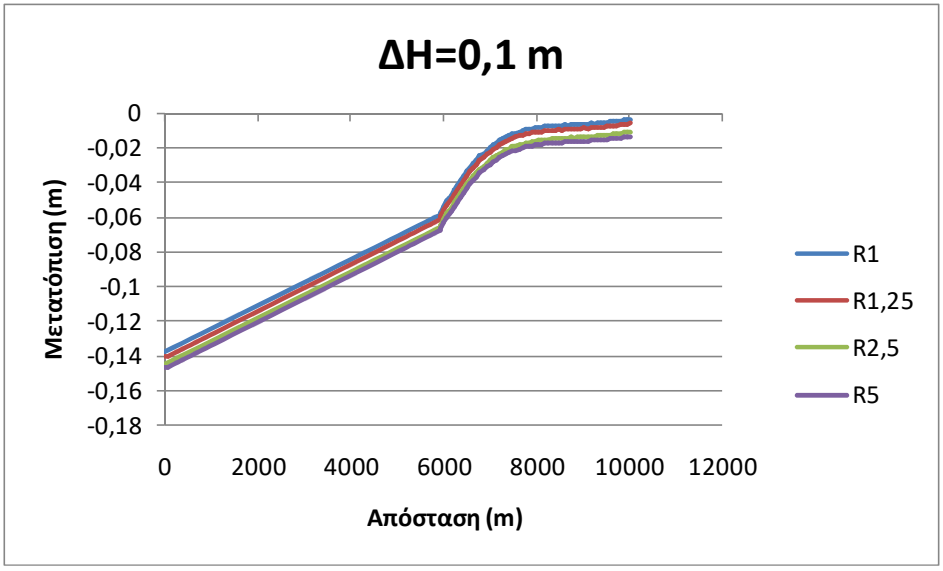
Γράφημα 4.1: Καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους για ΔΗ=0,01 m για διαφορετικούς λόγους ανισοτροπίας σε συνθήκες κανονικού ρήγματος.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ



Γράφημα 4.2: Καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους για ΔH=0,05m για διαφορετικούς λόγους ανισοτροπίας σε συνθήκες κανονικού ρήγματος.



Γράφημα 4.3: : Καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους για ΔH=0,1 m για διαφορετικούς λόγους ανισοτροπίας σε συνθήκες κανονικού ρήγματος.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

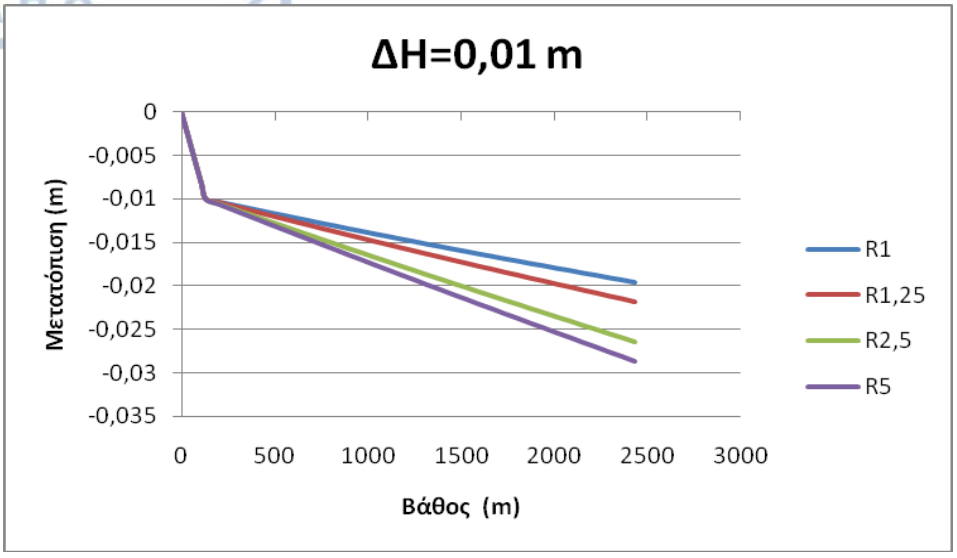
Στο γράφημα 4.1 παρατηρείται οι λόγοι ανισοτροπίας να έχουν σημαντική επιρροή στις τιμές καθίζησης. Οι καθιζήσεις στον λόγο ανισοτροπίας R_5 είναι 50% μεγαλύτερες από το R_1. Στο γράφημα 4.2, ενώ το ποσό για την άντληση ρευστού γίνετε πέντε φορές μεγαλύτερη από το ΔΗ=0,01 m, οι μετακινήσεις μεγαλώνουν κατά 2,75 φορές. Παρατηρείται μικρότερη επίδραση ανισοτροπίας του εντατικού πεδίου, αυτό το αποδεικνύει το στενό εύρος των καμπύλων σε σχέση με το γράφημα 4.1. Στο διάγραμμα 4.3 ενώ το ΔΗ=0.1 m γίνετε 10 φορές μεγαλύτερο από το ΔΗ=0,01 m η μετακίνηση είναι περίπου 5 φορές μεγαλύτερη. Επίσης οι τιμές των λόγων ανισοτροπίας έχουν παρόμοιες τιμές μετακίνησης. Παρατηρείται δηλαδή καθώς μεγαλώνει η παραγωγή όγκου ρευστού η μετακίνηση αυξάνεται αλλά με μικρότερο ρυθμό λόγο της μικρότερης επίδρασης της ανισοτροπίας.

Στα γραφήματα 4.1 και 4.2 παρατηρείται μια μεταβατική ζώνη καθίζησης έκτασης 2,5 km αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι διαφορετικές ιδιότητες του ταμιευτήρα με τα γύρω πετρώματα είναι διαφορετικές και η διαφορά μεταξύ των ιδιοτήτων σε βάθος προκαλεί επιρροή ακόμη και έως την επιφάνεια. Στο γράφημα 4.2 παρατηρείται όμως μεγαλύτερη κλίση, σε σχέση με την μικρότερη εξάντληση όγκου ρευστού. Αντίθετα στο διάγραμμα 4.3 δεν διαμορφώνει τμήμα με μεταβατική ζώνη, λόγω της αυξημένης εξάντλησης όγκου ρευστού και της έντονης ανακατανομής των κόκκων.

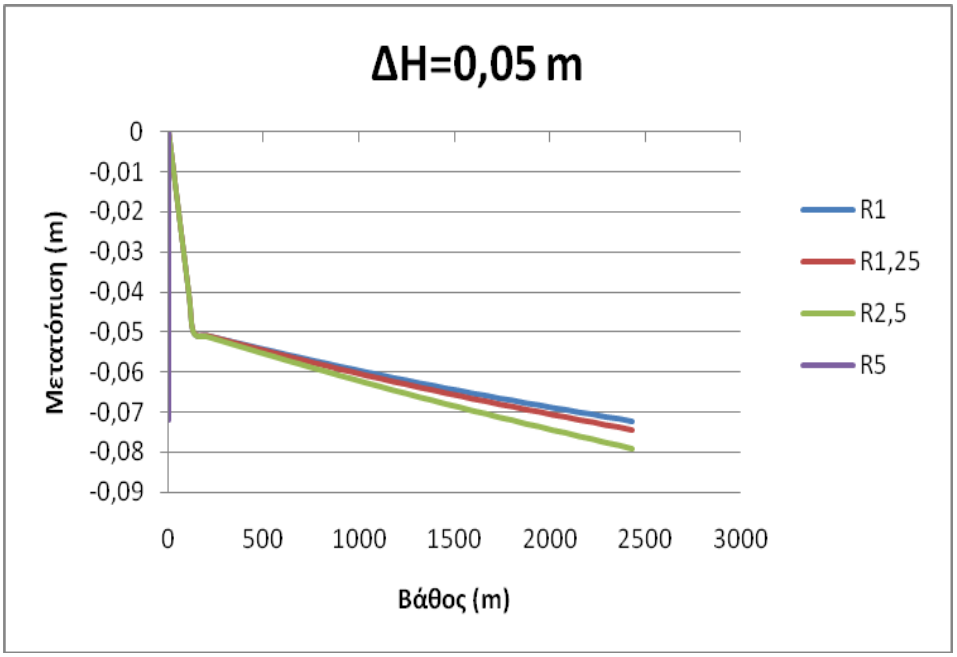
Οι μετακινήσεις στο κεντρικό τμήμα του ταμιευτήρα έως την επιφάνεια αποτυπώνονται στην τομή Β-Β’, όπως παρουσιάζεται στο γράφημα 3.4, τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρουσιάζονται στα γραφήματα 4.4, 4.5 και 4.6 στα οποία απεικονίζονται οι μετακινήσεις σε συνθήκες κανονικού ρήγματος για την καθίζηση της οροφή του ταμιευτήρα ΔΗ=0,01 m, ΔΗ=0,05 m, ΔΗ=0,1 m, στο καθένα αναλύεται για τους τέσσερις διαφορετικούς λόγους ανισοτροπίας.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας



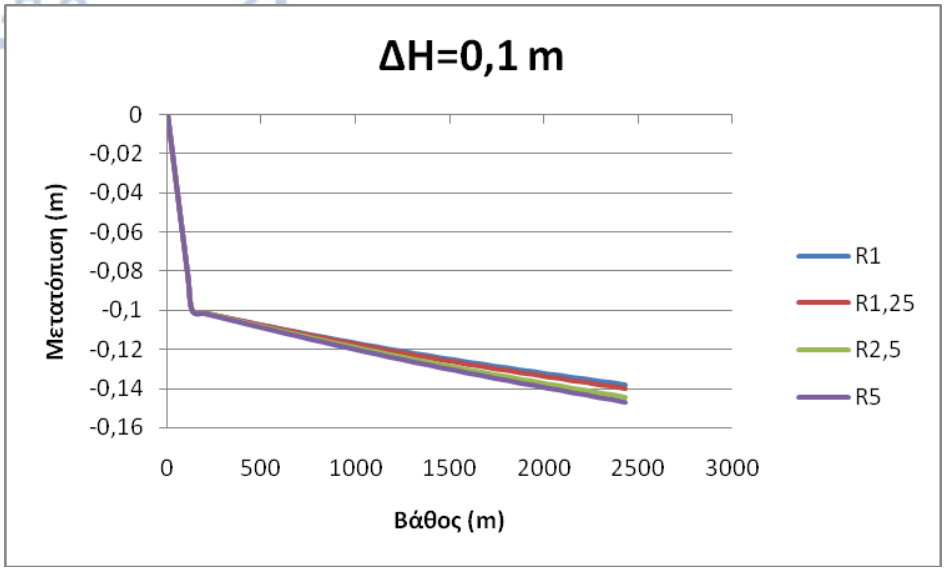
Γράφημα 4.4: Μετακινήσεις στο κεντρικό τμήμα του ταμιευτήρα έως την επιφάνεια για ΔH=0,01 m για διαφορετικούς λόγους ανισοτροπίας σε συνθήκες κανονικού ρήγματος.



Γράφημα 4.5: Μετακινήσεις στο κεντρικό τμήμα του ταμιευτήρα έως την επιφάνεια για ΔH=0,05 m για διαφορετικούς λόγους ανισοτροπίας σε συνθήκες κανονικού ρήγματος

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας



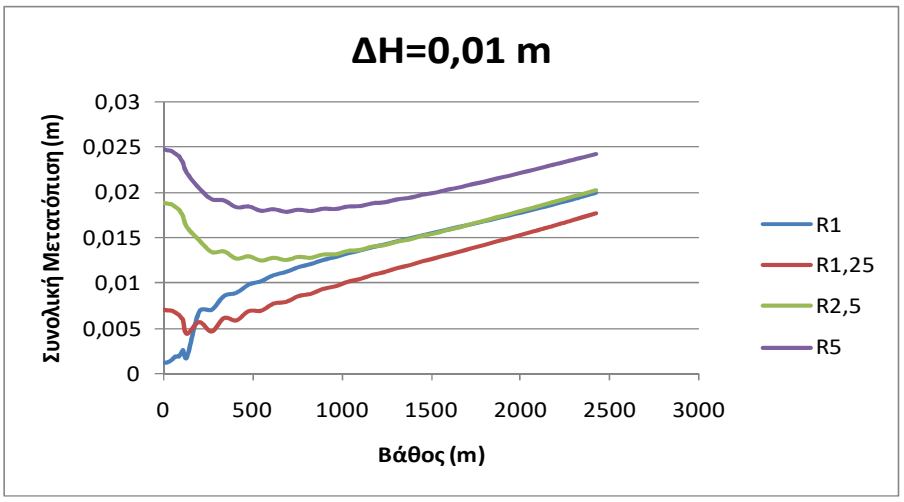
Γράφημα 4.6: Μετακινήσεις στο κεντρικό τμήμα του ταμιευτήρα έως την επιφάνεια για ΔΗ=0,1 m για διαφορετικούς λόγους ανισοτροπίας σε συνθήκες κανονικού ρήγματος.

Στα γραφήματα 4.4, 4.5 και 4.6 το σημείο (0,0) αποτελεί την βάση του ταμιευτήρα στην συνέχεια στα διαγράμματα ακολουθείται μια γραμμική πορεία η οποία είναι ίδια ανεξαρτήτως τους λόγους ανισοτροπίας. Η κοινή εξέλιξη της γραμμής διακόπτεται όταν συναντήσει το σημείο ΔΗ που έχει οριστεί στο κάθε διάγραμμα, το σημείο αυτό αποτελεί την οροφή του ταμιευτήρα με την αντίστοιχη καθίζηση που έχει τεθεί στην κάθε συνθήκη. Το τελικό σημείο της καμπύλης αντιστοιχεί στην επιφάνεια του εδάφους, το οποίο παρουσιάζει γραμμική συνέχεια και διαφοροποιείται η μετακίνηση ανά συντελεστή ανισοτροπίας. Η μεγάλη διαφορά μεταξύ των συντελεστών ανισοτροπίας παρουσιάζεται σε μικρές ποσότητες παραγωγής όγκου ρευστού ΔΗ=0,01 m, γράφημα 4.4, το φαινόμενο παρατηρείται από την επιφάνεια έως το βάθος των 1500 m. Από τα 1500 m και σε μεγαλύτερο βάθος οι μετακινήσεις συμπεριφέρονται με τον ίδιο τρόπο ανεξαρτήτως του συντελεστή ανισοτροπίας. Στο γράφημα 4.5, για ΔΗ=0,05 m η επιρροή των συντελεστών είναι εντονότερη έως το βάθος των 500 m ενώ βαθύτερα δεν επιδρούν οι συντελεστές. Το ίδιο φαινόμενο επιρροής φαίνεται και στο γράφημα 4.6 με την επίδραση των λόγων ανισοτροπιών να παρουσιάζεται έως το βάθος των 250 m. Στο τέλος παρατηρούνται ότι με την αύξηση του όγκου παραγωγής μειώνεται η κλίση και άρα ο ρυθμός παραγωγής.

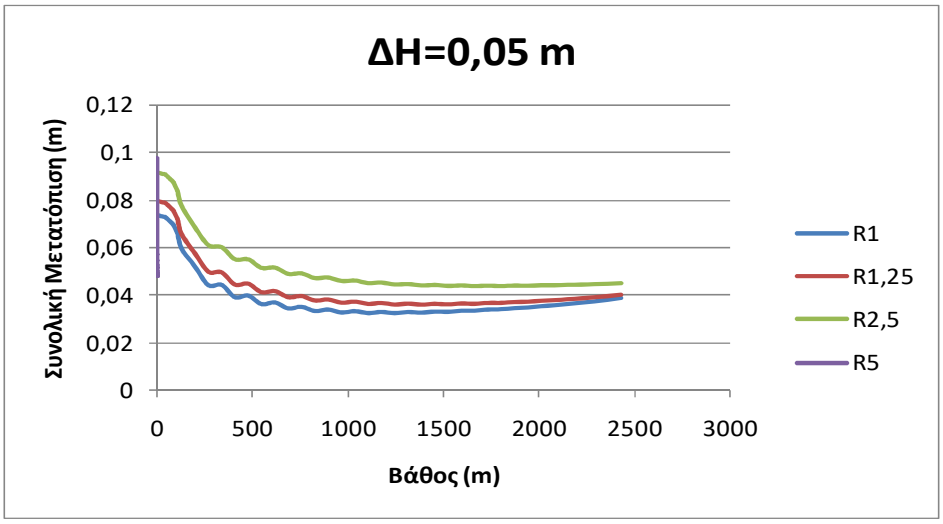
Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
ΑΠΘ

Σε συνθήκες κανονικού ρήγματος πραγματοποιήθηκε και μια ακόμη ομάδα γραφημάτων στο σημείο τομής του ταμιευτήρα με τα γύρω πετρώματα που εξελίσσεται έως την επιφάνεια, στην τομή Γ-Γ', όπως φαίνεται στο γράφημα 3.4. Στα διαγράμματα 4.7, 4.8, 4.9 αποτυπώνεται η εξάντληση ρευστού για ΔΗ=0,01 m, ΔΗ=0,05 m και για ΔΗ= 0,1 m για τους τέσσερις λόγους ανισοτροπίας.



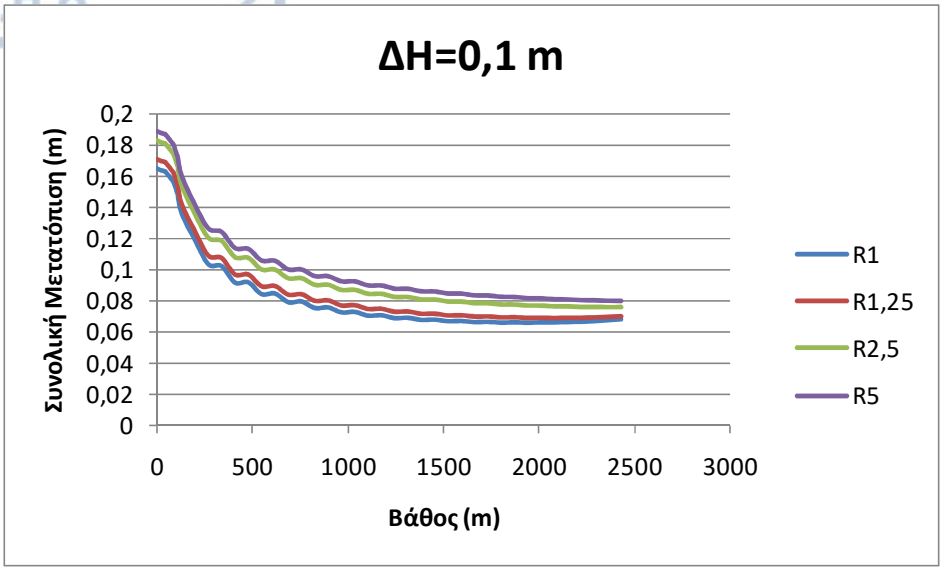
Γράφημα 4.7: Μετακινήσεις στην επαφή του ταμιευτήρα με τα γύρω πετρώματα για ΔΗ=0,01 m για διαφορετικούς λόγους ανισοτροπίας σε συνθήκες κανονικού ρήγματος.



Γράφημα 4.8 : Μετακινήσεις στην επαφή του ταμιευτήρα με τα γύρω πετρώματα για ΔΗ=0,05 m για διαφορετικούς λόγους ανισοτροπίας σε συνθήκες κανονικού ρήγματος.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας



Γράφημα 4.9: Μετακινήσεις στην επαφή του ταμιευτήρα με τα γύρω πετρώματα για ΔΗ=0,1 m για διαφορετικούς λόγους ανισοτροπίας σε συνθήκες κανονικού ρήγματος.

Στα γραφήματα 4.7, 4.8 και 4.9 στο σημείο τομής του ταμιευτήρα με τα γύρω πετρώματα σε βάθος 130 m αποτυπώνεται μείωση των μετακινήσεων εξαιτίας της άντλησης όγκου ρευστών. Από την οροφή του ταμιευτήρα προς την επιφάνεια παρατηρούνται δυο ζώνες. Συγκεκριμένα και στα τρία διαγράμματα παρατηρείται στην ζώνη επαφής μη γραμμική συμπεριφορά. Στην μη γραμμική ζώνη αλλάζει η έκταση της ανάλογα με το ποσό του όγκου ρευστών που αντλείται. Για την παραγωγή ρευστών μικρού όγκου ΔΗ=0,01 m η έκταση της ζώνης είναι 800 m από την οροφή του ταμιευτήρα προς την επιφάνεια. Για την πενταπλάσια παραγωγή όγκου ρευστού ΔΗ=0,05 m η ζώνη εκτείνεται περίπου 650 m από την οροφή του ταμιευτήρα. Τέλος για μεγάλη παραγωγή όγκου ρευστού ΔΗ= 0,1 m η ζώνη εκτείνεται 800 m από το ανώτερο τμήμα του ταμιευτήρα προς την επιφάνεια. Στην συνέχεια, στο διάγραμμα 4.7 από τα 1000 m βάθος και προς την επιφάνεια παρουσιάζεται μια γραμμική πρόοδος εξαιτίας των μετακινήσεων που είναι συνάρτηση του λόγου ανισοτροπίας. Ενώ στα διαγράμματα 4.8 και 4.9 όπου η παραγωγή όγκου ρευστών μεγαλώνει, σε βάθος 800 m και 1000 m αντίστοιχα έως την επιφάνεια του εδάφους ακολουθεί ουδέτερη συμπεριφορά κατά την οποία ασκείται μικρότερη επίδραση από τους λόγους ανισοτροπίας.

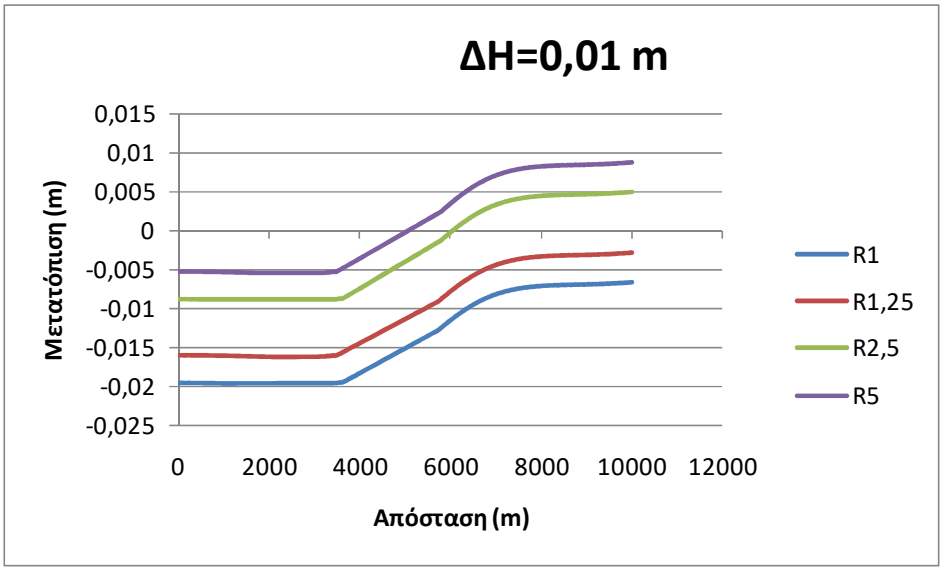
Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
ΑΠΘ

Συγκρίνοντας τα γραφήματα 4.1, 4.2 και 4.3 παρατηρείται ότι οι τιμές στην θέση 5650 m, η οποία αποτελεί η προέκταση του κεντρικού τμήματος του ταμιευτήρα στην επιφάνεια, σε σχέση με τα διαγράμματα 4.7, 4.8 και 4.9 αντίστοιχα, επιβεβαιώνουν τις τιμές στην επιφάνεια του εδάφους. Παρόμοια, τα γραφήματα 4.1, 4.2 και 4.3 στο σημείο με απόσταση μηδέν, οι τιμές του είναι ίσες σε αντιστοιχία των τιμών στην επιφάνεια του εδάφους των γραφημάτων 4.4, 4.5 και 4.6.

4.3: Ανάλυση Αποτελεσμάτων σε συνθήκες ανάστροφου ρήγματος.

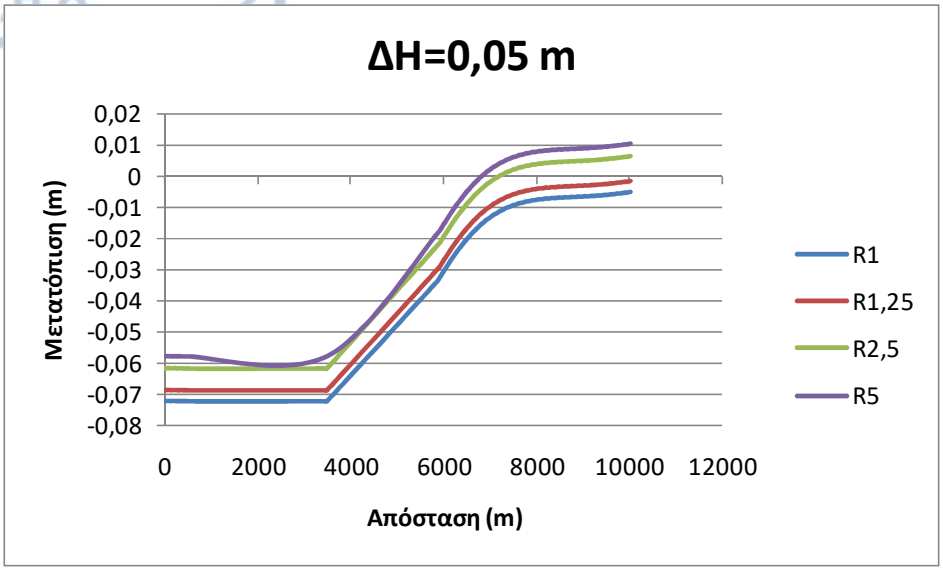
Στην περίπτωση όπου στο πεδίο τάσεων η οριζόντια τάση είναι μεγαλύτερη από την κάθετη τάση $\sigma_h > \sigma_v$, δηλαδή σε συνθήκες ανάστροφου ρήγματος. Η ανάλυση γίνετε στα διαγράμματα για τους τέσσερις διαφορετικούς λόγους ανισοτροπίας ανάλογα με τον όγκο ρευστού που θα αντληθεί από τον ταμιευτήρα, για ΔH=0,01 m, ΔH=0,05 m και ΔH=0,1 m. Στα γραφήματα 4.10, 4.11 και 4.12 αναλύεται η τομή Α-Α', το σημείο της τομής παρουσιάζεται στο γράφημα 3.4, που αναπαριστά την καθίζηση του εδάφους στην επιφάνεια.



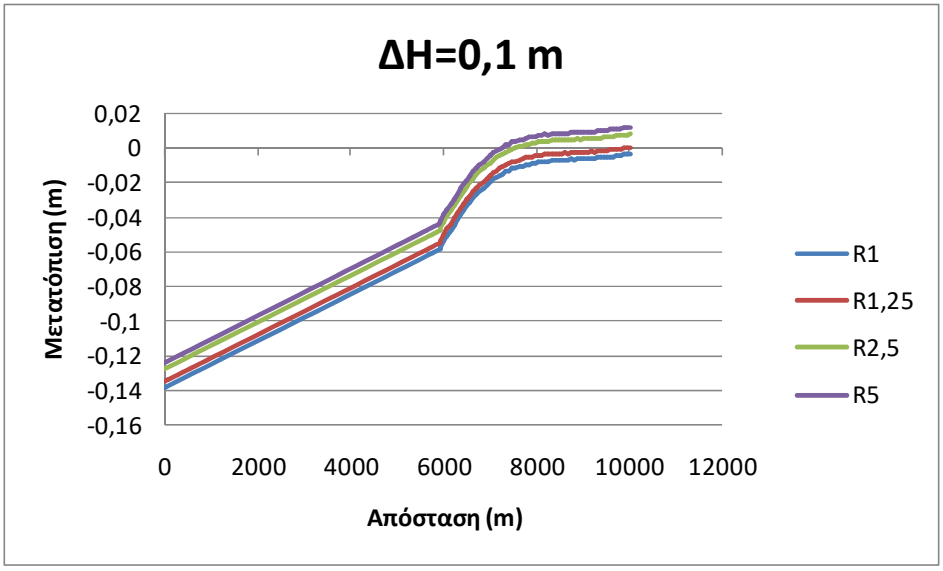
Γράφημα 4.10: Καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους για ΔH=0,01 m για διαφορετικούς λόγους ανισοτροπίας σε συνθήκες ανάστροφου ρήγματος.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας



Γράφημα 4.11: Καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους για ΔH=0,05 m για διαφορετικούς λόγους ανισοτροπίας σε συνθήκες ανάστροφου ρήγματος.



Γράφημα 4.12: Καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους για ΔH=0,1 m για διαφορετικούς λόγους ανισοτροπίας σε συνθήκες ανάστροφου ρήγματος.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Στο διάγραμμα 4.10 για μικρή παραγωγή όγκου ρευστού οι λόγοι ανισοτροπίας επηρεάζουν σε μεγαλύτερο βαθμό τις τιμές που γίνετε η καθίζηση. Ο λόγος R_5 είναι κατά 75% μικρότερος από τον λόγο R_1. Δηλαδή η καθίζηση μειώνεται με μεγαλύτερο λόγο ανισοτροπίας, Στο διάγραμμα 4.11 ενώ ο όγκος παραγωγής μεγαλώνει 5 φορές περισσότερο από το ΔΗ=0,05 m οι λόγοι ανισοτροπίας επηρεάζουν σε μικρότερο βαθμό αυτό διαπιστώνεται από το γεγονός ότι ο λόγος R_5/ R_1 είναι μικρότερος σε σχέση με τους αντίστοιχους λόγους στο διάγραμμα 4.10. Οι λόγοι ανισοτροπίας στο διάγραμμα 4.12 επηρεάζει ελάχιστα τις τιμές καθίζησης. Συνοψίζοντας, ενώ μεγαλώνει η καθίζηση με την μεγαλύτερη παραγωγή όγκου ρευστού, οι τιμές μεταξύ των ανισοτροπιών επηρεάζουν σε μικρότερο ρυθμό την καθίζηση.

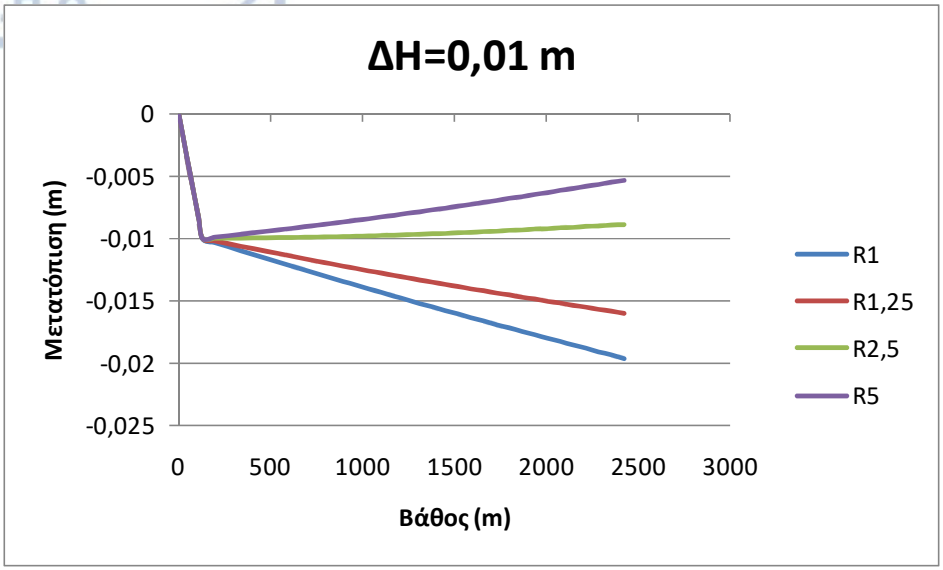
Η επέκταση στην επιφάνεια του σημείου τομής του ταμιευτήρα με τα περιβάλλοντα πετρώματα λόγο των διαφορετικών ιδιοτήτων, διαμορφώνει μια μεταβατική ζώνη 2,5 km στα διαγράμματα 4.10 και 4.11. Στο διάγραμμα 4.12 η μεταβατική ζώνη δεν φαίνεται να υπάρχει λόγο του μεγάλου ποσού παραγωγής ρευστού και της έντονης ανακατανομής των κόκκων.

Ενώ τα παραπάνω φαινόμενα ισχύουν και για τις συνθήκες κανονικού ρήγματος, οι καθιζήσεις στο ανάστροφο ρήγμα είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες καθιζήσεις στο κανονικό ρήγμα. Επιπλέον, όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος ανισοτροπίας, γεγονός που παρουσιάζεται εντονότερα στο R_5 αλλά φαίνεται και στο $R_{2,5}$ διαμορφώνει μια μορφή που κάμπτεται προς τα πάνω, πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, το φαινόμενο αυτό ονομάζεται << Heave>> ή <<Φούσκωμα>>. Η μορφολογία αυτή εξαρτάται από τις ισχυρές πλευρικές τάσεις, από τις μετακινήσεις της οροφής και από το βάρος των υπερκείμενων στρωμάτων.

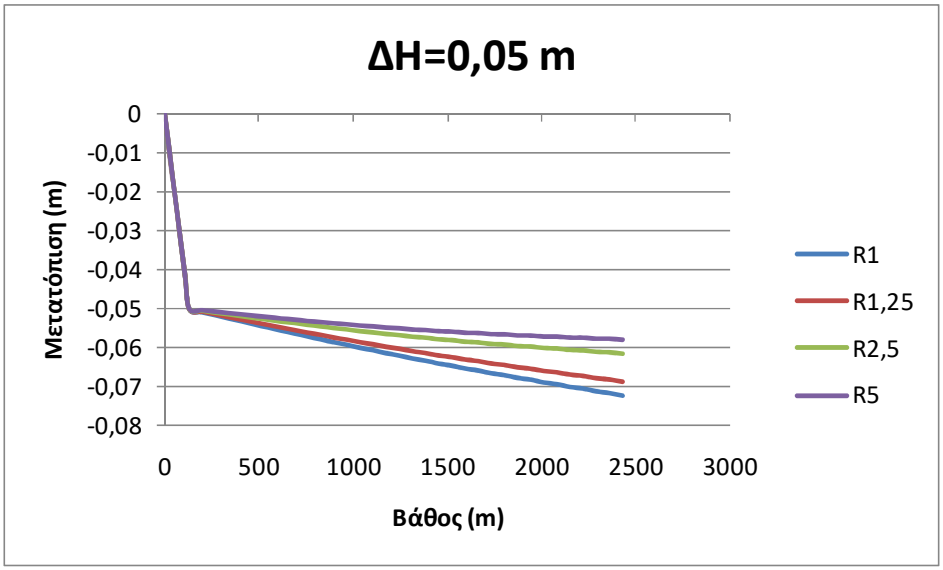
Η μετακίνηση του εδάφους στην τομή Β-Β’ από το κεντρικό τμήμα του ταμιευτήρα έως την επιφάνεια του εδάφους αποτυπώνεται στα γραφήματα 4.13, 4.14, 4.15, τα διαγράμματα αποτυπώνουν την άντληση όγκου ρευστού για ΔΗ=0,01 m, ΔΗ=0,05 m και ΔΗ=0,1 m αντίστοιχα για καθ’ ένα από τους λόγους ανισοτροπίας. Τα διαγράμματα αναφέρονται σε συνθήκες ανάστροφου ρήγματος.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας



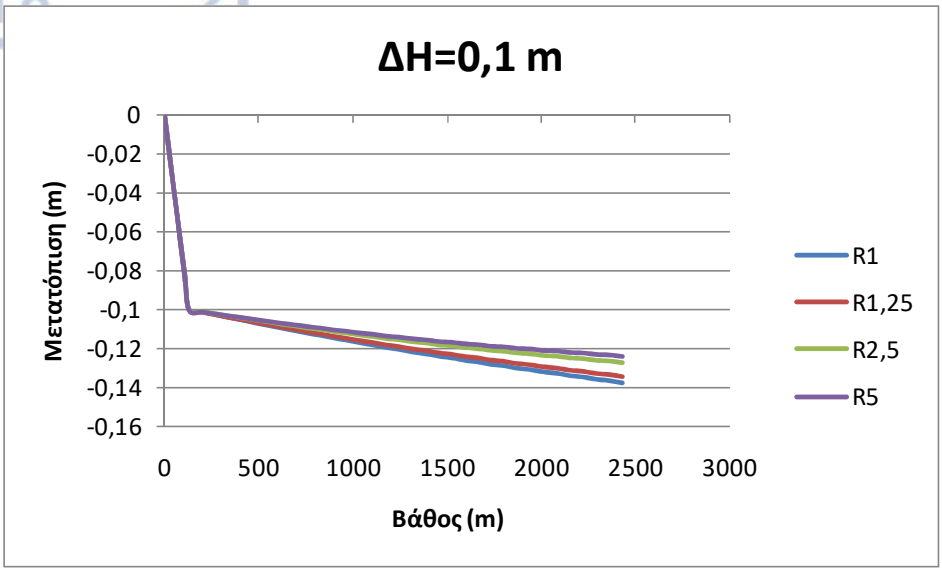
Γράφημα 4.13: Μετακινήσεις στο κεντρικό τμήμα του ταμιευτήρα έως την επιφάνεια για ΔH=0,01 m για διαφορετικούς λόγους ανισοτροπίας σε συνθήκες ανάστροφου ρήγματος.



Γράφημα 4.14: Μετακινήσεις στο κεντρικό τμήμα του ταμιευτήρα έως την επιφάνεια για ΔH=0,05 m για διαφορετικούς λόγους ανισοτροπίας σε συνθήκες ανάστροφου ρήγματος.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.



Γράφημα 4.15: Μετακινήσεις στο κεντρικό τμήμα του ταμιευτήρα έως την επιφάνεια για ΔH=0,1 m για διαφορετικούς λόγους ανισοτροπίας σε συνθήκες ανάστροφου ρήγματος.

Στα γραφήματα 4.13, 4.14 και 4.15, το σημείο της βάσης του ταμιευτήρα αποτυπώνεται στο σημείο (0,0). Στην συνέχεια, για όλους τους λόγους ανισοτροπίας η μετακίνηση είναι ανάλογη με την συνθήκη καθίζησης που τέθηκε ως ΔH, έως το βάθος των 130 m, δηλαδή μέχρι την οροφή του ταμιευτήρα. Από την οροφή του ταμιευτήρα έως την επιφάνεια του εδάφους συνεχίζει η γραμμική πορεία, η οποία διαφοροποιείται ανάλογα με τον συντελεστή ανισοτροπίας.

Στο γράφημα 4.13 όπου ο όγκος παραγωγής ρευστού είναι μικρός, ΔH=0,01 m, οι λόγοι ανισοτροπίας επηρεάζουν σημαντικά το ποσό μετακίνησης του εδάφους. Για τους λόγους ανισοτροπίας R_1 και $R_{1,25}$ οι μετακινήσεις κατά βάθος μεγαλώνουν, ενώ για τους συντελεστές $R_{2,5}$ και R_5 οι μετατοπίσεις μικραίνουν, οι συντελεστές ακολουθούν την συμπεριφορά όπως στις συνθήκες κανονικού ρήγματος απλώς η μετακινήσεις είναι μικρότερου μεγέθους. Το γεγονός αυτό οφείλεται ότι ο ισχυρός λόγος ανισοτροπίας αποτρέπει την μετακίνηση των υπερκείμενων στρωμάτων.

Στο γράφημα 4.14 όπου ο όγκος ρευστού που αντλείται είναι μεγαλύτερος οι λόγοι ανισοτροπίας επηρεάζουν τις μετατοπίσεις έως το βάθος των 1500 m, στα βαθύτερα στρώματα

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

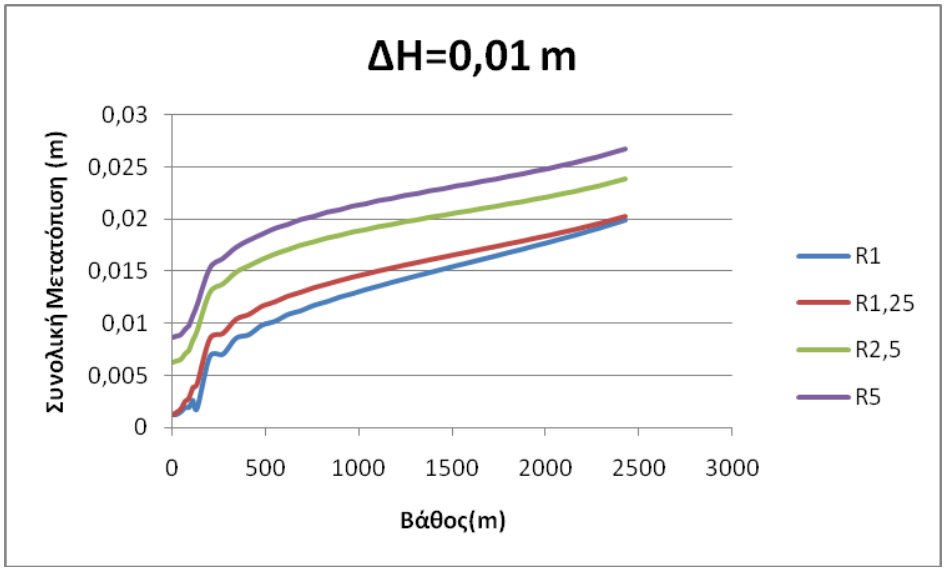
Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
ΑΠΘ

δεν παρουσιάζουν επιρροή. Ενώ η συμπεριφορά είναι παρόμοια με την συμπεριφορά κανονικού ρήγματος με την διαφορά ότι τα μεγέθη είναι μικρότερα.

Στο γράφημα 4.15, όπου ο όγκος ρευστού που αντλείται είναι μεγάλος οι λόγοι ανισοτροπίας επηρεάζουν μια μικρή ζώνη του εδάφους περίπου στα 250 m. Η επίδραση αυτή είναι πολύ μικρή. Ο λόγος ανισοτροπίας παρατηρείται ότι δεν διαμορφώνει τις μετακινήσεις, εξαιτίας αυτού οι τιμές σε σχέση με τις συνθήκες κανονικού ρήγματος έχουν μικρή απόκλιση.

Συμπερασματικά, οι συντελεστές ανισοτροπίας δεν επηρεάζουν τις μετακινήσεις εντός του ταμιευτήρα αλλά γίνετε ένας εξαρτημένος παράγοντας για τις μετακινήσεις από το ανώτερο τμήμα του ταμιευτήρα έως την επιφάνεια.

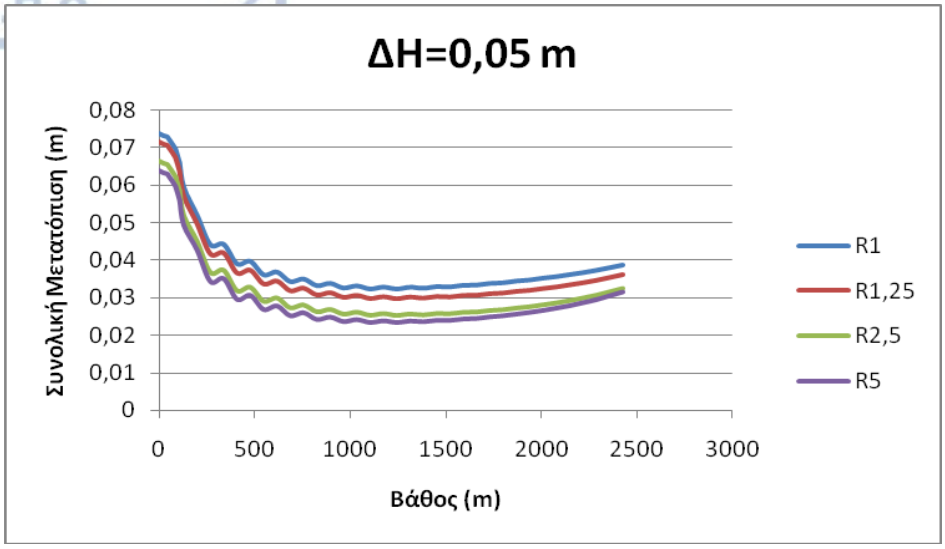
Σε συνθήκες ανάστροφου ρήγματος αναλύθηκε το μοντέλο στην τομή Γ-Γ’ στο διάγραμμα το οποίο περιγράφει τις κάθετες μετακινήσεις από το σημείο επαφής του ταμιευτήρα με τα γύρω πετρώματα έως την επιφάνεια του εδάφους. Η ανάλυση έγινε για ΔΗ=0,01 m, ΔΗ=0,05 m, ΔΗ=0,1 m για τους τέσσερις λόγους ανισοτροπίας. Το μοντέλο περιγράφηκε στα γραφήματα 4.16, 4.17 και 4.18.



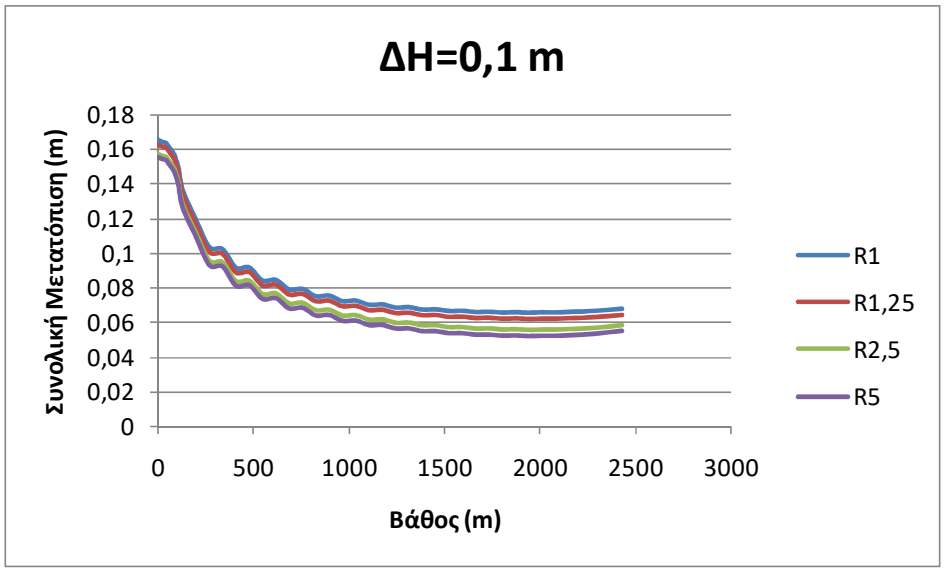
Γράφημα 4.16: Μετακινήσεις στην επαφή του ταμιευτήρα με τα γύρω πετρώματα για ΔΗ=0,01 m για διαφορετικούς λόγους ανισοτροπίας σε συνθήκες ανάστροφου ρήγματος.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας



Γράφημα 4.17: Μετακινήσεις στην επαφή του ταμιευτήρα με τα γύρω πετρώματα για ΔH=0,05 m για διαφορετικούς λόγους ανισοτροπίας σε συνθήκες ανάστροφου ρήγματος.



Γράφημα 4.18: Μετακινήσεις στην επαφή του ταμιευτήρα με τα γύρω πετρώματα για ΔH=0,1 m για διαφορετικούς λόγους ανισοτροπίας σε συνθήκες ανάστροφου ρήγματος.

Στο γράφημα 4.16, παρατηρείται ότι όλοι οι λόγοι ανισοτροπίας παρουσιάζουν μια αυξητική τάση στις μετακινήσεις. Αρχικά στον ταμιευτήρα εμφανίζει μικρή κάμψη, η μη γραμμική

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
ΑΠΘ

συμπεριφορά στο σύνορο του ταμιευτήρα οφείλεται στην διαφορά ιδιοτήτων, στο μικρό πάχος του ταμιευτήρα και στις μετακινήσεις της οροφής. Έπειτα πάνω από τον ταμιευτήρα παρουσιάζει μια μεταβατική ζώνη έκτασης 150- 200 m. Στην μεταβατική ζώνη υπάρχει μια μη γραμμική ακολουθία η οποία οφείλεται στις διαφορετικές ιδιότητες του ταμιευτήρα σε σχέση με τα γύρω πετρώματα. Στην μεταβατική ζώνη η έκταση μειώνεται σε σχέση με το διάγραμμα 4.7 το οποίο αναφέρεται στις ίδιες συνθήκες αλλά με την κάθετη τάση μεγαλύτερη από την οριζόντια τάση. Τελικό στάδιο έως την επιφάνεια μια γραμμική αυξητική συμπεριφορά.

Στα γραφήματα 4.17 και 4.18 υπάρχουν ζώνες που καθορίζουν την συμπεριφορά της μετακίνησης. Αρχικά αποτυπώνεται μείωση λόγω εξάντλησης ρευστών έως τα 130 m, το σημείο επαφής του ταμιευτήρα με τα περιβάλλοντα πετρώματα. Στην συνέχεια ακολουθεί μη γραμμική συμπεριφορά, όπου για άντληση όγκου ρευστού ΔΗ=0,05 m συμπεριφορά εκτείνετε για 800 m, λίγο μεγαλύτερη από την μη γραμμική ζώνη των 750 m στις συνθήκες κανονικού ρήγματος. Για άντληση μεγάλου όγκου ΔΗ=0,1 m η ζώνη εκτείνετε στα 1400 m βάθος και το πάχος της είναι περίπου 1350 m, 1,75 φορές μεγαλύτερη έκταση συγκριτικά με την έκταση στις συνθήκες κανονικού ρήγματος. Έπειτα η συμπεριφορά του είναι ουδέτερη, δηλαδή δεν υπάρχουν μετακινήσεις, για την άντληση ρευστών ΔΗ= 0,05 m η συμπεριφορά συνεχίζει από τα 900 m έως τα 1500 m, για άντληση ρευστών όγκου ΔΗ=0,1 m η συμπεριφορά αυτή συνεχίζει έως την επιφάνεια, όπως συμβαίνει και στις συνθήκες κανονικού ρήγματος. Τέλος για την ενδιάμεση παραγωγή συνεχίζει μια αυξητική τάση με μικρή γωνία κλίσης, η συμπεριφορά αυτή δεν παρατηρείται σε συνθήκες κανονικού ρήγματος, του οποίου η συμπεριφορά είναι ουδέτερη έως την επιφάνεια του εδάφους.

Οι τιμές στα γραφήματα 4.10, 4.11 και 4.12 σε απόσταση 0, που αντιπροσωπεύουν την προέκταση του κεντρικού τμήματος του ταμιευτήρα στην επιφάνεια, επιβεβαιώνουν τις τιμές στα γραφήματα 4.13, 4.14, 4.15 στο βάθος των 2500 m που αποτυπώνει την επιφάνεια του εδάφους. Τα γραφήματα 4.10, 4.11 και 4.12 σε απόσταση 1000 m αντιπροσωπεύουν την επιφάνεια κάτω από την οποία βρίσκεται η επαφή του πετρώματος ταμιευτήρα με τα γύρω πετρώματα και οι τιμές στο σημείο αυτό ταυτίζονται με τις τιμές στα διαγράμματα 4.16, 4.17, 4.18 στο βάθος των 2500 m.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Συγκρίνοντας τις τιμές στις συνθήκες ανάστροφου ρήγματος και στις συνθήκες κανονικού ρήγματος παρατηρείται ότι οι τιμές στα γραφήματα 4.7 και του 4.16 έχουν μικρή απόκλιση, ενώ έχουν ίδια συμπεριφορά. Στο γράφημα 4.7 για μεγαλύτερους λόγους ανισοτροπίας έχει μεγαλύτερες τιμές κοντά στον ταμιευτήρα έως το βάθος των 130 m, ενώ στο διάγραμμα 4.16 οι τιμές όσο πλησιάζουν στην επιφάνεια είναι ελάχιστα μεγαλύτερες από το γράφημα 4.7. Ενώ και στις δυο περιπτώσεις, ανάστροφου και κανονικού ρήγματος, η ισότροπη συμπεριφορά έχει τις χαμηλότερες τιμές και η ισχυρά ανισότροπη συμπεριφορά έχει τις υψηλότερες. Στα γραφήματα 4.8 και 4.17 έχουν παρόμοια συμπεριφορά, με μια μικρή απόκλιση στις τιμές, η διαφορά μεταξύ των μετακινήσεων έγκειται της τάξης των 0,02 m, με τις μεγαλύτερες τιμές μετακίνησης να λαμβάνουν χώρα στις συνθήκες κανονικού ρήγματος. Ενώ στα διαγράμματα 4.9 και 4.18 οι μετακινήσεις φθάνουν περίπου στο 0,7-0,8 m και οι τιμές μεταξύ των συντελεστών ανισοτροπίας είναι παρόμοιες. Μεταξύ των γραφημάτων 4.8 και 4.17, 4.9 και 4.18 οι λόγοι ανισοτροπίας έχουν αντίθετη συμπεριφορά, όπου στις συνθήκες κανονικού ρήγματος όσο μεγαλύτερη ανισοτροπία παρουσιάζει τόσο μικρότερη είναι η μετακίνηση, παρουσιάζει δηλαδή αντίθετη συμπεριφορά σε σχέση με τις συνθήκες ανάστροφου ρήγματος.

Συμπεραίνοντας ότι με την αύξηση όγκου παραγωγής οι συντελεστές ανισοτροπίας και οι τάσεις δεν επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τις τιμές των μετακινήσεων,

4.4: Προτάσεις για εξέλιξη εργασίας.

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων για τις δυο συνθήκες, κανονικού και ανάστροφου ρήγματος, ολοκληρώθηκε θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν ορισμένες μελέτες για την εξέλιξη της εργασίας αυτής. Πιθανές προτάσεις θα μπορούσαν να είναι οι ακόλουθες:

- Επίδραση της πλαστικότητας του ταμιευτήρα και των υπερκείμενων πετρωμάτων
- Ανάλυση πορομηχανικής συμπεριφοράς. Η αντικατάσταση των μετακινήσεων είναι συνέπεια παραγωγής όγκων υδρογονανθράκων με πραγματική ογκομετρική παροχή Q η μονάδα μέτρησης είναι B.B.L/ day.
- Μελέτη δημιουργίας ρωγμών στο πέτρωμα κάλυμμα.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
ΑΠΘ

Αγγλική Βιβλιογραφία

Asaei, H., Moosavi, M., & Aghighi, M. A. (2017). *A laboratory study of stress arching around an inclusion due to pore pressure changes*. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 10, 678-693. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.01.008

Bachu, S. (2008). *CO2 Storage in Geological Media: Role, Means, Status and Barriers to Deployment.* Progress in Energy and Combustion Science, 34(2):254-273. https://doi.org/10.1016/j.pecs.2007.10.001

Biot, M. A. (1941). *General theory of three-dimensional consolidation*. J. Appl. Phys., 12:155-64. DOI: https://doi.org/10.1063/1.1712886

Biot, M.A., Willis, D.F. (1957) *The elastic coefficients of the theory of consolidation*. J Appl Mech 24:584–601. DOI: https://doi.org/10.1115/1.4011606

Cheng, A.H-D. (1997). *Material coefficients of anisotropic poroelasticity*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 34(2):199–205. DOI: https://doi.org/10.1016/S0148-9062(96)00055-1

Choustoulakis, E. (2015). *Detection of gas in sandstone reservoir using AVO analysis in Prinos basin*. Master Thesis of Mineral Resources Engineering, Technical University of Crete, Chania, Greece. https://doi.org/10.26233/heallink.tuc.61648

Fokker, P. A., & Orlic, B. (2006). *Semi-Analytic Modelling of Subsidence*. Journal of the International Association for Mathematical Geology, 38(5):565-589. DOI: 10.1007/s11004-006-9034-z

Fjaer, E., Holt, R. M. , Horsrud, P., & Raaen, A. M. (2008). Petroleum related rock mechanics. Elsevier

Gambolati, G., Ferronato M., & Teatini, P. (2006). *Reservoir compaction and land subsidence*. Revue Européenne de Génie Civil, 10:6-7, 731-762, DOI: 10.1080/17747120.2006.9692854

Gaurina-Međimurec, N., & Novak Mavar, K. (2017). *Depleted hydrocarbon reservoirs and CO2 injection wells –CO2 leakage assessment. Rudarsko-geološko-Naftni Zbornik*, *32*(2), 15–27. https://doi.org/10.17794/rgn.2017.2.3

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

Geertsma, J. (1973). *Land Subsidence above Compacting Oil and Gas Reservoirs.* Journal of Petroleum Technology, Vol. 59, No. 6, pp. 734-744. DOI: https://doi.org/10.2118/3730-PA

Gercek, H. (2007). *Poisson's ratio values for rocks.* International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 44, 1-13. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2006.04.011

Hettema, M.H.H., Schutjens, P.M.T.M., Verboom, B.J.M. & Gussinklo, H.J. (2000). *Production-Induced Compaction of a sandstone reservoir: The strong influence of stress path.* SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 3 (4), 342-347

Hillis, R. R. (2001). *Coupled changes in pore pressure and stress in oil fields and sedimentary basins*. Petroleum geoscience ,7, (4). DOI: 10.1144/petgeo.7.4.419

Khurshid, I., Fujii, Y., Choe, J. (2015). *Analytical model to determine optimal fluid injection time ranges for increasing fluid storage and oil recovery: A reservoir compaction approach.* Journal of Petroleum Science and Engineering, Volume 135, , Pages 240-245

Koukouzas, N., Ziogou, F., & Gemeni, V. (2009). *Preliminary assessment of CO2 geological storage opportunities in Greece.* International Journal of Greenhouse Gas Control , 3, 502-513. https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2008.10.005

Kyriakou, A. (2014). *In-situ stress estimation in the Eastern Mediterranean with Finite Element Analysis*. Thesis Dissertation, Civil and Environmental Engineering, University of Cyprus.

Luo, X., Were, P., Liu, J.,& Hou, Z. (2015). *Estimation of Biot's effective stress coefficient from well logs*. Environ Earth Sci, 73, 7019–7028. https://doi.org/10.1007/s12665-015-4219-8

Mitchel, J. K., Soga, K. (2005). *Fundamentals of Soil Behavior*. JOHN WILEY & SONS, INC

Osipov, V.I. (2015). *The Terzaghi Theory of Effective Stress*. In: Physicochemical Theory of Effective Stress in Soils. SpringerBriefs in Earth Sciences. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-20639-4_2

Schimmel, M., Liu, W., Worrell, E. (2019). *Facilitating sustainable geo-resources exploitation: A review of environmental and geological risks of fluid injection into hydrocarbon reservoirs*. Earth science Reviews, Volume 194, Pages 455-471. DOI: https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.03.006

Segura, J.M. ,Fisher, Q.J., Crook, A.J.L., Dutko, M., Yu, J., Skachkov, S., Angus, D.A., Verdon, J., & Kendall, M. (2011). *Reservoir stress path characterization and its implications for*

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας

fluid-flow production simulation. Petroleum geosciences, 17(4):335-344. https://doi.org/10.1144/1354-079310-034

Serasa, A. S., Rafek, A. G., Harun, W. S. W., Abdurrahman, M., Ern, L. K., Huy, N. X., Van Xuan, T., Roslee, R., Zhang, M., & Lai, G. T. (2022*). Correlation of Dynamic and Static Young's Modulus for Limestone.* IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 1103, Issue 1, id.012032, 8 pp.

Taherynia, M. H., Fatemi Aghda, S. M., Fahimifar, A., & Ghazifard, A. (2013). *Modeling of Land Subsidence in the South Pars Gas Field (Iran).* International Journal of Geosciences, 4, 1095-1100. http://dx.doi.org/10.4236/ijg.2013.47103.

Taherynia, M. H., Fatemi Aghda, S. M., Fahimifar, A., & Koopialipoor, M. (2021). *Investigation of Stress Arching Above Depleting Hydrocarbon Reservoirs and Its Effect on the Compaction Drive Mechanism*. Geotechnical and Geological Engineering, 40:259–272. https://doi.org/10.1007/s10706-021-01876-y

Terzaghi, K., & Richart, F.E. (1952) "*Stresses in Rock about Cavities,"* Institution of Civil Engineers, London, 34p. DOI: https://doi.org/10.1680/geot.1952.3.2.57

Tien, H. S. (1996). A *literature study of the arching effect*. Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering http://hdl.handle.net/1721.1/39056

Uribe-Patiño, J.A., Alzate-Espinosa, G.A., Arbeláez-Londoño A. (2017). *Geomechanical aspects of reservoir thermal alteration: A literature review.* Journal of Petroleum Science and Engineering, 152, 250-266.

Wang, F., Li X., Couples, G., Shi J., Zhang, J., Tepinhi, Y., & Wu, L. (2014). *Stress arching effect on stress sensitivity of permeability and gas well production in Sulige gas field*. Journal of Petroleum Science and Engineering, *125*, 234–246. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2014.11.024

Xia, K. (2014). *Numerical prediction of soil compaction in geotechnical engineering*. C. R. Mecaque, 342, 208-219. http://dx.doi.org/10.1016/j.crme.2014.01.007

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Zheng, Y., Burridge, R., & Burns, D. (2003). *Reservoir Simulation with the Finite Element Method Using Biot Poroelastic Approach.* Earth Resources Laboratory Industry Consortia Annual Report;2003-11. http://hdl.handle.net/1721.1/67873

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
ΑΠΘ

Ελληνική Βιβλιογραφία

Γεωργακόπουλος, Α. (2022). *Σημειώσεις μαθήματος «Κοιτασματολογίας Πετρελαίου».* Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Κολέτσης, Γ. (2016). *Τεχνικό-οικονομική αξιολόγηση ρευστών διάτρησης με βάση το νερό & ρευστών διάτρησης με βάση το πετρέλαιο στην όρυξη γεωτρήσεων, στο κοίτασμα «Πρίνος».* Διπλωματική εργασία, Τμήμα μηχανικών μεταλλείων- Μεταλλουργών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Σολωμού, Α. (2018). *Πειραματική και υπολογιστική διερεύνηση τριχοειδών φαινομένων ροής σε πορώδη υλικά.* Μεταπτυχιακή διατριβή, τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Κύπρου.

Σοφιανός. Α.Ι. & Νομικός, Π.Π. (2008). *Γενικευμένο κριτήριο Hoek and Brown.* Κεφάλαιο 6 Αντοχή Άρρηκτου Πετρώματος, τμήμα Μεταλλειολόγων- Μεταλλουργών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Στουρνάρας, Γ. Κ., & Σταυροπούλου, Μ. Χ. (2010). *Τεχνική Γεωλογία*. Εκδόσεις Τζιόλα.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
ΑΠΘ

Πηγές διαδικτύου

Tony Smithson, Slb. https://www.slb.com/resource-library/oilfield-review/defining-series/defining-reservoir-drive-mechanisms

Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Terzaghi%27s_principle

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης