



ΕΥΣΤΡΑΤΙΟΥ ΒΑΣΙΛΙΚΗ

ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΚΑΙ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2020





ΕΥΣΤΡΑΤΙΟΥ ΒΑΣΙΛΙΚΗ
Φοιτήτρια Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ: 5510

ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΚΑΙ
ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας, Τομέα Κοιτασματολογίας

Επιβλέπων

Ανδρέας Γεωργακόπουλος



© Βασιλική Ευστρατίου, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Κοιτασματολογίας, 2020

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΚΑΙ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ –

Διπλωματική Εργασία

© Vasiliki Efstratiou, School of Geology, Dept. of Geology, 2020

All rights reserved.

BEHAVIOR OF OIL AND GAS RESERVOIRS DURING 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.

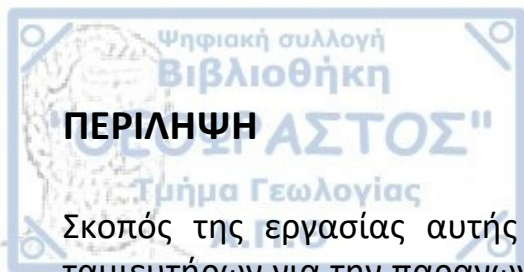


ΑΦΙΕΡΩΣΗ

Αυτή η εργασία είναι αφιερωμένη στους γονείς μου αλλά και στην αδερφή μου που αποτελεί το παράδειγμά μου όλα αυτά τα χρόνια και με βοηθάει ανελλιπώς σε όλα τα βήματά μου.

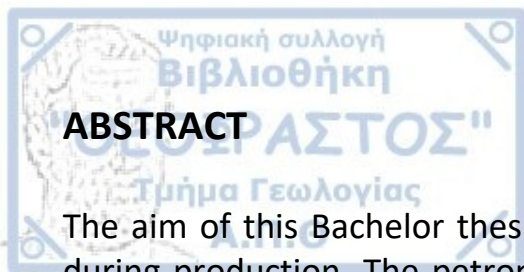
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αναμφισβήτητα, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υπεύθυνο καθηγητή Ανδρέα Γεωργακόπουλο για την μεγάλη στήριξη και εμπιστοσύνη που μου έδειξε στην εκπόνηση της πτυχιακής αλλά και τη βοήθεια και την καθοδήγηση που έλαβα κατά τη διάρκεια αυτής. Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω όλο τον θαυμασμό μου προς αυτόν.



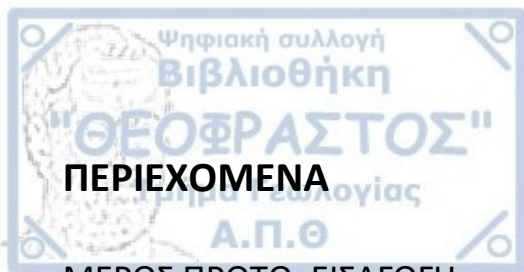
ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι να εξετασθεί η μηχανική συμπεριφορά των ταμιευτήρων για την παραγωγή φυσικού αερίου και πετρελαίου. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται μια εισαγωγή όπου αναπτύσσονται οι πετροφυσικές ιδιότητες των πετρωμάτων και των ταμιευτήρων των υδρογονανθράκων. Στην συνέχεια, αναφέρεται η μηχανική συμπεριφορά των ταμιευτήρων όπου εισάγονται και αναλύονται οι απαραίτητες εξισώσεις. Τέλος, πραγματοποιείται μια παραπομπή στην ανάλυση PVT, η οποία είναι αλληλένδετη με την επιφανειακή παραγωγή και εκμετάλλευση των όγκων υδρογονανθράκων.



ABSTRACT

The aim of this Bachelor thesis is to examine the behavior of oil and gas reservoirs during production. The petrophysical properties of the hydrocarbon reservoir rocks are presented. A description of the mechanical behavior of the reservoir along with several formulas used in reservoir engineering to determine important parameters related to production rate, are introduced and analyzed. Finally, reference is made to the PVT analysis [Pressure - Volume - Temperature (PVT) analysis] which is the process of determining the fluid behaviors and properties of oil and gas samples from an existing well.



ΜΕΡΟΣ ΠΡΩΤΟ. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΠΕΤΡΟΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ

1.1 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

1.1.1 Ταξινόμηση με βάση την προέλευσή τους

1.1.2 Ταξινόμηση με βάση την σπουδαιότητά τους για την παραγωγή υδρογονανθράκων

1.2 ΤΥΠΟΙ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ

1.2.1 Κλαστικοί ταμιευτήρες

1.2.2 Ασβεστολιθικοί ταμιευτήρες

1.3 ΤΟ ΒΑΘΟΣ

1.4 Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΚΑΙ ΤΟ ΠΑΧΟΣ

1.5 ΤΟ ΠΟΡΩΔΕΣ

1.5.1 Ο έλεγχος του πορώδους

1.6 Η ΔΙΑΠΕΡΟΤΗΤΑ

1.7 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΑΝΑΦΟΡΙΚΑ ΜΕ ΤΗΝ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΤΟ ΠΟΡΩΔΕΣ

1.8 ΤΡΙΧΟΕΙΔΗΣ ΠΙΕΣΗ

ΜΕΡΟΣ ΔΕΥΤΕΡΟ. ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Η ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ

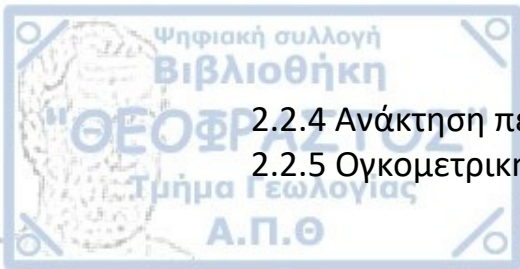
2.1 ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ

2.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΩΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ

2.2.1 Εισαγωγή

2.2.2 Υπολογισμός του όγκου των υδρογονανθράκων

2.2.3 Ρυθμίσεις πίεσης ρευστών



2.2.4 Ανάκτηση πετρελαίου: Συντελεστής ανάκτησης

2.2.5 Ογκομετρική μηχανική των ταμιευτήρων του αερίου

ΜΕΡΟΣ ΤΡΙΤΟ. ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΥΤ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΥΤ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

3.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΒΑΣΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΡΥΤ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΠΕΤΡΟΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ

Στη διαδικασία απεικόνισης της μηχανικής συμπεριφοράς των ταμιευτήρων αξίζει να αναφερθούν αρχικά οι θεμελιώδεις έννοιες που την απαρτίζουν. Τα πετροφυσικά χαρακτηριστικά ενός ταμιευτήρα αποτελούνται από την απόθεση και τις συνεχόμενες μεταβολές, τον τύπο του ταμιευτήρα είτε αυτός είναι κλαστικός είτε είναι ανθρακικός, το βάθος, το πάχος, τη περιοχή, το πορώδες, τη διαπερατότητα και τη τριχοειδής πίεση.^[1]

1.1 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

Πριν αναφερθούν τα χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα είναι πρέπων να ταξινομηθούν:

1. Οι τρεις κύριες ομάδες ιζηματογενών πετρωμάτων ταξινομούνται με βάση την προέλευσή τους.
2. Οι πέντε τύποι ιζηματογενών πετρωμάτων που υπάρχουν και είναι σημαντικοί για την παραγωγή υδρογονανθράκων.

1.1.1 Ταξινόμηση με βάση την προέλευσή τους

A. Κλαστικά ιζηματογενή πετρώματα.

Σχηματίζονται ως αποτέλεσμα διάβρωσης ή κατακερματισμού των προϋπάρχοντων πετρωμάτων και ορυκτών και ταξινομούνται με βάση τα μεγέθη των κόκκων. Διαχωρίζονται σε χονδρόκοκκα (συσσωματώματα), μεσαίου μεγέθους (ψαμμίτες) και λεπτόκοκκα (χαλίκι, ιλύολιθος και σχιστόλιθος). Τα κλαστικά ιζηματογενή πετρώματα ταξινομούνται περαιτέρω ανάλογα με την ορυκτολογία, η οποία αντικατοπτρίζει το μητρικό πέτρωμα.

B. Χημικά ιζηματογενή πετρώματα

Σχηματίζονται ως αποτέλεσμα χημικών διεργασιών και μπορεί να είναι ανόργανοι ασβεστόλιθοι, δολομίτες και εβαπορίτες. Ένα παράδειγμα ανόργανου ασβεστόλιθου είναι ο τραβερτίνης. Ο δολομίτης χαρακτηρίζεται ως ένα πέτρωμα πλούσιο σε ασβέστιο και μαγνήσιο, το οποίο καταβυθίστηκε κατά τη διάρκεια της λιθοποίησης. Τέλος, ο αλίτης, η γύψος και ο ανυδρίτης (θαλάσσιοι εβαπορίτες) προέρχονται από την εξάτμιση μαζών νερού.^[1,α]

Γ. Βιογενή ιζηματογενή πετρώματα

Τα βιογενή ιζηματογενή πετρώματα προκύπτουν από τα υπολείμματα των φυτικών και ζωικών οργανισμών, τα οποία χαρακτηρίζονται ως ανθρακικά. Τα πυριτικά είναι αυτά που αποτελούνται από πυριτικό σκελετικό υλικό ραδιολαρίων και διατόμων.

1.1.2 Ταξινόμηση με βάση την σπουδαιότητά τους για την παραγωγή υδρογονανθράκων

A. Ψαμμίτες

Οι ψαμμίτες είναι κλαστικά ιζηματογενή πετρώματα που αποτελούνται κυρίως από μεσαίου μεγέθους κόκκους, τα οποία είναι τοποθετημένα σε ένα πλέγμα ιλύος/αργίλου και ενωμένα με συγκολλητικό υλικό. Το συγκολλητικό υλικό είναι συνήθως πυρίτιο, οξείδιο του σιδήρου ή ανθρακικό ασβέστιο. Τα σωματίδια άμμου αποτελούνται κατά ένα μεγάλο μέρος από χαλαζία, συνεπώς ο ψαμμίτης υποδεικνύει ένα πέτρωμα που περιέχει περίπου 85-90% χαλαζία.

B. Ανθρακικά

Τα ανθρακικά χωρίζονται σε **δύο** κατηγορίες ασβεστόλιθων και δολομιτών.

- Οι ασβεστόλιθοι είναι ιζηματογενή πετρώματα που αποτελούνται κυρίως από ανόργανο ασβεστίτη (ανθρακικό ασβέστιο) με ή χωρίς ανθρακικό μαγνήσιο.
- Ο δολομίτης είναι ένα ορυκτό γνωστό με τον τύπο $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$. Ένα ιζηματογενές πέτρωμα θα καλείται δολομίτης αν αποτελείται πάνω από 90% ορυκτού δολομίτη και κάτω από 10% ορυκτού ασβεστίτη.

Γ. Σχιστόλιθοι

Ο σχιστόλιθος είναι ένας τύπος ιζηματογενούς πετρώματος που σχηματίζεται από την ενοποίηση του λεπτόκοκκου υλικού συμπεριλαμβανομένων ιλύος και άργιλου (mud and silt) και έχει μια πολυεπίπεδη ή στρωματοποιημένη δομή ή παράλληλες με την στρώση επιφάνειες. Είναι πορώδης σχηματισμός, περιέχει υδρογονάνθρακες αλλά δεν παρουσιάζουν διαπερατότητα. Τυπικά δεν χαρακτηρίζονται ως ταμειυτήρες αλλά ως παγίδες υδρογονανθράκων.

Δ. Εβαπορίτες

Οι εβαπορίτες, όπως και οι σχιστόλιθοι, δεν χαρακτηρίζονται ως ταμειυτήρες αλλά ως παγίδες υδρογονανθράκων καθώς είναι αδιαπέρατοι. Ο όρος 'εβαπορίτης' χρησιμοποιείται για όλες τις εναποθέσεις οι οποίες αποτελούνται από ορυκτά που καθιζάνουν από αλατούχα διαλύματα και εν τέλει συμπυκνώνονται μετά την εξάτμιση

του υγρού διαλύματος. Κατά την εξάτμιση η γενική ακολουθία κατακρημνίσεων είναι: ασβεστίτης, γύψος ή ανυδρίτης, αλίτης.

Ο σχηματισμός των δομών των αλάτων παράγει διάφορους τύπους παγίδων. Ο ένας τύπος συσχετίζεται με την πλευρική και ανοδική πορεία του αλατιού μέσω των υπερκείμενων καλυμμάτων και οδηγείται στην αναδίπλωση και στην αστοχία. Ένας άλλος τύπος μηχανισμού παγίδευσης δημιουργείται από τις προεξοχές του αλατιού.

1.2 ΤΥΠΟΙ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ

Ένας ταμιευτήρας είναι ένας υπόγειος όγκος διαπερατού ή μη διαπερατού πετρώματος. Όσον αφορά τους πορώδεις και διαπερατούς σχηματισμούς πετρωμάτων που επιτρέπουν τη ροή υγρών μέσα από αυτούς, οι υδρογονάνθρακες έχουν την τάση να μεταναστεύουν προς τα πάνω μέχρις ότου φθάσουν στην επιφάνεια ή μέχρις ότου παγιδευτούν από το μη διαπερατό πέτρωμα, το οποίο ονομάζεται κάλυμμα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αποθηκευτούν οι υδρογονάνθρακες στον ταμιευτήρα, να εντοπισθούν και να εξορυχθούν. Το πορώδες και η διαπερατότητα επηρεάζονται από τις γεωμετρικές των πόρων εναπόθεσης των ιζημάτων καθώς και τις μετέπειτα μεταβολές που λαμβάνουν χώρα, οι οποίες θα αναπτυχθούν πιο αναλυτικά στην συνέχεια. Οι ταμιευτήρες διαχωρίζονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

1. Κλαστικοί ταμιευτήρες
2. Ασβεστολιθικοί ταμιευτήρες

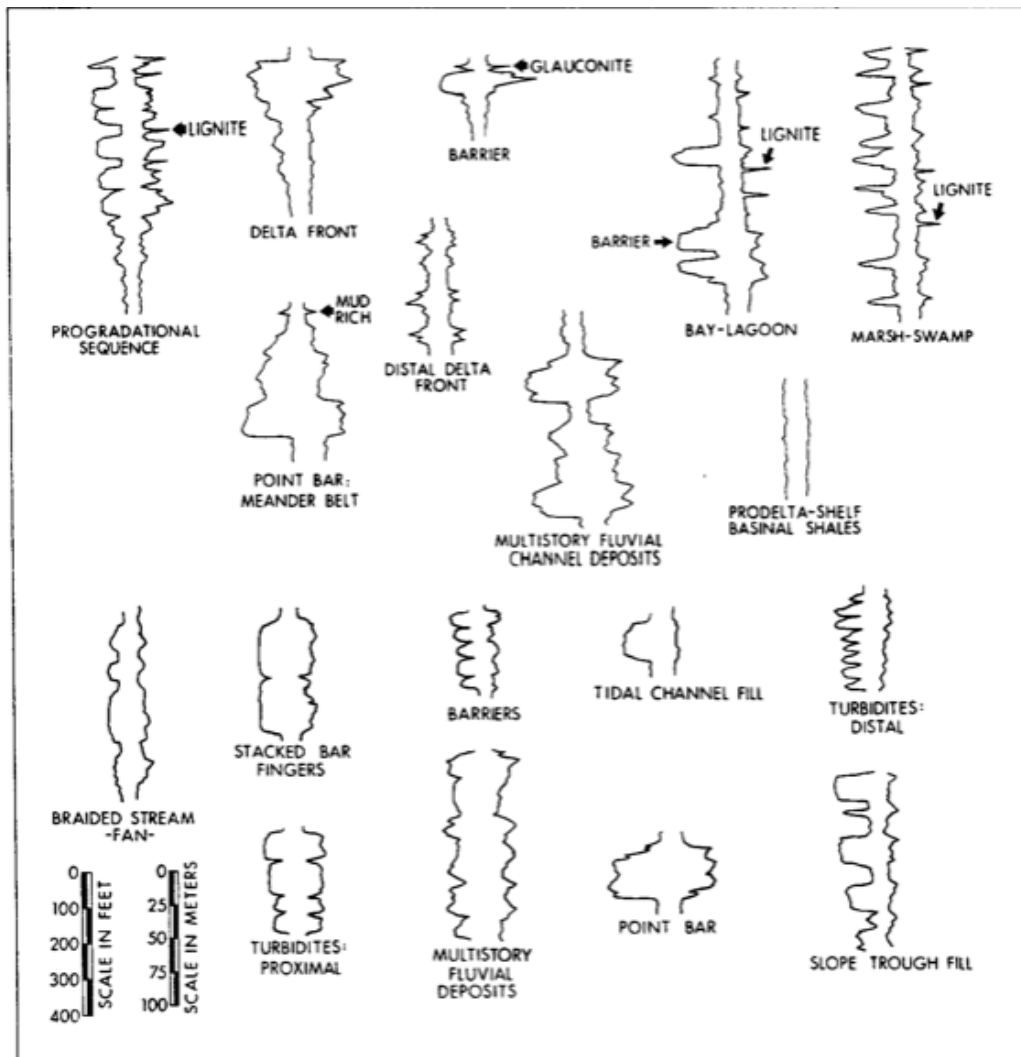
1.2.1 Κλαστικοί ταμιευτήρες

Οι κλαστικοί ταμιευτήρες ποικίλλουν εξαιτίας του περιβάλλοντος εναπόθεσης. Μεμονωμένα τα χαρακτηριστικά μπορεί να είναι διαφορετικά, αλλά το κοινό τους γνώρισμα είναι ότι προέρχονται από μεταφερόμενα, εναποτιθέμενα θραύσματα προϋπάρχοντος πετρώματος καθώς και οργανικών υλικών. Η απόθεσή τους συσχετίζεται με την ροή των ποταμίων, τα θαλάσσια ρεύματα και κύματα, τον άνεμο αλλά και τη βαρύτητα στη γη. Τα περιβάλλοντα εναπόθεσης παράγουν μια μεγάλη ποικιλία τύπων ταμιευτήρων (εικόνα 1). Επιβάλλεται να λαμβάνονται υπόψιν τα εσωτερικά χαρακτηριστικά, η γεωμετρία αλλά και το πλαίσιο για την αποτελεσματική παραγωγή υδρογονανθράκων από αυτά.

Οι σημαντικότεροι ταμιευτήρες αποτελούνται από ψαμμίτη και κροκαλοπαγές ή χαλαζία, άστριο και μικρές ποσότητες βαρέων ορυκτών κόκκων. Οι κόκκοι τους μπορεί να είναι πολύ ώριμοι, καλά στρογγυλεμένοι και καλά ταξινομημένοι λόγω της ανθεκτικότητάς τους στη μηχανική και χημική διάσπαση. Άλλοι κλαστικοί ταμιευτήρες είναι αυτοί που κατασκευάζονται από ασβεστολιθικούς κόκκους ή θραύσματα κελύφους, τα οποία χαρακτηρίζονται από χαμηλή ανθεκτικότητα σε μηχανικές και χημικές συνθήκες (υψηλό ποσοστό διάβρωσης) και συσσωρεύονται

κοντά στη θέση τους. Ωστόσο και οι δύο αυτοί τύποι είναι εφικτό να έχουν καλό πορώδες και υψηλή διαπερατότητα με αποτέλεσμα να είναι σημαντικοί ταμειυτήρες. Άλλη μια βασική παρατήρηση που συσχετίζεται με το πορώδες είναι το συγκολλητικό υλικό. Στα μη ανθρακικά κλαστικά μπορεί να είναι διοξείδιο του πυριτίου, ανθρακικό άλας, μια ποικιλία οξειδίων και ορυκτών της αργίλου ενώ στα ανθρακικά εντοπίζεται ασβεστίτης και δολομίτης όπου κατά περιόδους μπορεί να πυριτωθούν (εικόνα 2). Οι κλαστικοί ταμειυτήρες δημιουργούνται κάτω από τρία βασικά περιβάλλοντα εναπόθεσης. [2]

- 1) ηπειρωτικό
- 2) μεταβατικό και
- 3) θαλάσσιο



Εικόνα 1. Ηλεκτρικά λογαριθμικά υποδείγματα μορφών εναπόθεσης κλαστικών υλικών. From Garcia, 1981. Permission to publish by AAPG. [2]



PRIMARY POROSITY MODELS

Initial Porosity
Probably close to 40%, and may have been short-lived. In outcrop, primary porosity is about 30% in the St. Peter and about 20% in the Mount Simon.

Early Cementation
Inferred from open packing and high proportion of cement. Early cements in the Mount Simon and St. Peter include quartz overgrowths and carbonate.

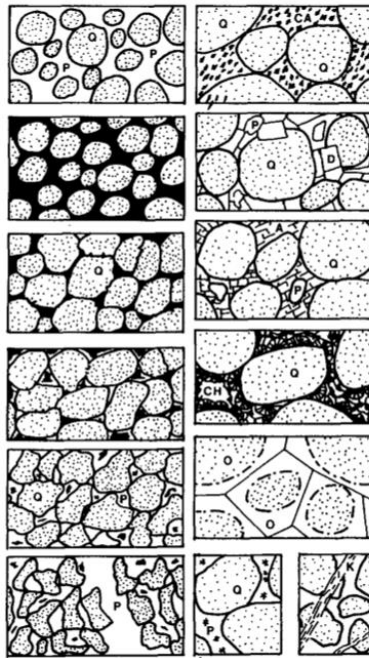
Stable Framework
Mechanical reduction of porosity by rotation and sliding of grains prior to later, possibly sutured contacts, which are very common where both sandstones are deeply buried.

SECONDARY POROSITY MODELS

Leached Cement
Cements dissolved and dissolution usually selective as to kind, place, and completeness. All cements in the Mount Simon and St. Peter Sandstones have been partially dissolved, especially where deeply buried.

Leached Framework
Framework grains dissolved and dissolution usually selective as to kind, place, and completeness. Quartz grains in the St. Peter are commonly etched, and in the Mount Simon feldspar and quartz grains are dissolved.

Framework Collapse
Dissolution has removed both cements and framework so that a large, irregular pore system exists with significant permeability. Both sandstones locally have framework collapse and oversized pores. Most advanced stage of secondary porosity.



Open network of etched calcite rhombohedra partially fill primary pores in the St. Peter Sandstone and generally occurs at shallow to moderate depths.

Dolomite cement fills primary pores and is preserved in the shallow St. Peter as a late, replacement cement in the Mount Simon. Dolomite has been dissolved, increasing porosity in both sandstones.

Anhydrite is present as a cement where the St. Peter is deeply buried, but is locally dissolved and enhances porosity. Maximum abundance of anhydrite cement is 4%.

Chert and chalcedony cement the St. Peter near outcrop in southern Wisconsin at depths less than 400 ft (121 m).

Quartz overgrowths are common almost everywhere in both the Mount Simon and St. Peter Sandstones and locally completely fill primary pore space.

Chlorite cement is present as a fracture filling in the St. Peter (right) and kaolinite and chlorite are pore fillings in the Mount Simon (left).

Εικόνα 2. Πορώδες και συγκολλητικό υλικό. From Moholick, et al., 1984. Permission to publish by AAPG. [2]

1.2.2. Ασβεστολιθικοί ταμιευτήρες

Η δημιουργία των ανθρακικών πετρωμάτων μπορεί να προέρχεται από κλαστική, βιολογική ή φυσικοχημική διεργασία. Η κλαστική εναπόθεση περιλαμβάνει αποδιοργανωμένα τεμάχια που αποτίθενται μηχανικά ως ανθρακική άμμος ή χαλίκι. Τα βιολογικά εναποτιθέμενα ανθρακικά άλατα εμφανίζονται ως ιζήματα και συσχετίζονται με τις μεταβολικές διεργασίες των φυτικών υπολειμμάτων ή των ζώων. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μερική επικάλυψη καθώς τα ιζήματα που περιλαμβάνουν θραύσματα κελύφους μπορεί να αποτελούνται κατά ένα ποσοστό από σπασμένα βιολογικά σχηματισμένα κελύφη που είναι μηχανικά εναποτιθέμενα σε κλαστικό περιβάλλον. Η φυσικοχημική διεργασία επηρεάζει κάποια ανθρακικά πετρώματα, τα οποία κατακρημνίζονται απευθείας από την επαφή τους με το φρέσκο ή το θαλασσινό νερό και αυτό συμβαίνει λόγω των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας ή της συγκέντρωσης του διαλύματος.

Αναφορικά με την ταξινόμηση των ανθρακικών πετρωμάτων εννοείται οι τύποι των κόκκων και το μέγεθος αυτών, το πλέγμα, το συγκολλητικό υλικό, η υφή απόθεσης και η διαγένεσης. Με βάση αυτές τις παραμέτρους απεικονίζονται οι αρχικές συνθήκες εναπόθεσης, η διαγενετική αλλοίωση και παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά και οι διαδικασίες που φέρουν άμεσα το δυναμικό των ταμιευτήρων. (εικόνα 3, 4, 5, 6) [2]

Grain/Micrite Ratio	% Grains	GRAIN TYPE					Organic Frame-Builders	No Organic Frame-Builders
		Detrital Grains	Skeletal Grains	Pellets	Lumps	Coated Grains		
9:1	~90%	Detrital Ls.	Skeletal Ls.	Pellet Ls.	Lump Ls.	Oolitic Ls. Pisolithic Ls. Algal Encl. Ls.	Coraline Ls. Algal Ls., Etc.	Caliche Travertine Tufa
1:1	~50%	Detrital-Micritic Ls.	Skeletal-Micritic Ls.	Pellet-Micritic Ls.	Lump-Micritic Ls.	Oolitic- (Pisolithic, Etc.) Micritic Ls.	Coraline-Micritic Ls. Algal-Micritic Ls., Etc.	
1:9	~10%	Micritic-Detrital Ls.	Micritic-Skeletal Ls.	Micritic-Pellet Ls.	Micritic-Lump Ls.	Micritic-Oolitic (Pisolithic, Etc.) Ls.	Micritic-Coraline Ls. Micritic-Algal Ls., Etc.	
←----- Micritic Limestone -----→								

Εικόνα 3. Ταξινόμηση ασβεστόλιθου σύμφωνα με το πλέγμα, τους κόκκους και την προέλευση υφής. From Leighton and Pendexter, 1962. Permission publish by AAPG. [2]

DEPOSITIONAL TEXTURE				
Original components not bound together during deposition				Original components were bound together during deposition . . . as shown by intergrown skeletal matter, lamination contrary to gravity, or sediment-floored cavities that are rooled over by organic or questionably organic matter and are too large to be interstices
Contains mud (particles of clay and fine silt size)			Lacks mud and is grain supported	
Mud supported		Grain supported		
Less than 10 percent grains	More than 10 percent grains			
Mudstone	Wackestone	Packstone	Grainstone	Boundstone

Εικόνα 4. Ταξινόμηση ασβεστόλιθου σύμφωνα με την υφή απόθεσης. From Dunham, 1962. Permission to publish by AAPG [2]

	Transported Constituents	In Place Constituents	
64 mm	Very coarse calcirudite	Extremely coarsely crystalline	
16 mm	Coarse calcirudite		
4 mm	Medium calcirudite		
1 mm	Fine calcirudite	Very coarsely crystalline	4 mm
0.5 mm	Coarse calcarenite	Coarsely crystalline	
0.25 mm	Medium calcarenite		
0.125 mm	Fine calcarenite	Medium crystalline	0.25 mm
0.062 mm	Very fine calcarenite		
0.031 mm	Coarse calcilutite	Finely crystalline	
0.016 mm	Medium calcilutite		
0.008 mm	Fine calcilutite		
0.004 mm	Very fine calcilutite	Very finely crystalline	
		Aphanocrystalline	0.004 mm

Εικόνα 5. Ταξινόμηση μεγέθους κόκκων των ανθρακικών πετρωμάτων. From Folk, 1959. Permission to publish by AAPG [2]

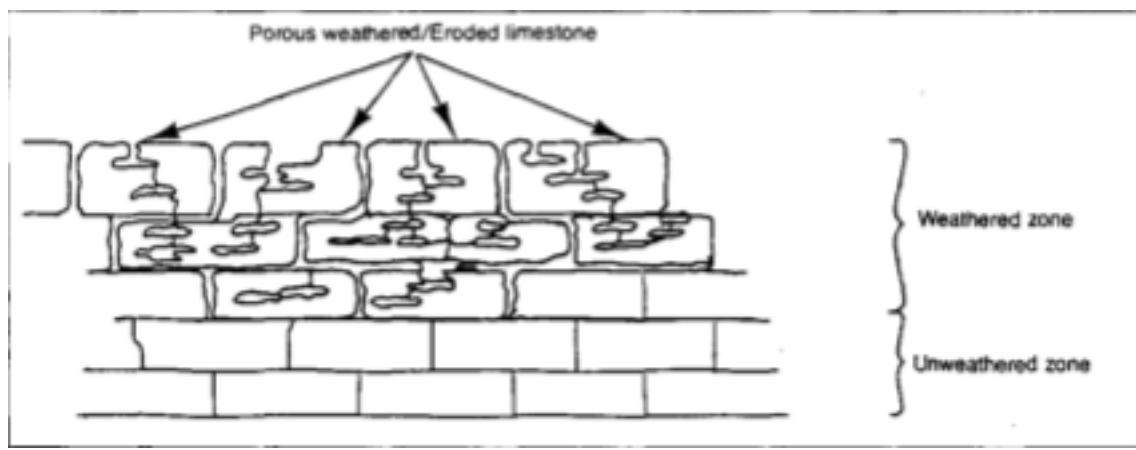
		Limestones, Partly Dolomitized Limestones, and Primary Dolomites (see Notes 1 to 6)				Replacement Dolomites* (V)					
		>10% Allochems Allochemical Rocks (I and II)		<10% Allochems Microcrystalline Rocks (III)		Undis- turbed Bioherm Rocks (IV)	Allochem Ghosts	No Allochem Ghosts			
		Sparry Calcite Cement > Micro- crystalline Ooze Matrix	Microcrystalline Ooze Matrix > Sparry Calcite Cement	1-10% Allochems	<1% Allochems						
Volcanic Allochem Composition	<15% Intracrysts <15% Oolites Volcanic Basins of Famals to Pellets	>15% Intracrysts (I)	Intrasparrodite (B:La) Intrasparrite (B:La)	Intramicrodite* (B:La) Intramicrorite* (B:La)	Most Abundant Allochem	Intraclasts: Intraclast- bearing Micrite* (III:La or La)	Micrite (III:La); if dismembered, Dumi- crite (III:La); if primary dolomite, Dolomite (III:La; D)	Indistinct (IV-L)	Evident Allochems	Finely Crystalline Intraclastic Dol- omite (VI:D) etc.	Medium Cryst- alline Dolom- ite (V:D)
		>15% Oolites (II)	Ooosparrodite (B:La) Oosparrite (B:La)	Oomicrodite* (B:La) Oomicrorite* (B:La)		Oolites: Oolite-bearing Micrite* (III:La or La)				Coarsely Crystal- line Oolitic Dolomite (Vo:D) etc.	Finely Cryst- alline Dolom- ite (V:D)
		>1:1 (B)	Bioisparrodite (B:La) Bioisparrite (B:La)	Bioisparrodite (B:La) Bioisparrite (B:La)		Fossils: Fossiliferous Micrite (III: La, La, or L)				Aphanocrystalline Biogenic Dolomite (Vb:D) etc.	
		1:1-1:3 (Bp)	Bioisparrodite (Bp:La)	Bioisparrodite (Bp:La)		Pellets: Pelletiferous Micrite (IIIp:La)				Very Finely Crystalline Pellet Dolomite (Vp:D) etc.	etc.
		<1:3 (B)	Foliasparrite (Fp:La)	Foliasparrite (Fp:La)							

Εικόνα 6. Ταξινόμηση ανθρακικών πετρωμάτων. From Folk, 1959. Permission to publish by AAPG^[2]

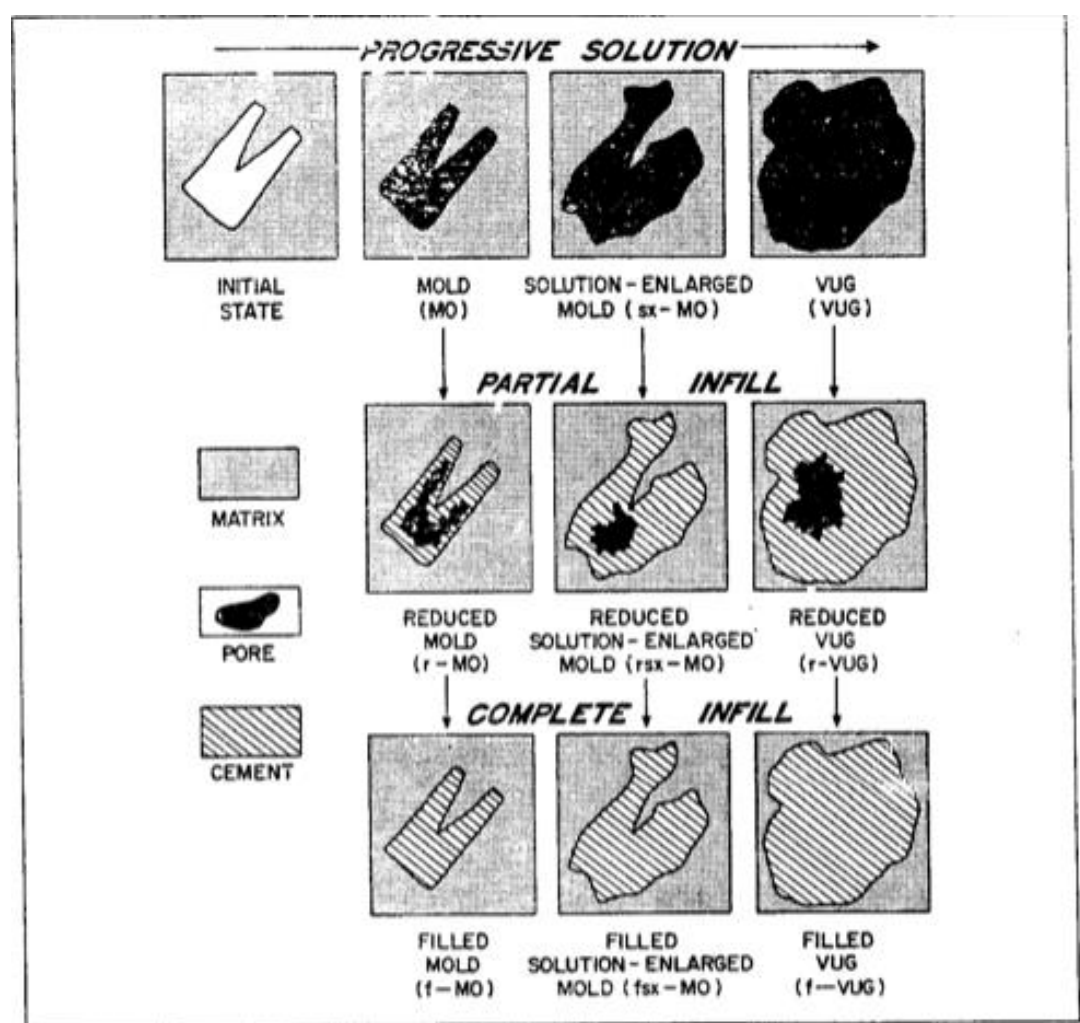
Όλοι οι τύποι ανθρακικών πετρωμάτων εμφανίζουν υφή απόθεσης (εικόνα 4) και ορισμένοι τύποι πρωτογενούς πορώδους και διαπερατότητας, οι οποίοι υπόκεινται σε δευτερογενή ενίσχυση ή μείωση, η περιγραφή των οποίων πραγματοποιείται μέσω οργανικών και / ή ανόργανων παραμέτρων. Αρχικά, θεωρείται σκόπιμο να διευκρινιστεί πως το πορώδες των ανθρακικών αλάτων είναι συνάρτηση του περιβάλλοντος εναπόθεσης. Ο τελικός τύπος του πορώδους μπορεί να μεταβληθεί σημαντικά με μεταγενέστερες διαγενετικές, βιολογικές ή τεκτονικές επιδράσεις. Η εξέλιξη του πορώδους αλλά και των σχετικών τύπων πόρων περιλαμβάνει ή διεύρυνση με διάλυμα (εικόνα 7) ή μείωση με συμπλήρωση ή διαδοχικό συνδυασμό των δύο (εικόνα 8). Τα ανθρακικά πετρώματα είναι κυρίως κλαστικοί, βιολογικοί ή κατακρημνισμένοι ασβεστόλιθοι. Η δευτερογενής δολομιτίωση είναι σημαντική παράμετρος όσον αφορά το πορώδες καθώς έχει την δυνατότητα να μειώσει το εσωτερικό πορώδες ενός ασβεστόλιθου.

Το πορώδες των ανθρακικών πετρωμάτων αναπτύσσεται σε τρία στάδια (εικόνα 9). Οι προϋποθέσεις δημιουργίας του προκαταρκτικού κύριου πορώδους είναι ένα ιζηματογενές υλικό να σχηματιστεί, να αποθεθεί και τελικά να θαφτεί. Το πορώδες αποθέσεως δημιουργείται κατά την τελική απόθεση ιζημάτων, καθώς μετά την ολοκλήρωση της τελικής απόθεσης λαμβάνει χώρα το δευτερογενές πορώδες, στην τελική του θέση ταφής. Τα στάδια ταφής που συνοδεύουν την απόθεση αντιπροσωπεύουν τη πρώιμη, ρηχή ταφή η οποία είναι ορμονική, τη βαθύτερη ταφή η οποία είναι μεσογενετική και τελικά τη βαθιά ταφή, με παραμόρφωση και διάβρωση, η οποία με την σειρά της είναι τηλεγενετική.

Κάθε μία από τις περιόδους ταφής εξαρτάται από την ανάπτυξη του τύπου πορώδους που συσχετίζεται με τις πρωτογενείς και δευτερογενείς αποθέσεις και τις διαγενετικές διεργασίες. Τέλος, οι ιδιότητες του πετρώματος, όπως η σκληρότητα, το πορώδες και η διαπερατότητα, σχετίζονται με πρωτογενείς και δευτερογενείς παράγοντες και είναι σημαντικές στις εργασίες γεώτρησης και παραγωγής καθώς καθορίζουν για παράδειγμα τους ρυθμούς της γεώτρησης και τα χαρακτηριστικά παραγωγής. [2]

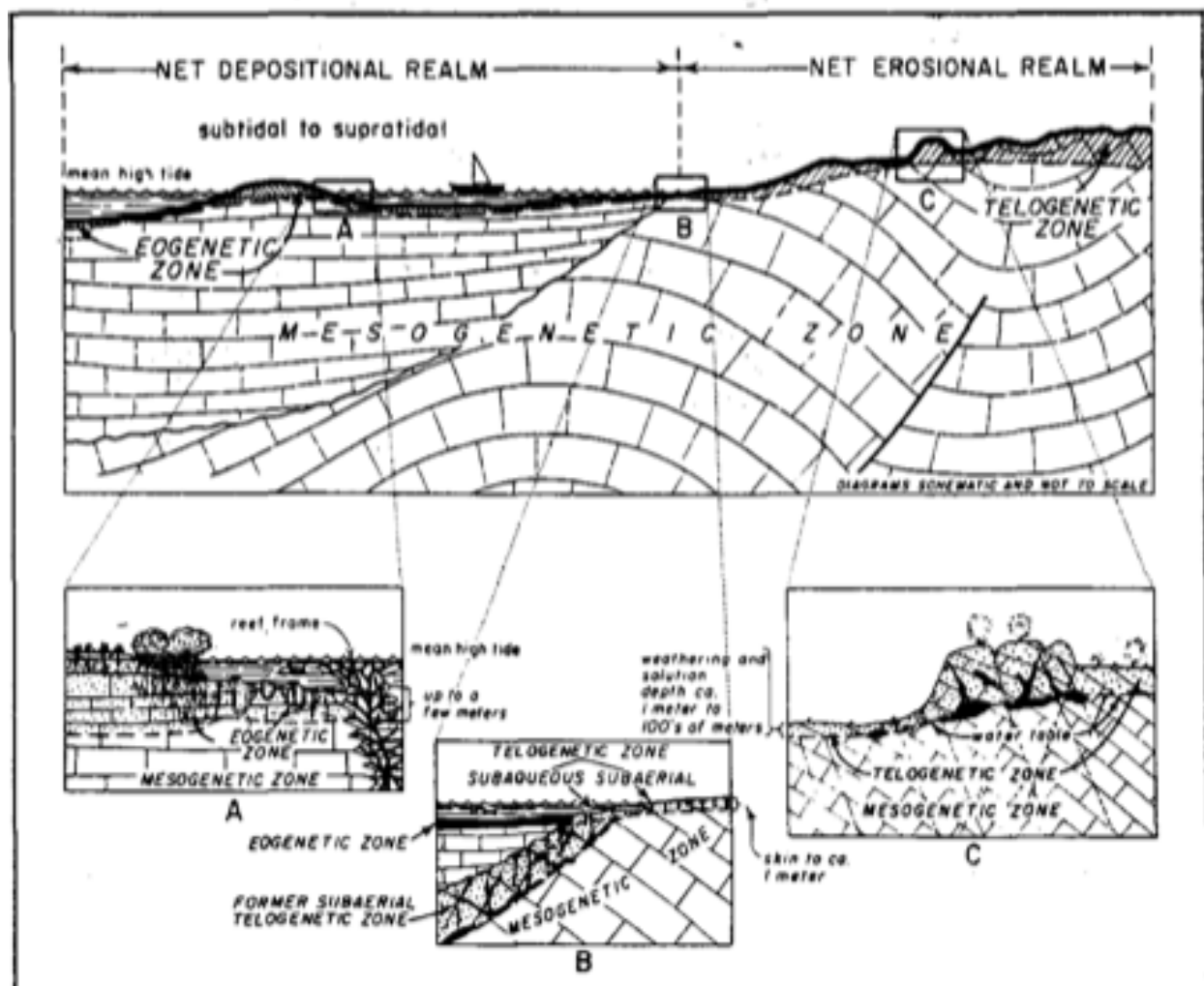


Εικόνα 7. Διεύρυνση του πορώδους μέσω διάβρωσης. [2]



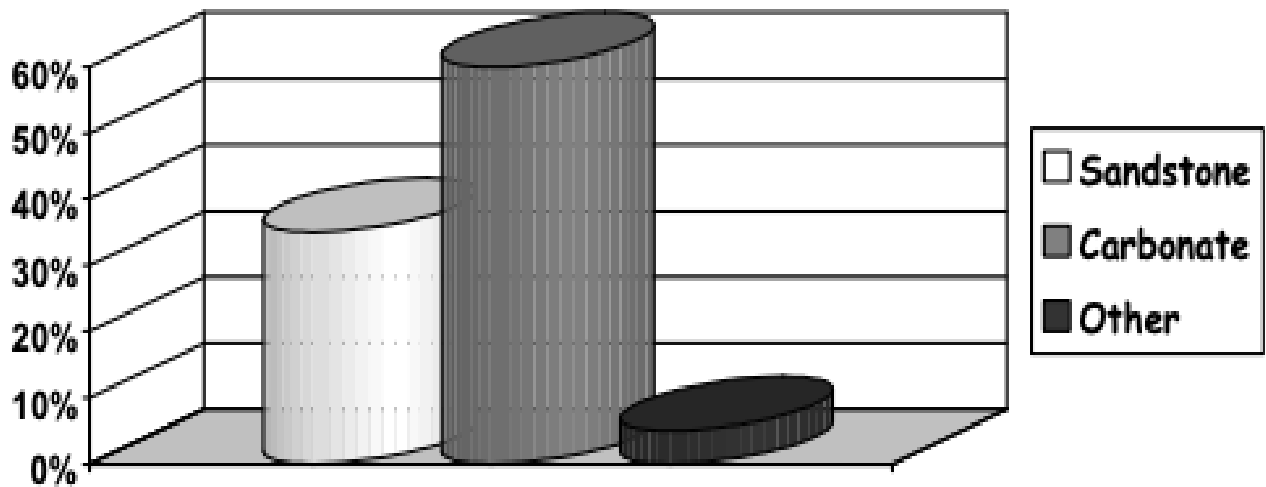
Εικόνα 8. Εξέλιξη του πορώδους με διαδοχικό συνδυασμό. From Choquette and Pray, 1970. Permission to publish by AAPG. [2]

TIME-POROSITY TERMS						
STAGE	PRE-DEPOSITION		DEPOSITION	POST-DEPOSITION		
POROSITY TERM	PRIMARY POROSITY			SECONDARY POROSITY		
	PRE-DEPOSITIONAL POROSITY		DEPOSITIONAL POROSITY	POST-DEPOSITIONAL POROSITY		
				EOGENETIC POROSITY	MESOGENETIC POROSITY	TELOGENETIC POROSITY
"TYPICAL" RELATIVE TIME SPAN	[Diagram: thin layer]		[Diagram: thicker layer]	[Diagram: thin layer]	[Diagram: thin layer]	



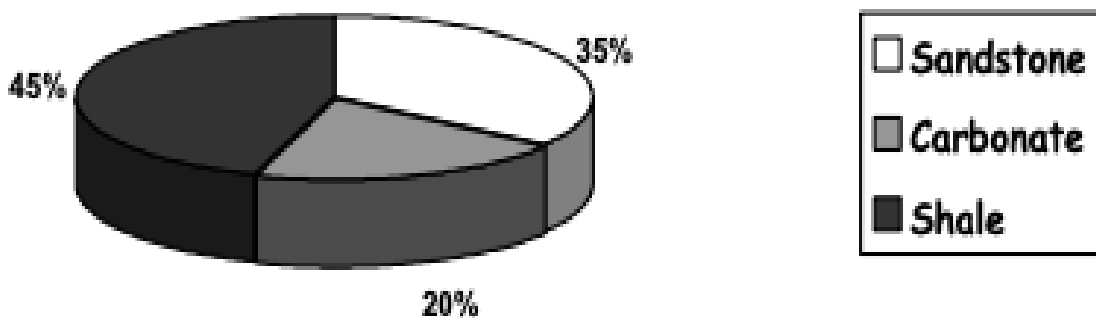
Εικόνα 9. Τρία στάδια δημιουργίας και τροποποίηση του πορώδους. From Choquette and Pray, 1970. Permission to publish by AAPG. [2]

Κατά προσέγγιση οι τύποι ιζηματογενών σχηματισμών σημαντικών για την παραγωγή υδρογονανθράκων έχουν ως εξής:



Εικόνα 10. Παραγωγή υδρογονανθράκων από ιζηματογενείς ταμιευτήρες. ^[1]

Κατά προσέγγιση η ποσοστιαία αναλογία των τριών τύπων ιζηματογενών σχηματισμών είναι η εξής:



Εικόνα 11. Η ποσοστιαία προσέγγιση ύπαρξης των τριών ιζηματογενών σχηματισμών. ^[1]

Είναι σημαντικό, σε αυτό το σημείο, να επισημανθεί ότι οι ανθρακικοί ταμιευτήρες αποδίδουν την διπλάσια ποσότητα υδρογονανθράκων από τους ψαμμιτικούς ταμιευτήρες. Ο λόγος ο οποίος συμβαίνει αυτό είναι διότι στη Μέση Ανατολή και στο Μεξικό πραγματοποιείται σημαντική παραγωγή από ανθρακικούς ταμιευτήρες. ^[1]

1.3 ΤΟ ΒΑΘΟΣ

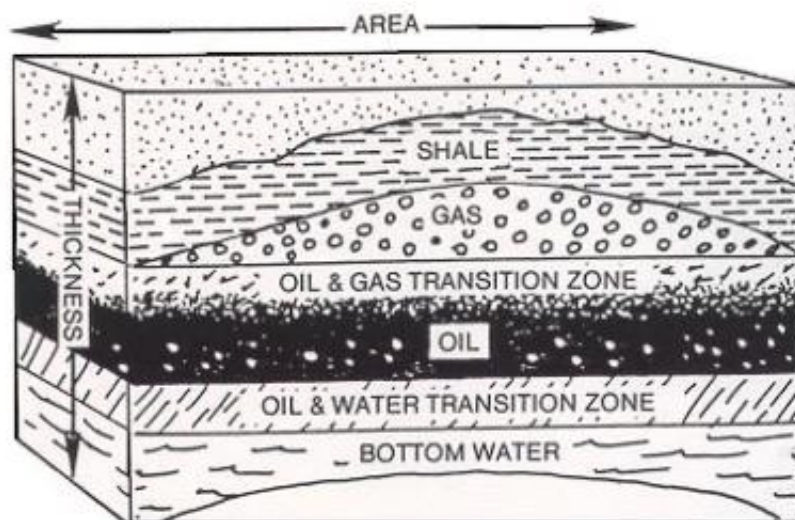
Στα φυσικά χαρακτηριστικά ενός ταμιευτήρα, όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, δεν γινόταν να μην ανήκει το βάθος. Με βάση αυτό, επηρεάζονται έντονα τα χαρακτηριστικά ενός ταμιευτήρα ανάλογα το πού εμφανίζεται. Έτσι ο ταμιευτήρας χωρίζεται σε ρηχός και βαθύς.

Ένας ρηχός ταμιευτήρας δημιουργήθηκε από την αναδίπλωση σχετικά πυκνού και μέτρια συμπιεσμένου πετρώματος, με προδιαγραφές ταμιευτήρα, με συσσώρευση κάτω από ένα αντίκλινο ή κάποια παγίδα. Γενικά, οι υδρογονάνθρακες θα ήταν καλύτερα διαχωρισμένοι ως αποτέλεσμα των εσωτερικών χαμηλότερων πιέσεων των ταμιευτήρων, λιγότερο αέριο σε υγρή μορφή και πετρέλαιο με αυξημένο ιξώδες, που προκύπτει από μειωμένες θερμοκρασίες.

Ένας βαθύς ταμιευτήρας δημιουργείται από σοβαρή αστοχία. Οι υδρογονάνθρακες, σε αυτήν την περίπτωση, θα είναι λιγότερο διαχωρισμένοι με περισσότερο αέριο σε υγρή μορφή και πετρέλαιο με μειωμένο ιξώδες λόγω υψηλότερων θερμοκρασιών. Εξαιτίας της αυξημένης συμπίεσης υπάρχει συχνά μείωση του πορώδους και της διαπερατότητας.^[1]

1.4 Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΚΑΙ ΤΟ ΠΑΧΟΣ

Η συνολική έκταση που καταλαμβάνει ένας ταμιευτήρας αλλά και το πάχος αυτού, έχουν ιδιαίτερη σημασία για το αν ο ταμιευτήρας αυτός έχει μεγάλο οικονομικό ενδιαφέρον ή όχι (εικόνα 12). Όσο μεγαλύτερη είναι η περιοχή που καταλαμβάνει αλλά και όσο μεγάλο είναι το πάχος του ταμιευτήρα τόσο μεγαλύτερο δυναμικό διαθέτει για την συσσώρευση του πετρελαίου και του φυσικού αερίου. Αναμφισβήτητα, υπάρχουν ταμιευτήρες που παράγουν σημαντικές ποσότητες υδρογονανθράκων παρόλο που το μέγεθος τους δεν είναι τόσο σημαντικό.^[1]



Εικόνα 12. Απεικόνιση της έκτασης και του πάχους ενός ταμιευτήρα.^[1]

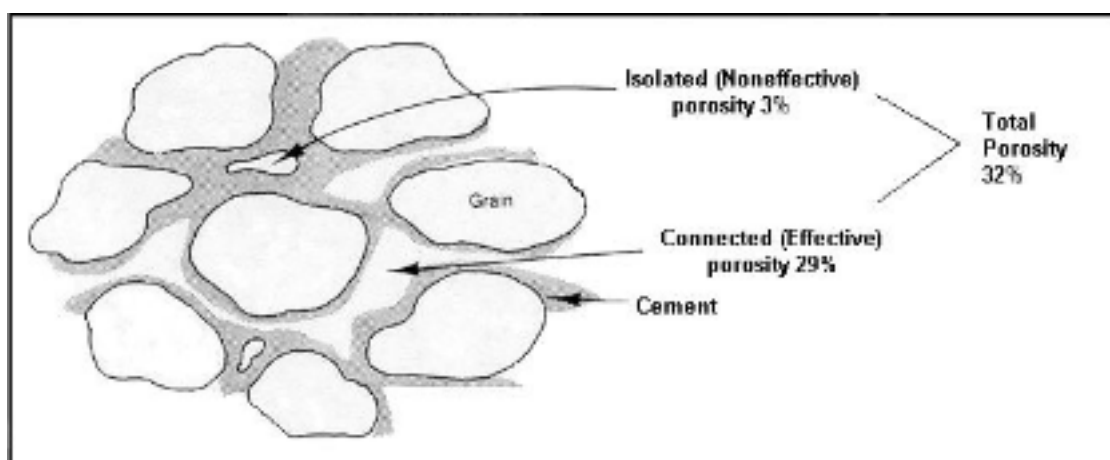
1.5 ΤΟ ΠΟΡΩΔΕΣ

Το πορώδες αντικατοπτρίζει την μέγιστη χωρητικότητα αποθήκευσης υδρογονανθράκων σε έναν ταμιευτήρα. Είναι ο λόγος του κενού χώρου, ή όγκου πόρων, ενός πετρώματος προς τον συνολικό όγκο του πετρώματος και συμβολίζεται με το γράμμα «Φ». Αυτή η αναλογία εκφράζεται είτε ως ποσοστό είτε ως κλάσμα, όμως όταν χρησιμοποιείται σε υπολογισμούς είναι σημαντικό να βρίσκεται σε δεκαδική μορφή. ^[3,1]

$$\text{Πορώδες } (\Phi) = \frac{\text{Κενός χώρος ενός πετρώματος}}{\text{Συνολικός όγκος ενός πετρώματος}}$$

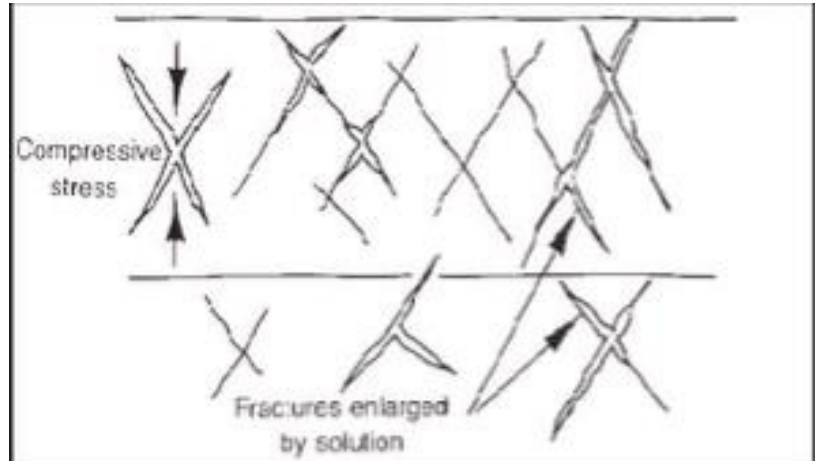
Η τιμή του πορώδους αναφέρεται ως πρωτογενές, ως δευτερογενές, ως αποτελεσματικό ή συνολικό πορώδες, ανάλογα με τον τύπο μέτρησης που χρησιμοποιείται. Παράλληλα διαχωρίζεται ως το πορώδες θραύσης, ως Vuggy πορώδες και ως μέγιστο ή ως ρεαλιστικό πορώδες.

- Ως πρωτογενές πορώδες χαρακτηρίζεται ο χώρος ανάμεσα στους πόρους που υπάρχει στο ίζημα τη στιγμή της απόθεσής του ή ο χώρος που σχηματίζεται κατά τη διάρκεια της καθίζησης.
- Το δευτερογενές πορώδες είναι αποτέλεσμα της διάλυσης του υπογείου νερού, της ανακρυστάλλωσης και της διάρρηξης.
- Το αποτελεσματικό πορώδες είναι ποσότητα του ελεύθερου χώρου που συμβάλλει στην ροή των υγρών και είναι ο τύπος του πορώδους που μετριέται στο εργαστήριο και χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς της ροής του ρευστού. ^[3,1]
- Το συνολικό πορώδες αντιπροσωπεύει το συνολικό κενό χώρο του μέσου και δείχνει κατά πόσο αποτελεσματικό ή μη αποτελεσματικό είναι. (εικόνα 13)



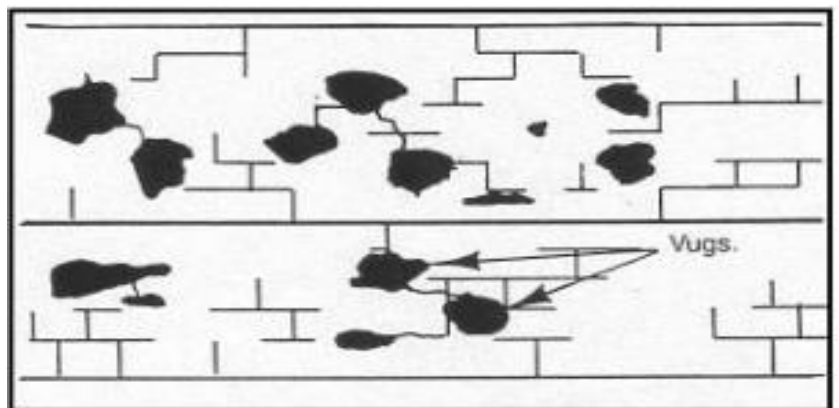
Εικόνα 13. Αποτελεσματικό και μη αποτελεσματικό πορώδες ^[1]

- Το πορώδες θραύσης είναι αποτέλεσμα των ανοιγμάτων που παράγονται από τη διάρρηξη ενός πετρώματος. Υπάρχουν δύο τρόποι θραύσης του πετρώματος (εικόνα 14). Ο πρώτος τρόπος είναι να προκληθεί ένα τεκτονικό φαινόμενο. Ο δεύτερος τρόπος είναι η υδραυλική θραύση. Είναι μια μέθοδος τόνωσης της παραγωγής προκαλώντας ρηγμάτωση και σχισμές στο σχηματισμό με την έγχυση υγρών μέσα στο πέτρωμα του ταμιευτήρα, υπό έντονες πιέσεις που υπερβαίνουν την αντοχή του πετρώματος. Τέλος, η υδραυλική θραύση μπορεί να αυξήσει σημαντικά το αποτελεσματικό πορώδες και τη διαπερατότητα ενός σχηματισμού.^[1]



Εικόνα 14. Πορώδες θραύσης^[1]

- Το Vuggy πορώδες χαρακτηρίζεται ως δευτερογενές πορώδες (εικόνα 15). Πιο συγκεκριμένα, είναι μια μορφή αυτού που έχει ως αποτέλεσμα την περαιτέρω διάλυση των πιο διαλυτών τμημάτων ενός σχηματισμού ή τη διεύρυνση των κενών πόρων (vugs) και των σχισμών.^[1]



Εικόνα 15. Vuggy πορώδες^[1]

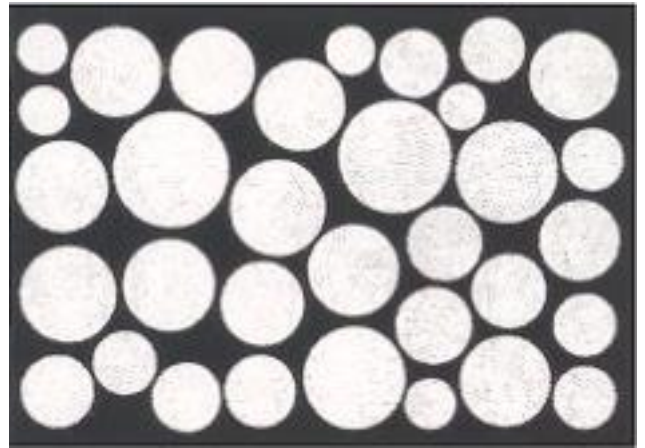
- Επίσης υπάρχει η κατάταξη του μέγιστου και του ρεαλιστικού πορώδους. Θεωρητικά το μέγιστο πορώδες που μπορεί να προσεγγίσει μια πολύ καλά ταξινομημένη ασυμπιεστή άμμος είναι 47,6%. Σε ένα ψαμμίτη όμως η τιμή αυτή σαφέστατα είναι χαμηλότερη, λόγω της συμπίεσης και της ενοποίησης, εν αντιθέσει με ένα ανθρακικό, κατακερματισμένο με Vuggy πορώδες πέτρωμα το οποίο υπερβαίνει σε σημαντικό βαθμό το θεωρητικό μέγιστο πορώδες.^[1]

1.5.1 Ο έλεγχος του πορώδους

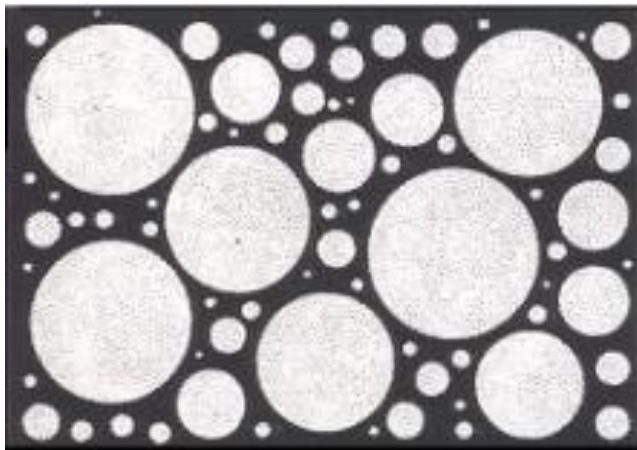
Ο έλεγχος του πορώδους πραγματοποιείται μέσω της ταξινόμησης. Η ταξινόμηση, είναι μία διαδικασία με την οποία μέσω διαφόρων φορέων μεταφοράς, όπως για παράδειγμα το νερό, διάφορα ιζηματογενή σωματίδια μεταφέρονται και καθιζάνουν. Η διαφορά σε αυτά τα σωματίδια είναι το μέγεθος, το ειδικό βάρος, το σχήμα και με βάση αυτά ταξινομούνται σε καλά ή φτωχά ταξινομημένο πέτρωμα. Άλλοι βασικοί παράγοντες ελέγχου συμπεριλαμβάνουν συγκέντρωση κόκκων, συμπίεση και συγκόλληση.^[1]

- Καλά ταξινομημένο πέτρωμα

Γενικά, σε αυτήν την ομάδα κατατάσσονται οι κόκκοι που έχουν το ίδιο μέγεθος και σχήμα. Εάν οι κόκκοι είναι καλά στρογγυλεμένοι και έχουν παρόμοιο μέγεθος, τότε όταν έρχονται σε επαφή μεταξύ τους αφήνουν ένα μεγάλο διάκενο. Σε ένα καλά ταξινομημένο πέτρωμα το πορώδες είναι σε γενικές γραμμές υψηλό.^[1] (εικόνα 16)



Εικόνα 16. Καλά ταξινομημένο πέτρωμα.^[1]



Εικόνα 17. Φτωχά ταξινομημένο πέτρωμα.^[1]

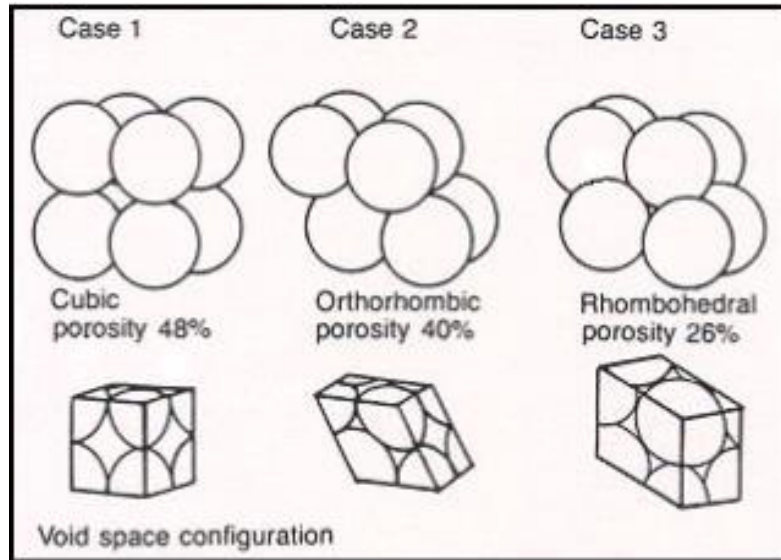
- Φτωχά ταξινομημένο πέτρωμα

Πρόκειται για τα πετρώματα που αποτελούνται από πλήθος διαφοροποιημένων μεγεθών και μορφών κόκκων. Στην συγκεκριμένη κατηγορία το πορώδες μπορεί να μειωθεί αισθητά καθώς μικρότεροι ή ακανόνιστοι κόκκοι μπορούν να εισβάλλουν ανάμεσα των μεγαλύτερων κόκκων, μειώνοντας έτσι την ποσότητα του χώρου των πόρων.^[1] (εικόνα 17)

- Συγκέντρωση κόκκων

Αναφέρεται στα πρότυπα απόστασης ή πύκνωσης των κόκκων σε ένα ιζηματογενές πέτρωμα και είναι συνάρτηση του μεγέθους, του σχήματος και της συμπίεσης. Η συγκέντρωση των κόκκων καθορίζει σε σημαντικό βαθμό την πυκνότητα, το πορώδες και τη διαπερατότητα των πετρωμάτων. Τα αποτελέσματα της συγκέντρωσης των

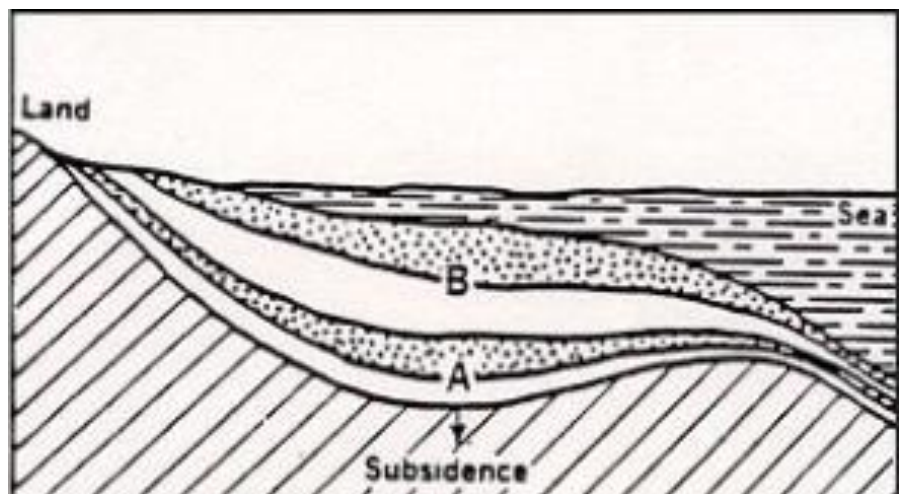
κόκκων μπορούν να απεικονισθούν εξετάζοντας την μεταβολή του πορώδους που λαμβάνει χώρα όταν οι κόκκοι αποστρογγυλεμένοι, με ομοιόμορφο μέγεθος αναδιατάσσονται από την ανοιχτή/κυβική συγκέντρωση, με πορώδες 47,6%, στην πιο σφιχτή ή κλειστή/ρομβοεδρική συγκέντρωση, με πορώδες 26%.^[1] (εικόνα 18)



Εικόνα 18. Η συγκέντρωση των κόκκων και η επίδραση της στο πορώδες.^[1]

- Συμπύεση

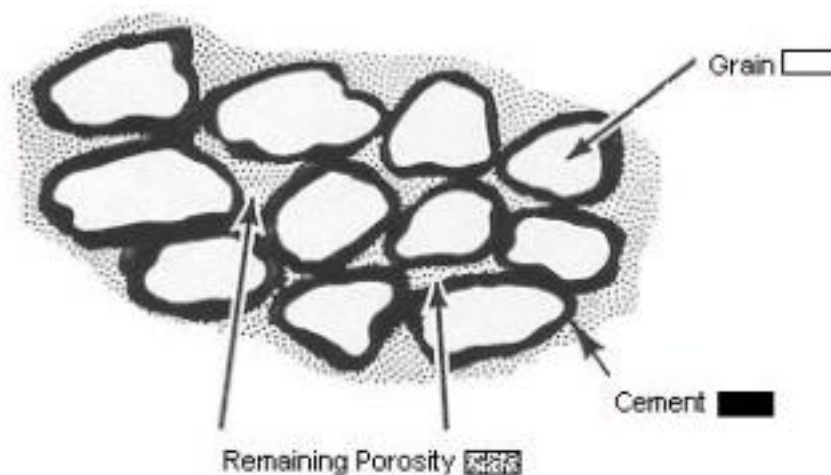
Για μεγάλο χρονικό διάστημα τα ιζήματα είχαν την δυνατότητα να συσσωρευτούν και να δημιουργήσουν σχηματισμούς με πάχους χιλιάδων ποδιών. Το βάρος των υπερκείμενων ιζημάτων είχε την τάση να συμπιέζει τα υποκείμενα ιζήματα όσο το δυνατόν σε πιο στενή διάταξη. Ταυτοχρόνως, τα υπερκείμενα ασκούν πίεση στο νερό και αυτό με την σειρά του καταλαμβάνει τους ελεύθερους χώρους μεταξύ των ιζημάτων. Αυτό δίνει το αποτέλεσμα της μείωσης του ελεύθερου όγκου των σχηματισμών. Αναμφισβήτητα, η συμπύεση εξαρτάται και από τους διάφορους τύπους κλαστικών υλικών που υπάρχουν στο σχηματισμό και όχι μόνο από την πίεση που ασκούν τα υπερκείμενα. Τέλος, επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το πορώδες και την διαπερατότητα καθώς μειώνει την ποσότητα του διασυνδεδεμένου χώρου των πόρων.^[1]



Εικόνα 19. Το στρώμα A συμπιέζεται από το στρώμα B με αποτέλεσμα να καθιζάνει.^[1]

- Συγκόλληση

Η κρυστάλλωση ή καθίζηση διαλυτών ορυκτών μεταξύ των διαστημάτων των ελεύθερων πόρων και των κλαστικών σωματιδίων συνδυάζεται με τη διαδικασία της λιθοποίησης και ολοκληρώνεται με την διαδικασία της συγκόλλησης. Η λιθοποίηση είναι η μετατροπή των μη στερεοποιημένων κοιτασμάτων σε στερεό πέτρωμα. Οι πιο συνηθισμένοι τύποι συγκολλητικών υλικών περιλαμβάνουν τον ασβεστίτη (CaCO_3), διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2) και οξείδιο του σιδήρου (Fe_2O_3). Τέλος, με την διαδικασία αυτή το πορώδες αλλά και η διαπερατότητα μειώνονται σημαντικά.^[1] (εικόνα 20)



Εικόνα 20. Η επίδραση της διαδικασίας της συγκόλλησης στο πορώδες^[1]

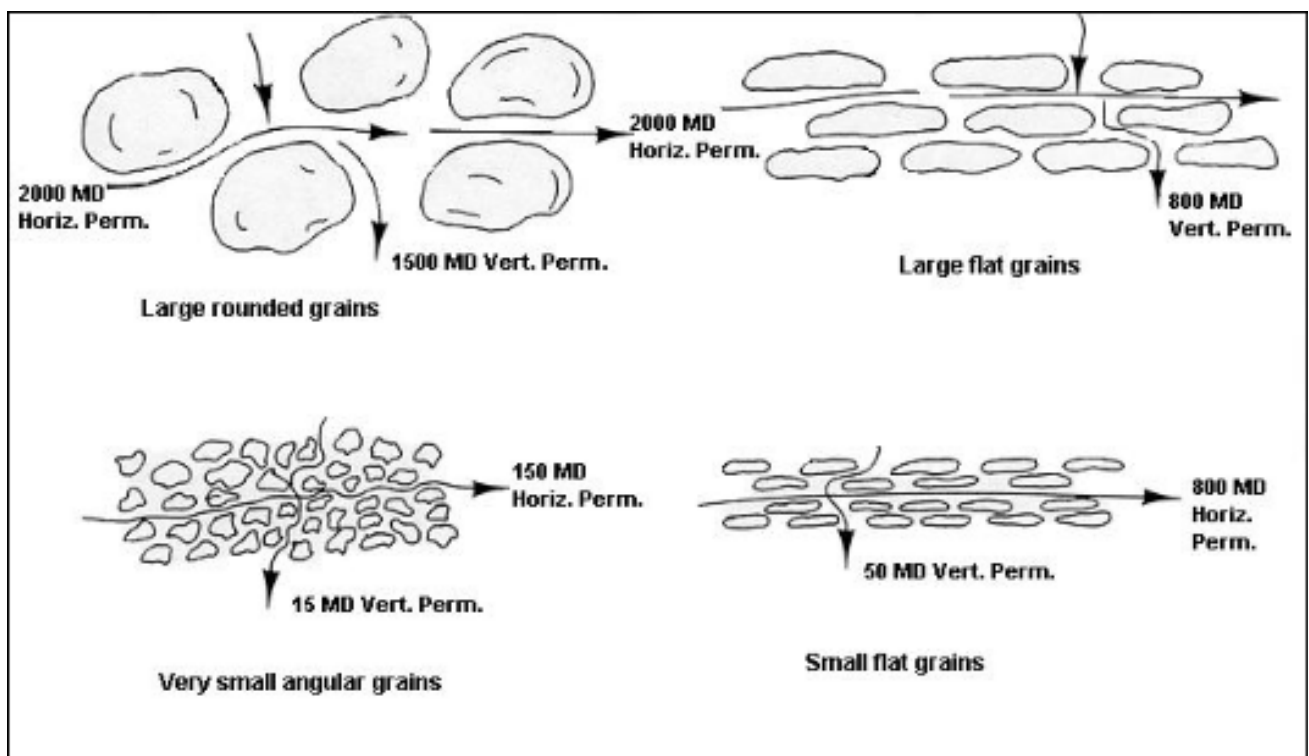
1.6 Η ΔΙΑΠΕΡΟΤΗΤΑ

Μία από τις σημαντικότερες διαδικασίες της μηχανικής πετρελαίου είναι η ανάκτηση υδρογονανθράκων από τον ταμιευτήρα. Η διαδικασία που βοηθάει στον προσδιορισμό των αποθεμάτων υδρογονάνθρακα και του ποσού που είναι ικανό να παραχθούν σε έναν ταμιευτήρα είναι η διαπερατότητα. Ουσιαστικά, η διαπερατότητα συνδέεται με το πόσο εύκολα επιτρέπεται σε ένα υγρό να ρέει μέσα από έναν σχηματισμό. Αναμφισβήτητα, η διαπερατότητα ενός σχηματισμού είναι αλληλοσυνδεόμενη με το πορώδες του σχηματισμού, αναφορικά με το διακοκκώδες ή διακρυσταλλικό πορώδες (intergranular or intercrystalline), τις διασυνδεδεμένες οπές ή ρωγμές.

Πρωταρχικό ρόλο για τον προσδιορισμό της διαπερατότητας κατέχουν το μέγεθος του σχηματισμού καθώς και το σχήμα αυτού, οι ιδιότητες και η ποσότητα ροής ρευστού. Τέλος, γνωστός επιβάλλεται να είναι ο παράγοντας της πίεσης που ασκείται στα ρευστά, αφού όσο μεγαλύτερη πίεση ασκείται σε ένα ρευστό, τόσο υψηλότερη είναι και η παροχή και όσο πιο όξινο είναι το υγρό, τόσο πιο δύσκολη χαρακτηρίζεται η κυκλοφορία του μέσα στον σχηματισμό. Το ιξώδες συσχετίζεται με την εσωτερική αντίσταση του υγρού να ρέει ή με την εσωτερική τριβή του.

Η μονάδα μέτρησης της διαπερατότητας είναι σε darcies και εκφράζεται συνήθως σε millidarcies ή 1/1000 darcy. Λίγα πετρώματα έχουν διαπερατότητα 1 darcy.

Επίσης, η διαπερατότητα μετριέται παράλληλα με τα επίπεδα των σχηματισμών του ταμιευτήρα και αναφέρεται ως οριζόντια διαπερατότητα. Γενικότερα, αυτή είναι η κύρια διαδρομή που ακολουθούν τα υγρά μέσα στην διάτρηση. Εκτός της οριζόντιας διαπερατότητας, η κατακόρυφη διαπερατότητα μετριέται σε όλα τα επίπεδα και είναι συνήθως μικρότερη. Ο λόγος για τον οποίο η οριζόντια διαπερατότητα έχει σε γενικές γραμμές υψηλότερη τιμή έναντι της κατακόρυφης διαπερατότητα οφείλεται κατά μεγάλο μέρος στη διάταξη και στη συγκέντρωση των κόκκων κατά την διάρκεια της εναπόθεσης και την μετέπειτα συμπίεση. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα, που αποτυπώνεται στην εικόνα 21, είναι πως οι επίπεδες επιφάνειες των κόκκων μπορούν να ευθυγραμμιστούν και να επικαλυφθούν παράλληλα με την επιφάνεια εναπόθεσης, αυξάνοντας έτσι την οριζόντια διαπερατότητα. Για να έχει μία κατακόρυφη διαπερατότητα υψηλή τιμή θα πρέπει να οφείλεται στο αποτέλεσμα των θραύσεων και της διάλυσης κατά μήκος των θραύσεων. Συνήθως, αυτό εντοπίζεται σε ανθρακικά πετρώματα, σε κλαστικά πετρώματα με υψηλή περιεκτικότητα σε διαλυτό υλικό ή σε άλλους τύπους πετρωμάτων που χαρακτηρίζονται από εύθραυστη δομή. Τέλος, όπως αποδεικνύεται και στην εικόνα 21, η κατακόρυφη διαπερατότητα ενδεχομένως να είναι χαρακτηριστική στα πετρώματα που απουσιάζει το συγκολλητικό υλικό ή στους ελαφρώς συμπιεσμένους ψαμμίτες.^[1]



Εικόνα 21. Παραδείγματα οριζόντιας και κατακόρυφης διαπερατότητας συσχετιζόμενη με το μέγεθος και το σχήμα των κόκκων.^[1]

1.7 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΑΝΑΦΟΡΙΚΑ ΜΕ ΤΗΝ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΤΟ ΠΟΡΩΔΕΣ

Πρώτη χαρακτηριστική αντίφαση διαπερατότητας και πορώδους είναι η εξής: Υπάρχει το ενδεχόμενο ορισμένοι λεπτόκοκκοι ψαμμίτες να έχουν υψηλό πορώδες, αλλά οι μεμονωμένοι πόροι μπορεί να είναι αρκετά πιο μικροί. Αυτό οδηγεί την τραχύτητα των πόρων, που συνδέεται με τους μεμονωμένους πόρους, να είναι αρκετά περιορισμένη και πολύπλοκη, με αποτέλεσμα η διαπερατότητα των λεπτόκοκκων σχηματισμών να είναι αρκετά χαμηλή.

Δεύτερη κατηγορία είναι αναφορικά με τους σχιστόλιθους και τους αργίλους. Οι σχιστόλιθοι και οι άργιλοι, για τον λόγο ότι αποτελούνται από εξαιρετικά λεπτόκοκκο υλικό, εμφανίζουν και υψηλές τιμές πορώδους. Για τον ίδιο λόγο, δηλαδή εξαιτίας του εξαιρετικά λεπτόκοκκου υλικού και του υπερβολικά μικρού στομίου των πόρων (pore throat), εμφανίζουν ουσιαστικά μηδενικές τιμές διαπερατότητας.

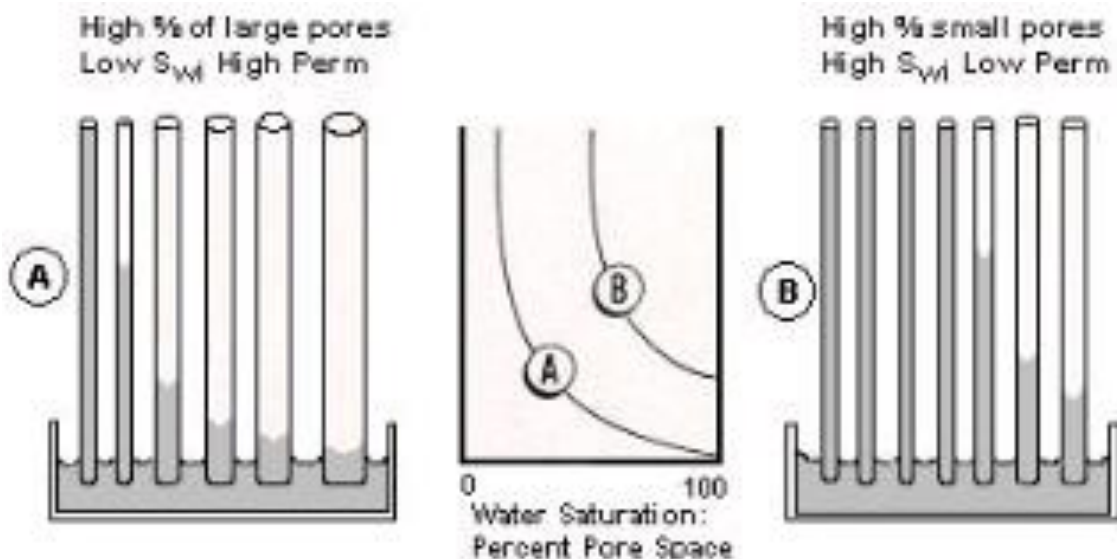
Τέλος, σε ορισμένους ασβεστόλιθους, υπάρχει η πιθανότητα να περιέχουν πολύ μικρό πορώδες ή απομονωμένο vuggy πορώδες, το οποίο δεν είναι διασυνδεδεμένο. Αυτοί οι τύποι ασβεστόλιθων έχουν την τάση να παρουσιάζουν πολύ μικρή τιμή διαπερατότητας. Όμως, αν ένας από αυτούς τους σχηματισμούς, έχει μία αστοχία ή είναι κερματισμένος, τότε η τιμή της διαπερατότητας θα είναι υψηλότερη καθώς οι απομονωμένοι πόροι συνδέονται μέσω των θραυσμάτων. ^[1]

1.8 ΤΡΙΧΟΕΙΔΗΣ ΠΙΕΣΗ

Οι ταμιευτήρες αποτελούνται από μεγάλη ποικιλία κόκκων, όσον αφορά το μέγεθος τους, πόρων και τριχοειδών. Τριχοειδή ονομάζονται οι διάυλοι μεταξύ των κόκκων και των πόρων, καθώς ορισμένες φορές αποκαλούνται στόμια πόρων. Όσο το μέγεθος των πόρων και των «καναλιών=channels» (δηλαδή των επιμηκυμένων πόρων στη μία ή και στις δύο διαστάσεις) μειώνεται, τόσο η επιφανειακή τάση των ρευστών αυξάνεται. Όμως, όταν μέσα στο πέτρωμα υπάρχουν διαφορετικά υγρά και το κάθε υγρό χαρακτηρίζεται από διαφορετική επιφανειακή τάση και πρόσφυση τότε αναπτύσσεται διαφορά της πίεσης μεταξύ αυτών των υγρών. Η πίεση αυτή ονομάζεται τριχοειδείς πίεση και η παρουσία της αποτρέπει την ροή ενός υγρού υπό την παρουσία ενός άλλου.

Αυτό συμβαίνει για παράδειγμα στην εικόνα 22. Εκεί αποτυπώνεται πως οι δυνάμεις πρόσφυσης όταν έρθουμε σε επαφή με τον αέρα έχουν την δυνατότητα να δημιουργήσουν νερό, να υπερυψωθούν ελαφρώς έναντι τοιχωμάτων του δοχείου και της βαρύτητας και στην τελική, να σχηματίσουν ένα κοίλο μηνίσκο. Εάν τοποθετηθούν περισσότεροι σωλήνες διαφορετικών διαμέτρων σε ένα γεμάτο με νερό δοχείο, τότε αναπτύσσεται ένας μηνίσκος στα εσωτερικά τοιχώματα των σωλήνων. Στους πολύ στενούς σωλήνες, όλη η διασύνδεση αέρα-νερού θα είναι κοίλη προς τα πάνω και η επιφανειακή τάση θα προσπαθήσει να ισοπεδώσει αυτή τη διασύνδεση, προκαλώντας μια ελαφρώς αυξημένη στάθμη του νερού σε όλη τη διάμετρο του σωλήνα. Κατά την εκτέλεση αυτού, η πρόσφυση του νερού στο γυαλί

θα συνεχίσει να ελκύει τα μόρια νερού προς την άνω επιφάνεια, κοντά στην άκρη των σωλήνων. Αυτός ο μηχανισμός θα λάβει την τελική του θέση μέχρις ότου η δύναμη που ελκύει τα μόρια προς τα πάνω εξισορροπηθεί από το βάρος της στήλης ύδατος. Σε αυτή τη φάση, η δύναμη της τριχοειδούς πίεσης μπορεί να εκτιμηθεί από την κοιλότητα που αναπτύσσεται μεταξύ των διασυνδέσεων αέρα-νερού που παρατηρούνται στους διαφορετικούς σωλήνες. Όσο μεγαλύτερη είναι η τριχοειδής πίεση, τόσο περισσότερο θα παραμορφωθεί σε κοίλωμα η διασύνδεση αέρα-νερού από την προσκόλληση νερού στο γυαλί στην πλευρά του σωλήνα. Οι διασυνδέσεις αέρα-νερού στους στενούς σωλήνες εμφανίζουν μεγαλύτερο κοίλωμα εν αντιθέσει με τους φαρδύτερους. Συνεπώς, το ύψος του νερού στους σωλήνες B, οι οποίοι είναι οι πιο στενοί, αυξάνεται περισσότερο συγκριτικά με τους σωλήνες A οι οποίοι είναι πιο φαρδιοί. Όσο μικρότερο είναι το άνοιγμα του σωλήνα, τόσο μεγαλύτερη είναι η τριχοειδής πίεση. Σε σχέση με έναν ταμιευτήρα, αυτό μπορεί να θεωρηθεί από την άποψη της διαμέτρου του στομίου του πόρου. ^[1]



Εικόνα 22. Η επίδραση της τριχοειδούς πίεσης σε έναν ταμιευτήρα. ^[1]

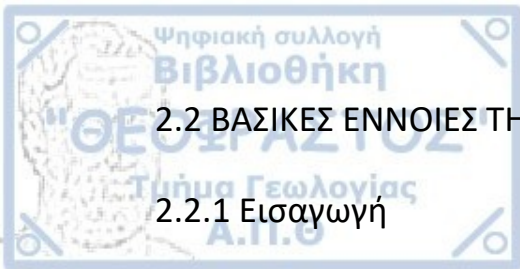
ΜΕΡΟΣ ΔΕΥΤΕΡΟ. ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Η ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ

2.1 ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ

$OIP = V_{\phi}(1-S_{WC})(res.vol.)$	1.1	Όγκος του ταμειυτήρα
$STOIP = n = V_{\phi} (1-S_{WC})/B_{oi}$	1.2	Όγκος πετρελαίου στις επιφανειακές συνθήκες στον ταμειυτήρα
$OP = FP + GP$	1.3	Πίεση υπερκείμενου φορτίου
$d(FP) = -d(GP)$	1.4	Η μείωση της πίεσης του ρευστού είναι ίση με την αύξηση της πίεσης των κόκκων
$p_w = \left(\frac{dp}{dD}\right)_{water} \times D + 14.7 \text{ (psia)}$	1.5	Η πίεση του νερού που υπάρχει στον ταμειυτήρα
$p_w = \left(\frac{dp}{dD}\right)_{water} \times D + 14.7 + C \text{ (psia)}$	1.6	Η μη φυσιολογική υδροστατική πίεση
$p_w = 0.45 D + 15 \text{ (psia)}$	1.7	Η 1.5 στρογγυλεμένη στο πλησιέστερο psia
$p_o = 0.35D + 565 \text{ (psia)}$	1.8	Γραμμική εξίσωση για την πίεση του πετρελαίου, επάνω από την επαφή πετρέλαιο και νερού με εκτιμώμενη σταθερά
$p_o = 0.08D + 1969 \text{ (psia)}$	1.9	Η γραμμή της πίεσης του αερίου
$Ultimate \text{ Recovery}(UR) = \left(\frac{V_{\phi} (1-S_{WC})}{B_{oi}} \right) \times RF$	1.10	Συντελεστής τελικής ανάκτησης πετρελαίου
$c = - \frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial p} \Big _T$	1.11	Η ισοθερμική συμπιεστότητα
$dV = cV\Delta p$	1.12	Η μεμονωμένη χρήση της συμπιεστότητας για την περιγραφή της μείωσης του ταμειυτήρα.
$pV = nRT$	1.13	Εξίσωση κατάστασης για ένα ιδανικό αέριο
$\left(p + \frac{a}{V^2}\right) (V-b) = RT$	1.14	Ο τρόπος έκφρασης της εξίσωσης του van der Waals για ένα lb.mole ενός αερίου
$pV = ZnRT$	1.15	Η πιο διαδεδομένη εξίσωση κατάστασης για ένα ιδανικό αέριο
$E = 35.37 \frac{p}{ZT}$	1.16	Τιμή που χρησιμοποιείται στην εξίσωση 1.20

$G = V_{\phi} (1-S_{wc})E_i$		1.17	Το αρχικό αέριο στη θέση του εκφρασμένο σε τυπικές συνθήκες
Production(sc)= (sc)–Unproduced Gas (sc)	GIIP	1.18	Η ισορροπία των υλικών για δεδομένο όγκο παραγωγής G_p
$G_p = G - (HCPV)E$			
$G_p = G - (G / E_i) E$			
$G_p/G = 1 - (E / E_i)$		1.19	Η ισορροπία του υλικού εξάντλησης
$(p/Z) = (p_i/Z_i)(1 - (G_p/G))$		1.20	Με τη χρήση της εξίσωσης 1.19 και της 1.16
$d(HCPV) = - dV_w + dV_f$		1.21	Η συνολική μεταβολή στον όγκο των πόρων υδρογονανθράκων
$c_f = - (1/ V_i) (\partial V_i / \partial (FP)) = (1/ V_f) (\partial V_f / \partial p)$		1.22	Ο όγκος των πόρων υδρογονανθράκων
$d(HCPV) = -(c_w V_w + c_f V_f) \Delta p$		1.23	Η μείωση στον όγκο των πόρων υδρογονανθράκων
$G_p/G = 1 - (1 - (c_w S_{wc} + c_f) \Delta p) / (1 - S_{wc}) E / E_i$		1.24	Τροποποιημένο ισοζύγιο υλικών(1.23 και 1.18)
Production(sc)= (sc)–Unproduced Gas (sc)	GIIP	1.25	Εξίσωση ισορροπίας υλικού υπό την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχει διαφορά μεταξύ του όγκου νερού της επιφάνειας και του ταμιευτήρα
$G_p = G - ((G / E_i) - W_e) E$			
$(p/Z) = (p_i/Z_i)(1 - (G_p/G)) / (1 - (E_i W_e / G))$		1.26	Εξίσωση ισορροπίας υλικού με εισροή νερού
$G_a = G_p / (1 - E / E_i)$		1.27	Το φαινόμενο αέριο στη θέση του
$G = (G_p - W_e E) / (1 - E / E_i)$		1.28	Η σωστή τιμή του αερίου στη θέση του λαμβάνεται και από αυτή την εξίσωση
$G_a = G + (W_e E) / (1 - E / E_i)$		1.29	Αφαιρώντας την εξίσωση 1.28 από την εξίσωση 1.27 προκύπτει
$(R - R_s) (scf/stb) \times B_g (rb/scf) = (R - R_s) B_g$		2.1	Ο όγκος που θα καταλάβει η συνιστώσα $(R - R_s) scf/stb$ όταν κατέλθει στον ταμιευτήρα
$(\text{Underground withdrawal})/stb = B_o + (R - R_s) B_g (rb/stb)$		2.2	Η συνολική υπόγεια απόσυρση υδρογονανθράκων που συνδέεται με την παραγωγή ενός stb πετρελαίου
$B_g (rb/scf) = 1/5.615E$		2.3	Η σχέση μεταξύ B_g και E



2.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΩΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ

2.2.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα εισαχθούν πολλές θεμελιώδεις έννοιες για την απεικόνιση των πρωταρχικών λειτουργιών ενός ταμειυτήρα. Αναφέροντας τις πρωταρχικές λειτουργίες ενός ταμειυτήρα εννοείται η εκτίμηση των υδρογονανθράκων, ο υπολογισμός ενός συντελεστή ανάκτησης και η προσάρτηση μιας χρονικής κλίμακας στην ανάκτηση.

Σχετικά με την περιγραφή του υπολογισμού του πετρελαίου στη θέση την οποία βρίσκεται, πραγματοποιείται εστίαση σε μεγάλο βαθμό στον προσδιορισμό των καθεστώτων πίεσης υγρού και στο πρόβλημα της τοποθέτησης των επαφών των ρευστών στον ταμειυτήρα. Η πρωτογενής ανάκτηση περιγράφεται με γενικούς όρους λαμβάνοντας υπόψη τη σημασία των ισοθερμικών συμπιέσεων των ρευστών των ταμειυτήρων, ενώ ο προσδιορισμός του συντελεστή ανάκτησης και η προσάρτηση μιας χρονικής κλίμακας απεικονίζονται με την περιγραφή μηχανικού ογκομετρικού ταμειυτήρα αερίου. Τέλος, η ολοκλήρωση του κεφαλαίου πραγματοποιείται με μια σύντομη ποσοτική αναφορά της συμπεριφοράς φάσης των συστημάτων υδρογονανθράκων πολλαπλών στοιχείων.^[4]

2.2.2 Υπολογισμός του όγκου των υδρογονανθράκων

Έστω πως υπάρχει ένας ταμειυτήρας που αρχικά γεμίζει με πετρέλαιο. Ο όγκος του πετρελαίου μέσα στον ταμειυτήρα, η θέση δηλαδή που καταλαμβάνει, δίνεται από τον τύπο:

$$OIP = V_{\phi}(1 - S_{WC})(res.vol.) \quad (1.1)$$

όπου,

V = ο καθαρός όγκος του ταμειυτήρα

ϕ = το πορώδες

S_{WC} = ο συμφυής ή μη μειώσιμος κορεσμός του νερού (the connate or irreducible water saturation) εκφράζεται και ως κλάσμα του όγκου των πόρων.

Ως V_{ϕ} ονομάζεται ο όγκος των πόρων (PV) και είναι ο συνολικός όγκος στον ταμειυτήρα και έχει την δυνατότητα να καταλαμβάνεται από τα υγρά. Ομοίως, το $V_{\phi}(1 - S_{WC})$ ονομάζεται ο όγκος των πόρων των υδρογονανθράκων (HCPV) και είναι ο συνολικός όγκος του ταμειυτήρα, ο οποίος έχει την δυνατότητα να πληρωθεί με υδρογονάνθρακες, είτε πετρέλαιο είτε αέριο είτε και τα δύο.

Η ύπαρξη του συμφυούς κορεσμένου νερού είναι συνήθως 10-25% (PV), είναι ένα παράδειγμα φυσικού φαινομένου το οποίο είναι θεμελιώδες για τη ροή υγρών σε πορώδη μέσα. Ουσιαστικά, όταν ένα υγρό μετατοπίζει ένα άλλο σε ένα πορώδες μέσο, ο μετατοπισμένος κορεσμός υγρού δεν μπορεί ποτέ να μειωθεί στο μηδέν. Αυτό

ισχύει υπό την προϋπόθεση ότι τα υγρά δεν έχουν την δυνατότητα να αναμειχθούν, και αυτό έχει ως απαίτηση την ύπαρξη μιας πεπερασμένης επιφανειακής τάσης στη διεπιφάνεια μεταξύ των υγρών. [4]

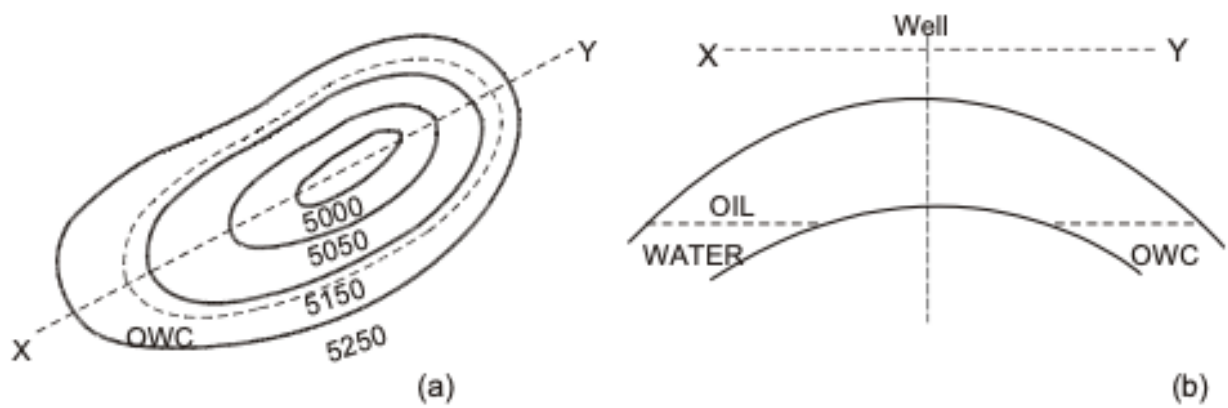
Με αυτό τον τρόπο, το πετρέλαιο, το οποίο παράγεται κάτω από πετρώματα μεγάλου βάθους, όταν μεταναστεύει σε μια παγίδα ταμιευτήρα κορεσμένη με νερό, μετατοπίζει ένα μέρος του νερού και όχι όλο, με αποτέλεσμα την παρουσία συμφυούς κορεσμένου νερού. Δεδομένου ότι το νερό είναι ακίνητο η μόνη επίδρασή του στον υπολογισμό της μηχανικής ταμιευτήρα είναι η μείωση του όγκου του ταμιευτήρα, ο οποίος έχει την δυνατότητα να καταλαμβάνεται από υδρογονάνθρακες. [4]

Ο όγκος του πετρελαίου μέσα στον ταμιευτήρα υπολογίστηκε με τη χρήση της εξίσωσης (1.1) και πρακτικά εκφράζεται ως όγκος του ταμιευτήρα. Δεδομένου ότι όλα τα πετρέλαια, στις υψηλές επικρατούσες πιέσεις και θερμοκρασίες στους ταμιευτήρες, περιέχουν διαφορετικές ποσότητες διαλυμένου αερίου ανά μονάδα όγκου, είναι πολύ σημαντικό να εκφράζονται και οι όγκοι του πετρελαίου στις επιφανειακές συνθήκες των ταμιευτήρων, στις οποίες θα έχουν διαχωριστεί το πετρέλαιο και το αέριο. Έτσι ο ταμιευτήρας πετρελαίου βρίσκεται στη θέση

$$STOIP=n= V_{\phi} (1-S_{WC})/B_{oi} \quad (1.2)$$

Όπου B_{oi} είναι ο συντελεστής του όγκου του σχηματισμού του πετρελαίου, υπό τις αρχικές συνθήκες που επικρατούν και έχει τον όγκο του ταμιευτήρα μονάδων / ο όγκος της δεξαμενής αποθέματος (units reservoir volume/stock tank volume), συνήθως βαρέλια ταμιευτήρα / βαρέλι δεξαμενής αποθέματος (rb / stb). (reservoir barrels/stock tank barrel (rb/stb)). Έτσι, ένας όγκος $B_{oi} rb$ του πετρελαίου θα παράγει ένα stb του πετρελαίου στην επιφάνεια μαζί με τον όγκο του αερίου, ο οποίος στην αρχή ήταν διαλυμένος στο πετρέλαιο που βρισκόταν μέσα στον ταμιευτήρα. Οι παράμετροι ϕ και S_{WC} καθορίζονται με πετροφυσική ανάλυση. Ο καθαρός όγκος V , λαμβάνεται από γεωλογική ανάλυση και από ανάλυση υγρής πίεσης. [4],[5]

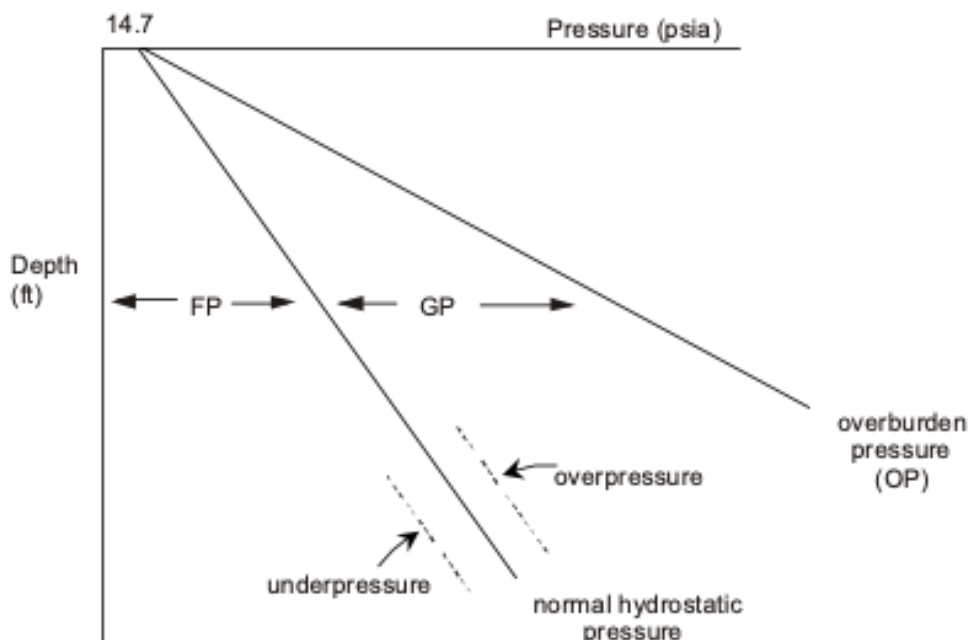
Οι γεωλόγοι παρέχουν χάρτες στους οποίους χαρτογραφούν την κορυφή και την βάση της δεξαμενής, όπως φαίνεται στην εικόνα 23. Αυτοί οι χάρτες έχουν ισοϋψείς που έχουν σχεδιαστεί για κάθε 50 πόδια ανύψωσης και το πρόβλημα εδώ είναι να καθοριστεί το επίπεδο στο οποίο εντοπίζεται η επαφή του νερού με το πετρέλαιο (OWC). Η μέτρηση του περιορισμένου όγκου του πετρώματος του ταμιευτήρα πάνω από αυτό το επίπεδο θα δώσει στη συνέχεια τον καθαρό συνολικό όγκο V . Για την κατάσταση που επικρατεί όμως στην εικόνα 23 (β) δεν θα ήταν δυνατό να προσδιοριστεί αυτή η επαφή με εξέταση των logs στον ταμιευτήρα επειδή μόνο η ζώνη πετρελαίου είναι διαπερατή. Μια τέτοια τεχνική θα ήταν αποδεκτή να εφαρμοστεί εάν τα όρια OWC ήταν κάπως υψηλότερα στον ταμιευτήρα. Ο τρόπος με τον οποίο είναι εφικτό να οριοθετηθεί η επαφή νερού-πετρελαίου και γενικά οι επαφές των ρευστών απαιτεί τη γνώση των καθεστώτων πίεσης υγρών στον ταμιευτήρα. [4]



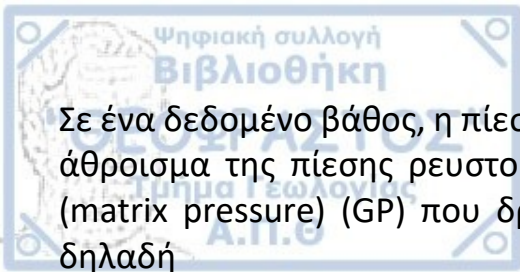
Εικόνα 23. (α) Χάρτης δομικού περιγράμματος της κορυφής του ταμειυτήρα και (β) διατομή διαμέσου του ταμειυτήρα, κατά μήκος της γραμμής X-Y. ^[4]

2.2.3 Καθεστώτα πίεσης των ρευστών

Η συνολική πίεση σε οποιοδήποτε βάθος είναι γνωστή ως πίεση υπερκείμενου φορτίου. Κατά κύριο λόγο προκύπτει από το συνδυασμένο βάρος του σχηματιζόμενου πετρώματος και υγρών, είτε πρόκειται για νερό, είτε για πετρέλαιο, είτε για φυσικό αέριο. Στην πλειοψηφία των ιζηματογενών λεκανών, η πίεση υπερκείμενου φορτίου αυξάνεται γραμμικά με το βάθος και τυπικά έχει κλίση πίεσης 1 psi / ft. Αυτό απεικονίζεται στην εικόνα 24. ^[4]



Εικόνα 24. Υπερκείμενη πίεση και καθεστώτα υδροστατικής πίεσης (FP = πίεση ρευστού, GP = πίεση κόκκων) ^[4]



Σε ένα δεδομένο βάθος, η πίεση του υπερκείμενου φορτίου μπορεί να εξισωθεί με το άθροισμα της πίεσης ρευστού (FP) και της πίεσης κόκκων ή της μητρικής πίεσης (matrix pressure) (GP) που δρουν μεταξύ των μεμονωμένων σωματιδίων βράχου, δηλαδή

$$OP = FP + GP \quad (1.3)$$

και συγκεκριμένα, ενώ η πίεση υπερκείμενου φορτίου παραμένει σταθερή σε κάθε συγκεκριμένη περίπτωση το βάθος, τότε

$$d(FP) = -d(GP) \quad (1.4)$$

Συνεπώς, η μείωση της πίεσης του ρευστού θα οδηγήσει σε αντίστοιχη αύξηση της πίεσης κόκκων και αντίστροφα.

Οι ρυθμίσεις πίεσης των ρευστών στους υδρογονάνθρακες υπαγορεύονται από την επικρατούσα πίεση νερού στην περιοχή του ταμιευτήρα. Σε μια απολύτως ιδανική περίπτωση, η πίεση του νερού σε οποιοδήποτε βάθος μπορεί να υπολογιστεί ως

$$p_w = \left(\frac{dp}{dD}\right)_{\text{water}} \times D + 14.7 \text{ (psia)} \quad (1.5)$$

όπου $\frac{dp}{dD}$ είναι η κλίση της πίεσης του νερού και εξαρτάται από τη χημική σύνθεση, δηλαδή την αλατότητα. Για το καθαρό νερό έχει την τιμή 0,4335 psi / ft. Η προσθήκη της επιφανειακής πίεσης μιας ατμόσφαιρας (14,7 psia) έχει σαν αποτέλεσμα την έκφραση της πίεσης σε μονάδες απόλυτης τιμής παρά σε μονάδες μέτρησης (psig), οι οποίες μετρούνται σε σχέση με την ατμοσφαιρική πίεση. Σε πολλές περιπτώσεις στην μηχανική των ταμιευτήρων η κύρια ανησυχία είναι οι διαφορές πίεσης, οι οποίες είναι οι ίδιες είτε χρησιμοποιούνται οι απόλυτες πιέσεις είτε οι μετρήσεις, και χαρακτηρίζονται ως psi.

Η εξίσωση (1.5) προϋποθέτει ότι υπάρχει τόσο συνεχής πίεση νερού στην επιφάνεια όσο και ότι η αλατότητα δεν εναλλάσσεται ανάλογα με το βάθος, πράγμα το οποίο δεν υφίσταται καθώς η αλατότητα μπορεί να ποικίλει σημαντικά με το βάθος. Αυτό που είναι πολύ βασικό για έναν μηχανικό είναι ο ορισμός του καθεστώτος υδροστατικής πίεσης κοντά στις άμμους που φέρουν υδρογονάνθρακες.

Σε αντίθεση με αυτή την κανονική κατάσταση, παρατηρείται μη φυσιολογική υδροστατική πίεση η οποία μπορεί να οριστεί από την εξίσωση

$$p_w = \left(\frac{dp}{dD}\right)_{\text{water}} \times D + 14.7 + C \text{ (psia)} \quad (1.6)$$

όπου C είναι μια σταθερά που είναι θετική εάν το νερό έχει μεγαλύτερη πίεση και αρνητική εάν έχει μικρότερη πίεση από αυτή που ορίζεται.

Για μία ασυνήθιστη πίεση του νερού κάτω από οποιαδήποτε άμμο, η άμμος θα πρέπει να συμπιέζεται αποτελεσματικά από τα περιβάλλοντα στρώματα, έτσι ώστε να μην είναι δυνατή η αποκατάσταση της συνέχειας της υδροστατικής πίεσης στην επιφάνεια.

Έχουν αναφερθεί διάφορες καταστάσεις που μπορούν να προκαλέσουν μη φυσιολογικές πιέσεις ρευστών σε κλειστές υδροφόρες άμμους, οι οποίες περιλαμβάνουν: ^{[4],[6]}

- Αλλαγή της θερμοκρασίας: μια αύξηση της θερμοκρασίας ενός βαθμού Fahrenheit μπορεί να προκαλέσει αύξηση της πίεσης των 125 psi σε ένα κλειστό σύστημα νερού. (sealed fresh water system).
- Γεωλογικές μεταβολές όπως η ανύψωση του ταμιευτήρα ή η ισοδύναμη επιφανειακή διάβρωση, οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα η πίεση του νερού στην άμμο του ταμιευτήρα να είναι πολύ υψηλή για το βάθος της ταφής. Το αντίθετο φαινόμενο συμβαίνει σε ένα ταμιευτήρα που υποβαθμίζεται, στον οποίο μπορεί να εμφανιστεί ασυνήθιστα χαμηλή πίεση ρευστών.
- Το φαινόμενο της όσμωσης μεταξύ των υδάτων που έχουν διαφορετική αλατότητα, όπου ο περικλείων σχιστόλιθος ενεργεί ως ημιδιαπερατή μεμβράνη σε αυτή την ιοντική ανταλλαγή. Εάν το νερό μέσα στον κλειστό αυτό χώρο είναι πιο αλατούχο από το περιβάλλον νερό, η όσμωση θα προκαλέσει αφύσικα υψηλή πίεση και αντίστροφα.

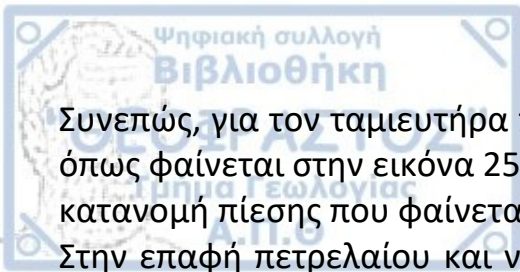
Ορισμένες από αυτές τις αιτίες μη φυσιολογικής πίεσης είναι αλληλεπιδραστικές, για παράδειγμα, αν αυξηθεί ο όγκος του ταμιευτήρα, η προκύπτουσα υπερπίεση μετριάζεται εν μέρει από τη μείωση της θερμοκρασίας της δεξαμενής.

Οι μηχανικοί των ταμιευτήρων τείνουν να είναι πιο ρεαλιστικοί με το θέμα των ασυνήθιστων πιέσεων από ότι οι γεωλόγοι. Πρακτικά, αναζητούν απαντήσεις σε ερωτήματα όπως - ποια επίδραση έχει η πίεση της άμμου στο νερό κατά την συσσώρευση των υδρογονανθράκων; ^{[4],[7]} Μέχρι στιγμής έχουν ληφθεί υπόψη μόνο οι υδροστατικές πιέσεις. Τα καθεστώτα πίεσης υδρογονανθράκων είναι διαφορετικά, καθώς οι πυκνότητες πετρελαίου και αερίου είναι μικρότερες από τις πυκνότητες νερού και συνεπώς οι κλίσεις της πίεσης είναι μικρότερες, ενώ οι χαρακτηριστικές τιμές είναι

$$\left(\frac{dp}{dD}\right)_{\text{water}} = 0.45 \text{ psi/ft}$$

$$\left(\frac{dp}{dD}\right)_{\text{oil}} = 0.35 \text{ psi/ft}$$

$$\left(\frac{dp}{dD}\right)_{\text{gas}} = 0.08 \text{ psi/ft}$$



Συνεπώς, για τον ταμιευτήρα που περιέχει τόσο πετρέλαιο όσο και ελεύθερο αέριο, όπως φαίνεται στην εικόνα 25, χρησιμοποιώντας τις παραπάνω κλίσεις θα δώσει την κατανομή πίεσης που φαίνεται στην αριστερή πλευρά του διαγράμματος. ^[4]

Στην επαφή πετρελαίου και νερού στα 5500 πόδια, η πίεση στο πετρέλαιο και στο νερό πρέπει να είναι ίση, διαφορετικά δεν θα υπάρχει στατική διεπαφή. Η πίεση στο νερό μπορεί να προσδιοριστεί χρησιμοποιώντας την εξίσωση 1.5, στρογγυλεμένη στο πλησιέστερο psi, όπως

$$p_w = 0.45 D + 15 \text{ (psia)} \text{ (1.7)}$$

η οποία λαμβάνει ένα κανονικό καθεστώς υδροστατικής πίεσης. Ως εκ τούτου, κατά την επαφή πετρελαίου-νερού

$$p_o = p_w = 0.45 \times 5500 + 15 = 2490 \text{ (psia)}$$

Η γραμμική εξίσωση για την πίεση του πετρελαίου, επάνω από την επαφή πετρέλαιο και νερού, είναι:

$$p_o = 0.35D + \text{σταθερά}(\text{constant})$$

και δεδομένου ότι $p_o = 2490$ psia στο $D = 5500$ πόδια, η σταθερά μπορεί να εκτιμηθεί για να δώσει την εξίσωση

$$p_o = 0.35D + 565 \text{ (psia)} \text{ (1.8)}$$

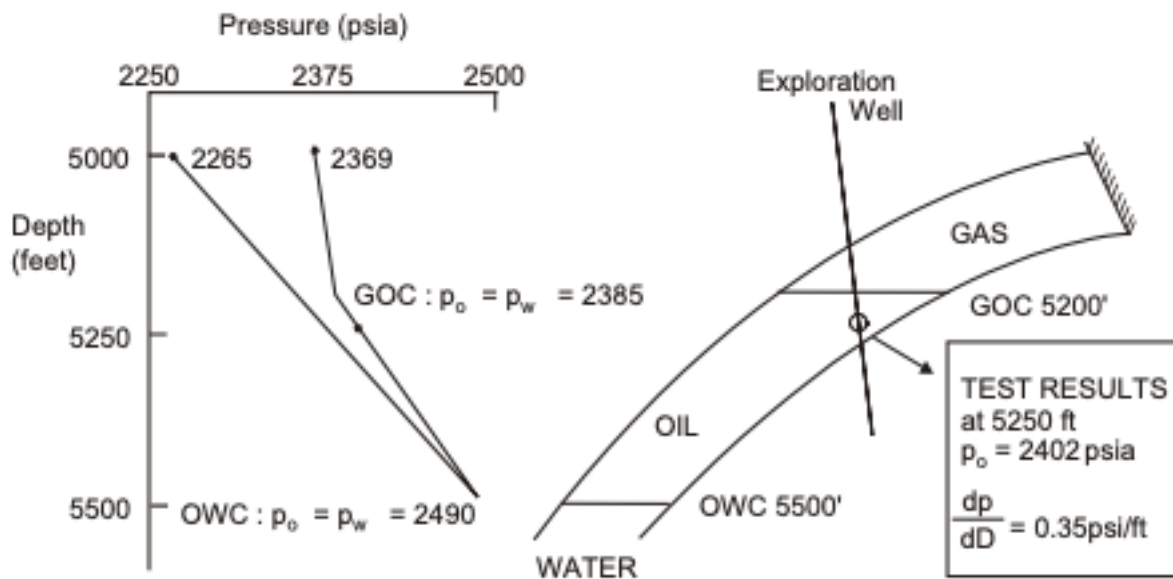
Κατά την επαφή τώρα του αερίου και του πετρελαίου στα 5200 πόδια, η πίεση και στα δύο υγρά πρέπει να είναι ίση και μπορεί να υπολογιστεί με τη χρήση της εξίσωσης 1.8 δηλαδή 2385 psia. Η εξίσωση της γραμμής της πίεσης του αερίου μπορεί στη συνέχεια να προσδιοριστεί ως

$$p_o = 0.08D + 1969 \text{ (psia)} \text{ (1.9)}$$

Τέλος, χρησιμοποιώντας την τελευταία εξίσωση, η πίεση αερίου στην κορυφή της δομής, στα 5000 πόδια, μπορεί να υπολογιστεί ως 2369 psia. Οι γραμμές πίεσης στην στήλη υδρογονανθράκων σχεδιάζονται στο διάγραμμα βάθους πίεσης, εικόνα 24, από την οποία μπορεί να φανεί ότι στην κορυφή της δομής η πίεση του αερίου υπερβαίνει την κανονική υδροστατική πίεση κατά 104 psi.

Έτσι, σε μια γεώτρηση με περικλείοντα σχιστόλιθο ακριβώς στη κορυφή της δομής θα υπάρξει μια απότομη αύξηση της πίεσης από 2265 psi σε 2369 psia στην πρώτη διείδυση στον ταμιευτήρα στα 5000 πόδια. Το μέγεθος της ασυνέχειας της πίεσης κατά τη διάτρηση σε έναν ταμιευτήρα υδρογονανθράκων εξαρτάται από την

κατακόρυφη απόσταση μεταξύ του σημείου της διείσδυσης και της επαφής του υδρογόνου με το νερό. Για μια δεδομένη τιμή αυτής της απόστασης θα είναι πολύ μεγαλύτερη εάν ο ταμιευτήρας περιέχει μόνο αέριο.^[4]



Εικόνα 25. Τα καθεστώτα πίεσης στο πετρέλαιο και στο αέριο για μια συνηθισμένη συσσώρευση υδρογονανθράκων.^[4]

Κατά τη στιγμή της γεώτρησης και την ανακάλυψη ενός νέου ταμιευτήρα, ένας από τους κύριους στόχους είναι να καθορισθεί η θέση των επαφών των ρευστών, η οποία θα διευκολύνει τον υπολογισμό του πετρελαίου στη συγκεκριμένη θέση.

Όσον αφορά την εξερευνητική διείσδυση που εμφανίζεται στην εικόνα 25, η γεώτρηση διαπερνά τον ταμιευτήρα κοντά στην κορυφή της στήλης του πετρελαίου. Η επαφή αερίου και πετρελαίου στον ταμιευτήρα θα εμφανιστεί ξεκάθαρα στα logs της διείσδυσης. Η επαφή όμως του πετρελαίου με το νερό δεν θα παρατηρηθεί αφού είναι περίπου 225 πόδια κάτω από το σημείο που η διείσδυση διαπερνά τη βάση του ταμιευτήρα.^[4]

Η θέση της επαφής μπορεί να συναχθεί μόνο ως αποτέλεσμα ενός δοκιμαστικού δείγματος, όπως το drill stem^{[4],[8]} ή το wireline formation test^{[9],[10]}, όπου μετρήθηκαν η πίεση και θερμοκρασία και έτσι ανακτήθηκε ένα δείγμα πετρελαίου. Η ανάλυση του δείγματος επιτρέπει τον υπολογισμό της πυκνότητας του πετρελαίου σε συνθήκες του συγκεκριμένου ταμιευτήρα και συνεπώς επιτυγχάνεται η εύρεση της κλήσης της πίεσης του πετρελαίου. Η μέτρηση και η κλίση της πίεσης αρκούν να καθορίσουν την ευθεία, η οποία συσχετίζεται με την στήλη του πετρελαίου. Αν αυτό πραγματοποιηθεί σε βάθος 5250 πόδια, στον ταμιευτήρα της εικόνας 24, τότε η μετρούμενη πίεση θα είναι 2402 psia και η υπολογισμένη κλίση του πετρελαίου 0,35 psi / ft, που επαρκούν για να προσδιορισθεί η γραμμή πίεσης του πετρελαίου ως

$$p_o = 0.35D + 565 \text{ (psia)} \text{ (1.8)}$$

και η προέκταση αυτής της γραμμής για να ικανοποιήσει την κανονική γραμμή υδροστατικής πίεσης θα εντοπίσει την επαφή πετρελαίου-νερού στα 5500 πόδια.^[4] Αυτός ο τύπος ανάλυσης βασίζεται σε μια γνώση του καθεστώτος υδροστατικής πίεσης. Για παράδειγμα, εάν το νερό έχει υπερπίεση μόλις 20 psi τότε η επαφή πετρελαίου-νερού θα ήταν στα 5300 ft αντί στα 5500 ft. Αυτό το γεγονός μπορεί να ελεγχθεί με οπτικό έλεγχο της εικόνας 24 ή εκφράζοντας την εξίσωση της γραμμής υπερπίεσης νερού, εξίσωση 1.6 ως

$$p_w = 0.45D + 35 \text{ (psia)}$$

και λύνοντάς την ταυτοχρόνως με την εξίσωση 1.8 με την προϋπόθεση ότι $p_w = p_o$ στην επαφή πετρελαίου-νερού. Η διαφορά των 200 ποδιών στη θέση της επαφής μπορεί να κάνει μια τεράστια διαφορά με το υπολογιζόμενο πετρέλαιο στη θέση του, ειδικά εάν η έκταση της επιφάνειας του ταμιευτήρα είναι μεγάλη.

Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο οι μηχανικοί των ταμιευτήρων είναι διατεθειμένοι να ξοδέψουν πολύ χρόνο (και αναμφισβήτητα χρήματα) για τον καθορισμό του καθεστώτος υδροστατικής πίεσης σε ένα νέο πεδίο. Απλός τρόπος για να πραγματοποιηθεί αυτό είναι να εκτελεστεί μια σειρά wireline formation test^{[9],[10]}, στην ερευνητική γεώτρηση, συνήθως μετά την καταγραφή και πριν από την τοποθέτηση της επένδυσης, όπου οι πιέσεις μετριοούνται σκόπιμα σε άμμο που φέρει νερό τόσο πάνω όσο και κάτω από τον ταμιευτήρα ή τους ταμιευτήρες υδρογονανθράκων. Η σειρά μετρήσεων πίεσης σε διαφορετικά βάθη επιτρέπει την υδροστατική γραμμή πίεσης, εξίσωση 1.6, να οριστεί με ακρίβεια κοντά στη συσσώρευση υδρογονανθράκων, ανεξάρτητα από το αν το καθεστώς πίεσης είναι φυσιολογικό ή μη φυσιολογικό.^[4]

Τέτοιες δοκιμές επαναλαμβάνονται στις πρώτες λίγες γεωτρήσεις που έχουν διανοιχθεί σε ένα νέο πεδίο ή περιοχή μέχρις ότου οι μηχανικοί είναι αρκετά ικανοποιημένοι ότι υπάρχει μια ομοιομορφία στην υδροστατική πίεση. Αναμφισβήτητα, αν δεν εξασφαλιστεί αυτή η ομοιομορφία μπορεί να προκληθεί σημαντικό λάθος στην εκτίμηση των εν λόγω υδρογονανθράκων, γεγονός που με τη σειρά του μπορεί να οδηγήσει στη διαμόρφωση ανεπαρκών και ανακριβών σχεδίων ανάπτυξης πεδίου (field).

2.2.4 Ανάκτηση πετρελαίου: Συντελεστής ανάκτησης

Η εξίσωση (1.2), για το STOIIP, μπορεί να μετατραπεί σε μια εξίσωση για τον υπολογισμό της τελικής ανάκτησης πετρελαίου απλά πολλαπλασιάζοντας τον συντελεστή ανάκτησης (RF), ο οποίος είναι ένας αριθμός μεταξύ του μηδενός και της ενότητας που αντιπροσωπεύει το κλάσμα του ανακτήσιμου πετρελαίου, έτσι

$$\text{Ultimate Recovery(UR)} = (V_\phi (1 - S_{wc}) / B_{oi}) \times \text{RF} \quad (1.10)$$

Όμως, είναι δύσκολο να προσδιοριστεί ποιος είναι ο συντελεστής ανάκτησης για κάθε δεδομένο ταμιευτήρα. Πράγματι, ο προσδιορισμός αυτού του αριθμού είναι το πιο σημαντικό μεμονωμένο έργο της μηχανικής ενός ταμιευτήρα.

Αρχικά, οποιοσδήποτε μπορεί να διακρίνει δύο τύπους συντελεστών ανάκτησης. Ο πρώτος τύπος είναι το σύστημα το οποίο διέπεται από τις τρέχουσες οικονομικές συνθήκες αλλά περισσότερο από περιβαλλοντικούς και οικονομικούς προβληματισμούς, ενώ ο δεύτερος μπορεί να χαρακτηριστεί ξεκάθαρα ως ένας τεχνικός παράγοντας ανάκαμψης ανάλογα με την φυσική του συστήματος ρευστών δεξαμενών.^[4]

Αυτές οι δύο κύριες κατηγορίες ανάκτηση υδρογονανθράκων ονομάζονται πρωτογενής και συμπληρωματικές. Η πρωτογενής ανάκτηση είναι ο όγκος υδρογονανθράκων που μπορεί να παραχθεί χάρη στη χρησιμοποίηση της φυσικής ενέργειας που υπάρχει στον ταμιευτήρα και στον παρακείμενο υδροφορέα. Η συμπληρωματική ανάκτηση είναι το πετρέλαιο που υπάρχει η δυνατότητα να ληφθεί με την προσθήκη ενέργειας στο σύστημα ρευστού του ταμιευτήρα.

Ολόκληρος ο μηχανισμός της πρωτογενούς ανάκτησης βασίζεται στην επέκταση των υγρών στον ταμιευτήρα και μπορεί να εκτιμηθεί καλύτερα λαμβάνοντας υπόψη τον ορισμό της ισοθερμικής συμπιεστότητας.

$$c = - \frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial p} \Big|_T \quad (1.11)$$

Η ισόθερμη συμπιεστότητα εφαρμόζεται συνήθως στην πλειοψηφία των υπολογισμών της μηχανικής των ταμιευτήρων, καθώς θεωρείται λογικό πως κατά την παραγωγή των υγρών απομακρύνεται η θερμότητα από τον ταμιευτήρα. Η διάδοση της θερμότητας πραγματοποιείται από την οροφή και τη βάση του πετρώματος, τα οποία θεωρούνται ότι λειτουργούν ως πηγές θερμότητας απεριόριστης έκτασης. Έτσι αντικαθιστούν αμέσως αυτή τη θερμότητα με αγωγιμότητα, μέχρις ότου η θερμοκρασία του ταμιευτήρα να παραμένει σταθερή. Φυσικά, όταν αναφέρεται η συμπιεστότητα ερμηνεύεται πάντα ως ισοθερμική συμπιεστότητα.

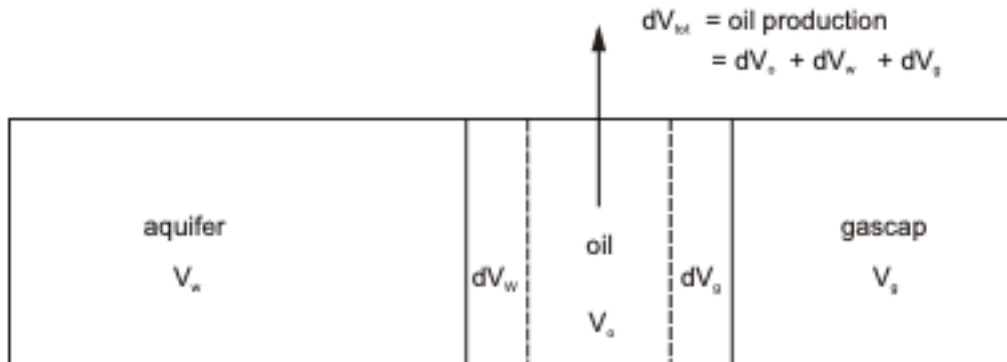
Η ύπαρξη αρνητικού σημείου που απαιτείται στην εξίσωση 1.11, είναι επειδή η συμπιεστότητα ορίζεται ως ένας θετικός αριθμός, ενώ η διαφορά, $\partial V / \partial p$, είναι αρνητική, αφού τα υγρά αναπτύσσονται όταν μειώνεται η περιοριστική πίεση τους. Όταν όμως χρησιμοποιείται μεμονωμένα ο ορισμός της συμπιεστότητας για την περιγραφή της μείωσης του ταμιευτήρα, είναι πιο ενδεικτικό να εκφράζεται με τη μορφή,

$$dV = cV\Delta p \quad (1.12)$$

όπου dV είναι μια επέκταση και Δp μια πτώση πίεσης, και τα δύο είναι θετικά. Αυτή είναι η πιο βασική εξίσωση που αποτελεί τη βάση όλων των μορφών του κύριου μηχανισμού ανάκτησης. Στον ταμιευτήρα, εάν Δp λαμβάνεται ως πτώση πίεσης από

την αρχική σε κάποια χαμηλότερη πίεση, $P_i - P$, τότε η dV θα είναι η αντίστοιχη αύξηση υγρών, η οποία εκδηλώνεται ως παραγωγή.^[4]

Η ικανότητα κατασκευής ενός υψηλού πρωτεύοντος συντελεστή ανάκτησης, με τη χρήση της φυσικής ενέργειας δεξαμενής, είναι να εξασφαλιστεί ότι το dV , που είναι η παραγωγή, είναι το πιο εμπορικά πολύτιμο υγρό στη δεξαμενή, δηλαδή το πετρέλαιο. Αυτό φαίνεται στην εικόνα 26.



Εικόνα 26. Πρωταρχική ανάκτηση πετρελαίου που προκύπτει από την διεύρυνση του πετρελαίου, του νερού και του αερίου.^[4]

Το διάγραμμα απεικονίζει το γεγονός ότι για να παραχθεί ένας ταμιευτήρας πετρελαίου, θα πρέπει να πραγματοποιηθούν διεισδύσεις στη ζώνη πετρελαίου. Εάν ο ταμιευτήρας έρχεται σε επαφή με ένα φράγμα αερίου και υδροφορέα, η παραγωγή πετρελαίου λόγω ομοιόμορφης πτώσης πίεσης, Δp , σε ολόκληρο το σύστημα, θα έχει συστατικά λόγω της ξεχωριστής διαστολής του αερίου πετρελαίου και του νερού, έτσι

$$dV_{TOT} = \text{Oil Production} = dV_O + dV_W + dV_g$$

όπου η ισορροπία εκφράζεται σε όγκους ρευστών σε συνθήκες ταμιευτήρα. Εφαρμόζοντας την εξίσωση (1.12), μπορεί να εκφραστεί ως

$$dV_{TOT} = c_o V_o \Delta p + c_w V_w \Delta p + c_g V_g \Delta p$$

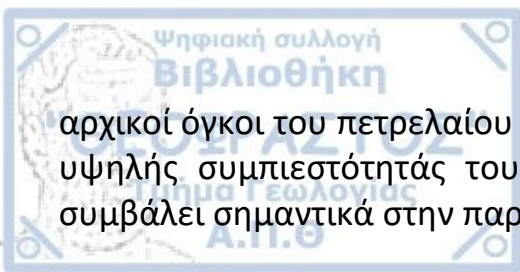
Επίσης, λαμβάνοντας υπόψη τα ακόλουθα στοιχεία ως τυπικά για τις συμπιέσεις των τριών συστατικών σε πίεση 2000 psia:

$$c_o = 15 \times 10^{-6} / \text{psi}$$

$$c_w = 3 \times 10^{-6} / \text{psi}$$

$$c_g = 500 \times 10^{-6} / \text{psi}$$

είναι προφανές ότι η συμβολή στο dV_{TOT} που παρέχεται από την επέκταση του πετρελαίου και του νερού θα είναι σημαντική μόνο εάν και οι δύο V_o και V_w , οι



αρχικοί όγκοι του πετρελαίου και του νερού, είναι μεγάλοι. Αντίθετα, λόγω της πολύ υψηλής συμπίεσής του, ακόμη και ένας σχετικά μικρός όγκος αερίου θα συμβάλει σημαντικά στην παραγωγή πετρελαίου. ^[4]

2.2.5 Ογκομετρική μηχανική ταμιευτήρων αερίου

Η ογκομετρική μηχανική των ταμιευτήρων αερίου θα χρησιμοποιηθεί για να καταδειχθεί ο τρόπος με τον οποίο μπορεί να καθοριστεί ένας συντελεστής ανάκτησης και να επιστραφεί μια χρονική κλίμακα στην ανάκτηση.

Η απλότητα αυτής της παραμέτρου είναι ότι το αέριο είναι μία από τις λίγες ουσίες των οποίων η κατάσταση, η οποία ορίζεται από την πίεση, τον όγκο και τη θερμοκρασία (PVT), μπορεί να περιγραφεί με μια απλή σχέση που περιλαμβάνει και τις τρεις παραμέτρους. ^[4]

Μια άλλη τέτοια ουσία είναι ο κορεσμένος ατμός, αλλά για παράδειγμα για το πετρέλαιο που περιέχει διαλυμένο αέριο δεν υπάρχει τέτοια σχέση και οι παράμετροι PVT πρέπει να προέρχονται εμπειρικά και να εξυπηρετούν τον σκοπό του προσδιορισμού της κατάστασης της ανάμειξης.

Η εξίσωση της κατάστασης για ένα ιδανικό αέριο, δηλαδή ένα στο οποίο οι διαμοριακές έλξεις και ο όγκος που καταλαμβάνουν τα μόρια είναι τόσο αμελητέα, είναι

$$pV = nRT \quad (1.13)$$

όπου,

p = η πίεση (psia)

V = ο όγκος (cu.ft)

T = απόλυτη θερμοκρασία - βαθμοί Rankine ($^{\circ}R=460+^{\circ}F$)

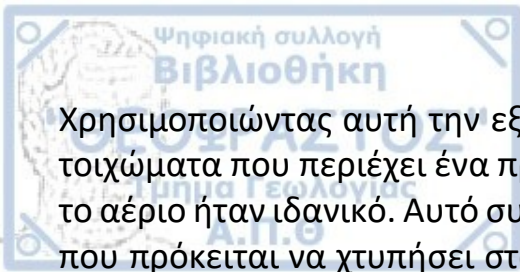
n = ο αριθμός των γραμμομορίων, όπου ένα γραμμομόριο είναι το μοριακό βάρος του αερίου που εκφράζεται σε λίβρες.

R = γενική σταθερά αερίου η οποία, για τις παραπάνω μονάδες, έχει την τιμή 10.732 psia.cu.ft / lb. mole $^{\circ}R$.

Αυτή η εξίσωση προκύπτει από τις συνδυασμένες προσπάθειες των Boyle, Charles, Avogadro και Gay Lussac και εφαρμόζεται μόνο σε πιέσεις κοντά στην ατμοσφαιρική, για τις οποίες εξήχθη πειραματικά και στην οποία τα αέρια συμπεριφέρονται ως ιδανικά.

Ωστόσο, έχουν γίνει πολλές προσπάθειες για να ληφθούν υπόψη οι αποκλίσεις ενός πραγματικού αερίου, από την ιδανική εξίσωση αερίου της κατάστασης, κάτω από ακραίες συνθήκες. Ένα από αυτά που αποτελεί τα πιο γνωστά είναι η εξίσωση του van der Waals, η οποία, για ένα lb.mole ενός αερίου, μπορεί να εκφραστεί ως

$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right) (V-b) = RT \quad (1.14)$$



Χρησιμοποιώντας αυτή την εξίσωση υποστηρίζεται ότι η πίεση p , που μετράται στα τοιχώματα που περιέχει ένα πραγματικό αέριο, είναι χαμηλότερη από ότι θα ήταν αν το αέριο ήταν ιδανικό. Αυτό συμβαίνει επειδή η ταχύτητα κίνησης ενός μορίου αερίου που πρόκειται να χτυπήσει στα τοιχώματα μειώνεται από τις διαμοριακές έλξεις και κατά συνέπεια μειώνεται η πίεση. Σημαντικό είναι να τονισθεί πως η πίεση είναι ανάλογη με το ρυθμό μεταβολής της ορμής. Για να αλλάξει αυτό, ο όρος a/V^2 πρέπει να προστεθεί στην παρατηρούμενη πίεση, όπου το a είναι μία σταθερά ανάλογα με τη φύση του αερίου. Ομοίως ο όγκος V , μετράται υποθέτοντας ότι τα μόρια καταλαμβάνουν αμελητέο χώρο, πρέπει να μειωθεί για ένα πραγματικό αέριο από τον συντελεστή b , ο οποίος εξαρτάται και πάλι από τη φύση του αερίου. ^[4]

Το κύριο μειονέκτημα στην προσπάθεια χρήσης της εξίσωσης 1.14 για να περιγράψουμε τη συμπεριφορά των πραγματικών αερίων που συναντώνται στους ταμιευτήρες είναι ότι η μέγιστη πίεση για την οποία εφαρμόζεται η εξίσωση είναι ακόμα πολύ κάτω από το κανονικό εύρος των πιέσεων των ταμιευτήρων.

Προήλθαν πιο πρόσφατες και πιο επιτυχημένες εξισώσεις (equations of state) όπως για παράδειγμα οι εξισώσεις Beattie-Bridgeman και Benedict-Webb-Rubin, όμως η εξίσωση που χρησιμοποιείται πιο διαδεδομένα από τη βιομηχανία είναι:

$$pV = ZnRT \quad (1.15)$$

στην οποία οι μονάδες είναι οι ίδιες με την εξίσωση 1.13 και Z , η οποία είναι χωρίς διαστάσεις και ονομάζεται συντελεστής Z .

Με την έκφραση της εξίσωσης ως

$$\left(\frac{p}{Z}\right) V = nRT$$

ο συντελεστής Z μπορεί να ερμηνευτεί ως ένας όρος με τον οποίο η πίεση πρέπει να διορθωθεί για να ληφθεί υπόψη η απόκλιση από την ιδανική εξίσωση αερίων. ^[4]

Ο συντελεστής Z είναι συνάρτηση τόσο της πίεσης όσο και της απόλυτης θερμοκρασίας, αλλά, για λόγους της μηχανικής του ταμιευτήρα το κύριο ενδιαφέρον έγκειται στον προσδιορισμό του Z , ως συνάρτηση της πίεσης, σε σταθερή θερμοκρασία ταμιευτήρα. Η σχέση $Z(p)$ που λαμβάνεται είναι επομένως κατάλληλη για την περιγραφή της ισοθερμικής εξάντλησης του ταμιευτήρα και υπάρχουν τρεις τρόποι προσδιορισμού αυτής της σχέσης και είναι:

- α) Πειραματικός προσδιορισμός
- β) Ο συσχετισμός του παράγοντα Z του Standing και του Katz
- γ) Άμεσος υπολογισμός των συντελεστών Z .

2.2.6 Υπόλοιπο υλικό αερίου : Παράγοντας ανάκτησης

Η εξίσωση του ισοζυγίου υλικών, για οποιοδήποτε σύστημα υδρογονανθράκων, είναι απλώς ένα ισοζύγιο όγκου το οποίο ισοδυναμεί με τη συνολική παραγωγή της διαφορά μεταξύ του αρχικού όγκου υδρογονανθράκων στον ταμιευτήρα και του τρέχοντος όγκου. Στη μηχανική ταμιευτήρων αερίου η εξίσωση είναι απλή και θα ληφθεί υπόψη για τις ξεχωριστές περιπτώσεις στις οποίες δεν υπάρχει εισροή νερού στη δεξαμενή καθώς και όταν υπάρχει σημαντικός βαθμός εισροής.^[4]

α) Ταμιευτήρες ογκομετρικής εξάντλησης

Ο όρος ογκομετρική εξάντληση, ή απλή εξάντληση, που εφαρμόζεται στην απόδοση ενός ταμιευτήρα σημαίνει ότι καθώς η πίεση μειώνεται λόγω της παραγωγής, υπάρχει μια ασήμαντη ποσότητα εισροής νερού στον ταμιευτήρα από τον παρακείμενο υδροφόρο ορίζοντα. Αυτό, με τη σειρά του, υποδηλώνει ότι ο υδροφορέας πρέπει να είναι μικρός. Έτσι ο όγκος του ταμιευτήρα που καταλαμβάνεται από τους υδρογονάνθρακες (HCPV) δεν θα μειωθεί κατά τη διάρκεια της εξάντλησης. Μία έκφραση για τον όγκο των πόρων υδρογονάνθρακα μπορεί να ληφθεί από την εξίσωση 1.17 ως

$$\text{HCPV} = V_{\phi} (1 - S_{wc}) = G/E_i$$

Όπου,

G = το αρχικό αέριο στη θέση του εκφρασμένο σε τυπικές συνθήκες.

Η ισορροπία των υλικών, που εκφράζεται επίσης σε τυπικές συνθήκες, για δεδομένο όγκο παραγωγής G_p και συνεπώς η πτώση της μέσης πίεσης δεξαμενής $\Delta p = p_i - p$ είναι τότε

$$\text{Production (sc)} = \text{GIIP (sc)} - \text{Unproduced Gas (sc)}$$

$$G_p = G - (\text{HCPV})E \quad (1.18)$$

$$G_p = G - \frac{G}{E} E$$

που μπορεί να εκφραστεί ως

$$G_p/G = 1 - (E / E_i). \quad (1.19)$$

Ή χρησιμοποιώντας την εξίσωση 1.16, εκφράζεται ως

$$(p/Z) = (p_i/Z_i)(1 - (G_p/G)) \quad (1.20)$$

Ο λόγος G_p/G είναι η ανάκτηση κλασματικού αερίου σε οποιοδήποτε στάδιο κατά τη διάρκεια της εξάντλησης και, εάν ο συντελεστής διαστολής αερίου E στην εξίσωση 1.19, αξιολογείται στην προτεινόμενη πίεση εγκατάλειψης, τότε η αντίστοιχη τιμή του G_p/G είναι ο συντελεστής ανάκτησης αερίου.

Προτού πραγματοποιηθεί η περιγραφή του πώς χρησιμοποιείται στην πράξη η εξίσωση ισορροπίας υλικού, αξίζει να επανεξετασθεί λεπτομερώς η ισορροπία που εκφράζεται από την εξίσωση 1.18. Τυπικά, στην εξίσωση αυτή, η υπόθεση είναι ότι επειδή η εισροή νερού είναι αμελητέα τότε ο όγκος πόρων των υδρογονανθράκων παραμένει σταθερός κατά τη διάρκεια της εξάντλησης. Αυτό, ωστόσο, παραμελεί δύο φυσικά φαινόμενα που σχετίζονται με την πτώση της πίεσης. Πρώτον, το συμφυσές κορεσμένο νερό στον ταμιευτήρα θα διογκωθεί και δεύτερον, καθώς η πίεση του αερίου (ρευστού) μειώνεται, η πίεση κόκκων αυξάνεται σύμφωνα με την εξίσωση 1.4.
[4]

Ως αποτέλεσμα των τελευταίων, τα μόρια των πετρωμάτων θα συμπυκνωθούν περισσότερο και αυτό θα δώσει ως αποτέλεσμα τη μείωση του όγκου των πόρων. Αυτά τα δύο αποτελέσματα μπορούν να συνδυαστούν για να δώσουν τη συνολική μεταβολή στον όγκο των πόρων των υδρογονανθράκων ως

$$d(HCPV) = -dV_w + dV_f \quad (1.21)$$

όπου V_w και V_f αντιπροσωπεύουν τον αρχικό όγκο του συμφυσούς κορεσμένου νερού και τον όγκο των πόρων (PV), αντίστοιχα. Το αρνητικό πρόσημο είναι απαραίτητο επειδή μια επέκταση του συμφυσούς κορεσμένου νερού οδηγεί σε μείωση του HCPV. Αυτές οι αλλαγές όγκου μπορούν να εκφραστούν, χρησιμοποιώντας εξίσωση 1.11, από την άποψη της συμπιεστότητας του νερού και του πόρου, όπου ο τελευταίος ορίζεται ως

$$c_f = -(1/V_f) (\partial V_f / \partial (GP))$$

όπου GP είναι η πίεση κόκκων που σχετίζεται με την πίεση ρευστού από

$$d(FP) = -d(GP) \quad (1.4)$$

επομένως,

$$c_f = -(1/V_f) (\partial V_f / \partial (FP)) = (1/V_f) (\partial V_f / \partial p) \quad (1.22)$$

ή, ως μείωση στον όγκο των πόρων υδρογονανθράκων ως

$$d(HCPV) = -(c_w V_w + c_f V_f) \Delta p \quad (1.23)$$

όπου $\Delta p = p_i - p$, η πτώση της πίεσης του ρευστού (αέριο). Τέλος, εκφράζοντας τον πόρο και τον όγκο του συμφυσούς κορεσμένου νερού ως

$$V_f = PV = HCPV / (1 - S_{wc}) = G / E_i(1 - S_{wc})$$

$$V_w = PV \times S_{wc} = G S_{wc} / E_i(1 - S_{wc})$$

η μείωση του όγκου πόρων υδρογονανθράκων, (εξίσωση 1.23), μπορεί να συμπεριληφθεί στην εξίσωση 1.18), για να δώσει

$$G_p/G = 1 - (1 - (c_w S_{wc} + c_f) \Delta p) / (1 - S_{wc}) \cdot E / E_i \quad (1.24)$$

ως τροποποιημένο ισοζύγιο υλικών. Εισαγωγή των τυπικών τιμών $c_w = 3 \times 10^{-6}/\text{psi}$, $c_f = 10 \times 10^{-6}/\text{psi}$ και $S_{wc} = 0.2$ σε αυτή την εξίσωση και λαμβάνοντας υπόψη μια μεγάλη πτώση πίεσης $\Delta p = 1000 \text{ psi}$. Ο όρος σε παρένθεση γίνεται

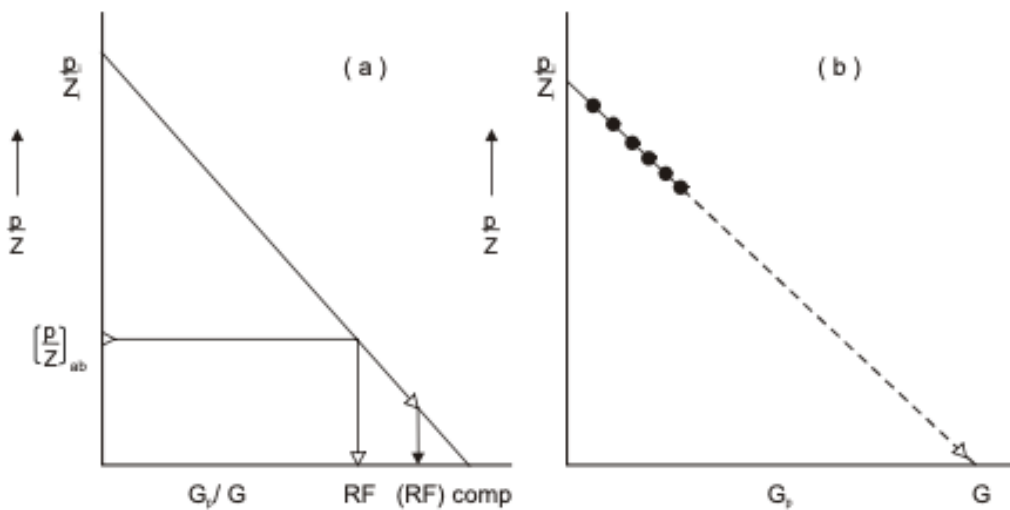
$$1 - (3 \times 0.2 + 10) / 0.8 \times 10^{-6} \times 10^3 = 1 - 0.013$$

Ουσιαστικά, η συμπερίληψη του όρου που αντιπροσωπεύει τη μείωση του όγκου πόρων υδρογονανθράκων, λόγω της επέκτασης του συμφυούς νερού και της μείωσης του όγκου πόρων, μεταβάλλει μόνο το ισοζύγιο υλικών κατά 1,3% και επομένως συχνά παραμελείτε. Ο λόγος της παράλειψής του οφείλεται στο γεγονός ότι η συμπίεση του νερού και του πόρου είναι συνήθως, και όχι πάντα, ασήμαντη σε σχέση με τη συμπίεσιμότητα του αερίου. Ωστόσο, η συμπίεσιμότητα των πόρων μπορεί μερικές φορές να είναι πολύ μεγάλη σε ρηχούς μη στερεοποιημένους ταμιευτήρες και οι τιμές που υπερβαίνουν τα $100 \times 10^{-6} / \text{psi}$ έχουν μετρηθεί, για παράδειγμα, στα πεδία της ακτής Bolivar στη Βενεζουέλα. Σε αυτούς τους ταμιευτήρες θα ήταν απαράδεκτο να παραλειφθεί η συμπίεσιμότητα του πόρου από την ισορροπία του αερίου. ^[4]

Σε έναν ταμιευτήρα που περιέχει μόνο υγρό πετρέλαιο χωρίς ελεύθερο αέριο, πρέπει να γίνει πρόβλεψη για τα αποτελέσματα του συμφυούς νερού και της συμπίεσότητας των πόρων στην ισορροπία του υλικού, καθώς αυτές οι συμπίεσότητες έχουν την ίδια τάξη μεγέθους με το ίδιο το υγρό πετρέλαιο.

Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, το ισοζύγιο των υλικών για έναν ταμιευτήρα αερίου τύπου εξαντλήσεως (a depletion type gas reservoir) μπορεί να περιγραφεί επαρκώς με τη χρήση της εξίσωσης 1.20. Αυτή η εξίσωση υποδεικνύει ότι υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ p/Z και κλασματικής ανάκτησης G_p/G , ή της αθροιστικής παραγωγής G_p , όπως φαίνεται στην εικόνα 27 (α) και (β), αντίστοιχα. Αυτά τα διαγράμματα απεικονίζουν μία από τις βασικές τεχνικές, στη μηχανική των ταμιευτήρων, που είναι η μείωση των εξισώσεων ανεξάρτητα από το πόσο σύνθετη είναι στην εξίσωση μιας ευθείας γραμμής. Αυτό συμβαίνει για τον απλό λόγο ότι οι γραμμικές λειτουργίες μπορούν εύκολα να προεκβληθούν, ενώ, γενικά, οι μη γραμμικές λειτουργίες δεν μπορούν. Συνεπώς, μια γραφική παράσταση του p έναντι

G_p / G ή G_p , θα έχει μικρότερη χρησιμότητα από τις παραστάσεις που φαίνονται στην εικόνα 27, καθώς και οι δύο θα ήταν μη γραμμικές. ^[4]



Εικόνα 27. Γραφικές απεικονίσεις του ισοζυγίου των υλικών για έναν ογκομετρικό ταμιευτήρα εξαντλήσεως αερίου. (εξίσωση 1.20) ^[4]

Η εικόνα 27 (α) δείχνει πώς μπορεί να προσδιοριστεί ο συντελεστής ανάκτησης (RF) εισάγοντας την τεταγμένη στην τιμή του $(\frac{p}{Z})_{ab}$ που αντιστοιχεί στην πίεση εγκατάλειψης. Η πίεση αυτή υπαγορεύεται σε μεγάλο βαθμό από τη φύση της σύμβασης αερίου, η οποία συνήθως καθορίζει ότι το αέριο πρέπει να πωλείται με κάποιο σταθερό ρυθμό και σταθερή επιφανειακή πίεση, η τελευταία είναι η πίεση στο σημείο παράδοσης, ο αγωγός αερίου. Μόλις η πίεση στον ταμιευτήρα πέσει στο επίπεδο το οποίο είναι μικρότερο από το άθροισμα των σταγόνων της πίεσης που απαιτούνται για τη μεταφορά του αερίου από τον ταμιευτήρα στον αγωγό, τότε ο ρυθμός παραγωγής σε επίπεδες τιμές (plateau) δεν μπορεί πλέον να διατηρηθεί. Αυτές οι πτώσεις της πίεσης περιλαμβάνουν την άντληση πίεσης σε κάθε ταμιευτήρα, η οποία είναι η διαφορά μεταξύ της μέσης πίεσης του ταμιευτήρα και της μέσης πίεσης που αναπτύσσεται στη ροή στην οπή του πυθμένα, που κάνει το αέριο να ρέει στο φρέαρ της γεώτρησης (wellbore), η πτώση πίεσης που απαιτείται για την κατακόρυφη ροή προς την επιφάνεια και η πτώση της πίεσης στην επεξεργασία και τη μεταφορά του αερίου στο σημείο παράδοσης.

Η εικόνα 27 (β) απεικονίζει επίσης τις σημαντικές τεχνικές στη μηχανική των ταμιευτήρων και πιο συγκεκριμένα, "αντιστοίχιση ιστορικού" και "πρόβλεψη". Τα κυκλικά σημεία στο διάγραμμα, τα οποία συνδέονται με την συμπαγή γραμμή, αντιπροσωπεύουν το ιστορικό της δεξαμενής. Δηλαδή, για τις καταγεγραμμένες τιμές της αθροιστικής παραγωγής αερίου, μετρήθηκαν οι πιέσεις στους ταμιευτήρες παραγωγής και προσδιορίστηκε μια μέση πίεση ταμιευτήρα. ^[4]

Δεδομένου ότι οι τιμές των σχέσεων p/Z έναντι G_p σχηματίζουν μια ευθεία γραμμή, ο μηχανικός μπορεί να είναι διατεθειμένος να πιστεύει ότι ο ταμιευτήρας είναι ένας τύπος εξάντλησης και να προχωρήσει στην εξαγωγή της γραμμικής τάσης για την πρόβλεψη της μελλοντικής απόδοσης. Η πρόβλεψη, στην προκειμένη περίπτωση, είναι ο τρόπος με τον οποίο η πίεση μειώνεται ως συνάρτηση της παραγωγής και, εάν η εμπορεύσιμη τιμή είναι σταθερή χρονικά. Συγκεκριμένα, η παρεκβολή στην τετμημένη θα έδινε την αξία του GIP που μπορεί να ελεγχθεί σε σχέση με την ογκομετρική εκτίμηση που αποκτήθηκε. Αυτή η τεχνική αντιστοίχισης του παρατηρούμενου ιστορικού πίεσης παραγωγής με την κατασκευή ενός κατάλληλου μαθηματικού μοντέλου, αν και στην προκειμένη περίπτωση είναι πολύ απλή (εξίσωση 1.20) και η χρήση του μοντέλου για την πρόβλεψη μελλοντικών επιδόσεων είναι αυτή που είναι θεμελιώδους σημασίας για το θέμα της μηχανικής των ταμιευτήρων.

B) Ταμιευτήρες με βάση το υποκείμενο νερό (water drive reservoirs)

Εάν η μείωση της πίεσης του ταμιευτήρα οδηγεί σε επέκταση του παρακείμενου ύδατος του υδροφόρου ορίζοντα και την επακόλουθη εισροή στον ταμιευτήρα, η εξίσωση ισορροπίας υλικού πρέπει στη συνέχεια να τροποποιηθεί ως

$$\text{Production}(sc) = GIP(sc) - \text{Unproduced Gas}(sc) \quad (1.25)$$

$$G_p = G - \left(\frac{G}{E_i} - W_e \right) E$$

όπου, στην περίπτωση αυτή, ο όγκος πόρων του υδρογονάνθρακα στην χαμηλότερη πίεση μειώνεται με την ποσότητα W_e , η οποία είναι η σωρευτική ποσότητα εισροής νερού που προκύπτει από την πτώση πίεσης. Η εξίσωση υποθέτει ότι δεν υπάρχει διαφορά μεταξύ του όγκου νερού της επιφάνειας και του ταμιευτήρα και παραμελεί πάλι τις επιδράσεις του συμφυούς κορεσμένου νερού και της μείωσης του όγκου των πόρων.

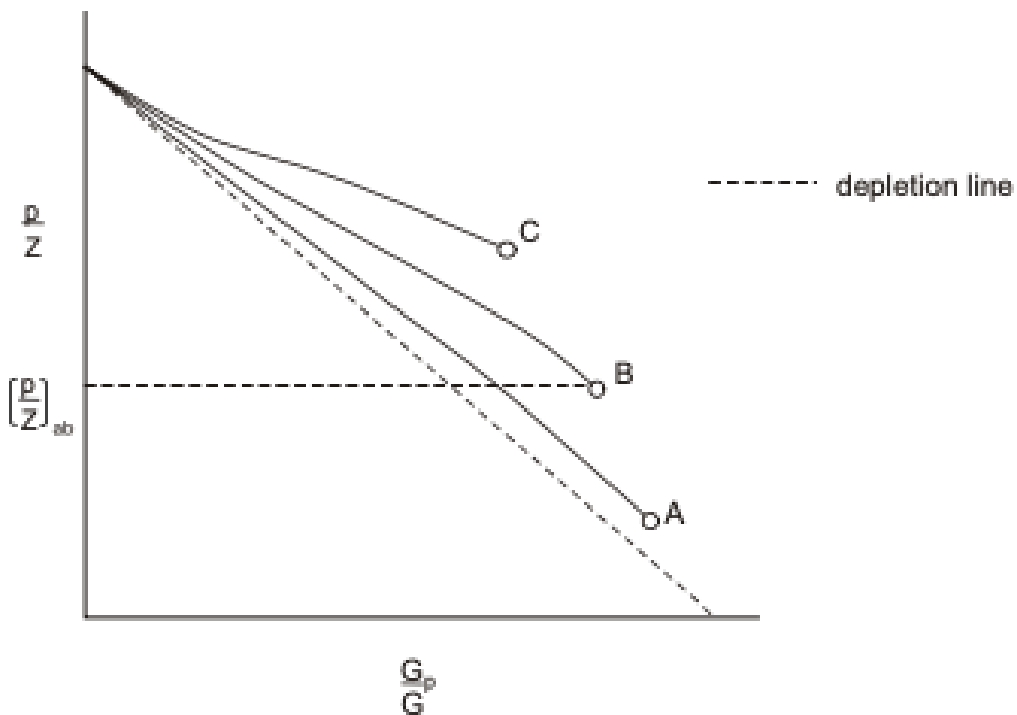
Αν έχει παραχθεί κάποια εισροή νερού, μπορεί να ληφθεί υπόψη η αφαίρεση αυτού του όγκου, W_p , από την εισροή W_e στην δεξιά πλευρά της εξίσωσης. Με κάποιες ελαφρές αλγεβρικές κινήσεις η εξίσωση 1.25 μπορεί να εκφραστεί ως

$$(p/Z) = (p_i/Z_i) \left(1 - (G_p/G) \right) / \left(1 - (E_i W_e) / G \right). \quad (1.26)$$

Όπου $W_e E_i/G$ αντιπροσωπεύει το κλάσμα του αρχικού όγκου πόρων υδρογονανθράκων που έχει υπερχειλίσει με νερό και επομένως είναι πάντοτε λιγότερο από μονάδα (unity). Σε σύγκριση με την ισορροπία του υλικού εξάντλησης, στην εξίσωση (1.20), μπορεί να φανεί ότι η επίδραση της εισροής νερού είναι να διατηρηθεί η πίεση της δεξαμενής σε υψηλότερο επίπεδο για δεδομένη σωρευτική

παραγωγή αερίου. Πλέον η εξίσωση 1.26 είναι μη γραμμική, σε αντίθεση με την εξίσωση 1.20, γεγονός που περιπλέκει τόσο την αντιστοίχιση του ιστορικού όσο και την πρόβλεψη. Τα τυπικά διαγράμματα αυτής της εξίσωσης, για διαφορετικές αντοχές του υδροφόρου ορίζοντα, φαίνονται στην εικόνα 28.

Κατά τη διάρκεια της φάσης αντιστοίχισης ιστορικού, ένα ξεχωριστό τμήμα του μαθηματικού μοντέλου πρέπει να σχεδιάζεται για τον υπολογισμό της σωρευτικής εισροής νερού που αντιστοιχεί σε μια δεδομένη συνολική πτώση πίεσης στη δεξαμενή και αυτό το μέρος του ιστορικού αγώνα περιγράφεται ως "τοποθέτηση υδροφορέα". Για έναν υδροφορέα του οποίου οι διαστάσεις έχουν την ίδια τάξη μεγέθους με τον ίδιο τον ταμιευτήρα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το ακόλουθο απλό μοντέλο



Εικόνα 28. Γραφική απεικόνιση της εξίσωσης του ισοζυγίου του υλικού για έναν ταμιευτήρα με βάση το υποκείμενο νερό, για διάφορες αντοχές του υδροφόρου ορίζοντα. (εξίσωση 1.26)^[4]

$$W_e = cW\Delta p$$

Όπου,

c = η συνολική συμπίεσιτικότητα του υδροφόρου ορίζοντα ($c_w + c_f$)

W = ο συνολικός όγκος νερού, και εξαρτάται κυρίως από τη γεωμετρία του υδροφόρου ορίζοντα

Δp = η πτώση πίεσης στο αρχικό όριο ταμιευτήρα-υδροφόρου ορίζοντα.

Το μοντέλο αυτό υποθέτει ότι, επειδή ο υδροφορέας είναι σχετικά μικρός, μια πτώση πίεσης στον ταμιευτήρα μεταδίδεται στιγμιαία σε όλο το σύστημα ταμιευτήρα-υδροφόρου ορίζοντα. Η ισορροπία υλικού σε μια τέτοια περίπτωση θα είναι όπως

φαίνεται από το γράφημα Α στην εικόνα 28 η οποία δεν διαφέρει σημαντικά από τη γραμμή εξάντλησης.

Για την παροχή της απόκρισης πίεσης που φαίνεται στις γραμμές Β και Γ, ο όγκος του υδροφόρου ορίζοντα πρέπει να είναι σημαντικά μεγαλύτερος από τον όγκο του ταμιευτήρα και είναι απαράδεκτη η στιγμιαία υπόθεση της μετάδοσης πίεσης σε όλο το σύστημα. Τώρα θα υπάρξει μια χρονική υστέρηση μεταξύ μιας διαταραχής της πίεσης στον ταμιευτήρα και της πλήρους απόκρισης του υδροφορέα. Η κατασκευή ενός μοντέλου υδροφόρου ορίζοντα, συμπεριλαμβανομένης αυτής της εξάρτησης από το χρόνο, είναι πολύ περίπλοκη.^[4]

Μία από τις ατυχείς πτυχές της καθυστέρησης στην απόκριση των υδροφόρων είναι ότι, αρχικά, όλα τα material balance plots στην εικόνα 28 φαίνεται να είναι γραμμικά και εάν δεν υπάρχει επαρκές ιστορικό παραγωγής και πίεσης για να αποδειχθεί η απόκλιση από τη γραμμικότητα μπορεί κανείς να μπει στον πειρασμό να εξάγει τις πρώιμες τάσεις, υποθέτοντας ένα ταμιευτήρα τύπου εξάντλησης, ο οποίος θα είχε ως αποτέλεσμα τον προσδιορισμό πολύ μεγάλης τιμής του GIIP. Σε μια τέτοια περίπτωση, μια μεγάλη διαφορά μεταξύ αυτού και της ογκομετρικής εκτίμησης του GIIP μπορεί να είναι διαγνωστική για να αποφασιστεί εάν υπάρχει υδροφόρος ορίζοντας ή όχι.

Ακολουθεί επίσης ότι η προσπάθεια να οικοδομηθεί ένα μαθηματικό μοντέλο για την περιγραφή της απόδοσης του ταμιευτήρα με βάση τα ανεπαρκή ιστορικά δεδομένα μπορεί να παράγει εσφαλμένα αποτελέσματα όταν χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της μελλοντικής απόδοσης των ταμιευτήρων.

Εάν υπάρχει διαθέσιμο ιστορικό πίεσης-παραγωγής, είναι δυνατόν να γίνει μια εκτίμηση του GIIP, σε ταμιευτήρα με βάση το υποκείμενο νερό χρησιμοποιώντας την ακόλουθη μέθοδο^{[4],[11]}

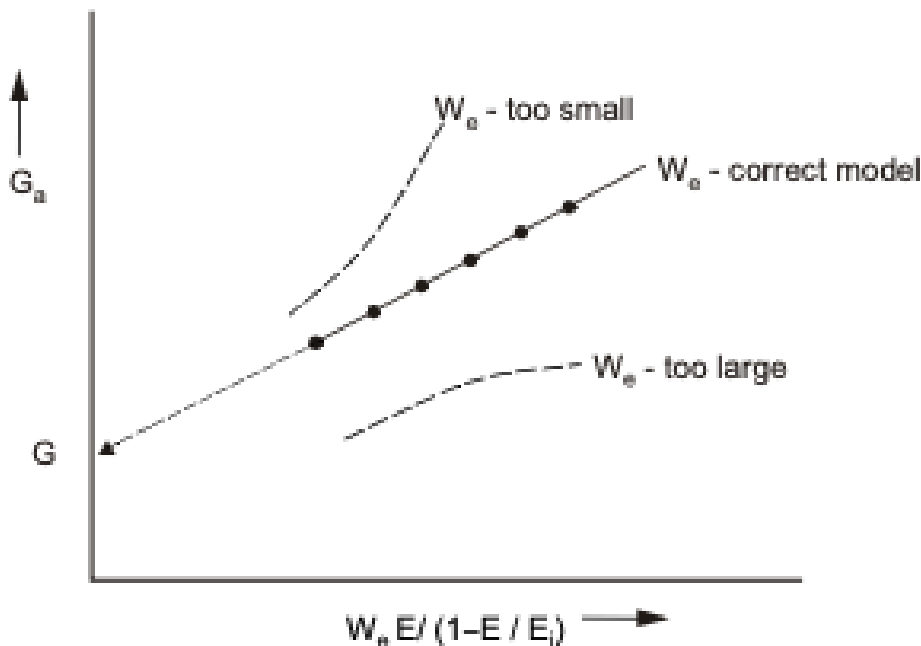
Η ισορροπία του υλικού εξάντλησης, εξίσωση (1.19), επιλύεται αρχικά για να προσδιοριστεί το φαινόμενο αέριο στη θέση του ως

$$G_a = G_p / (1 - E / E_i) \quad 1.27$$

Εάν υπάρχει ενεργό υποκείμενο νερό (active water drive), η τιμή G_a που υπολογίζεται χρησιμοποιώντας αυτή την εξίσωση, για γνωστές τιμές των E και G_p , δεν θα είναι μοναδική. Οι διαδοχικές υπολογιζόμενες τιμές του G_a θα αυξηθούν καθώς η απόκλιση του p / Z πάνω από τη γραμμή ισοζυγίου του υλικού εξάντλησης αυξάνεται λόγω της συντήρησης της πίεσης που παρέχεται από τον υδροφόρο ορίζοντα. Η σωστή τιμή του αερίου στη θέση του, ωστόσο, μπορεί να ληφθεί από την εξίσωση (1.25) ως

$$G = (G_p - W_e E) / (1 - E / E_i) \quad 1.28$$

όπου W_e είναι η σωρευτική εισροή ύδατος που υπολογίζεται, χρησιμοποιώντας κάποια μορφή μαθηματικού μοντέλου υδροφόρου ορίζοντα, τη στιγμή κατά την οποία μετρήθηκαν τόσο το E όσο και το G_p .



Εικόνα 29. Προσδιορισμός του GIIP σε ένα ταμιευτήρα αερίου με βάση το υποκείμενο νερό. Οι καμπύλες και οι διακεκομμένες γραμμές προκύπτουν από επιλογή ενός λανθασμένου μοντέλου υδροφόρου ορίζοντα εξαρτώμενο από τον χρόνο. ^[4]

Αφαιρώντας την εξίσωση 1.28 από την εξίσωση 1.27 προκύπτει

$$G_a = G + (W_e E) / (1 - E / E_i) \quad 1.29$$

Αν οι υπολογισθείσες τιμές των G_a , της εξίσωσης (1.27), σχεδιάζονται ως συνάρτηση του $W_e E / (1 - E / E_i)$ το αποτέλεσμα θα πρέπει να είναι μια ευθεία γραμμή, υπό την προϋπόθεση ότι έχει επιλεγεί το σωστό μοντέλο υδροφόρου ορίζοντα, όπως φαίνεται στην εικόνα 29 και η σωστή τιμή του G μπορεί να προσδιοριστεί με γραμμική παρέκταση στην τεταγμένη. Η επιλογή του σωστού μοντέλου υδροφόρου ορίζοντα (τοποθέτηση υδροφόρου ορίζοντα) είναι μια δοκιμή και ένα σφάλμα που συνεχίζεται μέχρι να επιτευχθεί μια ευθεία γραμμή. ^[4]

Ένα άλλο ενδιαφέρον χαρακτηριστικό που παρουσιάζεται στην εικόνα 28 είναι ότι η μέγιστη δυνατή ανάκτηση αερίου, η οποία φαίνεται από τα κυκλωμένα σημεία, εξαρτάται από το βαθμό διατήρησης της πίεσης που προσφέρεται από τον υδροφόρο ορίζοντα, και είναι μικρότεροι για τους πιο ανταποκρίσιμους υδροφόρους ορίζοντες (responsive aquifers). Ο λόγος για αυτό, είναι ότι κατά την μη αναμίξιμη μετατόπιση ενός υγρού από ένα άλλο, δεν μπορεί να αφαιρεθεί όλο το μετατοπισμένο υγρό από το κενό μεταξύ πόρων. ^{[12],[13]}

Έτσι, καθώς το νερό προχωρά στον ταμιευτήρα, υπολειμματικό κορεσμένο αέριο (residual gas saturation) παραμένει παγιδευμένο λίγο πριν το εμπρόσθιο μέρος. Αυτός ο κορεσμός αερίου S_{gr} , είναι μάλλον υψηλός της τάξεως του 30%-50% του όγκου των πόρων και είναι σε μεγάλο βαθμό ανεξάρτητος από την πίεση στην οποία παγιδεύεται το αέριο. ^{[12],[13]} Στην περίπτωση αυτή, εφαρμόζοντας την εξίσωση (1.15), στο αέριο που παγιδεύεται ανά όγκο πόρου πίσω από το εμπρόσθιο υπερχειλισμένο μέρος (behind the flood front), δίνει

$$p/Z S_{gr} = nRT$$

και, δεδομένου ότι το S_{gr} είναι ανεξάρτητο από την πίεση, τότε για ισοθερμική εξάντληση

$$n \propto p/Z$$

που δείχνει ότι μια μεγαλύτερη ποσότητα αερίου παγιδεύεται σε υψηλή πίεση παρά σε χαμηλή.

Η τελική ανάκτηση φυσικού αερίου εξαρτάται τόσο από τη φύση του υδροφόρου ορίζοντα όσο και από την πίεση εγκατάλειψης. Για την τιμή του $(p/Z)_{ab}$ που φαίνεται στην εικόνα 28, ο υδροφορέας που δίνει την απόκριση πίεσης που αντιστοιχεί στη γραμμή B είναι ο πλέον ευνοϊκός. Ενώ η επιλογή της πίεσης εγκατάλειψης (abandonment pressure) είναι υπό τον έλεγχο του μηχανικού, η επιλογή του υδροφορέα, δυστυχώς, δεν είναι. Συνεπώς, είναι εξαιρετικά σημαντικό να πραγματοποιηθεί μέτρηση με ακρίβεια τόσο στις πιέσεις όσο και στην παραγωγή αερίου ώστε να δημιουργηθεί ένα αξιόπιστο μοντέλο υδροφόρου ορίζοντα το οποίο με τη σειρά του μπορεί να χρησιμοποιηθεί για προβλέψεις επιδόσεων. ^[4]

Μια από τις πιο περιπετειώδεις πτυχές της μηχανικής των ταμιευτήρων αερίου είναι ότι οι συμβάσεις πώλησης αερίου, καθορίζοντας τον ρυθμό αγοράς και την πίεση του αγωγού, συμφωνούνται συνήθως μεταξύ του χειριστή και του αγοραστή πολύ νωρίς στη ζωή του πεδίου, όταν το ποσό των δεδομένων ιστορικού είναι ελάχιστο. Στη συνέχεια ο φορέας εκμετάλλευσης αναγκάζεται να λάβει σημαντικές αποφάσεις για το πόσο καιρό θα είναι σε θέση να ανταποκριθεί στη ζήτηση της αγοράς, με βάση τα μάλλον περιορισμένα δεδομένα. Οι μελέτες ευαισθησίας διεξάγονται συνήθως σε αυτό το στάδιο, χρησιμοποιώντας τις απλές εξισώσεις ισοζυγίου υλικών και μεταβάλλοντας τις κύριες παραμέτρους, δηλαδή

- το GIIP
- το μοντέλο υδροφόρου ορίζοντα, με βάση τις πιθανές γεωμετρικές διαμορφώσεις του υδροφόρου ορίζοντα
- πίεση εγκατάλειψης, αν θα εφαρμοστεί συμπίεση επιφάνειας ή όχι
- τον αριθμό των ταμιευτήρων παραγωγής και τον μηχανικό σχεδιασμό τους.

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Προηγουμένως, τονίστηκε η σημασία της ανάλυσης ΡVΤ για τη συσχέτιση παρατηρούμενων όγκων παραγωγής αερίου στην επιφάνεια με την αντίστοιχη υπόγεια απόσυρση. Για το αέριο αυτή η σχέση θα μπορούσε να επιτευχθεί απλώς με τον προσδιορισμό του παράγοντα Ζ ή ενός φάσματος και τη χρήση του στην εξίσωση της κατάστασης. Η βασική ανάλυση ΡVΤ που απαιτείται για τη συσχέτιση της επιφανειακής παραγωγής με την υπόγεια απόσυρση για ένα ταμιευτήρα πετρελαίου είναι αναγκαστικά πιο πολύπλοκη λόγω της παρουσίας, κάτω από την πίεση του σημείου φυσαλίδων (bubble point pressure), τόσο υγρού πετρελαίου όσο και ελεύθερης φάσης αερίου στον ταμιευτήρα.

Ουσιαστικά, σε αυτό το κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί ο καθορισμός των τριών κύριων παραμέτρων που απαιτούνται για τον συσχετισμό της επιφάνειας με τους όγκους των ταμιευτήρων, για έναν ταμιευτήρα πετρελαίου. Στη συνέχεια περιγράφεται πώς αυτές οι παράμετροι μπορούν να προσδιοριστούν στο εργαστήριο με ελεγχόμενα πειράματα που εκτελούνται σε δείγματα του αργού πετρελαίου. Το θέμα προσεγγίζεται από μηχανιστική άποψη, αναγνωρίζοντας απλώς ότι οι παράμετροι ΡVΤ μπορούν να προσδιοριστούν ως λειτουργίες πίεσης με συνήθη εργαστηριακή ανάλυση. Δεν περιγράφονται οι περίπλοκες θερμοδυναμικές διεργασίες που εμπριέχονται στον προσδιορισμό αυτών των παραμέτρων.

Τέλος, αποδίδεται μεγάλη προσοχή στη μετατροπή των δεδομένων ΡVΤ, όπως αυτά παρουσιάζονται από το εργαστήριο, στη μορφή που απαιτείται στην ύπαιθρο. Ο πρώτος είναι ένα απόλυτο σύνολο μετρήσεων, ενώ οι τελευταίοι εξαρτώνται από τον τρόπο διαχωρισμού του αερίου και του πετρελαίου από την επιφάνεια.

3.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΒΑΣΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΡVΤ

Η σχέση πίεσης-όγκου-θερμοκρασίας για ένα πραγματικό αέριο μπορεί να οριστεί με μοναδικό τρόπο από την απλή εξίσωση της κατάστασης

$$pV = ZnRT \quad (1.15)$$

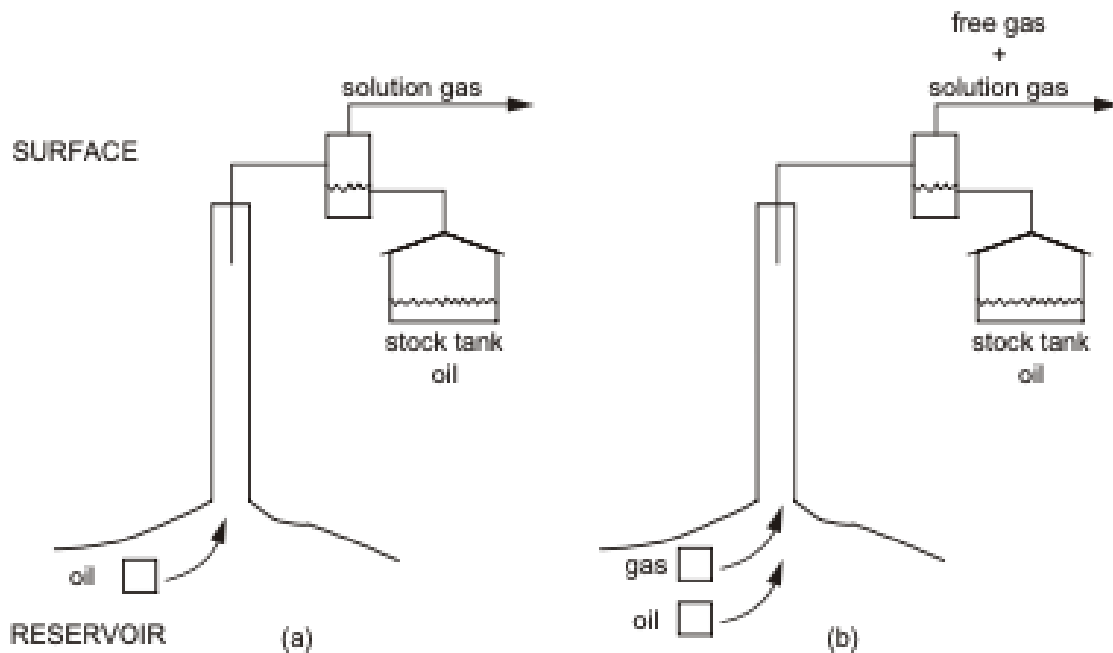
στην οποία ο συντελεστής Ζ αντιπροσωπεύει την απόκλιση από την ιδανική συμπεριφορά αερίου. Χρησιμοποιώντας αυτή την εξίσωση, είναι σχετικά απλό να προσδιοριστεί η σχέση μεταξύ των επιφανειακών όγκων του αερίου και των όγκων στο δοχείο ως

$$E = (p/p_{sc}) \times (T_{sc}/T) \times (1/Z) = 35.37 p/ZT \quad (scf /rcf) \quad (1.16)$$

Δυστυχώς όμως, δεν υπάρχει τέτοια απλή εξίσωση κατάστασης που θα περιγράφει τις ιδιότητες ΡVΤ του πετρελαίου. Αντιθέτως, υπάρχουν αρκετές ονομαζόμενες

παράμετροι PVT που πρέπει να μετρηθούν με εργαστηριακή ανάλυση δειγμάτων αργού πετρελαίου. Οι παράμετροι μπορούν στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν για να εκφράσουν τη σχέση μεταξύ των επιφανειακών όγκων και των όγκων υδρογονανθράκων που βρίσκονται στον ταμιευτήρα και ισοδυναμούν με την εξίσωση 1.16

Η πολυπλοκότητα των σχετικών επιφανειακών όγκων παραγωγής υδρογονανθράκων στους αντίστοιχους όγκους τους στον ταμιευτήρα μπορεί να εκτιμηθεί λαμβάνοντας υπόψη την εικόνα 30.



Εικόνα 30. Παραγωγή υδρογονανθράκων (α) πάνω από το σημείο πίεσης των φυσαλίδων, (β) κάτω από το σημείο πίεσης των φυσαλίδων.^[4]

Πάνω από το σημείο των φυσαλίδων, υπάρχει μόνο μία φάση στον ταμιευτήρα, το υγρό πετρέλαιο. Αν μία ποσότητα αυτού του μη κορεσμένο πετρελαίου παράγεται στην επιφάνεια, το αέριο θα διαχωριστεί από το πετρέλαιο όπως φαίνεται στην εικόνα 30. Ο δε όγκος του αερίου εξαρτάται από τις συνθήκες στις οποίες πραγματοποιείται ο επιφανειακός διαχωρισμός. Σε αυτήν την περίπτωση, είναι σχετικά εύκολο να συσχετιστούν οι επιφανειακοί όγκοι του πετρελαίου και του αερίου με τους όγκους που βρίσκονται σε συνθήκες ταμιευτήρα, αφού είναι γνωστό ότι όλο το παραγόμενο αέριο πρέπει να έχει διαλυθεί στο πετρέλαιο μέσα στον ταμιευτήρα.

Εάν όμως ο ταμιευτήρας είναι κάτω από το σημείο πίεσης των φυσαλίδων όπως απεικονίζεται στην εικόνα 30 (β), η κατάσταση είναι πιο περίπλοκη. Τώρα υπάρχουν δύο φάσεις υδρογονανθράκων στον ταμιευτήρα, κορεσμένο πετρέλαιο με αέριο (gas saturated oil) και αέριο απελευθερωμένου διαλύματος (liberated solution gas). Κατά την επιφανειακή παραγωγή, το αέριο διαλύματος θα αναπτυχθεί από την πετρελαϊκή

φάση και η συνολική παραγωγή αερίου επιφάνειας θα έχει δύο συστατικά. Το πρώτο είναι το αέριο που ήταν ελεύθερο στον ταμιευτήρα και το δεύτερο είναι το αέριο που απελευθερώθηκε από το πετρέλαιο κατά την διάρκεια της παραγωγής. Αυτά τα ξεχωριστά συστατικά δεν διακρίνονται στην επιφάνεια. Συνεπώς, το πρόβλημα εδώ είναι το πως θα διαιρεθεί η επιφανειακή παρατηρούμενη παραγωγή αερίου σε όγκους απελευθερωμένου και σε όγκους διαλυμένου αερίου στον ταμιευτήρα. ^[4]

Κάτω από το σημείο πίεσης των φυσαλίδων υπάρχει μια επιπρόσθετη επιπλοκή κατά το ότι το αέριο απελευθερωμένου διαλύματος στον ταμιευτήρα κινείται με διαφορετική ταχύτητα από το υγρό πετρέλαιο, όταν και τα δύο υποβάλλονται στην ίδια διαφορά πίεσης. Η ταχύτητα ροής ενός υγρού σε ένα πορώδες μέσο είναι αντιστρόφως ανάλογη προς το ιξώδες ρευστού. Τυπικά, το ιξώδες του αερίου στον ταμιευτήρα είναι περίπου πενήντα φορές μικρότερο από ότι για το υγρό πετρέλαιο και κατά συνέπεια, η ταχύτητα ροής του αερίου είναι πολύ μεγαλύτερη.

Ως αποτέλεσμα, είναι φυσιολογικό, όταν παράγεται από έναν ταμιευτήρα στον οποίον υπάρχει κορεσμός ελεύθερου αερίου (free gas saturation), το αέριο αυτό θα παράγεται σε δυσανάλογες ποσότητες σε σύγκριση με το πετρέλαιο. Ουσιαστικά, ένα βαρέλι πετρελαίου μπορεί να παραχθεί μαζί με έναν όγκο αερίου που υπερβαίνει κατά πολύ τον όγκο που αρχικά διαλύθηκε, ανά βαρέλι πετρελαίου πάνω από την πίεση του σημείου φυσαλίδας. ^[4]

Ο έλεγχος των σχετικών επιφανειακών όγκων παραγωγής προς την υπόγεια απόσυρση επιτυγχάνεται καθορίζοντας τις ακόλουθες τρεις παραμέτρους PVT, οι οποίες μπορούν να μετρηθούν με εργαστηριακά πειράματα που εκτελούνται σε δείγματα των ταμιευτήρων πετρελαίου, συν το αρχικώς διαλυμένο αέριο.

R_s – Ο λόγος διαλύματος (ή διαλυμένου) πετρελαίου εσωτερικής καύσης, ο οποίος είναι ο αριθμός των τυπικών κυβικών ποδών αερίου που θα διαλύονται σε ένα βαρέλι πετρελαίου αποθεματικής δεξαμενής (stock tank barrel) όταν και τα δύο μεταφέρονται στον ταμιευτήρα με την επικρατούσα πίεση και θερμοκρασία του ταμιευτήρα. (μονάδες – scf. gas/stb πετρελαίου).

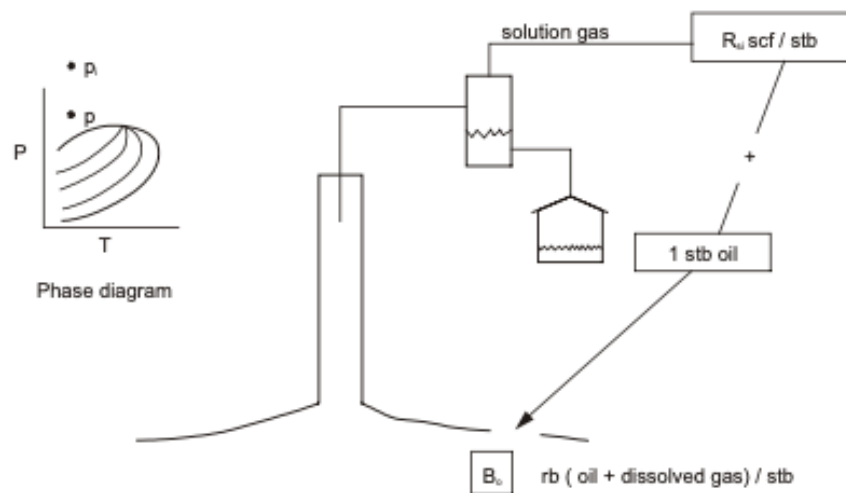
B_o – Ο συντελεστής όγκου του σχηματισμού του πετρελαίου, είναι ο όγκος σε βαρέλια που καταλαμβάνεται στον ταμιευτήρα, στην επικρατούσα πίεση και θερμοκρασία, από ένα βαρέλι πετρελαίου αποθεματικής δεξαμενής, συν το διαλυμένο αέριό του (μονάδες - rb (πετρέλαιο + διαλυμένο αέριο) / stb πετρελαίου)

B_g – Ο συντελεστής όγκου σχηματισμού αερίου, ο οποίος είναι ο όγκος σε βαρέλια που ένας κυβικός πόδας αερίου θα καταλαμβάνει ως ελεύθερο αέριο στον ταμιευτήρα με την επικρατούσα πίεση και θερμοκρασία της δεξαμενής (μονάδες - rb ελεύθερο αέριο / scf αέριο).

Τόσο ο κυβικός πόδας (scf) όσο και το βαρέλι αποθεματικής δεξαμενής (stb) που αναφέρονται στους παραπάνω ορισμούς καθορίζονται σε τυπικές συνθήκες, οι

οποίες εδώ θα λαμβάνονται ως 60°F και μία ατμόσφαιρα ($14,7\text{ psia}$). Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι τα R_s και B_o μετρούνται και τα δύο σε σχέση με ένα βαρέλι πετρελαίου αποθεματικής δεξαμενής, το οποίο είναι η βασική μονάδα όγκου που χρησιμοποιείται στο πεδίο. Και οι τρεις παράμετροι είναι αυστηρά λειτουργίες πίεσης, όπως φαίνεται στην εικόνα 34, υποθέτοντας ότι η θερμοκρασία της δεξαμενής παραμένει σταθερή κατά την εξάντληση.^[4]

Το πως ακριβώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν αυτές οι παράμετροι για τη συσχέτιση των μετρούμενων επιφανειακών όγκων με τους όγκους δεξαμενών απεικονίζονται στις εικόνες 31 και 32.



Εικόνα 31. Εφαρμογή των παραμέτρων PVT που συνδέουν την επιφάνεια με τους όγκους των υδρογονανθράκων που βρίσκονται στον ταμιευτήρα πάνω από το σημείο πίεσης των φυσαλίδων.^[4]

Η εικόνα 31 απεικονίζει την κατάσταση όταν η πίεση του ταμιευτήρα έχει πέσει από την αρχική της τιμή p_i σε κάποια χαμηλότερη τιμή p , η οποία είναι ακόμα πάνω από το σημείο φυσαλίδας. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα P-T, το μόνο υγρό στον ταμιευτήρα είναι το κορεσμένο υγρό πετρέλαιο. Όταν το πετρέλαιο αυτό παράγεται στην επιφάνεια, κάθε βαρέλι ταμιευτήρα αποθέματος θα αποφέρει, κατά τον διαχωρισμό του πετρελαίου εσωτερικής καύσης R_{sj} πρότυπο κυβικά πόδια αερίου. Δεδομένου ότι το πετρέλαιο έχει υποστεί κορεσμό με αέριο, πράγμα που σημαίνει ότι θα μπορούσε να διαλυθεί περισσότερο εάν τα τελευταία ήταν διαθέσιμα, τότε η αρχική τιμή του λόγου του πετρελαίου διαλύματος πρέπει να παραμείνει σταθερή στο R_{sj} (scf / stb) μέχρις ότου η πίεση πέσει στο σημείο φυσαλίδας, όταν το πετρέλαιο κορεσθεί, όπως φαίνεται στην εικόνα 34 (β).

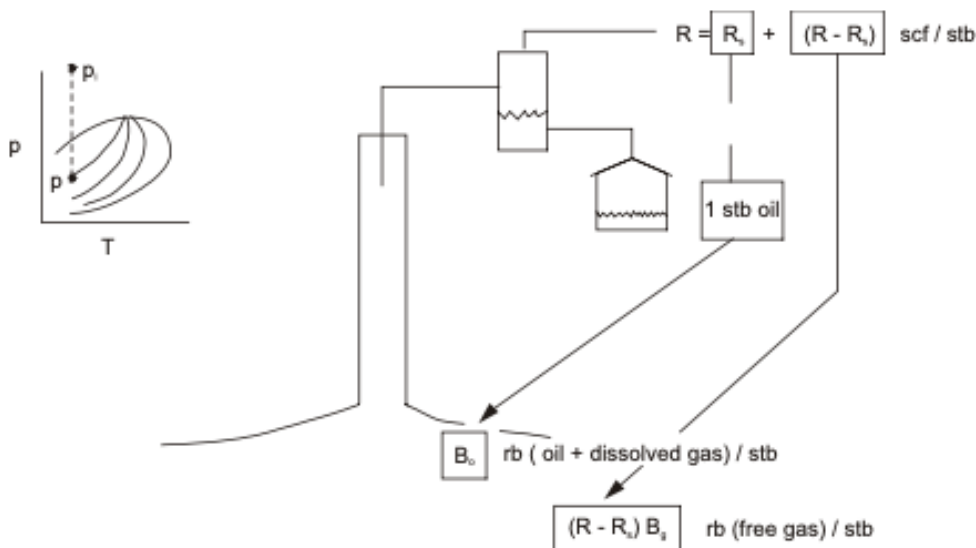
Επίσης, η εικόνα 31 απεικονίζει σύμφωνα με τους ορισμούς των R_s και B_o , ότι εάν το R_{sj} scf αερίου αφαιρεθεί στον ταμιευτήρα με ένα stb πετρελαίου, τότε το αέριο θα διαλυθεί πλήρως στο πετρέλαιο στην πίεση και τη θερμοκρασία του ταμιευτήρα για να δώσει έναν όγκο B_o rb πετρελαίου, συν διαλυμένο αέριο. Η εικόνα 34 (α) δείχνει

ότι το B_0 αυξάνει ελαφρά καθώς μειώνεται η πίεση από την αρχική, στην πίεση του σημείου φυσαλίδων. Αυτή η επίδραση οφείλεται απλώς στην διαστολή του υγρού και, επειδή η συμπίεσιμότητα του μη κορεσμένου πετρελαίου στον ταμιευτήρα είναι χαμηλή, η διαστολή είναι σχετικά μικρή.

Τυπικές τιμές των R_s και B_0 πάνω από το σημείο φυσαλίδας υποδεικνύονται στην εικόνα 33, αυτά είναι τα γραφικά αποτελέσματα της εργαστηριακής ανάλυσης που παρουσιάζονται στον πίνακα 1. Η αρχική τιμή του συντελεστή όγκου του σχηματισμού του πετρελαίου B_{0i} είναι 1,2417 η οποία αυξάνεται σε 1,2511 στο σημείο φυσαλίδας. Έτσι, στην αρχή 1,2417 βαρέλια ταμιευτήρα πετρελαίου, συν το διαλυμένο αέριο του, θα παράγει ένα stb του πετρελαίου. Πρόκειται για μια μάλλον ευνοϊκή αναλογία που δείχνει ένα πετρέλαιο μέτριας μεταβλητότητας και αναμφισβήτητα η αρχική αναλογία πετρελαίου-αερίου διαλύματος είναι επίσης σχετικά χαμηλή στα 510 scf / stb. Υπό λιγότερο ευνοϊκές συνθήκες, για τα πιο πτητικά πετρέλαια, η B_{0i} μπορεί να έχει πολύ υψηλότερες τιμές. Αυτό συμβαίνει, για παράδειγμα στο Statfjord στη Βόρεια Θάλασσα, το B_{0i} είναι 2.7 rb / stb ενώ η τιμή του R_{si} είναι περίπου 3000 scf / stb. ^[4]

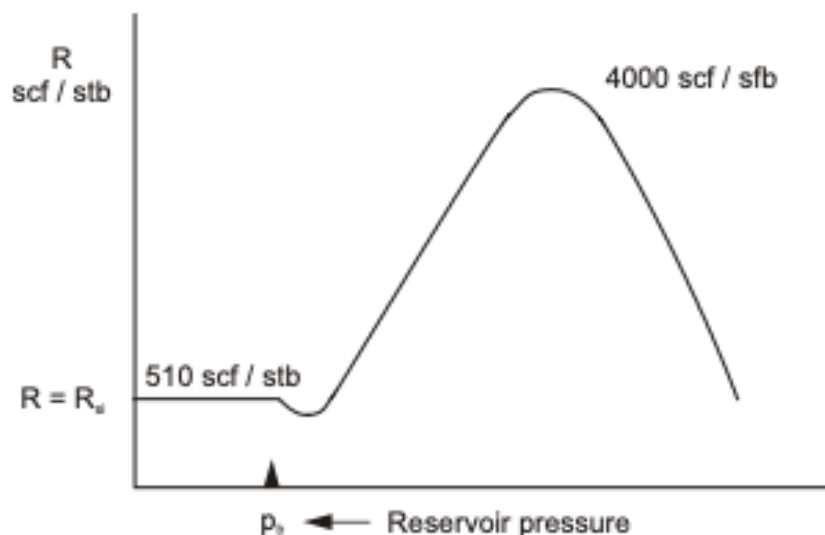
Προφανώς η πιο ευνοϊκή τιμή του B_{0i} είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στην μονάδα, Δείχνοντας έτσι ότι το πετρέλαιο περιέχει ελάχιστο διαλυμένο αέριο και οι όγκοι των ταμιευτήρων είναι περίπου ίσοι με τους όγκους της επιφάνειας. Τα μικρά πεδία πετρελαίου του Beykan και του Kayaköy στα ανατολικά της Τουρκίας αποτελούν αξιόλογα παραδείγματα αυτής της τελευταίας κατάστασης που έχει τιμές B_{0i} και R_{si} των 1,05 και 20 scf / stb αντίστοιχα.

Όμως, κάτω από το σημείο φυσαλίδων η κατάσταση είναι πιο περίπλοκη όπως φαίνεται στην εικόνα 32.



Εικόνα 32. Εφαρμογή των παραμέτρων PVT που συνδέουν την επιφάνεια με τους όγκους των υδρογονανθράκων που βρίσκονται στον ταμιευτήρα κάτω από το σημείο πίεσης των φυσαλίδων. ^[4]

Σε αυτή την περίπτωση κάθε βαρέλι πετρελαίου αποθεματικής δεξαμενής παράγεται σε συνδυασμό με R scf αερίου, όπου το R (scf / stb) ονομάζεται η στιγμιαία ή η παραγωγική αναλογία αερίου-πετρελαίου (instantaneous or producing gas oil ratio) και μετράται καθημερινά. Μερικά από αυτά τα αέρια διαλύονται στο πετρέλαιο στον ταμιευτήρα και απελευθερώνονται κατά τη διάρκεια της παραγωγής μέσω του διαχωριστή, ενώ το υπόλοιπο αποτελείται από αέριο το οποίο είναι ήδη ελεύθερο στον ταμιευτήρα. Επιπροσθέτως, η τιμή του R μπορεί να υπερβεί σε μεγάλο βαθμό την R_{Si} , την αρχική αναλογία πετρελαίου αερίου, επειδή, λόγω της υψηλής ταχύτητας ροής αερίου σε σύγκριση με το πετρέλαιο, είναι φυσιολογικό να παράγεται μια δυσανάλογη ποσότητα αερίου. Αυτό προκύπτει από την αποτελεσματική κλοπή απελευθερωμένου αερίου από όλο τον ταμιευτήρα και την παραγωγή του μέσω των σχετικά απομονωμένων σημείων εξαγωγής. Μια τυπική γραφική παράσταση του R ως συνάρτηση της πίεσης του ταμιευτήρα παρουσιάζεται στην εικόνα 33.



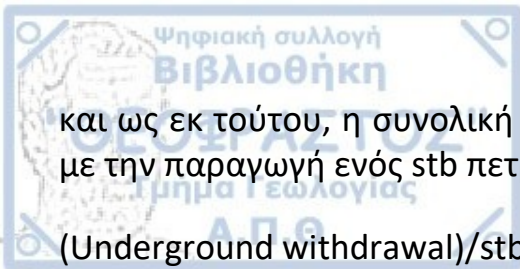
Εικόνα 33. Παραγωγή αναλογίας πετρελαίου ως συνάρτηση της μέσης πίεσης του ταμιευτήρα για μία τυπική κίνηση διαλυμένου αερίου.^[4]

Ο λόγος παραγωγής πετρελαίου-αερίου μπορεί να χωριστεί σε δύο συνιστώσες όπως φαίνεται στην εικόνα 32. Δηλαδή

$$R = R_S + (R - R_S)$$

Το πρώτο από αυτά, το R_S scf/stb, όταν κατέλθει στον ταμιευτήρα (taken down to the reservoir) με το ένα stb πετρελαίου θα διαλυθεί στο πετρέλαιο, στην επικρατούσα πίεση του ταμιευτήρα, για να δώσει B_0 rb πετρελαίου συν διαλυμένο αέριο. Το υπόλοιπο, $(R - R_S)$ scf/stb, όταν κατέλθει στον ταμιευτήρα θα καταλάβει έναν όγκο

$$(R - R_S) (\text{scf/stb}) \times B_g (\text{rb/scf}) = (R - R_S) B_g (\text{rb.-free gas/stb}) \quad (2.1)$$



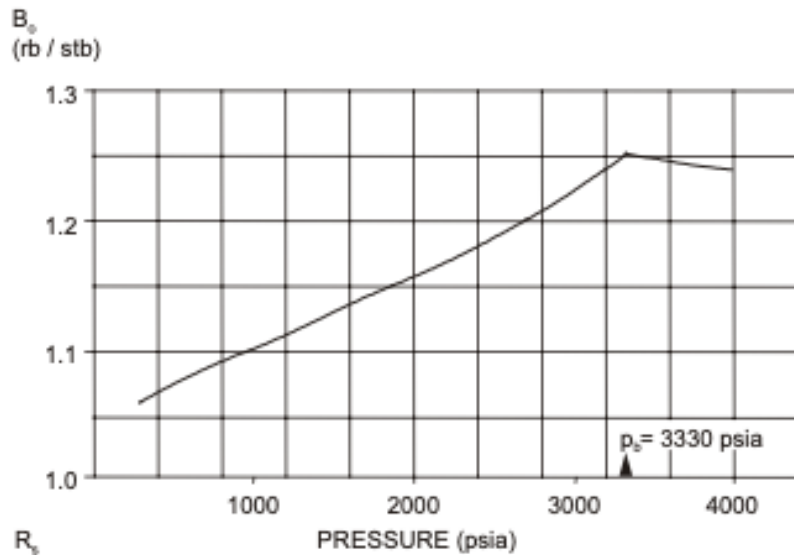
και ως εκ τούτου, η συνολική υπόγεια απόσυρση υδρογονανθράκων που συνδέεται με την παραγωγή ενός stb πετρελαίου είναι

$$(\text{Underground withdrawal})/\text{stb} = B_0 + (R - R_s) B_g (\text{rb/stb}) \quad (2.2)$$

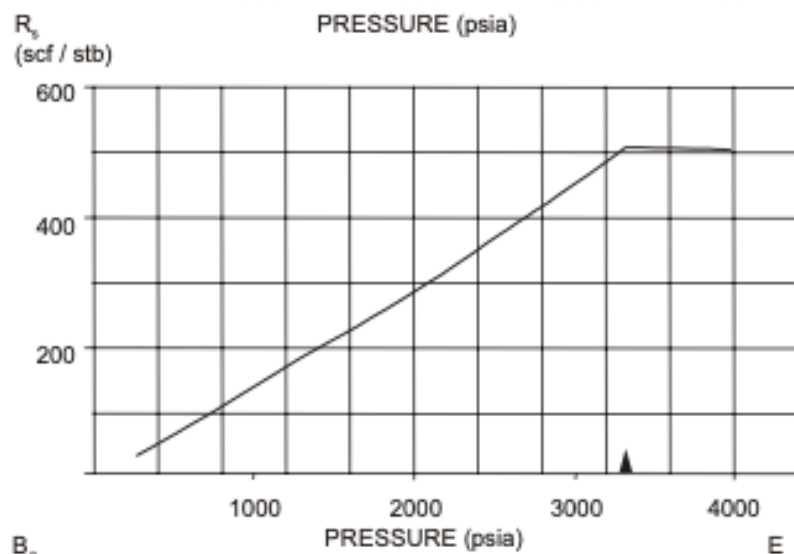
Η παραπάνω σχέση δείχνει γιατί ο συντελεστής όγκου σχηματισμού αερίου έχει τις μάλλον ατυχείς μονάδες rb / scf. Είναι απλή η μετατροπή των αναλογιών πετρελαίου εσωτερικής καύσης, μετρημένες σε scf / stb, απευθείας σε rb / stb, ώστε να είναι συμβατές με τις μονάδες του B_0 . Ενώ το B_g χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά στη μηχανική των ταμιευτήρων πετρελαίου, το ισοδύναμο του σε μηχανική ταμιευτήρων αερίου είναι ο E, ο συντελεστής επέκτασης αερίου έχει τις μονάδες scf / rcf. Η σχέση μεταξύ B_g και E είναι η εξής,

$$B_g (\text{rb/scf}) = 1/(5.615E) \quad (2.3)$$

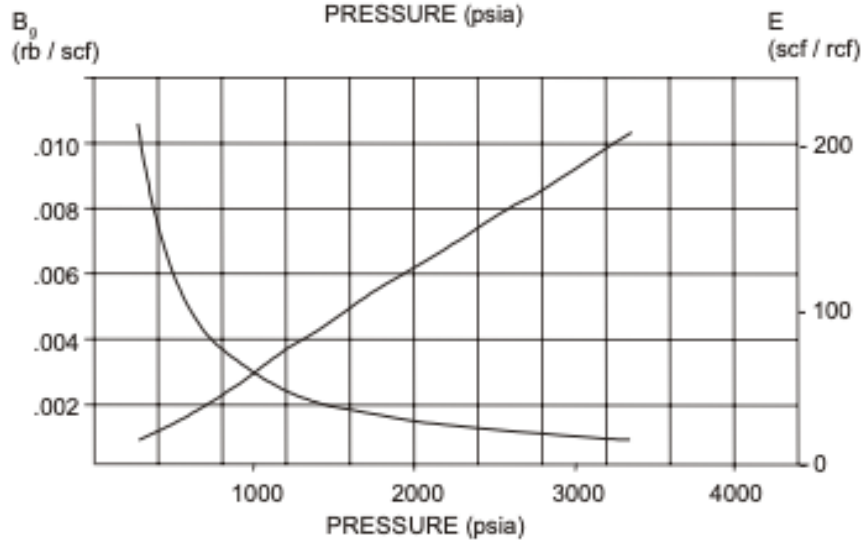
Όπου το B_g έχει πάντα πολύ μικρές τιμές. Για παράδειγμα, για μια τυπική τιμή του E στα 150 scf / rcf, η τιμή του B_g θα είναι 0.00119 rb / scf.



(a)



(b)



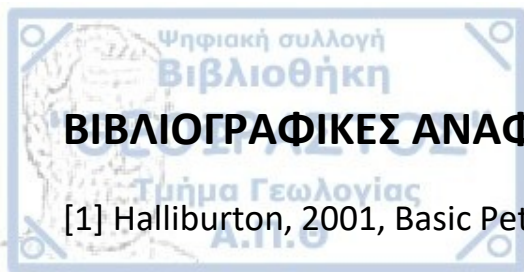
(c)

Εικόνα 34. Παράμετροι PVT (B_o , R_s and B_g) ως λειτουργίες πίεσης για την ανάλυση που παρουσιάζεται στον πίνακα 1 ($p_b=3330$ psia).^[4]

Τα σχήματα των καμπυλών B_0 και R_s καμπυλώνουν κάτω από το σημείο φυσαλίδας, όπως φαίνεται στην εικόνα 34 (α) και (β). Καθώς η πίεση μειώνεται κάτω από το p_b , όλο και περισσότερο αέριο απελευθερώνεται από το κορεσμένο πετρέλαιο και έτσι το R_s , το οποίο αντιπροσωπεύει την ποσότητα αερίου που διαλύεται σε ένα stb στην τρέχουσα πίεση του ταμιευτήρα, μειώνεται συνεχώς. Παρομοίως, δεδομένου ότι κάθε όγκος ταμιευτήρα πετρελαίου περιέχει μικρότερη ποσότητα διαλυμένου αερίου καθώς μειώνεται η πίεση, θα λαμβάνονται ένα stb πετρελαίου από προοδευτικά μικρότερους όγκους εφεδρικού πετρελαίου και το B_0 μειώνεται σταθερά με την πίεση.

Πίνακας 1. Παράμετροι πεδίου PVT προσαρμοσμένοι για μονή φάση, διαχωρισμός επιφανείας στους 150 psia και 80 ° F. $cbf = .7993$.^[4]

Pressure (psia)	$B_0 = \frac{V_o}{C_{b1}}$ (rb/stb)	$R_s - R_{st} = \frac{5.615 F}{C_{b1}}$ (scf/stb)	$B_g = \frac{1}{5.615 E}$ (rb/scf)
4000 (p_i)	1.2417 (B_{oi})	510 (R_{si})	
3500	1.2480	510	
3330 (p_b)	1.2511 ($B_{obf} = \frac{1}{C_{b1}}$)	510	.00087
3000	1.2222	450	.00096
2700	1.2022	401	.00107
2400	1.1822	352	.00119
2100	1.1633	304	.00137
1800	1.1450	257	.00161
1500	1.1287	214	.00196
1200	1.1115	167	.00249
900	1.0940	122	.00339
600	1.0763	78	.00519
300	1.0583	35	.01066



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Halliburton, 2001, Basic Petroleum Geology and Log Analysis, σελίδες 17-18, 24-39
- [2] Peter K. Link, 1999, Basic petroleum geology, σελίδες 303-317
- [3] B. C. Craft, M. Hawkins, Ronald E. Terry] Applied Petroleum Reservoir Engineering (2nd Edition), σελίδες 9-10
- [4] {Dake L. P.} Fundamentals of Reservoir Engineering , σελίδες 1-50
- [5] Lynch, E.J.,1964. Formation Evaluation. Harper and Row, New York.
- [6] Bradley, J.S., 1975. Abnormal Formation Pressure. The American Ass. of Pet. Geologists Bulletin, Vol. 59, No. 6, June: 957–973.
- [7] Chapman, R.E., 1973. Petroleum Geology, a Concise Study. Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam: 67–76.
- [8] Earlougher, R.C., Jr., 1977. Advances in Well Test Analysis. SPE Monograph: Chapter 8.
- [9] Lebourg, M., Field, R.Q. and Doh, C.A., 1957. A Method of Formation Testing on Logging Cable. Trans. AIME, 210: 260–267.
- [10] Schultz, A.L., Bell, W.T. and Urbanosky, H.J., 1974. Advancements in Uncased–Hole Wireline–Formation–Tester Techniques. SPE paper 5053, prepared for the Annual Fall Meeting of the SPE of AIME; Houston, Texas. October.
- [11] Bruns, J.R., Fetkovitch, M.J. and Meitzen, V.C., 1965. The Effect of Water Influx on p/Z –Cumulative Gas Production Curves. J.Pet.Tech., March: 287–291.
- [12] Craft, B.C. and Hawkins, M.F., Jr., 1959. Applied Petroleum Reservoir Engineering. Prentice–Hall, Inc. New Jersey.
- [13] Agarwal, R.G., Al-Hussainy, R. and Ramey, H.J., Jr., 1965. The Importance of Water Influx in Gas Reservoirs. J.Pet.Tech., November: 1336–1342. Trans. AIME.

Διαδικτυακές Πηγές

[α] <http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg105y/html/daonpiaoa.html>