



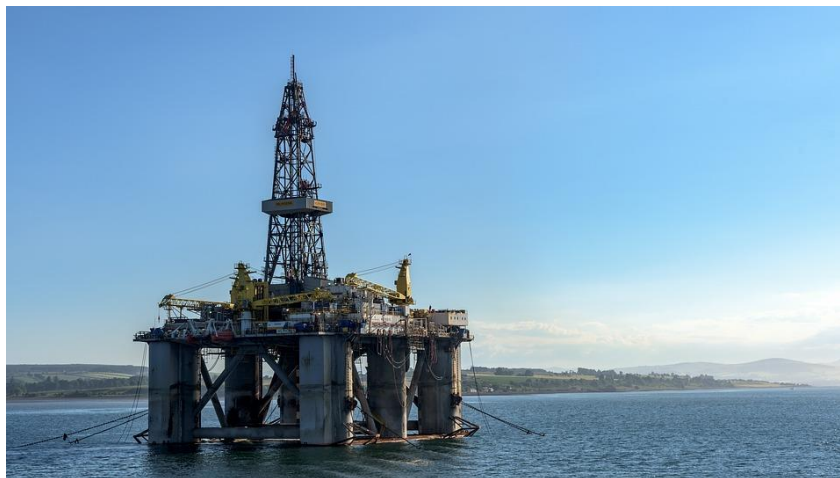
**ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ**

**ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ**

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΚΙΝΗΣΗΣ ΤΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ ΣΤΟΥΣ  
ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ ΚΑΙ ΑΝΑΚΤΗΣΗ**



**ΜΑΡΓΑΡΙΤΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ**

**Θεσσαλονίκη 2020**



### Περίληψη (Abstract)

Η παρούσα πτυχιακή εργασία ασχολείται με τα φαινόμενα και τους μηχανισμούς κίνησης των διαφόρων ρευστών που βρίσκονται σε έναν ταμιευτήρα υδρογονανθράκων αλλά και στους μηχανισμούς ανάκτησης των ρευστών μέσα από αυτούς τους ταμιευτήρες.

Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας θα εξηγηθούν οι έννοιες των αποθεμάτων των ταμιευτήρων, του συντελεστή όγκου και του συντελεστή ανάκτησης. Επιπλέον, θα γίνει αναφορά και στο νόμο του Darcy αλλά και στο πως διέπει τα ρευστά που βρίσκονται στους ταμιευτήρες.

Στο δεύτερο κεφάλαιο θα αναλυθούν οι μηχανισμοί κίνησης και οι τεχνικές ανάκτησης των υδρογονανθράκων από τους ταμιευτήρες, τόσο οι πρωτογενείς όσο και οι δευτερογενείς αλλά και κάποιες τριτογενείς.



## **Περιεχόμενα**

### **Εισαγωγή**

#### **Κεφάλαιο 1**

##### **Αποθέματα, Συντελεστής Όγκου, Συντελεστής αποληψιμότητας, Darcy**

##### **Εισαγωγή**

##### **1.1 Συντελεστής όγκου**

##### **1.2 Συστήματα Πίεσης Ρευστών**

##### **1.3 Συντελεστής ανάκτησης**

##### **1.4 Μηχανική ογκομετρικού ταμιευτήρα αερίου**

##### **1.5 Ανάλυση Πίεσης, Όγκου, Θερμοκρασίας για το πετρέλαιο**

##### **1.6 Νόμος Darcy και εφαρμογή του**

#### **Κεφάλαιο 2**

##### **Μηχανισμοί ανάκτησης των υδρογονανθράκων**

##### **2.1 Ορισμοί**

##### **2.2 Πρωτογενείς μηχανισμοί κίνησης και ανάκτηση**

##### **2.3 Δευτερογενείς μηχανισμοί κίνησης και ανάκτηση**

##### **2.4 Τριτογενής-βελτιωμένη ανάκτηση πετρελαίου**



Κατά τη διαδικασία απεικόνισης των πρωταρχικών λειτουργιών της μηχανικής του ταμιευτήρα , δηλαδή στην εκτίμηση των υδρογονανθράκων, στον υπολογισμό ενός συντελεστή ανάκτησης αλλά και στην προσάρτηση μίας χρονικής κλίμακας για την ανάκτηση, αυτό το κεφάλαιο εισάγει αρκετές από τις θεμελιώδεις έννοιες της μηχανικής των ταμιευτήρων.

Η περιγραφή του υπολογισμού του πετρελαίου επικεντρώνεται σε μεγάλο βαθμό στον καθορισμό των καθεστώτων της πίεσης του υγρού και του προβλήματος του εντοπισμού των ρευστών επαφών στον ταμιευτήρα. Η πρωτογενής ανάκτηση περιγράφεται σε γενικές γραμμές, λαμβάνοντας υπόψη την ιδιαιτερότητα των ισοθερμικών συμπερισμάτων των ρευστών του ταμιευτήρα, ενώ ο προσδιορισμός του συντελεστή ανάκτησης και η προσάρτηση μιας χρονικής κλίμακας, απεικονίζονται με την περιγραφή μηχανικής ογκομετρικού ταμιευτήρα αερίου.

Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με μια μικρή ποσοτική αναφορά της συμπεριφοράς φάσης των υδρογονανθράκων που αποτελούνται από πολλαπλά στοιχεία.

## 1.1 Συντελεστής όγκου

Αρχικά , θεωρούμε έναν ταμιευτήρα ο οποίος είναι γεμάτος με υγρό πετρέλαιο. Ο όγκος του πετρελαίου που βρίσκεται στον ταμιευτήρα (oil in place), θα ορίζεται από τον παρακάτω τύπο :

$$OIP = V \varphi (1 - S_{wc}) \text{ (όγκος ταμιευτήρα)} \quad (1.1)$$

Όπου ,

$V$  : ο καθαρός όγκος που υπάρχει στον ταμιευτήρα του βράχου

$\Phi$  : το πορώδες

$S_{wc}$  : το κορεσμένο νερό το οποίο εκφράζεται ως κλάσμα του όγκου των πόρων

Η ποσότητα  $V\phi$  αναφέρεται στον όγκο των πόρων και είναι ο συνολικός όγκος που μπορούν να έχουν τα ρευστά μέσα στον ταμιευτήρα. Έτσι, και η παραπάνω ποσότητα  $V\phi(1 - S_{wc})$  αναφέρεται στον όγκο των πόρων των υδρογονανθράκων και είναι ο συνολικός όγκος ταμιευτήρα που μπορεί να γεμίσει με υδρογονάνθρακες, είτε φυσικό αέριο, είτε πετρέλαιο είτε και τα δύο.

Η ύπαρξη του κορεσμένου νερού που είναι παγιδευμένο στους πόρους, η τιμή του οποίου κυμαίνεται μεταξύ 10-25%, είναι ένα παράδειγμα ενός φυσικού φαινομένου το οποίο είναι θεμελιώδες για τον καθορισμό της κίνησης των ρευστών μέσα στο δίκτυο των πόρων. Με βάση αυτό, όταν ένα υγρό αντικαθιστά ένα άλλο, μέσα στο δίκτυο των πόρων, ο κορεσμός του υγρού του οποίου έχει αντικατασταθεί, δε μπορεί να μειωθεί ποτέ στο μηδέν. Για να ισχύσει ωστόσο το παραπάνω, θα πρέπει τα υγρά να μη μπορούν να αναμειχθούν μεταξύ τους. Αυτό μας δείχνει ότι υπάρχει μια πεπερασμένη επιφανειακή τάση στην διεπιφάνεια ανάμεσά τους.

Έτσι, το πετρέλαιο, το οποίο δημιουργείται σε βαθιά μητρικά πετρώματα, όταν μεταναστεύει σε έναν ταμιευτήρα-παγίδα, ο οποίος είναι γεμάτος με νερό, αντικαθιστά αρκετό από το νερό, το οποίο οδηγεί στην παρουσία του κορεσμένου νερού. Δεδομένου ότι το νερό είναι ακίνητο η μόνη επίδρασή του στο υπολογισμό της μηχανικής του ταμιευτήρα είναι η μείωση του όγκου του ταμιευτήρα που μπορεί να καταλαμβάνεται από υδρογονάνθρακες.

Ο όγκος του πετρελαίου που υπολογίζεται από την εξίσωση (1.1) αναφέρεται ως όγκος του ταμιευτήρα. Έτσι, εφόσον όλο το πετρέλαιο, σε υψηλή επικρατούμενη πίεση και θερμοκρασία, περιέχει διάφορες ποσότητες διαλυμένων αερίων, ανά μονάδα όγκου, έχει περισσότερο νόημα να αναφερόμαστε στον όγκο του πετρελαίου σε συνθήκες επιφάνειας, όπου το αέριο και το πετρέλαιο είναι διαχωρισμένα. Έτσι, το πετρέλαιο σε συνθήκες επιφάνειας ορίζεται από την εξίσωση :

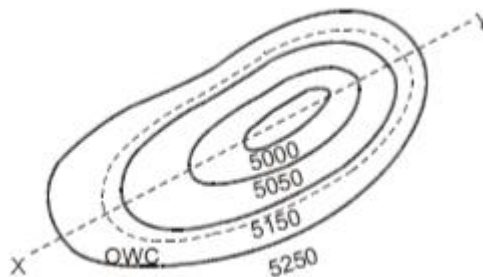
$$STOIIP = n = v\phi(1 - S_{wc})/B_{oi} \quad (1.2)$$

Όπου  $B_{oi}$  ορίζεται ως ο παράγοντας όγκου σχηματισμού πετρελαίου, κάτω από τις αρχικές συνθήκες, και έχει τις μονάδες μέτρησης που ορίζονται από τον όγκο του ταμιευτήρα προς τον όγκο του πετρελαίου σε συνθήκες επιφάνειας και συνήθως ορίζεται ως τα βαρέλια του ταμιευτήρα προς τα βαρέλια σε συνθήκες επιφάνειας. Έτσι, ένας όγκος του  $B_{oi}$  από βαρέλια ταμιευτήρα με πετρέλαιο θα συμβάλλουν στην παραγωγή ενός βαρελιού σε συνθήκες επιφάνειας μαζί με τον όγκο αερίου που αρχικά είχε διαλυθεί στο πετρέλαιο του ταμιευτήρα (Dake, 1978).

Στην εξίσωση (1.2) οι παράμετροι  $\varphi$  και  $S_{wc}$  καθορίζονται φυσιολογικά από πετρογραφική ανάλυση. Ο όγκος  $v$  καθορίζεται από γεωλογική ανάλυση και από ανάλυση της πίεσης των ρευστών.

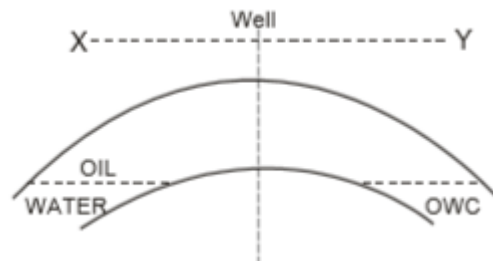
Ο γεωλόγος παρέχει χάρτες περιγράμματος της κορυφής και της βάσης του ταμιευτήρα όπως φαίνονται και στα σχήματα 1 και 2. Τέτοιοι χάρτες έχουν γραμμές σχεδιασμένες ανά 50 πόδια της ανύψωσης. Το πρόβλημα σε αυτήν την περίπτωση είναι να καθορίσουμε το επίπεδο στο οποίο βρίσκεται η επαφή του νερού με το πετρέλαιο (Oil Water Contact-OWC).

Σχήμα 1 : Χάρτης περιγράμματος της κορυφής του ταμιευτήρα



Πηγή : Dake L. (1978)

Σχήμα 2 : Διατομή του ταμιευτήρα , παράλληλα με τη γραμμή X-Y



Πηγή : Dake L. (1978)

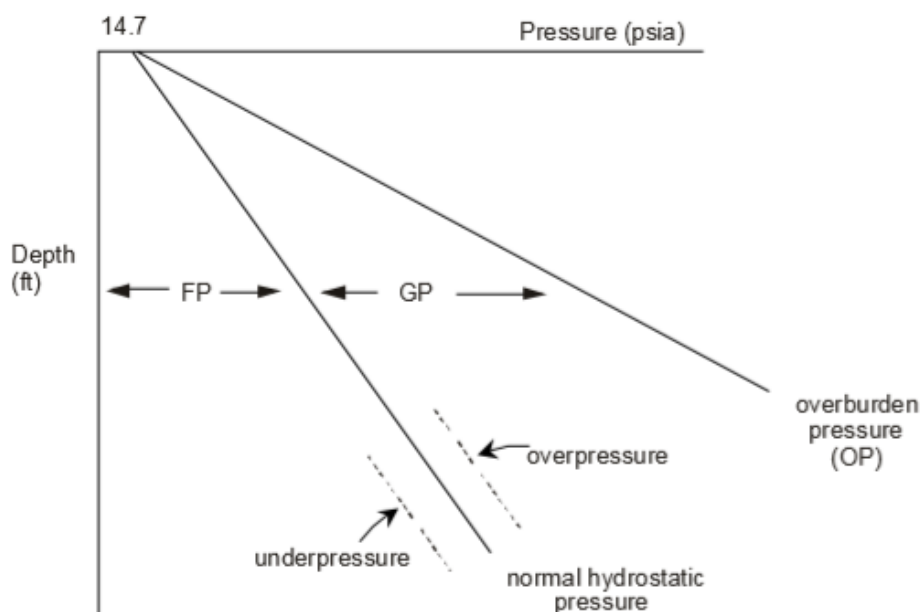
Η μέτρηση του όγκου του πετρώματος του ταμιευτήρα πάνω από το επίπεδο αυτό, θα μας δώσει τον καθαρό όγκο,  $v$ . Για την περίπτωση του σχήματος 2 , σύμφωνα με το σχήμα, δε θα μπορούσε να προσδιοριστεί η επαφή με έλεγχο των γεωτρήσεων που έχουν πραγματοποιηθεί, διότι μόνο η ζώνη πετρελαίου έχει διατηρηθεί. Ωστόσο, η τεχνική αυτή θα μπορούσε να εφαρμοστεί εάν η επαφή του πετρελαίου με το νερό ήταν αρκετά υψηλότερα. Για να προσδιοριστεί ο τρόπος με

τον οποίο μπορούμε να υπολογίσουμε την επαφή του πετρελαίου με το νερό, αλλά και άλλων ρευστών γενικά, είναι αναγκαία η γνώση των συστημάτων της πίεσης των ρευστών το οποίο θα περιγραφεί παρακάτω.

## 1.2 Συστήματα πίεσης ρευστών

Η συνολική πίεση σε οποιοδήποτε βάθος, που προκύπτει από το συνδυασμένο βάρος του σχηματισμού πετρώματος και ρευστών, είτε πρόκειται για νερό, αέριο, ή πετρέλαιο, είναι γνωστή ως πίεση υπερκείμενου φορτίου. Στην πλειοψηφία των ιζηματογενών λεκανών η πίεση υπερκείμενου φορτίου αυξάνεται γραμμικά με το βάθος και τυπικά έχει κλίση πίεσης 1 (Πίεση προς βάθος) .

Σχήμα 3 : Συστήματα πίεσης υπερκείμενου φορτίου και Υδροστατικής πίεσης



Πηγή : Dake L. (1978)

Σε ένα δεδομένο βάθος, η πίεση υπερκείμενου φορτίου, μπορεί να εξομοιωθεί με το άθροισμα της πίεσης των ρευστών (FP) και της πίεσης των κόκκων (GP) που δρουν μεταξύ των μεμονωμένων σωματιδίων του πετρώματος.



$$OP = FP + GP$$

Και ειδικότερα, καθώς η πίεση υπερκείμενου φορτίου παραμένει σταθερή σε οποιοδήποτε βάθος, τότε ,

$$d(FP) = -d(GP)$$

Δηλαδή σύμφωνα με τα παραπάνω, η μείωση της πίεσης των ρευστών θα οδηγήσει σε αντίστοιχη αύξηση της πίεσης των κόκκων, αλλά και το αντίστροφο.

Τα συστήματα πίεσης των ρευστών σε στήλες υδρογονανθράκων υπαγορεύονται από την επικρατούσα πίεση του νερού στην περιοχή του ταμιευτήρα. Σε μία απόλυτα φυσιολογική περίπτωση, η πίεση του νερού σε οποιοδήποτε βάθος μπορεί να υπολογιστεί ως εξής,

$$p_w \left( \frac{dp}{dD} \right)_{\text{water}} \times D + 14.7 \text{ (psia)} \quad (1.3)$$

Όπου,  $dp/dD$ , η κλίση της πίεσης του νερού, εξαρτάται από την χημική σύνθεση (αλατότητα) και για το καθαρό νερό έχει τιμή 0.4335 psi/ft.

Η προσθήκη της επιφανειακής πίεσης μίας ατμόσφαιρας (14.7 psia) έχει ως αποτέλεσμα την έκφραση της πίεσης σε απόλυτες μονάδες παρά μονάδες μέτρησης (psig), οι οποίες μετρούνται σε σχέση με την ατμοσφαιρική πίεση. Σε πολλές περιπτώσεις στη μηχανική των ταμιευτήρων η κύρια ανησυχία είναι με τις διαφορές πίεσης, οι οποίες είναι ίδιες είτε χρησιμοποιούνται ως απόλυτες πιέσεις είτε ως μετρήσεις και ονομάζονται απλά ως psi.

Η παραπάνω εξίσωση (1.3) θεωρεί ότι υπάρχει τόσο συνεχής πίεση νερού στην επιφάνεια και ότι η αλατότητα δεν διαφέρει ανάλογα με το βάθος. Η προηγούμενη παραδοχή είναι έγκυρη, στις περισσότερες των περιπτώσεων, παρόλο που η άμμος που φέρει το νερό συνήθως διασκορπίζεται με αδιαπέρατες σχισμές, καθώς οποιοδήποτε σπάσιμο της επιφανειακής συνέχεις τέτοιων φαινομένων στεγανοποίησης θα οδηγήσει στην καθιέρωση της συνέχειας της υδροστατικής πίεσης στην επιφάνεια. Η τελευταία υπόθεση, ωστόσο, είναι μάλλον αφελής αφού η αλατότητα μπορεί να διαφέρει σημαντικά ανάλογα με το βάθος. Παρόλα αυτά, προς το παρόν, θα θεωρηθεί μια σταθερή βαθμίδα υδροστατικής πίεσης, για πιο εύκολη προσέγγιση. Όπως θα φανεί έπειτα, αυτό που έχει πραγματικά σημασία για τον μηχανικό είναι ο ορισμός του συστήματος πίεσης υδροστατικής πίεσης κοντά στην άμμο που φέρει υδρογονάνθρακες (Reduehlhuber, 1957).



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

$$p_w = \left(\frac{dp}{dD}\right)_{water} \times D + 14.7 + C \text{ (psia)} \quad (1.4)$$

Όπου C είναι μία σταθερά, η οποία είναι θετική εάν το νερό δέχεται περισσότερη πίεση, και αρνητική αν δέχεται λιγότερη πίεση.

Για να είναι ασυνήθιστα πιεσμένο το νερό σε οποιαδήποτε άμμο, η άμμος θα πρέπει να σφραγίζεται αποτελεσματικά από τα περιβάλλοντα στρώματα, έτσι ώστε η συνέχεια της υδροστατικής πίεσης στην επιφάνεια να μην είναι εφικτό να συμβεί. Ο Bradley (Bradley, 1975) έχει αναφέρει διάφορες καταστάσεις κατά τις οποίες μπορεί να προκληθεί μη φυσιολογική πίεση ρευστού σε κλειστές με νερό άμμους. Κάποιες από αυτές είναι οι παρακάτω.

- Η θερμοκρασία αλλάζει. Μία αύξηση της θερμοκρασίας της τάξεως του ενός Fahrenheit μπορεί να προκαλέσει αύξηση της πίεσης της τάξεως του 125 psi σε ένα κλειστό σύστημα γλυκού νερού.
- Γεωλογικές αλλαγές, όπως η ανύψωση του ταμιευτήρα ή η ισοδύναμη επιφανειακή διάβρωση, τα οποία και τα δύο έχουν ως αποτέλεσμα την υπερβολικά υψηλή πίεση του νερού του ταμιευτήρα στην άμμο του ταμιευτήρα ανάλογα με το βάθος ταφής. Το αντίθετο φαινόμενο μπορεί να συμβεί και σε έναν ταμιευτήρα που υποβαθμίζεται στον οποίο μπορεί να εμφανιστεί ασυνήθιστα χαμηλή πίεση ρευστών.
- Η όσμωση μεταξύ των υδάτων που έχουν διαφορετική αλατότητα, ο αδιαπέρατος σχίστης συμπεριφέρεται ως η ημιπερατή μεμβράνη σε αυτή την ιονική ανταλλαγή. Εάν το νερό μέσα στη σφράγιση είναι πιο αλμυρό από ότι το νερό που το περιβάλλει, η όσμωση θα προκαλέσει μη φυσιολογική υψηλή πίεση και το αντίστροφο.

Ορισμένες από αυτές τις αιτίες της μη φυσιολογικής πίεσης είναι αλληλεπιδραστικές. Για παράδειγμα, εάν ένα μπλοκ ταμιευτήρα έχει υποστεί ανύψωση η προκύπτουσα υπερπίεση μετριάζεται εν μέρει από τη μείωση της θερμοκρασίας του ταμιευτήρα.

Το γεωλογικό εγχειρίδιο του Chapman (Chapman, 1973) παρέχει μία περιεκτική περιγραφή της μηχανικής της υπερπίεσης. Οι μηχανικοί ταμιευτήρων, ωστόσο, τείνουν να είναι πιο ρεαλιστές για το θέμα των ασυνήθιστων πιέσεων από τους γεωλόγους. Οι κύριες ερωτήσεις όμως που παραμένουν είναι εάν η φέρουσα με νερό άμμος πιέζονται μη φυσιολογικά, και εάν συμβαίνει αυτό, τι επίδραση έχει στην έκταση οποιασδήποτε συσσώρευσης υδρογονανθράκων.

Μέχρι στιγμής έχουν ληφθεί υπόψη μόνο υδροστατικές πιέσεις. Τα συστήματα πίεσης των υδρογονανθράκων, είναι διαφορετικές διότι οι πυκνότητες του πετρελαίου και του αερίου είναι μικρότερες του νερού και συνεπώς οι κλίσεις της πίεσης θα είναι μικρότερες, με χαρακτηριστικές τιμές

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

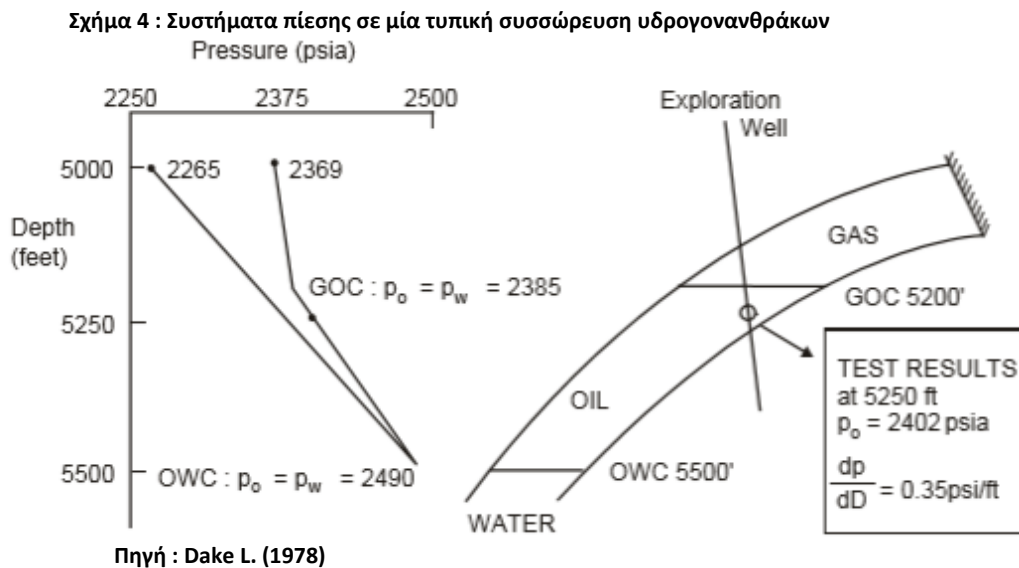
$$\left(\frac{dp}{dD}\right)_{oil} = 0.35 \text{ psi/ft}$$

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

Συνεπώς, για τον ταμιευτήρα που περιέχει τόσο πετρέλαιο όσο και ελεύθερο αέριο, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, χρησιμοποιώντας τις παρακάτω κλίσεις θα μας δώσει την κατανομή της πίεσης, η οποία φαίνεται στην αριστερή πλευρά του διαγράμματος.

Στην επαφή πετρελαίου-νερού, στα 5500 πόδια, η πίεση στο πετρέλαιο και στο νερό πρέπει να είναι ίση, διαφορετικά δε θα υπήρχε στατική διεπαφή. Η πίεση στο νερό μπορεί να καθοριστεί χρησιμοποιώντας την εξίσωση 1.5, με στρογγυλοποίηση στο πλησιέστερο psi,

$$p_w = 0.45 D + 15 \text{ (psia)} \quad (1.5)$$



Η οποία θεωρείται ένα κανονικό σύστημα υδροστατικής πίεσης. Έτσι, στην επαφή πετρελαίου-νερού,

$$p_o = p_w = 0.45 \times 5500 + 15 = 2490 \text{ (psia)} \quad (1.6)$$

Η γραμμική εξίσωση για την πίεση πετρελαίου, πάνω από την επαφή πετρελαίου-νερού, τότε, είναι

$$p_0 = 0.35D + \text{constant} \quad (1.7)$$

Και δεδομένου ότι  $p_0 = 2490 \text{ psia}$  σε  $D = 5500 \text{ ft}$ , η σταθερά μπορεί να αξιολογηθεί ώστε να δώσει την εξίσωση

$$p_0 = 0.35D + 565 \text{ (psia)} \quad (1.8)$$

Στην επαφή αερίου-πετρελαίου, στα 5200 ft, η πίεση και στα δύο υγρά πρέπει να είναι ίση και να μπορεί να υπολογιστεί, χρησιμοποιώντας την εξίσωση (1.8), ώστε να γίνει 2385 psia. Η εξίσωση της γραμμής πίεσης αερίου μπορεί τότε να προσδιοριστεί ως ,

$$p_0 = 0.08D + 1969 \text{ (psia)} \quad (1.9)$$

Τέλος, χρησιμοποιώντας την τελευταία εξίσωση, η πίεση του αερίου στην κορυφή της δομής, στα 5000ft , μπορεί να υπολογιστεί ως 2369 psia. Οι γραμμές πίεσης στη στήλη υδρογονανθράκων σχεδιάζονται στο διάγραμμα βάθους (σχήμα 4), από το οποίο μπορεί να φανεί ότι στην κορυφή της δομής η πίεση του αερίου υπερβαίνει την κανονική υδροστατική πίεση κατά 104psi. Έτσι, σε μία καλή γεώτρηση ενός σχιστολίθου στεγανοποίησης στην κορυφή της δομής θα υπάρξει μία απότομη αύξηση πίεσης από τα 2265 psi στα 2369 psia κατά την πρώτη διάτρηση του ταμιευτήρα στα 5000 ft. Το μέγεθος της ασυνέχειας πίεσης κατά τη διάτρηση ενός ταμιευτήρα υδρογονανθράκων εξαρτάται από την κατακόρυφη απόσταση μεταξύ του σημείου διείδυσης και της επαφής νερού-πετρελαίου, για μια δεδομένη τιμή αυτής της απόστασης, θα είναι πολύ μεγαλύτερη εάν ο ταμιευτήρας περιέχει μόνο αέριο.

Τη στιγμή της γεώτρησης ενός ταμιευτήρα εξερεύνησης και της ανακάλυψης ενός νέου ταμιευτήρα, ένας από τους κύριους στόχους, είναι να καθοριστεί η θέση των επαφών των ρευστών, το οποίο, όπως περιγράφεται παραπάνω, θα διευκολύνουν τον καθορισμό του πετρελαίου στον ταμιευτήρα.

Θεωρούμε τον ταμιευτήρα εξερεύνησης, που φαίνεται στο σχήμα 4, που διεισδύει στον ταμιευτήρα κοντά στην κορυφή της στήλης πετρελαίου. Η επαφή πετρελαίου-αερίου στον ταμιευτήρα θα είναι σαφώς ορατή , στα 5200 ft, στους σωλήνες που βρίσκονται στον ταμιευτήρα. Η επαφή πετρελαίου-νερού, ωστόσο, δε

θα είναι ορατή, καθώς βρίσκεται 225 ft, πιο κάτω από το σημείο που το φρεάτιο διεισδύει στη βάση του ταμιευτήρα. Η θέση της επαφής μπορεί να συναχθεί μόνο ως αποτέλεσμα ενός πηγαδιού δοκιμής, όπως είναι η δοκιμή τρυπανιού ή δοκιμή σχηματισμού καλωδίων, στα οποία η πίεση και η θερμοκρασία μετρούνται και ένα δείγμα πετρελαίου ανακτάται. Η ανάλυση του δείγματος επιτρέπει τον υπολογισμό της πυκνότητας του πετρελαίου στις συνθήκες μέσα στον ταμιευτήρα και ως εκ τούτου την κλίση της πίεσης του πετρελαίου. Μαζί, η μέτρηση της πίεσης και η κλίση της πίεσης είναι επαρκείς για τον καθορισμό της ευθείας γραμμής που είναι η σχέση βάθους πίεσης στη στήλη πετρελαίου. Εάν μία τέτοια δοκιμή είχε διεξαχθεί στο βάθος των 5250 ft, στον ταμιευτήρα, τότε η μετρημένη πίεση θα ήταν 2402 psia, και η υπολογισμένη κλίση πετρελαίου 0.35psi/ft, που είναι επαρκή για να καθορίσουν την γραμμή πίεσης πετρελαίου ως

$$p_o = 0.35D + 565 \text{ (psia)} \quad (1.10)$$

Και η προέκταση της γραμμής για να συναντήσει την κανονική γραμμή υδροστατικής πίεσης θα εντοπίσει την επαφή πετρελαίου-νερού στα 5500ft.

Αυτός ο τύπος ανάλυσης βασίζεται πολύ στη γνώση του καθεστώτος υδροστατικής πίεσης. Εάν για παράδειγμα, το νερό υπερπιέζεται κατά μόλις 20 psi, τότε η επαφή πετρελαίου-νερού θα βρίσκεται στα 5300ft αντί για τα 5500ft. Αυτό το γεγονός μπορεί να ελεγχθεί από οπτική παρακολούθηση του σχήματος 4 ή εκφράζοντας την εξίσωση της γραμμής υπερπιεζόμενης γραμμής νερού, ως

$$p_w = 0.45D + 35 \text{ (psia)} \quad (1.11)$$

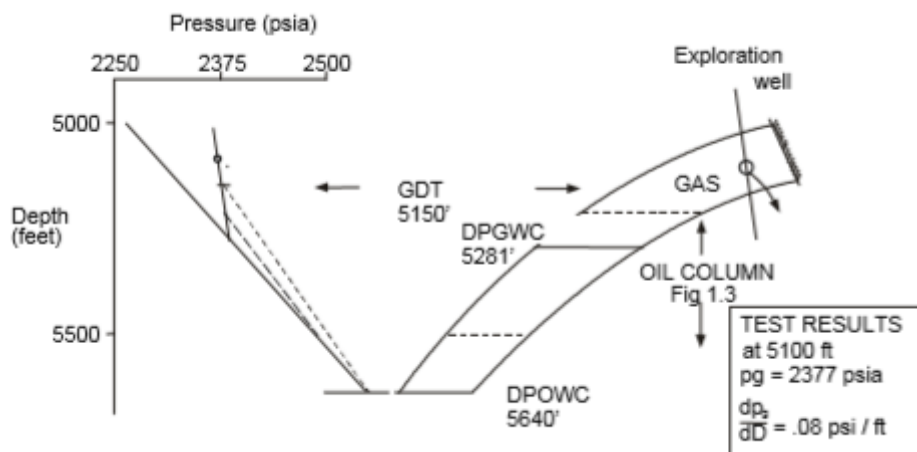
Και λύνοντας παράλληλα με την εξίσωση (1.8) για την κατάσταση όπου  $p_w = p_o$  στην επαφή πετρελαίου-νερού. Η διαφορά των 200ft στην θέση της επαφής μπορεί να δημιουργήσει τεράστια διαφορά στο υπολογιζόμενο πετρέλαιο στον ταμιευτήρα, ειδικά εάν η έκταση του ταμιευτήρα είναι μεγάλη.

Για αυτόν τον λόγο οι μηχανικοί ταμιευτήρων είναι έτοιμοι να δαπανήσουν πολύ χρόνο και, επομένως, χρήματα, στον καθορισμό του καθεστώτος υδροστατικής πίεσης σε ένα νέο πεδίο. Ένας απλός τρόπος για να γίνει αυτό, είναι να τρέξουν μια σειρά από δοκιμές σχηματισμού καλωδίων στο φρεάτιο εξερεύνησης, συνήθως μετά την καταγραφή και πριν από τη ρύθμιση του καρότου, στο οποίο οι πιέσεις μετρώνται σκόπιμα σε άμμους που φέρουν νερό τόσο από πάνω όσο και από κάτω του ταμιευτήρα ή ταμιευτήρων υδρογονανθράκων. Η σειρά των μετρήσεων πίεσης σε διαφορετικά βάθη, επιτρέπει τη γραμμή υδροστατικής πίεσης, να οριστεί με ακρίβεια κοντά στη συσσώρευση υδρογονανθράκων, ανεξάρτητα από το εάν το καθεστώς πίεσης είναι φυσιολογικό ή όχι (J. Lohrenz, 1964).

Τέτοιες δοκιμές επαναλαμβάνονται στα πρώτα φρεάτια που ανοίγονται σε καινούργια πεδία ή περιοχές μέχρι οι μηχανικοί να είναι αρκετά ικανοποιημένοι ότι

υπάρχει ομοιομορφία στην υδροστατική πίεση. Σε περίπτωση που δε συμβεί αυτό, μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικό σφάλμα στον υπολογισμό των υδρογονανθράκων που βρίσκονται, το οποίο μπορεί να οδηγήσει στον σχηματισμό ανακριβών σχεδίων ανάπτυξης του πεδίου (Amyx, 1960).

**Σχήμα 5 :** Απεικονίζοντας την αβεβαιότητα στην εκτίμηση της πιθανής έκτασης μίας στήλης πετρελαίου, που προέρχεται από την δοκιμή στο χώρο αερίου



Πηγή : Dake L. (1978)

Το σχήμα 5 , απεικονίζει έναν άλλο τύπο αβεβαιότητας που σχετίζεται με τον προσδιορισμό των επαφών ρευστών από μετρήσεις πίεσης. Ο ταμιευτήρας είναι ο ίδιος όπως απεικονίζεται στο σχήμα 4, αλλά σε αυτή την περίπτωση το φρεάτιο εξερεύνησης έχει διεισδύσει μόνο στον χώρο αερίου. Διεξάγεται δοκιμή πηγαδιού σε βάθος 5100 ft , από τα οποία προσδιορίζεται ότι η πίεση αερίου είναι 2377 psia , και από την ανάλυση ενός συλλεγμένου δείγματος, ότι η κλίση αερίου στον ταμιευτήρα είναι 0.08 psi/ft. Από αυτά τα δεδομένα η εξίσωση της γραμμής πίεσης αερίου, μπορεί να καθοριστεί ως

$$p_0 = 0.08D + 1969 \text{ (psia)} \quad (1.12)$$

Εφόσον δε βλέπουμε καθόλου πετρέλαιο στον ταμιευτήρα, ο μηχανικός μπορεί να υποθέσει ότι έχει διεισδύσει σε έναν ταμιευτήρα που περιέχει μόνο αέριο, και προέκτεινε ώστε να συναντήσει την κανονική γραμμή υδροστατικής πίεσης ,

$$p_w = 0.45D + 15 \text{ (psia)} \quad (1.13)$$

Σε βάθος των 5281 ft, στο οποίο  $p_w = p_g$ . Αυτό το επίπεδο που έχει σημειωθεί στο σχήμα 5, ως η πιθανότερα βαθύτερη επαφή αερίου-νερού, θεωρώντας ότι δεν υπάρχει πετρέλαιο.

Εναλλακτικά, δεδομένου ότι το βαθύτερο σημείο στο οποίο μπορεί να παρατηρηθεί αέριο στον ταμιευτήρα είναι στα 5150 ft, δεν υπάρχει κανένας φυσικός λόγος ώστε μία στήλη πετρελαίου να μην επεκτείνεται ακριβώς κάτω από αυτό το σημείο. Η πίεση του πετρελαίου στην κορυφή, σε μία τέτοια στήλη, θα ήταν ισοδύναμη με την πίεση των αερίων, η οποία μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την εξίσωση 1.9 ως 2381 psia. Εξού και η εξίσωση της γραμμής πίεσης του πετρελαίου, θεωρώντας ότι η κλίση του πετρελαίου που χρησιμοποιήθηκε πριν των 0.35psi/ft, θα είναι,

$$p_0 = 0.35D + 579 \text{ (psia)} \quad (1.14)$$

Και λύνοντας το ταυτόχρονα με την εξίσωση 1.7, για την συνθήκη  $p_0 = p_w$ , δίνει την επαφή πετρελαίου-νερού, στο βάθος των 5640ft. Αυτό σημειώνεται στο σχήμα 5, ως η πιθανή βαθύτερη επαφή πετρελαίου-νερού και αντιστοιχεί στη μέγιστη πιθανή στήλη πετρελαίου. Έτσι, παρά το γεγονός ότι ο ταμιευτήρας έχει ελεγχθεί προσεκτικά, παραμένει υψηλός βαθμός αβεβαιότητας ως προς την έκταση οποιασδήποτε στήλης πετρελαίου. Θα μπορούσε πράγματι να είναι μηδέν, ή σε μία πιο αισιόδοξη περίπτωση, θα μπορούσε να επεκτείνεται για 490 ft, ή εναλλακτικά, υποθέτουμε μία τιμή ανάμεσα σε αυτά τα δύο όρια. Επίσης, η στήλη στο σχήμα 5, είναι η ίδια με αυτή στο σχήμα 4.

Επομένως, το ερώτημα που τίθεται πάντα, σχετικά με τη διείσδυση ενός ταμιευτήρα που περιέχει μόνο αέριο, υπάρχει μία σημαντική στήλη πετρελαίου, ή στεφάνη πετρελαίου, που μπορεί να αναπτυχθεί; Ο μόνος σίγουρος τρόπος για να ανακαλυφθεί είναι να γίνει διάτρηση ενός ταμιευτήρα αρκετά χαμηλότερα από την κατασκευή, ή εάν είναι εφικτό μηχανικά, να συνδεθεί ξανά και να παρεκκλίνει από την αρχική τρύπα. Κατά τον προγραμματισμό της γεώτρησης ενός πηγαδιού, δεν είναι πάντα σκόπιμο να στοχεύετε το πηγάδι στο υψηλότερο σημείο της κατασκευής. Κάνοντας κάτι τέτοιο, τείνει να μεγιστοποιήσει την πιθανότητα εύρεσης υδρογονανθράκων, αλλά θα αντιταχθεί σε έναν από τους πρωταρχικούς στόχους στη γεώτρηση ερευνητικών πηγαδιών, το οποίο είναι για να συγκεντρώσει όσο το δυνατόν περισσότερες πληροφορίες για τον ταμιευτήρα και για τα περιεχόμενά τους.



Έχοντας προσδιορίσει της επαφές ρευστών στον ταμιευτήρα, χρησιμοποιώντας τις μεθόδους που περιγράφονται σε αυτό το κεφάλαιο, ο μηχανικός είναι στη θέση να υπολογίσει τον καθαρό όγκο  $V$  που απαιτείται για τον υπολογισμό των υδρογονανθράκων.

Τέλος, όσον αφορά την εφαρμογή της εξίσωσης 1.2, η σωστή τιμή για το πετρέλαιο μπορεί να αποκτηθεί μόνο εάν όλες οι παράμετροι στην εξίσωση είναι πραγματικά αντιπροσωπευτικές των μέσων τιμών σε όλον τον ταμιευτήρα. Δεδομένου ότι είναι απίθανο να ληφθούν τέτοιες τιμές, είναι πιο συνηθισμένο να εκπροσωπείται κάθε παράμετρο στην εξίσωση του πετρελαίου με κατανομή πιθανότητας, παρά με καθορισμένη τιμή. Για παράδειγμα, μπορεί να υπάρχουν διαφορετικές γεωλογικές ερμηνείες της κατασκευής που δίνουν ένα εύρος τιμών του καθαρού όγκου  $V$ , οι οποίες θα μπορούσαν να εκφραστούν ως πιθανότητα κατανομής της τιμής της παραμέτρου.

Έτσι, η εξίσωση πετρελαίου (STOIP) αξιολογείται χρησιμοποιώντας μία διαδικασία στατιστικού υπολογισμού, ανάλογα με την ποιότητα των δεδομένων που θα εισαχθούν, και τα αποτελέσματα εκφράζονται με όρους κατανομής πιθανοτήτων του πετρελαίου (STOIP). Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι ενώ η μέση τιμή του πετρελαίου (STOIP) μπορεί να εξαχθεί από την τελική κατανομή, τα αποτελέσματα μπορούν επίσης να διατυπωθούν ως προς την αβεβαιότητα που επισυνάπτεται σε αυτό το σχήμα, που εκφράζεται, για παράδειγμα, ως τυπική απόκλιση για το μέσο. Εάν αυτή η αβεβαιότητα είναι πολύ μεγάλη, μπορεί να είναι απαραίτητο να γίνει διάτρηση ενός επιπλέον πηγαδιού ή πηγαδιών, ώστε να υπολογιστεί το εύρος προτού ξεκινήσει η διαδικασία για την ανάπτυξη του πεδίου.

### 1.3 Συντελεστής ανάκτησης

Η εξίσωση 1.2, για το πετρέλαιο (STOIP), μπορεί να μετατραπεί σε εξίσωση για τον υπολογισμό της τελικής ανάκτησης πετρελαίου, πολλαπλασιάζοντας απλώς με τον συντελεστή ανάκτησης (RF), ο οποίος είναι ένας αριθμός μεταξύ του μηδενός και μιας μονάδας που αντιπροσωπεύει το κλάμα του ανακτήσιμου πετρελαίου, έτσι,



$$Ultimate Recovery (UR) = \left( \frac{V_{\phi}(1-S_{wc})}{B_o} \right) \times RF \quad (1.15)$$

Παρόλο που είναι εύκολο να πούμε ότι απλά πολλαπλασιάζουμε με τον συντελεστή ανάκτησης, είναι πολύ πιο δύσκολο να προσδιορίσουμε ποιος πρέπει να είναι αυτός ο συντελεστής για κάθε δεδομένο ταμιευτήρα, και πράγματι, ο καθορισμός του αριθμού αυτού είναι το πιο σημαντικό έργο στη μηχανική ταμιευτήρα.

Για αρχή, μπορεί κανείς να ξεχωρίσει ξεκάθαρα δύο τύπους παράγοντα ανάκτησης. Υπάρχει ένας που διέπεται από τις τρέχουσες οικονομικές συνθήκες και, όλο και περισσότερο, από περιβαλλοντικά και οικολογικά ζητήματα, ενώ ο δεύτερος μπορεί να χαρακτηριστεί ως καθαρά τεχνικός παράγοντας ανάκτησης ανάλογα με τη φυσική του συστήματος ταμιευτήρα-ρευστών.

Οι δύο κύριες κατηγορίες ανάκτησης υδρογονανθράκων ονομάζονται πρωταρχική και συμπληρωματική. Η πρωταρχική ανάκτηση είναι ο όγκος των υδρογονανθράκων που μπορεί να παραχθεί μέσω της χρήσης της φυσικής ενέργειας που είναι διαθέσιμη στον ταμιευτήρα και στον γειτονικό υδροφόρο ορίζοντα. Αντίθετα, η συμπληρωματική ανάκτηση είναι το ανακτώμενο πετρέλαιο προσθέτοντας ενέργεια στο σύστημα ταμιευτήρα-ρευστών. Ο πιο κοινός τύπος της συμπληρωματικής ανάκτησης είναι η πλημμύρα με νερό στην οποία το νερό εγχύεται στον ταμιευτήρα και μετατοπίζει το πετρέλαιο προς τα πηγάδια παραγωγής, αυξάνοντας έτσι τη φυσική ενέργεια του συστήματος.

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

$$c = - \frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \Big|_t \quad (1.16)$$

Η ισοθερμική συμπιεστότητα συνήθως εφαρμόζεται στην πλειονότητα των υπολογισμών της μηχανικής ταμιευτήρα επειδή θεωρείται μία λογική προσέγγιση ότι καθώς τα ρευστά παράγονται, και απομακρύνεται έτσι η θερμότητα από τον ταμιευτήρα μέσω μεταφοράς, το καπάκι και ο κύριος βράχος, τα οποία θεωρούνται ότι συμπεριφέρονται ως πηγές θερμότητας άπειρης έκτασης, αμέσως αντικαθιστούν τη θερμότητα με αγωγή έτσι ώστε η θερμοκρασία του ταμιευτήρα να παραμένει σταθερή. Επομένως, η συμπιεστότητα, όταν αναφέρεται στο κείμενο, πρέπει πάντα να ερμηνεύεται ως ισοθερμική συμπιεστότητα.

Η χρήση του αρνητικού πρόσημου είναι απαραίτητη στην εξίσωση 1.16, διότι η συμπιεστότητα ορίζεται ως θετικός αριθμός, ενώ το πηλίκο  $dV/dp$ , είναι αρνητικό, καθώς τα ρευστά διογκώνονται όταν η πίεση μειώνεται. Όταν χρησιμοποιείται ο όρος

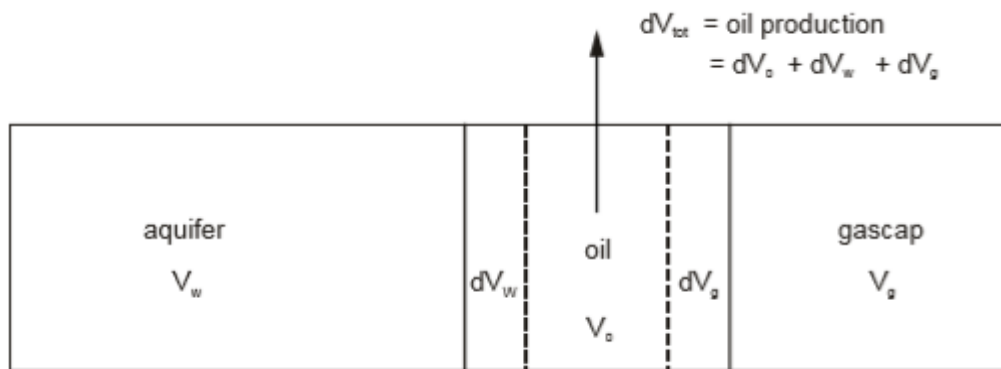
της συμπιεστότητας μεμονωμένα, για να περιγραφεί η εξάντληση του ταμιευτήρα, είναι πιο επεξηγηματικό να εκφράζεται με τη μορφή

$$dV = c V \Delta p$$

όπου  $dV$ , είναι μια επέκταση και  $\Delta p$  μία πτώση πίεσης, τα οποία και τα δύο είναι θετικά. Αυτή είναι η πιο βασική εξίσωση στην οποία βασίζονται όλες οι μορφές των μηχανισμών πρωταρχικής ανάκτησης. Στον ταμιευτήρα, εάν το  $\Delta p$  λαμβάνεται υπόψη ως πτώση πίεσης από το αρχικό σε κάποια χαμηλότερη πίεση,  $p_i - p$ , τότε το  $dV$  θα είναι η αντίστοιχη διαστολή ρευστών, η οποία εκδηλώνεται και μόνη της ως παραγωγή.

Η ικανότητα στη δημιουργία ενός υψηλού πρωταρχικού παράγοντα ανάκτησης, χρησιμοποιώντας τη φυσική ενέργεια του ταμιευτήρα, είναι για να διασφαλιστεί ότι το  $dV$ , που είναι η παραγωγή, είναι το πιο εμπορικά πολύτιμο ρευστό στον ταμιευτήρα, δηλαδή το πετρέλαιο. Ο τρόπος με τον οποίο αυτό μπορεί να γίνει φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

Σχήμα 6 : Πρωταρχική ανάκτηση πετρελαίου, αποτέλεσμα της επέκτασης πετρελαίου, νερού, αερίου



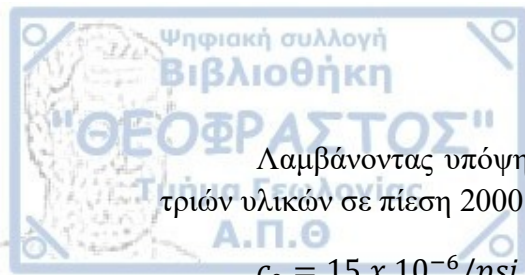
Πηγή : Dake L. (1978)

Το διάγραμμα δείχνει το αρκετά προφανές γεγονός ότι για την παραγωγή ενός ταμιευτήρα πετρελαίου, τα φρεάτια πρέπει να τρυπηθούν στη ζώνη πετρελαίου. Εάν ο ταμιευτήρας είναι σε επαφή με ένα καπάκι αερίου και έναν υδροφόρο ορίζοντα, η παραγωγή πετρελαίου λόγω μίας ομοιόμορφης πτώσης της πίεσης,  $\Delta p$ , σε ολόκληρο το σύστημα, θα έχει υλικά λόγω της ξεχωριστής επέκτασης του πετρελαίου, αερίου και νερού, έτσι ,

$$dV_{TOT} = \text{Oil Production} = dV_o + dV_w + dV_g \quad (1.17)$$

Στην οποία, η ισορροπία εκφράζεται σε όγκους ρευστών σε συνθήκες ταμιευτήρα. Εφαρμόζοντας την εξίσωση 1.12 , αυτό μπορεί να εκφραστεί ως

$$dV_{TOT} = c_o V_o \Delta p + c_w V_w \Delta p + c_g V_g \Delta p \quad (1.18)$$



Λαμβάνοντας υπόψη τους ακόλουθους αριθμούς για τις συμπιεστότητες των τριών υλικών σε πίεση 2000 psia,

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

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

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

Είναι προφανές ότι η συνεισφορά στο  $dV_{TOT}$  που παρέχεται από την επέκταση πετρελαίου και νερού, θα είναι σημαντική εάν τόσο το  $V_o$  όσο και το  $V_w$ , οι αρχικοί όγκοι του πετρελαίου και του νερού, είναι μεγάλοι. Σε αντίθεση, εξαιτίας της μεγάλης συμπιεστότητας, ακόμη και ένας σχετικά μικρός όγκος αερίου, θα συμβάλει σημαντικά στην παραγωγή πετρελαίου.

Επομένως, παρόλο που είναι προφανές ότι δε μπορεί να παράγει έναν υδροφόρο ορίζοντα, αλλά να αφήσει το νερό να επεκταθεί και να μετακινήσει το πετρέλαιο, έτσι και το αέριο, παρόλο που έχει εμπορική αξία, συχνά κρατείται μέσα στον ταμιευτήρα και αφήνεται έτσι ώστε να διαδραματίσει τον δικό του σημαντικό ρόλο στην πρωταρχική ανάκτηση, μέσω της επέκτασής του.

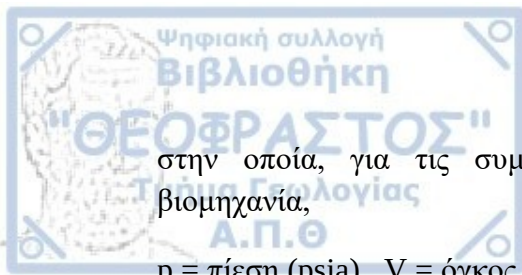
## 1.4 Μηχανική ογκομετρικού ταμιευτήρα αερίου

Η μηχανική ογκομετρικού ταμιευτήρα αερίου εισάγεται εξαιτίας της σχετικής απλότητας του θέματος. Επομένως, θα χρησιμοποιηθεί για να απεικονίσει πως μπορεί να προσδιοριστεί ο συντελεστής ανάκτησης και μια χρονική κλίμακα προσαρτημένη στην ανάκτηση (Katz, 1959).

Ο λόγος της απλότητας οφείλεται στο γεγονός ότι το αέριο είναι μία από τις λίγες ουσίες των οποίων η κατάσταση, όπως ορίζεται από την πίεση, όγκο και θερμοκρασία, μπορεί να περιγραφεί με μια απλή σχέση που θα περιλαμβάνει και τις τρεις παραμέτρους. Μία άλλη παρόμοια ουσία είναι ο κορεσμένος ατμός, αλλά για το πετρέλαιο που περιέχει διαλυμένο αέριο, για παράδειγμα, δεν υπάρχει τέτοια σχέση και όπως θα φανεί και παρακάτω, οι παράμετροι πίεσης, όγκου και θερμοκρασίας πρέπει να προέρχονται εμπειρικά οι οποίες εξυπηρετούν τον σκοπό καθορισμού της κατάστασης του μείγματος.

Η εξίσωση της κατάστασης για ένα ιδανικό αέριο, δηλαδή, στην οποία οι ενδομοριακές έλξεις και ο όγκος που καταλαμβάνουν τα μόρια είναι αμελητέες είναι,

$$pV = nRT \quad (1.19)$$



στην οποία, για τις συμβατικές μονάδες πεδίου που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία,

$p$  = πίεση (psia) ,  $V$  = όγκος (cu.ft)

$T$  = απόλυτη θερμοκρασία – βαθμούς Rankine ( $R=460+F$ )

$N$  = ο αριθμός των lb. Moles, όπου ένα lb. mole, είναι το μοριακό βάρος του αερίου εκφρασμένο σε pounds.

Και  $R$ = η παγκόσμια σταθερά αερίου η οποία, για τις παραπάνω μονάδες, έχει την τιμή 10.732 psia.cu.ft/lb.mole.R

Η εξίσωση είναι αποτέλεσμα των συνδυασμένων προσπαθειών των Boyle, Charles, Avogadro και Gay Lussac και ισχύει μόνο για πιέσεις κοντά στην ατμοσφαιρική, για τις οποίες προήλθε πειραματικά και στις οποίες τα αέρια συμπεριφέρονται ως ιδανικά.

Πολλές προσπάθειες έχουν γίνει στο παρελθόν για να ληφθούν υπόψη οι αποκλίσεις ενός πραγματικού αερίου, από την εξίσωση του ιδανικού αερίου, κάτω από ακραίες συνθήκες. Ένα από τα πιο διάσημα από αυτά είναι η εξίσωση του van der Waals, για την οποία ένα lb.mole αερίου μπορεί να εκφραστεί ως ,

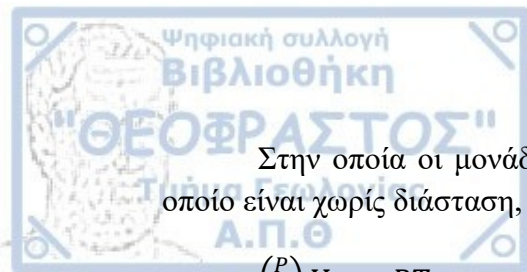
$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT \quad (1.20)$$

Κατά τη χρήση αυτής της εξίσωσης, υποστηρίζεται ότι η πίεση, μετρούμενη στο τοίχωμα ενός δοχείου που περιέχει πραγματικό αέριο, είναι χαμηλότερη από ό,τι θα ήταν εάν το αέριο ήταν ιδανικό. Αυτό συμβαίνει διότι η ορμή ενός μορίου αερίου που πρόκειται να χτυπήσει τον τοίχο μειώνεται από τις ενδομοριακές έλξεις, και έτσι, η πίεση, η οποία είναι ανάλογη με τον ρυθμό αλλαγής της ορμής, μειώνεται. Για να διορθωθεί αυτό, θα πρέπει ο όρος  $a/V^2$  να προστεθεί στην παρατηρούμενη πίεση, όπου το  $a$  είναι μία σταθερά εξαρτώμενη με τη φύση του αερίου. Ομοίως, ο όγκος  $V$ , που μετριέται υποθέτοντας ότι τα μόρια καταλαμβάνουν αμελητέο χώρο, πρέπει να μειωθεί για ένα πραγματικό αέριο από τον παράγοντα  $b$  ο οποίος εξαρτάται από τη φύση του αερίου.

Το κύριο μειονέκτημα στην προσπάθεια χρήσης της εξίσωσης 1.19, για την περιγραφή της συμπεριφοράς των πραγματικών αερίων που συναντώνται σε ταμειυτήρες είναι ότι η μέγιστη πίεση για την οποία εφαρμόζεται η εξίσωση είναι ακόμη πολύ πιο χαμηλά από το φυσιολογικό εύρος πιέσεων των ταμειυτήρων.

Πιο πρόσφατες και πιο επιτυχημένες εξισώσεις έχουν προκύψει, - οι εξισώσεις Beattie-Bridgeman και Benedict-Webb-Rubin, για παράδειγμα, αλλά η εξίσωση που χρησιμοποιείται πιο συχνά στην πράξη από τη βιομηχανία είναι

$$pV = ZnRT$$



Στην οποία οι μονάδες είναι ίδιες όπως και στην εξίσωση 1.19 και το  $Z$ , το οποίο είναι χωρίς διάσταση, ονομάζεται παράγοντας  $Z$ . Εκφράζοντας την εξίσωση ως

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

Ο παράγοντας  $Z$  μπορεί να ερμηνευθεί ως ένας όρος με τον οποίο πρέπει να διορθωθεί η πίεση για να ληφθεί υπόψη η απόκλιση για την εξίσωση ιδανικού αερίου.

Ο παράγοντας  $Z$  είναι συνάρτηση της πίεσης και της απόλυτης θερμοκρασίας, αλλά για τους σκοπούς της μηχανικής ταμιευτήρων, το κύριο ενδιαφέρον έγκειται στον προσδιορισμό του  $Z$ , συνάρτηση τη πίεσης σε σταθερή θερμοκρασία ταμιευτήρα. Η σχέση  $Z(p)$  που αποκτήθηκε είναι κατάλληλη για την περιγραφή εξάντλησης των ισοθερμικών ταμιευτήρων.

## 1.5 Ανάλυση Πίεσης, Όγκου, Θερμοκρασίας για το πετρέλαιο

Στις παραπάνω ενότητες, τονίστηκε η σημασία της ανάλυσης της πίεσης, του όγκου και της θερμοκρασίας (PVT) για τη συσχέτιση των παρατηρούμενων όγκων παραγωγής στην επιφάνεια με την αντίστοιχη υπόγεια ανάκτηση. Για το αέριο, αυτή η σχέση θα μπορούσε να αποκτηθεί με τον καθορισμό μονοφασικού ή διφασικού παράγοντα  $Z$  και τη χρήση της εξίσωσης της κατάστασης. Η βασική ανάλυση των PVT που απαιτείται για να συσχετιστεί η επιφανειακή παραγωγή με την υπόγεια ανάκτηση για έναν ταμιευτήρα πετρελαίου είναι αναγκαστικά πιο περίπλοκη λόγω της παρουσίας, κάτω από την πίεση του bubblepoint, τόσο υγρού πετρελαίου όσο και της φάσης του ελεύθερου αερίου στον ταμιευτήρα.

Η σχέση μεταξύ Πίεσης-Όγκου-Θερμοκρασίας, για ένα πραγματικό αέριο μπορεί να περιγραφεί από την παρακάτω εξίσωση κατάστασης

$$pV = ZnRT$$

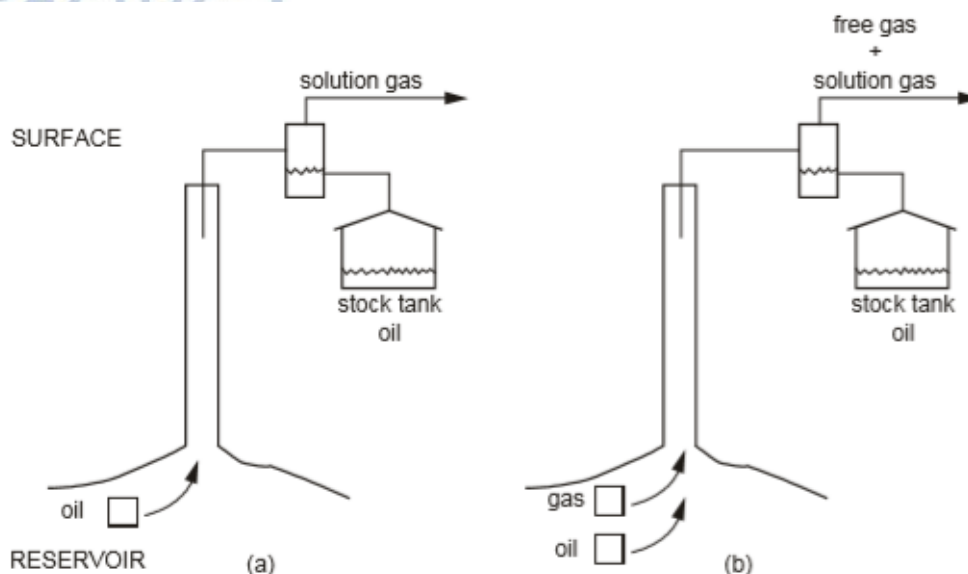
Στην οποία, ο παράγοντας  $Z$ , ο οποίος αντιπροσωπεύει την απόκλιση από την συμπεριφορά ενός ιδανικού αερίου, μπορεί να καθοριστεί όπως περιγράφηκε. Χρησιμοποιώντας αυτήν την εξίσωση, είναι σχετικά απλό θέμα να προσδιοριστεί η σχέση μεταξύ τον όγκο του αερίου στην επιφάνεια και τον όγκο στον ταμιευτήρα ως,

$$E = \frac{p}{p_{sc}} \times \frac{T_{sc}}{T} \times \frac{1}{Z} = 35.37 \frac{p}{ZT} \left( \frac{scf}{rcf} \right) \quad (1.21)$$

Δυστυχώς, δεν υπάρχει τόσο απλή εξίσωση κατάστασης που μπορεί να περιγράψει τις ιδιότητες PVT του πετρελαίου. Αντί αυτού, αρκετές, λεγόμενες PVT παράμετροι πρέπει να μετρηθούν με εργαστηριακή ανάλυση δειγμάτων αργού πετρελαίου. Έτσι, οι παράμετροι μπορούν μετά να εκφράσουν την σχέση μεταξύ επιφανειακών και μέσα στον ταμιευτήρα όγκων, ισοδύναμη με την εξίσωση 1.25.

Η πολυπλοκότητα στη συσχέτιση επιφανειακών όγκων παραγωγής υδρογονανθράκων, με τους αντίστοιχους όγκους στον ταμιευτήρα μπορούν να εκτιμηθούν με το παρακάτω σχήμα





Πηγή : Dake L. (1978)

Πάνω από το σημείο φυσαλίδας μόνο μία φάση υπάρχει στον ταμιευτήρα, αυτή του υγρού πετρελαίου. Εάν μια ποσότητα από αυτού του ακόρεστου πετρελαίου παραχθεί στην επιφάνεια, το αέριο θα διαχωριστεί όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, ο όγκος του αερίου που εξαρτάται από τις συνθήκες υπό τις οποίες πραγματοποιείται ο επιφανειακός διαχωρισμός. Σε αυτή την περίπτωση, είναι σχετικά εύκολο να συσχετιστούν οι επιφανειακοί όγκοι πετρελαίου και αερίου με τους όγκους σε συνθήκες ταμιευτήρα καθώς είναι γνωστό ότι όλο το παραγόμενο αέριο πρέπει να έχει διαλυθεί στο πετρέλαιο του ταμιευτήρα.

Εάν ο ταμιευτήρας είναι κάτω από το σημείο φυσαλίδας πίεσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 7, η κατάσταση είναι πιο περίπλοκη. Τώρα υπάρχουν δύο φάσεις υδρογονανθράκων στον ταμιευτήρα, κορεσμένο σε αέριο πετρέλαιο και απελευθερωμένο αέριο διαλύματος. Κατά τη παραγωγή στην επιφάνεια, το αέριο διαλύματος θα εξελιχθεί από την φάση πετρελαίου και η συνολική επιφανειακή παραγωγή αερίου θα έχει δύο συστατικά, το αέριο που ήταν ελεύθερο στον ταμιευτήρα και το ελεύθερο αέριο από το πετρέλαιο κατά την παραγωγή. Αυτά τα ξεχωριστά συστατικά δε μπορούν να διακριθούν στην επιφάνεια και το πρόβλημα είναι, επομένως, πώς να χωρίσουμε την παρατηρούμενη παραγωγή επιφανειακού αερίου σε όγκους απελευθερωμένων και διαλυμένων αερίων στον ταμιευτήρα.

Κάτω από το σημείο φυσαλίδας πίεσης υπάρχει μία επιπρόσθετη επιπλοκή στο ότι το απελευθερωμένο αέριο διαλύματος στον ταμιευτήρα ταξιδεύει με διαφορετική ταχύτητα σε σχέση με το υγρό πετρέλαιο, όταν και τα δύο υπόκεινται στην ίδια διαφορά πίεσης. Η ταχύτητα ροής ενός ρευστού σε ένα πορώδες μέσο είναι αντιστρόφως ανάλογη με το ιξώδες του ρευστού. Συνήθως το ιξώδες του αερίου σε έναν ταμιευτήρα είναι περίπου πενήντα φορές μικρότερο από το υγρό πετρέλαιο και κατά συνέπεια η ταχύτητα ροής του αερίου είναι πολύ μεγαλύτερη. Ως αποτέλεσμα ,

είναι λογικό όταν παράγεται από τον ταμιευτήρα στον οποίον υπάρχει κορεσμένο ελεύθερο αέριο, ότι το παραγόμενο αέριο θα βρίσκεται σε δυσανάλογες ποσότητες σε σχέση με το πετρέλαιο. Δηλαδή, ένα βαρέλι πετρελαίου μπορεί να παραχθεί μαζί με έναν όγκο αερίου που θα ξεπερνά τον αρχικό όγκο που διαλύθηκε ανά βαρέλι πετρελαίου πάνω από το σημείο φυσαλίδας πίεσης.

Ο έλεγχος σχετικά με τη συσχέτιση των επιφανειακών όγκων παραγωγής με την υπόγεια ανάκτηση επιτυγχάνεται με τον καθορισμό των παρακάτω τριών παραμέτρων PVT που μπορούν να μετρηθούν όλες με εργαστηριακά πειράματα που πραγματοποιούνται σε δείγματα του ταμιευτήρα πετρελαίου, μαζί με το διαλυμένο, αρχικά, αέριο.

$R_s$  – Η αναλογία διαλυμένου αερίου πετρελαίου, που είναι ο αριθμός στάνταρ κυβικών ποδιών αερίου που διαλύονται σε ένα stock tank βαρέλι πετρελαίου όταν και τα δύο μεταφέρονται στον ταμιευτήρα με την επικρατούσα πίεση και θερμοκρασία ταμιευτήρα (μονάδες – scf.gas/stb πετρέλαιο).

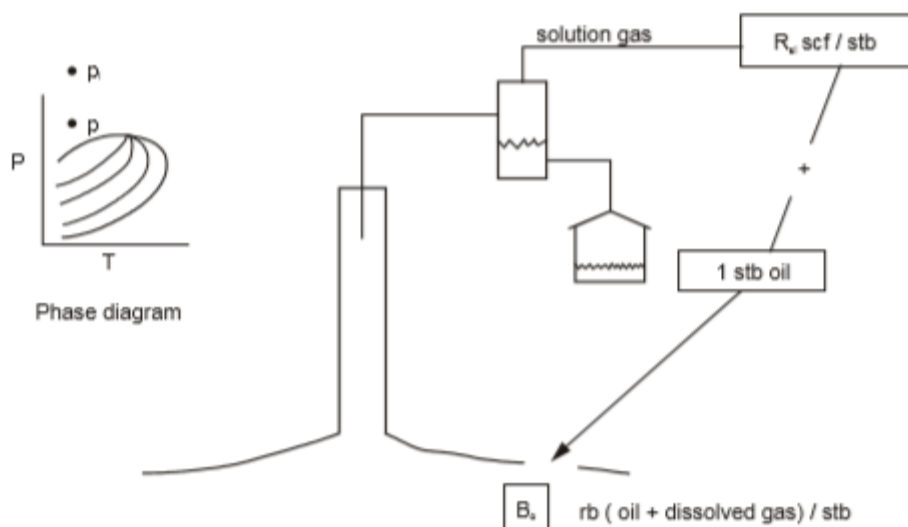
$B_o$  – Ο συντελεστής όγκου σχηματισμού πετρελαίου, είναι ο όγκος σε βαρέλια που κρατούνται στον ταμιευτήρα, στην επικρατούσα πίεση και θερμοκρασία, από ένα stock tank βαρέλι πετρελαίου μαζί με το διαλυμένο του αέριο (μονάδες – rb (πετρέλαιο και διαλυμένο αέριο)/stb πετρέλαιο).

$B_g$  – Ο συντελεστής όγκου σχηματισμού αερίου, που είναι ο όγκος σε βαρέλια όπου ένα στάνταρ κυβικό πόδι αερίου θα συμπεριφερθεί ως ελεύθερο αέριο στον ταμιευτήρα στην επικρατούσα πίεση και θερμοκρασία ταμιευτήρα (μονάδες – rb ελεύθερου αερίου/ssf αερίου).

Τόσο το στάνταρ κυβικό πόδι (scf) όσο και το stock tank βαρέλι που αναφέρονται παραπάνω, ορίζονται σε συνθήκες των 60 F και μία ατμόσφαιρα (14.7 psia). Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι τα  $R_s$  και  $B_o$  και τα δύο μετρούνται σε σχέση με ένα stock tank βαρέλι πετρελαίου, το οποίο είναι η βασική μονάδα που χρησιμοποιείται στο πεδίο. Και οι τρεις παράμετροι είναι αυστηρά συναρτήσεως της πίεσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.5, υποθέτοντας ότι η θερμοκρασία του ταμιευτήρα παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια της εξάντλησης.

Ο τρόπος με τον οποίο αυτές οι παράμετροι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη συσχέτιση των μετρημένων όγκων επιφάνειας με τους όγκους του ταμιευτήρα, απεικονίζεται στα σχήματα 8 και 9.

Σχήμα 8 : Εφαρμογή των PVT παραμέτρων για το συσχετισμό επιφανειακών όγκων υδρογονανθράκων με όγκων ταμιευτήρα, πάνω από το bubblepoint πίεσης



Πηγή : **Dake L. (1978)**

Το σχήμα 8 απεικονίζει την κατάσταση κατά την οποία η πίεση του ταμιευτήρα έχει μειωθεί από την αρχική της τιμή  $p_1$  σε κάποια χαμηλότερη τιμή  $p$ , η οποία είναι ακόμη πάνω από το σημείο φυσαλίδας. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα P-T, το μόνο ρευστό στον ταμιευτήρα είναι το ακόρεστο υγρό πετρέλαιο. Όταν αυτό το πετρέλαιο παράγεται στην επιφάνεια κάθε stock tank βαρέλι θα αποδίδει, κατά το διαχωρισμό πετρελαίου αερίου,  $R_{si}$  στάνταρ κυβικών ποδιών αερίου. Δεδομένου ότι το πετρέλαιο είναι ακόρεστο με αέριο, το οποίο σημαίνει ότι θα μπορούσε να διαλύσει περισσότερο εάν το τελευταίο ήταν διαθέσιμο, τότε η αρχική τιμή του λόγου διαλυμένου αερίου πετρελαίου θα πρέπει να μείνει σταθερή σε  $R_{si}$  (scf/stb) μέχρι η πίεση να πέσει στο σημείο φυσαλίδας, μέχρι το πετρέλαιο να κορεστεί, όπως φαίνεται και στο σχήμα 11(b)

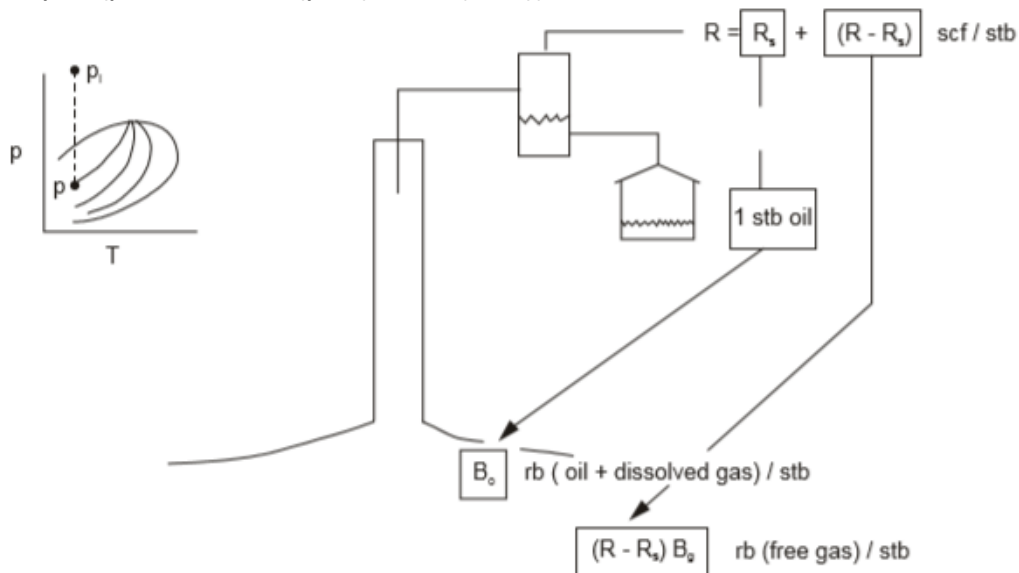
Το σχήμα 8, δείχνει επίσης, σύμφωνα με τους ορισμούς των  $B_o$  και  $R_s$ , ότι εάν το  $R_{si}$  scf του αερίου μεταφερθεί στον ταμιευτήρα με ένα stock tank βαρέλι πετρελαίου, τότε το αέριο θα διαλυθεί εντελώς στο πετρέλαιο στην πίεση και στη θερμοκρασία του ταμιευτήρα για να δώσει όγκο  $B_o$  rb πετρελαίου μαζί με διαλυμένο αέριο. Το σχήμα 11(a) δείχνει ότι το  $B_o$  αυξάνεται ελαφρώς καθώς η πίεση μειώνεται από την αρχική στο σημείο φυσαλίδας πίεσης. Αυτό το αποτέλεσμα οφείλεται στην διαστολή του υγρού και δεδομένου ότι η συμπίεστικότητα του ακόρεστου πετρελαίου στον ταμιευτήρα είναι χαμηλή, η διαστολή είναι σχετικά μικρή.

Οι τυπικές τιμές των  $B_o$  και  $R_s$  πάνω από το σημείο φυσαλίδας υποδεικνύονται στο σχήμα 11. η αρχική τιμή του συντελεστή όγκου σχηματισμού πετρελαίου  $B_{oi}$  είναι 1.2417 που αυξάνεται σε 1.2511 στο σημείο φυσαλίδας. Έτσι, αρχικά, 1.2417 βαρέλια ταμιευτήρα πετρελαίου μαζί με το διαλυμένο αέριο θα παράγουν ένα stock tank βαρέλι πετρελαίου. Αυτός είναι μάλλον ένας ευνοϊκός λόγος που δείχνει ένα πετρέλαιο μέτριας πηκτηκότητας, και όπως θα αναμενόταν σε αυτή

την περίπτωση, ο αρχικός λόγος διαλυμένου αερίου πετρελαίου είναι επίσης σχετικά χαμηλός στα 510 scf/stb. Κάτω από λιγότερο ευνοϊκές συνθήκες, για περισσότερο πτητικό πετρέλαιο, το  $B_{oi}$  μπορεί να έχει υψηλότερες τιμές.

Κάτω από το σημείο φυσαλίδας η κατάσταση είναι πιο περίπλοκη, όπως φαίνεται και στο σχήμα 9

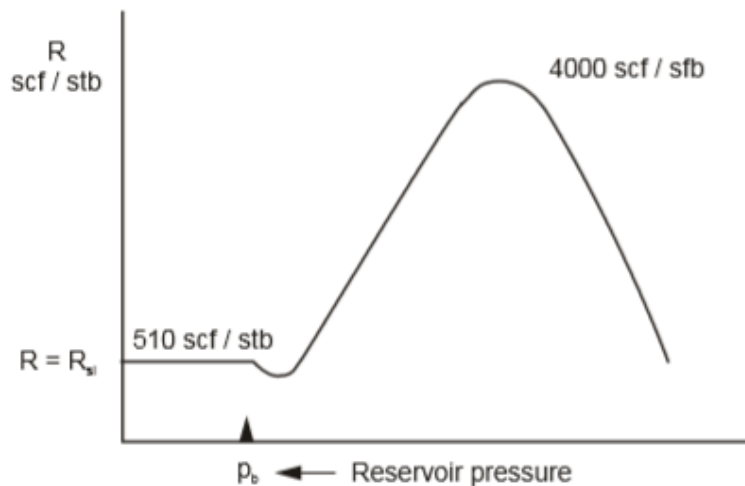
Σχήμα 9 : Εφαρμογή των PVT παραμέτρων για το συσχετισμό επιφανειακών όγκων υδρογονανθράκων με όγκων ταμιευτήρα, κάτω από το σημείο φυσαλίδας πίεσης



Πηγή : Dake L. (1978)

Σε αυτήν την περίπτωση, κάθε stock tank βαρέλι πετρελαίου παράγεται σε συνδυασμό με το  $R$  scf του αερίου, όπου  $R$  (scf/stb) ονομάζεται η στιγμιαία αναλογία ή αναλογία παραγόμενου αερίου πετρελαίου και μετριέται καθημερινά. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, μέρος αυτού του αερίου διαλύεται στο πετρέλαιο του ταμιευτήρα και απελευθερώνεται κατά την παραγωγή μέσω του διαχωριστή, ενώ το υπόλοιπο αποτελείται από αέριο το οποίο είναι ήδη ελεύθερο μέσα στον ταμιευτήρα. Επιπλέον, η τιμή του  $R$  μπορεί να υπερβεί σε μεγάλο βαθμό το  $R_{si}$ , την αρχική αναλογία διαλυμένου αερίου πετρελαίου, λόγω της υψηλής ταχύτητας της ροής αερίου σε σύγκριση με του πετρελαίου, είναι πολύ φυσιολογικό να παράγει δυσανάλογη ποσότητα αερίου. Αυτό προκύπτει από την αποτελεσματική κλοπή απελευθερωμένου αερίου από όλο τον ταμιευτήρα και την παραγωγή του μέσω των σχετικά απομονωμένων σημείων πρόσληψης, των φρεατίων. Μία τυπική γραφική παράσταση του  $R$  ως συνάρτηση της πίεσης ταμιευτήρα φαίνεται στο σχήμα 10.

Σχήμα 10 : Αναλογία παραγόμενου αερίου πετρελαίου ως συνάρτηση της μέσης πίεσης ταμιευτήρα για έναν τυπικό ταμιευτήρα διαλυμένου αερίου



Πηγή : Dake L. (1978)

Η αναλογία του παραγόμενου αερίου πετρελαίου μπορεί να χωριστεί σε δύο συστατικά όπως φαίνεται στο σχήμα 9 ,

$$R = R_s + (R - R_s)$$

Το πρώτο από αυτά,  $R_s$  scf/stb, όταν κατέβει στον ταμιευτήρα με ένα stock tank βαρέλι πετρελαίου, θα διαλυθεί στο πετρέλαιο με την επικρατούσα πίεση ταμιευτήρα για να δώσει  $B_o$  rb πετρελαίου μαζί με το διαλυμένο αέριο. Το υπόλοιπο ,  $(R - R_s)$  scf/stb, όταν κατέβει στον ταμιευτήρα θα καταλάβει όγκο

$$(R - R_s) \left( \frac{\text{scf}}{\text{stb}} \right) \times B_g \left( \frac{\text{rb}}{\text{scf}} \right) = (R - R_s) B_g (\text{rb} - \text{ελεύθερο αέριο/stb}) \quad (2.1)$$

Και έτσι, η συνολική υπόγεια ανάκτηση των υδρογονανθράκων που σχετίζεται με την παραγωγή ενός stock tank βαρελιού πετρελαίου είναι ,

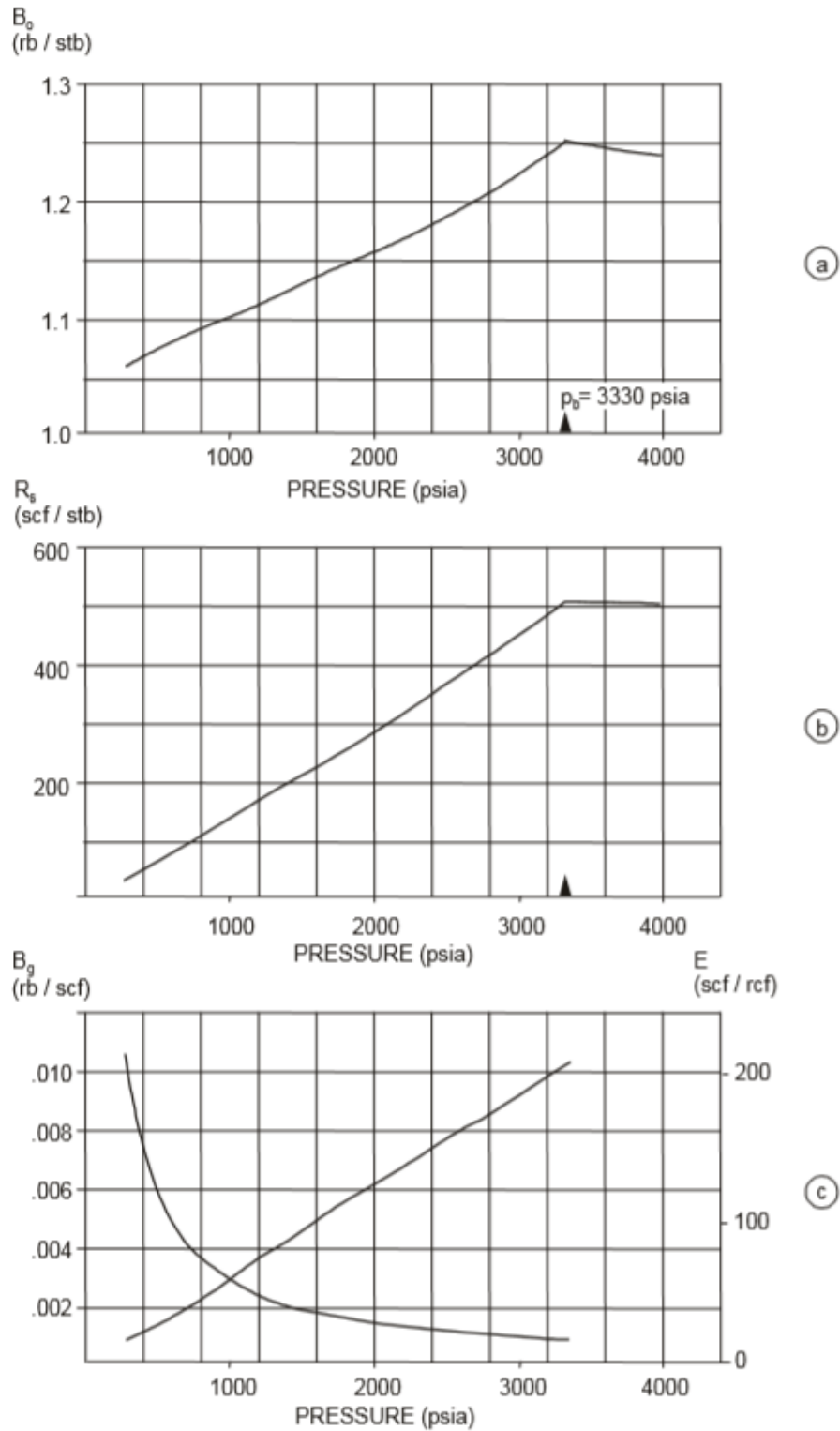
$$\frac{\text{Υπόγεια ανάκτηση}}{\text{stb}} = B_o + (R - R_s) B_g (\text{rb/stb}) \quad (2.2)$$

Η παραπάνω σχέση δείχνει γιατί ο παράγοντας όγκου σχηματισμού αερίου έχει τις μάλλον ατυχείς μονάδες rb/scf. Είναι απλώς για την μετατροπή αναλογιών αερίου πετρελαίου, μετρημένα σε scf/stb, απευθείας σε rb/stb ώστε να είναι συμβατές με τις μονάδες του  $B_o$ . Ενώ το  $B_g$  χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά στη μηχανική ταμιευτήρων πετρελαίου, το αντίστοιχο στη μηχανική ταμιευτήρων αερίου είναι το E, ο παράγοντας επέκτασης αερίου, με μονάδες μέτρησης scf/rcf. Η σχέση μεταξύ  $B_g$  και E , είναι

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

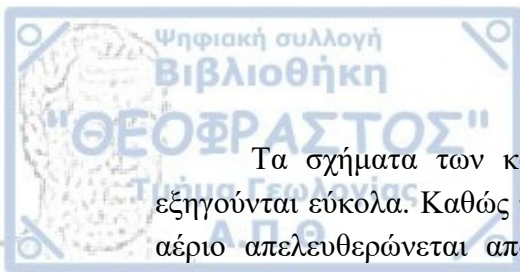
Έτσι, το  $B_g$  έχει πάντα πολύ μικρές τιμές, για παράδειγμα για μία τυπική τιμή του  $E$ , ας πούμε 150 scf/rcf η τιμή του  $B_g$  θα είναι 0.0119 rb/scf.

Σχήμα 11 : PVT παράμετροι συναρτήσει psi



Πηγή : Dake L. (1978)





Τα σχήματα των καμπυλών  $B_o$  και  $R_s$  κάτω από το σημείο φυσαλίδας εξηγούνται εύκολα. 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 stock tank βαρέλι στην τρέχουσα πίεση ταμιευτήρα, συνεχώς μειώνεται. Παρομοίως, δεδομένου ότι κάθε όγκος ταμιευτήρα πετρελαίου περιέχει μία μικρότερη ποσότητα διαλυμένου αερίου καθώς η πίεση πέφτει, ένα stock tank βαρέλι πετρελαίου θα ληφθεί από τους προοδευτικά μικρότερους όγκους του ταμιευτήρα πετρελαίου και το  $B_o$ , μειώνεται σταθερά με την πίεση.

## 1.6 Νόμος του Darcy και εφαρμογή του

Α. Ο εμπειρικός νόμος ροής του Darcy ήταν η πρώτη επέκταση των αρχών της κλασικής δυναμικής ρευστών στη ροή ρευστών διαμέσου πορωδών μέσων. Η σημασία του νόμου του Darcy είναι ότι εισάγει ρυθμό ροής στη μηχανική ταμιευτήρων και δεδομένου ότι η παραγωγή του επιφανειακού πετρελαίου από έναν ταμιευτήρα είναι ,

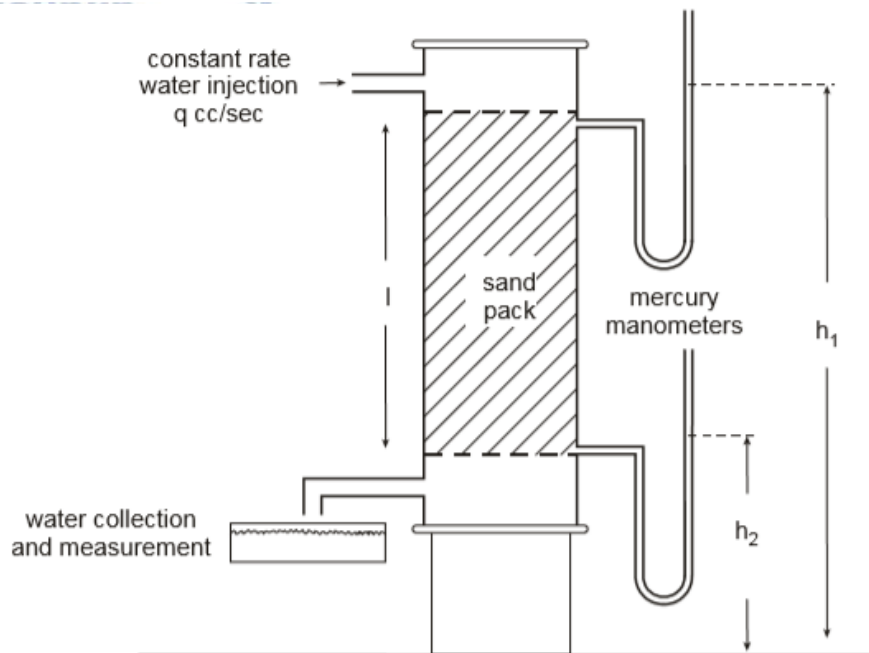
$$q_{res} = \frac{dN_p}{dt} \quad (1.22)$$

Ότι εισάγει έμμεσα μία χρονική κλίμακα στους υπολογισμούς ανάκτησης πετρελαίου.

Όπως και άλλοι κλάδοι της επιστήμης έχουν τους δικούς τους ήρωες έτσι και η μηχανική ταμιευτήρων έχει τον δικό της, τον Henry Darcy, που παρόλο που δεν το κατάλαβε, κέρδισε μία ξεχωριστή θέση στην ιστορία ως ο πρώτος πειραματικός μηχανικός ταμιευτήρων. Το 1856 ο Darcy δημοσίευσε μια λεπτομερή περιγραφή του έργου του, στη βελτίωση των υδάτινων έργων στη Dijon και ειδικότερα, στον σχεδιασμό ενός φίλτρου, αρκετά μεγάλου, για την επεξεργασία των καθημερινών αναγκών στο νερό της πόλης. Παρόλο που η δυναμική των ρευστών ήταν ένα αρκετά προηγμένο θέμα εκείνες τις μέρες, δεν υπήρχαν δημοσιεύματα για το φαινόμενο της ροής των ρευστών μέσω ενός πορώδους μέσου, και έτσι, ως πρακτικός άνθρωπος, ο Darcy σχεδίασε ένα φίλτρο όπως φαίνεται και στο σχήμα 12, σε μια προσπάθεια διερεύνησης του θέματος (Hubbert, 1956).

Ο εξοπλισμός αποτελείται από έναν σιδερένιο κύλινδρο που περιείχε ένα μη στερεοποιημένο πακέτο άμμου, μήκους περίπου ενός μέτρου, το οποίο συγκρατιόταν μεταξύ δύο διαπερατών σίτων γαζών. Τα μανόμετρα ήταν συνδεδεμένα με τον κύλινδρο αμέσως πάνω και κάτω από το πακέτο άμμου. Ρέοντας νερό μέσω του πακέτου, ο Darcy διαπίστωσε ότι, για οποιοδήποτε ρυθμό ροής, η ταχύτητα ροής ήταν άμεσα ανάλογα με τη διαφορά στα μανόμετρα ύψη, με τη σχέση να είναι ,

Σχήμα 12 : Σχηματική απεικόνιση του πειραματικού εξοπλισμού του Darcy



Πηγή : Dake L. (1978)

$$u = K \frac{h_1 - h_2}{l} = K \frac{\Delta h}{l} \quad (1.23)$$

Όπου,

U = ταχύτητα ροής σε cm/sec, που είναι ο συνολικός μετρούμενος ρυθμός ροής q cc/sec, διαιρούμενος με την περιοχή διατομής του πακέτου άμμου

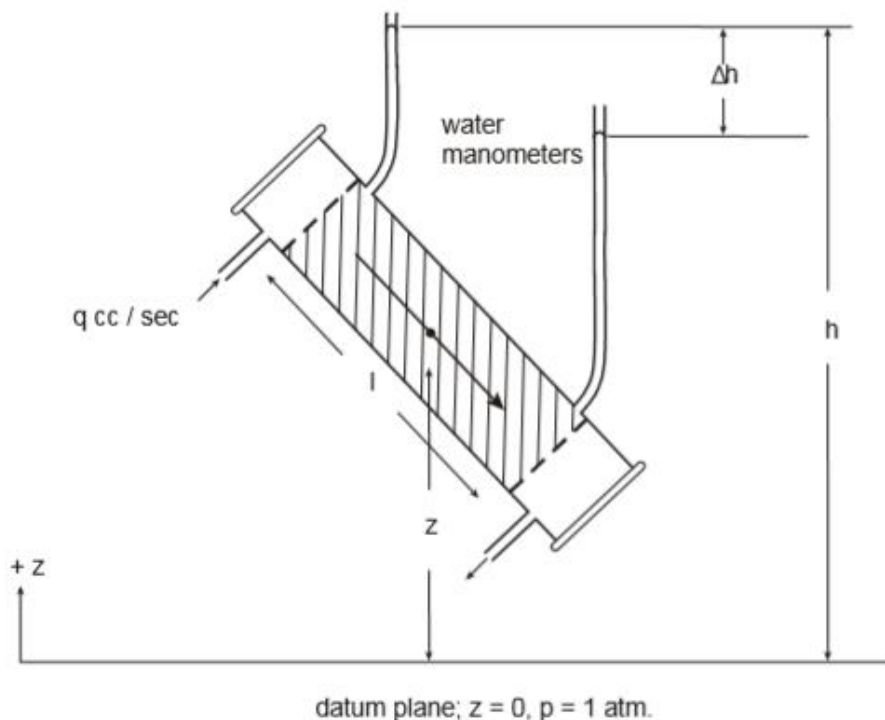
$\Delta h$  = η διαφορά στα επίπεδα των μανόμετρων , cm (ισοδύναμο νερού)

l = το συνολικό μήκος του πακέτου άμμου

K = σταθερά.

Η μόνη παραλλαγή του Darcy σε αυτό το πείραμα ήταν να αλλάξει τον τύπο του πακέτου άμμου, το οποίο είχε ως αποτέλεσμα την αλλαγή της τιμής της μεταβλητής K, διαφορετικά, όλα τα πειράματα διεξήχθησαν με νερό και επομένως, οι επιπτώσεις της πυκνότητας του νερού και του ιξώδους στη ροή δεν διερευνήθηκαν. Επιπλέον, ο σιδερένιος κύλινδρος παρέμενε πάντα σε κατακόρυφη θέση.

Στη συνέχεια, και άλλοι επανέλαβαν το πείραμα του Darcy, κάτω από λιγότερο περιοριστικές συνθήκες, και ένα από τα πρώτα πράγματα που έκαναν ήταν να προσανατολίσουν το πακέτο άμμου σε διαφορετικές γωνίες σε σχέση με το κατακόρυφο, όπως φαίνεται στο σχήμα 13. Διαπιστώθηκε, ωστόσο, ότι ανεξάρτητα από το προσανατολισμό του πακέτου άμμου, η διαφορά στο ύψος,  $\Delta h$ , ήταν πάντα ίδια για έναν δεδομένο ρυθμό ροής. Έτσι, ο πειραματικός νόμος του Darcy, αποδείχτηκε ανεξάρτητος από τη κατεύθυνση της ροής στο βαρυτικό πεδίο της Γης.



Πηγή : Dake L. (1978)

Είναι άξιο αναφοράς η σημασία του όρου  $\Delta h$  που εμφανίζεται στο νόμο του Darcy. Η πίεση σε οποιοδήποτε σημείο της διαδρομής ροής, σχήμα 13, το οποίο έχει υψόμετρο  $z$ , σε σχέση με το επίπεδο δεδομένων, μπορεί να εκφραστεί σε από απόλυτες μονάδες ως

$$p = \rho g(h-z)$$

σε σχέση με την επικρατούσα ατμοσφαιρική πίεση. Σε αυτή την εξίσωση το  $h$  είναι το υψόμετρο του υγρού στο άνω μανόμετρο, πάλι σε σχέση με το  $z=0$  και το  $\rho$  είναι η πυκνότητα του υγρού (νερό). Η εξίσωση μπορεί εναλλακτικά να εκφραστεί ως

$$hg = \left( \frac{p}{\rho} + gz \right)$$

Εάν η εξίσωση 1.22 γραφτεί διαφορετικά

$$u = K \frac{dh}{dl}$$

Τότε, διαφοροποιώντας την εξίσωση 1.23 και αντικαθιστώντας στην εξίσωση 4.3, έχουμε

$$u = \frac{K}{g} \frac{d}{dl} \left( \frac{p}{\rho} + gz \right) = \frac{K}{g} \frac{d(hg)}{dl}$$

Ο όρος  $\left(\frac{p}{\rho} + gz\right)$ , στην τελευταία εξίσωση, έχει τις ίδιες μονάδες όπως το  $hg$ , οι οποίες είναι : απόσταση  $\times$  δύναμη ανά μονάδα μάζας, που είναι, πιθανή ενέργεια ανά μονάδα μάζας. Σε αυτό το δυναμικό υγρού συνήθως δίνεται το σύμβολο  $\Phi$  και ορίζεται ως η απαιτούμενη εργασία, με μια διαδικασία χωρίς τριβή, για τη μεταφορά μίας μάζας υγρού από μία κατάσταση ατμοσφαιρικής πίεσης και μηδενικής ανύψωσης στο εν λόγω σημείο, έτσι

$$\Phi = \int_{1-atm}^p \frac{dp}{\rho} + gz \quad (1.24)$$

Αν και ορίζεται με αυτόν τον τρόπο, τα δυναμικά ρευστού δε μετρώνται πάντοτε σε σχέση με την ατμοσφαιρική πίεση και το μηδενικό ύψος, αλλά μάλλον σε σχέση με την αυθαίρετη πίεση βάσης και την ανύψωση ( $p_b$ ,  $z_b$ ) που τροποποιεί την εξίσωση 1.24 ως

$$\Phi = \int_{p_b}^p \frac{dp}{\rho} + g(z - z_b) \quad (1.25)$$

Ο λόγος για αυτό είναι ότι η ροή ρευστού ανάμεσα σε δύο σημεία Α και Β διέπεται από τη διαφορά δυναμικού μεταξύ των σημείων, όχι τα απόλυτα δυναμικά, δηλαδή

$$\Phi_A - \Phi_B = \int_{p_B}^{p_A} \frac{dp}{\rho} + g(z_A - z_b) - \int_{p_b}^{p_B} \frac{dp}{\rho} + g(z_B - z_b) = \int_{p_B}^{p_A} \frac{dp}{\rho} + g(z_A - z_B) \quad (1.26)$$

Είναι λοιπόν συμβατικό, στη μηχανική ταμιευτήρων να επιλέγεται ένα αυθαίρετο, βολικό επίπεδο δεδομένων, σχετικό με τον ταμιευτήρα, και να εκφράζονται όλα τα δυναμικά σε σχέση με το επίπεδο. Επιπλέον, εάν υποθεθεί ότι το ρευστό του ταμιευτήρα είναι ασυμπίεστο ( $\rho$  ανεξάρτητο της πίεσης) τότε η εξίσωση 1.24 εκφράζεται ως

$$\Phi = \frac{p}{\rho} + gz \quad (1.27)$$

Που είναι ακριβώς ο όρος που εμφανίζεται στην εξίσωση 1.23. Μπορεί επομένως να φανεί ότι ο όρος  $h$  της εξίσωσης του Darcy είναι άμεσα ανάλογος της διαφοράς στη δυναμική των ρευστών ανάμεσα στα άκρα του πακέτου άμμου.

Η σταθερά  $K / g$  ισχύει μόνο για τη ροή του νερού, που είναι το υγρό που χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά στα πειράματα του Darcy. Τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν με μια ποικιλία διάφορων υγρών, αποκάλυψαν ότι ο νόμος μπορεί να γενικευτεί ως

$$u = \frac{k\rho}{\mu} \frac{d\Phi}{dl} \quad (1.27)$$

Στην οποία η εξάρτηση της ταχύτητας ροής από την πυκνότητα υγρού  $\rho$  και ιξώδους  $\mu$ , είναι αρκετά προφανής. Η νέα μεταβλητή  $k$  έχει επομένως απομονωθεί καθώς εξαρτάται αποκλειστικά στη φύση της άμμου και περιγράφεται ως διαπερατότητα. Είναι, στην πραγματικότητα, η απόλυτη διαπερατότητα της άμμου, υπό την προϋπόθεση ότι η τελευταία είναι πλήρως κορεσμένη με υγρό και, λόγω του τρόπου παραγωγής, θα έχει την ίδια τιμή ανεξάρτητα από τη φύση του υγρού.

Αυτή η τελευταία δήλωση, είναι σε μεγάλο βαθμό αληθής, κάτω από κανονικές πιέσεις ταμιευτήρα και συνθήκες ροής, με εξαίρεση για ορισμένες περιπτώσεις που αντιμετωπίζονται στη ροή πραγματικού αερίου. Σε πολύ χαμηλές πιέσεις υπάρχει ολίσθηση μεταξύ των μορίων αερίου και τα τοιχώματα κάθε πόρου οδηγούν σε μία αύξηση της διαπερατότητας. Αυτό το φαινόμενο, που ονομάζεται φαινόμενο Klinkenberg, σπάνια εισάγει υπολογισμούς μηχανικής ταμιευτήρων, αλλά είναι σημαντικό στα εργαστηριακά πειράματα, τα οποία για ευκολία, οι διαπερατότητες των πετρωμάτων καθορίζονται μετρώντας τους ρυθμούς ροής του αέρα μέσω πυρήνων βυσμάτων σε πιέσεις κοντά στην ατμοσφαιρική. Αυτό απαιτεί διόρθωση για τον καθορισμό της απόλυτης διαπερατότητας (Darcy, 1856).

Λόγω του πολύ χαμηλού ιξώδους, η ταχύτητα ροής ενός πραγματικού αερίου στον ταμιευτήρα είναι πολύ μεγαλύτερη από ότι το πετρέλαιο ή το νερό. Σε μία περιορισμένη περιοχή γύρω από το πηγάδι, όπου η πτώση της πίεσης είναι υψηλή, η ταχύτητα του αερίου μπορεί να γίνει τόσο μεγάλη που ο νόμος του Darcy δεν θα περιγράφει πλήρως τη ροή.





## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### **Μηχανισμοί κίνησης και ανάκτηση (Drive Mechanisms and recovery)**

## Πορώδες

Το πορώδες,  $\Phi$ , είναι ίσο με το κενό όγκο του πετρώματος, διαιρούμενο με τον καθαρό όγκο και εκφράζεται ως ποσοστό ή κλάσμα του συνολικού όγκου του πετρώματος. Οι φέροντες ψαμμίτες έχουν πορώδη που συχνά κυμαίνονται μεταξύ 15-30%. Τα πορώδη των ασβεστόλιθων και των δολομιτών είναι συνήθως χαμηλότερα.

Πρέπει να γίνει διαφοροποίηση μεταξύ του απόλυτου πορώδους και του αποτελεσματικού πορώδους. Το απόλυτο πορώδες ορίζεται ως η αναλογία του συνολικού όγκου του πετρώματος προς τον συνολικό καθαρό όγκο του πετρώματος ενώ το αποτελεσματικό πορώδες ορίζεται ως η αναλογία του διασυνδεδεμένου όγκου πόρων του πετρώματος προς τον συνολικό καθαρό όγκο του πετρώματος.

Παράγοντες που επηρεάζουν το πορώδες είναι το πόσο συμπαγές είναι το πέτρωμα, ο χαρακτήρας και η ποσότητα του τσιμέντου, το σχήμα και η διάταξη των κόκκων, και η ομοιομορφία του μεγέθους των κόκκων ή της κατανομής τους.

Σε προβλήματα που αφορούν υπολογισμούς πορώδους, είναι βολικό να θυμόμαστε ότι ένα πορώδες ισοδυναμεί με την παρουσία 77.6 βαρέλια χώρου πόρων σε έναν συνολικό όγκο ενός στρέμματος άμμου.

## Διαπερατότητα

Η διαπερατότητα ενός πετρώματος είναι μία μονάδα της ευκολίας με την οποία τα ρευστά ρέουν μέσα στο πέτρωμα. Συμβολίζεται με το σύμβολο  $k$  και εκφράζεται συνήθως σε μονάδες Darcy.

## Απόλυτη διαπερατότητα

Εάν ένα πορώδες σύστημα είναι πλήρως κορεσμένο με ένα μόνο υγρό, η διαπερατότητα είναι μια ιδιότητα του βράχου και όχι μια ιδιότητα του ρέοντος υγρού (με εξαίρεση τα αέρια σε χαμηλή πίεση. Αυτή η διαπερατότητα με 100% κορεσμό ενός υγρού ονομάζεται απόλυτη διαπερατότητα.

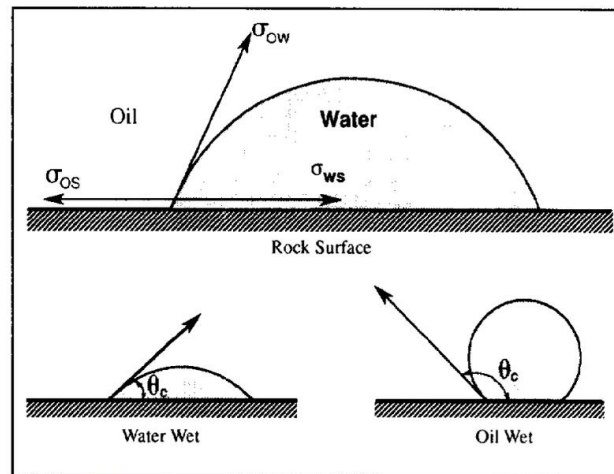
(LYONS BIBΛΙΟ)

## Διαβρεκτικότητα

Η διαβρεκτικότητα επηρεάζει σημαντικά μία ποικιλία μετρήσεων που είναι κρίσιμες για την περιγραφή των ταμιευτήρων πετρελαίου, από υπολειμματικούς κορεσμούς ως δείκτες αντίστασης. Παρά τη σημασία που αποδίδεται στη

διαβρεκτικότητα, δεν υπάρχει τυποποιημένη τεχνική που να χαρακτηρίζει πλήρως και επαρκώς το φαινόμενο. Φυσικά, η διαβρεκτικότητα αντιπροσωπεύει μια ισορροπία δυνάμεων που συμβαίνει στη διεπαφή μεταξύ τριών φάσεων, μία εκ των οποίων είναι η στερεή.

Σχήμα 14 : Διαβρεκτικότητα σε ένα σύστημα νερού, πετρελαίου, πετρώματος



Πηγή : [https://wiki.aapg.org/Drive\\_mechanisms\\_and\\_recovery](https://wiki.aapg.org/Drive_mechanisms_and_recovery)

## 2.2 Πρωτογενείς μηχανισμοί κίνησης και ανάκτηση

Η φυσική ενέργεια ενός ταμιευτήρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μετακινήσει το πετρέλαιο και το αέριο προς την πηγή. Χρησιμοποιώντας τες με τέτοιο τρόπο, αυτές οι πηγές ενέργειας, ονομάζονται μηχανισμοί κίνησης. Ο πρώιμος προσδιορισμός και χαρακτηρισμός των μηχανισμών κίνησης που υπάρχουν σε έναν ταμιευτήρα, μπορεί να επιτρέψει μεγαλύτερη τελική ανάκτηση υδρογονανθράκων. Οι μηχανισμοί κίνησης καθορίζονται από την ανάλυση ιστορικών δεδομένων παραγωγής, κυρίως πίεσης ταμιευτήρα και αναλογιών παραγωγής ρευστών (Clark, 1969).

Οι τρεις πρωτογενείς μηχανισμοί κίνησης ταμιευτήρα πετρελαίου είναι η κίνηση διαλυμένου αερίου ( solution gas drive ), η κίνηση αερίου ( gas cap drive ) και η κίνηση νερού ( water drive ). Οι τάσεις της πίεσης του ταμιευτήρα και οι τάσεις αναλογίας παραγωγής αερίου – πετρελαίου φαίνονται στα σχήματα 1 και 2 , αντίστοιχα. Ένας συνδυασμός ή μικτή κίνηση συμβαίνει όταν δύο ή περισσότεροι πρωτογενείς μηχανισμοί κίνησης είναι παρόντες στον ίδιο ταμιευτήρα. Ένας

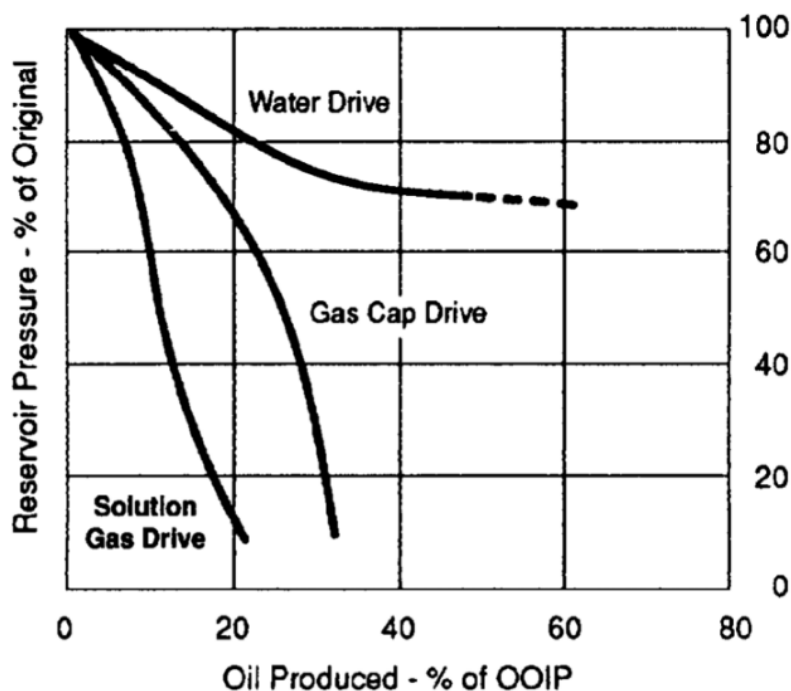
συνδυασμός κίνησης μπορεί επίσης να συμβεί όταν ένας ή παραπάνω πρωτογενής μηχανισμός κίνησης υποβοηθούνται από την αποστράγγιση βαρύτητας ( gravity drainage ). Ο πίνακας 1 δείχνει τις πηγές ενέργειας και το τελικό εύρος ανάκτησης

των κύριων μηχανισμών κίνησης.

| Μηχανισμός κίνησης       | Πηγή ενέργειας                        | Ανάκτηση (% OOIP) |
|--------------------------|---------------------------------------|-------------------|
| Κίνηση διαλυμένου αερίου | Επέκταση διαλυμένου αερίου            | 5-30              |
| Κίνηση αερίου            | Επέκταση αερίου και διαλυμένου αερίου | 20-40             |
| Κίνηση νερού             | Επέκταση υδροφόρου                    | 35-75             |
| Αποστράγγιση βαρύτητας   | Βαρύτητα                              | 5-30              |

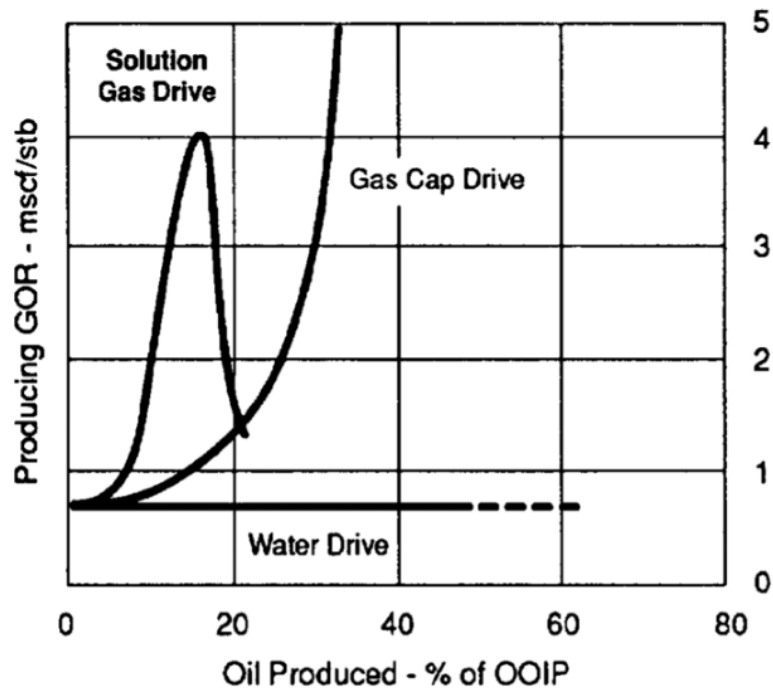
Πίνακας 1 : Ανάκτηση ανά μηχανισμό κίνησης

Σχήμα 15 : Πίεση ταμειυτήρα ανάλογα με το μηχανισμό κίνησης



Πηγή : [https://wiki.aapg.org/Drive\\_mechanisms\\_and\\_recovery](https://wiki.aapg.org/Drive_mechanisms_and_recovery)

Σχήμα 16 : Αναλογία παραγωγής αερίου πετρελαίου ανάλογα με το μηχανισμό κίνησης

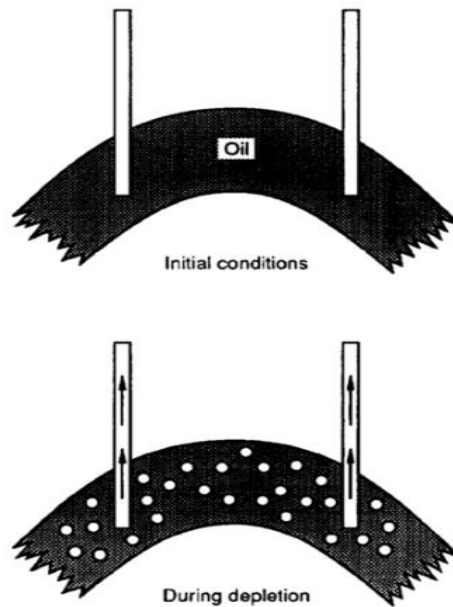


Πηγή : [https://wiki.aapg.org/Drive\\_mechanisms\\_and\\_recovery](https://wiki.aapg.org/Drive_mechanisms_and_recovery)

### 2.2.1 Κίνηση διαλυμένου αερίου

Σε έναν ταμιευτήρα κίνησης διαλυμένου αερίου, το πετρελαιοφόρο πέτρωμα περιβάλλεται από αδιαπέραστα φράγματα. Καθώς η πίεση του ταμιευτήρα μειώνεται κατά την παραγωγή, η διαστολή του πετρελαίου και του διαλυμένου του αερίου, παρέχουν τη μεγαλύτερη ενέργεια της κίνησης. Επιπλέον ενέργεια λαμβάνεται από τη διαστολή του πετρώματος και του περιεχόμενου νερού.

Σχήμα 17 : Ταμιευτήρας κίνησης διαλυμένου αερίου



Πηγή : [https://wiki.aapg.org/Drive\\_mechanisms\\_and\\_recovery](https://wiki.aapg.org/Drive_mechanisms_and_recovery)

Ανάλογα με την πίεση ανακάλυψης, ένας ταμιευτήρας κίνησης διαλυμένου αερίου μπορεί εξ'αρχής να είναι είτε κορεσμένος είτε ακόρεστος. Σε έναν ακόρεστο ταμιευτήρα η πίεση ταμιευτήρα είναι μεγαλύτερη από το σημείο φυσαλίδας του πετρελαίου. Δεν υπάρχει ελεύθερο αέριο στον ταμιευτήρα όσο η πίεση παραμένει πάνω από το σημείο φυσαλίδας. Η ενέργεια κίνησης του ταμιευτήρα παρέχεται μόνο από την περιορισμένη διαστολή του πετρελαίου, του πετρώματος και του νερού. Σε έναν κορεσμένο ταμιευτήρα, η πίεση του ταμιευτήρα είναι στο σημείο φυσαλίδας. Μόλις παραχθεί πετρέλαιο, η πίεση πέφτει και σχηματίζονται φυσαλίδες από το διαλυμένο αέριο στον ταμιευτήρα. Αυτή η απελευθέρωση του διαλυμένου αερίου ωθεί το πετρέλαιο στο να συρρικνωθεί, αλλά η συρρίκνωση του πετρελαίου αντισταθμίζεται περισσότερο από την διαστολή του διαλυμένου αερίου, την κύρια πηγή κίνησης του ταμιευτήρα κάτω από το σημείο φυσαλίδας.

Οι ταμιευτήρες κίνησης διαλυμένου αερίου δείχνουν χαρακτηριστικές αλλαγές στην πίεση ταμιευτήρα, στην αναλογία παραγωγής αερίου-πετρελαίου και τους ρυθμούς παραγωγής πετρελαίου και νερού κατά τη διάρκεια ζωής του ταμιευτήρα. Εάν ο ταμιευτήρας είναι αρχικά ακόρεστος, η πίεση πέφτει γρήγορα κατά τη διάρκεια παραγωγής πετρελαίου εξαιτίας των μικρών συμπιεστών του πετρελαίου, του νερού και του πετρώματος. Πτώσεις πίεσης αρκετών εκατοντάδων κιλών ανά τετραγωνική ίντσα μπορούν εύκολα να συμβούν μέσα σε λίγους μήνες. Επειδή το μόνο αέριο που παράγεται είναι από πού εξελίσσεται από το παραγόμενο πετρέλαιο στην οπή, η αναλογία αερίου-πετρελαίου ( GOR ) παραμένει σταθερή μέχρι ο ταμιευτήρας να φτάσει το σημείο φυσαλίδας.

Μόλις η πίεση του ταμιευτήρα φτάσει στην πίεση του σημείου φυσαλίδας ή εάν ο ταμιευτήρας ήταν αρχικά κορεσμένος, η πίεση του ταμιευτήρα μειώνεται λιγότερο γρήγορα εξαιτίας της μεγάλης συμπιεστότητας των φυσαλίδων αερίου που σχηματίζονται στον ταμιευτήρα. Η αναλογία παραγωγής αερίου-πετρελαίου αυξάνεται γρήγορα καθώς οι φυσαλίδες συνδέονται και αρχίζουν να ρέουν και μπορούν να αυξηθούν έως και δέκα φορές της αρχικής αναλογίας αερίου-πετρελαίου. Εάν η πίεση του ταμιευτήρα συνεχίσει να πέφτει, η αναλογία παραγωγής αερίου-πετρελαίου τελικά θα μειωθεί καθώς το αέριο διαστέλλεται όλο και λιγότερο καθώς ρέει στο φρεάτιο.

Οι ρυθμοί παραγωγής πέφτουν γρήγορα μόλις αρχίσει να αυξάνεται η αναλογία παραγωγής αερίου-πετρελαίου. Τα πηγάδια πρέπει να τοποθετούνται σε τεχνητό ανελκυστήρα νωρίς κατά τη διάρκεια ζωής τους. Αρχικά, παράγεται λίγο έως και καθόλου νερό. Καθώς η πίεση του ταμιευτήρα μειώνεται, μία μικρή ποσότητα νερού παράγεται καθώς ο κορεσμός του παρενθετικού νερού διαστέλλεται και υπερβαίνει την κρίσιμη τιμή που απαιτείται για τη ροή (Odeh, 1986).

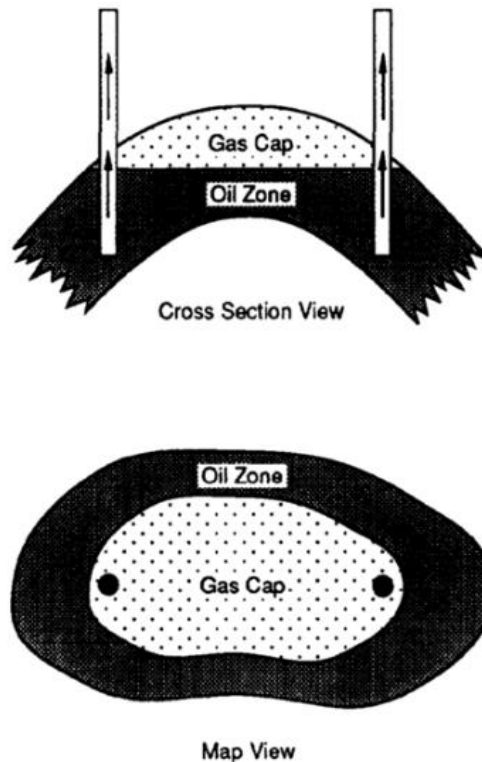
## Ανάκτηση

Η ανάκτηση πετρελαίου από τους ταμιευτήρες κίνησης διαλυμένου αερίου είναι συνήθως μικρή, με εύρος από 5-30% του αρχικού πετρελαίου (Original Oil In Place – OOIP). Συνήθως, λιγότερο από 5% του OOIP ανακτάται πάνω από το σημείο φυσαλίδας. Γενικά, οι καλύτερες ανακτήσεις κίνησης διαλυμένου αερίου λαμβάνονται σε δεξαμενές με σχετικά χαμηλό ιξώδες και αρκετά ομοιογενείς ιδιότητες πετρώματος. Η ανάκτηση μπορεί κάποιες φορές να βελτιωθεί με στρατηγικές ολοκλήρωσης που εξοικονομούν ενέργεια ταμιευτήρα ελαχιστοποιώντας την αναλογία παραγωγής αερίου-πετρελαίου.



Σε έναν ταμιευτήρα αερίου, η κύρια πηγή ενέργειας ταμιευτήρα είναι το αρχικό αέριο, το οποίο διαστέλλεται καθώς η πίεση του ταμιευτήρα μειώνεται. Επιπλέον ενέργεια παρέχεται από τη διαστολή του διαλυμένου αερίου που απελευθερώνεται από το πετρέλαιο. Λιγότερο σημαντικές συνεισφορές κίνησης παρέχονται από τη διαστολή του πετρώματος και του περιεχόμενου σε αυτού νερό.

Σχήμα 18 : Ταμιευτήρας κίνησης αερίου



Πηγή : [https://wiki.aapg.org/Drive\\_mechanisms\\_and\\_recovery](https://wiki.aapg.org/Drive_mechanisms_and_recovery)

### Τάσεις παραγωγής

Η διαστολή του αερίου προκαλεί πτώση της πίεσης του ταμιευτήρα πιο αργά σε έναν ταμιευτήρα κίνησης αερίου από ότι σε έναν που παράγει με κίνηση διαλυμένου αερίου. Ο ρυθμός μείωσης της πίεσης συνδέεται με το σχετικό μέγεθος του αερίου, με μεγαλύτερα gas caps να έχουν ως αποτέλεσμα μια πιο σταδιακή μείωση της πίεσης καθώς παράγεται το πετρέλαιο.

Νωρίς στη ζωή ενός ταμιευτήρα κίνησης αερίου, η αναλογία αερίου-πετρελαίου αυξάνεται αργά επειδή η υψηλότερη πίεση ταμιευτήρα διατηρεί περισσότερο αέριο σε διάλυμα στο πετρέλαιο. Αργότερα, η αναλογία αερίου-πετρελαίου αυξάνεται δραματικά καθώς το διογκούμενο gas cap φτάνει στα υψηλότερα φρεάτια της δομής. Η αναλογία αερίου-πετρελαίου συνεχίζει να ανεβαίνει καθώς η επαφή αερίου-πετρελαίου κινείται πιο μακριά από τη δομή και η παραγωγή

κίνησης αερίου αυξάνεται. Οι ρυθμοί παραγωγής πετρελαίου μειώνονται λιγότερο γρήγορα σε σχέση με έναν ταμειυτήρα κίνησης διαλυμένου αερίου εξαιτίας της πιο αργή μείωσης του ταμειυτήρα πίεσης. Η τεχνητή ανύψωση ίσως να μην απαιτείται τόσο νωρίς, καθώς τα πηγάδια τείνουν να έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Όπως και στη κίνηση διαλυμένου αερίου έτσι και εδώ, λίγο ή και καθόλου νερό παράγεται.

### **Ανάκτηση**

Η ανάκτηση πετρελαίου από ταμειυτήρες κίνησης αερίου συνήθως κυμαίνεται από 20 έως 40% του αρχικού πετρελαίου. Η πραγματική ανάκτηση που προκύπτει εξαρτάται από το μέγεθος του αρχικού αερίου, τη γεωμετρία της δομής του ταμειυτήρα και τον τρόπο διαχείρισης του πεδίου.

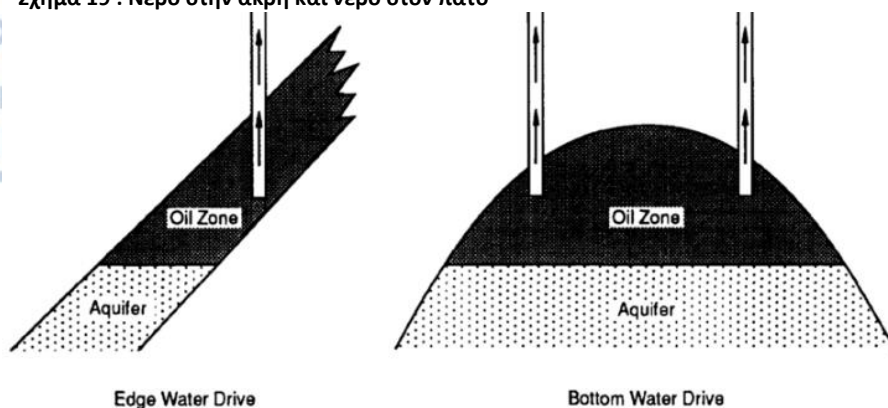
Η ανάκτηση κίνησης αερίου αυξάνεται με το μέγεθος του αρχικού gas cap εάν η παραγωγή του gas cap μπορεί να ελαχιστοποιηθεί. Αυτό γίνεται πιο εύκολα σε απότομους ταμειυτήρες ή σε εκείνες τις πυκνές στήλες πετρελαίου που επιτρέπουν στα πηγάδια να διατηρηθούν όσο το δυνατόν περισσότερο κάτω από την επαφή αερίου-πετρελαίου. Η ανάκτηση μπορεί επίσης να βελτιωθεί με το κλείσιμο των φρεατίων όταν αρχίζουν την παραγωγή μεγάλης ποσότητας gas cap. Επιπλέον, το παραγόμενο αέριο μπορεί να επιστραφεί στο gas cap χρησιμοποιώντας φρεάτια έγχυσης αερίου που βρίσκονται ψηλά στη δομή.

### **2.2.3 Κίνηση νερού**

Σε έναν ταμειυτήρα κίνησης νερού, η ζώνη πετρελαίου είναι σε επικοινωνία με έναν υδροφόρο ορίζοντα που παρέχει το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας κίνησης του ταμειυτήρα. Καθώς παράγεται το πετρέλαιο, το νερό στον υδροφόρο διαστέλλεται και κινείται στον ταμειυτήρα, μετατοπίζοντας το πετρέλαιο. Ανάλογα με την ισχύ του υδροφόρου, πρόσθετη ενέργεια μπορεί να παρέχεται με τη διαστολή του διαλυμένου αερίου. Πολύ λιγότερο σημαντικές συνεισφορές παρέχονται από την επέκταση του πετρώματος του ταμειυτήρα και του περιεχόμενου σε αυτού νερό.

Η γεωμετρία του υδροφόρου καθορίζει το αν πρόκειται για νερό βυθού ή νερό ακροδέκτη Σχήμα5. Στη κίνηση νερού βυθού, ο ταμειυτήρας βρίσκεται κάτω από ολόκληρο τον ταμειυτήρα και η εισροή νερού κινείται κάθετα προς τα πάνω προς τη ζώνη πετρελαίου. Στη κίνηση ακροδέκτη νερού, ο υδροφόρος βρίσκεται στις πλευρές του ταμειυτήρα και το νερό κινείται προς τα πάνω κατά μήκος του ταμειυτήρα.

Σχήμα 19 : Νερό στην άκρη και νερό στον πάτο



Πηγή : [https://wiki.aapg.org/Drive\\_mechanisms\\_and\\_recovery](https://wiki.aapg.org/Drive_mechanisms_and_recovery)

### Τάσεις παραγωγής

Σε μία κίνηση νερού, η απόκριση της πίεσης του ταμιευτήρα στην παραγωγή εξαρτάται από το μέγεθος και τη διαπερατότητα του υδροφόρου και το ρυθμό με τον οποίο παράγεται ο ταμιευτήρας. Εάν ο ταμιευτήρας παράγεται σε χαμηλό ρυθμό, ο υδροφόρος μπορεί να αντικαταστήσει τους παραγόμενους όγκους υγρών και η πίεση του ταμιευτήρα παραμένει αρκετά σταθερή. Σε υψηλά ποσοστά παραγωγής, ο υδροφόρος δε μπορεί να συνεχίσει με την ανάκτηση και η πίεση του ταμιευτήρα πέφτει. Εάν ο ρυθμός μειωθεί σε χαμηλό επίπεδο, η πίεση του ταμιευτήρα θα αυξηθεί. Το μέγεθος χαμηλών και υψηλών ποσοστών ρυθμών παραγωγής για έναν συγκεκριμένο ταμιευτήρα κίνησης νερού καθορίζονται από το μέγεθος και τη διαπερατότητα του σχετικού υδροφόρου του.

Σε έναν ισχυρό ταμιευτήρα κίνησης νερού, η αναλογία παραγωγής αερίου-πετρελαίου παραμένει αρκετά σταθερή, αντικατοπτρίζοντας τη σταθερή πίεση του ταμιευτήρα. Ωστόσο, εάν ο υδροφόρος δε μπορεί να διατηρήσει την πίεση του ταμιευτήρα η αναλογία παραγωγής αερίου-πετρελαίου θα αυξηθεί ανάλογα.

Οι ρυθμοί του πετρελαίου παραμένουν υψηλοί κάτω από την ισχυρή κίνηση νερού μέχρι το νερό να διαρρεύσει στα πηγάδια παραγωγής. Η παραγωγή του νερού συμβαίνει συνήθως νωρίς στη διάρκεια ζωής του πεδίου των κάτω φρεατίων δομής και η αναλογία νερού πετρελαίου (Water Oil Ratio – WOR ) συνεχίζει να αυξάνεται με το χρόνο καθώς η επαφή πετρελαίου-νερού κινείται προς τα επάνω. Η ανύψωση αερίου ενδέχεται να απαιτείται για να συνεχίσουν να ρέουν τα πηγάδια νερού.

### Ανάκτηση

Η ανάκτηση πετρελαίου από του ταμιευτήρες κίνησης νερού συνήθως κυμαίνεται από 35 έως 75% του αρχικού πετρελαίου. Η πραγματική ανάκτηση που επιτυγχάνεται εξαρτάται από την δύναμη του υδροφόρου, την αποτελεσματικότητα σάρωσης του παραβατικού νερού και τον τρόπο διαχείρισης του πεδίου.

Η ανάκτηση της κίνησης του νερού αυξάνεται με την ισχύ του υδροφόρου ένα η παραγωγή του νερού μπορεί να ελαχιστοποιηθεί. Όπως συμβαίνει και στους ταμιευτήρες κίνησης αερίου, αυτό γίνεται πιο εύκολα σε γεωμετρίες ταμιευτήρων που επιτρέπουν στα πηγάδια να διατηρηθούν σε σημαντική απόσταση από την επαφή των ρευστών.

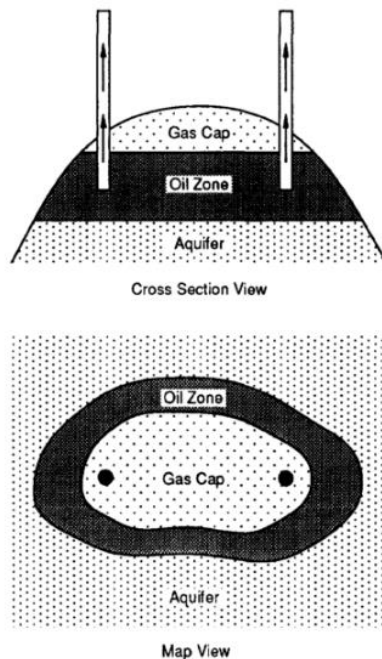
Η ανάκτηση κίνησης νερού εξαρτάται επίσης από την αποτελεσματικότητα σάρωσης του υδροφόρου. Η αποτελεσματικότητα σάρωσης είναι ένα μέτρο του πόσο αποτελεσματικά το νερό εισβολής μετατοπίζει το πετρέλαιο. Υψηλή αποτελεσματικότητα σάρωσης και ανάκτηση πετρελαίου συμβαίνουν όταν το ιξώδες του πετρελαίου είναι χαμηλό συγκριτικά με αυτό του νερού και το πετρέλαιο ρέει πιο εύκολα από το νερό που εισβάλλει. Οι ταμιευτήρες κίνησης νερού με υψηλό ακάθαρτο ιξώδες έχουν χαμηλή αποτελεσματικότητα σάρωσης και ανάκτηση πετρελαίου επειδή το νερό τείνει να κινείται μπροστά, αφήνοντας πίσω του άπλυτο πετρέλαιο.

Η ανάκτηση κίνησης νερού μπορεί να βελτιωθεί ρυθμίζοντας τους ρυθμούς παραγωγής σε όλο το πεδίο έτσι ώστε η επαφή πετρελαίου νερού να κινείται όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφα γίνεται. Δεδομένου ότι η κίνηση του νερού είναι πιο αποτελεσματική από την κίνηση διαλυμένου αερίου, σε κάποιες περιπτώσεις είναι δυνατό να αυξηθεί η παραγωγή παράγοντας τον ταμιευτήρα σε αρκετά χαμηλό ρυθμό έτσι ώστε ο υδροφόρος να είναι σε θέση να διατηρήσει την υψηλή πίεση του ταμιευτήρα.

#### 2.2.4 Συνδυασμός κίνησης

Οι περισσότεροι ταμιευτήρες πετρελαίου παράγουν υπό την επίδραση δύο ή περισσότερων μηχανισμών κίνησης ταμιευτήρων, που αναφέρονται συλλογικά ως συνδυαστική κίνηση. Ένα κοινό παράδειγμα είναι ένας ταμιευτήρας πετρελαίου με ένα αρχικό gas cap και μία ενεργή κίνηση νερού.

Σχήμα 20 : Ταμιευτήρας συνδυασμένης κίνησης



Πηγή : [https://wiki.aapg.org/Drive\\_mechanisms\\_and\\_recovery](https://wiki.aapg.org/Drive_mechanisms_and_recovery)

### Τάσεις παραγωγής

Οι τάσεις παραγωγής σε έναν ταμιευτήρα συνδυασμού κίνησης αντικατοπτρίζουν τα χαρακτηριστικά του κυρίαρχου μηχανισμού κίνησης. Ένας ταμιευτήρας με ένα μικρό αρχικό gas cap και μία αδύναμη κίνηση νερού θα συμπεριφερθεί με παρόμοιο τρόπο όπως ένας ταμιευτήρας διαλυμένου αερίου με δραστική μείωση της πίεσης του ταμιευτήρα και άνοδο της αναλογίας αερίου-πετρελαίου. Αντίστοιχα, ένας ταμιευτήρας με μεγάλο gas cap και ισχυρή κίνηση νερού μπορεί να δείξει μικρή ελάττωση στην πίεση ταμιευτήρα ενώ αυξάνεται σταθερά η αναλογία αερίου-πετρελαίου και νερού-πετρελαίου. Η αξιολόγηση αυτών των τάσεων παραγωγής είναι η κύρια μέθοδος που έχει ένας μηχανικός ταμιευτήρων για τον προσδιορισμό των μηχανισμών κίνησης που είναι ενεργοί μέσα στον ταμιευτήρα.

### Ανάκτηση

Η τελική ανάκτηση που αποκτάται από έναν ταμιευτήρα συνδυασμένης κίνησης είναι συνάρτηση των μηχανισμών κίνησης που είναι ενεργοί στον ταμιευτήρα. Η ανάκτηση μπορεί να είναι υψηλή ή χαμηλή ανάλογα με το αν κυριαρχούν οι μηχανισμοί μετατόπισης ή εξάντλησης. Η επέκταση κίνησης νερού και gas cap είναι και οι μηχανισμοί κίνησης τύπου μετατόπισης και έχουν σχετικά υψηλές ανακτήσεις. Η κίνηση διαλυμένου αερίου είναι μια τύπου εξάντλησης και είναι σχετικά μη αποτελεσματική.



Η ανάκτηση από έναν ταμειυτήρα συνδυασμένης κίνησης μπορεί συχνά να βελτιωθεί, ελαχιστοποιώντας το αποτέλεσμα των μηχανισμών κίνησης εξάντλησης με αντικατάσταση ή αύξηση αποτελεσματικότερων μέσω διαχείρισης ρυθμού παραγωγής ή έγχυσης υγρού. Για να συμβεί αυτό, οι μηχανισμοί κίνησης που είναι ενεργοί σε έναν ταμειυτήρα θα πρέπει να αναγνωριστούν νωρίς στη ζωή του.

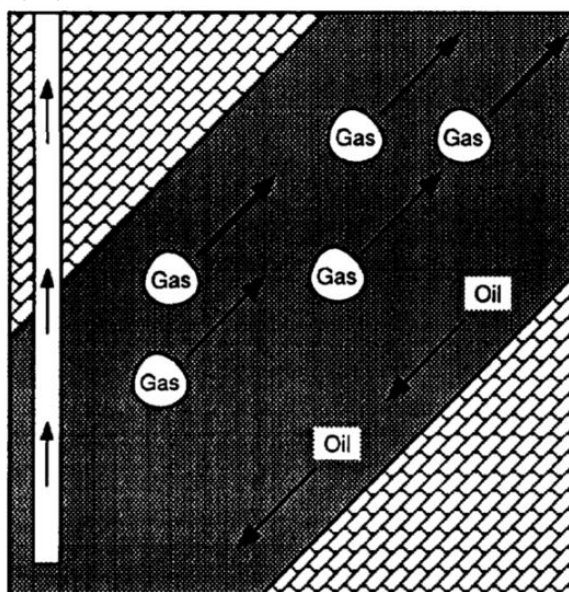
## 2.2.5 Αποστράγγιση βαρύτητας

Η αποστράγγιση βαρύτητας ή ο διαχωρισμός βαρύτητας είναι η τάση του πετρελαίου, αερίου και νερού να διαχωρίζονται σε έναν ταμειυτήρα κατά τη διάρκεια της παραγωγής λόγω των διαφορετικών πυκνοτήτων τους. Ως δευτερεύον μηχανισμός, ο διαχωρισμός βαρύτητας συμβαίνει μόνο σε έναν συνδυασμό ενός ή περισσότερων πρωτογενών μηχανισμών κίνησης ταμειυτήρα πετρελαίου.

Συνθήκες που ευνοούν την αποστράγγιση βαρύτητας περιλαμβάνουν παχύρευστους ταμειυτήρες με υψηλή κάθετη διαπερατότητα ή λεπτούς ταμειυτήρες με απότομες βυθίσεις. Σε έναν ταμειυτήρα κίνησης διαλυμένου αερίου, η αποστράγγιση βαρύτητας μπορεί να προκαλέσει το απελευθερωμένο διαλυμένο αέριο να μεταναστεύσει προς τα πάνω και το πετρέλαιο να κινηθεί προς τα κάτω, εξοικονομώντας ενέργεια ταμειυτήρα και αυξάνοντας την παραγωγή κοντά σε εκείνη με κίνηση νερού (W., 1996).

Ο ρυθμός του πετρελαίου της αποστράγγισης βαρύτητας στον ταμειυτήρα είναι συνήθως χαμηλός συγκριτικά με τους ρυθμούς παραγωγής του πεδίου. Με την πάροδο του χρόνου, η αποστράγγιση βαρύτητας μπορεί να είναι εξαιρετικά αποτελεσματική και οι ανακτήσεις να είναι μεγαλύτερες από κάθε άλλο πρωταρχικό μηχανισμό κίνησης.

Σχήμα 21 : Διαχωρισμός υγρών μέσω αποστράγγισης βαρύτητας



Πηγή : [https://wiki.aapg.org/Drive\\_mechanisms\\_and\\_recovery](https://wiki.aapg.org/Drive_mechanisms_and_recovery)

### 2.2.6 Τεχνητή ανύψωση

Η τεχνητή ανύψωση αναφέρεται στη μηχανική ανύψωση των υγρών των φρεατίων στην επιφάνεια. Η μηχανική ανύψωση των υγρών των φρεατίων είναι απαραίτητη όταν η πίεση του ταμιευτήρα είναι ανεπαρκής για την κίνηση των ρευστών του ταμιευτήρα στην επιφάνεια. Ο εξοπλισμός της τεχνητής ανύψωσης μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την αύξηση της παραγωγής από ρέοντα πηγάδια μειώνοντας την παραγωγή της πίεσης του πυθμένα.

Διάφοροι τύποι συστημάτων τεχνητής ανύψωσης χρησιμοποιούνται. Τα τέσσερα βασικά συστήματα είναι τα κάτωθι.

#### Ηλεκτρικές υποβρύχιες αντλίες

Μία ηλεκτρική υποβρύχια αντλία αποτελείται από μία φυγόκεντρη αντλία συνδεδεμένη με έναν ηλεκτρικό κινητήρα. Ο συνδυασμός αντλίας και κινητήρα λειτουργεί στο φρεάτιο στο κάτω μέρος της χορδής σωληνώσεων και βρίσκεται κάτω από τη στάθμη του υγρού λειτουργίας στο φρεάτιο.

Ο ηλεκτρικός κινητήρας τροφοδοτεί μία φυγόκεντρη αντλία που ωθεί το ρευστό στην αντλία μέσα της σωλήνωσης και έξω στην επιφάνεια. Ο ηλεκτρικός κινητήρας τροφοδοτείται από ένα ηλεκτρικό καλώδιο που είναι δεμένο στην πλευρά του σωλήνα. Η ικανότητα ανύψωσης για κάθε αντλία ρυθμίζεται αλλάζοντας τον αριθμό των σταδίων στην φυγοκεντρική αντλία ή/και αλλάζοντας την ιπποδύναμη του ηλεκτρικού κινητήρα.

Οι ηλεκτρικές υποβρύχιες αντλίες είναι ευεργετικές σε πηγάδια που πρέπει να ανυψώνουν όγκους ρευστών από βάθος λιγότερο των 10.000 ποδιών. Οι ηλεκτρικές υποβρύχιες αντλίες χρησιμοποιούνται συχνά στα τελευταία στάδια της πλημμύρας νερού όπου οι υψηλές περικοπές νερού απαιτούν ανύψωση μεγάλων όγκων παραγωγής από κάθε πηγάδι (Lebourg, 1957).

#### Ανύψωση αερίου

Η ανύψωση αερίου είναι η διαδικασία ανύψωσης ρευστών από το φρεάτιο χρησιμοποιώντας αέριο υψηλής πίεσης ως πηγή ενέργειας. Ο εξοπλισμός ανύψωσης αερίου αποτελείται από μία σειρά βαλβίδων ανύψωσης αερίου που βρίσκονται σε προκαθορισμένα βάθη στη σειρά των σωλήνων. Η σειρά σωληνώσεων τοποθετείται σε έναν συσκευαστή πάνω από τις θήκες διάτρησης. Το αέριο συνήθως εγχέεται κάτω από το δακτύλιο σωληνώσεων και εισέρχεται στη σωλήνωση μέσω των βαλβίδων



ανύψωσης αερίου. Ένας επιφανειακός συμπιεστής αερίου χρησιμοποιείται για την παροχή της υψηλής πίεσης αερίου που απαιτείται για το άνοιγμα των βαλβίδων ανύψωσης αερίου.

Τα συστήματα ανύψωσης αερίου μετακινούν τα ρευστά του ταμειυτήρα στην επιφάνεια μέσω μείωσης της υδροστατικής πίεση της κολώνας των ρευστών στη σωλήνωση κάτω από την πίεση ταμειυτήρα. Το εγχεόμενο αέριου διογκώνεται καθώς κινείται προς τα πάνω στην σωλήνωση, παρέχοντας επιπλέον ανύψωση. Τα συστήματα ανύψωσης αερίου μπορούν να εγκατασταθούν για να δημιουργούν είτε συνεχόμενα είτε κατά διαστήματα. Η ανύψωση αερίου χρησιμοποιείται συχνά σε υπεράκτιες περιοχές και σε περιοχές όπου υπάρχει άφθονη παροχή αερίου. Συχνά το αέριο που παράγεται από το φρεάτιο, διαχωρίζεται από τα παραγόμενα ρευστά και επανεγχύεται στο ίδιο φρεάτιο.

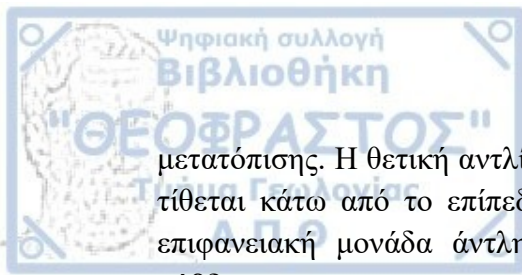
### **Υδραυλικές αντλίες**

Μία υδραυλική αντλία λειτουργεί παρόμοια με ένα σύστημα ανύψωσης αερίου, με υγρό ισχύος υψηλής πίεσης ως πηγή ενέργειας στη θέση αερίου υψηλής πίεσης. Υπάρχουν δύο διαφορετικοί τύποι υδραυλικών αντλιών, έμβολο και πίδακα. Μία αντλία τύπου εμβόλου αποτελείται από έναν υδραυλικό κινητήρα στο ένα άκρο και από μία αντλία τύπου εμβόλου στο άλλο άκρο(σχήμα 3). Υδραυλικό αέριο υψηλής πίεσης αντλείται κάτω από τη σωλήνωση και εισέρχεται σε έναν παλινδρομικό υδραυλικό κινητήρα. Αυτός ο κινητήρας ενεργοποιεί την αντλία τύπου εμβόλου που ανυψώνει τα παραγόμενα υγρά και το υδραυλικό ρευστό επάνω στον δακτύλιο της θήκης προς την επιφάνεια. Το υδραυλικό ρευστό που χρησιμοποιείται συνήθως παράγεται πετρέλαιο από το ίδιο το πηγάδι. Όταν τα παραγόμενα ρευστά και το υδραυλικό ρευστό αντλούνται στην επιφάνεια, το πετρέλαιο διαχωρίζεται και κάποιο από αυτό επαναχρησιμοποιείται ως υγρό ισχύος.

Το υδραυλικό σύστημα αντλίας πίδακα χρησιμοποιεί μία πτώση πίεσης ventura για την ανάμειξη της ισχύος του υδραυλικού υγρού με τα παραγόμενα ρευστά. Το σύστημα αντλίας πίδακα δεν απαιτεί το υδραυλικό ρευστό να είναι τόσο καθαρό όσο είναι αυτό του συστήματος τύπου εμβόλου. Το σύστημα πίδακα ακόμη επιτρέπει ρυθμούς μεγαλύτερης παραγωγής από ότι κάνει το σύστημα αντλίας τύπου εμβόλου. Οι υδραυλικές αντλίες χρησιμοποιούνται κυρίως σε βαθιά πηγάδια που απαιτούν όγκους ανύψωσης μεγαλύτερους από ότι τα συστήματα δοκού αντλιών.

### **Αντλίες δοκού**

Τα συστήματα αντλίας δοκού ήταν από τους πρώτους τύπους τεχνητών ανυψώσεων που χρησιμοποιήθηκαν στο πεδίο πετρελαίου και είναι ακόμη τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα μέσα τεχνητής ανύψωσης. Ένα σύστημα αντλίας δοκού ανυψώνει τα ρευστά μέσω παλινδρομικής κίνησης που ενεργοποιεί μία θετική αντλία



μετατόπισης. Η θετική αντλία μετατόπισης είναι τοποθετημένη σε μία σωλήνωση και τίθεται κάτω από το επίπεδο του υγρού λειτουργίας του πηγαδιού(σχήμα 4). Μία επιφανειακή μονάδα άντλησης παρέχει την δύναμη για την παλινδρόμηση της ράβδου.

Η μονάδα επιφανειακής αντλίας αποτελείται από δύο κύρια εξαρτήματα, έναν πρωτεύοντα κινητήρα και μία κινούμενη δοκό συνδεδεμένη σε έναν κεντρικό στύλο. Η κινούμενη δοκός λειτουργεί σαν τραμπάλα στον κεντρικό στύλο, παρέχοντας μία παλινδρομική κίνηση στη ράβδο. Σε κάθε ανοδική κίνηση της ράβδου , ένας όγκος των παραγόμενων ρευστών του πηγαδιού ανυψώνεται προς τα πάνω στη σωλήνωση προς την επιφάνεια. Η χωρητικότητα του συστήματος άντλησης δοκού καθορίζεται από το μέγεθος της αντλίας καθοδικής ροής, το μήκος της διαδρομής της ράβδου και την ταχύτητα με την οποία η ράβδος περιστρέφεται. Όταν η χωρητικότητα της αντλίας υπερβαίνει την είσοδο υγρού φρεατίου, η μονάδα επιφανειακής αντλίας μπορεί να ρυθμιστεί ώστε να λειτουργεί διαλείπουσα κλείνοντας τη μονάδα άντλησης για μια καθορισμένη χρονική περίοδο.

Οι περιορισμοί του συστήματος άντλησης δοκού είναι περίπου 150 bbl του υγρού ανά μέρα στα 12.000 πόδια βάθος. Μεγαλύτεροι όγκοι ρευστών μπορούν να παραχθούν με τα συστήματα άντλησης δοκού σε μικρότερα βάθη. Τα συστήματα άντλησης δοκού έχουν χρησιμοποιηθεί σε πηγάδια έως και 15.000 πόδια.

### **2.3 Δευτερογενείς μηχανισμοί κίνησης και ανάκτηση**

Η πρωτογενής ανάκτηση, όπως έχει ήδη αναφερθεί, αναφέρεται στην ανάκτηση πετρελαίου ή και αερίου που ανακτάται είτε με φυσική ροή είτε με τεχνητή ανύψωση μέσω ενός πηγαδιού. Έτσι η πρωτογενής ανάκτηση συμβαίνει ως αποτέλεσμα της ενέργειας που υπάρχει αρχικά στον ταμιευτήρα κατά την στιγμή της ανακάλυψης. Όταν η αρχική ενέργεια έχει εξαντληθεί και ο ρυθμός ανάκτησης πετρελαίου μειώνεται, η παραγωγή του πετρελαίου μπορεί να αυξηθεί με την έγχυση δευτερογενούς ενέργειας στον ταμιευτήρα. Η δευτερογενής ανάκτηση είναι η ανάκτηση πετρελαίου ή και αερίου που περιλαμβάνει την εισαγωγή τεχνητής ενέργειας στον ταμιευτήρα μέσω ενός πηγαδιού και την παραγωγή πετρελαίου ή και αερίου από ένα άλλο πηγάδι. Τα συμβατικά μέσα της δευτερογενούς ανάκτησης περιλαμβάνουν τις μη αναμίξιμες διαδικασίες της πλημμύρας νερού και της έγχυσης αερίου. Επί του παρόντος, στις Ηνωμένες Πολιτείες της, η πλημμύρα νερού είναι η κυρίαρχη μέθοδος δευτερογενούς ανάκτησης, τόσο, έτσι ώστε η μισή παραγωγή πετρελαίου που ανακτάται να είναι από έργα πλημμύρας νερού.

### **Συντήρηση πίεσης**

Η συντήρηση πίεσης είναι μια δευτερογενής διαδικασία ανάκτησης που εφαρμόζεται νωρίς κατά τη διάρκεια της πρωταρχικής φάσης παραγωγής πριν η

ενέργεια του ταμιευτήρα να έχει εξαντληθεί. Τα έργα συντήρησης πίεσης, που μπορούν να επιτευχθούν από την έγχυση είτε αερίου είτε νερού, σχεδόν πάντα θα ανακτούν περισσότερα αποθέματα πετρελαίου από ότι είναι ανακτήσιμα από πρωτογενείς μηχανισμούς παραγωγής. Για παράδειγμα, η επιστροφή του αερίου στο σχηματισμό νωρίς στην πρωτογενή ιστορία παραγωγής ενός πεδίου θα επιτρέψει υψηλότερα ποσοστά παραγωγής πετρελαίου.

## Εισαγωγή αερίου

Ιστορικά, τόσο το φυσικό αέριο όσο και ο αέρας έχουν χρησιμοποιηθεί σε έργα έγχυσης αερίου, και σε ορισμένες περιπτώσεις εγχύθηκε και άζωτο αλλά και καυσάερια. Πολλά από τα πρώιμα έργα έγχυσης αερίου χρησιμοποίησαν τον αέρα για να αντικαταστήσουν χωρίς ανάμιξη το αργό πετρέλαιο από τους ταμιευτήρες. Η έγχυση αερίου υδρογονάνθρακα μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα είτε αναμίξιμη είτε μη αναμίξιμη διαδικασία ανάλογα με τη σύνθεση του εισαγόμενου αερίου και του μετατοπισμένου αργού πετρελαίου, της πίεσης του ταμιευτήρα και της θερμοκρασίας του ταμιευτήρα.

Παρόλο που το απόλυτο πετρέλαιο που ανακτήθηκε από μη αναμίξιμα έργα έγχυσης αερίου κανονικά θα είναι χαμηλότερο από ότι η πλημμύρα νερού, η έγχυση αερίου μπορεί αν είναι η μόνη εναλλακτική δευτερογενής ανάκτηση κάτω από ορισμένες συνθήκες. Εάν η διαπερατότητα είναι πολύ χαμηλή, ο ρυθμός της έγχυσης νερού μπορεί να είναι τόσο χαμηλός που η έγχυση αερίου προτιμάται. Σε ταμιευτήρες με φουσκωμένο πηλό, η έγχυση αερίου είναι προτιμότερη. Σε απότομα βαθιούς ταμιευτήρες, το αέριο που εγχέεται μπορεί πολύ αποτελεσματικά να μετατοπίσει το αργό πετρέλαιο μέσω μηχανισμού αποστράγγισης βαρύτητας. Αυτή η τεχνική είναι πολύ αποτελεσματική σε χαμηλής διαπερατότητας σχηματισμούς όπως σε σχιστόλιθο με ρωγμές. Σε παχύ σχηματισμό, με μικρό βάθος, το εγχέόμενο αέριο (εξαιτίας της χαμηλότερης πυκνότητας) θα τείνει να παρακάμψει και να οδηγεί σε κατακόρυφο διαχωρισμό εάν η κατακόρυφη διαπερατότητα είναι μεγαλύτερη από 200 md. Σε λεπτούς σχηματισμούς, ειδικά εάν η πρωταρχική παραγωγή αερίου έχει γίνει με κίνηση διαλυμένου αερίου, το αέριο μπορεί να εγχυθεί σε μια σειρά πηγαδιών στον ταμιευτήρα σε πρότυπη βάση πηγαδιού. Αυτή η λειτουργία εγχύσεως διασκορπισμένου αερίου προσπαθεί να τραβήξει το πετρέλαιο σε έναν μηχανισμό μετωπικής μετατόπισης. Εκτός από το εξωτερικό αέριο που εγχέεται σε ταμιευτήρες με βάθος όπως περιγράφηκαν (το οποίο μπορεί να είναι σε ένα πρωταρχικό ή δευτερογενές κάλυμμα αερίου), μία παραλλαγή που ονομάζεται ανάκτηση πετρελαίου σοφίτας περιλαμβάνει έγχυση αερίου σε μία χαμηλότερη δομική θέση. Εάν υπάρχει επαρκής κάθετη διαπερατότητα το εγχέόμενο αέριο θα μεταναστεύσει προς τα πάνω για να δημιουργήσει ένα δευτερογενές κάλυμμα αερίου που θα μπορεί να μετακινήσει το πετρέλαιο προς τα κάτω όπου ανακτάται σε πηγάδια τα οποία έχουν ήδη διατρηθεί.

### Έγχυση νερού

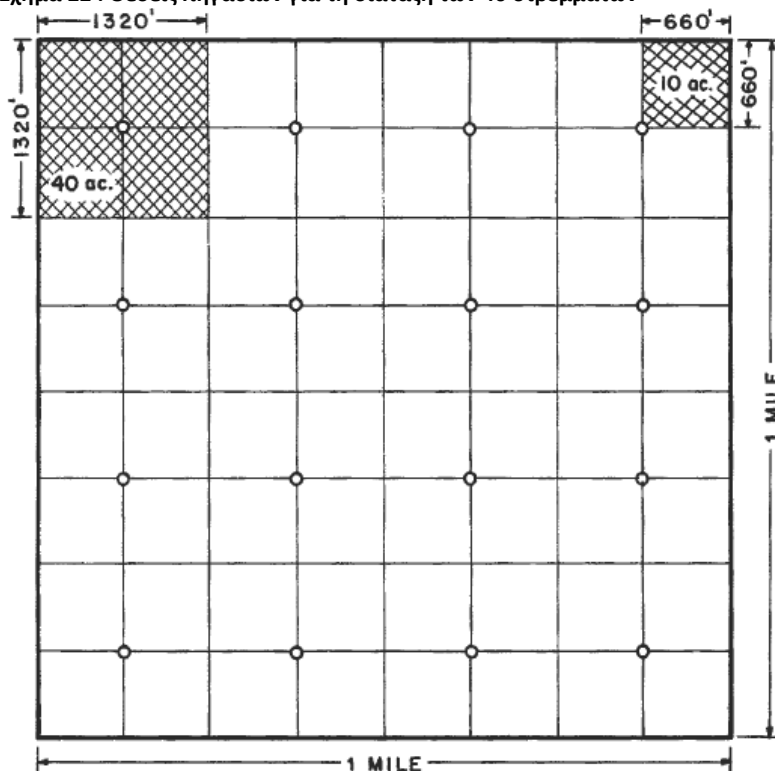
Οι διεργασίες έγχυσης νερού μπορούν να σχεδιαστούν ώστε : (1) να απορρίπτεται το νερό άλμης , (2) να δημιουργηθεί ένα έργο συντήρησης πίεσης για τη διατήρηση της πίεσης του ταμειυτήρα όταν η διαστολή ενός υδροφόρου ορίζοντα ή καλύμματος αερίου δεν είναι επαρκεί για να διατηρήσουν την πίεση ή (3) για την εφαρμογή κίνησης νερού ή πλημμύρας νερού του πετρελαίου μετά την πρωταρχική ανάκτηση. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η πλημμύρα νερού είναι η κυρίαρχη δευτερογενής διεργασία ανάκτησης, που αντιπροσωπεύει το 50% της παραγωγής του πετρελαίου στις Ηνωμένες Πολιτείες (Lynch, 1964).

### Διάταξη πηγαδιών

Ένα τμήμα (ένα τετραγωνικό μίλι ή 5.280 πόδια επί 5.280 πόδια) είναι 640 στρέμματα. Εάν τα πηγάδια είναι διατρημένα ομοιόμορφα, έτσι ώστε κάθε πηγάδι να αντλεί 40 στρέμματα, τα 16 πηγάδια ανά τμήμα θα έχουν διάταξη όπως στο σχήμα 5-148. Κάθε 40 στρέμματα θα περιέχουν 40 επί 43.560 ή 1.742.400 πόδια<sup>2</sup>. Η περιοχή των 10 στρεμμάτων στο σχήμα 5-148 θα είχε μέγεθος 660 πόδια επί 660 πόδια και θα περιείχε 435.000 πόδια<sup>2</sup>. Αντίστοιχα, μία περιοχή 20 στρεμμάτων θα περιείχε 871.200 πόδια<sup>2</sup> και θα είχε μέγεθος  $(20 \times 871.200)^{1/2}$  ή 933.4 πόδια επί 933.4 πόδια.

Σε πολλά σημεία των Ηνωμένων Πολιτειών, η διάταξη των 40 στρεμμάτων ή λιγότερο είναι συνηθισμένο για πηγάδια πετρελαίου, ενώ 160 στρέμματα ή 320 στρέμματα είναι συνηθισμένο για πηγάδια αερίου. Επειδή η διάτρηση κοστίζει περισσότερο όσο αυξάνεται το βάθος, βαθύτερα πηγάδια μπορεί να είναι σε μία μεγαλύτερη διάταξη.

Σχήμα 22 : Θέσεις πηγαδιών για τη διάταξη των 40 στρεμμάτων



Πηγή : Lyons W. (1996)

### Τοποθέτηση πηγαδιού έγχυσης

Τα πηγάδια μπορεί να απέχουν μεταξύ τους ομοιόμορφα ή ανομοιόμορφα μεταξύ τους, ανάλογα με την τοπολογία της επιφάνειας, τα όρια μίσθωσης, τους κανονισμούς ή άλλους παράγοντες. Πολλά παλαιότερα πεδία αναπτύχθηκαν σε ακανόνιστη διάταξη. Πιο πρόσφατα, περισσότερα ομοιόμορφα σχέδια διάταξης και διάταξης πηγαδιών έχουν χρησιμοποιηθεί.

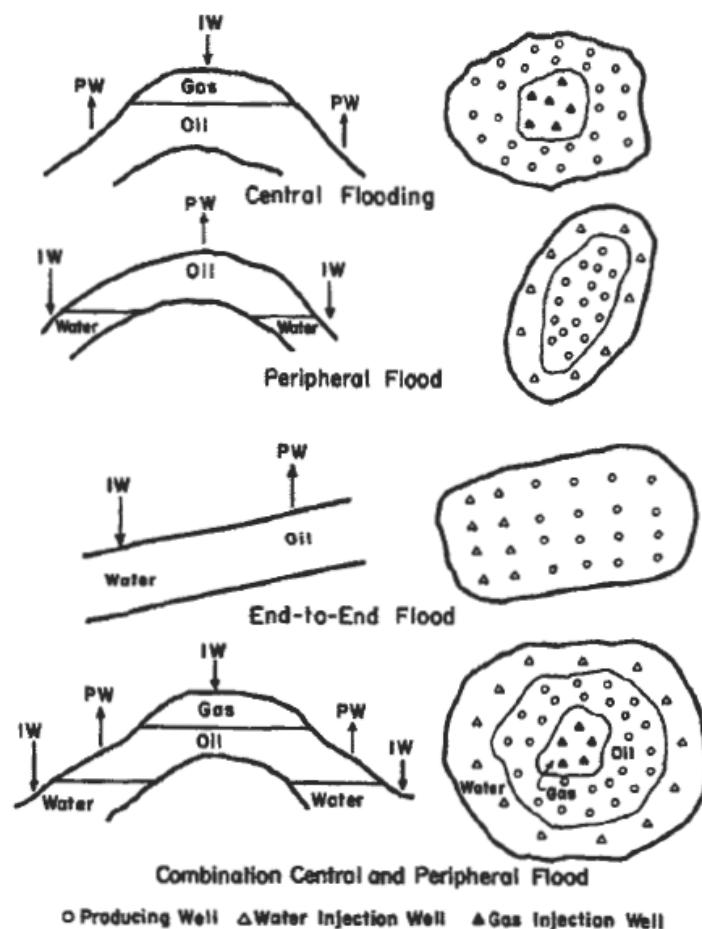
Στις περισσότερες περιπτώσεις κατά την έναρξη ενός έργου έγχυσης, η πρωταρχική ανάκτηση έχει ολοκληρωθεί και τα πηγάδια παραγωγής είναι ήδη σε θέση. Για κάποια έργα, ένας αριθμός προϋπαρχόντων πηγαδιών θα μετατραπεί από παραγωγούς σε εγχυτήρες και σε άλλες περιπτώσεις ένα πηγάδια έγχυσης θα διατηρηθούν. Σε κάθε περίπτωση, η τοποθέτηση του πηγαδιού έγχυσης θα πρέπει να είναι συμβατά με τα ήδη υπάρχοντα πηγάδια και θα πρέπει να επωφεληθούν από τις γνωστές ομοιομορφίες ή ανομοιομορφίες των ταμιευτήρων, να παρέχουν επαρκή ρυθμό έγχυσης υγρού για την απόδοση του επιθυμητού ρυθμού παραγωγής, να μεγιστοποιήσουν την ανάκτηση με ελάχιστη παραγωγή των εγγεόμενων ρευστών και στις περισσότερες περιπτώσεις, απαιτούν έναν ελάχιστο αριθμό νέων πηγαδιών. Δύο γενικοί τύποι τοποθέτησης πηγαδιών είναι συχνοί : (1) περιφερειακή ή κεντρική πλημμύρα όπου οι εγχυτήρες είναι ομαδοποιημένοι μαζί και (2) πλημμύρα σχεδίου όπου συγκεκριμένα σχέδια επαναλαμβάνονται σε όλο το πεδίο. Η σχετική θέση των εγχυτήρων και παραγωγών εξαρτάται από τη γεωλογία και τον τύπο του ταμιευτήρα, τον όγκο του ταμιευτήρα και τους χρονικούς περιορισμούς που επηρεάζουν τα οικονομικά. Όταν είναι εφικτό, το σχήμα έγχυσης θα πρέπει να επωφεληθεί από τη βαρύτητα.



## Περιφερειακή ή κεντρική πλημμύρα

Στην περιφερειακή πλημμύρα, οι εγχυτήρες βρίσκονται στην περιφέρεια έτσι ώστε η πλημμύρα να προχωρά προς το κέντρο όπως φαίνεται και στο σχήμα 5-149. Όταν η πρώτη σειρά των παραγωγών πλημμυρίσει, μετατρέπονται σε κατάσταση έγχυσης. Αυτός ο τύπος πλημμύρας μπορεί να οδηγήσει σε μέγιστη ανάκτηση πετρελαίου με το ελάχιστο παραγόμενο εγχυτικό, και λιγότερο εγχυτικό απαιτείται για μια δεδομένη ποσότητα παραγωγής, αλλά μία περιφερειακή πλημμύρα συνήθως παίρνει περισσότερο από μία πλημμύρα σχεδίου. Γενικά, επαρκής διαπερατότητα απαιτείται για να επιτραπεί η κίνηση των ρευστών σε ένα αποδεκτό ρυθμό με τη διαθέσιμη διάταξη πηγαδιών. Η κεντρική πλημμύρα είναι η αντίθετη περίπτωση στη οποία οι εγχυτήρες βρίσκονται στο κέντρο του πεδίου και η πλημμύρα προχωρά προς τα έξω, σχήμα 5-149 (Shah, 1971).

Σχήμα 23 : Περιφερειακή και κεντρική πλημμύρα



Πηγή : Lyons W. (1996)

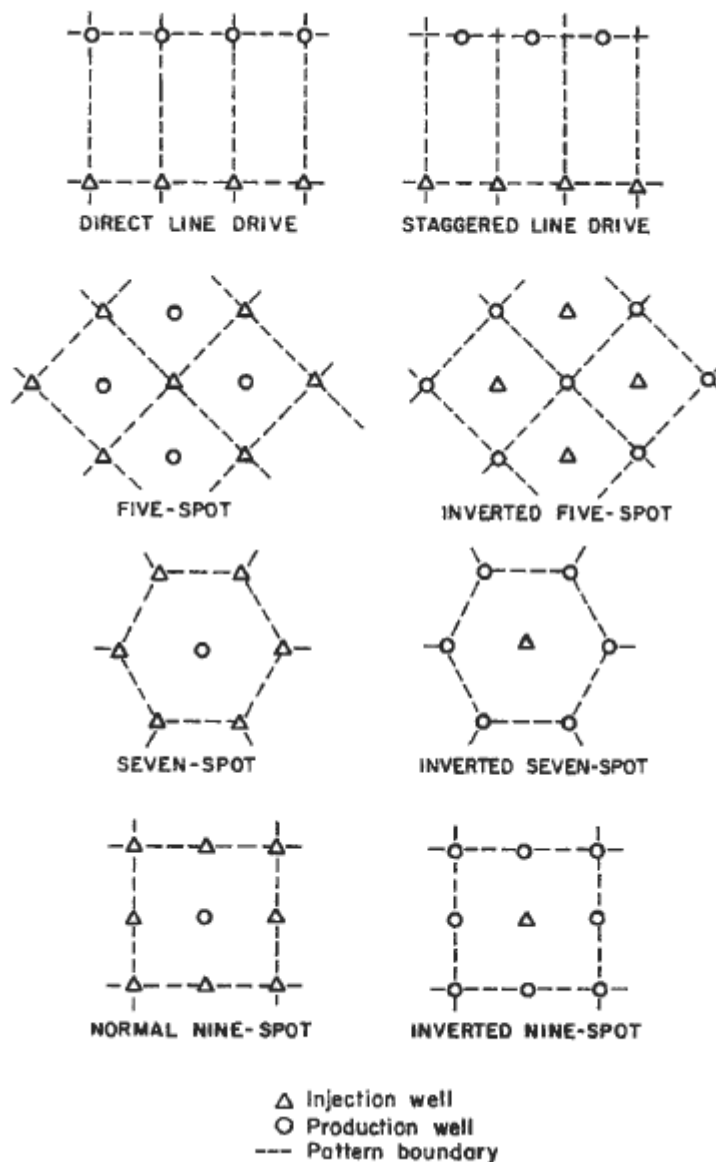


Μία μορφή περιφερειακής πλημμύρας είναι μία πλημμύρα από άκρο σε άκρο, όπως αυτή που φαίνεται στο σχήμα 5-149. Αυτός ο τύπος έγχυσης μπορεί να περιέχει την έγχυση αερίου σε ένα κάλυμμα αερίου ή την έγχυση νερού σε έναν υδροφόρο ορίζοντα. Η επιλογή της περιφερειακή ή της επαναλαμβανόμενης πλημμύρας σχεδίου συνήθως γίνεται με βάση το σχηματισμό της διαπερατότητας, το σχηματισμό του βάθους, και της περιοχής και της διαστάσεις του ταμιευτήρα και της αρχικής αντίδρασης παραγωγής που είναι αποδεκτή.

### **Πλημμύρα σχεδίου**

Στη πλημμύρα σχεδίου, οι εγχυτήρες κατανέμονται μεταξύ των παραγωγών σε μία επαναλαμβανόμενη διάταξη. Παραδείγματα των συνηθισμένων επαναλαμβανόμενων σχεδίων φαίνονται στο σχήμα 5-150. Η πλημμύρα σχεδίου είναι πολύ συχνή και η επιλογή του τύπου του σχεδίου θα εξαρτηθεί από τις περιστάσεις σε ένα δεδομένο πεδίο. Εάν τα υπάρχοντα πηγάδια έχουν διατηρηθεί σε τετράγωνο σχέδιο, 5-σημείων και 9-σημείων είναι συνηθισμένα, και τα δύο αποδίδουν παρόμοια απόδοση ανάκτησης πετρελαίου και αναλογίας νερού-πετρελαίου. Εάν το εγγεόμενο υγρό είναι περισσότερο ευκίνητο από το εκτοπισμένο υγρό (κάτι που συμβαίνει συχνά, ειδικά όταν το ιξώδες του πετρελαίου είναι υψηλό), ένα σχέδιο όπου θα υπάρχουν περισσότεροι παραγωγοί από ότι εγχυτήρες είναι πιο θεμιτό ώστε να ισορροπηθούν τα ποσοστά παραγωγής και έγχυσης. Σε περιπτώσει όπου το εγγεόμενο υγρό είναι λιγότερο ευκίνητο ή όταν η διαπερατότητα του σχηματισμού είναι χαμηλή, ένα σχέδιο όπου περιέχονται περισσότεροι εγχυτήρες από ότι παραγωγοί είναι πιο θεμιτό.

Σχήμα 24 : θέση πηγαδιών στην πλημμύρα σχεδίου

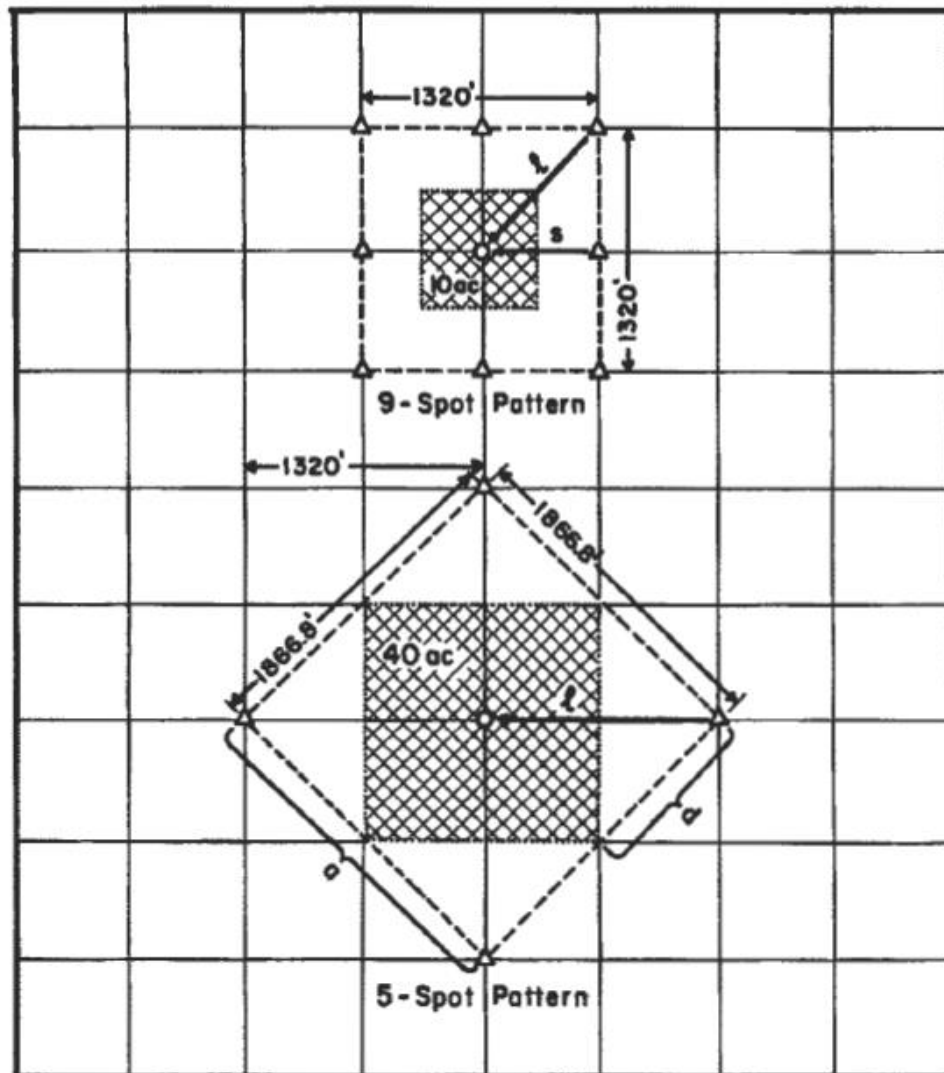


Πηγή : Lyons W. (1996)

Συχνά υπάρχει σύγχυση ανάμεσα στην διάταξη των πηγαδιών (ή πυκνότητα) και το μέγεθος του σχεδίου. Όπως φαίνεται στο σχήμα 5-151, η περιοχή του σχεδίου για ένα 5-σημείων είναι δύο φορές μεγαλύτερη από τη διάταξη των πηγαδιών ή την πυκνότητα των πηγαδιών, και η περιοχή σχεδίου για ένα 9-σημείων είναι τέσσερις φορές μεγαλύτερη της διάταξης πηγαδιών.

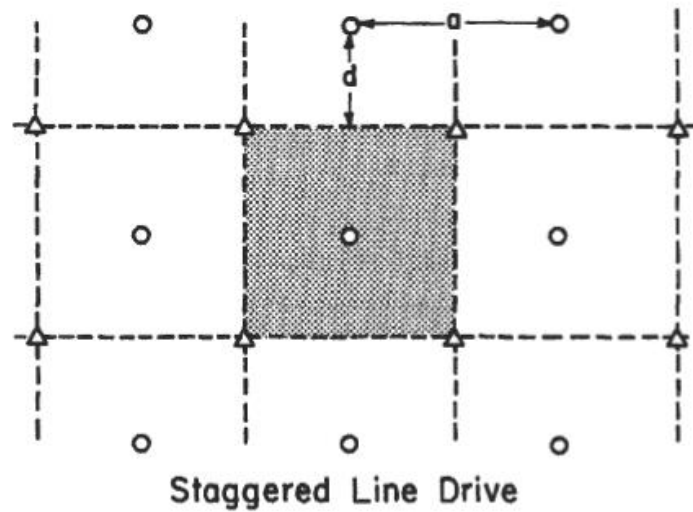
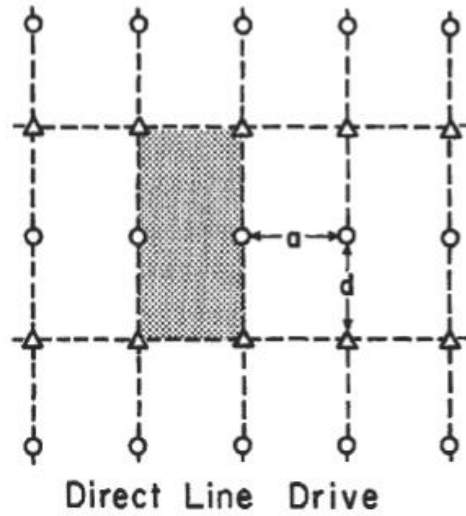
Η επιλογή του σχεδίου είναι σημαντική διότι μπορεί να επηρεάσει την εξάπλωσης της περιοχής από το εγγεόμενο υγρό.

Σχήμα 25 : Μέγεθος σχεδίου για σχέδιο 9 και 5 σημείων



Πηγή : Lyons W. (1996)

Σχήμα 26 : Αποστάσεις σε σχέδια γραμμών



○ Producing Well    Δ Injection Well    --- Pattern Boundary

Πηγή : Lyons W. (1996)

## 2.4 Τριτογενής-βελτιωμένη ανάκτηση πετρελαίου

Οι συμβατικές μέθοδοι ανάκτησης (πρωταρχική και δευτερογενής) συνήθως εξάγουν περίπου το ένα τρίτο του αρχικού πετρελαίου σε έναν ταμειυτήρα. Οι εκτιμήσεις (που έγιναν στα τέλη της δεκαετίας του 1970) του παγκόσμιου πετρελαίου in-place κυμαίνονται περί τα 1.5 τρισεκατομμύρια βαρέλια. Χρησιμοποιώντας αυτόν τον αριθμό, εκτιμάται ότι το παραμένον πετρέλαιο ως υπολειμματικό κορεσμένο πετρέλαιο μετά από συμβατική ανάκτηση ανέρχεται στα περίπου 1 τρισεκατομμύριο βαρέλια. Αρκετές τεχνικές βελτιωμένης ανάκτησης πετρελαίου (EOR-Enhanced Oil Recovery), γενικά ομαδοποιούνται ως συστήματα τριτογενούς παραγωγής, έχουν στοχεύσει αυτό το τεράστιο ανεκμετάλλευτο απόθεμα (Council, 1976).

Στο παρελθόν, χημικές, θερμικές και αναμίξιμες τεχνικές έχουν χρησιμοποιηθεί από τη βιομηχανία σε εμπορική κλίμακα. Οι τεχνικές EOR απαιτούν την έγχυση χημικών ενώσεων διαλυμένων σε νερό, την έγχυση ατμού ή την έγχυση αερίου που είναι αναμίξιμο με το πετρέλαιο in place. Ως αποτέλεσμα, οι τρέχοντες τεχνικές EOR είναι πολύ ακριβότερες στη χρησιμοποίηση από τα κανονικά έργα δευτερογενούς έγχυσης νερού. Επομένως, η ποσότητα πετρελαίου που μπορεί τελικά να ανακτηθεί με τις υπάρχουσες τεχνικές EOR σχετίζεται άμεσα με την τιμή του αργού πετρελαίου.

Όλα τα έργα EOR ξεκινούν με ανάλυση τη φύσης, της τοποθεσίας και των αιτιών των υπολειμματικών κορεσμών πετρελαίου (SOR-Residual Oil Saturations) που παραμένουν μετά την πρωταρχική ή και τη δευτερογενή ανάκτηση. Οι κύριοι παράγοντες που ελέγχουν την τιμή των SOR είναι η γεωμετρία των πόρων, η διαβρεκτικότητα του πετρώματος και οι ιδιότητες του εκτοπισμένου πετρελαίου και των εκτοπισμένων ρευστών. Οι ιδιότητες ρευστού ιδιαίτερου ενδιαφέροντος είναι η διεπιφανειακή τάση, το ιξώδες και η πυκνότητα. Σε συνδυασμό με την ετερογένεια του ταμειυτήρα, αυτές οι ιδιότητες έχουν ως αποτέλεσμα τη συνολική ανάκτηση για οποιοδήποτε σχήμα ανάκτησης.

Η συνολική ανάκτηση είναι αποτέλεσμα της αποτελεσματικότητας της μετατόπισης και την αποτελεσματικότητα σάρωσης. Η αποτελεσματικότητα της μετατόπισης είναι αντιστρόφως ανάλογη με το υπολειπόμενο κορεσμό πετρελαίου ενώ η αποτελεσματικότητα σάρωσης είναι αντιστρόφως ανάλογη της αναλογίας κινητικότητας (M-Mobility ratio) μεταξύ των εγγεόμενων ρευστών και του πετρελαίου in place. Το M δηλώνεται συνήθως ως προς τη σχετική διαπερατότητα μιας ρευστής φάσης διαιρούμενη από το ιξώδες της φάσης, σε σχέση με την ίδια αναλογία για άλλη φάση όπως για μια πλημμύρα νερού.

$$M = \frac{\left(\frac{k_{rw}}{\mu_w}\right)}{(k_{ro}/\mu_o)}$$

Με απλούστερους όρους, η επιδίωξη της σταδιακής ανάκτησης πετρελαίου για EOR μειώνει την επιλογή της διαδικασίας που ελαχιστοποιεί το M ή το SOR για έναν συγκεκριμένο ταμιευτήρα. Η επιλογή της διαδικασίας που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται επίσης από άλλες εκτιμήσεις όπως το βάθος, η θερμοκρασία και η ποσότητα του πετρελαίου που απομένει πριν από την βελτιωμένη ανάκτηση πετρελαίου. Δυστυχώς, η εφαρμογή όλων των τρεχόντων διεργασιών EOR περιλαμβάνει παράγοντες που μπορούν να αυξήσουν και να μειώσουν το M. Για παράδειγμα, ένα αναμίξιμο αέριο μειώνει το M, αυξάνοντας την διαπερατότητα πετρελαίου σε σχέση με το εγχέόμενο μέσω της εξάλειψης της διεπιφανειακής τάσης, αλλά ταυτόχρονα το χαμηλό ιξώδες αερίου σε σχέση με το πετρέλαιο οδηγεί σε αύξηση του M.

Μεγάλο μέρος της φάσης σχεδιασμού ενός έργου EOR δαπανάται για την αναζήτηση συνδυασμού διεργασιών και σχεδίων έγχυσης που θα μεγιστοποιήσουν την ανάκτηση πετρελαίου σε σχέση με το κόστος υλοποίησης της συγκεκριμένης διαδικασίας. Συγκεκριμένα, οι φάσεις στον σχεδιασμό ενός έργου EOR περιλαμβάνουν τα ακόλουθα :

#### 1. Βασικά κριτήρια ελέγχου

- Ιξώδες πετρελαίου
- Πετρέλαιο in place που περίσσεψε
- Γεωλογία
- Αλατότητα νερού του σχηματισμού
- Βάθος και θερμοκρασία σχηματισμού
- Υπολογισμός του δυνητικού κέρδους
- Κόστος

#### 2. Εργαστηριακά τεστ

- Ιδιότητες ρευστών
- Ιδιότητες πετρώματος
- Βασικές πλημμύρες
- Η χημεία των εγχέομενων υλικών

#### 3. Όγκομετρικοί υπολογισμοί για τον καθορισμό της αναλογίας κόστους-κέρδους

#### 4. Λεπτομερείς τεχνικές μελέτες

- Γεωλογικές
- Προσομοιώσεις ταμιευτήρα



- Οικονομικές προβλέψεις

## 5. Δοκιμές πεδίου

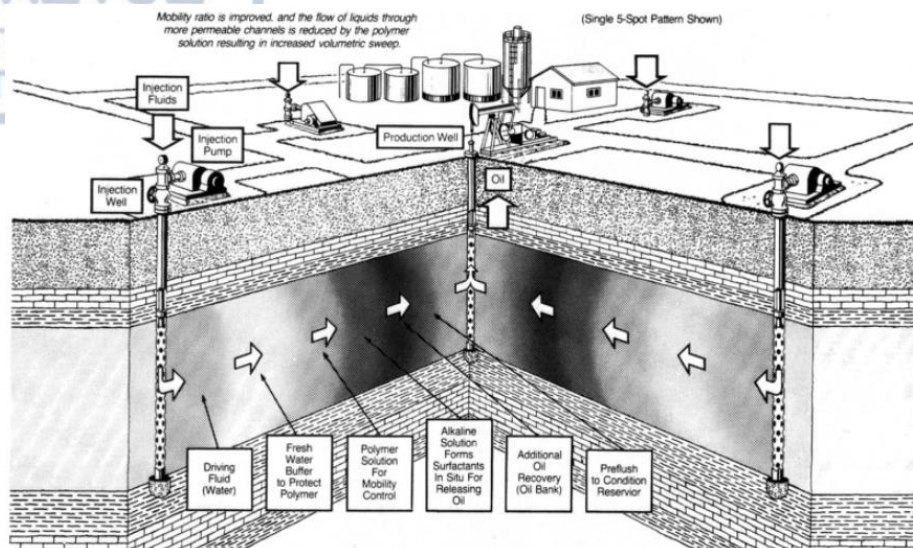
Είναι δυνατόν να παραλειφθούν πολλά από αυτά τα βήματα χρησιμοποιώντας αναλογία μηχανικής ταμειυτήρων όταν γειτονικοί ταμειυτήρες που έχουν υποβληθεί σε EOR έχουν παρόμοιες ιδιότητες με αυτές του ταμειυτήρα που ψάχνουμε. Επιπλέον, οι δοκιμές πεδίου είναι συχνά δεν επιχειρούνται εξαιτίας του μεγάλου μήκους χρόνου που απαιτούν και την δυσκολία στην επιλογή ενός τμήματος ενός ταμειυτήρα για μελέτη που θα είναι αντιπροσωπευτική για όλο τον ταμειυτήρα στο σύνολό του.

### Χημική πλημμύρα

Οι βασικοί σκοποί της βασικής πλημμύρας είναι να προστεθεί υλικό (χημικό) στο νερό που εγχέεται σε έναν ταμειυτήρα για να αυξηθεί η ανάκτηση πετρελαίου με (1) αύξηση του ιξώδους του νερού, (2) μειώνοντας τη σχετική διαπερατότητα στο νερό, ή (3) αυξάνοντας τη σχετική διαπερατότητα στο πετρέλαιο και μειώνοντας το SOR μειώνοντας την διεπιφανειακή τάση μεταξύ της φάσης πετρελαίου και νερού. Η διαδικασία απεικονίζεται σχηματικά στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα τάδε). Χημικά πρόσθετα για τη μείωση της διεπιφανειακής τάσης είναι ενώσεις τύπου απορρυπαντικό όπως θειικά πετρέλαια και είναι τόσο ακριβά που οι χημικές πλημμύρες είναι συχνά τεχνικές επιτυχίες και οικονομικές αποτυχίες. Ο επιτυχής σχεδιασμός των χημικών πλημμυρών πάντα περιστρέφεται γύρω από την ελαχιστοποίηση των χημικών ουσιών που απαιτούνται για την επίτευξη της επιθυμητής αλλαγής της διεπιφανειακής τάσης ή και στην αναλογία κινητικότητας (Stalkup, 1983).

Αυτή η ελαχιστοποίηση επιτυγχάνεται πριν από τη χημική έγχυση με ένα προπλύσιμο για να ρυθμιστούν τα χημικά από αντιδράσεις με το επί τόπου νερό και μετά από τη χημική έγχυση, με την έγχυση διαλύματος πολυμερούς για να διατηρηθεί μια ευνοϊκή αναλογία κινητικότητας για την πλημμύρα. Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα με την έγχυση επιφανειοδραστικών και άλλων χημικών ουσιών στο πέτρωμα του ταμειυτήρα είναι ότι τα χημικά είναι επιφανειακά ενεργά. Έτσι, έχουν μεγάλη συνάφεια με τα ορυκτά που βρίσκονται στους ταμειυτήρες, προκαλώντας την προσρόφηση χημικών ουσιών από το διάλυμα στον βράχο σε μεγάλες ποσότητες.

Σχήμα 27 : Χημική πλημμύρα



Πηγή : [https://wiki.aapg.org/Enhanced\\_oil\\_recovery](https://wiki.aapg.org/Enhanced_oil_recovery)

## Πλημμύρα αναμίξιμο αερίου

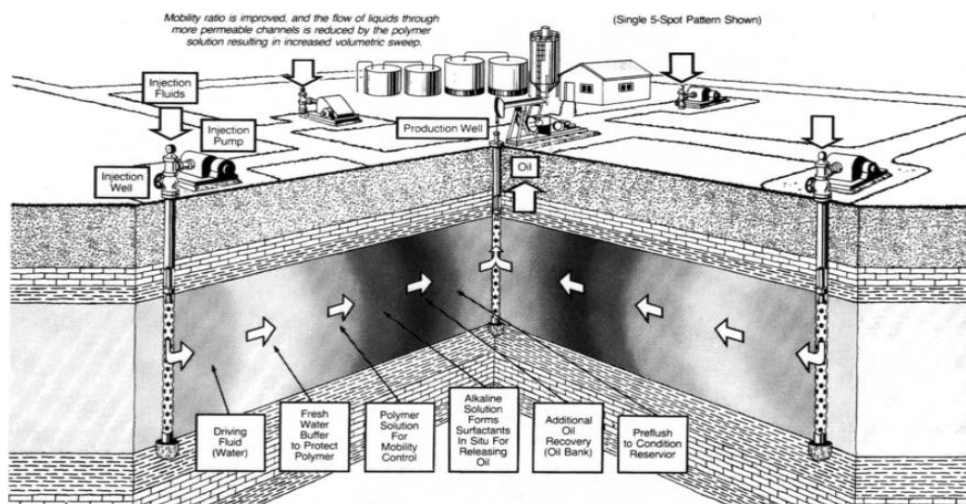
Η ιδέα πίσω από τις αναμίξιμες πλημμύρες, όπως οι πλημμύρες με διοξείδιο του άνθρακα, είναι ότι ο καλύτερος τρόπος για να εξαλειφθεί η διεπιφανειακή ένταση μεταξύ του in place πετρελαίου και των εγχόμενων ρευστών είναι η έγχυση ενός διαλύτη για αυτό το πετρέλαιο (ο διαλύτης είναι ένα υλικό που είναι αναμίξιμο σε όλες τις αναλογίες με το διαλυμένο υλικό). Ο υπολειπόμενος κορεσμός πετρελαίου για μετατόπιση από έναν διαλύτη θα είναι 0. Στην πράξη, πρέπει να βρεθεί διαλύτης που να είναι αναμίξιμος με το πετρέλαιο και να μη κοστίζει περισσότερο από το πετρέλαιο. Τέλος, η ογκομετρική απόδοση σάρωσης της διαδικασίας πρέπει να είναι αρκετά υψηλή για να καταστήσει αυτό το σχήμα οικονομικό. Επειδή τα σχετικά αποτελέσματα διαπερατότητας έχουν αφαιρεθεί από την αναμίξιμη φύση της μετατόπισης, η αποτελεσματικότητα σάρωσης είναι κυρίως εξάρτηση του ιξώδους του διαλύτη σε σχέση με το ιξώδες του πετρελαίου.

Οι τρέχουσες εφαρμογές αναμίξιμων πλημμυρών έχουν επικεντρωθεί στις διεργασίες έγχυσης διοξειδίου του άνθρακα, αερίου υδρογονανθράκων και αζώτου. Οι διαλύτες αερίου τείνουν να είναι πολύ λιγότερο ιξώδεις από ότι το πετρέλαιο ταμειντήρα, έτσι ώστε η αποτελεσματικότητα σάρωσης να είναι συχνά πολύ χαμηλή για πλημμύρες αναμίξιμου αερίου. Οι προσπάθειες σχεδιασμού επικεντρώνονται στην εύρεση μεθόδων για τη βελτίωση της ογκομετρικής αποτελεσματικότητας σάρωσης. Στην περίπτωση πλημμυρών διοξειδίου του άνθρακα, το αέριο εγχέεται στον ταμειντήρα σε μικρά φυσίγγια που εναλλάσσονται με φυσίγγια νερού ως μέσο μείωσης της κινητικότητας του εγχόμενου υγρού.

Τα δευτερεύοντα οφέλη της έγχυσης αναμίξιμου αερίου περιλαμβάνουν τα αποτελέσματα διαλυτότητας του διαλύτη στη φάση πετρελαίου. Καθώς το διοξείδιο του άνθρακα, το αέριο υδρογονανθράκων ή το άζωο διαλύονται στη φάση του πετρελαίου, το πετρέλαιο διογκώνεται και το ιξώδες του μειώνεται. Και τα δύο αυτά

φαινόμενα προσθέτουν στην κινητικότητα του πετρελαίου σε σχέση με τον εγγεόμενο διαλύτη. Στην πράξη, παρόλο που η αναμίξιμη μετατόπιση δεν συνεπάγεται με υπολειμματικό κορεσμό πετρελαίου στην περιοχή που σαρώνεται από το διαλύτη, απομένει ένα μικρός υπολειπόμενος κορεσμός λόγω οικονομικών εκτιμήσεων παραγωγής σε υψηλές GOR και της συμπεριφοράς της φάσης του συστήματος πριν από την επίτευξη της ανάμιξης στον ταμιευτήρα.

Σχήμα 28: Πλημμύρα διοξειδίου του άνθρακα



Πηγή : [https://wiki.aapg.org/Enhanced\\_oil\\_recovery](https://wiki.aapg.org/Enhanced_oil_recovery)

## Θερμική ανάκτηση

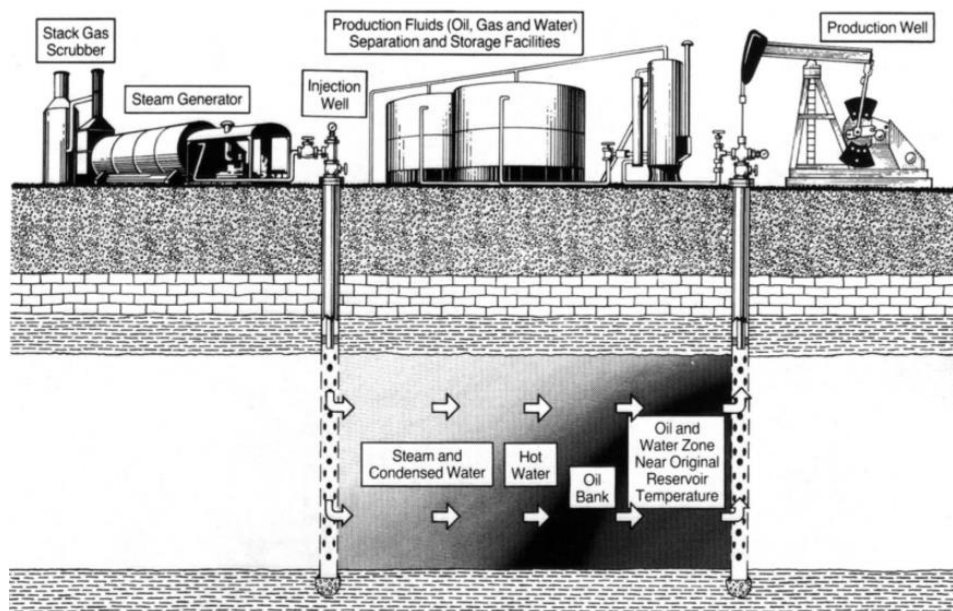
Όλες οι διαδικασίες θερμικής ανάκτησης περιλαμβάνουν τη χρήση θερμότητας για την επιτάχυνση της διαδικασίας ανάκτησης πετρελαίου. Η θερμότητα μπορεί να παραχθεί στην επιφάνεια και να εγχυθεί στον ταμιευτήρα, όπως στην περίπτωση της έγχυσης ατμού, ή να δημιουργηθεί στον ταμιευτήρα με την έγχυση ενός ρευστού όπως αέρα, που είναι εύφλεκτο με το πετρέλαιο in place. Η επιλογή της τεχνικής που θα χρησιμοποιηθεί για την προσθήκη θερμικής ενέργειας στον ταμιευτήρα εξαρτάται από την ανάλυση του ταμιευτήρα πετρελαίου και τα οικονομικά της παραγωγής ενέργειας. Ωστόσο, ο κύριος στόχος όλων των θερμικών μεθόδων είναι η μείωση του ιξώδους του in place πετρελαίου. Για τις περισσότερες θερμικές διεργασίες, αυτό επιτυγχάνεται με τη θέρμανση ενός πολύ βαρύ πετρελαίου.

Σε μια θερμική πλημμύρα, καταβάλλεται μεγάλη προσπάθεια για την επεξεργασία του νερού του λέβητα και των στοιβαγμένων αερίων που προκύπτουν

από την καύση του παραγόμενου πετρελαίου ή αερίου για την παραγωγή θερμότητας. Λόγω περιβαλλοντικών παραμέτρων, αυτό συνήθως περιορίζει την τεχνική σε μη κατοικημένες περιοχές.

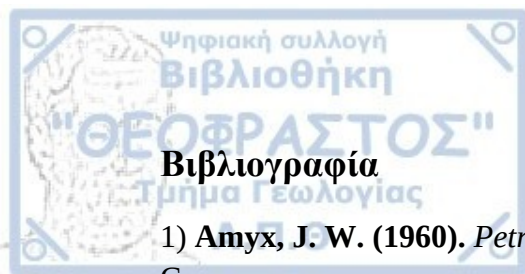
Οι τεχνικές θερμικής ανάκτησης ήταν οι πιο πετυχημένες από τις τεχνικές που εφαρμόστηκαν μέχρι σήμερα. Αυτό συμβαίνει επειδή ο υπολειπόμενος κορεσμός πετρελαίου πριν από μία θερμική πλημμύρα είναι συνήθως υψηλός έτσι ώστε ο στόχος των EOR να είναι μεγάλος. Η επιλογή έγχυσης ζεστού νερού, της συνεχούς έγχυσης ατμού, της κυκλικής έγχυσης ατμού, ή της επί τόπου καύσης εξαρτάται από το βάθος του ταμιευτήρα, τις θερμικές ιδιότητες των περιβαλλόντων σχηματισμών και τις ιδιότητες των ρευστών του in-place πετρελαίου. Επομένως, η φάση σχεδιασμού ενός θερμικού έργου συνήθως επικεντρώνεται στον καθορισμό του πόσο γρήγορα η ενέργεια μπορεί να μεταφερθεί στον ταμιευτήρα με τη διαδικασία που εξετάζεται και το κόστος παραγωγής αυτής της θερμικής ενέργειας.

Σχήμα 29: Πλημμύρα ατμού



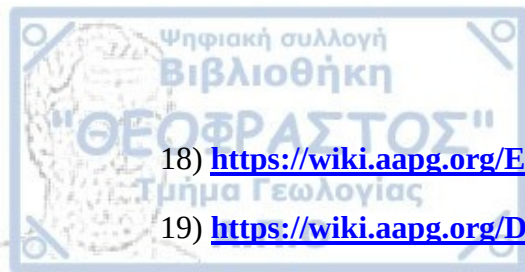
Πηγή : [https://wiki.aapg.org/Enhanced\\_oil\\_recovery](https://wiki.aapg.org/Enhanced_oil_recovery)





### Βιβλιογραφία

- 1) **Amyx, J. W. (1960).** *Petroleum Reservoir Engineering*. McGraw-Hill Book Company.
- 2) **Bradley, J. S. (1975).** *Abnormal Formation Pressure*. The American Ass.of Pet.Geologists Bulletin.
- 3) **Chapman, R. (1973).** *Petroleum Geology*. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Co.
- 4) **Clark, N. (1969).** *Elements of petroleum reservoirs* . Dallas: Society of petroleum engineers.
- 5) **Council, N. P. (1976).** *An analysis of the potential for enhanced oil recovery from known fields in the US*.
- 6) **Dake, L. (1978).** *Fundamentals of Reservoir Engineering : The Netherlands*. Elsevier Science Publishers.
- 7) **Darcy, H. (1856).** *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon*. Paris: Victor Dalmont.
- 8) **Hubbert, M. K. (1956).** *Darcy's Law and the Field Equations of the Flow of Underground Fluids*. Trans.
- 9) **J. Lohrenz, B. B. (1964).** *Calculating Viscosities of Reservoir fluid from their compositions*.
- 10) **Katz, D. L. (1959).** *Handbook of Natural Gas Engineering* . New York: McGraw Hill Book Co.
- 11) **Lebourg, M. (1957).** *A Method of Formation Testing on Logging Cable*.
- 12) **Lynch. (1964).** *Formation Evaluation*. New York : Harper and Row.
- 13) **Lyons W. (1996).** *Standard Handbook of Petroleum and Natural Gas Engineering*, United States of America
- 14) **Odeh, A. (1986).** *Reservoir fluid flow and natural drive mechanisms*. Boston.
- 15) **Reduehlhuber, F. (1957).** *Sampling Procedures for oil Reservoir Fluids*. J.Pet.Tech.
- 16) **Shah, D. (1971).** *Improved oil recovery by surfactant and polymer flooding*. New York: Academic Press.
- 17) **Stalkup, F. J. (1983).** *Miscible displacement*. Society of petroleum Engineers Monograph Series.



18) [https://wiki.aapg.org/Enhanced\\_oil\\_recovery](https://wiki.aapg.org/Enhanced_oil_recovery)

19) [https://wiki.aapg.org/Drive\\_mechanisms\\_and\\_recovery](https://wiki.aapg.org/Drive_mechanisms_and_recovery)