

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΕΞΟΡΥΞΗΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ



ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΑΛΕΞΟΠΟΥΛΟΣ ΑΡΓΥΡΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: Δρ. ΘΕΟΔΩΡΟΠΟΥΛΟΥ ΜΑΡΙΑ

ΠΑΤΡΑ 2013

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματεύεται το ιδιαίτερα πολύπλευρο και πολύπλοκο θέμα της εξόρυξης πετρελαίου. Με μια ιστορική ανασκόπηση στο εν λόγω θέμα θα γίνει εμφανής στον αναγνώστη/μελετητή η τεράστια μελέτη και προσπάθεια που έχει γίνει στον τομέα ούτως ώστε να καταλήξουμε στα σημερινά δεδομένα τεχνολογικής προόδου όσο και στον σημερινό υψηλό όγκο παραγωγής αργού πετρελαίου. Επίσης με αυτήν την εργασία θα γίνει αντιληπτό γιατί η βιομηχανία εξόρυξης πετρελαίου απορροφά τόσο ποικίλο και μεγάλο σε όγκο επιστημονικά και τεχνικά εξειδικευμένο προσωπικό τόσο για την διενέργεια αυτής καθαυτής της εξόρυξης πετρελαίου όσο και για την έρευνα με σκοπό την βελτιστοποίηση των υπαρχόντων τεχνικών καθώς και την ανάπτυξη νέων, με γνώμονα την πιο αποτελεσματική, πιο οικονομική και πιο ασφαλή εξόρυξη. Τέλος θα γίνει αναφορά στην τεράστια οικολογική καταστροφή που δύναται να επέλθει και τις αιτίες που μπορεί να ευθύνονται για αυτήν καθώς και το νομικό πλαίσιο που καλύπτει το συγκεκριμένο, μείζονος σημασίας, κομμάτι.

Ευχαριστώ θερμά την επιβλέπουσα καθηγήτρια μου κυρία Μαρία Θεοδωροπούλου Δρ. του Τμήματος Μηχανολογίας, για την ανάθεση του θέματος, την βοήθειά της κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας, αλλά και για την κατανόηση, την καθοδήγηση και τη στήριξή της, σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Επίσης, οφείλω να ευχαριστήσω θερμά και να εκφράσω την ειλικρινή μου ευγνωμοσύνη κυρίως στην οικογένεια μου αλλά και σε όσους στάθηκαν δίπλα μου και με βοήθησαν με κάθε τρόπο σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Αλεξόπουλος Αργύριος
Σεπτέμβριος 2013

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια ιστορική ανασκόπηση της εξόρυξης πετρελαίου ανά τους αιώνες με έμφαση στους δύο τελευταίους αιώνες οπότε και εκτοξεύθηκε η ζήτηση, η τεχνολογία και ο όγκος της εξόρυξης. Επίσης επεξηγείται η προέλευση του πετρελαίου και αναλύεται η σύσταση του καθώς και ο τρόπος ταξινόμησης του.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται οι σύγχρονες μέθοδοι εξόρυξης. Περιγράφεται η διαδικασία εντοπισμού κοιτασμάτων και γίνεται μια στατιστική αναφορά στα παγκόσμια κοιτάσματα πετρελαίου και την κίνηση της αγοράς. Απαριθμούνται και επεξηγούνται τα τεχνικά μέσα και οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται εκτενής αναφορά στις επιστημονικές μεθόδους πάνω στις οποίες και στηρίζονται οι τεχνικές και τα τεχνικά μέσα που χρησιμοποιούνται στις σύγχρονες μεθόδους εξόρυξης, όπως αυτές αναφέρονται στο δεύτερο κεφάλαιο.

Στο τέταρτο και τελευταίο κεφάλαιο περιγράφεται ο οικολογικός αντίκτυπος διαρροής πετρελαίου και οι αιτίες που μπορεί να οδηγήσουν σε αυτή. Ακολουθεί αναφορά στο νομοθετικό πλαίσιο που διέπει τέτοιες περιπτώσεις και καθορίζει την ευθύνη, οικονομική και αστική, των υπαιτίων.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	ii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	iii
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟ	1
1.1 Η ΕΞΟΡΥΞΗ ΚΑΙ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΤΟΥ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ ΑΝΑ ΤΟΥΣ ΑΙΩΝΕΣ.....	1
1.2 Η ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΤΟΥ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ	12
1.3 ΣΥΣΤΑΣΗ ΑΡΓΟΥ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ	17
1.4 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΠΕΤΡΕΛΑΙΩΝ	20
2. ΤΑ ΣΤΑΔΙΑ ΤΗΣ ΕΞΟΡΥΞΗΣ	23
2.1 ΕΡΕΥΝΑ ΓΙΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟ.....	23
2.1.1 Γεωλογική Έρευνα.....	24
2.1.2 Γεωφυσική Έρευνα.....	24
2.1.2.1 Μη Σεισμικές Μέθοδοι.....	24
2.1.2.2 Σεισμικές Μέθοδοι.....	27
2.1.2.3 Γεωχημική Έρευνα και Προσδιορισμός Ανθρακοποίησης Δειγμάτων	30
2.2 ΥΠΑΡΞΗ, ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΑΠΟΘΕΜΑΤΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ	31
2.3 ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ.....	35
2.3.1 Περιστροφική Εξέδρα Γεώτρησης.....	36
2.4 ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ	42
2.4.1 Πρωτογενής ανάκτηση (primary recovery)	43
2.4.2 Δευτερογενής ανάκτηση (secondary recovery)	43
2.4.3 Τριτογενής ή προχωρημένη ανάκτηση (tertiary or enhanced recovery).....	44
2.5 ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΡΓΟΥ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ	50
2.6 ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΑΠΟ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ	52
3. ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΤΙΣ ΟΠΟΙΕΣ ΣΤΗΡΙΖΕΤΑΙ Η ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ ..	55
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ.....	55
3.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΟΡΩΔΩΝ ΜΕΣΩΝ	56
3.3 ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΟΡΩΔΩΝ ΜΕΣΩΝ ΓΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΦΑΣΙΚΗΣ ΡΟΗΣ	59
3.3.1 Απόλυτη διαπερατότητα και νόμος του Darcy	60

3.3.2 Θεωρία Διείσδυσης.....	62
3.3.3 Προσέγγιση αποτελεσματικού μέσου.....	64
3.3.4 Ροή δύο φάσεων σε πορώδη μέσα – παράμετροι ροής.....	65
3.3.4.1 Σχετικές Διαπερατότητες.....	65
3.3.4.2 Τριχοειδής Αριθμός.....	66
3.3.4.3 Ιστορία της ροής.....	68
3.3.4.4 Λόγος Ξωδών.....	70
3.3.5 Διαβρεκτικότητα.....	70
3.3.5.1 Γωνία επαφής ισορροπίας.....	70
3.3.5.2 Επίδραση της διαβρεκτικότητας στην τριχοειδή πίεση.....	72
3.3.6 Δυναμική Γαγγλίων.....	73
3.3.6.1 Κινητοποίηση Γαγγλίου.....	73
3.3.6.2 Δυναμική Πληθυσμού Γαγγλίων.....	77
4. Ο ΑΝΤΙΚΤΥΠΟΣ ΤΗΣ ΕΞΟΡΥΞΗΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ.....	79
4.1 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ.....	79
4.2 ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ.....	83
4.2.1 Ευρωπαϊκή νομοθεσία σχετικά με τη ρύπανση από θαλάσσια ατυχήματα.....	86
4.2.2 Η Συνθήκη του Λουγκάνο σε σχέση με τα απόβλητα.....	86
4.2.3 Λευκή Βίβλος.....	87
4.2.4 Η οδηγία 2004/35/ΕΚ.....	88
4.2.5 Erika II - επιστημονική υποστήριξη και επικοινωνία.....	92
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	95

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟ

1.1 Η ΕΞΟΡΥΞΗ ΚΑΙ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΤΟΥ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ ΑΝΑ ΤΟΥΣ ΑΙΩΝΕΣ

Η χρησιμοποίηση παραγώνων πετρελαίου εντοπίζεται πολλές χιλιετίες στο παρελθόν. Στην Μεσοποταμία καταγράφονται έως και 30 περιοχές με ροές πετρελαίου και επιφανειακές ενδείξεις. Οι Ασσύριοι κατά τον 9ον αιώνα π.Χ. θεωρούσαν την διαφυγή των αερίων από τα κοιτάσματα πετρελαίου “την φωνή των θεών που έβγαινε από τους Βράχους”. Το εύφλεκτο πετρέλαιον ονοματίσθηκε από τους Βαβυλώνιους ως νάφθα, ήτοι το υλικό που καίγεται με έντονη φλόγα. Η αξιοποίηση της πίσσας για την αδιαβροχοποίηση στεγών στην τοιχοποιία και την στεγανοποίηση πλοιαρίων καθώς και για φαρμακευτικούς σκοπούς καταγράφεται στο 3000 π.Χ. Η ασφαλτος αποτελούσε σημαντικότερο εμπορικό προϊόν της Μεσοποταμίας και γίνεται αναφορά από τον Στράβωνα και τον Τάκιτο. Η νάφθα, συνδυασμένη με ασβέστη και άλλες προσμίξεις, ήταν το κυρίως υλικό που χρησιμοποιούσαν οι Βυζαντινοί του 7ου μ.Χ. αιώνα στο περίφημο ‘υγρό πυρ’. Ο Αγκικόλας, τον 16° αιώνα, περιγράφει στο De Re Metallica το διαχωρισμό της ασφάλτου από ασφαλτούχα πετρώματα με την μέθοδο της θέρμανσης. Η πρώτη περιγραφή απόσταξης πετρελαίου καταγράφεται σε ένα φυλλάδιο που εκδόθηκε το 1625 στο Στρασβούργο. Κατά την προσεχτική απόσταξη αργού πετρελαίου, εκτός από τα Βαριά κλάσματα που είναι κατάλληλα για φαρμακευτικές χρήσεις, λαμβάνονταν και κλάσματα που μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για λίπανση αξόνων, στη Βαφική και ως φωτιστικό πετρέλαιο στις λάμπες.

Από το τέλος του 17ου αιώνα χρονολογείται ευρεσιτεχνία στην Αγγλία που περιγράφει την επεξεργασία πισσούχων σχιστόλιθων (κονιοποίηση και απόσταξη) στο Pitchford on Severn με προϊόντα το διαλύτη <<νέφτι>> και την πίσσα (pitch). Το 1712 ένας Έλληνας γιατρός της Ελβετίας εφήυρε τα επικαλυπτικά υλικά που περιείχαν ασφαλτο και τριμμένα πετρώματα.

Έπρεπε όμως να περάσουν εβδομήντα και πλέον χρόνια για να αρχίσει κάπως να γενικεύεται η χρήση βελτιωμένων υλικών του πετρελαίου. Η σύγχρονη

βιομηχανία πετρελαίου δεν προήλθε πάντως από τις παραπάνω χρήσεις, αλλά από την ανάγκη για καλύτερο και αποδοτικότερο φωτισμό στη δεκαετία του 1850.

Άλλωστε, η ίδια ανάγκη οδήγησε και στην τεχνολογία παραγωγής του φωταερίου από άνθρακα. Στην παραπάνω δεκαετία άρχισε να διατίθεται για φωτισμό το φωτιστικό πετρέλαιο ή παραφινέλαιο (paraffin-oil) στην Αγγλία (προερχόμενο από τους βιτουμειούχους σχίστες της Σκωτίας), ενώ στην Αμερική το ίδιο υλικό, με το όνομα κηροζίνη, παραγόταν από την άσφαλτο του Τρινιντάντ. Το υλικό αυτό αντικατέστησε το όλο και ακριβότερο λίπος των φαλαινών που χρησιμοποιούνταν ως τότε για φωτιστικό έλαιο. Οι πρώτες σχετικά προηγμένες τεχνολογικά γεωτρήσεις (που είχαν δανειστεί αρκετές ιδέες από τους Κινέζους) έγιναν μετά το 1830 για την εύρεση νερού ή ορυκτών αλάτων. Δεν ήταν λίγες οι φορές όμως που έπεφταν επάνω σε φλέβες πετρελαίου. Αν και η πρώτη ηθελημένη προσπάθεια για ανόρυξη γεώτρησης πετρελαίου ξεκίνησε τον Απρίλιο του 1857 στο Αμβούργο (και την ίδια χρονιά ολοκληρώθηκαν δύο χειροποίητες γεωτρήσεις στο Πλοέστι της Ρουμανίας), συχνά αναφέρεται ως απαρχή της εποχής του πετρελαίου η ανόρυξη γεώτρησης στις 27 Αυγούστου του 1859 στο Titusville της Πενσυλβάνιας από τον Edwin L. Drake, κατόπιν παραγγελίας του βιομηχάνου G.H. Bissell. Το βάθος της επιτυχούς αυτής γεώτρησης ήταν μόλις 69½ ft (21 m). Μέσα σε 15 χρόνια η παραγωγή πετρελαίου στην Πενσυλβάνια έφτασε τα 10 εκατομμύρια βαρέλια ετησίως.

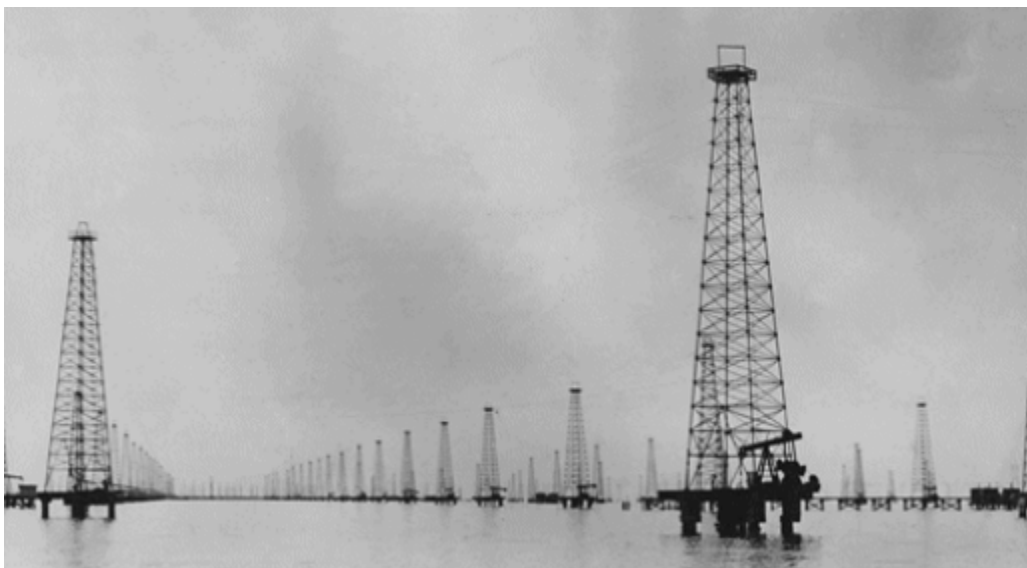
Οι περισσότεροι ειδικοί στην ιστορία του πετρελαίου εντοπίζουν την αρχή της θαλάσσιας έρευνας και παραγωγής πετρελαίου στο Summerland της California το 1897. Σε αυτή την ειδυλλιακή αρχικά περιοχή, στα νοτιοανατολικά της Santa Barbara, είχαν παρατηρηθεί επιφανειακές εμφανίσεις πετρελαίου σε απόσταση μερικών εκατοντάδων μέτρων από την ακτή. Ο ιδρυτής του Summerland, H.L. Williams, παραλείποντας το στάδιο της έρευνας, ξεκίνησε αμέσως την κατασκευή 3 ξύλινων αποβάθρων (piers), σε απόσταση 411 m από την ακτή και σε βάθος νερού 11 m. Κατά τη διάρκεια των επόμενων 3 ετών ανέγειρε 20 πύργους γεωτρήσεων (derricks). Οι ηλεκτρικές γεννήτριες και ο υπόλοιπος υποστηρικτικός εξοπλισμός ήταν τοποθετημένος κατά μήκος της ακτής. Το προσωπικό του Williams, όπως και οι περισσότεροι άλλοι γεωτρυπανιστές εκείνη την εποχή δεν είχαν ακόμα χρησιμοποιήσει τα περιστροφικά γεωτρήματα (rotary drilling rigs). Αντ' αυτών, τοποθετούσαν έναν ασάλινο σωλήνα από την εξέδρα της γεώτρησης προς τον αμμώδη θαλάσσιο πυθμένα και χρησιμοποιούσαν εργαλεία με συρματοσχοίνο (cable tools) για να φτάσουν ως τα 139m, που ήταν το βάθος του στόχου.

Το κυνήγι για τον μαύρο χρυσό αν και ήταν τολμηρό είχε μέτρια απόδοση με την πιο παραγωγική γεώτρηση (well) να φτάνει στα 78 βαρέλια την ημέρα (barrel soils per day bord), ενώ μία μέση γεώτρηση παρήγαγε μόλις 2 βαρέλια την ημέρα. Η παραγωγή στο Summerland κορυφώθηκε το 1902 και οι γεωτρήσεις εγκαταλείφθηκαν κάποια χρόνια αργότερα. Άφησαν πίσω τους μία παραλία κατάμαυρη από το πετρέλαιο και γεμάτη από τις παλιές εξέδρες που σάπιζαν και πύργους γεωτρήσεων που σκούριαζαν, μέχρις ότου ένα ισχυρό παλιρροϊκό κύμα «κατάπτε» τις εναπομείνουσες κατασκευές το 1942.

Την δεκαετία του 1910, κατά μήκος των ακτών της Καλιφόρνια επιχειρήσαν και άλλοι να ακολουθήσουν το παράδειγμα του Summerland με εξέδρα και πύργο γεώτρησης. Χαρακτηριστικά, στο ElwoodField, οι εξέδρες εκτείνονταν στα 550 m από την ακτή και έφταναν σε βάθος νερού μόλις 10 m. Το επόμενο βήμα στην ιστορία των θαλάσσιων γεωτρήσεων έγινε σε ένα λιμναίο περιβάλλον. Στην περιοχή γύρω από τη λίμνη Caddo στο Ανατολικό Τέξας, οι «κυνηγοί» του πετρελαίου είχαν πέσει πολλές φορές πάνω σε θύλακες φυσικού αερίου. Το 1907, ο J. B. McCann, «ανιχνευτής» για την GulfOilCorporation, θέλησε να διερευνήσει περαιτέρω το ενδεχόμενο ύπαρξης ενός μεγάλου κοιτάσματος φυσικού αερίου στην περιοχή αυτή. Έτσι, ένα βράδυ κωπηλατώντας στη λίμνη άναβε σπύρτα πάνω από τις φυσαλίδες που έβγαιναν από αυτή. Με αυτόν τον τρόπο, πείστηκε και έπεισε και τον W. L. Mellon, επικεφαλής της GulfOil στο Pittsburg, ότι ένα μεγάλο πετρελαϊκό πεδίο βρισκόταν κάτω από τη λίμνη.

Η GulfOil πήρε την παραχώρηση (concession), της εν λόγω περιοχής, προκειμένου να ορύξει γεωτρήσεις στα 80 km του λιμναίου βυθού, εφαρμόζοντας νέες τεχνικές για την περιοχή, αλλά και για την πετρελαϊκή βιομηχανία συνολικά. Ξεκινώντας το 1910, ρυμουλκήθηκαν μέσα από τον ποταμό Μισσισιππή και από τον Κόκκινο Ποταμό, μια πλωτή μηχανή τοποθέτησης πασσάλων (floating pile driver), ένας μικρός στόλος με πλοία προμηθειών και φορηγίδες με πύργους, γεννήτριες και λέβητες. Χρησιμοποιώντας πασσάλους από κορμούς κυπαρισσιού, κατασκεύασαν εξέδρες και πύργους γεωτρήσεων (Εικ. 1.2). Κάθε γεωτρητική και παραγωγική εξέδρα διέθετε το δικό της πύργο και τη δική της γεννήτρια φυσικού αερίου. Κάθε μία από αυτές, μέσω ενός αγωγού διαμέτρου 3 in εγκατεστημένου στο βυθό της λίμνης, διοχέτευε τα παραγόμενα ρευστά στους σταθμούς διαχωρισμού πάνω σε ειδικές εξέδρες συγκέντρωσης. Κατά τη διάρκεια των επόμενων 4 δεκαετιών, η εταιρεία όρυξε 278 γεωτρήσεις και παρήγαγε 13 εκατ. βαρέλια

πετρελαίου από τη λίμνη Caddo, δημιουργώντας στην πορεία ένα εμπορικά επιτυχημένο πρότυπο, για θαλάσσιες γεωτρήσεις, από εξέδρες πάνω σε πασσάλους. Στη Βενεζουέλα, στα μέσα της δεκαετίας του '20, αντέγραψαν την τεχνική που εφαρμόστηκε στη λίμνη Caddo, με μια διαφορά, τη χρήση τσιμεντένιων πασσάλων για τη στήριξη της εξέδρας. Αυτό έγινε, αναγκαστικά, λόγω ενός λιμναίου σκουληκιού που κατέτρωγε το ξύλο, με αποτέλεσμα να μην επιτρέπει τον απαραίτητο για την οικονομική βιωσιμότητα, χρόνο ζωής των πάσσαλων. Στα επόμενα 30 χρόνια, η εταιρεία LagoPetroleum, κατασκεύασε 900 τσιμεντένιες εξέδρες στη λίμνη Maracaibo. Στα 1950, για την κατασκευή των εξεδρών χρησιμοποιούσαν κοίλους κυλινδρικούς πασσάλους, διαμέτρου 54 in, με πάχος τοιχώματος 5 in, εφοδιασμένους με ασάλινη κεφαλή για ευκολότερη τοποθέτηση, και μήκους 61 m, κατασκευασμένους από προεντεταμένο σκυρόδεμα οπλισμένο με συρματόσχοινα (Εικ. 1.1).



Εικόνα 1.1: Πολυάριθμες offshore πλατφόρμες στη λίμνη Maracaibo, στη Βενεζουέλα.



Εικόνα 1.2: Πλατφόρμες με ξύλινους πασσάλους.

Ενώ η λίμνη Maracaibo αναπτυσσόταν, η TexasOil που τότε εκμεταλλευόταν τους βάλτους της Louisiana, έψαχνε μία νέα ιδέα για να βελτιώσει την οικονομικότητα της χρήσης των ξύλινων πασσάλων. Η ιδέα χρήσης μιας βυθισμένης φορηγίδας στην επιθυμητή θέση της εξέδρας προσέλκυσε το ενδιαφέρον της. Έτσι, μετά από έρευνα ανακάλυψαν στο Γραφείο Ευρεσιτεχνιών των ΗΠΑ ότι ο Louis Giliasso, ένας πλοίαρχος του εμπορικού ναυτικού που είχε δουλέψει στη λίμνη Maracaibo, είχε ήδη κατοχυρώσει την ιδέα. Σε συνεργασία μαζί του, βύθισαν δύο φορηγίδες τη μία δίπλα στην άλλη, σε μια ελώδη περιοχή της λίμνης Pelto, στη Louisiana. Καθώς το βάθος νερού ήταν μόλις λίγα πόδια, γρήγορα, εγκατέστησαν πάνω μία εξέδρα και έναν πύργο γεώτρησης. Ονόμασαν την πρώτη αυτή βυθιζόμενη κατασκευή (submersible Giliasso), από τον εφευρέτη της. Αφού όρυξαν μία γεώτρηση βάθους 1737 m με περιστροφικό γεωτρύπανο δεν εντόπισαν κοίτασμα υδρογονανθράκων. Απτόητοι, ανέλκυσαν τις φορηγίδες και μετακινήθηκαν γρήγορα σε άλλα σημεία της λίμνης ορύσσοντας 5 νέες γεωτρήσεις σε ένα χρόνο. Η εξέδρα Giliasso μείωσε το νεκρό χρόνο μεταξύ της ολοκλήρωσης μιας γεώτρησης και της έναρξης όρυξης της επόμενης από 17 σε 2 ημέρες. Έτσι, ξεκίνησε η όρυξη θαλάσσιων γεωτρήσεων με πλωτά μέσα.

Στα 1930, η εταιρεία PureOil διεξήγαγε χερσαίες γεωφυσικές και σεισμικές έρευνες κοντά στην παραθαλάσσια πόλη Creole, στη Louisiana. Οι έρευνες

κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι πετρελαιοφόροι άμμοι (oil sands) εκτείνονταν και στη θάλασσα. Το 1937, σχημάτισαν μία κοινοπραξία με την Superior Oil για να ερευνήσουν τη θαλάσσια παραχώρηση έκτασης 133 km². Γι' αυτό το λόγο ανέθεσαν στην εταιρεία Brown and Root να κατασκευάσει μία καινοτόμο εξέδρα επιφάνειας 133 km² στηριγμένη επάνω σε ξύλινους πασσάλους, σε βάθος νερού 4,5m και σε απόσταση ενός μιλίου από την ακτή. Η κατασκευή για να είναι ανθεκτική σε καταιγίδες ενισχύθηκε με χαλύβδινα δεσίματα και επιπλέον πασσάλους. Η πρώτη γεώτρηση ορύχθηκε στα 2865 m και αποδείχθηκε επιτυχημένη. Αργότερα ορύχθηκαν άλλες 10 κεκλιμένες γεωτρήσεις. Τελικά, το πεδίο Creole παρήγαγε ως το πέρας της ζωής του 4 εκατ. βαρέλια πετρελαίου.

Στις αρχές του 1947, έγινε το επόμενο άλμα στην εξέλιξη των θαλάσσιων γεωτρήσεων. Η Superior Oil εγκατέστησε μια εξέδρα σε βάθος νερού 7 m και σε απόσταση περίπου 18 μιλίων από το Vermilion Parish, στη Louisiana. Η εν λόγω εξέδρα κατασκευάστηκε σε χερσαίο εργοτάξιο και ήταν η πρώτη προκατασκευασμένη εξέδρα. Στη συνέχεια μεταφέρθηκε σε τμήματα και τοποθετήθηκε στη θέση εγκατάστασής της. Με αυτή την καινοτόμο τεχνική, η Superior πέτυχε: μείωση χρόνου εγκατάστασης, βελτιωμένη δομική ακεραιότητα, μείωση του κόστους και βελτίωση των συνθηκών ασφαλείας γύρω από την εγκατάσταση. Ωστόσο η γεώτρηση ήταν ανεπιτυχής. Η Kerr-McGee Oil Industries (K-M) (τώρα Anadarko Petroleum) ήταν εκείνη που ολοκλήρωσε, ως ανάδοχος για τους εταίρους Phillips Petroleum (ConocoPhillips) και Stanolind Oil & Gas (BP), τον Οκτώβριο του 1947 το εγχείρημα στην ιστορική περιοχή Ship Shoal Block 32, 10,5 μίλια από το Vermilion Parish. Μετά από προσπάθεια 2 ετών και οικονομικές και τεχνικές δυσκολίες, η K-M εγκατέστησε 2 εξέδρες και όρυξε την πρώτη επιτυχημένη θαλάσσια γεώτρηση σε σημείο όπου δεν ήταν δυνατή η ορατότητα από την ξηρά. Η πρώτη αυτή γεώτρηση της Kerr-McGee στον Κόλπο του Μεξικού παρήγαγε περίπου 500 βαρέλια την ημέρα. Την ίδια περίπου εποχή, ο John T. Hayward, ένας αμφιλεγόμενος μηχανολόγος του ναυτικού, σχεδίασε μία πλήρως βυθιζόμενη, συμβατικού μεγέθους φορηγίδα με στύλους αρκετά ψηλούς ώστε να μπορούν να στηρίξουν την εξέδρα σε ασφαλή απόσταση πάνω από το νερό, με ελεγχόμενο ύψος εξάλων και χωρίς εκτροπή λόγω κυματισμού. Πλωτήρες σε κάθε πλευρά της φορηγίδας παρείχαν σταθερότητα και έλεγχο της μετατόπισης. Αν και αρχικά οι πελάτες του δυσπιστούσαν έναντι αυτού του σχεδιασμού, τελικά πείστηκαν και κατασκεύασαν την πρωτότυπη εξέδρα το 1948, την οποία ονόμασαν Breton Rig 20. Η πρωτότυπη αυτή εξέδρα

χρησιμοποιήθηκε σε 6 γεωτρήσεις στον Κόλπο του Μεξικού, μετακινούμενη κατά 10-15 μίλια κάθε φορά και ξεκινώντας μία νέα γεώτρηση μία ή δύο μέρες μετά την αναχώρηση από την προηγούμενη. Για τα επόμενα 12 χρόνια, οι εταιρείες σχεδίασαν διάφορες παραλλαγές της βυθιζόμενης φορηγίδας, φτάνοντας σε βάθη νερού της τάξης των 60 m.

Καθώς η εξέλιξη της τεχνολογίας διεύρυνε τις δυνατότητες όρυξης θαλάσσιων γεωτρήσεων, η έρευνα στη θάλασσα σταμάτησε λόγω ενός νομικού αδιεξόδου το 1950. Παρόλο που προσφέρονταν μισθώσεις για θαλάσσιες γεωτρήσεις από τις πολιτείες της California, του Texas και της Louisiana, ο Πρόεδρος των ΗΠΑ Harry Truman θέλησε να επιβάλλει την αποκλειστική ομοσπονδιακή δικαιοδοσία σε όλη την υφαλοκρηπίδα το 1945.

Το Ανώτατο δικαστήριο των ΗΠΑ, το 1947 και το 1950 υποστήριξε το αίτημα του Truman. Όμως, ελλείψει της απαραίτητης ομοσπονδιακής νομοθεσίας, δεν είχε καταχωρηθεί η εξουσία στο Υπουργείο Εσωτερικών ή σε άλλη ομοσπονδιακή αρχή, να μισθώνουν παραχωρήσεις. Έτσι, οι αδειοδοτήσεις σταμάτησαν προσωρινά μέχρι και το τέλος του 1950. Όταν οι θαλάσσιες γεωτρήσεις προχώρησαν σε νερά βαθύτερα από 33 m, κατασκευάστηκαν θαλάσσια γεωτρύπανα με σταθερή εξέδρα (fixed platform rigs). Όταν προέκυψε η ανάγκη για όρυξη γεωτρήσεων σε βάθη 33-120 m στον Κόλπο του Μεξικού, έκαναν την εμφάνιση τους και οι πρώτες εξέδρες τύπου jack-up, από εξειδικευμένες εταιρείες, όπως η ENSCO International. Η πρώτη ημιβυθιζόμενη εξέδρα εμφανίστηκε εξαιτίας ενός ατυχήματος το 1961. Η εταιρεία BlueWaterDrilling είχε στην ιδιοκτησία της και λειτουργούσε στον Κόλπο του Μεξικού την βυθιζόμενη εξέδρα με τέσσερις στύλους BlueWater No.1 για λογαριασμό της Shell Oil. Δεδομένου ότι οι πλωτήρες δεν ήταν επαρκείς για να υποστηρίξουν το βάρος της εξέδρας και των αναλωσίμων της κατά τη μεταφορά της, ρυμουλκούνταν μεταξύ των θέσεων με βύθισμα στο μέσον της απόστασης μεταξύ της άνω πλευράς των πλωτήρων και της κάτω πλευράς του καταστρώματος. Παρατηρήθηκε ότι οι κινήσεις σε αυτό το βύθισμα ήταν πολύ μικρές και η BlueWaterDrilling και η Shell αποφάσισαν από κοινού ότι το γεωτρύπανο θα μπορούσε να λειτουργήσει ως πλωτό.

Η πρώτη ημιβυθιζόμενη εξέδρα κατασκευασμένη για αυτό το σκοπό, παρουσιάστηκε το 1963 με την ονομασία "OceanDriller". Από τότε, πολλοί τύποι ημιβυθιζόμενων εξεδρών έχουν σχεδιαστεί ειδικά για τις θαλάσσιες γεωτρήσεις υδρογονανθράκων. Το πρώτο θαλάσσιο γεωτρητικό πλοίο ήταν το Submarex1, το

οποίο κατασκευάστηκε για λογαριασμό μιας κοινοπραξίας εταιρειών στην οποία συμμετείχαν οι Union, Continental, Shell και SuperiorOil (επωνομαζόμενη ως CUSS). Επρόκειτο για ένα μετασκευασμένο πρώην πολεμικό πλοίο (άκατος περιπολίας) στο οποίο προστέθηκε ένα γεωτρύπανο ως πρόβολος πακτωμένος στο μέσο της αριστερής πλευράς του. Το 1953, το γεωτρητικό πλοίο Submatex όρυξε γεωτρήσεις σε από 10 έως 120 m, αλλά αντιμετώπισε μηχανικά προβλήματα και έτσι οι εταιρείες περιόρισαν τις δραστηριότητές του σε δειγματοληψίες πυρήνων (coresampling) και όχι σε ερευνητικές γεωτρήσεις. Η κοινοπραξία όμως, εφοδιασμένη με γνώσεις από αυτό το εγχείρημα, σχεδίασε στη συνέχεια, το CUSS 1 και έτσι το πρώτο γεωτρητικό πλοίο κατασκευάστηκε το 1961. Το CUSS 1 δεν διέθετε πρόωση. Ρυμουλκούνταν στη θέση του και αγκυρωνόταν στον βυθό. Το CUSS 1 χρησιμοποιήθηκε με επιτυχία σε βάθη νερού μέχρι 106 m, εκτελώντας πυρηνοληψία μέχρι και τα 1890 m. Οι περισσότεροι ιστορικοί, συμφωνούν ότι το CUSS 1 ξεκίνησε μία νέα κατηγορία θαλάσσιων ερευνητικών γεωτρυπανών: τις πλωτές εξέδρες. Το 1962, η Sedco κατασκεύασε το Eureka για την ShellOil. Για να διαχειριστεί το θέμα της σταθερότητας θέσης, το Eureka διέθετε πρυμναίες και πρωραίες προπέλες που εκτείνονταν στον πυθμένα του πλοίου. Οι προπέλες είχαν τη δυνατότητα να περιστρέφονται κατά 360° μετακινώντας το πλοίο προς οποιαδήποτε κατεύθυνση. Η Shell και αυτή τη φορά χρησιμοποίησε το γεωτρητικό αυτό πλοίο μόνο για πυρηνοληψία θεωρώντας το πολύ πειραματικό για να ορύξει ερευνητικές γεωτρήσεις. Το πρώτο γεωτρητικό σκάφος με τέτοια δυνατότητα είναι το SEDCO 445, που έκανε την εμφάνισή του το 1971.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι το SEDCO 445 ήταν το πρώτο γεωτρητικό πλοίο που χρησιμοποίησε το ακουστικό σύστημα εντοπισμού θέσης (acoustic positioning system), με σημαντικό περιθώριο λάθους, όμως, που για βάθη της τάξης των 910 m έφτανε τα 20 m. Το σκάφος αυτό κατασκευάστηκε με τη δυνατότητα να ορύσσει γεωτρήσεις σε βάθη νερού έως 1890 m.

Το 1962, το πρώτο τηλεχειριζόμενο ρομποτικό όχημα (Remotely Operated Vehicle ROV) χρησιμοποιήθηκε για να συνεισφέρει σε μία θαλάσσια γεώτρηση στη Δυτική ακτή των ΗΠΑ από τη Shell.

Στα 1972, ξεκίνησαν οι θαλάσσιες γεωτρήσεις σε βαθιά νερά με την πρώτη ημιβυθιζόμενη εξέδρα που είχε τη δυνατότητα όρυξης γεωτρήσεων σε βάθη θάλασσας μεγαλύτερα των 300 m (1000ft). Τα σχετικά σταθερά επίπεδα παραγωγής πετρελαίου από υποθαλάσσια κοιτάσματα, στη δεκαετία του 1980, συγκαλύπτουν μια

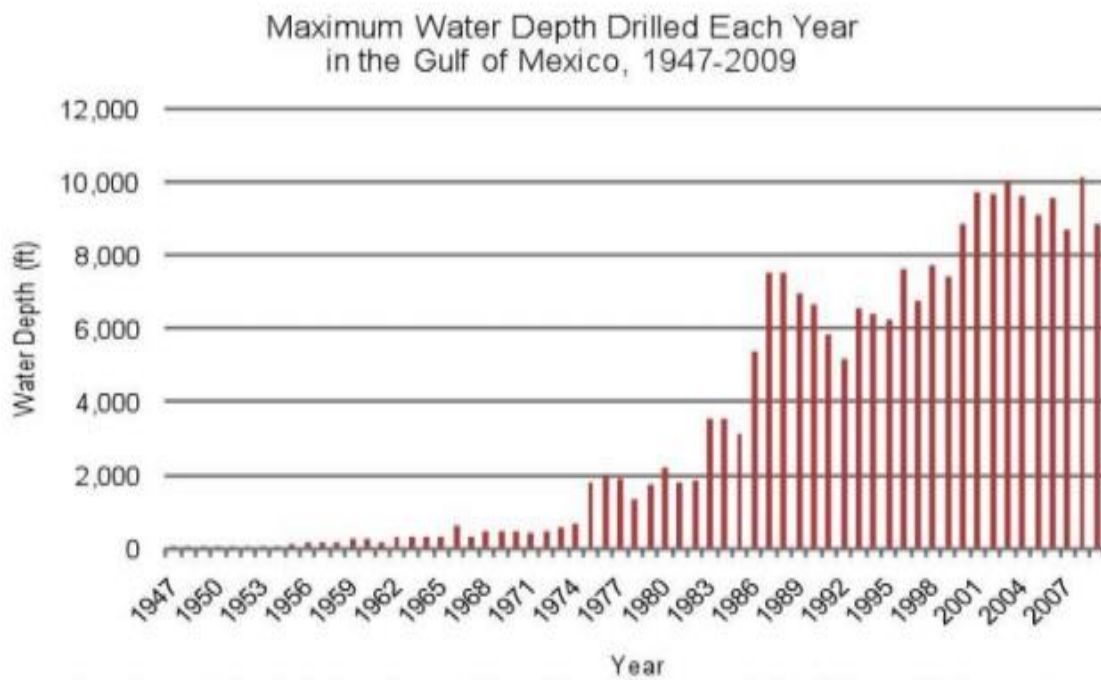
σημαντική μετατόπιση που συνέβη στον Κόλπο του Μεξικού. Η παραγωγή πετρελαίου από θαλάσσιες γεωτρήσεις μικρού βάθους θάλασσας αυξήθηκε και μειώθηκε διαδοχικά σε πλήρη αναλογία με τους κύκλους άνθησης και ύφεσης της ευρύτερης πετρελαϊκής βιομηχανίας. Αν και εντοπίστηκαν ορισμένες πολλά υποσχόμενες περιοχές σε μικρό βάθος θάλασσας, γρήγορα αποδείχτηκαν πολύ δύσκολες στην προσπέλαση, λόγω των περιορισμών που τίθονταν τότε στη σεισμική έρευνα. Η υφαλοκρηπίδα περιείχε, ως επί το πλείστον, φυσικό αέριο καθιστώντας έτσι δυσκολότερη οικονομικά την εκμετάλλευση μικρών διάσπαρτων κοιτασμάτων. Οι δύο παραπάνω παράγοντες οδήγησαν σε μεγαλύτερη έρευνα για τον εντοπισμό μεγαλύτερων πεδίων σε βαθύτερα νερά.

Η πρώτη ανακάλυψη σε βαθιά νερά άνω των 300m (1000ft) ήρθε στο πεδίο Cognac της εταιρείας ShellOil το 1975. Ωστόσο, η τεχνολογία έπρεπε να εξελιχθεί ώστε να είναι κατάλληλη για βαθιά νερά, όμως ακριβώς χρειάστηκε κάποιο χρόνο για να μεταφερθεί από τις χερσαίες στις θαλάσσιες γεωτρήσεις. Στο Cognac υιοθετήθηκε η τεχνολογία της σταθερής εξέδρας που είχε χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε ρηχά νερά, η οποία ωστόσο αποδείχθηκε αντιοικονομική όταν έπρεπε να μετακινηθεί σε μεγάλη απόσταση από την ακτή.

Παρόλα αυτά, με την εμφάνιση νέων τεχνολογιών, τη δεκαετία του 1980 παρατηρήθηκαν αρκετές πρωτοποριακές ανακαλύψεις. Η παράλληλη δραστηριότητα της Shell σε βαθιά νερά στο πεδίο Augur (1987) και σε άλλες θέσεις που ανακαλύφθηκαν στη δεκαετία του 1980, προήγαγαν τις δυνατότητες γεωτρήσεων σε βαθιά νερά. Στο Augur χρησιμοποιήθηκε μία μη σταθερή εξέδρα τύπου jack-up, η οποία προσαρμοζόταν καλύτερα σε βαθιά νερά έναντι των σταθερών εξεδρών.

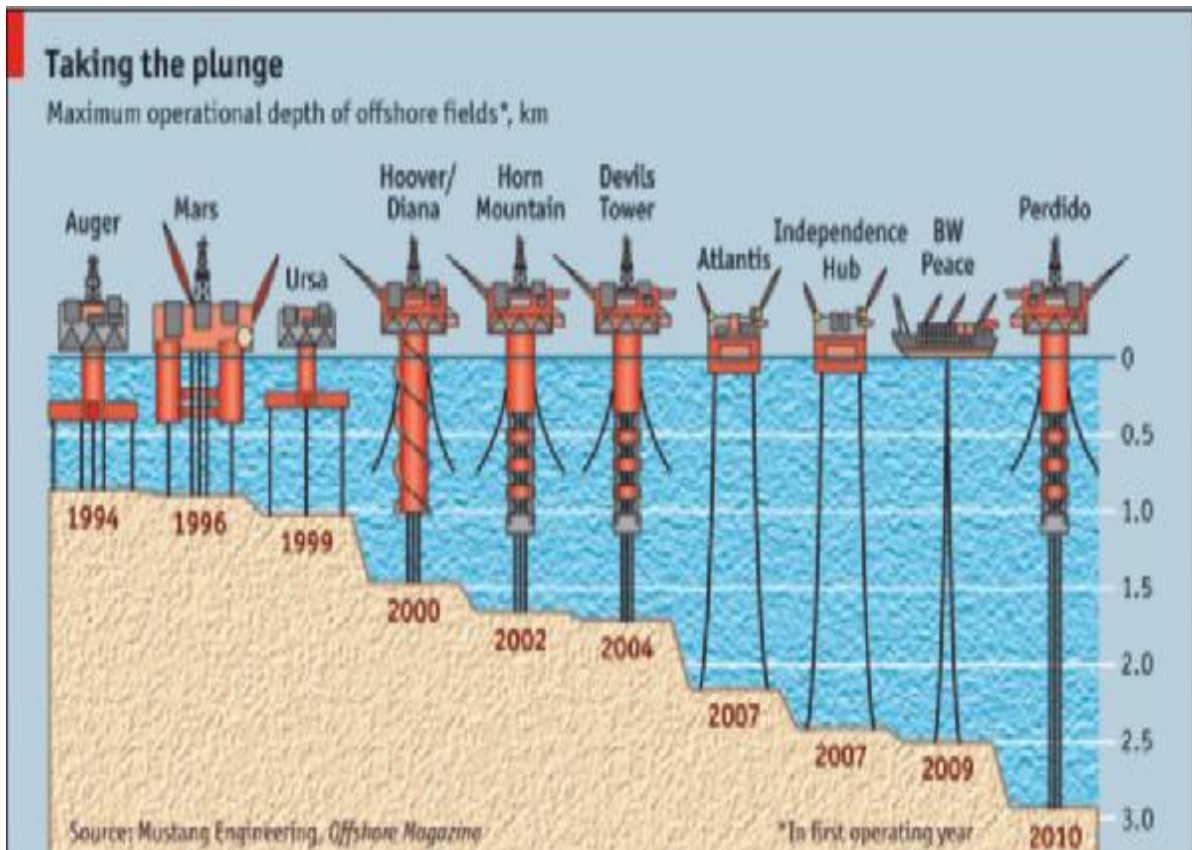
Η Shell δεν ήταν η μόνη που έκανε σημαντικές ανακαλύψεις σε βαθιά νερά στον Κόλπο του Μεξικού στη δεκαετία του 1980. Η Conoco (αργότερα συγχωνεύτηκε με την Phillips), η BritishPetroleum, η Mobil (αργότερα συγχωνεύτηκε με την Exxon), η Amoco (αργότερα συγχωνεύτηκε με την BP), η Oryx (αργότερα συγχωνεύτηκε με την Kerr-McGee) και η Exxon κινήθηκαν περισσότερο προς την αναζήτηση νέων θαλάσσιων κοιτασμάτων πετρελαίου και φυσικού αερίου. Τέλος, η Petrobas, που ιδρύθηκε από την κυβέρνηση της Βραζιλίας το 1953, προχώρησε επίσης στην αναζήτηση κοιτασμάτων σε βαθιά νερά στα ανοικτά των ακτών της Βραζιλίας. Η κατάρρευση των τιμών του πετρελαίου στην παγκόσμια αγορά στα μέσα της δεκαετίας του 1980 σταμάτησε την επέκταση των χερσαίων και θαλάσσιων γεωτρήσεων και αποτέλεσε ένα καταστροφικό πλήγμα για τις οικονομίες της

Λουιζιάνα και του Τέξας. Μέχρι το 1990, η συνολική θαλάσσια παραγωγή ανήλθε σε μόλις 1,1 εκατομμύρια βαρέλια την ημέρα (Mbopd), μόλις 5% περισσότερο από την προηγούμενη δεκαετία. Χαρακτηριστικό είναι επίσης ότι το ίδιο χρονικό διάστημα μειώθηκαν και οι επενδύσεις για έρευνα και ανάπτυξη κοιτασμάτων σε μεγαλύτερα βάθη θάλασσας (Εικ. 1.3).



Εικόνα 1.3: Εξέλιξη βαθών νερού στις γεωτρήσεις στον Κόλπο του Μεξικού από το 1947-2009.

Τον Ιούνιο του 2010, υπήρχαν 620 πλωτά θαλάσσια γεωτρήματα (jackups, semisubs, drillships, barges), διαθέσιμα για να παρέχουν υπηρεσίες στη θαλάσσια γεωτρητική δραστηριότητα. Σημαντικό είναι να επισημανθεί και η εξέλιξη των εξεδρών για θαλάσσιες γεωτρήσεις ανάλογα με το βάθος της θάλασσας, όπως φαίνεται στην Εικ. 1.4 για τα τελευταία περίπου 20 χρόνια.



Εικόνα 1.4: Εξέλιξη των γεωτρήσεων σε βαθιά νερά από το 1994 έως και το 2010.

Το πετρέλαιο αποτελεί την κυριότερη πηγή ενέργειας στο σύγχρονο κόσμο, αλλά και την πρώτη ύλη για την παραγωγή πληθώρας χημικών και φαρμακευτικών προϊόντων. Το πετρέλαιο (αργό πετρέλαιο – crudeoil) είναι ουσιαστικά ένα πολύπλοκο μίγμα αερίων, υγρών και στερεών υδρογονανθράκων (που περιέχουν όμως και μικρές ποσότητες οξυγόνου, θείου και αζώτου), το οποίο ανευρίσκεται σε πετρελαιοφόρα κοιτάσματα σε διάφορα μέρη του πλανήτη και κυρίως στην περιοχή της Μέσης Ανατολής. Τα κοιτάσματα αυτά έγιναν διαθέσιμα στον κόσμο σε χαμηλό κόστος μετά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο και διαφοροποίησαν τον τρόπο που ζούμε σήμερα. Συχνά αναφέρεται και ως «μαύρος χρυσός».

Αρχικά, για την απόσταξη του αργού πετρελαίου χρησιμοποιούνταν οριζόντιοι κυλινδρικοί αποστακτήρες που θερμαίνονταν με ατμό και παρήγαγαν τρία κύρια προϊόντα:

- α)** τη βενζίνη (το ελαφρύτερο κλάσμα, που αρχικά θεωρήθηκε επικίνδυνο και άχρηστο)
- β)** την κηροζίνη
- γ)** το βαρύ υπόλειμμα που πωλούνταν ως καύσιμο.

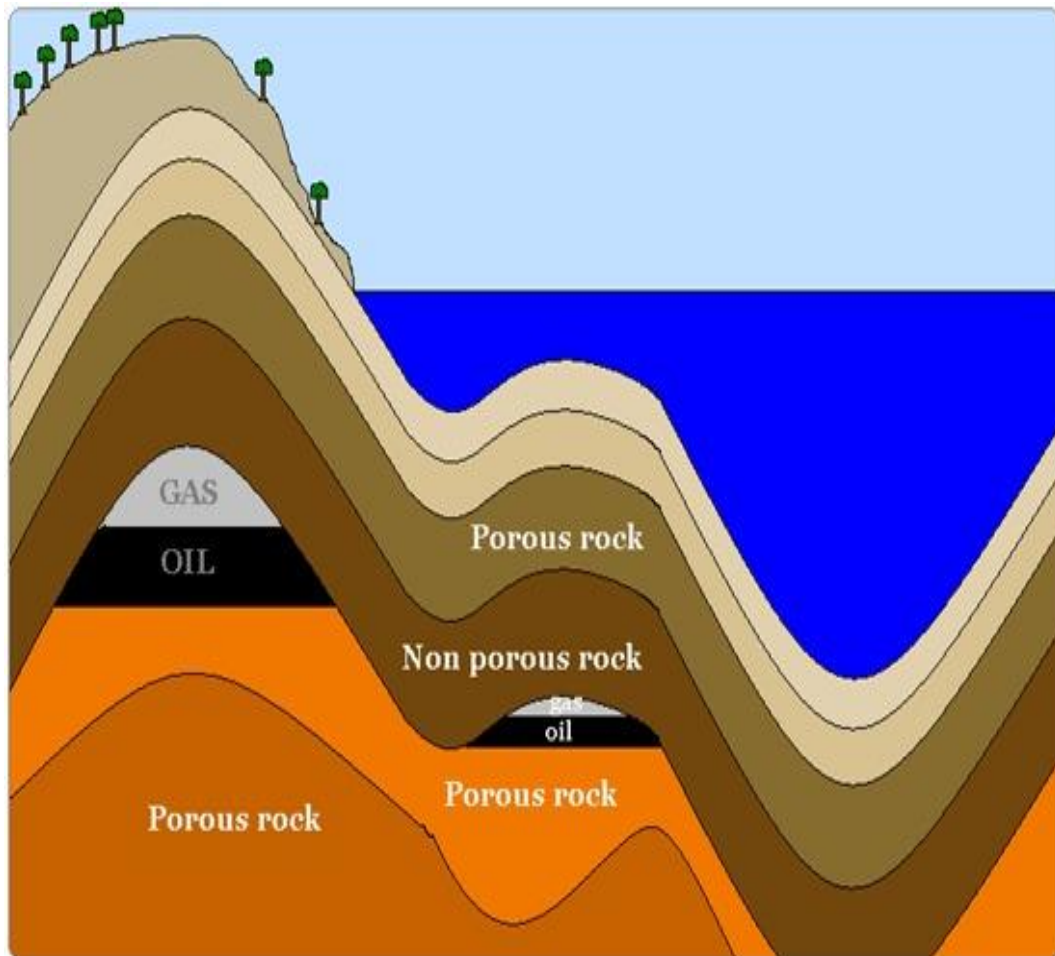
Μέχρι το 1880 στην Αμερική η όλη διεργασία απόσταξης γινόταν σε παρτίδες (διαλείπουσα διεργασία), ενώ στην Ευρώπη είχε εισαχθεί η συνεχής διεργασία. Η έλευση του ηλεκτρισμού στη δεκαετία του 1880 και η συνεχής γενίκευση του ηλεκτρικού φωτισμού άρχισε να κάνει δύσκολη τη χρήση της κηροζίνης και να πιέζει τις τιμές του πετρελαίου προς τα κάτω. Έπρεπε να βρεθούν νέες χρήσεις των προϊόντων πετρελαίου. Αρχικά, το 1878, παρουσιάστηκε η σόμπα πετρελαίου στην Διεθνή Έκθεση του Παρισιού. Μέσα σε ένα χρόνο πουλήθηκαν μισό εκατομμύριο σόμπες. Έπρεπε όμως να περάσουν άλλα 25 χρόνια για να αρχίσει να παίρνει τα επάνω της η βιομηχανία πετρελαίου με τη μαζική παραγωγή βενζινοκίνητων αυτοκινήτων. Η εφεύρεση του βενζινοκινητήρα από τους Daimler και Benz το 1885 έφερε τη μεγάλη επανάσταση στη χρησιμοποίηση των προϊόντων του πετρελαίου ως καύσιμα αυτοκινήτων. Η σημαντική αύξηση της κυκλοφορίας των βενζινοκίνητων αυτοκινήτων είχε ως συνέπεια να παρατηρηθεί έλλειψη σε βενζίνη με ταυτόχρονο πλεόνασμα σε κηροζίνη, λόγω της αυξανόμενης χρήσης των ηλεκτρικών λαμπτήρων. Η αλλαγή των δεδομένων της αγοράς ήταν η κύρια αιτία για την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών που θα παρήγαγαν επιπλέον βενζίνη χρησιμοποιώντας τα βαρέα κλάσματα.

1.2 Η ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΤΟΥ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ

Το πετρέλαιο είναι ένα ορυκτό καύσιμο το οποίο απαντάται σε πληθώρα περιοχών ανά τον κόσμο. Σύμφωνα με τη επικρατούσα θεωρία, που αρχικά διατύπωσε ο γεωλόγος Ποτονιέ, σχηματίστηκε από τα λείψανα ζωικών και φυτικών μικροοργανισμών (πλαγκτόν) που έζησαν και πέθαναν σε πανάρχαιους ωκεανούς μεταξύ δέκα και εξακοσίων εκατομμυρίων χρόνων στο παρελθόν. Αφού οι οργανισμοί αυτοί πέθαναν, καταβυθίστηκαν στην άμμο και την ιλύ του πυθμένα της θάλασσας.

Με την πάροδο των χρόνων τα λείψανα αυτά αποσυντέθηκαν στα ιζηματογενή στρώματα, όπου και υπάρχει μικρή ή και καθόλου παρουσία οξυγόνου, οπότε και τα εκεί παρόντα αναερόβια βακτήρια τα διέσπασαν σε χημικές ενώσεις πλούσιες σε άνθρακα οι οποίες με την σειρά τους σχημάτισαν οργανικές στοιβάδες. Το οργανικό υλικό αναμειγμένο με τα ιζήματα σχημάτισε πολύ ψιλό σχιστόλιθο. Καθώς καινούργιες στοιβάδες ιζήματος κατακάθονταν, ασκούσαν έντονες πιέσεις και

θερμότητες στον σχιστόλιθο οι οποίες είχαν ως αποτέλεσμα την διύλιση του οργανικού υλικού σε αργό πετρέλαιο και φυσικό αέριο. Το πετρέλαιο απομακρύνθηκε από τον σχιστόλιθο και δημιουργήθηκαν μεγάλες συγκεντρώσεις σε λεκάνες πορώδους ασβεστόλιθου και αμμόλιθου. Οι διάφορες τεκτονικές δραστηριότητες στον φλοιό της γης παγίδευσαν το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο ανάμεσα σε στρώματα αδιαπέραστου βράχου, όπως γρανίτη και μαρμάρου.



Εικόνα 1.5: Σχηματισμός πετρελαίου.

Την θεωρία αυτή στηρίζει το γεγονός ότι στα διάφορα κοιτάσματα πετρελαίου βρέθηκαν ίχνη χλωροφύλλης και αιμίνης. Η ύπαρξη των ενώσεων αυτών αποδεικνύει αφενός τη φυτική και ζωική προέλευση, αφετέρου ότι η δημιουργία αυτή έγινε κάτω από ήπια βιολογική δράση, δεδομένου ότι οι ενώσεις αυτές αποσυντίθενται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη των 250 βαθμών. Η θεωρία αυτή ενισχύεται ακόμη περισσότερο και από το γεγονός ότι τα πετρέλαια σήμερα εντοπίζονται πάντα σε

ιζηματογενή πετρώματα, ενώ στη βάση των πετρελαϊκών κοιτασμάτων ανευρίσκεται, σχεδόν πάντα, αλμυρό νερό.

Τα διάφορα στάδια δημιουργίας είναι:

1. Ανώριμο στάδιο (διαγένεση). Στο στάδιο αυτό σε σχετικά χαμηλή θερμοκρασία και πίεση και με τη βοήθεια βακτηριακής δράσης δημιουργήθηκε το κηρογόνο (kerogen) και το βιογενές μεθάνιο (biogenic methane), το οποίο συμμετέχει περίπου κατά 20% στα παγκόσμια αποθέματα μεθανίου. Το κηρογόνο συνίσταται από άνθρακα (69-80%), υδρογόνο (7-11%), άζωτο (1,25-2,5%), θείο (1-8%) και οξυγόνο (9-17%).

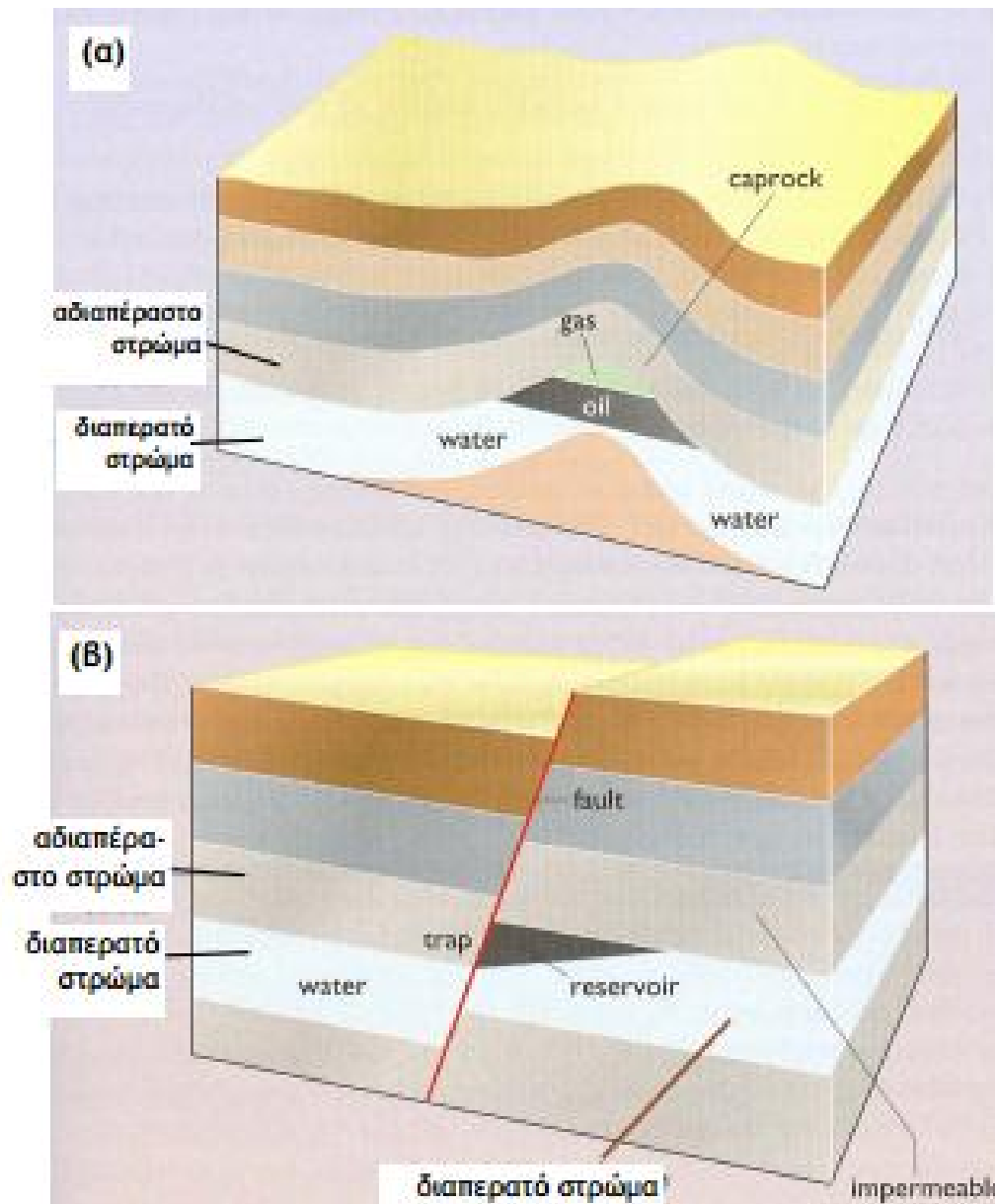
2. Ωριμο στάδιο. Σε μεγαλύτερα βάθη και υψηλότερες θερμοκρασίες και πιέσεις το κηρογόνο μετατράπηκε σε αργό πετρέλαιο και φυσικό αέριο, όταν από το κηρογόνο απομακρύνθηκαν το οξυγόνο και το άζωτο με κάποιο μηχανισμό. Το αρχικό υγρό ήταν μίγμα πετρελαίου και νερού, το οποίο με το χρόνο διαχωρίστηκε για να σχηματιστούν τα κοιτάσματα πετρελαίου.

3. Μετα-ώριμο στάδιο. Σε ιδιαίτερα υψηλή θερμοκρασία το αργό πετρέλαιο μετατράπηκε σε φυσικό αέριο πλούσιο σε μεθάνιο. Επειδή το πετρέλαιο είναι ρευστό, μπορεί να «μεταναστεύσει» μέσα στο υπέδαφος καθώς σχηματίζεται.

Απαραίτητη προϋπόθεση για το σχηματισμό μεγάλων και οικονομικά ανακτήσιμων αποθεμάτων πετρελαίου είναι η παρουσία συγκεκριμένων γεωλογικών σχηματισμών: (α) ενός ταμιευτήρα (ή «λίμνης»- oilpool, reservoir) πετρελαίου και (β) ένα πέτρωμα-κάλυμμα («παγίδα»-oiltrap, caprock) του πετρελαίου. Ένας ταμιευτήρας πετρελαίου χαρακτηρίζεται από υψηλό πορώδες (3-30%) και ικανή διαπερατότητα. Με άλλα λόγια ένας ταμιευτήρας πετρελαίου είναι μια συλλογή σταγόνων πετρελαίου σε ένα αμμώδες ή πορώδες πέτρωμα. Οι υδρογονάνθρακες συσσωρεύονται κυρίως σε πορώδη ψαμμιτικά ή ασβεστολιθικά πετρώματα. Από την άλλη μεριά, μια «παγίδα» πετρελαίου είναι ένα σχηματισμός μη πορώδους πετρώματος που συγκρατεί στη θέση του το πετρέλαιο του ταμιευτήρα. Είναι πράγματι φανερό ότι για να παραμείνουν στη θέση τους το πετρέλαιο και τα συνδεδεμένα αέρια, θα πρέπει να είναι παγιδευμένα έτσι ώστε να μη μεταναστεύσουν ούτε, κυρίως, προς στην επιφάνεια της γης, αλλά ούτε και πλευρικά. Τα πετρώματα-καλύμματα αποτελούνται συνήθως από σχιστόλιθους, αργίλους, ορυκτό αλάτι, γύψο κ.ά. Τα πετρώματα αυτά θα πρέπει να διαθέτουν πλαστικότητα, έτσι ώστε όταν δέχονται πιέσεις να ρηγματώνονται. Ταμιευτήρες πετρελαίου μπορούν να σχηματιστούν με διαφορετικούς τρόπους. Το απλούστερο παράδειγμα είναι όταν

διαστρωματωμένα ιζηματογενή πετρώματα (layered sedimentary rocks), που περικλείουν και ένα πέτρωμα-κάλυμμα, αναδιπλώνονται σε ένα αντίκλινο (Σχ. 1.1α). Τα αντίκλινα θεωρήθηκαν από τους γεωλόγους ως οι καλύτερες περιοχές για αναζήτηση πετρελαίου για περισσότερα από 150 χρόνια, μια που σε τέτοιους γεωλογικούς σχηματισμούς βρίσκεται περίπου το 88% των πόρων πετρελαίου και φυσικού αερίου. Η κάλυψη ενός πετρώματος που περιέχει πετρέλαιο από πέτρωμα-κάλυμμα μπορεί να γίνει και λόγω συνδυασμού ρηγμάτων (faults), όπως φαίνεται στο Σχ. 1.1β. Άλλες περιπτώσεις που μπορούν να σχηματιστούν κυρτά ιζηματογενή στρώματα είναι η πτύχωση των ιζημάτων ως προς ένα υψηλό σημείο και ο σχηματισμός τοξωτής κλίνης από την κίνηση προς τα πάνω ενός θόλου άλατος (Σχ. 1.2). Στον ταμιευτήρα με τα χρόνια τα διάφορα ρευστά κατανέμονται σε σχεδόν οριζόντιες ζώνες ανάλογα με την πυκνότητά τους. Έτσι, το φυσικό αέριο βρίσκεται στο ανώτερο τμήμα του ταμιευτήρα και το αλατούχο νερό (αλμόλοιπο-brine) στο κατώτερο.

Τέλος, έχουν προταθεί και θεωρίες για τη μη βιολογική προέλευση των υδρογονανθράκων, θεωρίες που βασίζονται κυρίως στην παρουσία υδρογονανθράκων και σε άλλα σώματα στο κοσμικό μας σύστημα. Μία ένδειξη για τη θεωρία αυτή αποτελεί η ύπαρξη του ισοτόπου ^3He στο φυσικό αέριο και όχι του ^4He , το οποίο επικρατεί στην ατμόσφαιρα.

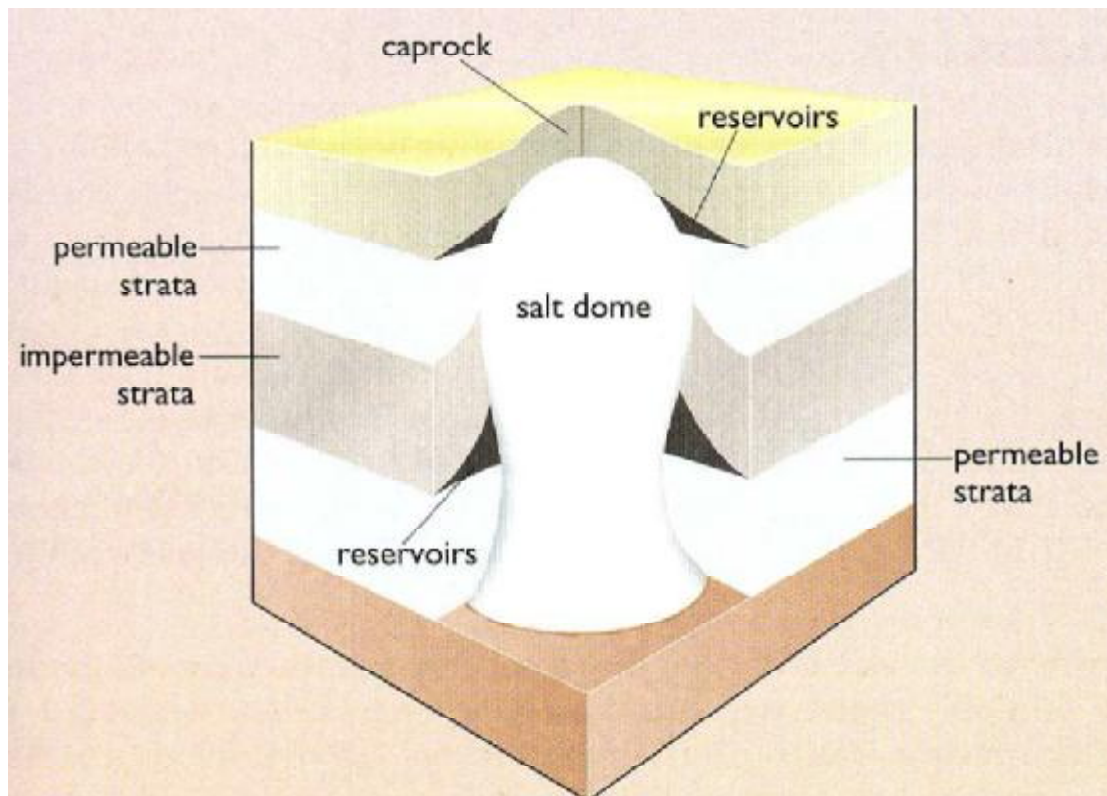


Σχήμα 1.1: Συμβατικό και μη-συμβατικό πετρέλαιο.

Το αργό πετρέλαιο βρίσκεται κυρίως εγκλωβισμένο σε πορώδεις φαμμίτες οι οποίοι καλύπτονται από αδιαπέραστα πετρώματα, όπως παρουσιάζεται στο Σχ. 1.1 και Σχ. 1.2. Το αλάτι αποτελεί άριστο αδιαπέραστο στρώμα (μικρό πορώδες, μικροί κόκκοι) και προέρχεται από την εξάτμιση θαλασσινού νερού. Το πετρέλαιο που μπορεί να ανακτηθεί με την πρωτογενή και τη δευτερογενή ανάκτηση, όπως θα δούμε παρακάτω, ανέρχεται σε ποσοστό 20-40% του συνολικού πετρελαίου που βρίσκεται σε έναν ταμιευτήρα και καλείται «συμβατικό» πετρέλαιο (conventional oil).

Το υπόλοιπο ποσοστό που μπορεί εν μέρει να ανακτηθεί με εξειδικευμένες και δαπανηρές μεθόδους καλείται «μη-συμβατικό πετρέλαιο».

Στην δεύτερη κατηγορία κατατάσσεται και το πετρέλαιο που μπορεί να ανακτηθεί από τους βιτουμενιούχους σχίστες (shaleoil, κοιτάσματα στις δυτικές Η.Π.Α.), από πισσούχους άμμους (tarsands, βρίσκονται στον Καναδά) και από το βαρύ πετρέλαιο. Αυτοί οι τύποι πετρελαίου σχηματίζονται κατά την μετακίνηση του αργού πετρελαίου προς την επιφάνεια της γης και την απώλεια των ελαφρύτερων και πτητικότερων συστατικών του.



Σχήμα 1.2: Το αργό πετρέλαιο το οποίο βρίσκεται σε πορώδεις ψαμμίτες οι οποίοι καλύπτονται από αδιαπέραστα πετρώματα.

1.3 ΣΥΣΤΑΣΗ ΑΡΓΟΥ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ

Το αργό πετρέλαιο είναι ένα ανομοιογενές υγρό που αποτελείται από πληθώρα υδρογονανθράκων. Περισσότερες από 3000 ενώσεις έχουν ταυτοποιηθεί στο αργό πετρέλαιο και περιλαμβάνουν από αέρια, όπως το μεθάνιο, μέχρι και βαριές ασφαλικές ενώσεις που δεν αποστάζουν. Η σύστασή του κατά βάρος είναι κατά 80-87% από άνθρακα (ενώσεις με αριθμό ατόμων C από 5 μέχρι και 100) και κατά 11-16% από υδρογόνο (πολύ μεγαλύτερο ποσοστό από ότι τους άνθρακες), ενώ βρίσκονται σε μικρότερες ποσότητες οξυγόνο (<3%), θείο (<4%) και αζώτο

(<1%). Επίσης απαντώνται και πολύ μικρές συγκεντρώσεις (μέχρι 0,1%) μετάλλων, όπως σίδηρος, νικέλιο, χρώμιο, βανάδιο κτλ. Σημειώνεται ότι παρά τις μικρές ποσότητες του θείου και του αζώτου, η παρουσία τους προκαλεί τα γνωστά περιβαλλοντικά προβλήματα με τις εκπομπές οξειδίων θείου και αζώτου.

Οι κυριότερες οργανικές ουσίες στο πετρέλαιο είναι οι παραφινικοί (παραφίνες), ναφθениκοί και οι αρωματικοί υδρογονάνθρακες, καθώς και οι ασφατικές ουσίες. Οι παραφίνες συγκεντρώνονται κυρίως στα χαμηλού σημείου ζέσης κλάσματα πετρελαίου, οι ναφθениκοί και οι αρωματικοί υδρογονάνθρακες (συνιστούν το 6% με 90%) είναι στα μέσου σημείου ζέσης κλάσματα και οι ασφατικές ουσίες συγκεντρώνονται στα υψηλού σημείου ζέσης κλάσματα πετρελαίου. Εκτός από υδρογονάνθρακες το φυσικό πετρέλαιο περιέχει χαμηλές συγκεντρώσεις θείου (0-5%) αζώτου(0-1%) οξυγόνου (0-2%) και μετάλλων (0-0,1%) κυρίως σιδήρου, νικελίου, χρωμίου και βαναδίου.

Το αργό πετρέλαιο παρουσιάζει μεγάλες διαφορές σε όλες τις φυσικές ιδιότητές του, εξαιτίας της έντονης διαφοροποίησής της σύστασής του. Το χρώμα του μπορεί να είναι μαύρο, πράσινο ή φαιοκίτρινο. Επίσης η πυκνότητά του και το ιξώδες ποικίλλουν αρκετά. Το σημείο ζέσεως των διαφόρων συστατικών του πετρελαίου κυμαίνεται από -160°C μέχρι 540°C. Οι κυριότερες οργανικές ενώσεις στο αργό πετρέλαιο ανήκουν στις παραφινικές, τις ολεφινικές, τις ναφθениκές και τις αρωματικές σειρές υδρογονανθράκων και περιέχουν συνήθως από πέντε μέχρι είκοσι άτομα άνθρακα. Οι παραφίνες συγκεντρώνονται κυρίως στα χαμηλού σημείου ζέσεως κλάσματα, οι ναφθениκές και οι μονοαρωματικές ενώσεις στα μέσου σημείου ζέσεως κλάσματα, ενώ τα πολυαρωματικά μόνο στα βαριά κλάσματα. Η σύσταση του αργού και, συνεπώς, οι ιδιότητές του εξαρτώνται σημαντικά από την περιοχή από την οποία προέρχεται το κοίτασμα. Τα πετρέλαια που είναι πλούσια σε θείο παρουσιάζουν ιδιαίτερα προβλήματα κατά την επεξεργασία και την αξιοποίησή τους, όπως είναι η διάβρωση των μεταλλικών επιφανειών, οι οσμές, η χαμηλή απόδοση και οι εκπομπές οξειδίων του θείου.

Οι φυσικές διεργασίες της διύλισης πετρελαίου (κλασματική απόσταξη, απορρόφηση και ψύξη) επηρεάζονται σημαντικά από τις ιδιότητες των υδρογονανθράκων, ενώ οι χημικές διεργασίες (π.χ. αποθείωση, πυρόλυση) επηρεάζονται από την παρουσία του θείου, του αζώτου και του οξυγόνου και από το είδος των υδρογονανθράκων.

Όλοι οι τύποι αργού πετρελαίου είναι σύνθετα μίγματα υψηλού αριθμού υδρογονανθράκων οι οποίοι επίσης περιέχουν μικρό ποσοστό οργανικών ενώσεων θείου και ακόμη μικρότερο ποσοστό ενώσεων αζώτου και οξυγόνου καθώς και πολύ μικρό ποσοστό μετάλλων, κυρίως Βανάδιο, Νικέλιο, άλατα και νερό. Κάθε τύπος αργού πετρελαίου αποτελεί, τόσο από πλευράς χημικής σύστασης όσο και από πλευράς φυσικών ιδιοτήτων, ένα μοναδικό μίγμα που όμοιο του δεν υπάρχει ακόμη και σε παρακείμενα του κοιτάσματα.

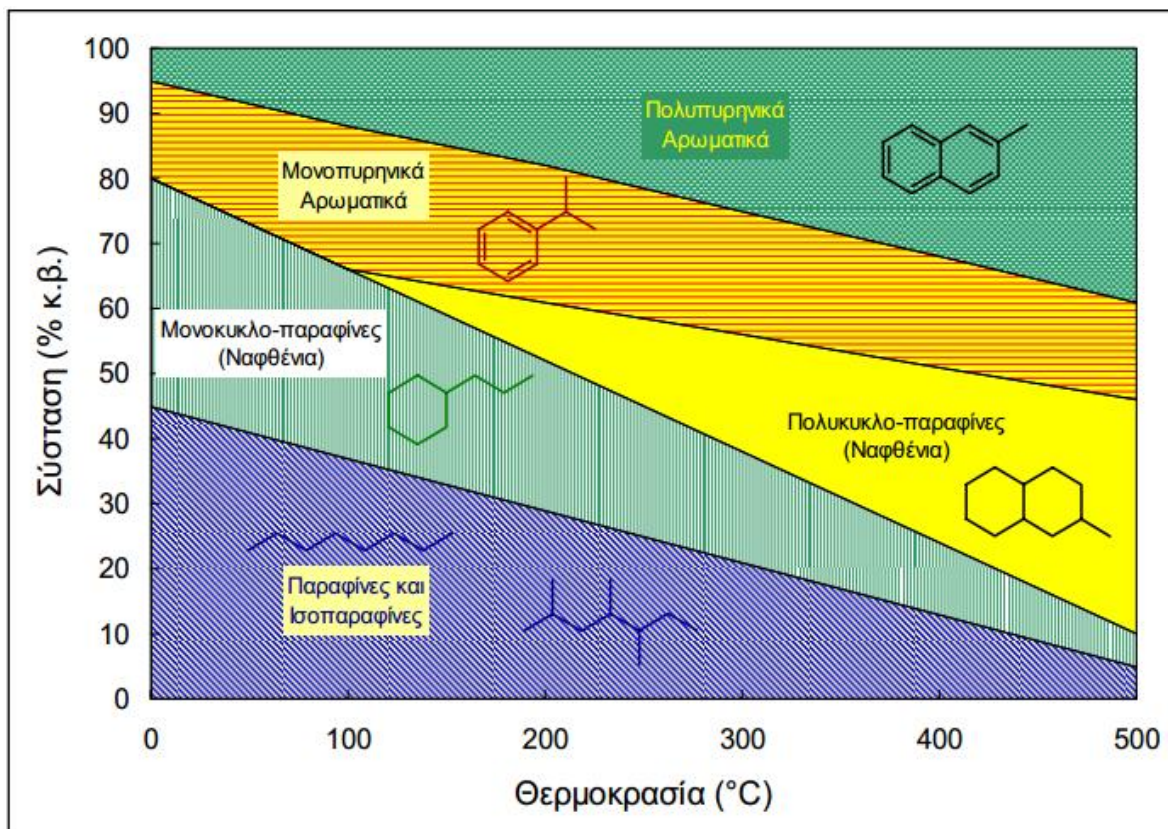
Το φυσικό πετρέλαιο είναι ρευστής φύσεως και η σύνθεση και η όψη του διαφέρουν ανάλογα με τον τρόπο προέλευσης του. Αποτελείται κυρίως από υδρογονάνθρακες, με μοριακό βάρος που κυμαίνεται από το ελαφρύτερο μεθάνιο με το ένα άτομο άνθρακα μέχρι τα βαριά στερεά μόρια, που περιέχουν 80 άτομα άνθρακα. Περιέχει επίσης ενώσεις οξυγόνου, θείου και αζώτου, όπως και ελάχιστα ποσά μεταλλικών ενώσεων, νερού και λευκωματωδών ενώσεων. Μεταξύ των αερίων που εκλύονται από τις πετρελαιοπηγές περιλαμβάνονται επίσης N_2 , CO_2 , H_2S και He σε σημαντικές περιεκτικότητες.

Οι φυσικές διεργασίες της διύλισης, όπως είναι η κλασμάτωση, η απορρόφηση και η ψύξη, επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από τις ιδιότητες των υδρογονανθράκων, καθώς αυτοί και αποτελούν την κύρια μάζα του πετρελαίου ενώ οι χημικές διεργασίες, όπως είναι η αποθείωση, επηρεάζονται από την παρουσία θείου, οξυγόνου και αζώτου και το είδος των υδρογονανθράκων που συμμετέχουν στην σύσταση του πετρελαίου.

Σχετικά μεγάλη συγκέντρωση οξυγόνου, συνήθως σε ενώσεις υπό την μορφή ναφθενικών οξέων, συναντάται στα ρωσικά πετρέλαια και στα πετρέλαια ναφθενικής βάσης στα οποία και απαντάται και άζωτο. Το θείο παρουσιάζεται είτε σαν διαλυμένο ελεύθερο θείο είτε υπό την μορφή οργανικών ενώσεων, όπως θειοφαίνεια, θειικά οξέα, μερκαπτόνες, θειικά αλκύλια και θειούχα αλκύλια. Μερικές από αυτές τις ενώσεις θείου δεν απαντούνται στο φυσικό πετρέλαιο, αλλά προκύπτουν από άλλες ενώσεις θείου κατά τη διάρκεια της διεργασίας απόσταξης και διύλισης. Η παρουσία ενώσεων θείου στο πετρέλαιο είναι προβληματική, γιατί έχουν δυσάρεστη οσμή και μερικές από αυτές είναι διαβρωτικές. Το πολύ μικρό ποσοστό μεταλλοοργανικών ενώσεων, που περιέχουν σίδηρο, νικέλιο, βανάδιο και αρσενικό, είναι δηλητηριώδεις για μερικούς καταλύτες που χρησιμοποιούνται στις χημικές διεργασίες των διυλιστηρίων. Πολλές σειρές υδρογονανθράκων βρίσκονται στο πετρέλαιο και άλλες σειρές παράγονται κατά την διάσπαση και την υδρογόνωση.

Πίνακας 1.1: Σύσταση Αργού Πετρελαίου.

α/α	Στοιχεία	Περιεκτικότητα (% κ.β.)
1	Άνθρακας	83.90 – 86.80
2	Υδρογόνο	11.40 – 14.00
3	Θείο	0.06 – 8.00
4	Άζωτο	0.11 – 1.70
5	Οξυγόνο	0.50
6	Μέταλλα (Fe, V, Ni, κλπ.)	0.03



Σχήμα 1.3: Σύσταση αργού πετρελαίου σε σχέση με την θερμοκρασία του.

1.4 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΠΕΤΡΕΛΑΙΩΝ

Το αργό πετρέλαιο ταξινομείται με διάφορους τρόπους. Ο πλέον συνήθης τρόπος αφορά στην ταξινόμησή του σε σχέση με την πυκνότητά του σε μια ορισμένη θερμοκρασία στην κλίμακα °API, η οποία ορίζεται ως:

$$^{\circ}API = 141.5 / r - 131.5 \quad (1.1)$$

όπου r είναι το ειδικό βάρος του πετρελαίου στους 15.6 °C. Έτσι, $^{\circ}API = 10$ αντιστοιχεί σε $r = 1$, όπως παρουσιάζεται και στον Πίν. 1.2.

Τα περισσότερα πετρέλαια ανήκουν στην κατηγορία των ελαφρών και των ενδιάμεσων αργών πετρελαίων. Βαρύτερα πετρέλαια χαρακτηρίζονται ως μη συμβατικά. Ένα ελαφρύ αργό πετρέλαιο παράγει κατά τη διύλιση του πολύ περισσότερα ελαφρά προϊόντα (βενζίνη) και λιγότερα βαριά από ό,τι παράγει ένα βαρύ αργό πετρέλαιο.

Πίνακας 1.2: Ταξινόμηση του πετρελαίου βάσει της πυκνότητας του.

α/α		$^{\circ}API$	ρ (στους 15.6 °C)
1	Ελαφρύ	> 40 $^{\circ}API$	< 0.825
2	Μέσο	30 - 40 $^{\circ}API$	0.825 – 0.875
3	Βαρύ	< 30 $^{\circ}API$	0.825 – 0.875
4	Πολύ βαρύ	< 10 $^{\circ}API$	> 1

2. ΤΑ ΣΤΑΔΙΑ ΤΗΣ ΕΞΟΡΥΞΗΣ

2.1 ΕΡΕΥΝΑ ΓΙΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟ

Η πιθανή ύπαρξη πετρελαίου ή φυσικού αερίου σε μια ιζηματογενή λεκάνη συνίσταται να επιβεβαιώνεται με ερευνητικά φρέατα. Το κόστος των φρεάτων που αυξάνει εκθετικά ανάλογα με το βάθος, τα ακραία καιρικά φαινόμενα και τις συνθήκες του περιβάλλοντος καθώς και τα διαρκώς αυξανόμενα έξοδα εξοπλισμού και ανθρώπινου δυναμικού καθιστούν απαραίτητη πριν τη διάνοιξη υφισταμένη και κοστοβόρα επιστημονική μελέτη. Η μελέτη αυτή χρειάζεται εξειδικευμένους επιστήμονες όπως γεωλόγους, γεωφυσικούς και γεωχημικούς. Καμία γεώτρηση δεν εκκινεί προτού οι επιστήμονες να ολοκληρώσουν την επεξεργασία ως προς τις πιθανότητες προσοδοφόρας κατάληξης του εγχειρήματος και δεν δώσουν την έγκρισή τους. Κατόπιν του υπολογισμού του κίνδυνου επένδυσης πρέπει να γίνουν υπολογισμοί ως προς τη συνολική βιωσιμότητα του κοιτάσματος και τις πιθανότητες αποπληρωμής του έργου. Παραταύτα, η πιθανότητα διάνοιξης φρέατος άνευ κοιτάσματος παραμένει υψηλή. Ο λόγος των παραγωγικών προς τα ξηρά φρέατα κυμαίνεται από 1:8 έως 1:6, και δεν έχει βελτιωθεί σημαντικά από την δεκαετία του '50. Είναι επομένως απαραίτητο να ανακατασκευαστούν οι συνθήκες σχηματισμού των υδρογονανθράκων σε χρονολογικό και γεωγραφικό πλαίσιο, και να ελεγχθεί κατά πόσο τα ταμειυτήρια πετρώματα είναι σε θέση να παγιδεύσουν πετρέλαιο ή αέριο. Η μέθοδος της σεισμικής ανάκλασης είναι το κύριο στοιχείο της σύγχρονης εξερεύνησης και κρίσιμο σχεδόν για κάθε φρέαρ. Αυτή η μέθοδος είναι σε συνεχή χρήση και ανάπτυξη για πάνω από τέσσερις δεκαετίες. Σε μια ήδη γνωστή περιοχή πέρα από μελέτες για τις γεωλογικές δομές και το πάχος της ακολουθίας πετρωμάτων η έρευνα ξεκινά με μετρήσεις σεισμικής ανάκλασης. Σε αντίθεση περιοχές με μικρή γεωλογική εξερεύνηση, ή με λεκάνες μεγάλου βάθους οι μετρήσεις αυτές αποτελούν το τέλος της γεωφυσικής προετοιμασίας.

2.1.1 Γεωλογική Έρευνα

Σε περιοχές με χαμηλή εξερεύνηση, και κυρίως στην ξηρά, η επιφανειακή γεωλογική έρευνα χρησιμοποιείται για την πρώτη αξιολόγηση και πιθανή οριοθέτηση προσδόκιμων ή μη προσδόκιμων. Η προϋπόθεση είναι εν μέρει η στρατιγραφική ακολουθία να εξέχει εν μέρει τουλάχιστον στην επιφάνεια και να είναι προσπελάσιμη. Σε αυτή τη φάση της εξερεύνησης, αριθμός των λιγότερο εξερευνημένων περιοχών έχει μειωθεί σε μεγάλο βαθμό. Στη δεκαετία του '80 ο αριθμός των προσδόκιμων ιζηματογενών λεκανών ήταν 700 περίπου. Από αυτές οι 350 είναι τουλάχιστον εν μέρει εξερευνημένες. Στις υπόλοιπες ιζηματογενείς λεκάνες, έχουν γίνει προκαταρκτικές γεωλογικές έρευνες, οι οποίες επιτρέπουν την εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς τη φύση και το πάχος των ιζημάτων. Με τη χρήση δορυφορικών φωτογραφιών υπάρχουν ακριβείς χάρτες για όλα τα μέρη του πλανήτη, στους οποίους οι γεωλόγοι εισάγουν τα ευρήματά τους. Όταν τα στοιχεία συμπληρωθούν από γεωλογικές μελέτες πεδίου, χρησιμοποιούνται για τη διατύπωση πιο αξιόπιστων απόψεων ως προς το πάχος, τη μορφή και την ηλικία των πετρωμάτων. Εάν τα αποτελέσματα των ερευνών πεδίου δείξουν ότι υπάρχουν τα κριτήρια για προσδόκιμο κοίτασμα πετρελαίου, είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθούν ειδικές εξετάσεις δειγμάτων πετρώματος σε συνδυασμό με στρατιγραφική διερεύνηση ώστε να εντοπίσουν τα μητρικά και τα ταμειυτήρια πετρώματα, και να συλλέξουν στοιχεία για ύπαρξη πηλού ή άλλων συστατικών απαραίτητων για τη φραγή του ταμειυτήρα. Η ύπαρξη πετρελαίου ή αερίου καθώς και ιχνών ασφάλτου στα πετρώματα δεν επαρκούν για να προβλέψουν την ύπαρξη κοιτασμάτων πετρελαίου. Τα ίχνη ασφάλτου μπορούν να θεωρηθούν ένδειξη σχηματισμού και μετανάστευσης πετρελαίου.

2.1.2 Γεωφυσική Έρευνα

2.1.2.1 Μη Σεισμικές Μέθοδοι

Οι μη σεισμικές γεωφυσικές μέθοδοι περιλαμβάνουν ηλεκτρικές, μαγνητικές και βαρυτικές μεθόδους. Χρησιμοποιούνται είτε από μόνες, είτε σε συνδυασμό, για την πρώτη εξερεύνηση των ιζηματογενών λεκανών. Επειδή οι βαρυτικές και οι

μαγνητικές μετρήσεις μπορούν να γίνουν από αεροπλάνο, αποτελούν γρήγορες και φθηνές μεθόδους εξερεύνησης.

A) Μαγνητικές Μετρήσεις:

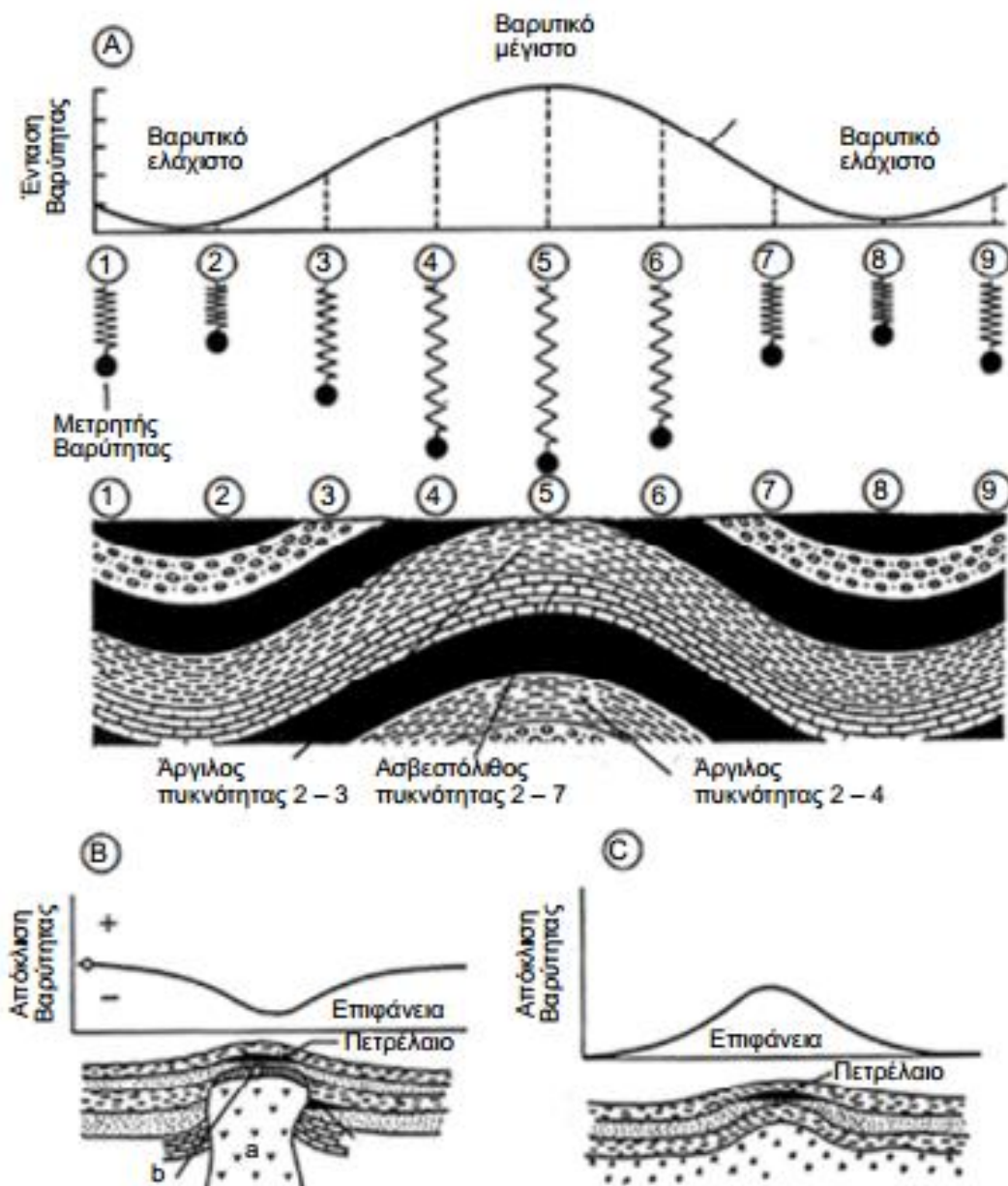
Οι μετρήσεις αυτές βασίζονται στη διαφορετική μαγνητική διαπερατότητα των πετρωμάτων, η οποία εξαρτάται από την περιεκτικότητά τους σε μαγνητικά υλικά (αιματίτης, ιλμενίτης). Η κρυσταλλική βάση δεν προκαλεί καμία ανωμαλία λόγω της ομοιόμορφης κατανομής των μαγνητικών υλικών μέσα σε αυτήν. Από την άλλη πλευρά, τα ιζήματα διαφέρουν ως προς τη μαγνητική διαπερατότητα ανάλογα με την αναλογία αυτών των μεταλλευμάτων στα στρώματα. Οι αλλαγές στο μαγνητικό πεδίο της Γης καταγράφονται με τη βοήθεια μαγνητομέτρων και δίνουν ενδείξεις για το σχήμα και το βάθος των κρυσταλλικών βάσεων ή ηφαιστειακών ή μαγματικών ενδογενών πετρωμάτων. Στη βασική τους έκδοση τα όργανα μέτρησης είναι πηνία μέσω των οποίων περνά ρεύμα. Το εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο επηρεάζεται από το γήινο μαγνητικό πεδίο, και όποια ανωμαλία προκύψει καταγράφεται.

B) Βαρυτικές Μετρήσεις:

Οι βαρυτικές μετρήσεις χρησιμοποιούνται για να μετρήσουν μεταβολές στο πεδίο βαρύτητας της Γης. Λόγω της διαφορετικής πυκνότητας των πετρωμάτων, στρώματα χαμηλής πυκνότητας όπως αλατούχα πετρώματα αποκλίνουν προς τα κάτω, ενώ στρώματα υψηλής πυκνότητας όπως ηφαιστειογενή ή χαλαζίες αποκλίνουν προς τα πάνω. Ως αποτέλεσμα μπορούν να ανιχνευθούν μεγάλοι σχηματισμοί ομοειδών πετρωμάτων που έχουν εκτοπιστεί τεκτονικά λόγω ρηγμάτων.

Το τυπικό όργανο μέτρησης είναι ένα ελατήριο ισορροπίας, η αλλαγή μήκους του οποίου είναι ανάλογη της πυκνότητας των πετρωμάτων (Σχ. 2.1). Η αλλαγή μήκους καταγράφεται και αντιστοιχείται σε μεταβολή βαρύτητας. Η από αέρα βαρυτική σε συνδυασμό με μαγνητική έρευνα είναι μια γρήγορη και φθηνή μέθοδος αναγνωριστικής έρευνας για εξερεύνηση πετρελαίου πάνω από μεγάλες επιφάνειες. Οι βαρυτικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο για την αντιμετώπιση συγκεκριμένων προβλημάτων. Η χρήση μοντέλων υπολογιστών έχει επιτρέψει σημαντικά βελτιωμένα αποτελέσματα. Οι βαρυτικές μέθοδοι είναι ένας σημαντικός τρόπος ανίχνευσης ταμιευτήρων πετρελαίου στα πλάγια θόλων άλατος, για τον καθορισμό του προγράμματος γεωτρήσεων, καθώς και για την ερμηνεία δεδομένων

σεισμικής έρευνας κοντά σε θόλους άλατος, όπου οι ανακλάσεις διαταράσσονται από το αλάτι για τον σωστό καθορισμό των ορίων του άλατος.



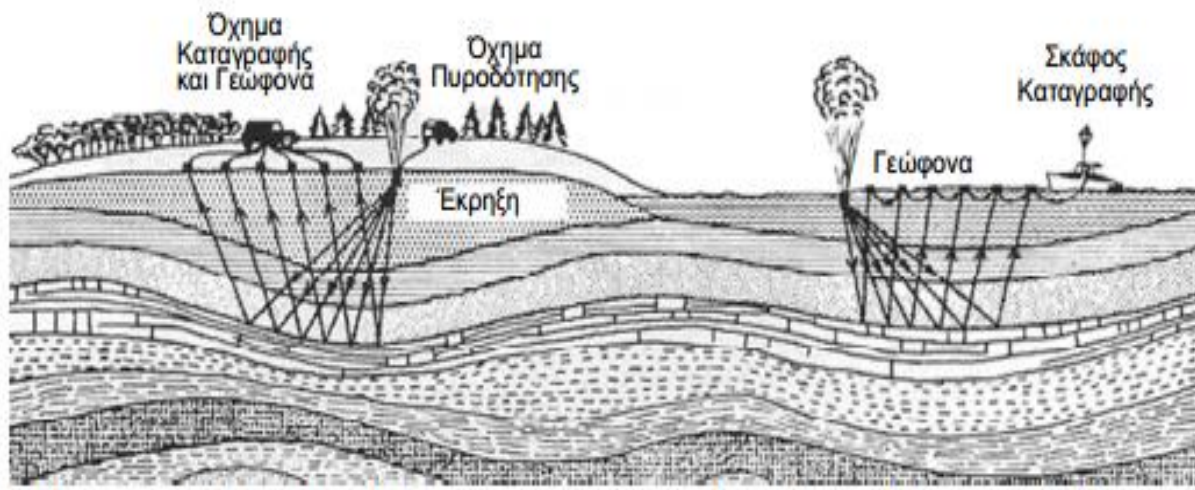
Σχήμα 2.1: Α) Αρχές βαρυτικής αποτύπωσης. Τα σημεία 1 - 9 αναπαριστούν σταθμούς παρατήρησης όπου έχουν εγκατασταθεί μετρητές βαρύτητας, Β) Αρνητική απόκλιση βαρύτητας πάνω από θόλο άλατος σε συνδυασμό με συγκέντρωση πετρελαίου α) Θόλος άλατος, β) Καλυπτήριο πέτρωμα, C) Θετική Απόκλιση βαρύτητας επάνω από ηφαιστειογενή ανύψωση σε συνδυασμό με συγκέντρωση πετρελαίου στο υπερκείμενο ίζημα.

Γ) Γεωηλεκτρικές Μετρήσεις:

Οι γεωηλεκτρικές μετρήσεις των φυσικών ρευμάτων της Γης δεν έχουν ανταποκριθεί στις προσδοκίες που είχαν βασιστεί πάνω τους. Οι πολλές παρεμβολές στις βιομηχανικές χώρες όπως τα δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και στα σιδηροδρομικά δίκτυα είναι ανεπιθύμητες για την εξαγωγή συμπερασμάτων. Γι' αυτούς τους λόγους οι γεωηλεκτρικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται σπάνια.

2.1.2.2 Σεισμικές Μέθοδοι

Από τη δεκαετία του '70, οι σεισμικές μέθοδοι έχουν γίνει οι πιο ακριβείς και συχνότερα χρησιμοποιούμενες μέθοδοι εξερεύνησης. Αυτό οφείλεται κυρίως στις δυνατότητες ψηφιακής καταγραφής και τα πολλά διαθέσιμα προγράμματα επεξεργασίας και ερμηνείας των δεδομένων. Οι σεισμικές μέθοδοι επιτρέπουν την εξαγωγή πολύ ακριβών συμπερασμάτων για την ακολουθία των στρωμάτων και τα βάθη των σχηματισμών. Αυτές οι μέθοδοι μετρούν το χρόνο διάδοσης τεχνικά προκληθέντων ελαστικών κυμάτων. Τα κύματα δημιουργούνται συνήθως από εκρηκτικά που έχουν τοποθετηθεί σε κατάλληλα σημεία (Σχ. 2.2). Σήμερα, χρησιμοποιούνται και άλλες πηγές ενέργειας. Η μέθοδος δόνησης χρησιμοποιεί μια χαλύβδινη πλάκα κάτω από ένα φορτηγό, η οποία πιέζεται στο έδαφος από το βάρος του φορτηγού. Έτσι παράγονται δονήσεις συγκεκριμένης συχνότητας και διαδίδονται στο υπέδαφος. Συνήθως λειτουργούν ταυτόχρονα τέσσερα έως έξι φορτηγά. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να διεξαχθεί έρευνα ακόμη και σε κατοικημένες περιοχές. Η μέθοδος είναι επίσης γρηγορότερη και φθηνότερη της αντίστοιχης με χρήση εκρηκτικών.



Σχήμα 2.2: Τεχνική ανάκλασης σεισμικών κυμάτων (χερσαία και υποθαλάσσια έρευνα).

Τα ελαστικά κύματα διαδίδονται σε όλες τις κατευθύνσεις και στα όρια μεταξύ στρωμάτων, π.χ. αργίλου - άμμου, άμμου - ανθρακικών. Εν μέρει διαθλώνται και εν μέρει ανακλώνται πίσω προς την επιφάνεια. Η ταχύτητα αυτών των σεισμικών κυμάτων μέσω των διαφόρων γεωλογικών σχηματισμών είναι ένδειξη του τύπου των πετρωμάτων και εξαρτάται από την ελαστικότητα και την πυκνότητα των πετρωμάτων (περίπου 1000 - 2000 m/s σε χαλαρά πετρώματα και έως 6000 m/s σε συμπαγή πετρώματα). Με όσο μεγαλύτερη ακρίβεια είναι γνωστή η ταχύτητα σε κάθε στρώμα, με τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια μπορεί να υπολογιστεί το βάθος της ζώνης ανάκλασης.

Οι υπολογισμοί διευκολύνονται με τη χρήση υπολογιστή. Υπάρχουν δύο διαφορετικές μέθοδοι: μέθοδος ανάκλασης και μέθοδος διάθλασης, η οποία ήταν σχεδόν η μοναδική που χρησιμοποιούσαν ως τη δεκαετία του '30. Η μέθοδος διάθλασης χρησιμοποιείται σήμερα μόνο για έρευνα σε μεγάλες επιφάνειες και πολύ βαθείς ορίζοντες, καθώς και για τον προσδιορισμό ηχητικών ταχυτήτων μέσα στα πετρώματα και για την επίλυση ειδικών προβλημάτων.

A) Μέθοδος Σεισμικής Διάθλασης:

Στη μέθοδο σεισμικής διάθλασης ένα μέρος των κυμάτων διαθλάται στον οριζοντα διάθλασης, αντίστοιχα με τη διάθλαση του φωτός στη διεπιφάνεια νερού - αέρα. Μερικά από τα διαθλώμενα κύματα συνεχίζουν να διέρχονται από τα όρια των στρωμάτων και να δημιουργούν κατά τη δίοδο άλλα κύματα που διαθλώνται προς

την επιφάνεια. Μετράται ο χρόνος διέλευσης των κυμάτων από τη στιγμή που δημιουργούνται, μέχρι να ανιχνευτούν από τα γεώφωνα που τοποθετούνται στην επιφάνεια σε απόσταση ανά 25 km περίπου. Η μέθοδος σεισμικής διάθλασης, απαιτεί μεγάλες ποσότητες εκρηκτικών με τα γεώφωνα τοποθετημένα σε σχετικά μεγάλες αποστάσεις και επιτρέπει σχετικά μεγάλα βάθη ανίχνευσης.

B) Μέθοδος Σεισμικής Ανάκλασης:

Στη μέθοδο σεισμικής ανάκλασης τα κύματα επιστρέφουν πίσω από τους οριζόντες ανάκλασης. Ανάλογα με το βάθος των οριζόντων ανάκλασης τα κύματα επιστρέφουν στην επιφάνεια της Γης σε αύξοντα χρονικά διαστήματα και καταγράφονται από γεώφωνα που είναι διατεταγμένα στο έδαφος. Στη συνέχεια μετατρέπονται σε ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς και καταγράφονται σε μαγνητικές ταινίες σε ειδικά ψηφιακά συστήματα καταγραφής. Η καταγραφή των σεισμικών σημάτων σε μαγνητικά μέσα επιτρέπει διορθώσεις στα πρωτογενή δεδομένα καθώς και απομάκρυνση θορύβου στα κέντρα επεξεργασίας των δεδομένων. Από τους χρόνους διέλευσης για τα εκπεμπόμενα και τα ανακλώμενα κύματα προσδιορίζεται το βάθος του ανακλαστικού οριζοντα, με δεδομένη την ταχύτητα διέλευσης μέσω των πετρωμάτων. Οι ενδείξεις για την ταχύτητα των σεισμικών κυμάτων προέρχονται από λεπτομερείς υπολογισμούς των μεθόδων ανάκλασης και διάθλασης από καταγραφή δεδομένων σε φρέατα με γεώφωνα που είναι τοποθετημένα σε συγκεκριμένα βάθη.

Γ) Σεισμικές Μετρήσεις σε Υποθαλάσσιες Περιοχές:

Οι μετρήσεις ανάκλασης σεισμικών κυμάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για μετρήσεις στη θάλασσα. Η χρήση εκρηκτικών έχει σταματήσει λόγω της σοβαρής περιβαλλοντικής ζημιάς που προκαλούσε και έχει αντικατασταθεί από δημιουργία κυμάτων με κανόνια πεπιεσμένου αέρα. Ο στόλος των ηχοβολιστικών πλοίων είναι πλέον πολύ μεγάλος και πραγματοποιεί μετρήσεις σε όλα σχεδόν τα μήκη και πλάτη της Γης.

Δ) Τρισδιάστατη(3D) Μέθοδος:

Μέχρι πρότινος, η σεισμική μέθοδος που χρησιμοποιούνταν ήταν η γραμμική. Τα τελευταία χρόνια έχει αρχίσει να γίνεται πιο έντονα χρήση της τρισδιάστατης απεικόνισης και στο στάδιο της έρευνας. Οι ομάδες των διατάξεων των γεωφώνων τοποθετούνται σε αποστάσεις των 25 km και η δημιουργία των κυμάτων γίνεται από

διάφορες θέσεις. Τα σήματα συγκεντρώνονται και επεξεργάζονται, όπως και στη γραμμική μέθοδο και μεταδίδονται στους σταθμούς εργασίας. Λόγω των μικρών αποστάσεων μεταξύ των διατάξεων των γεωφώνων της δυνατότητας τοποθέτησης κατά τρόπον ώστε να καλύψουν οποιοδήποτε σχήμα (ακόμη και μια τυχαία γραμμή), η ερμηνεία των οριζόντων ανάκλασης μπορεί να δώσει δεδομένα πολύ μεγάλης ευκρίνειας και ακρίβειας. Λόγω του πολύ υψηλού κόστους εξοπλισμού, απαιτούνται αρκετές χιλιάδες γεώφωνα και του μεγάλου αριθμού απαιτούμενου προσωπικού έως 350 άτομα η μέθοδος είναι πολύ ακριβή. Παρόλα αυτά, αποπληρώνει γρήγορα το κόστος, ιδίως κατά την ανάπτυξη μιας παραγωγικής περιοχής, αφού λόγω της ακρίβειας των δεδομένων αποφεύγονται οι μη παραγωγικές γεωτρήσεις.

2.1.2.3 Γεωχημική Έρευνα και Προσδιορισμός Ανθρακοποίησης Δειγμάτων

Οι γεωχημικές έρευνες και ο προσδιορισμός της ανθρακοποίησης έχουν γίνει πολύ σημαντικές παράμετροι. Χρησιμοποιούνται ως ενδείξεις ωριμότητας και προσδοκιμότητας για πιθανά μητρικά πετρώματα και για την απάντηση ερωτήσεων σχετικά με την προέλευση και τους δρόμους μετανάστευσης του πετρελαίου και του φυσικού αερίου. Αυτοί οι προσδιορισμοί διενεργούνται εν μέρει σε δείγματα από γεωλογικές έρευνες πεδίου και εν μέρει σε δείγματα από δοκιμαστικές οπές ("καρότα"). Οι μετρήσεις ανθρακοποίησης χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της ωριμότητας ενός μητρικού πετρώματος. Εάν φανεί ότι τα πετρώματα είναι ανώριμα, τότε εγκαταλείπονται όλες οι δραστηριότητες. Οι μελέτες ανθρακοποίησης, είναι κατά προτίμηση φωτομετρικές μετρήσεις ανάκλασης. Τα συμπεράσματα ως προς την ωριμότητα δειγμάτων μητρικών πετρωμάτων που προκύπτουν από χημική έρευνα δεν μπορούν να είναι πολύ αξιόπιστα. Χρησιμοποιούνται επίσης και οπτικές παράμετροι. Εδώ μετριέται η μεταβολή χρώματος του διασκορπισμένου οργανικού υλικού στο ίζημα λόγω θέρμανσης. Οι οπτικές μελέτες είναι μικρής σημασίας και θα πρέπει να χρησιμοποιούνται μόνο μαζί με δεδομένα χημικής έρευνας ή πυρόλυσης. Η πυρόλυση που πραγματοποιείται σε μεγάλο αριθμό δειγμάτων πετρώματος είναι πολύ σημαντική για την ανάλυση του κηρογόνου. Η δοκιμή πυρόλυσης Rock-Eval παρέχει έναν γρήγορο προσδιορισμό του τύπου και του βαθμού ωριμότητας του κηρογόνου, σε συνδυασμό με άμεσο προσδιορισμό του δυναμικού σε υδρογονάνθρακες. Η σύγκριση των δεδομένων από αρκετές δοκιμαστικές οπές

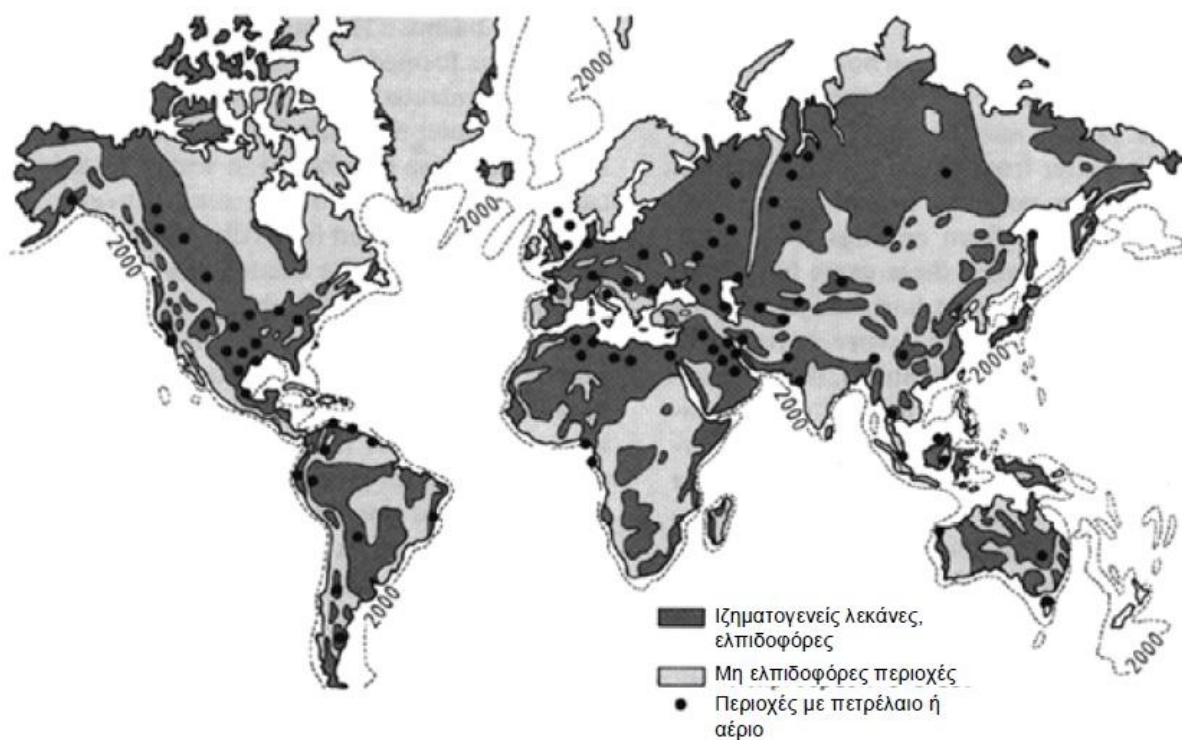
παρέχει πολύ σημαντικές χημικές/γεωχημικές συσχετίσεις για μια περιοχή. Η ανάλυση ισοτόπων άνθρακα στα συστατικά του φυσικού αερίου είναι πολύ συνηθισμένη στην έρευνα για κοιτάσματα υδρογονανθράκων. Βασίζεται στην αναλογία των ισοτόπων ^{13}C και ^{12}C στο μεθάνιο και στην ωριμότητα της οργανικής ύλης από την οποία προήλθε το μεθάνιο. Η ανάλυση μπορεί να δείξει εάν τα αέρια από τις δοκιμαστικές οπές σχηματίστηκαν εκεί ή έχουν μετακομίσει προς τα πάνω από βαθύτερα στρώματα. Οι λόγοι των ισοτόπων άνθρακα επιτρέπουν την εξαγωγή αξιόπιστων εκτιμήσεων για τη στρατιγραφική διαστρωμάτωση και τα αντίστοιχα μητρικά πετρώματα.

2.2 ΥΠΑΡΞΗ, ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΑΠΟΘΕΜΑΤΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ

Η ύπαρξη πετρελαίου είναι συνδυασμένη με τις ιζηματογενείς λεκάνες της Γης. Η κατανομή τους δεν ακολουθεί καμία στατιστική. Ακόμη και η τεκτονική τους κατάσταση είναι πολύ διαφορετική και δείχνει ότι ο σχηματισμός ιζημάτων δε σχετίζεται με ειδικούς τύπους λεκανών μόνο. Οι μεγαλύτερες ποσότητες πετρελαίου βρίσκονται σε λεκάνες που έχουν υποστεί καταβύθιση, ως αποτέλεσμα κίνησης τεκτονικών πλακών από το Ιουρασικό έως το Μέσο Τριαδικό όπου λόγω της έλλειψης επαφής με πλούσια σε οξυγόνο νερά και υπό την επίδραση κατάλληλης (σχετικά υψηλής) θερμοκρασίας και ύπαρξης αναγωγικών συνθηκών υπήρξε μετασχηματισμός της οργανικής ύλης. Τα κοιτάσματα σε παλαιότερους γεωλογικούς σχηματισμούς είναι σχετικά μικρά, μάλλον λόγω της χαμηλής ποσότητας οργανικής ύλης που ήταν διαθέσιμη εκείνες τις εποχές. Αλλά τα μικρότερα κοιτάσματα σε σχηματισμούς παλαιότερους από αυτούς του Μεσοζωικού αιώνα, μπορεί να είναι το αποτέλεσμα θερμικής εξέλιξης (μετατροπή του πετρελαίου σε αέριο), της καταστροφής των ταμειυτήρων ή της έμφραξης τους από τεκτονικές κινήσεις ή διάβρωση. Οι προσοδοφόρες ιζηματογενείς λεκάνες είναι κατανεμημένες τόσο στην ξηρά όσο και στη θάλασσα (Σχ. 2.3). Οι μέθοδοι έρευνας και ανάπτυξης είναι οι ίδιες, με τη μεγάλη διαφορά να βρίσκεται στο κόστος διάνοιξης του φρέατος και τοποθέτησης της εγκατάστασης εκμετάλλευσης στην περίπτωση των υποθαλάσσιων κοιτασμάτων.

Πέρα από τα κλασικά υποθαλάσσια πεδία όπως του Maracaibo (Βενεζουέλα) και του Baku (Κασπία θάλασσα) που ήταν ήδη γνωστά και υπό εκμετάλλευση με τροποποιημένες χερσαίες εγκαταστάσεις από τη δεκαετία του '30, η υποθαλάσσια

έρευνα και εκμετάλλευση απέκτησε αυξημένη σημασία από τη δεκαετία του '60 και μετά. Τότε έγινε τεχνικά δυνατή η αξιοποίηση κοιτασμάτων σε βάθη θαλασσών μεγαλύτερα από 1000 m. Το 1983, στη δυτική ακτή της Γαλλίας έγινε διάνοιξη φρέατος σε βάθος βυθού 1714 m. Σε τέτοια βάθη υπάρχουν δυσκολίες στην παραγωγή και ο εξοπλισμός θα πρέπει να τοποθετηθεί στην επιφάνεια του βυθού και να συντηρείται από δύτες. Το βαθύτερο παραγωγικό πεδίο είναι το Jolliet στον Κόλπο του Μεξικού, με εξέδρα εξόρυξης πάνω από βυθό βάθους 535 m. Το 1992 εγκαταστάθηκε πλωτή εξέδρα στο πεδίο Snorre της Νορβηγικής Βορείου Θάλασσας σε βάθος βυθού 350 m. Τα μεγαλύτερα βάθη στα οποία γίνεται εγκατάσταση πλωτής εξέδρας είναι στα 1000 m περίπου (πεδία Auger και Marlin). Λόγω του μεγάλου κόστους επένδυσης, η συστηματική εκμετάλλευση των υποθαλάσσιων κοιτασμάτων σε βαθιά νερά εξαρτάται από τη διαμόρφωση των τιμών του αργού πετρελαίου στην αγορά.



Σχήμα 2.3: Οι ιζηματογενείς λεκάνες της Γης με τις πιο σημαντικές παραγωγικές περιοχές.

Οι τιμές του αργού πετρελαίου παρουσίασαν σημαντική μείωση στο δεύτερο μισό της δεκαετίας του '80. Οι χώρες του ΟΠΕΚ σαν μέσο σταθεροποίησης των τιμών χρησιμοποίησαν σταθερές αναλογίες παραγωγής, χωρίς όμως ουσιαστική επιτυχία. Ο έλεγχος της παραγωγής από πλευράς ΟΠΕΚ και οι οικονομικές των

εκτός ΟΠΕΚ πετρελαιοπαραγωγών κρατών επηρεάζουν τόσο πολύ την εικόνα ώστε δε μπορεί να υπάρξει καθαρή εικόνα της παραγωγικότητας κάθε χώρας. Η παραγωγή (Πίν. 2.1) δίνει μόνο μια ένδειξη της συνολικής γεωλογικής και τεχνικά εφικτής δυναμικότητας. Η παγκόσμια παραγωγή πετρελαίου το 2005 ήταν 3.895×10^9 t. Σε 20 χρόνια αυξήθηκε κατά 40% περίπου. Η κατάταξη των πετρελαιοπαραγωγών κρατών για το 1989 δείχνει ότι τα πρωτεία κατέχουν τα κράτη της Μέσης Ανατολής (Σαουδική Αραβία, Ιράν, Ιράκ, Κουβέιτ, Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα) με παραγωγή 1208×10^6 t, ακολουθούμενα από τις χώρες της πρώην Σοβιετικής Ένωσης με 577×10^6 t, και τις ΗΠΑ με τον Καναδά να ακολουθούν στους 455×10^6 t από κοινού. Σε απόσταση ακολουθούσαν η Νότιος και Κεντρική Αμερική (350×10^6 t), η Ασία, η Ωκεανία (382×10^6 t), η Αφρική (467×10^6 t), και η Ευρώπη (268×10^6 t). Τα βεβαιωμένα αποθέματα πετρελαίου ανήλθαν στους 163.6×10^9 t κυρίως λόγω ανάπτυξης υποθαλάσσιων πεδίων. Υπάρχει αύξηση πάνω από 80% σε σχέση με τα αποθέματα που ήταν γνωστά τη δεκαετία του '70 (92.40×10^9 t). Σε σχέση με την παραγωγή του 2005 των περίπου 3.9×10^9 t, ο προκύπτων λόγος είναι 34:1, λίγο πάνω του 30:1 που ίσχυε για δεκαετίες. Με τα βεβαιωμένα μόνο αποθέματα, ο προκύπτων λόγος είναι περίπου 50:1. Τα βεβαιωμένα αποθέματα πετρελαίου καταγράφονται στον Πίν. 2.1.

Πίνακας 2.1: Σημαντικότερες πετρελαιοπαραγωγές χώρες, παραγωγή και αποθέματα (31/12/2005).

α/α		Συνολική Παραγωγή 10 ⁶ t	Αποθέματα	
			Βεβαιωμένα και Πιθανά, 10 ⁶ t	Προσδόκιμα, 10 ⁶ t
1	Καναδάς	4262	2314	7950
2	Ηνωμένες Πολιτείες	30652	3617	7280
3	Βόρειος Αμερική	34914	5931	15230
4	Αργεντινή	1386	317	475
5	Βραζιλία	1259	1617	1625
6	Κολομβία	942	200	930
7	Ισημερινός	561	711	415
8	Μεξικό	5315	1876	3975
9	Τρινιδάντ-Τομπάγκο	485	116	160
10	Βενεζουέλα	9091	11488	4130
11	Λοιποί	574	374	750
12	Νότιος - Κεντρ. Αμερική	14385	14780	12460
13	Ιράν	8851	18886	3020
14	Ιράκ	4455	15520	5560
15	Κουβέιτ	5302	13981	320
16	Ομάν	1158	756	150
17	Κατάρ	1186	1996	
18	Σαουδική Αραβία	16312	36293	7950
19	Συρία	638	409	
20	Ην. Αραβικά Εμιράτα	3758	12954	800
21	Λοιποί	1351	2950	320
22	Μέση Ανατολή	24469	101167	18120
23	Αλγερία	2549	1537	250
24	Αγκόλα	813	1219	250
25	Αίγυπτος	1417	524	300
26	Γκαμπόν	467	302	200
27	Λιβύη	3715	5095	950
28	Νιγηρία	3748	4842	1120
29	Λοιποί	589	1683	1830
30	Αφρική	13298	15202	4900
31	Αυστραλία	951	515	325
32	Κίνα	4744	2191	5100
33	Ινδία	1010	786	400
34	Μαλαισία	1216	550	700
35	Ινδονησία	3323	595	1250
36	Λοιποί	684	767	975
37	Ασία - Ωκεανία	11928	5404	8750
38	Νορβηγία	2767	1296	1065

39	Μεγάλη Βρετανία	3269	533	1175
40	Λοιποί Δυτ. Ευρώπης	983	285	300
41	Ανατολική Ευρώπη	2472	185	270
42	Ευρώπη	6725	2299	2900
43	τ. Σοβιετική Ένωση	23674	16834	14625
44	Σύνολο	145936	163568	76985

Πέρα από τα κοιτάσματα συμβατικού πετρελαίου θα πρέπει να αναφερθούν και οι περίπου 100×10^9 τ αποθεμάτων βαρέος πετρελαίου και πετρελαιοάμμων (tarsands). Τα αποθέματα βαρέος πετρελαίου βρίσκονται κυρίως (87%) στον Καναδά, τις χώρες της πρώην Σοβιετικής Ένωσης και τη Βενεζουέλα. Αντιστοιχούν σε μελλοντικά αποθέματα, τα οποία θα είναι περισσότερο ανακτήσιμα όταν εξελιχθούν περαιτέρω οι μέθοδοι τριτογενούς ανάκτησης, για να απομακρύνουν το πετρέλαιο από τα πετρώματα, και σε τιμές αργού πετρελαίου πάνω από τα 50 \$/bbl.

2.3 ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ

Για την έρευνα και παραγωγή πετρελαίου και φυσικού αερίου, απαιτείται η διάνοιξη γεωτρήσεων σε μεγάλα βάθη. Οι διανοίξεις για τον εντοπισμό και την εξερεύνηση των κοιτασμάτων είναι γνωστές ως ερευνητικά φρέατα (exploratory wells), ενώ οι διανοίξεις που χρησιμοποιούνται για παραγωγή από τα κοιτάσματα είναι γνωστές ως παραγωγικά φρέατα (production wells). Τα επιτυχημένα ερευνητικά φρέατα μετατρέπονται σε παραγωγικά με την προσθήκη του κατάλληλου εξοπλισμού. Τα ερευνητικά φρέατα πρέπει να διανοιχτούν με τέτοιο τρόπο ώστε να παρέχουν ακριβείς πληροφορίες για το πέτρωμα και το προς εξερεύνηση κοίτασμα. Αυτό γίνεται με δειγματοληψία πετρωμάτων, π.χ. με τη μορφή καρότων, δειγματοληψία υλικών που βρίσκονται στο πέτρωμα (π.χ., νερό, πετρέλαιο, αέριο), συλλογή δεδομένων από μεγάλο αριθμό γεωφυσικών μετρήσεων, διεξαγωγή δοκιμών, παραγωγικότητα και μέτρηση της προκύπτουσας συμπεριφοράς του κοιτάσματος. Τα παραγωγικά φρέατα πρέπει να διανοίγονται και να ολοκληρώνονται με τέτοιο τρόπο ώστε το κόστος της προκύπτουσας παραγωγής να είναι το ελάχιστο δυνατό, να μπορεί να παραχθεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ποσότητα από τα αποθέματα με οικονομικό τρόπο, να γίνει βέλτιστη χρήση της παραγωγικής

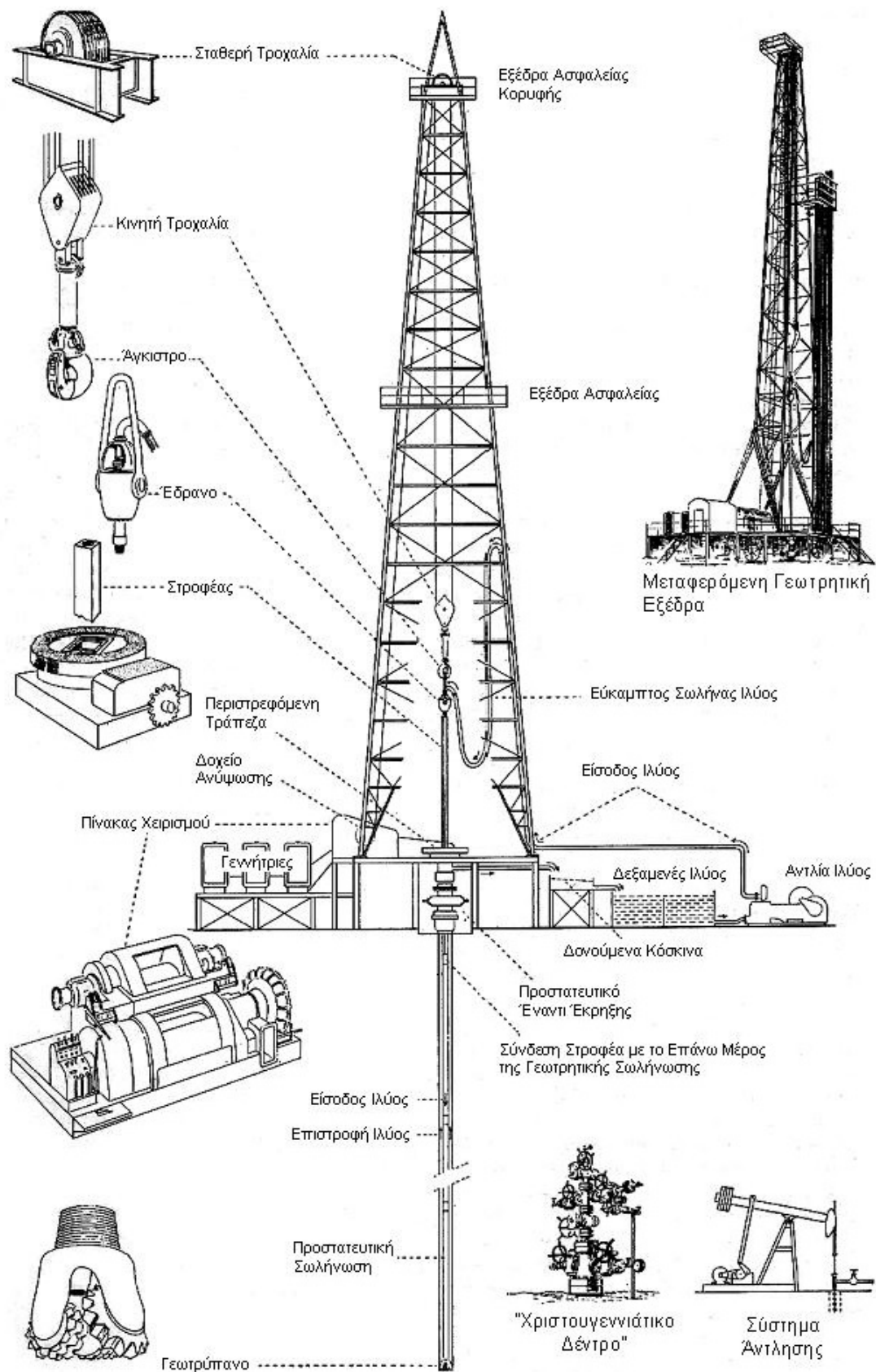
δυναμικότητας, να απαιτηθεί η διάνοιξη του ελάχιστου αριθμού φρεάτων για την ανάπτυξη του κοιτάσματος, και να επιτευχθεί παραγωγή χωρίς προβλήματα καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του κοιτάσματος.

Οι γεωτρήσεις σε μεγάλα βάθη δεν αποτελούν κάτι το νέο στην εξέλιξη της τεχνολογίας. Έχει αναφερθεί από τον Κομφούκιο η διάνοιξη φρεάτων σε αλατωρυχεία βάθους 500m το 600 π.Χ. Στην Ευρώπη πραγματοποιούνταν διάνοιξη φρεάτων για την εύρεση νερού τόσο στους αρχαίους χρόνους όσο και στο Μεσαίωνα. Η μηχανική διάνοιξης φρεάτων και τα βάθη στα οποία μπορούσε να φτάσει είχε μείνει στάσιμη για πάρα πολλούς αιώνες. Η έρευνα για πρώτες ύλες (ποτάσα, σιδηρομετάλλευμα, άνθρακας) στα πλαίσια της βιομηχανοποίησης το 19ο αιώνα, έδωσε ώθηση στην εξέλιξη της μηχανικής γεωτρήσεων. Σε αυτό το διάστημα, το βάθος των γεωτρήσεων έφτασε τα 2000 m.

Στην Ευρώπη κατά το δεύτερο μισό του 19ου αιώνα και το ξεκίνημα του 20ου αιώνα πραγματοποιήθηκε εκτεταμένη έρευνα για πρώτες ύλες. Στο διάστημα αυτό αναπτύχθηκε η τεχνική της περιστροφικής γεώτρησης με ανακυκλοφορία γεωτρητικής ιλύος. Με αυτόν τον τρόπο έγινε δυνατή η διάνοιξη οπών σε μεγαλύτερα βάθη για την παραγωγή άνθρακα, ποτάσας και ορυκτού αλατιού. Η χρήση της μεθόδου της περιστροφικής γεώτρησης αναπτύχθηκε στις Ηνωμένες Πολιτείες στο τέλος του 19ου αιώνα για την έρευνα και ανάπτυξη κοιτασμάτων πετρελαίου ήταν ένα σημαντικό βήμα προς τα εμπρός. Από τότε, η τεχνική έχει βελτιωθεί σημαντικά και παραμένει μέχρι και σήμερα η κυρίαρχη μέθοδος γεώτρησης, σε βάθη που έχουν φτάσει μέχρι τα 9000 m. Η βαθύτερη γεώτρηση έχει πραγματοποιηθεί στο φρέαρ KolaSG 3 της πρώην Σοβιετικής Ένωσης, που έχει φτάσει σε βάθος 12261 m.

2.3.1 Περιστροφική Εξέδρα Γεώτρησης

Τα κύρια χαρακτηριστικά της περιστροφικής γεώτρησης είναι η ανακυκλοφορούσα θιξοτροπική γεωτρητική ιλύς και χρήση ισχυρών κεφαλών γεωτρυπάνων. Αυτά, σε συνδυασμό με άλλα τυπικά χαρακτηριστικά λειτουργίας έχουν συμβάλει στην καθιέρωση της μεθόδου ως της σημαντικότερης για την εξερεύνηση και ανάπτυξη βαθέων κοιτασμάτων υδρογονανθράκων. Οι απότομες εκτονώσεις και οι πίδακες που κάποτε ήταν πολυάριθμες, σήμερα αποτελούν σπανιότατο γεγονός. Τα βασικά μέρη και η λειτουργία μιας περιστροφικής εξέδρας γεώτρησης δίνονται στο Σχ. 2.4.



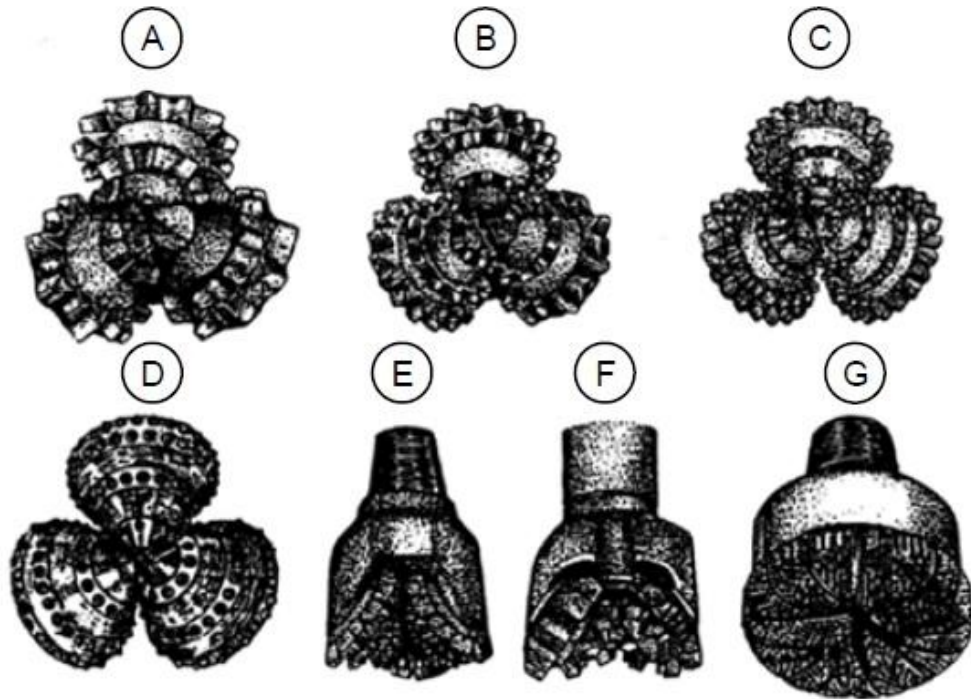
Σχήμα 2.4: Διάγραμμα περιστροφικής εξέδρας γεώτρησης.

Μέσω της περιστρεφόμενης τράπεζας (rotary table), εφαρμόζεται ροπή στο γεωτρύπανο, το οποίο αποτελείται από ανεξάρτητους σωλήνες. Οι σωλήνες αναρτώνται στον πυλώνα (derrick) μέσω του άγκιστρου (hook) που είναι προσαρτημένο στην κινητή τροχαλία (travelling block). Το άγκιστρο αυτό, που επιτρέπει στο γεωτρύπανο να περιστρέφεται, μπορεί να κινείται κατακόρυφα με τη βοήθεια κατάλληλου συστήματος στο δάπεδο της εξέδρας. Το γεωτρύπανο μεταφέρει τη ροπή στην κεφαλή (drilling bit), η ισχύς πρόσκρουσης του οποίου στο πέτρωμα εξαρτάται από το βάρος του γεωτρύπανου και των γεωτρητικών σωλήνων (drill collar) (μεγάλου πάχους σωλήνες τοποθετημένοι πάνω από την κεφαλή), που δεν αναλαμβάνεται από το άγκιστρο.

Η περιστρεφόμενη τράπεζα, η οποία είναι ένας "οδηγός επιφανείας", μπορεί να αντικατασταθεί από έναν υδραυλικό κινητήρα γεώτρησης ακριβώς πάνω από την κεφαλή του γεωτρύπανου. Αυτός ο μηχανισμός που μπορεί να είναι μηχανή θετικής εκτόπισης βασισμένη στην αρχή του Moineau ή μια πολυβάθμια τουρμπίνα, εγκαθίσταται στον αγωγό γεώτρησης και παίρνει κίνηση από τη γεωτρητική ιλύ.

Κεφαλές Γεώτρησης:

Η κεφαλή της γεώτρησης, είναι το μέρος του γεωτρύπανου μέσω του οποίου γίνεται η προσβολή του βράχου και η διάνοιξη της οπής του φρέατος. Αυτό μπορεί να γίνει με μηχανική διάνοιξη (κοπτική κεφαλή), θρυμματισμό (κωνική κυλινδρική κεφαλή Σχ. 2.5, A — E), ή αποξεστική διάτρηση (διαμαντένια κεφαλή. Σχ. 2.5, G).



Σχήμα 2.5: Διάφοροι τύποι κεφαλών γεωτρυπάνων.

- A) Περιστροφική κεφαλή με τραχεία οδόντωση (για μαλακά πετρώματα)
- B) Περιστροφική κεφαλή (για μέτριας σκληρότητας)
- C) Περιστροφική κεφαλή με λεπτή οδόντωση (για σκληρά πετρώματα)
- D) Περιστροφική κεφαλή με ένθετα σκληρού μετάλλου (για πολύ σκληρά πετρώματα)
- E) Κωνική κυλινδρική κεφαλή
- F) Κεφαλή με πίδακα
- G) Διαμαντένια κεφαλή

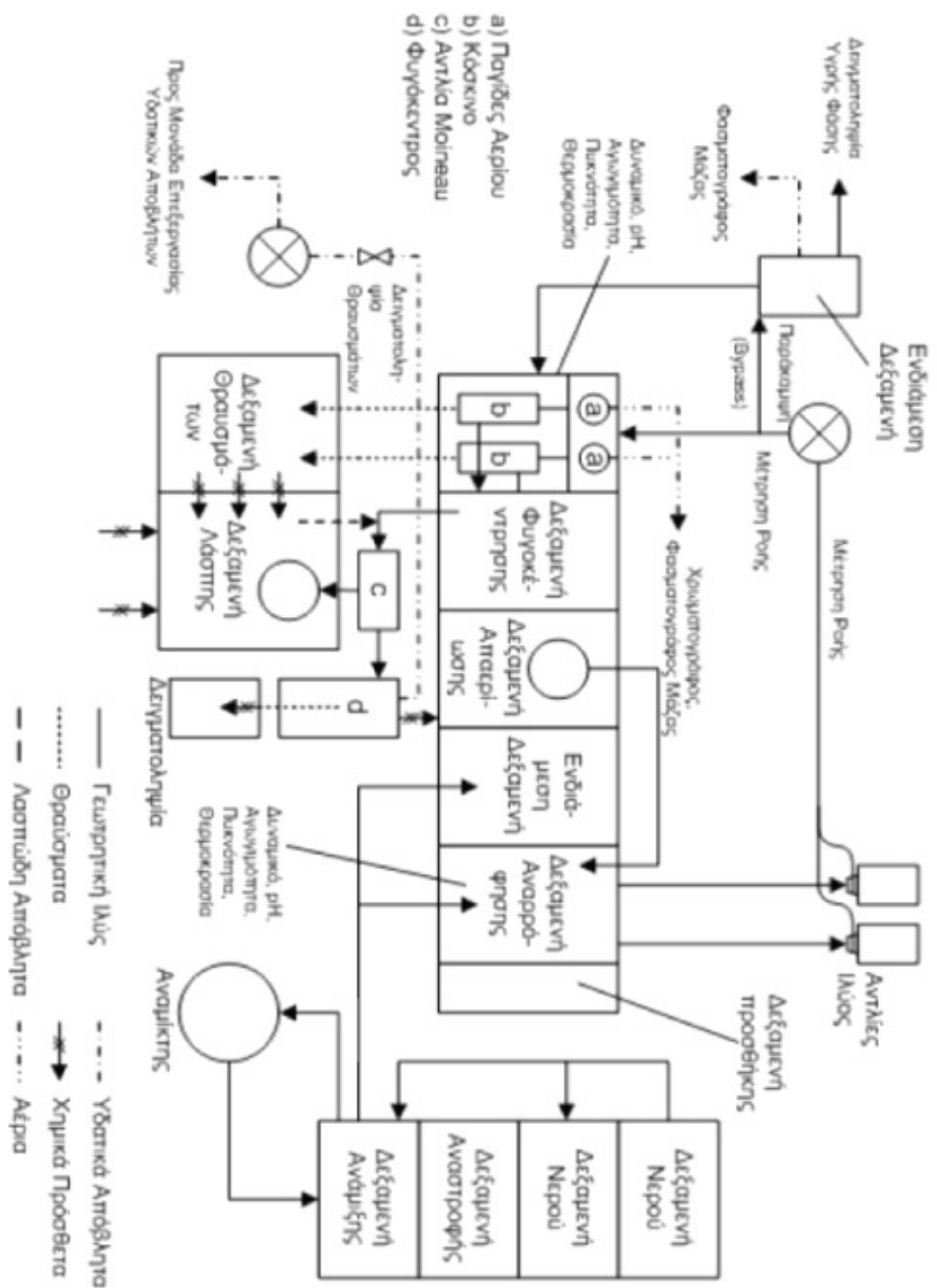
Γεωτρητική Ιλύς:

Τα θραύσματα από τη γεώτρηση μεταφέρονται στο δακτύλιο μεταξύ του τοιχώματος του φρέατος και του γεωτρύπανου από την ιλύ. Ως γεωτρητική ιλύς χρησιμοποιείται ένα θιξοτροπικό ρευστό που περιέχει μπεντονίτη και κυτταρίνη για παράδειγμα. Οι λειτουργίες της ιλύος περιλαμβάνουν την ψύξη και λίπανση του γεωτρύπανου, τον καθαρισμό του πυθμένα του φρέατος, την απομάκρυνση των θραυσμάτων, και την υποστήριξη των τοιχωμάτων της γεώτρησης (υδραυλική επίχριση). Η ιλύς αντλείται με εμβολοφόρες αντλίες μέσω των γεωτρητικών σωλήνων προς την κεφαλή του γεωτρύπανου, μέσω της οποίας εξέρχεται με μεγάλη ταχύτητα για να εξασφαλίσει τη μέγιστη δυνατή απομάκρυνση των θραυσμάτων. Τα

θραύσματα και τα μικρά κομμάτια στερεών απομακρύνονται από την ιλύ στην επιφάνεια (μέσω των δονούμενων κόσκινων, φυγοκέντρων και υδροκυκλώνων) και η ιλύ ανακυκλοφορεί προς την οπή μέσω της αντλίας (Σχ. 2.6).

Οι παράμετροι της ιλύος (π.χ., ρεολογικές ιδιότητες, μηχανική και θερμική κατάσταση του κολλοειδούς συστήματος) ρυθμίζονται ανάλογα με την ταχύτητα γεώτρησης, την ισχύ της αντλίας, τον τύπο κεφαλής του γεωτρήπανου, τη διάμετρο γεώτρησης, την πίεση στους πόρους του πετρώματος, τη θερμοκρασία, τη φύση του διανοιγόμενου πετρώματος (περιοχές απώλειας ιλύος στους διανοιγόμενους γεωλογικούς σχηματισμούς), τις εισροές στην οπή της γεώτρησης, και την περιεκτικότητα σε στερεά.

Πυκνότητα της ιλύος κυμαινόμενη μεταξύ 1.10 και 1.40 g/cm³ είναι συνήθως αποτελεσματική για να ανταποκριθεί στην πίεση του κοιτάσματος, και σε οριακές καταστάσεις όπως η επίδραση του εμβολισμού και οι αδρανειακές δυνάμεις κατά την έλξη της συστοιχίας των σωλήνων της γεώτρησης. Σε ειδικές περιπτώσεις μπορεί να απαιτηθεί πυκνότητα χαμηλότερη από 1 g/cm³ ή πάνω από 2.5 g/cm³.



Σχήμα 2.6: Σχηματικό διάγραμμα επεξεργασίας γεωθητικής ιλύος.

Η διήθηση του νερού από την ιλύ στα πορώδη πετρώματα, προς σχηματισμό διηθητού πλακούντα εξελίσσεται σύμφωνα με το νόμο διήθησης του Darcy. Η ποσότητα του διηθήματος είναι ανάλογη της διαπερατότητας του πλακούντα, της εφαρμοζόμενης διαφοράς πίεσης και της ενεργού επιφάνειας διήθησης, και αντιστρόφως ανάλογη του ιξώδους του διηθήματος και του πάχους του πλακούντα. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα της ιλύος, το pH και η περιεκτικότητα σε χλωριόντα, θειικά, ασβέστιο και όξινα ανθρακικά είναι παράμετροι που βρίσκονται υπό συνεχή παρακολούθηση. Τα πρόσθετα που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία του κολλοειδούς συστήματος της ιλύος είναι:

1. Αργιλούχα υλικά (π.χ., μπεντονίτης)
2. Βαρέα υλικά (π.χ., βαρίτης, αιματίτης)
3. Συστατικά μείωσης ιξώδους, διασπαρτικά, υλικά διατήρησης του κολλοειδούς
4. Γαλακτωματοποιητές, λιπαντικά (π.χ., λάδι, για να μειώσει την εσωτερική τριβή)
5. Παρεμποδιστές

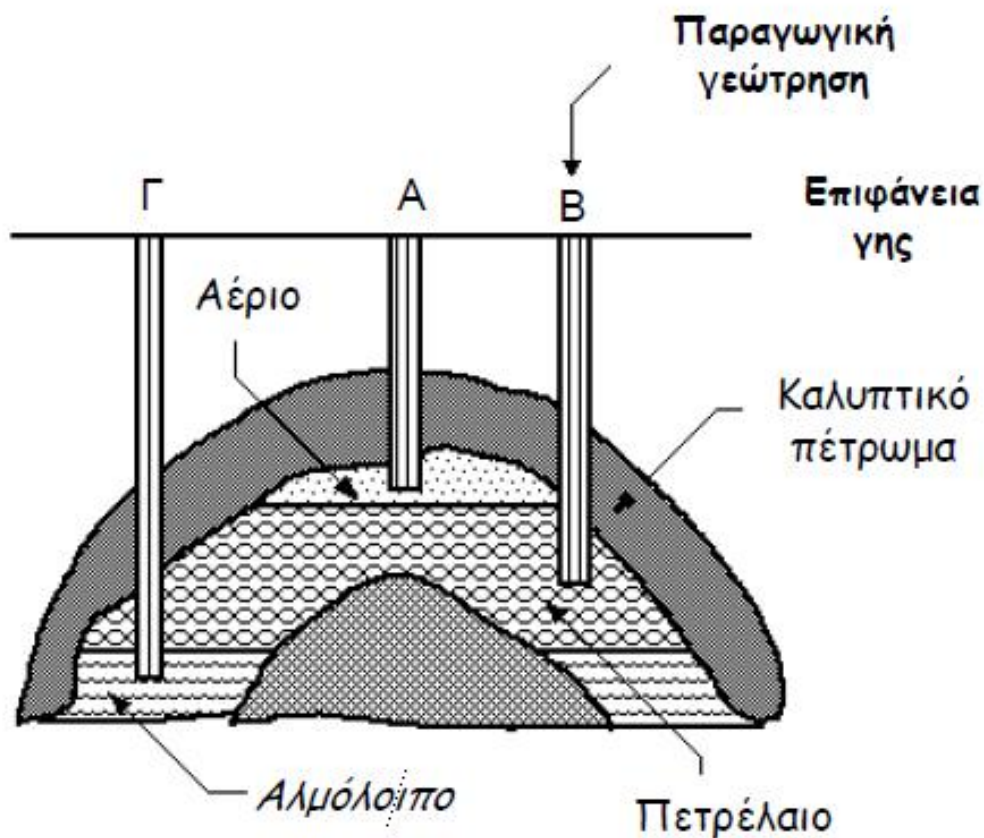
Υπάρχουν γεωτρητικές ιλύες υδατικής ή ελαιώδους βάσης. Η οπή της γεώτρησης χωρίζεται σε τμήματα από την κορυφή προς τον πυθμένα. Καθένα από αυτά τα τμήματα σταθεροποιείται με τη βοήθεια κατάλληλου υποστηρίγματος που στερεώνεται στα τοιχώματα με ειδικό σκυρόδεμα.

2.4 ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ

Η ανάκτηση του πετρελαίου γίνεται με γεώτρηση στη τοποθεσία που έχουν επιλέξει οι γεωλόγοι. Στο Σχ. 2.7 φαίνεται ότι από τις τρεις γεωτρήσεις, μόνον η γεώτρηση Β θα δώσει πετρέλαιο. Επιπλέον γεωτρήσεις χρειάζονται για να διαπιστωθεί το μέγεθος του κοιτάσματος και το βάθος του. Η εξόρυξη του πετρελαίου γίνεται με διάφορους τρόπους και με διαφορετικό κόστος. Συνήθως διακρίνεται σε πρωτογενής, δευτερογενής και τριτογενής ανάκτηση πετρελαίου όπως παρουσιάζεται παρακάτω.

2.4.1 Πρωτογενής ανάκτηση (primary recovery)

Η ανάκτηση αυτή βασίζεται στη φυσική ροή του πετρελαίου λόγω της πίεσης που επικρατεί στον ταμιευτήρα και στην άντληση. Η πρώτη μέθοδος είναι προφανώς η περισσότερο οικονομική μέθοδος παραγωγής και εφαρμόζεται εφόσον η παραγωγή είναι ικανοποιητική. Σε μερικές περιοχές στη Μέση Ανατολή η φυσική ροή ανέρχεται σε $65 \text{ m}^3/\text{hr}$. Κατά μέσο όρο ανακτάται περίπου το 15-20% των αποθεμάτων, αν και η πρωτογενής ανάκτηση μπορεί να φτάνει μόλις το 5%. Αν και η πρώτη ουσιαστικά γεώτρηση πετρελαίου έφτασε στα 21 m, σήμερα έχουν γίνει ερευνητικές γεωτρήσεις σε βάθος 8 χιλιομέτρων.



Σχήμα 2.7: Επιλογή θέσης για γεώτρηση πετρελαίου.

2.4.2 Δευτερογενής ανάκτηση (secondary recovery)

Η ανάκτηση αυτή βασίζεται στην πλημμύριση του κοιτάσματος με νερό ή στην εισαγωγή αερίου (Σχ. 2.7). Συνήθως ανακτάται ένα 5-20% από το κοιτάσμα. Ο

συνδυασμός πρωτογενούς και δευτερογενούς ανάκτησης καλείται συμβατική ανάκτηση. Με τη συμβατική ανάκτηση εξορύσσεται κατά μέσο όρο το 30% ενός κοιτάσματος (η περιοχή τιμών κυμαίνεται από 15-40%). Σε μερικές από αυτές τις μεθόδους η εκτοπίζουσα και η εκτοπιζόμενη φάση είναι μη αναμείξιμες (π.χ. εκτόπιση με διάλυμα πολυμερών) ενώ σε άλλες οι δύο φάσεις είναι αναμείξιμες (π.χ. εκτόπιση με υδρογονάνθρακες). Μερικές μέθοδοι αρχίζουν έχοντας τις δύο φάσεις αναμείξιμες αλλά πολύ γρήγορα, κατά την εξέλιξη της διεργασίας, οι δύο φάσεις αποχωρίζονται και καταλήγουν να γίνουν μη αναμείξιμες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι χημικές πλημμύρες που περιέχουν επιφανειακά ενεργές ουσίες (surfactants και cosurfactants) και που στην αρχή σχηματίζουν γαλάκτωμα με τη πετρελαϊκή φάση. Η χημική πλημμύρα προωθείται από διάλυμα πολυμερών για να μειωθεί η τάση για σχηματισμό δακτύλων (fingering). Κατά τη διάρκεια της εκτόπισης όμως, αρκετοί φυσικοχημικοί μηχανισμοί οδηγούν στην απώλεια των χημικών ουσιών που προστέθηκαν αρχικά στην εκτοπίζουσα φάση. Αυτοί οι μηχανισμοί περιλαμβάνουν απορρόφηση των πολυμερών και των επιφανειακά ενεργών ουσιών στα τοιχώματα του πετρώματος, καθίζηση ή παγίδευση στα ακίνητα γάγγλια πετρελαίου των πολυμερών και των επιφανειακά ενεργών ουσιών, μηχανική παγίδευση των πολυμερών στους στενούς πόρους, αποικοδόμηση (degradation) των πολυμερών κλπ. Έτσι η αρχικά αναμείξιμη πλημμύρα με το μεγάλο βαθμό αποτελεσματικότητας εκφυλίζεται σε μη αναμείξιμη πλημμύρα με χαμηλή αποτελεσματικότητα. Για τους παραπάνω λόγους η μη αναμείξιμη εκτόπιση είναι πρόβλημα πρωταρχικής σημασίας στη βελτιωμένη απόληψη πετρελαίου. Από τη στιγμή που η εκτόπιση είναι μη αναμείξιμη, η περαιτέρω επιτυχία ή αποτυχία της μεθόδου εξαρτάται από το αν θα σχηματισθεί τράπεζα πετρελαίου (oil bank), η οποία βέβαια θα πρέπει να διατηρηθεί ως το πηγάδι παραγωγής. Λέγοντας τράπεζα πετρελαίου εννοούμε μια ζώνη με υψηλή συγκέντρωση πετρελαίου, η οποία ταξιδεύει με το μέτωπο της πλημμύρας. Οι ερευνητές συμφωνούν ότι για τη διατήρηση της τράπεζας πετρελαίου καθοριστικό ρόλο παίζουν τόσο οι σχετικές (ως προς τη πλημμύρα) ταχύτητες των γαγγλίων, όσο και ο μηχανισμός της σύγκρουσης και συνένωσης των γαγγλίων.

2.4.3 Τριτογενής ή προχωρημένη ανάκτηση (tertiary or enhanced recovery)

Αποτελεί δαπανηρή μέθοδο και πραγματοποιείται με τη μείωση του ιξώδους του πετρελαίου που επιτυγχάνεται με θέρμανση με ατμό ή με εισαγωγή διοξειδίου του άνθρακα ή κατάλληλων τασιενεργών ουσιών. Αποδοτικότερη είναι η τριτογενής ανάκτηση με την εισαγωγή ατμού. Με το συνδυασμό των τριών τρόπων ανάκτησης μπορεί να ανακτηθεί ποσοστό πετρελαίου της τάξης του 40 με 80%, αλλά ξοδεύεται περίπου το ένα τρίτο της παραγωγής.

Οι μέθοδοι που εφαρμόζονται κατά το τριτοβάθμιο στάδιο ονομάζονται μέθοδοι βελτιωμένης απόληψης πετρελαίου (enhanced oil recovery methods). Στόχος των μεθόδων αυτών είναι η κινητοποίηση και/ή η διαλυτοποίηση των παγιδευμένων γαγγλίων ώστε να καταστεί δυνατή η απόληψη σημαντικού ποσού πετρελαίου με αποδεκτό κόστος. Οι μέθοδοι βελτιωμένης απόληψης πετρελαίου μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες:

A) Θερμικές μέθοδοι, που περιλαμβάνουν τη μέθοδο εκτόπισης με ατμό και τη μέθοδο της επιτόπου καύσης (in situ combustion). Στη μέθοδο της επιτόπου καύσης δημιουργείται και προωθείται διαμέσου του πετρελαιοφόρου πετρώματος ένα καιόμενο μέτωπο που κινείται και συντηρείται από αέρα ή οξυγόνο και πολλές φορές και από νερό με σκοπό τη μείωση του ιξώδους του πετρελαίου λόγω θέρμανσης και την ευκολότερη απόληψή του.

B) Μέθοδοι εκτόπισης με αέριο, όπου η εκτοπίζουσα φάση είναι αέριο, π.χ. υδρογονάνθρακας, ή CO₂, ή N₂.

Γ) Χημικές πλημμύρες, όπου η εκτοπίζουσα φάση είναι υδατικό διάλυμα πολυμερών (συνήθως πολυακρυλαμιδίων ή πολυσακχαριδίων), ή γαλάκτωμα (αποτελούμενο από άλμη, επιφανειακά ενεργές ουσίες, αλκοόλη και πετρέλαιο, ώστε το γαλάκτωμα να είναι σταθερό) που προωθείται με διάλυμα πολυμερών, ή είναι διάλυμα αλκαλικών ουσιών (π.χ. NaOH ή αλάτων Na).

Βέβαια υπάρχουν και συνδυασμοί των παραπάνω μεθόδων, ή τροποποιήσεις των μεθόδων αυτών, όπως π.χ. η προσθήκη αφρού (foam) στην εκτοπίζουσα φάση με σκοπό την αύξηση του ιξώδους της.

Σε μερικές από αυτές τις μεθόδους η εκτοπίζουσα και η εκτοπιζόμενη φάση είναι μη αναμείξιμες (π.χ. εκτόπιση με διάλυμα πολυμερών) ενώ σε άλλες οι δύο φάσεις είναι αναμείξιμες (π.χ. εκτόπιση με υδρογονάνθρακες). Μερικές μέθοδοι αρχίζουν έχοντας τις δύο φάσεις αναμείξιμες αλλά πολύ γρήγορα, κατά την εξέλιξη της διεργασίας, οι δύο φάσεις αποχωρίζονται και καταλήγουν να γίνουν μη αναμείξιμες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι χημικές πλημμύρες που περιέχουν

επιφανειακά ενεργές ουσίες (surfactants και cosurfactants) και που στην αρχή σχηματίζουν γαλάκτωμα με τη πετρελαϊκή φάση. Η χημική πλημμύρα προωθείται από διάλυμα πολυμερών για να μειωθεί η τάση για σχηματισμό δακτύλων (fingering). Κατά τη διάρκεια της εκτόπισης όμως, αρκετοί φυσικοχημικοί μηχανισμοί οδηγούν στην απώλεια των χημικών ουσιών που προστέθηκαν αρχικά στην εκτοπίζουσα φάση. Αυτοί οι μηχανισμοί περιλαμβάνουν απορρόφηση των πολυμερών και των επιφανειακά ενεργών ουσιών στα τοιχώματα του πετρώματος, καθίζηση ή παγίδευση στα ακίνητα γάγγλια πετρελαίου των πολυμερών και των επιφανειακά ενεργών ουσιών, μηχανική παγίδευση των πολυμερών στους στενούς πόρους, αποικοδόμηση (degradation) των πολυμερών. Έτσι η αρχικά αναμείξιμη πλημμύρα με το μεγάλο βαθμό αποτελεσματικότητας εκφυλίζεται σε μη αναμείξιμη πλημμύρα με χαμηλή αποτελεσματικότητα. Για τους παραπάνω λόγους η μη αναμείξιμη εκτόπιση είναι πρόβλημα πρωταρχικής σημασίας στη βελτιωμένη απόληψη πετρελαίου.

Από τη στιγμή που η εκτόπιση είναι μη αναμείξιμη, η περαιτέρω επιτυχία ή αποτυχία της μεθόδου εξαρτάται από το αν θα σχηματισθεί τράπεζα πετρελαίου (oil bank), η οποία βέβαια θα πρέπει να διατηρηθεί ως το πηγάδι παραγωγής. Λέγοντας τράπεζα πετρελαίου εννοούμε μια ζώνη με υψηλή συγκέντρωση πετρελαίου, η οποία ταξιδεύει με το μέτωπο της πλημμύρας. Οι ερευνητές συμφωνούν ότι για τη διατήρηση της τράπεζας πετρελαίου καθοριστικό ρόλο παίζουν τόσο οι σχετικές (ως προς τη πλημμύρα) ταχύτητες των γαγγλίων, όσο και ο μηχανισμός της σύγκρουσης και συνένωσης των γαγγλίων.

Ο ταμιευτήρας πετρελαίου συχνά βρίσκεται στη θάλασσα, οπότε πρέπει να κατασκευαστεί κάποιο είδος σταθερής πλατφόρμας για να προχωρήσει η συχνά επικίνδυνη και δαπανηρή διαδικασία ανόρυξης της γεώτρησης. Οι πλατφόρμες χωρίζονται σε επιπλέουσες με αγκύρωση και σε σταθερές, όπως απεικονίζεται στο Σχ. 2.8. Η ανόρυξη γεωτρήσεων στη θάλασσα κοστίζουν μέχρι και 10 φορές περισσότερο από το αν η ανόρυξη γινόταν στην ξηρά.

Με τη διάνοιξη και την ανάπτυξη του κοιτάσματος προσδιορίζονται οι πιο βασικές ιδιότητες του: πίεση κοιτάσματος, διαπερατότητα πετρωμάτων, ιξώδες παραγόμενου ρευστού, παρουσία και χαρακτηριστικά νερού ως μηχανισμός προώθησης. Αυτές οι παράμετροι είναι θεμελιώδεις για τον προγραμματισμό των μεθόδων και του ρυθμού παραγωγής καθώς και του απαιτούμενου εξοπλισμού. Κατά κύριο λόγο είναι διαθέσιμες οι ακόλουθες μέθοδοι παραγωγής:

1. Παραγωγή με ροή

2. Ανύψωση με αέριο

3. Φυγοκεντρικές αντλίες

4. Εμβολοφόρες ή υδραυλικές αντλίες

Με αυτές τις μεθόδους παράγονται περίπου $3.25 \times 10^9 \text{ m}^3$ αργού πετρελαίου ανά έτος, από βάθη έως τα 6000 m.

Παραγωγή με Ροή:

Ως αποτέλεσμα της παραγωγής, εμφανίζεται μια πτώση στην πίεση που επεκτείνεται, σε σχήμα χοάνης, γύρω από την οπή. Κάτω από την επίδραση αυτής της βαθμίδας πίεσης, το ρευστό του ταμιευτήρα ρέει προς την οπή, εισέρχεται μέσω των οπών της διάτρησης, ανέρχεται μέσω της σωλήνωσης προς την επιφάνεια, και ρέει στην επιφάνεια μέσω αγωγών στον αγωγό συλλογής προς την κεντρική εγκατάσταση. Στην κεντρική εγκατάσταση συλλέγεται η παραγωγή από όλα τα πεδία, εξυδατώνεται, και μεταφέρεται προς τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας (διυλιστήρια). Η πίεση ροής στο βάθος του κοιτάσματος είναι επαρκής για να υπερνικήσει την υδροστατική πίεση της στήλης παραγωγής και τις απώλειες τριβής στην ακολουθία σωληνώσεων και τους αγωγούς επιφάνειας.

Ο ρυθμός παραγωγής με ροή υπολογίζεται ως συνάρτηση της πίεσης ροής στον πυθμένα, της διαμέτρου σωληνώσεων, και της πίεσης στην επιφάνεια σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της ενέργειας, λαμβάνοντας υπόψη τις εμπειρικές παραμέτρους που καθορίζουν τη διαφασική ροή. Η διάρκεια αυτής της οικονομικά συμφέρουσας φάσης παραγωγής μπορεί να επεκταθεί με καλή ρύθμιση του ρυθμού παραγωγής ως προς τη διατομή του αγωγού παραγωγής.

Παραγωγή λόγω Ανύψωσης με Αέριο:

Στη μέθοδο ανύψωσης με αέριο, το αέριο εγχέεται στη σωλήνωση σε ένα σημείο ή για να ελαχιστοποιήσει την αρχική πίεση - σε διάφορα διαδοχικά σημεία και κατ' αυτό τον τρόπο έχει ξεκινήσει η ροή φυσαλίδων ή η εμβολική ροή, όπως ισχύει για αυτήν την είδους την εκρηκτική παραγωγή. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται συνεχώς ή περιοδικά, ανάλογα με το ρυθμό ροής, το ρυθμό παραγωγής, και τη διαθεσιμότητα αερίου. Η φάση εκρηκτικής παραγωγής συχνά υποστηρίζεται με την ανύψωση λόγω αερίου ή μεταπηδά στην ανύψωση λόγω αερίου όταν μειώνεται η

κλίση πίεσης μεταξύ της γεώτρησης και του ταμιευτήρα. Η δυνατότητα εφαρμογής αυτής της ευέλικτης μεθόδου παραγωγής περιορίζεται όταν υπάρχει έλλειψη αερίου ή το κόστος συμπίεσης αερίου είναι πάρα πολύ υψηλό. Όπου είναι διαθέσιμη ικανοποιητική ποσότητα αερίου, το πεδίο εφαρμογής είναι ευρύ λόγω της ευελιξίας αυτής της μεθόδου όσον αφορά το ρυθμό παραγωγής και το βάθος. Σε γεωτρήσεις με μεγάλη κλίση και εάν παράγονται από κοινού και αποξεστικά υλικά, η μέθοδος ανύψωσης με αέριο συνήθως πλεονεκτεί όλων των άλλων μεθόδων παραγωγής (κανένα κινούμενο μέρος).

Οι βάνες ανύψωσης αερίου που ελέγχονται από την πίεση έγχυσης προσαρμόζονται στη σωλήνωση, στην οποία εγχέουν το αέριο ανύψωσης. Η πίεση στη βάνα ελέγχεται μέσω ενός μηχανισμού πίεσης (pressure bellows) που λειτουργεί με ή χωρίς υποστήριξη ελατηρίου (ανάλογα με τον τύπο). Ο μηχανισμός πίεσης ρυθμίζεται σε ορισμένη πίεση ανοίγματος και κλεισίματος στην επιφάνεια πριν την εγκατάσταση του.

Δεδομένου ότι στο ξεκίνημα της λειτουργίας ενός φρέατος σε λειτουργία με ανύψωση λόγω αερίου η αντίθλιψη ολόκληρης της στήλης υγρού απαιτεί μια υψηλή πίεση έγχυσης, διάφορες βάνες ανύψωσης είναι εγκατεστημένες καικατανεμημένες στη σωλήνωση, οι πιέσεις ανοίγματος των οποίων συντονίζονται μεταξύ τους.

Παραγωγή με Υπόγειες Αντλίες:

Οι υπόγειες αντλίες είναι η πιο διαδεδομένη μορφή για την παραγωγή πετρελαίου, το οποίο συνήθως περιέχει και σημαντική ποσότητα νερού. Οι τύποι αντλιών που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν ηλεκτρικές εμβυθισμένες φυγοκεντρικές αντλίες και μηχανικές ή υδραυλικές υπόγειες εμβολοφόρες αντλίες. Οι αντλίες εγκαθίστανται κάτω από τη στάθμη του υγρού επίπεδο στα φρέατα και, σε δύσκολες υπόγειες συνθήκες, πρέπει να υπερνικήσουν τα υδραυλικά πίεση αρκετών εκατοντάδων έως μερικών χιλιάδων μέτρων (Σχ. 2.8). Οι τύποι υπογείων αντλιών που χρησιμοποιούνται είναι:

Ηλεκτρικές Εμβυθισμένες Φυγοκεντρικές Αντλίες:

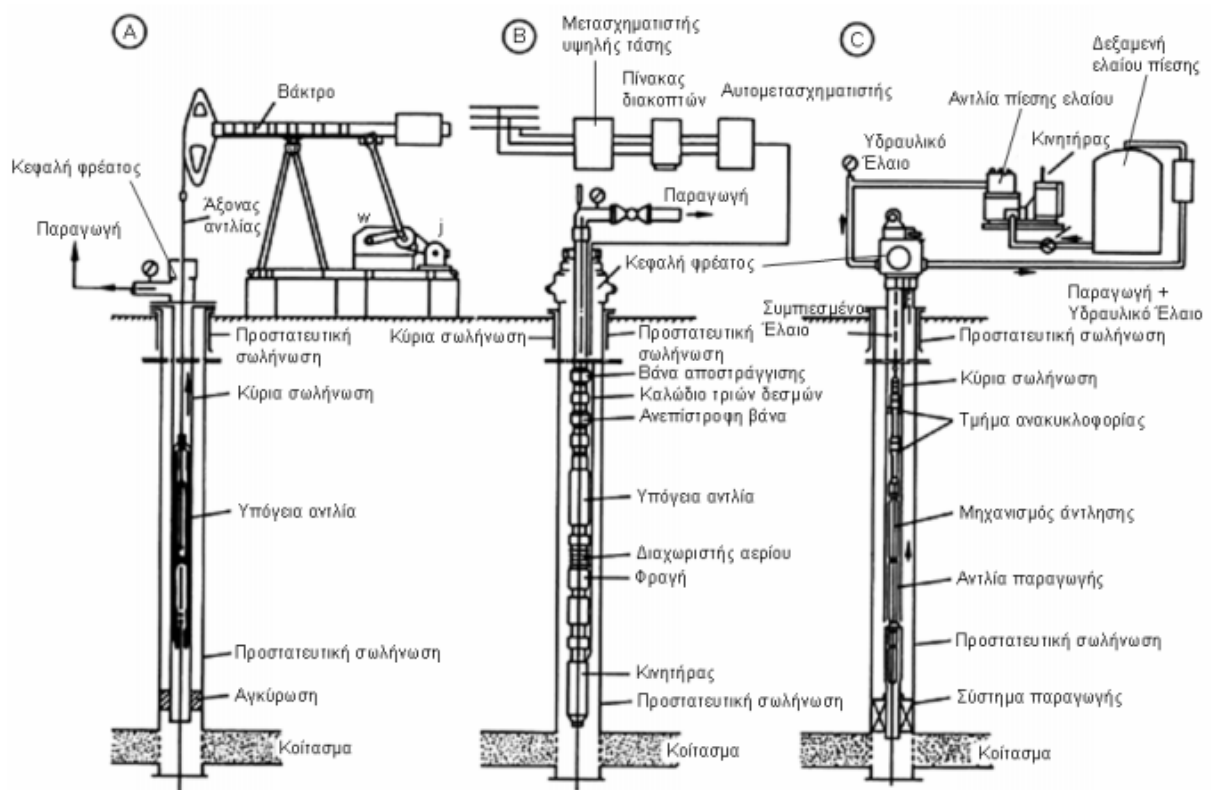
Είναι πολυβάθμιες φυγοκεντρικές αντλίες εμβυθισμένες στο προς παραγωγή υγρό, εγκατεστημένες στην οπή του φρέατος, συνδεδεμένες άμεσα με τον κινητήρα, και αναρτημένες στη σωλήνωση.

Μηχανικές Υπόγειες Αντλίες με Βάκτρο:

Η παραγωγή πετρελαίου ήταν για μια μεγάλη περίοδο συνώνυμη της χρήσης αντλιών με βάκτρο, που είναι εγκατεστημένες ως αντλίες σωλήνωσης ή είναι τοποθετημένες στο βάθος άντλησης, ως εισηγμένες αντλίες στο βάκτρο άντλησης. Αυτές οι αντλίες κινούνται από την επιφάνεια μέσω βάκτρων με κινητήρα, γρاناζοκιβώτιο, και σύστημα ανύψωσης, που περιλαμβάνει το τυπικό βάκτρο με την "κεφαλή γαϊδάρου" στο οποίο προσαρμόζεται το συρματόσχοινο της άντλησης.

Υδραυλικές Υπόγειες Εμβολοφόρες Αντλίες:

Όπως οι ηλεκτρικές εμβυθισμένες φυγοκεντρικές αντλίες, αυτές οι αντλίες λειτουργούν υπόγεια, με ρευστό πίεσης. Τα προβλήματα με το συρματόσχοινο αποφεύγονται με την υδραυλική μετάδοση της κινητικής ενέργειας με ένα βοηθητικό υγρό από την επιφάνεια σε μια αντλία που εγκαθίσταται στη γεώτρηση. Μια αντλητική εγκατάσταση υψηλής πίεσης παρέχει το "έλαιο πίεσης" που τροφοδοτείται στα ανεξάρτητα παραγωγικά φρέατα και την αντλία μέσω της σειράς σωληνώσεων.



Σχήμα 2.8: Διαφορετικοί τύποι αντλιών.

A) Υπόγεια με βάκτρο, με βηματική οδήγηση.

B) Ηλεκτρική εμβυθισμένη φυγοκεντρική αντλία.

C) Υδραυλική υπόγεια εμβολοφόρος αντλία με παροχή πίεσης ελαίου στο ανοιχτό σύστημα.

2.5 ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΡΓΟΥ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ

Οι ρυθμοί παραγωγής, οι ιδιότητες του αργού πετρελαίου, και οι συνθήκες των πεδίων καθορίζουν με ποιον τρόπο και μέχρι ποιο σημείο η παραγωγή των μεμονωμένων φρεατίων, ομάδων φρεατίων, μερών του συνολικού πεδίου, ή αρκετών γειτονικών πεδίων θα συνδυαστούν. Η επεξεργασία στο πεδίο περιλαμβάνει το διαχωρισμό του αερίου και την απομάκρυνση του νερού (Σχ. 2.9).

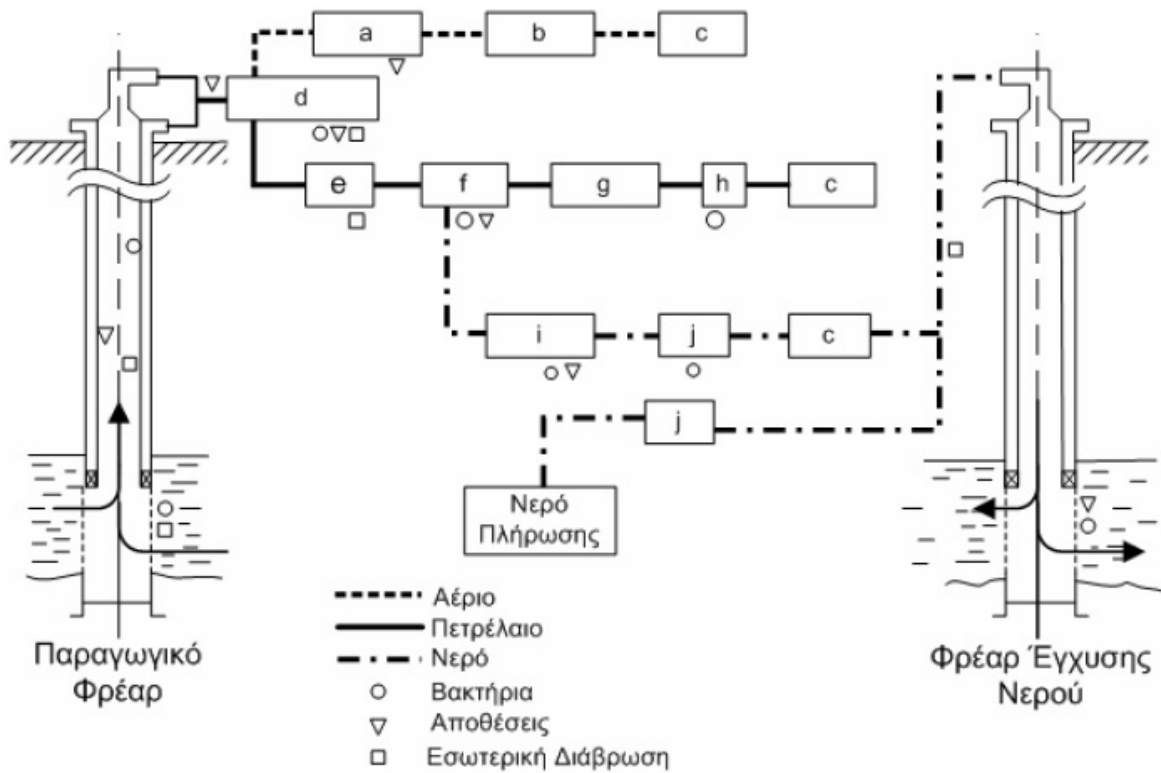
Διαχωρισμός Αερίου:

Η διαδικασία απαερίωσης ξεκινά μέσα στο κοίτασμα και εντείνεται με τη μείωση της πίεσης και της θερμοκρασίας μέσω της σωλήνωσης της γεώτρησης και διανομής κατά την παραγωγή. Συνεπώς, ένα διφασικό μίγμα εισάγεται στους διαχωριστές αερίου. Για να επιτευχθεί η μέγιστη απόδοση σε υγρό και σε σχετικά υψηλούς λόγους αερίου - πετρελαίου, πρέπει να χρησιμοποιηθεί διαχωρισμός πολλών βαθμίδων. Όμως το υψηλό κόστος εξοπλισμού και οι ειδικές απαιτήσεις, όπως π.χ. παράδοση αερίου στους καταναλωτές σε υψηλή πίεση, οδηγεί συνήθως στη χρήση δύο ή τριών βαθμίδων διαχωρισμού.

Αφυδάτωση και Αφαλάτωση:

Δεδομένου ότι το αργό πετρέλαιο μπορεί να παραχθεί ακόμη και με 95% περιεκτικότητα σε νερό, το νερό μαζί με την άμμο και άλλες ακαθαρσίες αφαιρείται το νωρίτερο δυνατόν για να μειώσει το κόστος μεταφοράς και προβλήματα διάβρωσης. Τα πρότυπα αποδοχής αργού πετρελαίου στα διυλιστήρια στη Γερμανία περιορίζουν τη συνολική μόλυνση (νερό και λάσπη) του αργού πετρελαίου γενικά στο 1% (περιεκτικότητα σε αλάτι κάτω από 0.02 %) Το νερό διαχωρίζεται μόνο εν μέρει ως "ελεύθερο νερό". Το νερό και το πετρέλαιο εμφανίζονται κυρίως ως ένα γαλάκτωμα, που πρέπει να σπάσει με θερμικές, μηχανικές, χημικές, ή ηλεκτρικές μεθόδους, ή από συνδυασμό τους. Ταυτόχρονα, οι γαλακτωματοποιητές που υπάρχουν στο αργό πετρέλαιο (συστατικά που συγκεντρώνονται στη διεπιφάνεια) πρέπει να

απενεργοποιηθούν. Τα ελεύθερα σταγονίδια νερού πρέπει να συσσωματωθούν και, με τη βοήθεια δυνάμεων βαρύτητας ή φυγοκέντρωσης να διαχωριστεί.



Σχήμα 2.9: Διάγραμμα ροής ενός πεδίου πετρελαίου.

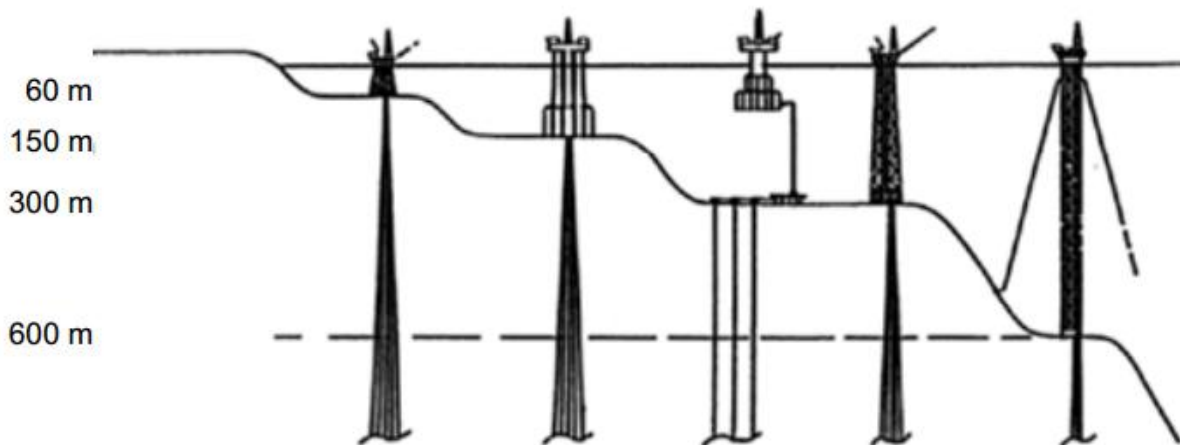
- a) Συμπιεστής
- b) Ξήρανση
- c) Αγωγός
- d) Διαχωριστής αερίου
- e) Θερμαντήρας
- f) Διαχωριστής
- g) Αφαλατωτής
- h) Δεξαμενή
- i) Δευτερογενής καταβύθιση
- j) Φίλτρο

2.6 ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΑΠΟ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ

Οι υγροί και αέριοι υδρογονάνθρακες στα υποθαλάσσια κοιτάσματα ανακτώνται και παράγονται με εξοπλισμό και συσκευές που αντιστοιχούν σε γενικές γραμμές σε εκείνες των χερσαίων εγκαταστάσεων. Διάκριση γίνεται μεταξύ των υποστηρικτικών κατασκευών που χρησιμοποιούνται για τις γεωτρητικές εγκαταστάσεις (εξέδρες) που χρησιμοποιούνται μόνο προσωρινά, και εκείνων που χρησιμοποιούνται για τις εγκαταστάσεις παραγωγής και επεξεργασίας που πρέπει να εγκατασταθούν στη θάλασσα κατά τη διάρκεια ολόκληρης της περιόδου εκμετάλλευσης του κοιτάσματος, συχνά περισσότερο από 20 έτη.

Λόγω των δύσκολων περιβαλλοντικών συνθηκών και του κινδύνου για το προσωπικό από την επεξεργασία ιδιαίτερα εύφλεκτων υδρογονανθράκων σε έναν πολύ μικρό χώρο (ειδικά για τα αέρια), οι απαιτήσεις ασφάλειας για τις μονάδες υποθαλάσσιας παραγωγής είναι ιδιαίτερα υψηλές.

Τα υποθαλάσσια φρέατα απαιτούν, για την απόσταση μεταξύ του πυθμένα της θάλασσας και της εξέδρας, μια ειδική σειρά περιβλήματος γνωστού ως ανυψωτή (riser), που πρέπει να αντισταθεί στις αντίξοες καιρικές συνθήκες, την κίνηση της θάλασσας, και τα θαλάσσια ρεύματα. Με την εξερεύνηση να προχωρά σε ακόμη μεγαλύτερα βάθη, οι εξέδρες κατασκευάζονται και χρησιμοποιούνται σε θαλάσσια βάθη μέχρι 600 m (Σχ. 2.10), ενώ η ανάπτυξη και ο προγραμματισμός προχωρούν ήδη σε θαλάσσια βάθη περίπου 1200 m. Η τεχνολογία ανυψωτών έχει επίσης εξελιχθεί πολύ. Οι παράμετροι ασφάλειας και συνεχούς ελέγχου υπό ακραίες καιρικές συνθήκες αποτελούν προτεραιότητα. Σε πιο μεγάλα βάθη, σε περιοχές με θαλάσσιες γραμμές, και για μικρότερα πεδία, χρησιμοποιείται μερικές φορές η υποθαλάσσια ολοκλήρωση στην οποία η κεφαλή του φρέατος και η πολλαπλή είναι τοποθετημένες στον πυθμένα της θάλασσας.



Σχήμα 2.10: Κατασκευές υποστήριξης για παραγωγή από υποθαλάσσια κοιτάσματα.

Οι θαλάσσιες γεωτρήσεις αποτελούν υπερράκτιες κατασκευές ειδικού τύπου. Γενικά, μια υπερράκτια κατασκευή δεν έχει σταθερή πρόσβαση σε ξηρά και μπορεί να χρειαστεί να παραμείνει στην ίδια θέση κάτω από δυσχερείς καιρικές συνθήκες. Οι υπερράκτιες κατασκευές μπορούν να εδράζονται στο βυθό της θάλασσας ή μπορεί να είναι πλωτές. Οι πλωτές κατασκευές μπορεί να είναι αγκυροβολημένες στον πυθμένα της θάλασσας, να διατηρούν δυναμικά τη θέση τους μέσω προωθητήρων ή μπορεί να αφηθούν να κινούνται ελεύθερα. Ενώ η πλειοψηφία των υπερράκτιων κατασκευών σχετίζεται με την έρευνα και παραγωγή πετρελαίου και φυσικού αερίου, υπάρχουν επίσης και άλλες μεγάλες κατασκευές, π.χ. για την αξιοποίηση της ενέργειας της θάλασσας, υπερράκτιες βάσεις ή/και υπερράκτια αεροδρόμια. Όσον αφορά στις θαλάσσιες γεωτρήσεις, είναι καταρχήν σημαντικό να αποσαφηνιστεί ο όρος «θαλάσσιες γεωτρήσεις μεγάλου βάθους ή υπερράκτιες γεωτρήσεις». Με τον όρο αυτό εννοούμε το ύψος της στήλης νερού στη θάλασσα ενώ με βάση την υφιστάμενη τεχνολογία δεν υφίσταται εκμετάλλευση υδρογονανθράκων σε βάθος μεγαλύτερο από τα 3100 m. Ο όρος δεν πρέπει να συγχέεται με το βάθος του στόχου που μπορεί να υπερβαίνει τα 10000 m κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας.

Ενώ δεν υπάρχει σαφής ορισμός που να κατηγοριοποιεί τις θαλάσσιες γεωτρήσεις ανάλογα με το βάθος της θάλασσας, στην πετρελαϊκή βιομηχανία έχει επικρατήσει να χρησιμοποιείται ο ακόλουθος (Πίν. 2.2):

Πίνακας 2.2: Κατηγοριοποίηση των θαλάσσιων γεωτρήσεων ανάλογα με το βάθος της θάλασσας.

α/α	Βάθος νερού, ft	Κατηγοριοποίηση
1	0-999	Μικρού βάθους (Shallow water)
2	1000-4999	Μεγάλου βάθους (Deepwater)
3	+5000	Πολύ μεγάλου βάθους (Ultradeep water)

3. ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΤΙΣ ΟΠΟΙΕΣ ΣΤΗΡΙΖΕΤΑΙ Η ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

Για τη μελέτη της ροής δύο φάσεων σε πορώδεις δομές, διεκπεραιώνονται πειράματα είτε σε μόνιμη κατάσταση, όπου συμβαίνει ταυτόχρονη ροή των δυο φάσεων, είτε σε μεταβατική κατάσταση, όπου η μια φάση εκτοπίζει την άλλη.

Κατά τη ροή των δύο μη αναμειξιμων ρευστών σε ένα πορώδες μέσο, το ένα ή και τα δύο ρευστά, μπορούν να βρίσκονται σε συνεχή μορφή ή σε ασυνεχή μορφή σταγόνων ή και στις δύο μορφές, ανάλογα με τις συνθήκες. Για να υποδηλωθεί μια σταγόνα της μη διαβρέχουσας φάσης που βρίσκεται στον πορώδη χώρο ενός διαπερατού μέσου χρησιμοποιείται ο όρος **γάγγλιο**. Τα **διαπερατά πορώδη** μέσα χαρακτηρίζονται από τη δυνατότητα να άγουν ρευστές φάσεις μέσα από τη μάζα τους με ιξώδη ροή, διαμέσου ενός δικτύου πόρων που συνδέονται μεταξύ τους και με τα σύνορα του μέσου. Αν το πορώδες μέσο διαθέτει ένα δίκτυο πόρων χωρίς σύνδεση με το περιβάλλον, αυτό αναφέρεται ως **κλειστός πορώδης όγκος**. Αν διαθέτει μόνο το δεύτερο ή δεν διαθέτει καθόλου πόρους, τότε είναι **αδιαπέρατο**.

Στην περίπτωση της εκτόπισης, το εκτοπιζόμενο ρευστό αναφέρεται ως **εισβολέας**, ενώ το εκτοπιζόμενο ως **υπερασπιστής**. Η διεργασία καλείται **εισρόφηση** όταν η εκτόπιση προχωρά με αύξηση του **κορεσμού** του διαβρέχοντος ρευστού. Η αντίστροφη διαδικασία, δηλαδή η σταδιακή αύξηση του κορεσμού του μη διαβρέχοντος ρευστού καλείται **αποστράγγιση**. Ο κορεσμός τέλος, είναι το ποσοστό του **πορώδους** ή **κενού όγκου** του πορώδους μέσου, που καταλαμβάνει μια φάση.

Στην περίπτωση της ταυτόχρονης ροής, ακολουθείται η ίδια σύμβαση για την ταξινόμηση των διεργασιών. Όταν στην τελική μόνιμη κατάσταση ο κορεσμός του διαβρέχοντος ρευστού είναι μεγαλύτερος από τον αρχικό κορεσμό του, η διεργασία λέγεται ότι αντιστοιχεί σε συνθήκες εισρόφησης. Στην αντίθετη περίπτωση, λέγεται ότι αντιστοιχεί σε συνθήκες αποστράγγισης.

Επειδή το μεγαλύτερο ενδιαφέρον εστιάζεται στις διεργασίες ανάκτησης του πετρελαίου, όπως οι υδατοπλημμύρες ή οι χημικές πλημμύρες, μια κατάλληλη συντομογραφία είναι η εξής: Ως διαβρέχον ρευστό χαρακτηρίζεται η **υδατική φάση** και ως μη διαβρέχον η **ελαϊκή**. Πάντως, τα αποτελέσματα εφαρμόζονται σε κάθε ζεύγος μη αναμειξιμων ρευστών.

Πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχει μεγάλη διαφορά μεταξύ μιας διαδικασίας εισρόφησης και μιας διαδικασίας αποστράγγισης. Οι φυσικές ιδιότητες που μετριούνται σε αντίστοιχες διαδικασίες διαφέρουν μεταξύ τους, παρουσιάζουν δηλαδή υστέρηση. Ο κύριος λόγος γι' αυτό, είναι ότι οι διαμορφώσεις που λαμβάνουν τα ρευστά και οι διεπιφάνειες που τα διαχωρίζουν είναι διαφορετικές, σε διαφορετικές συνθήκες διαβρεκτικότητας. Σε μια εκτόπιση, αυτό είναι εμφανές, καθώς στην εισρόφηση οι τριχοειδείς δυνάμεις υποβοηθούν τον εισβολέα (υδατική φάση), ο οποίος προχωρά από τους μικρότερους πόρους και σχηματίζει έναν λεπτό υμένα που καλύπτει τα τοιχώματα τους, ενώ στην αποστράγγιση οι τριχοειδείς δυνάμεις εμποδίζουν τον εισβολέα (ελαϊκή φάση), ο οποίος τώρα κινείται μέσω των μεγαλύτερων πόρων καταλαμβάνοντας το εσωτερικό τους.

3.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΟΡΩΔΩΝ ΜΕΣΩΝ

Η κίνηση των γαγγλίων σε πορώδη μέσα εξαρτάται κατά πολύ από τη γεωμετρία και τη τοπολογία του κενού χώρου του πορώδους μέσου. Έτσι πρέπει να μελετηθεί το πορώδες μέσο.

Τα πετρελαιοφόρα πετρώματα είναι συνήθως ιζηματογενή πετρώματα (π.χ. ψαμμίτες, ασβεστόλιθοι, δολομίτες). Τα ιζηματογενή πετρώματα έχουν πορώδη δομή η οποία διατηρεί τα χαρακτηριστικά της αρχικής κοκκώδους καθίζησης. Μετά την αρχική καθίζηση όμως συμβαίνουν αλλαγές στο ίζημα. Οι αλλαγές αυτές συνήθως συμβαίνουν σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες οπότε ονομάζονται **διαγενετικές** (diagenetic) και το σύνολο των αλλαγών αυτών **διαγένεση** (diagenesis). Μια χαρακτηριστική διαγενετική αλλαγή είναι η **συμπύεση** (compaction), η οποία συμβαίνει λόγω της πίεσης που ασκούν τα ανώτερα στρώματα του ιζήματος στα κατώτερα και η οποία οδηγεί σε μείωση του πορώδους. Αλλά η πλέον χαρακτηριστική και εύκολα διακρινόμενη συνέπεια των διαγενετικών αλλαγών είναι η **στερεοποίηση** (consolidation) του ιζήματος. Αυτή γίνεται είτε με τη **συγκόλληση**

(cementing) των κόκκων του ιζήματος, είτε με **καθίζηση** νέου υλικού στα διάκενα μεταξύ των κόκκων του ιζήματος, είτε με **ανακρυστάλλωση** των αρχικών χημικών ιζημάτων κατά τη διάρκεια της συμπίεσης. Η τελική πορώδης δομή των ιζηματογενών πετρωμάτων έχει και τα χαρακτηριστικά των διαγενετικών αλλαγών.

Όταν τα φαινόμενα της διαγένεσης δεν είναι πολύ έντονα, τα στερεοποιημένα πετρώματα έχουν συνήθως ένα δίκτυο πόρων στο οποίο σχετικά μεγάλοι πόροι συνδέονται μεταξύ τους με στενούς, επιμήκεις και στρωματοειδείς (lamellar). Οι πόροι με λόγο μήκους προς πλάτος κοντά στη μονάδα λέγονται **θάλαμοι** (chambers), ενώ οι σχετικά επιμήκεις και στενοί πόροι λέγονται **λαιμοί** (throats). Τα δύο είδη πόρων αναφέρονται επίσης σαν "**πόροι**" (pores) και "**στενώσεις**" (constrictions). Τα αποτελέσματα των πειραματικών μελετών της δομής των πετρελαιοφόρων πετρωμάτων δείχνουν ότι για τη μελέτη διφασικής ροής διαμέσου πορωδών μέσων τα περισσότερο σημαντικά χαρακτηριστικά της γεωμετρίας και της τοπολογίας της πορώδους δομής είναι:

- α) Η κατανομή μεγεθών των θαλάμων.
- β) Η κατανομή μεγεθών των λαιμών.
- γ) Ο λόγος μεγεθών των συνδεδεμένων λαιμών και θαλάμων.
- δ) Ο αριθμός σύνταξης των λαιμών σε θάλαμο.

Επίσης, στη περίπτωση διφασικής ροής σημαντικό χαρακτηριστικό είναι και η **διαβρεξιμότητα** του στερεού σε σχέση με τα δύο ρευστά.

Τα πορώδη μέσα είναι πολλά και ποικίλα. Η εργασία αυτή θα περιορισθεί μόνο σε μια κατηγορία πορωδών μέσων, τα πετρελαιοφόρα πετρώματα. Εξαιτίας της μεγάλης σημασίας του πετρελαίου, η μελέτη των πετρωμάτων αυτών είναι εκτενής. Τα κύρια χαρακτηριστικά των πορωδών πετρωμάτων τα οποία επηρεάζουν την ροή ρευστών διαμέσου των πετρωμάτων αυτών είναι τα ακόλουθα:

- πορώδες
- σχήμα πόρων και διαστάσεις των πόρων
- διασύνδεση των πόρων (αριθμός σύνταξης ή γένος ανά μονάδα όγκου)
- ανισοτροπία του πορώδους μέσου
- μικροτραχύτητα των τοιχωμάτων των πόρων
- ανομοιογένεια του πορώδους μέσου

Το πορώδες των πετρελαιοφόρων πετρωμάτων κυμαίνεται μεταξύ 0.02 και 0.28.

Τα πετρώματα έχουν ένα, 'σύνολο χαρακτηριστικών μηκών'. Ένα χαρακτηριστικό μήκος είναι η μέση διάμετρος των κόκκων (~50 μm). Το μέγεθος ενός θαλάμου μπορεί να χαρακτηριστεί από μια ισοδύναμη ογκομετρική διάμετρο, που ονομάζεται διάμετρος θαλάμου για συντομία. Οι διαμέτροι των θαλάμων κατανέμονται τυχαία σε μια ευρεία περιοχή τιμών από ~5 ως ~100 μm. Οι λαιμοί έχουν σχήμα στρωματοειδές, δηλαδή μικρό πάχος και μεγάλο πλάτος και μήκος. Συνήθως δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ένας λαιμός με ένα μόνο μήκος. Χρειάζεται να καθοριστεί το πάχος του, το μήκος του και πιθανόν το πλάτος του. Όμως μελέτες γύρω από τις κατανομές αυτών των μεγεθών και τις σχέσεις που πιθανόν υπάρχουν ανάμεσά τους δεν έχουν γίνει.

Η παραδοσιακή μέθοδος που χρησιμεύει για την μέτρηση κατανομών "μεγεθών πόρων" είναι η πορομετρία υδραργύρου. Τέτοιες όμως αναλύσεις δεν αντέχουν σε οποιαδήποτε κριτική επειδή το "μέγεθος πόρων" είναι συνήθως λάθος ορισμένο και τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι επηρεασμένα από τη τοπολογία της πορώδους δομής, την διασύνδεση των πόρων και την δυνατότητα προσπέλασης κάθε πόρου. Είναι δυνατό δηλαδή μια περιοχή με μεγάλους λαιμούς να περιβάλλεται από μια περιοχή από μικρούς λαιμούς, οπότε ο υδράργυρος πρέπει πρώτα να περάσει μέσα τους μικρούς λαιμούς (πράγμα που συμβαίνει για υψηλές τιμές πίεσης διείσδυσης) για να φθάσει στο χώρο που καταλαμβάνεται από τους μεγάλους θαλάμους. Αν ο υδράργυρος μπορούσε να φθάσει εύκολα στους μεγάλους θαλάμους θα καταλάμβανε το χώρο αυτό όταν η πίεση διείσδυσης ήταν χαμηλότερη. Αγνοώντας όλα αυτά τα φαινόμενα που επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα, τότε η πορομετρία υδραργύρου δίνει πληροφορίες για το πάχος των λαιμών, υποθέτοντας ότι το πάχος είναι πολύ μικρότερο του πλάτους. Στη πραγματικότητα το αποτέλεσμα της πορομετρίας δεν είναι η κατανομή διαμέτρων - λαιμών, αλλά η κατανομή ισοδύναμων τριχοειδών διαμέτρων, δηλαδή η κατανομή διαμέτρων υποθετικών τριχοειδών σωλήνων που θα έδιναν το ίδιο αποτέλεσμα με εκείνο της πορομετρίας κάτω από τις ίδιες συνθήκες. Εάν υποθεθεί ότι ένας λαιμός μπορεί να θεωρηθεί σαν ο χώρος ανάμεσα σε παράλληλες πλάκες, τότε το πάχος του λαιμού ισούται με το μισό της ισοδύναμης τριχοειδούς διαμέτρου. Στη πραγματικότητα βέβαια τα πράγματα είναι πολύ περισσότερο πολύπλοκα εξαιτίας της μικροτραχύτητας των τοιχωμάτων των λαιμών.

Όλα αυτά τα μοντέλα που αποτελούνται από τριχοειδείς κυλινδρικούς σωλήνες, δεν μπορούν να περιγράψουν ικανοποιητικά τη ροή μέσα σε πορώδη

σώματα, όπως τα πορώδη πετρώματα ή κλίνες κόκκων, γιατί δεν μπορούν να λάβουν υπόψη το συγκλίνοντα και αποκλίνοντα χαρακτήρα της ροής καθώς το ρευστό ρέει διαμέσου θαλάμων και λαιμών. Συνεπώς χρειάζονται μοντέλα που να μπορούν να λάβουν υπόψη το χαρακτηριστικό αυτό των πορωδών μέσων που αποτελούνται από κόκκους. Μοντέλα αυτού του είδους είναι τα δίκτυα σφαιρών και τριχοειδών και τα μοντέλα των τριχοειδών σωλήνων με στενώσεις. Τα μοντέλα δικτύων σωλήνων με στενώσεις που έχουν αναπτυχθεί εφαρμόζονται μόνο για μη στερεοποιημένα πετρώματα. Κάποια από τα προαναφερθέντα μοντέλα είναι διδιάστατα και επίπεδα. Μερικά όμως είναι διδιάστατα αλλά όχι επίπεδα και τα τελευταία χρόνια έχουν αρχίσει να εμφανίζονται και τρισδιάστατα δίκτυα. Υπάρχει μια σημαντική διαφορά ανάμεσα στη ροή σε επίπεδα δίκτυα και στη ροή σε τρισδιάστατα δίκτυα. Στα τρισδιάστατα δίκτυα το ρευστό μπορεί εύκολα να παρακάμψει περιοχές χαμηλής διαπερατότητας, ενώ αυτό είναι περισσότερο δύσκολο στα επίπεδα δίκτυα πόρων. Στη περίπτωση διφασικής ροής, η διαφορά είναι ακόμη σημαντικότερη, καθόσον κατά τη διάρκεια μιας αρχικής εκτόπισης (όπου όλο το δίκτυο είναι γεμάτο από τη μη διαβρέχουσα φάση) σε ένα επίπεδο δίκτυο, το διαβρέχον ρευστό δεν είναι δυνατό να διασχίσει το πορώδες μέσο χωρίς να διαχωρίσει το μη διαβρέχον ρευστό, ενώ στα μη επίπεδα αυτό είναι δυνατόν.

3.3 ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΟΡΩΔΩΝ ΜΕΣΩΝ ΓΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΦΑΣΙΚΗΣ ΡΟΗΣ

Τα μοντέλα πορωδών μέσων που συνήθως χρησιμοποιούνται για τη πειραματική μελέτη διφασικής ροής είναι **κλίνες κόκκων** (granular packings) όπως από γυάλινες σφαίρες ή από κόκκους άμμου και χαραγμένες πλάκες (etched plates) από γυαλί ή plexiglass. Τα πρώτα μπορεί να είναι επίπεδα ή τρισδιάστατα, ενώ τα δεύτερα είναι συνήθως επίπεδα. Οι κλίνες κόκκων είναι αρκετά καλά μοντέλα για μη στερεοποιημένα πετρώματα, αλλά υστερούν σαν μοντέλα στερεοποιημένων πετρωμάτων. Όταν εργάζεται κανείς με χαραγμένες πλάκες έχει το σημαντικό πλεονέκτημα να μπορεί να χαράξει στις πλάκες τη δομή που θέλει.

Τα κοκκώδη μέσα όπου οι κόκκοι έχουν στοιβαχθεί τυχαία έχουν πορώδες της τάξης του 40%. Οι πόροι τέτοιων μέσων μπορούν να διακριθούν σε θαλάμους και λαιμούς. Οι διάμετροι των θαλάμων είναι περίπου 0.80-0.86 φορές η μέση

ογκομετρική διάμετρος των κόκκων, ενώ οι λαιμοί είναι σχετικά μικροί σε μήκος για να μπορούν να χαρακτηρισθούν από ένα μόνο μήκος, τη διάμετρο. Η κατανομή διαμέτρων λαιμών μπορεί να ληφθεί από αρχικές καμπύλες αποστράγγισης και η μέση τιμή των διαμέτρων-λαιμών είναι 0.37 φορές η μέση ογκομετρική διάμετρος των κόκκων. Έτσι η μέση τιμή του λόγου διαμέτρου-λαιμού προς διάμετρο θαλάμου είναι περίπου 0.45 που είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντίστοιχη τιμή του λόγου αυτού για στερεοποιημένα πετρώματα. Αυτή η υψηλή τιμή του λόγου διαμέτρου λαιμού προς διάμετρο θαλάμου καθώς η διαφορά στα μήκη των λαιμών είναι μεγίστης σημασίας όταν γίνεται σύγκριση διεργασιών εκτόπισης σε μη στερεοποιημένες και σε στερεοποιημένες δομές, καθώς επιδρούν σημαντικά στους μηχανισμούς διάσπασης της πετρελαϊκής φάσης.

Οι κλίνες κόκκων διαφέρουν από τα πετρελαιοφόρα πετρώματα και ως προς την ανισοτροπία. Πειραματικές μελέτες έδειξαν ότι σε κλίνες ομοιόμορφων σφαιριδίων η διαπερατότητα κατά την οριζόντια κατεύθυνση διαφέρει ελάχιστα από τη διαπερατότητα κατά τη κατακόρυφη διεύθυνση, που σημαίνει ότι οι κλίνες ομοιόμορφων κόκκων μπορούν να θεωρηθούν ισότροπα μέσα. Είναι γνωστό όμως ότι τα πετρελαιοφόρα πετρώματα σε καμιά περίπτωση δεν μπορούν να θεωρηθούν ισότροπα.

Κλίνες κόκκων έχουν χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη διφασικής ροής. Οι περισσότερες από αυτές τις μελέτες έχουν γίνει σε μονοστιβαδικές κλίνες κόκκων που είναι εύκολο να κατασκευασθούν και το κυριότερο πλεονέκτημά τους είναι η εύκολη οπτική παρατήρηση των φαινομένων ροής που συμβαίνουν μέσα σ' αυτές.

Οι χαραγμένες πλάκες είναι επίσης επίπεδα πορώδη μέσα που έχουν το ίδιο πλεονέκτημα, της εύκολης δηλαδή οπτικής παρατήρησης. Το συγκριτικό πλεονέκτημα να μπορεί κανείς να χαράζει το επιθυμητό δίκτυο πόρων στις πλάκες, κάνει τη μέθοδο αυτή ιδιαίτερα ελκυστική. Με το τρόπο αυτό είναι δυνατή η μελέτη της διφασικής ροής κάτω από διάφορες συνθήκες. Έχουν γίνει πολλές μελέτες εκτόπισης σε δίκτυα τέτοιας κατασκευής.

3.3.1 Απόλυτη διαπερατότητα και νόμος του Darcy

Η αγωγιμότητα που παρουσιάζει ένα διαπερατό πορώδες υλικό κατά τη ροή ενός Νευτώνειου ρευστού μέσα από αυτό, καλείται απόλυτη διαπερατότητα, εξαρτάται μόνο από την πορώδη δομή του και λαμβάνει διαστάσεις επιφάνειας ([=]

Da [=] 0.987 μm^2). Η απόλυτη διαπερατότητα ορίζεται μέσω του νόμου του Darcy ο οποίος ισχύει για το είδος των ροών σε πορώδη μέσα όπου οι αδρανειακές δυνάμεις είναι αμελητέες (έρπουσα ροή ή Stokes).

Η εξίσωση Navier-Stokes για ισόθερμη ροή ασυμπίεστου Νευτώνειου ρευστού γράφεται σε αδιάστατη μορφή:

$$\frac{Du^*}{Dt^*} = \frac{\partial u^*}{\partial t^*} + (u^* \cdot \nabla^*)u^* = -\nabla^* p^* + \frac{1}{\text{Re}} \nabla^{*2} u^* + \frac{1}{Fr} g^* \quad (3.1)$$

όπου:

$\text{Re} = \frac{rud}{m}$ είναι ο αριθμός Reynolds, $Fr = \frac{u^2}{d} g$ ο αριθμός Froude, r η πυκνότητα του ρευστού, p η πίεση, u η ταχύτητα, d το χαρακτηριστικό μήκος της ροής, m το ιξώδες του ρευστού και g η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Στην περίπτωση που η ροή ενός ή περισσότερων ρευστών είναι αργή, ο αριθμός Reynolds είναι πολύ μικρός ($\text{Re} \ll 1$), οπότε για μόνιμη ροή οδηγεί στην εξίσωση Stokes:

$$\frac{1}{\text{Re}} \nabla^{*2} u^* = \nabla^* p^* - \frac{1}{Fr} g^* = \nabla^* P^* \quad (3.2)$$

όπου: P είναι η ολική πίεση και ορίζεται από τη σχέση: $P = p + rgz$ ενώ z είναι το ύψος από το επίπεδο αναφοράς.

Ο νόμος του Darcy, που προκύπτει με ομογενοποίηση της εξίσωσης Navier - Stokes, όταν αυτή εφαρμοσθεί για τους πόρους ενός συστήματος και με τις κατάλληλες συνοριακές συνθήκες ολοκληρωθεί σε ένα στοιχειώδη όγκο, έχει τη μορφή:

$$\langle u_b \rangle = -\frac{K}{m} \left(\nabla \langle P_b \rangle^b - r_b g \right) \quad (3.3)$$

όπου, ο κάτω δείκτης b υποδεικνύει ποσότητες που αναφέρονται στη φάση που καταλαμβάνει τους πόρους (φάση β) και ο άνω δείκτης b υποδηλώνει ότι η μέση τιμή της ιδιότητας αναφέρεται μόνο στη φάση β, ενώ η στερεά φάση εξαιρείται.

Ο τανυστής της διαπερατότητας K , υπολογίζεται από τη σχέση:

$$K = e_b T^{-1} \quad (3.4)$$

με τον τανυστή T να δίνεται από τη σχέση:

$$T = -\frac{1}{V_b} \int_{A_{bs}} n_{bs} \cdot (\nabla B - Ib) dA \quad (3.5)$$

όπου: e_b είναι το πορώδες, V_b είναι ο πορώδης όγκος, n_{bs} είναι το κάθετο μοναδιαίο διάνυσμα στη διεπιφάνεια μεταξύ των φάσεων β και σ , δηλαδή της πορώδους και στερεής δομής. Με A_{bs} συμβολίζεται η αντίστοιχη επιφάνεια και B, b είναι αντίστοιχα ένας τανυστής και ένα διάνυσμα, που προκύπτουν από τις αποκλίσεις των τοπικών τιμών της ταχύτητας και της πίεσης από τις εσωτερικές μέσες τιμές τους και εξαρτώνται μόνο από την πορώδη δομή.

Η μακροσκοπική περιγραφή συμπληρώνεται από τον αντίστοιχο μακροσκοπικό νόμο της συνέχειας για ασυμπίεστο ρευστό:

$$\nabla \cdot \langle u_b \rangle = 0 \quad (3.6)$$

Σε ισότροπο πορώδες μέσο, η διαπερατότητα K είναι αναλλοίωτη σε κάθε κατεύθυνση και ο νόμος Darcy για μονοδιάστατη ροή στην κατεύθυνση n γίνεται:

$$u_n = \frac{K}{m} \left(-\frac{\partial P}{\partial n} \right) \quad (3.7)$$

όπου u_n είναι η φαινομενική ταχύτητα.

3.3.2 Θεωρία Διείσδυσης

Η θεωρία αυτή χρησιμοποιεί την έννοια του δικτύου δεσμών (bonds) και κόμβων (sites) και το κύριο πρόβλημα που απαντά είναι το ποσοστό p_c των δεσμών ή των κόμβων, που πρέπει να είναι ανοικτοί ή κατειλημμένοι, δηλαδή αγωγιμοί στην περίπτωση ροής ενός ρευστού, ώστε να σχηματίζεται ένα δίκτυο συνδεδεμένων

αγώγιμων δεσμών ή κόμβων που να εκτείνεται από τη μια ως την άλλη άκρη του δικτύου. Το κρίσιμο αυτό ποσοστό ή πιθανότητα p_c λέγεται **κατώφλι διείσδυσης**, κάτω από το οποίο το δίκτυο δεν είναι αγώγιμο, δηλ. η διαπερατότητα του είναι μηδενική. Αν το πρόβλημα απασχολείται με το ποσοστό των δεσμών, λέγεται αντίστοιχα πρόβλημα διείσδυσης δεσμών, αν ερευνείται το ποσοστό των κόμβων, λέγεται πρόβλημα διείσδυσης κόμβων, ενώ υπάρχουν και μεικτά προβλήματα διείσδυσης δεσμών και κόμβων.

Στον Πίν. 3.1, παρουσιάζονται τιμές για το κατώφλι διείσδυσης ορισμένων διδιάστατων δικτύων, ενώ οι αντίστοιχες τιμές για τριδιάστατα δίκτυα παρουσιάζονται στον Πίν. 3.2.

Πίνακας 3.1: Τιμές για το κατώφλι διείσδυσης δεσμών p_{cb} , το κατώφλι διείσδυσης κόμβων p_{cs} και για τον παράγοντα $B_c = Zp_{cb}$ για τρία επίπεδα δίκτυα.

α/α	Δίκτυο	Z	p_{cb}	B_c	p_{cs}
1	Εξαγωνικό	3	$1 - 2 \sin(p / 18) \cong 0.6527$	1.96	0.6962
2	Τετραγωνικό	4	1/2	2	0.5927
3	Τριγωνικό	6	$2 \sin(p / 18) \cong 0.3473$	2.08	1/2

Πίνακας 3.2: Τιμές για το κατώφλι διείσδυσης δεσμών p_{cb} , το κατώφλι διείσδυσης κόμβων p_{cs} και για τον παράγοντα $B_c = Zp_{cb}$ για τέσσερα τριδιάστατα δίκτυα.

α/α	Δίκτυο	Z	p_{cb}	B_c	p_{cs}
1	Διαμαντοειδές	4	0.3886	1.55	0.4299
2	Απλό κυβικό	6	0.2488	1.49	0.3116
3	Χωροκεντρωμένο κυβικό	8	0.1795	1.44	0.2464
4	Εδροκεντρωμένο κυβικό	12	0.119	1.43	0.199

Το πιο ενδιαφέρον αποτέλεσμα της θεωρίας διείσδυσης είναι η εξαγωγή νόμων κλιμάκωσης, για τη διαπερατότητα, καθώς και για άλλους συντελεστές μεταφοράς. Κοντά στο κατώφλι διείσδυσης, ο νόμος για τη διαπερατότητα έχει τη μορφή:

$$k(p) \propto (p - p_c)^e \quad (3.8)$$

Ο εκθέτης e είναι περίπου 1.3 για διδιάστατα δίκτυα και 2.0 για τριδιάστατα. Οι τιμές αυτές μπορεί να είναι αρκετά διαφορετικές για διείσδυση σε συνεχή μέσα και φυσικά ισχύουν για μεγάλα δίκτυα. Σε μικρότερα, πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν και η επίδραση του μεγέθους.

3.3.3 Προσέγγιση αποτελεσματικού μέσου

Η προσέγγιση αποτελεσματικού μέσου (Effective medium approximation, EMA) είναι μια μέθοδος η οποία αντικαθιστά ένα πορώδες μέσο με ένα τυχαίο δίκτυο αγωγών που κατανέμονται στους δεσμούς του. Ένα δίκτυο στενής κατανομής αγωγιμοτήτων αντικαθίσταται με ένα ισοδύναμο δίκτυο του οποίου όλοι οι αγωγοί έχουν την ίδια αποτελεσματική (effective) αγωγιμότητα. Αυτή η αγωγιμότητα, g_e , προκύπτει από την επίλυση της ολοκληρωτικής εξίσωσης

$$\int h(g_p) \frac{g_p - g_e}{g_p + (g^{-1} - 1)g_e} dg_p = 0 \quad (3.9)$$

όπου, $g = \frac{2}{z}$ και $h(g_p)$ είναι η κατανομή των αγωγιμοτήτων των δεσμών του δικτύου, g_p . Η διαπερατότητα του δικτύου δίνεται τώρα από τη σχέση:

$$K = g_e \left\langle \frac{l}{S} \sum l \cdot n \right\rangle \quad (3.10)$$

όπου: S είναι το εμβαδόν της διατομής, l είναι το μήκος των δεσμών του δικτύου και n είναι το μοναδιαίο διάνυσμα στην κατεύθυνση της βαθμίδας της πίεσης. Η θεωρία δίνει ακριβέστερα αποτελέσματα για επίπεδα δίκτυα και για συστήματα που δεν είναι κοντά στο κατώφλι διείσδυσης, p_c . Για το κατώφλι διείσδυσης δεσμού (bond percolation threshold) προβλέπει την τιμή, $p_{cb} = 2/Z$. Ενώ προσομοιώσεις MonteCarlo έχουν δείξει ότι: $p_{cb} = \frac{d}{(d-1)Z}$, όπου d η διαστατικότητα του συστήματος. Επίσης η EMA προβλέπει τη σχέση μεταξύ της διαπερατότητας και της αγωγιμότητας του δικτύου:

$$s = s_f j^m \quad (3.11)$$

όπου, s είναι η αγωγιμότητα και s_f είναι η αγωγιμότητα του ρευστού. Η εξίσωση αυτή είναι γνωστή ως νόμος του Archie. Παρόμοια σχέση έχει προταθεί στο

παρελθόν για τη διαπερατότητα του μέσου, K , αλλά γρήγορα έγινε κατανοητό ότι μια γενική σχέση του είδους αυτού δεν είναι δυνατό να υπάρξει επειδή δύο πορώδη μέσα είναι δυνατόν να έχουν διαφορετικό πορώδες, j , αλλά την ίδια διαπερατότητα, K .

3.3.4 Ροή δύο φάσεων σε πορώδη μέσα – παράμετροι ροής

Η μελέτη της ροής δύο μη αναμίξιμων ρευστών σε πορώδη μέσα είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη. Η απόδοση μιας διεργασίας εκτόπισης περιγράφεται μέσω των σχετικών διαπερατοτήτων των ρευστών. Η παράμετρος που επηρεάζει άμεσα τις σχετικές διαπερατότητες είναι ο κορεσμός των δύο φάσεων. Ωστόσο, ο τελικός κορεσμός των ρευστών μετά από μια διεργασία εκτόπισης σ' ένα πορώδες μέσο, επηρεάζεται από τη μορφολογία του πορώδους χώρου, τη διαβροχή των επιφανειών των πόρων από τα ρευστά, το λόγο των ιξωδών και αδιάστατους αριθμούς όπως ο τριχοειδής αριθμός και ο αριθμός Bond.

3.3.4.1 Σχετικές Διαπερατότητες

Από την εξίσωση του Stokes για κάθε φάση και την εξίσωση συνέχειας εξάγονται οι παρακάτω εξισώσεις που αναφέρονται στις φάσεις β και γ :

$$\langle u_b \rangle = -\frac{K_b}{m_b} \cdot (\nabla \langle P_b \rangle^b - p_b g) + K_{bg} \cdot \langle u_g \rangle \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial S_b}{\partial t} + \nabla \cdot \langle u_b \rangle = 0 \quad (3.13)$$

$$\langle u_g \rangle = -\frac{K_g}{m_g} \cdot (\nabla \langle P_g \rangle^g - p_g g) + K_{gb} \cdot \langle u_b \rangle \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial S_g}{\partial t} + \nabla \cdot \langle u_g \rangle = 0 \quad (3.15)$$

$$S_b + S_g = 1 \quad (3.16)$$

Όπου $\langle u_b \rangle$ και $\langle u_g \rangle$ μέσες ταχύτητες, $\langle P_b \rangle^b$ και $\langle P_g \rangle^g$ οι μέσες πιέσεις και S_b, S_g , οι κορεσμοί των δύο φάσεων.

Στη βιομηχανία του πετρελαίου οι συντελεστές ιξώδους σύζευξης των δύο φάσεων αμελούνται. Έτσι οι απομένουσες αποτελεσματικές διαπερατότητες των φάσεων, K_b και K_g , των μακροσκοπικών εξισώσεων, διαιρεμένοι με την απόλυτη διαπερατότητα K δίνουν τις **σχετικές διαπερατότητες** των δυο φάσεων:

$$K_{rb} = \frac{K_b}{K} \text{ και } K_{rg} = \frac{K_g}{K} \quad (3.17)$$

Η δικαιολόγηση της έννοιας των σχετικών διαπερατοτήτων απαιτεί η οπισθέλκουσα της ροής στην περιοχή των διεπιφανειών να είναι αμελητέα, και η διεπιφάνεια να μπορεί να θεωρηθεί άκαμπτη, ως μια συνέχεια της διεπιφάνειας ρευστού και στερεού. Υπό τις παραπάνω συνθήκες οι όροι σύζευξης είναι αμελητέοι και η περιγραφή της ροής των δύο φάσεων απαιτεί μόνο τη μέτρηση των συμβατικών σχετικών διαπερατοτήτων. Παρόλα αυτά έχει βρεθεί ότι υπό ορισμένες συνθήκες οι όροι σύζευξης είναι σημαντικοί και η παράλειψή τους μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένα συμπεράσματα.

3.3.4.2 Τριχοειδής Αριθμός

Η ροή σε πορώδη μέσα διέπεται από τους αδιάστατους αριθμούς Weber, Bond, Reynolds, Froude και τον τριχοειδή αριθμό (Capillary number):

Ο αριθμός Weber δίδεται από το λόγο των αδρανειακών δυνάμεων προς τις τριχοειδείς:

$$We = \frac{ru^2d}{g_{ow}} \quad (3.18)$$

όπου, r η πυκνότητα του ρευστού που εισβάλλει στο πορώδες μέσο, u η φαινομενική ταχύτητα του ρευστού, d η διάμετρος των κόκκων του πορώδους και g_{ow} η διεπιφανειακή τάση του ζεύγους ρευστών.

Ο αριθμός Bond εκφράζει το λόγο των δυνάμεων άνωσης προς τις τριχοειδείς δυνάμεις σε κλίμακα μήκους ίση με τη διάμετρο των κόκκων του πορώδους και μπορεί να οριστεί ως εξής:

$$B = \frac{\Delta r g 2R \langle r_t \rangle}{g_{ow} \cos q_e} \quad (3.19)$$

όπου, Δr η διαφορά πυκνοτήτων των χρησιμοποιούμενων ρευστών, g η επιτάχυνση της βαρύτητας, R η ακτίνα των σφαιριδίων, $\langle r_t \rangle$ μια μέση ακτίνα λαιμών, g_{ow} η διεπιφανειακή τάση του χρησιμοποιούμενου ζεύγους ρευστών και q_e η γωνία επαφής.

Ο «ολικός» τριχοειδής αριθμός εκφράζει το λόγο των ιξωδών δυνάμεων προς τις τριχοειδείς και ορίζεται ως εξής:

$$Ca = \frac{m_l u}{g_{ow}} \quad (3.20)$$

όπου m_l το ιξώδες του εισβολέα, u η φαινομενική ταχύτητα $\left(= \frac{Q}{A} \right)$, g_{ow} η διεπιφανειακή τάση του χρησιμοποιούμενου συστήματος ρευστών, Q η παροχή του εισβολέα που διοχετεύεται μέσω της επιφάνειας της διατομής του πορώδους μέσου, A , η οποία περιλαμβάνει το στερεό και τον πορώδη χώρο. Αυτός ο ορισμός του τριχοειδούς αριθμού είναι αρκετά γενικευμένος.

Προκειμένου να εκτιμηθεί ο λόγος των ιξωδών προς τις τριχοειδείς δυνάμεις σε διάφορες κλίμακες ορίζονται οι εξής τριχοειδείς αριθμοί

1. Μικροσκοπικός τριχοειδής αριθμός, στην κλίμακα του πόρου:

$$Ca_p = Ca \left(\frac{m_D}{m_l} \right) \left(\frac{\langle r_H \rangle l_p}{k \cos q_e} \right) \quad (3.21)$$

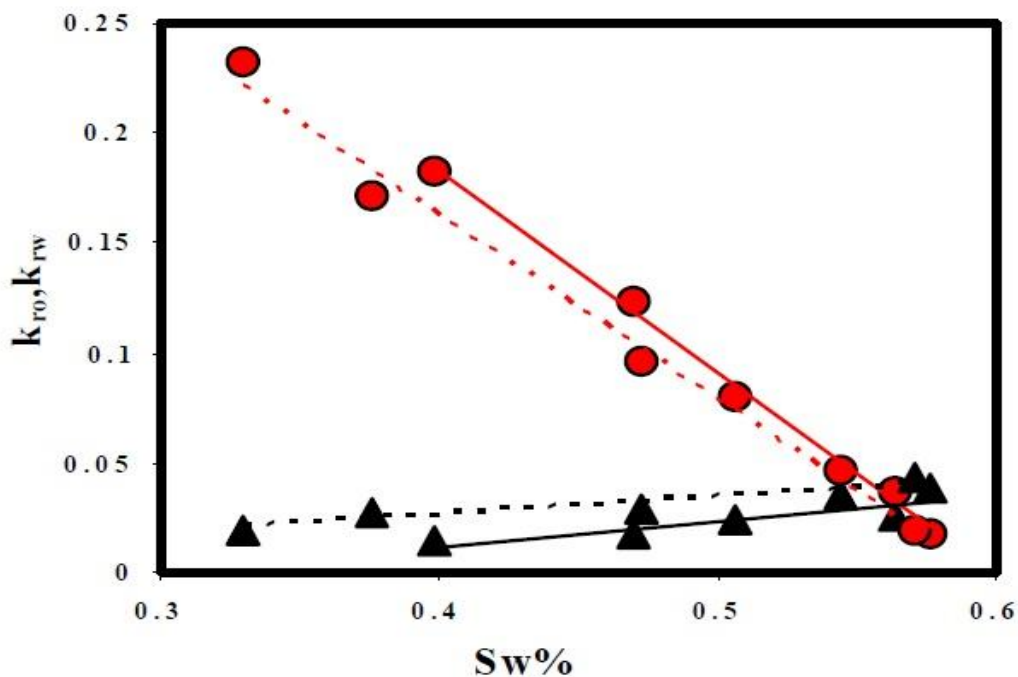
2. Μακροσκοπικός τριχοειδής αριθμός, στην κλίμακα του δικτύου των πόρων:

$$Ca_N = Ca \left(\frac{m_D}{m_l} \right) \left(\frac{\langle r_H \rangle L_N}{k \cos q_e} \right) \quad (3.22)$$

Όπου, $\langle r_H \rangle$ μια μέση ισοδύναμη υδραυλική ακτίνα, l_p το μήκος του πόρου, L_N το μήκος του δικτύου πόρων και $\frac{m_D}{m_l}$ ο λόγος του ιξώδους του υπερασπιστή προς αυτό του εισβολέα. Αυτός ο λόγος των ιξωδών συμπεριλαμβάνεται ώστε στην περίπτωση που είναι $\frac{m_D}{m_l} > 1$ να υπερεκτιμηθεί η συνεισφορά των ιξωδών δυνάμεων.

3.3.4.3 Ιστορία της ροής

Οι σχετικές διαπερατότητες εξαρτώνται από την ιστορία της ροής, δηλαδή τη διαδρομή που ακολουθήθηκε για να μεταβληθεί ο κορεσμός των δύο φάσεων (συνθήκες εισρόφησης ή αποστράγγισης) γιατί υπάρχουν πολλές διαφορετικές διαμορφώσεις των ρευστών, οι οποίες ικανοποιούν την εξίσωση του Stokes. Η ιστορία της ροής επηρεάζει κατά τέτοιο τρόπο που προκαλεί μια υστέρηση στις σχετικές διαπερατότητες (Σχ. 3.1).



Σχήμα 3.1: Σχετικές διαπερατότητες σε συνάρτηση με τον κορεσμό του νερού. Φαίνεται καθαρά η υστέρηση που παρουσιάζουν οι σχετικές διαπερατότητες (οι συνεχείς γραμμές αντιστοιχούν σε εισρόφηση και οι διακεκομμένες σε αποστράγγιση, με κόκκινο αναπαριστώνται οι σχετικές διαπερατότητες ελαϊκής φάσης και με μαύρο αυτές της υδατικής φάσης).

3.3.4.4 Λόγος Ιξωδών

Ο λόγος των ιξωδών, $\frac{m_l}{m_D}$, συνήθως ορίζεται ως το κλάσμα του ιξώδους του εισβολέα, m_l , προς το ιξώδες του υπερασπιστή, m_D . Έχει παρατηρηθεί πως για λόγο ιξωδών πολύ μεγαλύτερο της μονάδας και σχετικά μεγάλους τριχοειδείς αριθμούς η εκτόπιση σταθεροποιείται και ακολουθεί μετωπικό πρότυπο ανάπτυξης. Αντίθετα, για λόγους ιξωδών πολύ μικρότερους της μονάδας και σχετικά μεγάλους τριχοειδείς αριθμούς η εκτόπιση αποσταθεροποιείται και χαρακτηρίζεται από το σχηματισμό ιξωδών δακτύλων (viscous fingering). Σε πολύ μικρούς τριχοειδείς αριθμούς, η εκτόπιση ελέγχεται από την ανάπτυξη τριχοειδών δακτύλων, ανεξαρτήτως του λόγου των ιξωδών.

3.3.5 Διαβρεκτικότητα

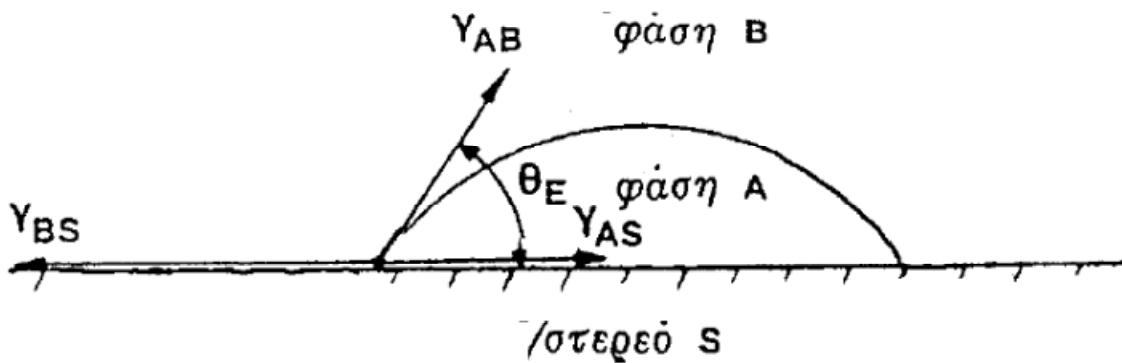
3.3.5.1 Γωνία επαφής ισορροπίας

Με τον όρο διαβρεκτικότητα αναφέρονται οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ρευστών και του στερεού. Η πιο άμεση εκδήλωση της διαβρεκτικότητας σε ένα σύστημα στερεού-υγρού-υγρού, είναι η γωνία επαφής ισορροπίας q_e , που παρατηρείται στο Σχ. 3.2. Στην ισορροπία, οι τρεις διεπιφανειακές τάσεις συνδέονται με τη σχέση Young-Dupree:

$$g_{ow} \cos q_e = g_{os} - g_{ws} \quad (3.23)$$

όπου: g_{ow} η διεπιφανειακή τάση μεταξύ της ελαϊκής και της υδατικής φάσης ενώ g_{os} , g_{ws} οι διεπιφανειακές τάσεις της ελαϊκής και της υδατικής φάσης με τη στερεή μήτρα αντίστοιχα.

Συνήθως, η γωνία επαφής ισορροπίας μετριέται μέσω της διαβρέχουσας φάσης. Κανονικά, αν $q_e < 90^\circ$, η επιφάνεια θεωρείται υδατοδιαβρεκτική. Ωστόσο στην πραγματικότητα η επιφάνεια θεωρείται υδατοδιαβρεκτική όταν, $q_e < 65^\circ$. Όταν $105^\circ < q_e < 180^\circ$, η επιφάνεια θεωρείται ελαιοδιαβρεκτική. Αν $65^\circ < q_e < 105^\circ$, η επιφάνεια θεωρείται ενδιάμεσης διαβρεκτικότητας και δεν δείχνει ιδιαίτερη προτίμηση σε κάποιο από τα δύο ρευστά. Τέλος, αν $q_e < 0^\circ$, τότε το ρευστό διαβρέχει πλήρως την επιφάνεια και αναπτύσσεται ένας διαβρέχων υμένας που διαχωρίζει το στερεό από το άλλο ρευστό. Οι συνθήκες αυτές καλούνται συνθήκες τέλει διαβροχής.



Σχήμα 3.2: Ορισμός της πραγματικής γωνίας επαφής θ_E και των διεπιφανειακών τάσεων γ_{AS} , γ_{BS} , γ_{AB} για ένα σύστημα δύο ρευστών A (υδατική φάση) και B (ελαϊκή), σε επαφή με μια λεία στερεή επιφάνεια S.

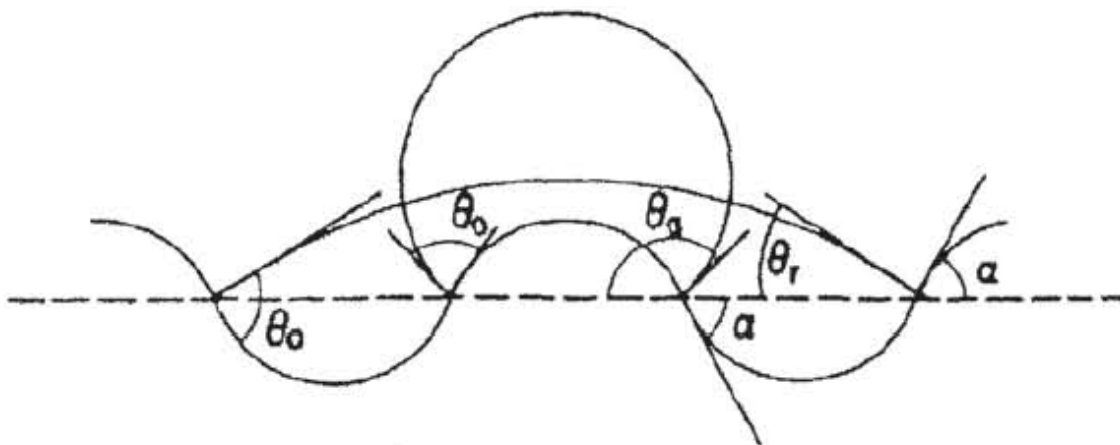
Η γωνία επαφής ισορροπίας της εξίσωσης Young – Dupree θεωρείται ως η πραγματική ή θερμοδυναμική γωνία επαφής, ενώ στα πραγματικά συστήματα παρατηρείται η φαινομενική γωνία επαφής Σχ. 3.3. Η γωνία που μετριέται έτσι, παρουσιάζει πολλές διαφορετικές τιμές, εμφανίζει δηλαδή υστέρηση.

$$q_r^0 < q_{app} < q_a^0 \quad (3.24)$$

όπου: q_r^0 είναι η στατική οπισθοχωρούσα γωνία, που παρατηρείται όταν η επιφάνεια επαφής στερεού – ρευστού τείνει να αυξηθεί και q_a^0 η στατική προϊούσα γωνία επαφής, που παρατηρείται όταν η επιφάνεια επαφής τείνει να συρρικνωθεί.

Οι λόγοι που πιθανόν οδηγούν στην υστέρηση της γωνίας επαφής είναι οι εξής:

- (α) Η τραχύτητα της επιφανείας.
- (β) Η χημική ετερογένεια ή η μόλυνση της διεπιφάνειας.
- (γ) Η ακινησία της διεπιφάνειας σε μακρομοριακό επίπεδο.



Σχήμα 3.3: Σταγόνα που ηρεμεί πάνω σε ομόκεντρα αυλάκια. Μικροσκοπικά και για τις δυο διαμορφώσεις η γωνία επαφής είναι ίδια, αν και μακροσκοπικά διαφέρει.

Στην περίπτωση που η γραμμή επαφής κινείται, τότε η φαινομενική γωνία επαφής q_{app} , λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές και καλείται δυναμική γωνία επαφής q_d . Ο προσδιορισμός της κίνησης της γραμμής επαφής είναι αρκετά δύσκολος δεδομένου του γεγονότος ότι η συνθήκη της μη ολίσθησης στα σύνορα του ρευστού με τη στερεά πλάκα οδηγεί σε αποκλίσεις. Η δυναμική γωνία επαφής σε τριχοειδής σωλήνες συνδέεται με τον τοπικό τριχοειδή αριθμό μέσω εμπειρικών σχέσεων της μορφής:

$$\cos q_d - \cos q_a = aCa^x \quad (3.25)$$

όπου: ο εκθέτης x λαμβάνει την τιμή 1/2. Μια παρόμοια σχέση για όλες τις τιμές $0 \leq q_d \leq 180^\circ$ και μικρούς τριχοειδείς αριθμούς ανάγεται στο νόμο του Tanner: $q_d \propto Ca^{1/3}$.

3.3.5.2 Επίδραση της διαβρεκτικότητας στην τριχοειδή πίεση

Ο ακίνητος μηνίσκος μεταξύ δύο αμιγών ρευστών τα οποία βρίσκονται σε ένα πόρο έχει σχήμα που καθορίζεται από τη γεωμετρία του πόρου και τη διαβροχή. Τριχοειδής πίεση είναι η διαφορά πίεσης μεταξύ της διαβρέχουσας και της μη διαβρέχουσας φάσης που υπάρχει εκατέρωθεν της διεπιφάνειας. Λόγω αυτής της διαφοράς πίεσης η διεπιφάνεια μεταξύ των δύο φάσεων είναι σφαιρική και εξαρτάται από το μέγεθος των πόρων και τις αναλογίες των ποσοτήτων των υπάρχοντων ρευστών.

Η πίεση των ρευστών στις δύο πλευρές μιας στατικής διεπιφάνειας παρουσιάζει ασυνέχεια, η οποία δίνεται από τον γνωστό νόμο του Young – Laplace:

$$P_c = P_o - P_w = g_{ow}J \quad (3.26)$$

όπου: P_c είναι η τριχοειδής πίεση, P_o και P_w είναι η πίεση από την πλευρά της ελαϊκής και της υδατικής φάσης, αντίστοιχα, και J είναι η μέση καμπυλότητα της διεπιφάνειας, που δίνεται από:

$$J = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (3.27)$$

όπου: R_1 και R_2 είναι οι κύριες ακτίνες καμπυλότητας της διεπιφάνειας. Η τριχοειδής αυτή πίεση είναι τοπική, ορισμένη σε κάθε σημείο μιας διεπιφάνειας. Με ανάλογο τρόπο ορίζεται η συνάρτηση τριχοειδούς πίεσης, σε ένα πορώδες μέσω, ως:

$$P_c(S_w) = P_o(S_w) - P_w(S_w) \quad (3.28)$$

όπου: οι αντίστοιχοι συμβολισμοί εννοούν μέσες τιμές πάνω στον πορώδη όγκο. Η συνάρτηση τριχοειδούς πίεσεων είναι χαρακτηριστική για κάθε πορώδες μέσο και φανερώνει τα χαρακτηριστικά της διαβρεκτικότητάς του.

Η διαβρεκτικότητα επιδρά στις σχετικές διαπερατότητες και έχει αποδειχτεί με βάση παλαιότερες έρευνες πως η σχετική διαπερατότητα της μη διαβρέχουσας φάσης αυξάνεται όταν η γωνία επαφής ελαττώνεται, δηλαδή με βελτίωση των συνθηκών διαβρεκτικότητας. Σε συνθήκες ροής (δυναμικές) ορίζεται η δυναμική τριχοειδής πίεση:

$$P_c = \langle P_o \rangle - \langle P_w \rangle \quad (3.29)$$

Επίσης έχει αποδειχθεί πως για τη δυναμική τριχοειδή πίεση ισχύει μια σχέση ανάλογη της εξίσωσης του Laplace για στατικές διεπιφάνειες:

$$P_c = \frac{g_{ow} f}{j} \quad (3.30)$$

όπου: f είναι μια άγνωστη συνάρτηση.

Με βάση νόμους γραμμικής θερμοδυναμικής μη αντιστρεπτών διεργασιών έχει αποδειχθεί πως κάτω από συνθήκες ροής η δυναμική τριχοειδής πίεση δίνεται από τη σχέση:

$$P_c = g_{ow} Jf + L_1 \frac{\partial(j S_o)}{\partial t} \quad (3.31)$$

όπου: f είναι μία συνάρτηση η οποία καθορίζει τη σχέση μεταξύ του ρυθμού μεταβολής των διεπιφανειών στο πορώδες και του ρυθμού μεταβολής του κορεσμού της μη διαβρέχουσας φάσης, S_o και L_1 είναι ένας μακροσκοπικός φαινομενολογικός συντελεστής.

3.3.6 Δυναμική Γαγγλίων

3.3.6.1 Κινητοποίηση Γαγγλίου

Όταν η μακροσκοπική βαθμίδα πίεσης στο διαβρέχον ρευστό είναι μηδενική, τότε ένα γάγγλιο βρίσκεται σε ισορροπία. Η διαφορά πίεσης σε κάθε διεπιφάνεια του γαγγλίου, δηλαδή η τοπική τριχοειδής πίεση, είναι ίδια και η καμπυλότητά τους δίνεται από τον νόμο του Laplace.

Όταν η βαθμίδα της πίεσης αυξηθεί σε κάποια θετική τιμή, μικρότερη από αυτήν που απαιτείται για να προκαλέσει την κινητοποίηση του γαγγλίου, τότε το γάγγλιο αντιδρά ως εξής: Η καμπυλότητα των διεπιφανειών που βρίσκονται κατάντη στη ροή αυξάνεται, ενώ η καμπυλότητα των διεπιφανειών ανάντη στη ροή μειώνεται. Η διαφορά στην τριχοειδή πίεση που δημιουργείται με τον τρόπο αυτό, εξουδετερώνει τη δύναμη που εξασκείται στο γάγγλιο από το εξωτερικό πεδίο

πίεσεων. Η κατάσταση αυτή είναι μια κατάσταση ισορροπίας μεταξύ των τριχοειδών και των ιξωδών δυνάμεων.

Εάν η βαθμίδα πίεσης ξεπεράσει μια κρίσιμη τιμή, το γάγγλιο κινητοποιείται. Αυτό συμβαίνει γιατί κάποια από τις κατάντη διεπιφάνειες γίνεται ασταθής, όταν η φαινομενική γωνία επαφής πάρει την ελάχιστη τιμή της, δηλαδή αυτήν που αντιστοιχεί στη στατική οπισθοχωρούσα γωνία επαφής q_r^0 . Η καμπυλότητα αντίστοιχα λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της. Όταν αυτό συμβαίνει το μη διαβρέχον ρευστό προχωρά στο σημείο που σχηματίστηκε η ασταθής διεπιφάνεια και η άλλη άκρη του γαγγλίου ακολουθεί, με ανάλογη κίνηση του διαβρέχοντος ρευστού. Το φαινόμενο αυτό λέγεται ρέον. Το τμήμα του φαινομένου που αντιστοιχεί σε εισρόφηση, δηλαδή σε κίνηση του διαβρέχοντος ρευστού εις βάρος του μη διαβρέχοντος, καλείται υγρόν, ενώ το τμήμα που αντιστοιχεί που αντιστοιχεί σε αποστράγγιση, δηλαδή σε κίνηση του μη διαβρέχοντος ρευστού και υποχώρηση του διαβρέχοντος, καλείται ξηρόν.

Μια γενίκευση του κριτηρίου με την οποία γίνεται η πρόβλεψη της κινητοποίησης του γαγγλίου αλλά και των συγκεκριμένων διεπιφανειών που κινούνται μπορεί να διατυπωθεί μέσω του αριθμού κινητοποίησης γαγγλίου G_m , ως εξής:

Αν ισχύει η παρακάτω ανισότητα το γάγγλιο κινητοποιείται, δηλαδή:

$$G_m = \frac{b_{KI}}{g_{ow}} \left| \frac{\partial p_w}{\partial z} \right| \geq 1 \quad (3.32)$$

Στην αντίθετη περίπτωση, το γάγγλιο παραμένει ακίνητο, δηλαδή:

$$G_m = \frac{b_{KI}}{g_{ow}} \left| \frac{\partial p_w}{\partial z} \right| < 1 \quad (3.33)$$

Ο αριθμός κινητοποίησης γαγγλίου εξαρτάται από την παράμετρο b_{KI} , η οποία δίνεται από:

$$b_{KI} = \max_{ki} \frac{\Delta L_{KI} \cos q_{KI}}{J_{dr,i}(q_r^0) - J_{imb,k}(q_a^0)} \quad (3.34)$$

όπου: i είναι η καταντή στη ροή διεπιφάνεια k μια αντίστοιχη ανάντη στη ροή και $J_{dr,i}$, $J_{imb,k}$ είναι οι καμπυλότητες των διεπιφανειών αυτών. Η κινητοποίηση του γαγγλίου λαμβάνει χώρα μεταξύ εκείνων των διεπιφανειών K και I , για τις οποίες η παράμετρος b_{KI} είναι μέγιστη. Η παράμετρος b_{KI} εξαρτάται από το μέγεθος, το σχήμα και την διεύθυνση του γαγγλίου στον πορώδη χώρο, μέσω του μήκους του, στη διεύθυνση της ροής, από την I έως την K διεπιφάνεια $\Delta L_{KI} \cos q_{KI}$.

Ένα γάγγλιο που κινητοποιείται από μια δεδομένη θέση στον πορώδη χώρο, συνήθως ακινητοποιείται ξανά σε κάποια άλλη θέση ανάντη στη ροή (εάν δεν διασπαστεί στο μεταξύ σε μικρότερα γάγγλια κατά την κίνηση του), επειδή το μήκος του στη διεύθυνση της ροής μικραίνει (το $\Delta L_{KI} \cos q_{KI}$ γίνεται μικρό) ή συναντά κάποιον πολύ στενό λαιμό (η καμπυλότητα $J_{dr,i}$ γίνεται πολύ μεγάλη). Συνεπώς, η κινητοποίηση του γαγγλίου δεν σημαίνει ότι το γάγγλιο θα παραμείνει κινητοποιημένο. Στην πραγματικότητα, το γάγγλιο ακινητοποιείται ξανά μετά από λίγα βήματα στον πορώδη χώρο, ή διασπάται σε μικρότερα, τα οποία ακινητοποιούνται με τη σειρά τους. Μόνο σε ομοιόμορφα πορώδη μέσα είναι δυνατόν να διατηρηθεί η κίνηση ενός γαγγλίου.

Το κριτήριο κινητοποίησης, είναι δυνατόν να εκφραστεί μέσω του τριχοειδούς αριθμού, ως εξής:

Αν ισχύει η παρακάτω ανισότητα το γάγγλιο κινητοποιείται, δηλαδή:

$$Ca = \frac{m_w v_w}{g_{ow}} \geq \frac{k_{rw} k}{b_{KI}} \quad (3.35)$$

Στην αντίθετη περίπτωση, το γάγγλιο παραμένει ακίνητο, δηλαδή:

$$Ca = \frac{m_w v_w}{g_{ow}} < \frac{k_{rw} k}{b_{KI}} \quad (3.36)$$

Η αδιάστατη ομάδα στο δεξιό μέλος εξαρτάται από τη γεωμετρία του πορώδους μέσου, το σχήμα, το μέγεθος, τη διευθέτηση και τη τοπική γεωμετρία της θέσης του γαγγλίου και μέσω της σχετικής διαπερατότητας k_{rw} από την ποσότητα και την κατανομή της μη διαβρέχουσας φάσης στη γειτονιά του γαγγλίου. Τυπικές τιμές για τον απαιτούμενο τριχοειδή αριθμό, ώστε να συμβεί κινητοποίηση του γαγγλίου είναι 10^{-4} έως 10^{-2} .

Η τελευταία θεώρηση παρέχει την απάντηση γιατί ο απαιτούμενος τριχοειδής αριθμός δεν είναι μονάδα προκειμένου να κινητοποιηθεί ένα γάγγλιο. Ο τριχοειδής αριθμός δεν είναι η κατάλληλη αδιάστατη ομάδα για τον προσδιορισμό της κινητοποίησης, επειδή δεν περιέχει ορισμένες σχετικές παραμέτρους. Συνακόλουθα, ο τριχοειδής αριθμός, που απαιτείται για την κινητοποίηση εξαρτάται, από τη συγκεκριμένη περίπτωση. Ο αριθμός κινητοποίησης G_m είναι πιο κατάλληλος και η κρίσιμη τιμή του για την κινητοποίηση του γαγγλίου είναι μονάδα.

Το παραπάνω κριτήριο, παρά τη γενικότητα του είναι ωστόσο προσεγγιστικό. Προσεγγίζει την κινητοποίηση κάτω από στατικές συνθήκες. Όταν η βαθμίδα πίεσης γίνει πολύ μεγάλη, τότε το γάγγλιο μπορεί να κινηθεί ταυτόχρονα μέσω πολλών διεπιφανειών. Η κινητοποίηση αυτή λέγεται δυναμική. Κάτω από τέτοιες συνθήκες, το γάγγλιο υφίσταται έντονες διασπάσεις, όταν τείνει να ακολουθήσει δύο πόρους ταυτόχρονα. Μια τέτοια διάσπαση λέγεται δυναμική διάσπαση. Σε συνθήκες σχεδόν

στατικής κινητοποίησης, το γάγγλιο διασπάται λόγω κατάρρευσης ινών με σαγμοειδή διαμόρφωση της διεπιφάνειας (εντομική διάσπαση και εντομική αποκοπή).

3.3.6.2 Δυναμική Πληθυσμού Γαγγλίων

Σε μια τυπική ροή σε μόνιμη κατάσταση, στον πορώδη χώρο σχηματίζεται ένας μεγάλος αριθμός από γάγγλια, διαφόρων μεγεθών, άλλα από τα οποία κινούνται και άλλα είναι παγιδευμένα στον πορώδη χώρο. Η πρόβλεψη της συμπεριφοράς ενός τέτοιου πληθυσμού γαγγλίων αποτελεί μια ενδιαφέρουσα προοπτική.

Αν ο τριχοειδής αριθμός, Ca λάβει κατάλληλη τιμή ώστε κάθε στιγμή ένας αριθμός από τα γάγγλια να είναι δυνατόν να κινητοποιηθεί, τότε παρατηρούνται μια σειρά από επαναλαμβανόμενα φαινόμενα, όπως η κινητοποίηση και η παγίδευση των γαγγλίων, η σύγκρουση και η πιθανή συνένωση των γαγγλίων σε μεγαλύτερα ή η διάσπαση των γαγγλίων σε μικρότερα. Υπό αυτές τις συνθήκες, κάθε γάγγλιο αλληλεπιδρά με τα γειτονικά του ή με αυτά που συναντά στην κίνησή του και επιδρά στις τοπικές συνθήκες πίεσης και κορεσμού. Κατά συνέπεια, το στατικό κριτήριο κινητοποίησης του γαγγλίου δεν επαρκεί για την περιγραφή του φαινομένου και απαιτείται η ανάπτυξη πιο γενικών μεθόδων πρόβλεψης των παραπάνω γεγονότων. Η σύνθετη αυτή συμπεριφορά αλληλεπίδρασης ενός πληθυσμού γαγγλίων καλείται δυναμική γαγγλίων (ganglion dynamics).

4. Ο ΑΝΤΙΚΤΥΠΟΣ ΤΗΣ ΕΞΟΡΥΞΗΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ

4.1 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ

Η έκχυση πετρελαίου στη θάλασσα είναι μία από τις χειρότερες μορφές ρύπανσης των θαλάσσιων υδάτων. Κάθε χρόνο εξορύσσονται 3 δισ. τόνοι αργού πετρελαίου και το μισό αυτής της ποσότητας μεταφέρεται διά θαλάσσης με αποτέλεσμα 3 περίπου εκατ. τόνοι να χύνονται στη θάλασσα. Από την ποσότητα αυτή μόνο το 15% οφείλεται σε ατυχήματα δεξαμενόπλοιών. Ο παγκόσμιος στόλος όμως συνεχώς μεγαλώνει, με αποτέλεσμα να αυξάνεται και η πιθανότητα της ρύπανσης. Στη Μεσόγειο υπολογίζεται ότι διακινούνται 360-370 εκατ. τόνοι πετρελαιοειδών κάθε χρόνο κάτι που αντιπροσωπεύει το 20-25% της ετήσιας παγκόσμιας διακίνησης πετρελαιοειδών με πλοία. Γενικότερα το 30% του παγκόσμιου όγκου μεταφορών με πλοία κατευθύνεται σε Μεσογειακά λιμάνια ή διασχίζει τη Μεσόγειο.

Τα μέτρα πρόληψης της ρύπανσης παρουσιάζουν δυσκολίες εφαρμογής και μέχρι τώρα δεν έχουν μειώσει αποτελεσματικά τα ατυχήματα και τις επιπτώσεις αυτών. Ωστόσο, τα περιστατικά μεγάλων πετρελαιοκηλίδων δεν είναι συχνά. Η πλειοψηφία των πετρελαιοκηλίδων από ατυχήματα ανέρχονται περίπου στον 1 τόνο πετρελαίου. Οι μεγαλύτερες πετρελαιοκηλίδες που προκαλούνται από ατυχήματα των δεξαμενοπλοίων (tanker), αντιπροσωπεύουν περίπου το 3% του ολικού φορτίου. Όπως φαίνεται από τον πίνακα που ακολουθεί ο αριθμός των μεγάλων πετρελαιοκηλίδων (>7.000 τόνους) έχει μειωθεί σημαντικά τα τελευταία 30 χρόνια.

Πίνακας 4.1: Ο αριθμός των πετρελαιοκηλίδων, μεγαλύτερες των 7 τόνων, ανά έτος.

α/α	Έτος	7 έως 700 τόνους	>700 τόνους
1	1970	6	29
2	1971	18	14
3	1972	48	27
4	1973	27	32
5	1974	89	28
6	1975	95	22
7	1976	67	26
8	1977	68	17
9	1978	58	23
10	1979	60	34
11	1980	52	13
12	1981	54	7
13	1982	45	4
14	1983	52	13
15	1984	25	8
16	1985	31	8
17	1986	27	7
18	1987	27	10
19	1988	11	10
20	1989	32	13
21	1990	51	14
22	1991	29	7
23	1992	31	10
24	1993	31	11
25	1994	26	9
26	1995	20	3
27	1996	20	3
28	1997	28	10
29	1998	25	5
30	1999	19	6
31	2000	19	4
32	2001	16	3
33	2002	12	3
34	2003	15	4
35	2004	16	5
36	2005	21	3
37	2006	14	4

Η ρύπανση πετρελαίου προκύπτει από τη διαρροή του πετρελαίου, από εκπομπές, εκχύσεις ή απόβλητα αποχέτευσης κατά την παραγωγή και μεταφορά του αργού πετρελαίου, από τον καθαρισμό των πετρελαιοχημικών εργοστασίων, καθώς και τις παράνομες αποβολές από τα πλοία. Υπάρχουν περισσότερες από 300 διαφορετικές χημικές ενώσεις στο πετρέλαιο, το μεγαλύτερο ποσοστό από τις οποίες

είναι υδρογονάνθρακες. Το αργό πετρέλαιο εξαπλώνεται ταχύτατα στην θαλάσσια επιφάνεια καλύπτοντας τεράστιες εκτάσεις (πχ. 1 λίτρο πετρελαίου είναι δυνατόν να καλύψει την έκταση ενός στρέμματος). Μετά την έκχυση πετρελαίου στη θάλασσα, η πετρελαιοκηλίδα που σχηματίζεται υφίσταται την επίδραση διαφόρων διεργασιών, οι οποίες αλλοιώνουν την σύστασή της. Τα πτητικά συστατικά του πετρελαίου, που αποτελούν το 25% της ποσότητάς του, εξατμίζονται με την πάροδο μερικών ωρών ή ημερών. Τα υπόλοιπα συστατικά του σχηματίζουν σφαιρίδια πίσσας που παραμένουν στην επιφάνεια και ένα τμήμα τους αποικοδομείται από διάφορους μικροοργανισμούς. Μετά την πάροδο 3 μηνών παραμένει στη θάλασσα το 15% του αρχικού πετρελαίου, το οποίο σταδιακά καταλήγει στις ακτές με την μορφή σφαιριδίων πίσσας. Οι συνέπειες που μπορεί να προκαλέσει μια πετρελαιοκηλίδα εξαρτώνται από το είδος του πετρελαίου που διαφεύγει, τις καιρικές συνθήκες και την ευαισθησία της τοποθεσίας. Το οικοσύστημα επανέρχεται με φυσικούς ρυθμούς που εξαρτώνται από το μέγεθος και την τοξικότητα του πετρελαίου. Αυτός ο ρυθμός μπορεί να επιταχυνθεί με ανθρώπινες προσπάθειες. Οι βραχυπρόθεσμες επιπτώσεις της απόρριψης ποσοτήτων πετρελαίου σε θαλάσσια ύδατα είναι:

- Η μείωση της διαπερατότητας του φωτός, με αποτέλεσμα να επιβραδύνεται η φωτοσυνθετική ικανότητα των υποθαλασσιών φυτών.
- Η μείωση της διαπερατότητας του ατμοσφαιρικού οξυγόνου στο υδάτινο σώμα, με αρνητικές επιδράσεις στη θαλάσσια οικολογία.
- Ο μαζικός θάνατος πτηνών. Τα φτερά των πτηνών καλύπτονται με πετρέλαιο, συγκολλούνται, με αποτέλεσμα να δυσχεραίνεται η πλεύση και το πέταγμά τους και να μειώνεται η θερμική μόνωσή του σώματός τους από το ψυχρό νερό. Το φαινόμενο αυτό οδηγεί στην ασφυξία και το θάνατό τους. Αν το φτέρωμα των πουλιών καλυφθεί με πετρελαιοειδή, τα πουλιά απειλούνται με θάνατο, ιδιαίτερα αν δεν μπορούν να πετάξουν για να βρουν τροφή. Τα θαλάσσια θηλαστικά αντίθετα δεν είναι ιδιαίτερα ευάλωτα σε αυτήν την μορφή ρύπανσης.
- Η καταστροφή φυκιών και υποθαλασσιών φυτών.
- Η τοξική δράση των ορισμένων ενώσεων του πετρελαίου (π.χ. πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων). Οι τοξικές αυτές ουσίες συσσωρεύονται μέσω της τροφικής αλυσίδας σε ανώτερους ζωικούς οργανισμούς και στον άνθρωπο.
- Η αγορά αλιευμάτων δέχεται μεγάλο πλήγμα. Ακόμα και οι μικρές συγκεντρώσεις υδρογονανθράκων προσδίδουν μια χαρακτηριστική δυσάρεστη γεύση στα αλιεύματα που τελικά οδηγεί στην απαγόρευση της διάθεσής τους στο εμπόριο.

- Η αισθητική ρύπανση, που προκαλείται από την απόθεση σφαιριδίων πίσσας στις ακτές, έχει οικονομικές επιδράσεις στις παράκτιες τουριστικές περιοχές.

Όμως τα ορατά αποτελέσματα δεν είναι πάντα τα πιο σοβαρά. Σε μικρές ακόμα συγκεντρώσεις τα πετρελαιοειδή μπορούν να επηρεάσουν ολόκληρη τη βιολογία και την τροφική αλυσίδα, από το πλαγκτόν και τις προνύμφες μέχρι τα ψάρια, τα οστρακοειδή και τα πουλιά. Ακόμα και η απλή επαφή με το πετρέλαιο προκαλεί στα οστρακοειδή, αναπνευστικά προβλήματα και κακή απορρόφηση της τροφής. Τα ψάρια μπορεί να εγκαταλείψουν την περιοχή αν διαταραχθεί η τροφική αλυσίδα. Έστω και ελάχιστη παρουσία πετρελαιοιδών επηρεάζει την δυνατότητα αναπαραγωγής των ψαριών. Η παρουσία των πετρελαιοιδών μπορεί να φτάσει μέχρι το πιάτο μας, απειλώντας την υγεία μας, αν τα ψάρια και τα οστρακοειδή προσροφήσουν πετρελαιοειδή.



Εικόνα 4.1: Περιβαλλοντική καταστροφή στον Κόλπο του Μεξικού τον Απρίλιο του 2010 από την εταιρεία πετρελαίου BP.

Μια από τις συνηθισμένες επιπτώσεις σε κοινωνικό-οικονομικό επίπεδο, είναι το πλήγμα που δέχεται ο τουρισμός. Πέρα από την θάλασσα, από την ρύπανση πλήττονται συνήθως και οι πιο προσιτές ακτές στον τόπο του ατυχήματος. Και συνήθως τέτοιες περιοχές λόγω της γεωγραφικής τους θέσης έχουν αυξημένη τουριστική ανάπτυξη. Σε τέτοιες περιοχές υπάρχουν δηλαδή συνήθως ξενοδοχειακές μονάδες, καταστήματα και διάφορες τουριστικές επιχειρήσεις. Ρυπαίνοντας επομένως αυτές τις περιοχές, πολλές φορές ανεπανόρθωτα, χάνουν την φυσική τους

ομορφιά και την αίγλη τους και παύουν να αποτελούν τον πόλο έλξης για τους τουρίστες. Αυτό θα έχει ως συνέπεια όλες οι παραπάνω τουριστικές επιχειρήσεις να δεχτούν μεγάλο πλήγμα, το οποίο θα μπορούσε να πάρει ακόμη και εθνικές διαστάσεις, αν ληφθεί υπόψη ότι για κάποιες χώρες ο τουρισμός αποτελεί βασικό έσοδο της οικονομίας τους. Επίσης στις παραθαλάσσιες περιοχές που έχουν ρυπανθεί θα πρέπει να σταματήσει η αλιεία ή τουλάχιστον θα μειωθεί σημαντικά, λόγω των σοβαρότατων οικολογικών προβλημάτων που θα αντιμετωπίζει η περιοχή, όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Ακόμη και η ανοικοδόμηση κατοικιών σε αυτές τις περιοχές θα σταματήσει πιθανόν, καθώς το μέρος θα χάσει σημαντικά από την προηγούμενη αίγλη του.

Τέλος, θα μπορούσαν να αναφερθούν οι «απώλειες ευζωίας», δηλαδή οι χαρές και οι συνήθειες του παρελθόντος που στερούνται κάποιοι άνθρωποι και οι οποίες δεν καλύπτονται από αποζημιώσεις. Τέτοιες ήταν οι απώλειες που προέκυψαν από τη διακοπή του ψαρέματος των ιδιωτών από τις ακτές που επηρεάστηκαν από την πετρελαιοκηλίδα, από τη διακοπή της κολύμβησης στη θάλασσα, ακόμη και η ευδαιμονία που προκαλούσε μια βόλτα στην περιοχή. Ένας τρόπος υπολογισμού των απωλειών ευζωίας είναι υποθέτοντας ότι το πλεόνασμα των κατοίκων της περιοχής θα ισούται των εξόδων που κάνει ο τουρίστας κάθε μέρα.

Γνωρίζοντας επίσης την συχνότητα των επισκέψεων στον τόπο καθώς και τις μέρες που δεν υπάρχει περίπτωση κάποιος να επισκεφθεί το μέρος, κάνουμε εύκολα τους υπολογισμούς μας.

4.2 ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

Ίσως η πιο γνωστή αρχή της περιβαλλοντικής νομοθεσίας, η οποία ισχύει τόσο στην Ευρωπαϊκή Ένωση όσο και διεθνώς, είναι η αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει». Αυτό σημαίνει ότι ο φορέας που προκαλεί την περιβαλλοντική ζημία φέρει την αντίστοιχη ευθύνη, και μάλιστα από οικονομική σκοπιά. Η αρχή αυτή ενσωματώνεται στο περιβαλλοντικό δίκαιο με διάφορες μορφές, όπως περιγράφονται στη συνέχεια.

Ο αυστηρός νόμος περί ευθύνης υπαγορεύει ότι ο θύτης πρέπει να πληρώσει αποζημίωση σε κάθε περίπτωση, ανεξάρτητα αν πήρε κάποια μέτρα πρόληψης. Οπότε στην περίπτωση ατυχημάτων που επηρεάζονται μόνο από τον θύτη, ο θύτης

θα επιλέξει το βέλτιστο επίπεδο φροντίδας διότι εφόσον είναι ο εξ' ολοκλήρου υπεύθυνος, αν ξοδέψει παραπάνω απ' ό που πρέπει στην πρόληψη θα αυξήσει το κόστος του για προληπτικά μέτρα, και αν ξοδέψει λιγότερα, θα αυξήσει την αναμενόμενη ζημιά.

Ο νόμος περί αμέλειας είναι αποδοτικός όταν το νομικό σύστημα καθορίζει ότι η οφειλόμενη προσοχή που δίνεται για την αποφυγή ατυχημάτων είναι ίση με το βέλτιστο επίπεδο φροντίδας. Αυτό εξηγείται ως εξής: αν ο θύτης έχει καταβάλει την προσοχή που επιβάλλεται από τους νόμους τότε απαλλάσσεται από τις ευθύνες του αν προκύψει ατύχημα. Αν καταβάλει λιγότερη, θα μειώσει μεν το κόστος της πρόληψης, αλλά θα αναγκαστεί να πληρώσει πολύ περισσότερα αν προκύψει ατύχημα. Επομένως, και ο νόμος περί αμέλειας αλλά και ο αυστηρός νόμος περί ευθύνης μπορούν εξίσου να οδηγήσουν σε ελαχιστοποίηση του κοινωνικού κόστους του ατυχήματος. Οι διαφορές των δύο νόμων είναι ότι στον πρώτο ο θύτης αν τον ακολουθεί πιστά δεν θα αναγκαστεί να πληρώσει αποζημίωση, ενώ κατά τον δεύτερο, το θύμα πάντα θα παίρνει αποζημίωση.

Στην περίπτωση των μονομερών ατυχημάτων, ο αυστηρός νόμος περί ευθύνης είναι ο προτιμότερος, γιατί οδηγεί σε μέγιστη πρόληψη και βέλτιστο επίπεδο δραστηριότητας. Στα διμερή ατυχήματα υπάρχουν δύο περιπτώσεις:

- i) αν η δραστηριότητα του δράστη είναι ιδιαίτερα επικίνδυνη και δημιουργεί υψηλό κίνδυνο πρόκλησης ατυχήματος, είναι προτιμότερος ο αυστηρός νόμος περί ευθύνης,
- ii) αν η δραστηριότητα δεν είναι τόσο σημαντική, χάνει αυτό του το πλεονέκτημα. Γενικά, από οικονομικής απόψεως το προβάδισμα δίνεται περισσότερο στον αυστηρό νόμο περί ευθύνης, ενώ από την νομική άποψη, αυτός ο νόμος δεν θεωρείται πάντα ο καταλληλότερος και αν θεωρηθεί, θα πρέπει να συνδυάζεται με υπεράσπιση των θυτών.

Η Κοινοτική Επιτροπή έχει επιλέξει τον αυστηρό νόμο για όλες τις ζημιές που προκύπτουν από επικίνδυνες ασχολίες, ενώ για ζημιές που προκύπτουν από τις υπόλοιπες ασχολίες επιλέγει τον νόμο περί αμέλειας.

Άλλοι νόμοι με μικρότερη όμως εφαρμογή από τους προηγούμενους είναι: Ο νόμος περί συμβάλλουσας αμέλειας, ο οποίος αφαιρεί το δικαίωμα αποζημίωσης των θυμάτων οι οποίοι δεν έχουν πάρει τα κατάλληλα μέτρα προφύλαξης. Αυτός ο νόμος έχει ως αποτέλεσμα την αναλογική διαχώριση του σφάλματος μεταξύ θύτη και

θύματος όταν και οι δύο έχουν διαπράξει κάποιο λάθος. Ο απόλυτος τέτοιος νόμος που αφαιρεί εντελώς την αποζημίωση από τα θύματα δεν χρησιμοποιείται πια. Απλά μειώνουν αναλογικά το ποσό της αποζημίωσης αν αποδειχθεί αμέλεια των θυμάτων. Ο πρωταρχικός σκοπός των νόμων αδικοπραξίας είναι να μειώσουν το κόστος ατυχημάτων, που αποτελείται κι από το κόστος της αποφυγής ατυχήματος και της ίδιας της ζημιάς. Το ελάχιστο 'κοινωνικό' κόστος των ατυχημάτων, σύμφωνα με τους οικονομολόγους, είναι εκεί που το οριακό κόστος της αποφυγής ατυχημάτων είναι ίσο με το οριακό όφελος από τη μείωση των ατυχημάτων. Το επίπεδο όπου συμβαίνει αυτό, λέγεται βέλτιστο ή αποδοτικό επίπεδο φροντίδας. Οι οικονομολόγοι χρησιμοποιούν έναν συγκεκριμένο τύπο για τον προσδιορισμό του 'κοινωνικού κόστους' των ατυχημάτων, το οποίο θέλουν να ελαχιστοποιήσουν. Όμως η έλλειψη σαφών προτύπων αξιολόγησης της ζημιάς είναι εμπόδιο για την ενιαία εφαρμογή των περιβαλλοντικών κανόνων αποζημιώσεων.

Ένα συγκεκριμένο εμπόδιο, το οποίο είναι κοινό στις περιβαλλοντικές υποθέσεις είναι η απόδειξη της υπαιτιότητας. Συχνά τα θέματα αυτά είναι περίπλοκα και απαιτούν υψηλά επίπεδα τεχνικών γνώσεων και ειδικών αποδείξεων. Οι βασικοί κανόνες που υπάρχουν στα περισσότερα συστήματα είναι ότι ο ενάγων κουβαλά το φορτίο της απόδειξης. Ο ενάγων θα πρέπει κατά τον αστικό νόμο να αποδείξει ότι μια αιτία ή μια άποψη των γεγονότων είναι πιο πιθανό να έχει συμβεί απ' ότι άλλα. Αυτό το επίπεδο της απόδειξης συχνά αναφέρεται ως ισορροπία των πιθανοτήτων ή επικράτηση της πιθανότητας. Κάποιες χώρες όπως το Βέλγιο, η Πορτογαλία και η Ισλανδία απαιτούν υψηλά επίπεδα απόδειξης.

Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι δεν καλύπτονται όλες οι μορφές περιβαλλοντικών ζημιών από το καθεστώς ευθύνης. Προκειμένου να είναι αποτελεσματική η θέσπιση ευθύνης πρέπει:

- Να έχει εντοπιστεί ένας ή περισσότεροι δράστες(ρυπαίνοντες).
- Η ζημιά να είναι συγκεκριμένη και να μπορεί να αποτιμηθεί το μέγεθός της.
- Να έχει αποδειχθεί η αιτιώδης συνάφεια μεταξύ της ζημιάς και του(ων) εντοπισθέντος(ων) ρυπαίνοντος(ων).

Κατά συνέπεια, η ευθύνη ενδέχεται να αποδοθεί, λόγου χάριν, σε περιπτώσεις όπου η ζημιά είναι αποτέλεσμα βιομηχανικών ατυχημάτων ή βαθμιαίας ρύπανσης που προκαλείται από επικίνδυνες ουσίες ή απόβλητα που εισάγονται στο περιβάλλον από εντοπίσιμες πηγές.

4.2.1 Ευρωπαϊκή νομοθεσία σχετικά με τη ρύπανση από θαλάσσια ατυχήματα

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει δημιουργήσει έναν μεγάλο αριθμό προγραμμάτων για την προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος και πολλές συμβάσεις για την πρόληψη και την αντιμετώπιση των ναυτικών ατυχημάτων. Ο ρόλος της στην αντιμετώπιση της θαλάσσιας ρύπανσης είναι νομικά κατοχυρωμένος με την Απόφαση 2850(20/12/2000) του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου του Συμβουλίου, που θέτει ένα κοινοτικό πλαίσιο συνεργασίας για την αντιμετώπιση της ατυχηματικής ή εκούσιας θαλάσσιας ρύπανσης.

4.2.2 Η Συνθήκη του Λουγκάνο σε σχέση με τα απόβλητα

Τα απόβλητα εξετάζονται στην περιβαλλοντική νομοθεσία με διαφορετικό τρόπο απ' ότι τα διάφορα αγαθά ή τα επικίνδυνα εμπορεύματα γενικότερα. Αυτό δεν προκύπτει από τον υψηλό κίνδυνο για ατυχήματα στην περίπτωση μεταφοράς αποβλήτων σε σχέση με τη μεταφορά άλλων αγαθών, αλλά από τον κίνδυνο της εγκατάλειψης ή την ανάρμοστη διάθεση των αποβλήτων από τον παραγωγό ή κάτοχό τους. Τα διεθνή μέσα και η εσωτερική νομοθεσία σε διάφορες χώρες ασχολούνται περισσότερο με τις κρατικές δαπάνες (προληπτικά μέτρα κτλ) και λιγότερο για τις ζημιές τρίτων. Σε περιορισμένες περιπτώσεις γίνεται χωριστή επεξεργασία για την εσωτερική και διασυνοριακή μετακίνηση των αποβλήτων. Τα απόβλητα δεν εξετάζονται χωριστά στις εκάστοτε συνθήκες μεταφορών. Η ευθύνη από την μεταφορά των αγαθών γενικά εξετάζεται σε διάφορες συμβάσεις, π.χ. οι θαλάσσιες μεταφορές των 22 αγαθών γενικά κυβερνώνται από την Συνθήκη LLMC που επικυρώνεται από 33 κράτη, οι επικίνδυνες ουσίες εξετάζονται από χωριστά όργανα, η CLC συνθήκη του 1969 εξετάζει την μεταφορά ακατέργαστου πετρελαίου σε μεγάλη ποσότητα με τα βυτιοφόρα. Για την διάθεση των αποβλήτων, θεσπίστηκε η συνθήκη του Λουγκάνο το 1993 σχετικά με την αστική ευθύνη για τις ζημιές από επικίνδυνες δραστηριότητες στο περιβάλλον. Η προσχώρηση της Κοινότητας στην συνθήκη αυτή θα παρουσίαζε το πλεονέκτημα να είναι σύμφωνη με την αρχή της επικουρικότητας σε διεθνές επίπεδο (δεν είναι σκόπιμο να θεσπιστεί νέα κοινοτική νομοθεσία, εφόσον μπορεί να αντιμετωπισθεί με την προσχώρηση της Κοινότητας σε υφιστάμενη διεθνή σύμβαση). Εξάλλου, η συνθήκη έχει το πλεονέκτημα της πληρότητας (περιλαμβάνονται όλοι οι τύποι ζημιών που απορρέουν από επικίνδυνες

δραστηριότητες) και ενός ευρέος και ανοικτού πεδίου εφαρμογής. Παρουσιάζει επίσης το πλεονέκτημα να διαθέτει ένα σύστημα που για να εξασφαλίσει συνοχή, αντιμετωπίζει κατά τρόπο ομοιόμορφο όσους ασκούν επικίνδυνες δραστηριότητες, οποιεσδήποτε και αν είναι αυτές. Έξι Κράτη Μέλη υπέγραψαν την συνθήκη, ενώ ορισμένα άλλα προτίθενται να τα ακολουθήσουν. Πολλά κράτη μέλη έχουν ήδη θεσπίσει τη νομοθεσία εφαρμογής της συνθήκης, ή ετοιμάζουν την επικύρωση (ωστόσο άλλα κράτη μέλη δεν προτίθενται να την υπογράψουν ή να την επικυρώσουν). Η Συνθήκη είναι επίσης ανοιχτή στις χώρες της Κεντρικής και Ανατολικής Ευρώπης καθώς και σε χώρες που δεν είναι μέλη του Συμβουλίου της Ευρώπης, προκειμένου να έχει ευρεία διεθνή βάση. Η προσχώρηση της Κοινότητας αναμένεται να ενθαρρύνει άλλες χώρες προς την ίδια κατεύθυνση.

Η αρχική διεθνής εξέταση συμβάσεων με αμοιβαία αναγνώριση και επιβολή κρίσεων είναι η Συνθήκη του Λουγκάνο το 1988, με βάση την 23 Συνθήκη των Βρυξελλών του 1968. Ο σκοπός της Συνθήκης είναι να καθορίσει τη διεθνή αρμοδιότητα, να διευκολύνει και να επισπεύσει την αναγνώριση ή/και την επιβολή των κρίσεων και να επικυρώσει τα όργανα και τις δικαστικές αποφάσεις. Ισχύει για τα αστικά (και εμπορικά) θέματα, αλλά όχι και για τα διοικητικά θέματα. Ειδικότερα, ένας ενάγων είναι σε θέση να έχει μια δράση ενάντια σε έναν κατηγορούμενο. Περαιτέρω, οι κρίσεις από μια χώρα που είναι συμβεβλημένη με την Συνθήκη μπορούν να αναγνωριστούν και να επιβληθούν σε μια άλλη χώρα που ακολουθεί επίσης την Συνθήκη. Η Συνθήκη του Λουγκάνο στην Ελλάδα έχει υπογραφεί, αλλά δεν έχει επικυρωθεί ακόμα. Το 1998 είχε συναφθεί επίσης και η Σύμβαση του Στρασβούργου για την προστασία του περιβάλλοντος με τη βοήθεια του ποινικού δικαίου, η οποία όμως δεν έχει τεθεί ακόμη σε ισχύ.

4.2.3 Λευκή Βίβλος

Μετά από μια συζήτηση γενικών κατευθύνσεων, στις 29 Ιανουαρίου 1997, η Επιτροπή αποφάσισε, λαμβάνοντας υπ' όψιν την ανάγκη ανταπόκρισης στο ψήφισμα του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου του 1994, το οποίο ζητούσε την ανάληψη δράσης από την Κοινότητα, την σύνταξη της Λευκής Βίβλου για την περιβαλλοντική ευθύνη.

Πολύ αργότερα, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή υιοθέτησε την Λευκή Βίβλο περί Περιβαλλοντικής Ευθύνης στις 9 Φεβρουαρίου του 2000. Κατά την Λευκή Βίβλο, μόνο οι συγκεκριμένες ζημιές πρέπει να καλύπτονται. Η Λευκή Βίβλος σκιαγραφεί

τους βασικούς άξονες ενός μελλοντικού κοινοτικού καθεστώτος ευθύνης για την εφαρμογή της αρχής «ο ρυπαίνων πληρώνει». Περιγράφει τα βασικά στοιχεία ώστε ένα τέτοιο καθεστώς να είναι αποτελεσματικό και εφαρμόσιμο. Το προτεινόμενο καθεστώς πρέπει όχι μόνο να καλύπτει τις τυχούσες ζημιές σε πρόσωπα, 24 αγαθά ή την ρύπανση χώρων, αλλά και τις ζημιές στην ίδια την φύση, ιδίως δε στους φυσικούς πόρους που είναι καίριας σημασίας προκειμένου να διαφυλαχθεί η βιοποικιλότητα στην Κοινότητα(ειδικότερα δε των περιοχών και των ειδών που τυγχάνουν προστασίας στο πλαίσιο του δικτύου Natura 2000). Μέχρι στιγμής, τα καθεστώτα περιβαλλοντικής ευθύνης των κρατών μελών της ΕΕ δεν πραγματεύονται το ζήτημα αυτό.

Απόρροια της Λευκής Βίβλου ήταν η έκδοση της Οδηγίας 2004/35, η οποία παρουσιάζεται ακολούθως.

4.2.4 Η οδηγία 2004/35/EK

Το αντικείμενο της οδηγίας 2004/35/EK είναι να ιδρύσει ένα κοινό πλαίσιο για την πρόληψη και την αποκατάσταση των περιβαλλοντικών καταστροφών με ένα λογικό κόστος για την κοινωνία, βασισμένο στην αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει». Η αποκατάσταση της περιβαλλοντικής ζημιάς, όσον αφορά τα ύδατα ή τα προστατευόμενα είδη ή τους φυσικούς οικότοπους, επιτυγχάνεται μέσω της επαναφοράς του περιβάλλοντος στην αρχική του κατάσταση μέσω της πρωτογενούς, της συμπληρωματικής και της αντισταθμιστικής αποκατάστασης, όπου:

- α) πρωτογενής αποκατάσταση είναι κάθε μέτρο αποκατάστασης που επαναφέρει τους κατεστραμμένους φυσικούς πόρους και/ή τις εξασθετισμένες υπηρεσίες στην ή προς την αρχική τους κατάσταση
- β) συμπληρωματική αποκατάσταση είναι κάθε μέτρο αποκατάστασης που αναλαμβάνεται σε σχέση με τους φυσικούς πόρους και/ή τις υπηρεσίες ως αντιστάθμιση του γεγονότος ότι η πρωτογενής αποκατάσταση δεν έχει ως αποτέλεσμα την πλήρη αποκατάσταση των κατεστραμμένων φυσικών πόρων και/ή υπηρεσιών
- γ) αντισταθμιστική αποκατάσταση είναι κάθε δράση που αναλαμβάνεται για να αντισταθμιστούν οι προσωρινές απώλειες των φυσικών πόρων και/ή των υπηρεσιών κατά την περίοδο που μεσολαβεί από την ημερομηνία που συνέβη

η ζημιά μέχρι την επίτευξη πλήρους αποτελέσματος της πρωτογενούς αποκατάστασης.

δ) προσωρινές απώλειες νοούνται οι απώλειες που προέρχονται από το γεγονός ότι οι κατεστραμμένοι φυσικοί πόροι ή οι υπηρεσίες δεν μπορούν να επιτελέσουν τις οικολογικές λειτουργίες του ή να παρέχουν υπηρεσίες σε άλλους φυσικούς πόρους ή στο κοινό μέχρι τα πρωτογενή και συμπληρωματικά μέτρα να αρχίσουν να παράγουν αποτέλεσμα .δεν συνιστούν οικονομική αντιστάθμιση προς το κοινό.

Όταν η πρωτογενής αποκατάσταση δεν φέρνει αποτέλεσμα στην επαναφορά του περιβάλλοντος στην αρχική του κατάσταση, τότε θα επιχειρηθεί η συμπληρωματική αποκατάσταση. Επιπροσθέτως η αντισταθμιστική αποκατάσταση θα επιχειρηθεί για να αντισταθμίσει τις προσωρινές απώλειες. Σκοπός της πρωτογενούς αποκατάστασης είναι η επαναφορά των κατεστραμμένων φυσικών πόρων και/ή των υπηρεσιών στην αρχική τους κατάσταση, ενώ σκοπός της συμπληρωματικής αποκατάστασης είναι να παρέχει ένα παρόμοιο επίπεδο φυσικών πόρων και/ή υπηρεσιών, ενδεχομένως και σε διαφορετική τοποθεσία, όπως θα παρεχόταν αν η κατεστραμμένη περιοχή είχε επανέλθει στην αρχική της κατάσταση. Όπου είναι πιθανό και ενδεδειγμένο, η διαφορετική τοποθεσία θα πρέπει να είναι γεωγραφικά συνδεδεμένη με την κατεστραμμένη περιοχή, λαμβάνοντας υπ' όψιν τα συμφέροντα του πληττόμενου πληθυσμού. Ως προς την αντισταθμιστική αποκατάσταση, η αντιστάθμιση αποτελείται από επιπρόσθετες βελτιώσεις στους προστατευόμενους φυσικούς οικότοπους και στα είδη, ή του ύδατος, είτε σε κατεστραμμένη τοποθεσία είτε σε διαφορετική τοποθεσία. Δεν περιλαμβάνει οικονομική αντιστάθμιση σε μέλη του κοινού. Η Οδηγία 2004/35 δεν εφαρμόζεται σε περιβαλλοντική καταστροφή ή σε όποια ενδεχόμενη καταστροφή που προκύπτει από ένα περιστατικό του οποίου η ευθύνη ή η αποζημίωση ανήκει στο πεδίο εφαρμογής όποιων από τις Διεθνείς Συμβάσεις που απαριθμούνται στο Παράρτημα IV, περικλείοντας κάθε μελλοντική τροποποίηση των Συμβάσεων αυτών, η οποία τίθεται σε ισχύ στο οικείο Κράτος Μέλος. Μεταξύ αυτών των Διεθνών Συμβάσεων περιλαμβάνονται οι ακόλουθες:

- a) International Convention of 27 November 1992 on Civil Liability for Oil Pollution Damage.
- b) International Convention of 27 November 1992 on the Establishment of an International Fund for Compensation for Oil Pollution Damage.

c) International Convention of 23 March 2001 on Civil Liability for Bunker Oil Pollution Damage.

d) International Convention of 3 May 1996 on Liability and Compensation for Damage in Connection with the Carriage of Hazardous and Noxious Substances by Sea.

e) Convention of 10 October 1989 on Civil Liability for Damage Caused during Carriage of Dangerous Goods by Road, Rail and Inland Navigation Vessels.

Επιπλέον, η οδηγία ισχύει υπό την επιφύλαξη του δικαιώματος του φορέα εκμετάλλευσης να περιορίσει την ευθύνη του σε συμφωνία με την εθνική νομοθεσία θέτοντας σε εφαρμογή την Σύμβαση Περιορισμού της Ευθύνης για Ναυτικές Αξιώσεις (LLMC) 1976, περιλαμβάνοντας κάθε μελλοντική τροποποίηση της Σύμβασης ή την Σύμβαση του Στρασβούργου για τον Περιορισμό της Ευθύνης στην εσωτερική Ναυσιπλοΐα (CLNI) 1988, περιλαμβάνοντας κάθε μελλοντική τροποποίηση της Σύμβασης.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η συγκεκριμένη Οδηγία δεν έχει εφαρμογή στα θαλάσσια ατυχήματα στα Κράτη Μέλη που έχουν υπογράψει τις διεθνείς συνθήκες που αναφέρθηκαν.

Erika I – απομάκρυνση δεξαμενόπλοιων μονού κύτους. Το ναυάγιο του ERIKA, του εικοσιπεντάχρονου δεξαμενοπλοίου με Μαλτέζικη σημαία, το 1999 επέδρασε ως καταλύτης στην Ευρωπαϊκή Ένωση για την θέσπιση μιας σειράς δραστικών μέτρων, με τη μορφή Οδηγιών και Κανονισμών για την πρόληψη των θαλασσίων πετρελαϊκών ατυχημάτων (ERIKA I package, ERIKA II package).

Το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο του Biarritz, στις 27 Σεπτεμβρίου του 2000, ζήτησε την ταχεία έγκριση της πρώτης δέσμης μέτρων που επονομάζεται «δέσμη Erika I» και κάλεσε την Επιτροπή να υποβάλει, το συντομότερο δυνατόν, πρόταση για δεύτερη δέσμη μέτρων, για τη συμπλήρωση των τριών νομοθετικών προτάσεων που υποβλήθηκαν την 21η Μαρτίου 2000. Αυτή η δεύτερη δέσμη μέτρων που αποβλέπει στη βελτίωση, κατά αειφόρο τρόπο, της προστασίας των ευρωπαϊκών υδάτων έναντι των κινδύνων ατυχημάτων και θαλάσσιας ρύπανσης, παρουσιάστηκε στις 6 Δεκεμβρίου 2000.

Βάσει κανονισμού της ΕΕ που εγκρίθηκε το 2002, τα δεξαμενόπλοια μονού κύτους επρόκειτο να απομακρυνθούν σταδιακά από τα ύδατα της Ευρωπαϊκής Ένωσης, υπέρ των πολύ ασφαλέστερων πλοίων διπλού κύτους. Η απομάκρυνση προβλεπόταν το αργότερο για το 2015, ενώ οι συγκεκριμένες προθεσμίες

κυμαίνονταν ανάλογα με το μέγεθος, τον τύπο και την ηλικία του πλοίου. Οι χρονολογίες είχαν αποφασιστεί σε συνεννόηση με τον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (ΙΜΟ). Το Κοινοβούλιο συμφώνησε με τις χρονολογίες αλλά κατόρθωσε να επιτύχει την εξαίρεση των μικρότερων δεξαμενοπλοίων, με το επιχείρημα ότι σε διαφορετική περίπτωση θα κινδύνευε ο εφοδιασμός των νησιωτικών περιοχών της Κοινότητας. Στις 13 Νοεμβρίου 2002, λίγους μόνο μήνες μετά την έγκριση του κανονισμού, συνέβη η καταστροφή του Prestige, η οποία ώθησε την Ευρωπαϊκή Ένωση να εισαγάγει νέο χρονοδιάγραμμα έτσι ώστε τα δεξαμενόπλοια μονού κύτους να καταργηθούν ταχύτερα. Τα μεγάλα δεξαμενόπλοια να απαγορευτούν έως το 2005, ενώ τα μικρότερα και τα πιο νέα σε ηλικία δεν θα επιτρέπεται να χρησιμοποιούνται στα κοινοτικά ύδατα μετά το 2010. Επίσης, θεσπίστηκε άμεση απαγόρευση στη χρήση δεξαμενοπλοίων μονού κύτους για τη μεταφορά βαρέος πετρελαίου (που είναι ο πιο ρυπαντικός τύπος) προς ή από λιμάνια της Κοινότητας.

Στην Ελλάδα, οι τελευταίες εξελίξεις είναι ότι από το 2008 θα αρχίσουν να αποσύρονται όλα τα μονού τοιχώματος τάνκερ, ενώ η Ευρωπαϊκή Ένωση πιέζει για να μην υπάρξουν καθυστερήσεις στην απόσυρση των πλοίων. Οι εξονυχιστικοί έλεγχοι της φυσικής κατάστασης των πλοίων στους λιμένες της ΕΕ είναι ο καλύτερος τρόπος για την επιβολή των κανόνων ασφαλείας. Σύμφωνα με την ΕΕ, οι επιθεωρήσεις θα είναι αυστηρότερες και συχνότερες: περίπου 4000 "επικίνδυνα" πλοία από τα κατά μέσο όρο 11.000 πλοία που υφίστανται επιθεώρηση κάθε χρόνο θα υφίστανται αυστηρή επιθεώρηση, σε σύγκριση με τα περίπου μόνο 700 σημερινά. Παράλληλα, θα απαγορευθεί η είσοδος σε κοινοτικούς λιμένες πλοίων που μεταφέρουν επικίνδυνο φορτίο, όπως πετρέλαιο, φυσικό αέριο ή χημικές ουσίες, εάν τα πλοία αυτά φέρουν τη σημαία κράτους που έχει περιληφθεί σε "μαύρη λίστα" και εάν έχουν κρατηθεί από λιμενικές αρχές πάνω από δύο φορές μέσα στα προηγούμενα δύο χρόνια. Παρά την έντονη αντίσταση των κυβερνήσεων της ΕΕ, οι βουλευτές προσέθεσαν ένα κανόνα βάσει του οποίου τα πλοία υποχρεούνται να φέρουν συσκευή καταγραφής δεδομένων διαδρομής (το λεγόμενο "μαύρο κουτί") η οποία καταγράφει πληροφορίες για χρήση κατά τη διερεύνηση ατυχημάτων. Οι κανόνες αυτοί έπρεπε να έχουν υλοποιηθεί έως τον Ιούλιο του 2003. Οι κυβερνήσεις μεταβιβάζουν την αρμοδιότητα διενέργειας δομικών ελέγχων ασφαλείας στα πλοία σε εταιρείες οι οποίες είναι γνωστές ως "νηογνώμονες" και οι οποίες διαθέτουν την απαραίτητη τεχνική εμπειρογνωμοσύνη. Η Ευρωπαϊκή Ένωση όμως αποφάσισε ότι οι εταιρείες αυτές θα πρέπει στο εξής να συμμορφώνονται με υψηλότερα πρότυπα

ποιότητας. Τώρα οι ευρωπαϊκές και εθνικές αρχές θα αναγνωρίζουν ή θα αποσύρουν την αναγνώριση από τις εταιρείες αυτές ύστερα από διεξοδική εξέταση του ιστορικού τους σε θέματα ασφαλείας και πρόληψης της ρύπανσης. Κατόπιν προτάσεως του Κοινοβουλίου, οι νηογνώμονες δεν επιτρέπεται να ελέγχονται από εφοπλιστές, ναυπηγεία ή άλλους εμπορικούς ναυτιλιακούς οργανισμούς, έτσι ώστε να αποτραπεί η σύγκρουση συμφερόντων.

4.2.5 Erika II - επιστημονική υποστήριξη και επικοινωνία

Τον Ιούνιο του 2002 εγκρίθηκαν δύο περαιτέρω μέτρα για τη βελτίωση της ασφάλειας στη θάλασσα. Το Κοινοβούλιο χαιρέτισε θερμά τη δημιουργία Ευρωπαϊκού Οργανισμού για την Ασφάλεια στη Θάλασσα, ο οποίος θα εδρεύει στη Λισαβόνα και θα προσφέρει επιστημονική και τεχνική υποστήριξη ώστε να βοηθά τα Κράτη-μέλη στην επιβολή της κοινοτικής νομοθεσίας ενώ παράλληλα θα αξιολογεί τον αντίκτυπο της νομοθεσίας για την ασφάλεια στη θάλασσα. Επίσης συγκροτήθηκε σύστημα πληροφόρησης της ΕΕ που επιτρέπει την αποτελεσματικότερη παρακολούθηση της θαλάσσιας κυκλοφορίας. Τα πλοία που πλέουν σε ύδατα της ΕΕ θα πρέπει να έχουν συστήματα αναγνώρισης που αυτόματα θα επικοινωνούν με τις λιμενικές αρχές. Τα δεδομένα για επικίνδυνα φορτία θα κυκλοφορούν ευκολότερα, ενώ τα Κράτη-μέλη θα έχουν μεγαλύτερες εξουσίες να παρεμβαίνουν εάν συμβαίνει ατύχημα ή υπάρχει κίνδυνος ρύπανσης.

Ο επιδιωκόμενος στόχος είναι συνεπώς για την Ευρωπαϊκή Ένωση να αποκτήσει τα μέσα που θα της επιτρέψουν καλύτερη επιτήρηση και έλεγχο της θαλάσσιας κυκλοφορίας στα ανοιχτά των ακτών της καθώς και δυνατότητα αποτελεσματικότερης παρέμβασης σε περίπτωση κρίσης στη θάλασσα. Για το σκοπό αυτό, η οδηγία που εμπεριέχεται στην δέσμη μέτρων Erika II προβλέπει:

- τη βελτίωση της παρακολούθησης των πλοίων που διέρχονται τις ζώνες μεγάλης κυκλοφορίας, υποχρεώνοντάς τα να εξοπλιστούν με συστήματα που θα επιτρέψουν τον αυτόματο εντοπισμό και τη συνεχή παρακολούθησή τους από τις αρχές των ακτών.
- την επέκταση των υποχρεώσεων ανακοίνωσης, που ήδη προβλέπονται στην οδηγία 93/75/ΕΟΚ σε καύσιμα αποθηκευμένα στο πλοίο, λαμβανομένου υπόψη του εξαιρετικά ρυπογόνου χαρακτήρα των προϊόντων αυτών.

- τη συστηματική προσφυγή στην ηλεκτρονική ανταλλαγή δεδομένων, προς απλοποίηση και εναρμόνιση της διαβίβασης και της εκμετάλλευσης δεδομένων που αφορούν στα επικίνδυνα ή ρυπογόνα εμπορεύματα που μεταφέρουν τα πλοία.
- τον υποχρεωτικό εξοπλισμό των πλοίων που κάνουν χρήση των λιμένων της Κοινότητας με καταγραφείς δεδομένων ταξιδιού προκειμένου να διευκολύνονται οι έρευνες κατόπιν ατυχήματος.
- την ενίσχυση των εξουσιών παρέμβασης των κρατών μελών, ως παράκτιων κρατών, σε περίπτωση κινδύνου ατυχήματος ή απειλούμενης ρύπανσης κοντά στις ακτές τους.
- την απαγόρευση του απόπλου των πλοίων σε περίπτωση καιρικών συνθηκών οι οποίες εγκυμονούν σοβαρό κίνδυνο για την ασφάλεια του πλοίου ή το περιβάλλον.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Αβραάμ Δημητρίου, *Σχετικές διαπερατότητες και καθεστώτα ροής δυο μη αναμείξιμων ρευστών κατά τη ροή τους σε πορώδη σώματα*, Διδακτορική Διατριβή, Πάτρα, (1996).
2. Κυριακόπουλος Γ.Β., *Τεχνολογία Πετρελαίου*, Αθήνα, (1977).
3. Κυριακόπουλος Γ.Β., *Τεχνολογία Περιβάλλοντος*, Αθήνα, (1978).
4. Συγγούνη Βαρβάρα, *Μια νέα μέθοδος μέτρησης της κλασματικής διαβροχής πορώδων μέσων από πειράματα εκτόπισης δύο φάσεων*, Διδακτορική Διατριβή, Πάτρα, (2007).
5. Shell, *Εισαγωγή στις μεθόδους ανακτήσεως πετρελαίου*, Τεχνολογικές Εκδόσεις, Αθήνα, (1981).
6. Aggelopoulos, C.A., Tsakiroglou, C.D., *The effect of micro-heterogeneity and capillary number on capillary pressure and relative permeability curves of soils*. Geoderma 148, 25–34, (2008a)
7. Avraam, D.G. and Payatakes, A.C., *Flow regimes and relative permeabilities during steady-state 2-phase flow in porous-media*, J. Fluid Mech., 293, 207, (1995a).
8. Avraam, D.G. and Payatakes, A.C., *“Generalized relative permeability coefficients during steady-state 2-phase flow in porous-media, and correlation with the flow mechanisms”*, Transp. Porous Media, 20, 135, (1995b).
9. Bommer Paul, *A Primer of Oil well Drilling A Basic Text of Oil and Gas Drilling Seventh Edition*, Texas, (2008).
10. Bran Edward, *Liability for damage to natural resources*, The Netherlands, (1997).
11. Brandly John Edward, *History of Oilwell Drilling*.
12. Economides Michael J., Hill A. Daniel, Economides Christine Ehlig, *Petroleum Production Systems*, Prentice Hall Petroleum Engineering Series, (1993).
13. Hunter Nick, *Offshore Oil Drilling*, Heinemann Library, (2011).
14. McGuigan Janet Stone, *The Potential Economic Impact of Environment Liability: The American & European Contexts*, European Commission, (2000).

15. Raymond Martin S. and Leffler William L., *Oil and Gas Production in Nontechnical Language*, PennWell Corporation, United States of America, (2006).
16. Sheridaw Paul, *Study of Civil Liability Systems for Remediating Environmental Damage*, (1995).
17. Tsakiroglou C.D., Theodoropoulou, M., Karoutsos, V., Papanicolaou, D. and Sygouni, V., *Experimental study of the immiscible displacement of shear-thinning fluids in pore networks*, J. Colloid Interface Sci., 267, 217, (2003b).
18. Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, <http://www.ntua.gr/>
19. Ελληνικά Πετρέλαια, <http://www.hellenic-petroleum.gr/>
20. Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Καβάλας, <http://www.teikavalas.gr/>
21. Τεχνολογία Πετρελαίου και Φυσικού αερίου, <http://www.chemeng.ntua.gr/>
22. Πανεπιστήμιο Κρήτης, <http://www.uoc.gr/>
23. Πολυτεχνείο Κρήτης, <http://www.tuc.gr/>
24. Πανεπιστήμιο Πειραιώς, <http://www.unipi.gr/>