

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ



ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΔΙΑΓΡΑΦΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ
ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ BLACKFOOT,
ΑΛΜΠΕΡΤΑ, ΚΑΝΑΔΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΟΣΧΟΥ ΓΕΩΡΓΙΑ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ :

Βαφείδης Αντώνιος, Καθηγητής (Επιβλέπων)

Μανούτσογλου Εμμανουήλ, Καθηγητής

Δρ. Κρητικάκης Γεώργιος

Χανιά
Μάιος, 2019

*Με εκτίμηση σε όσους μου προσέφεραν
την καθοδήγηση και τη βοήθειά τους.*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Κατά την έρευνα, αλλά και εκμετάλλευση υδρογονανθράκων, οι γεωφυσικές μέθοδοι που εφαρμόζονται μέσα σε γεωτρήσεις, παίζουν σημαντικό ρόλο στην αξιολόγηση των διατρηθέντων γεωλογικών σχηματισμών. Ειδικότερα αποσκοπούν στον καθορισμό της λιθολογίας και των φυσικών ιδιοτήτων των σχηματισμών, καθώς επίσης επιδιώκεται ο χαρακτηρισμός και η εκτίμηση της ποσότητας των ρευστών που περιέχουν. Οι φυσικές ποσότητες που μετρώνται μέσα στις γεωτρήσεις συνήθως παρίστανται σε διαγράμματα συναρτήσεως του βάθους, τα οποία ονομάζονται διαγραφίες (Well Logs).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αξιολογήθηκαν τα δεδομένα διαγραφιών δέκα γεωτρήσεων από την περιοχή Blackfoot της Αλμπέρτα στον Καναδά. Στις εν λόγω γεωτρήσεις πραγματοποιήθηκαν διαγραφίες διαμετρήματος, πορώδους (ακουστικές, πυκνότητας και νετρονίου), φυσικού δυναμικού, φυσικής ραδιενέργειας, καθώς και ηλεκτρικές διαγραφίες. Πραγματοποιήθηκε η απεικόνιση των δεδομένων και ο χαρακτηρισμός των σχηματισμών σε περατούς και μη, με βάση την εκτίμηση του όγκου των αργιλικών προσμίξεων από τον συνδυασμό των διαγραφιών φυσικού δυναμικού και φυσικής ραδιενέργειας. Επίσης, υπολογίστηκαν οι τιμές του ολικού πορώδους (ϕ) από τις διαγραφίες πυκνότητας και νετρονίου, του πρωτογενούς πορώδους (ϕ_{sonic}) από τις ακουστικές διαγραφίες καθώς και της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του νερού του σχηματισμού (R_w), μέσω της τεχνικής R_{wa} , αλλά και μέσω του συνδυασμού των διαγραφιών ηλεκτρικής αντίστασης και πορώδους (διαγράμματα Pickett και Hingle). Επιπλέον, δημιουργήθηκαν συνδυαστικά γραφήματα (cross-plots) για τα δεδομένα των ηλεκτρικών διαγραφιών και των διαγραφιών πορώδους από όπου προέκυψαν πληροφορίες για την ζώνη διείσδυσης του διηθήματος του γεωτρητικού πολφού, αλλά και την λιθολογία των σχηματισμών, αντίστοιχα. Τέλος, υπολογίστηκε ο βαθμός κορεσμού σε νερό (S_w) των περατών σχηματισμών, υπό την προϋπόθεση της απουσίας αργιλικών προσμίξεων και εντοπίστηκαν θέσεις με ικανοποιητικές συγκεντρώσεις υδρογονανθράκων (pay).

Με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης των δεδομένων των διαγραφιών, προέκυψε ότι οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του νερού του σχηματισμού (R_w) που υπολογίστηκαν από την τεχνική R_{wa} και τα διαγράμματα Pickett και Hingle παρουσιάζουν μικρές διαφορές μεταξύ τους. Σε 8 από τις 10 γεωτρήσεις εντοπίστηκαν, σε ασβεστολιθικής, κυρίως, σύστασης σχηματισμούς, θέσεις με ικανοποιητικές συγκεντρώσεις υδρογονανθράκων, ενώ παράλληλα υπάρχουν ενδείξεις για ύπαρξη φυσικού αερίου. Ωστόσο, στις θέσεις που υπάρχουν ενδείξεις, ο βαθμός κορεσμού σε νερό που έχει προσδιοριστεί στους περατούς σχηματισμούς, είναι πολύ πιθανόν να επηρεάζεται από την ύπαρξη αργιλικών προσμίξεων. Για το λόγο αυτό προτείνεται



η επανεξέταση των δεδομένων υπό την θεώρηση ύπαρξης αργιλικών προσμίξεων στους περατούς σχηματισμούς.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	i
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	v
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	vi
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο : ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Στόχος	1
1.2 Περίγραμμα των κεφαλαίων	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο : ΔΙΑΓΡΑΦΙΕΣ	3
2.1 Εισαγωγή	3
2.1.1 Τρόπος πραγματοποίησης γεωφυσικών μετρήσεων μέσα σε γεωτρήσεις	4
2.1.2 Είδη και μετρούμενα μεγέθη διαγραφιών	5
2.2 Διαγραφίες φυσικού δυναμικού (SP)	5
2.3 Διαγραφίες φυσικής ραδιενέργειας	6
2.3.1 Διαγραφίες ακτίνων γ (GR)	7
2.3.2 Διαγραφίες φασματοσκοπίας ακτίνων γ	8
2.4 Διαγραφίες νετρονίου	9
2.5 Διαγραφίες πυκνότητας	9
2.5.1 Διαγραφίες Litho-Density	10
2.6 Ακουστικές διαγραφίες	11
2.7 Ηλεκτρικές διαγραφίες	12
2.7.1 Ηλεκτρικές διαγραφίες εστίασης	13
2.7.2 Ηλεκτρικές διαγραφίες επαγωγής	14
2.8 Διαγραφίες διαμετρήματος	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο : ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	17
3.1 Θέση περιοχής μελέτης	17
3.2 Γεωλογία περιοχής	17
3.3 Περιγραφή γεωτρήσεων	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ^ο : ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	27
4.1 Εισαγωγή	27

4.2 Επιλογή τμημάτων των γεωτρήσεων και απεικόνιση διαγραφιών	28
4.3 Χαρακτηρισμός αργιλότητας	30
4.4 Αντιστοίχιση τιμών διαγραφιών πορώδους DP_{SS} (%) και NP_{SS} (%) σε μετρήσεις με αντιστάθμιση σε ασβεστόλιθο	32
4.5 Υπολογισμός του ολικού πορώδους ϕ (%) και του πρωτογενούς πορώδους ϕ_{sonic}	33
4.6 Απεικόνιση τιμών περατών σχηματισμών σε διαγράμματα ϕ_N - ϕ_D και ϕ_N - DT	34
4.7 Δημιουργία διαγραμμάτων ϕ - ϕ_{sonic}	40
4.8 Δημιουργία διαγραμμάτων ϕ και ϕ_{sonic} σε σχέση με το βάθος	41
4.9 Απεικόνιση τιμών περατών σχηματισμών σε διαγράμματα R_{IM}/R_{ID} - R_{SFL}/R_{ID}	44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο : ΕΥΡΕΣΗ ΒΑΘΜΟΥ ΚΟΡΕΣΜΟΥ ΣΕ ΝΕΡΟ (S_w)	47
5.1 Εισαγωγή	47
5.2 Καθορισμός του R_w	47
5.2.1 Καθορισμός του R_w μέσω της τεχνικής R_{wa}	47
5.2.2 Καθορισμός του R_w μέσω διαγραμμάτων Pickett και Hingle	50
5.2.2.1 Διάγραμμα Pickett	50
5.2.2.2 Διάγραμμα Hingle	53
5.3 Απεικόνιση τιμών S_w	55
5.3.1 Τιμές S_w της γεώτρησης 01-08	55
5.3.2 Τιμές S_w της γεώτρησης 01-17	56
5.3.3 Τιμές S_w της γεώτρησης 05-16	57
5.3.4 Τιμές S_w της γεώτρησης 08-08	58
5.3.5 Τιμές S_w της γεώτρησης 09-05	60
5.3.6 Τιμές S_w της γεώτρησης 09-17	61
5.3.7 Τιμές S_w της γεώτρησης 11-08	62
5.3.8 Τιμές S_w της γεώτρησης 13-16	63
5.3.9 Τιμές S_w της γεώτρησης 14-09	64
5.3.10 Τιμές S_w της γεώτρησης 16-08	65
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	67
6.1 Εισαγωγή	67
6.2 Συνολική εκτίμηση γεωτρήσεων	67
6.3 Προτάσεις	68
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	70
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	73

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

5.1	Τιμές $R_{wa(min)}$ (Ωm) των δέκα γεωτρήσεων	49
------------	--	-----------



ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

2.1 Η πρώτη διαγραφή που εκτελέστηκε (1927)	3
2.2 Αναπαράσταση καταγραφής της διαφοράς δυναμικού μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού συναρτήσει του βάθους	6
2.3 Φάσματα εκπομπής ακτίνων γ - ραδιενεργών στοιχείων	8
2.4 Συσκευή διαγραφιών πυκνότητας FDC	10
2.5 Σχηματική παράσταση της διείσδυσης του διηθήματος της λάσπης (a) καθώς και της μορφής της καμπύλης αντίστασης (b) σε ένα υδροφόρο στρώμα. Η πληρότητα (c) και η μορφή της καμπύλης αντίστασης (d) σε ένα πετρελαιοφόρο σχηματισμό	13
2.6 Σχηματική παράσταση της συσκευής Dual Laterolog	14
2.7 Συσκευές διαγραφιών διαμετρήματος με (a) 2, (b) 3, (c) 4 και (d) περισσότερους βραχίονες	15
3.1 Χάρτες απεικόνισης (a) των γεωγραφικών ορίων του Καναδά (b) της περιοχής μελέτης και (c) της θέσης πραγματοποίησης των μετρήσεων στο πεδίο Blackfoot	17
3.2 Σχηματική αναπαράσταση ιζηματογενούς λεκάνης που δομείται από αποθέσεις ποτάμιων και θαλάσσιων συστημάτων (Incised valley)	18
3.3 Στρωματογραφική ακολουθία του Πεδίου Blackfoot	19
3.4 Απεικόνιση της κεφαλής των γεωτρήσεων στην επιφάνεια (S – κίτρινο χρώμα) και του πυθμένα τους (B – κόκκινο χρώμα) πάνω σε δορυφορικό χάρτη του Google Earth	21
3.5 Απεικόνιση της κεφαλής των γεωτρήσεων 01-17, 04-16, 08-08, 11-08, 14-09 και 16-08 στην επιφάνεια (S – κίτρινο χρώμα) και του πυθμένα τους (B – κόκκινο χρώμα) πάνω σε δορυφορικό χάρτη του Google Earth	22
3.6 Απεικόνιση της κεφαλής των γεωτρήσεων (a) 05-16, 09-17, 12-16, 13-16 και (b) 01-08, 09-05 στην επιφάνεια (S – κίτρινο χρώμα) και του πυθμένα τους (B – κόκκινο χρώμα) πάνω σε δορυφορικό χάρτη του Google Earth	22
3.7 Γεωλογική και γεωφυσική ερμηνεία δεδομένων σεισμικής ανάκλασης για τη σύνθετη γλαυκονιτική λεκάνη του πεδίου Blackfoot	25
3.8 Οριζόντιες σεισμικές τομές από (a) το ανώτερο τμήμα της ιζηματογενούς λεκάνης και (b) το κατώτερο τμήμα της ιζηματογενούς λεκάνης του πεδίου Blackfoot. Οι μαύρες γραμμές οριοθετούν τα κανάλια	25

4.1 Γεώτρηση 01-08. Απεικόνιση (α) διαγραφιών φυσικού δυναμικού (SP) και φυσικής ραδιενέργειας (GR), (b) διαγραφιών πυκνότητας (DPSS) και νετρονίου (NPSS), (c) ηλεκτρικών διαγραφιών (SFL, ILD, ILM) και (d) της ακουστικής διαγραφίας (DT). Ο κατακόρυφος άξονας αποτελεί το μετρούμενο βάθος (measure depth) σε m	29
4.2 Απεικόνιση αντιστοίχισης τιμών I_{sh} με τις τιμές V_{sh} επάνω σε διάγραμμα I_{sh} - V_{sh}	30
4.3 Γεώτρηση 01-08. Απεικόνιση των διαγραφιών SP (mV) και GR (API), των σημείων SP_{ss} , SP_{sh} , GR_{ss} , GR_{sh} και των περατών (πράσινο και γκρι χρώμα) σχηματισμών με βάση τον υπολογισμένο όγκο των αργιλικών προσμίξεων. Ο κατακόρυφος άξονας αποτελεί το μετρούμενο βάθος (measure depth) σε m.	31
4.4 Απεικόνιση της αντιστοίχισης των τιμών με αντιστάθμιση σε ψαμμίτη (άξονας x) σε τιμές με αντιστάθμιση σε ασβεστόλιθο (άξονας y)	32
4.5 Διαγράμματα (α) ϕ_N - ϕ_D και (b) ϕ_N -DT για τις περατές ζώνες της γεώτρησης 01-08	34
4.6 Διαγράμματα (α) ϕ_N - ϕ_D και (b) ϕ_N -DT για τις περατές ζώνες της γεώτρησης 01-17	35
4.7 Διαγράμματα (α) ϕ_N - ϕ_D και (b) ϕ_N -DT για τις περατές ζώνες της γεώτρησης 05-16	35
4.8 Διαγράμματα (α) ϕ_N - ϕ_D και (b) ϕ_N -DT για τις περατές ζώνες της γεώτρησης 08-08	36
4.9 Διαγράμματα (α) ϕ_N - ϕ_D και (b) ϕ_N -DT για τις περατές ζώνες της γεώτρησης 09-05	36
4.10 Διαγράμματα (α) ϕ_N - ϕ_D και (b) ϕ_N -DT για τις περατές ζώνες της γεώτρησης 09-17	37
4.11 Διαγράμματα (α) ϕ_N - ϕ_D και (b) ϕ_N -DT για τις περατές ζώνες της γεώτρησης 11-08	37
4.12 Διαγράμματα (α) ϕ_N - ϕ_D και (b) ϕ_N -DT για τις περατές ζώνες της γεώτρησης 13-16	38
4.13 Διαγράμματα (α) ϕ_N - ϕ_D και (b) ϕ_N -DT για τις περατές ζώνες της γεώτρησης 14-09	38
4.14 Διαγράμματα (α) ϕ_N - ϕ_D και (b) ϕ_N -DT για τις περατές ζώνες της γεώτρησης 16-08	39
4.15 Διαγράμματα ϕ (%) - ϕ_{sonic} (%) των γεωτρήσεων (α) 01-08 και (b) 01-17	40
4.16 Διαγράμματα ϕ (%) - ϕ_{sonic} (%) των γεωτρήσεων (α) 05-16 και (b) 08-08	40
4.17 Διαγράμματα ϕ (%) - ϕ_{sonic} (%) των γεωτρήσεων (α) 09-05 και (b) 09-17	41
4.18 Διαγράμματα ϕ (%) - ϕ_{sonic} (%) των γεωτρήσεων (α) 11-08 και (b) 13-16	41
4.19 Διαγράμματα ϕ (%) - ϕ_{sonic} (%) των γεωτρήσεων (α) 14-09 και (b) 16-08	41
4.20 Διαγράμματα ϕ και ϕ_{sonic} σε σχέση με το βάθος των γεωτρήσεων (α) 01-08, (b) 01-17 και (c) 05-16. Ο κατακόρυφος άξονας αποτελεί το μετρούμενο βάθος (measure depth) σε m ..	42
4.21 Διαγράμματα ϕ και ϕ_{sonic} σε σχέση με το βάθος των γεωτρήσεων (α) 08-08, (b) 09-05 και (c) 09-17. Ο κατακόρυφος άξονας αποτελεί το μετρούμενο βάθος (measure depth) σε m ..	42

4.22	Διαγράμματα ϕ και ϕ_{sonic} σε σχέση με το βάθος των γεωτρήσεων (a) 11-18, (b) 13-16 και (c) 14-09. Ο κατακόρυφος άξονας αποτελεί το μετρούμενο βάθος (measure depth) σε m	43
4.23	Διάγραμμα ϕ και ϕ_{sonic} σε σχέση με το βάθος της γεώτρησης 16-08. Ο κατακόρυφος άξονας αποτελεί το μετρούμενο βάθος (measure depth) σε m	43
4.24	Διαγράμματα $R_{IM}/R_{ID} - R_{SFL}/R_{ID}$ των γεωτρήσεων (a) 01-08 και (b) 01-17	44
4.25	Διαγράμματα $R_{IM}/R_{ID} - R_{SFL}/R_{ID}$ των γεωτρήσεων (a) 05-16 και (b) 08-08	44
4.26	Διαγράμματα $R_{IM}/R_{ID} - R_{SFL}/R_{ID}$ των γεωτρήσεων (a) 09-05 και (b) 09-17	45
4.27	Διαγράμματα $R_{IM}/R_{ID} - R_{SFL}/R_{ID}$ των γεωτρήσεων (a) 11-08 και (b) 13-16	45
4.28	Διαγράμματα $R_{IM}/R_{ID} - R_{SFL}/R_{ID}$ των γεωτρήσεων (a) 14-09 και (b) 16-08	46
5.1	Διάγραμμα Pickett για το σύνολο των γεωτρήσεων	52
5.2	Διάγραμμα Hingle για το σύνολο των γεωτρήσεων	54
5.3	Διάγραμμα τιμών S_w της γεώτρησης 01-08 σε σχέση με το βάθος	56
5.4	Διάγραμμα τιμών S_w της γεώτρησης 01-17 σε σχέση με το βάθος	57
5.5	Διάγραμμα τιμών S_w της γεώτρησης 05-16 σε σχέση με το βάθος	58
5.6	Διάγραμμα τιμών S_w της γεώτρησης 08-08 σε σχέση με το βάθος	59
5.7	Διάγραμμα τιμών S_w της γεώτρησης 09-05 σε σχέση με το βάθος	60
5.8	Διάγραμμα τιμών S_w της γεώτρησης 09-17 σε σχέση με το βάθος	61
5.9	Διάγραμμα τιμών S_w της γεώτρησης 11-08 σε σχέση με το βάθος	62
5.10	Διάγραμμα τιμών S_w της γεώτρησης 13-16 σε σχέση με το βάθος	63
5.11	Διάγραμμα τιμών S_w της γεώτρησης 14-09 σε σχέση με το βάθος	64
5.12	Διάγραμμα τιμών S_w της γεώτρησης 16-08 σε σχέση με το βάθος	65

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Στόχος

Στόχο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η αξιολόγηση των δεδομένων γεωφυσικών διαγραφιών (loggings) δέκα γεωτρήσεων από την περιοχή Blackfoot της Αλμπέρτα στον Καναδά. Σε πρώτο στάδιο, επιλέχθηκαν τα τμήματα των γεωτρήσεων που αντιστοιχούσαν στις θέσεις ενδιαφέροντος, με σκοπό την καλύτερη διαχείριση και απεικόνισή των δεδομένων τους. Έπειτα, από τις διαγραφίες κάθε γεώτρησης, επιλέχθηκαν οι διαγραφίες πορώδους (ακουστικές, πυκνότητας και νετρονίου), φυσικού δυναμικού, φυσικής ραδιενέργειας, καθώς και ηλεκτρικές διαγραφίες προς περαιτέρω επεξεργασία.

Με τη χρήση των παραπάνω διαγραφιών πραγματοποιήθηκε χαρακτηρισμός περατότητας του σχηματισμού για κάθε γεώτρηση με βάση την εκτίμηση του όγκου των αργιλικών προσμίξεων, υπολογισμός του ολικού πορώδους (ϕ), του πρωτογενούς πορώδους (ϕ_{sonic}) και της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του νερού του σχηματισμού (R_w). Ακολούθως, δημιουργήθηκαν συνδυαστικά γραφήματα (cross-plots) ϕ_N - ϕ_D , ϕ_N -DT, ϕ - ϕ_{sonic} , και R_{IM}/R_{ID} - R_{SFL}/R_{ID} τα οποία παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τη γεωλογία και τη ζώνη διεύθυνσης του διηθήματος του γεωτρητικού πολφού. Τέλος, υπολογίστηκε ο βαθμός κορεσμού σε νερό (S_w) των περατών σχηματισμών υπό την προϋπόθεση της απουσίας αργιλικών προσμίξεων και εντοπίστηκαν θέσεις με ικανοποιητικές συγκεντρώσεις υδρογονανθράκων (pay).

1.2 Περίγραμμα των κεφαλαίων

Κατά την παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε η αξιολόγηση με γεωφυσικές μεθόδους των σχηματισμών που διατρήθηκαν από δέκα γεωτρήσεις στην περιοχή Blackfoot, της Αλμπέρτα στον Καναδά. Στο δεύτερο κεφάλαιο αναφέρονται επιγραμματικά τα σημαντικότερα στοιχεία κάθε γεωφυσικής μεθόδου (διαγραφή). Ειδικότερα περιγράφονται ο τρόπος που εκτελείται, τα όργανα που χρησιμοποιούνται και τα φυσικά μεγέθη που μετρά.

Ακολούθως, το τρίτο κεφάλαιο αφορά στη γεωλογία της περιοχής. Απεικονίζεται σχηματικά στο χάρτη το ακριβές σημείο του πεδίου Blackfoot όπου πραγματοποιήθηκαν οι γεωτρήσεις και αναλύεται λεπτομερώς η γεωλογία των σχηματισμών, καθώς επίσης απεικονίζονται και οι θέσεις της κεφαλής και του πυθμένα των γεωτρήσεων. Ενώ στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι διαγραφίες και τα στάδια επεξεργασίας των δεδομένων τους, καθώς και τα

διαγράμματα και συνδυαστικά γραφήματα (cross-plots). Στο πέμπτο κεφάλαιο, αναλύεται ο υπολογισμός της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του νερού του σχηματισμού (R_w) με τη χρήση της τεχνικής R_{wa} αλλά και μέσω του συνδυασμού των διαγραφιών ηλεκτρικής αντίστασης και πορώδους (διαγράμματα Pickett και Hingle). Επίσης, υπολογίζεται και απεικονίζεται ο βαθμός κορεσμού σε νερό (S_w) σε σχέση με το βάθος για κάθε γεώτρηση όπως και οι θέσεις με ικανοποιητικές συγκεντρώσεις υδρογονανθράκων (pay). Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα τελικά συμπεράσματα από την επεξεργασία των δεδομένων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

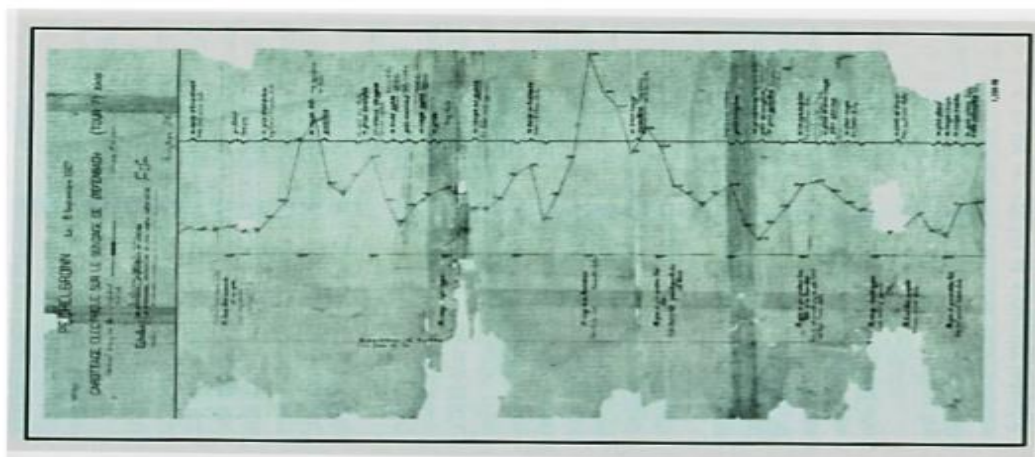
ΔΙΑΓΡΑΦΙΕΣ

2.1 Εισαγωγή

Γεωφυσική διαγραφή είναι μία συνεχής καταγραφή μετρήσεων μέσα σε γεωτρήσεις και αποκρίνεται σε μεταβολές φυσικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων που έχουν διατρηθεί. Αρχικά τα διαγράμματα ήταν σε έντυπη μορφή, ενώ τα τελευταίου τύπου διαγράμματα καταγράφονται σε ψηφιακή μορφή.

Σκοπός των μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης, οι οποίες παίζουν σημαντικό ρόλο στην μελέτη της δομής των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της γης, είναι ο εντοπισμός γεωλογικών συνθηκών που ευνοούν το σχηματισμό κοιτασμάτων πετρελαίου, φυσικού αερίου, μεταλλευμάτων, ορυκτών ανθράκων κ.λπ. Σημαντικός είναι επίσης ο ρόλος των γεωφυσικών μεθόδων στην αξιολόγηση γεωλογικών σχηματισμών. Για την αξιολόγηση αυτή χρησιμοποιούνται κατάλληλα όργανα τα οποία τοποθετούνται μέσα στη γεώτρηση και απέναντι από τον υπό μελέτη σχηματισμό. Οι μέσα σε γεωτρήσεις μετρούμενες φυσικές ποσότητες συνήθως παρίστανται σε διαγράμματα συναρτήσεως του βάθους, τα οποία ονομάζονται διαγραφίες (Well Logs). Η χρήση των διαγραφιών είναι ευρεία στην έρευνα υδρογονανθράκων.

Ιστορικά, το 1912 ο Conrad Schlumberger θέτει αρχικά την ιδέα χρησιμοποίησης ηλεκτρικών μετρήσεων για την αξιολόγηση γεωλογικών σχηματισμών. Έπειτα, το 1919 ο ίδιος και ο αδελφός του Marcel ξεκινούν εφαρμογές σε διαγραφίες γεωτρήσεων.



Σχήμα 2.1 : Η πρώτη διαγραφή που εκτελέστηκε (1927) (Βαφείδης, 2011).

Η πρώτη διαγραφή ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης πραγματοποιήθηκε στη Γαλλία το 1927 (Σχήμα 2.1), ενώ οι καταγραφές ακτίνων γ και νετρονίων ξεκίνησαν το 1941.

2.1.1 Τρόπος πραγματοποίησης γεωφυσικών μετρήσεων μέσα σε γεωτρήσεις

Οι διαγραφίες λαμβάνονται με άμεση επαφή των οργάνων στα τοιχώματα των γεωτρήσεων. Ο απαραίτητος εξοπλισμός για την πραγματοποίηση των μετρήσεων είναι τα γεωφυσικά όργανα, το καλώδιο, και το όχημα με τις συσκευές καταγραφής.

Το όχημα καταγραφής είναι συνήθως ένα βαρύ φορτηγό που πρέπει να μεταφέρει το καλώδιο, το τύμπανο περιέλιξης του καλωδίου, τον κύλινδρο με τα γεωφυσικά όργανα και το καταγραφικό όργανο. Το καλώδιο είναι μεγάλης αντοχής, οπλισμένο με δύο στρώματα ατσάλινου σύρματος και με επτά μονωμένους χάλκινους πυρήνες εσωτερικά. Το καταγραφικό όργανο είναι κατάλληλο για την ταυτόχρονη καταγραφή των μετρήσεων σε μαγνητικό μέσο (π.χ. μαγνητική ταινία, σκληρός δίσκος) ή στο χαρτί.

Τα γεωφυσικά όργανα βρίσκονται μέσα σε ατσάλινο ή πλαστικό σωλήνα ο οποίος είναι εξοπλισμένος με ατσάλινα ελατήρια (βραχίονες) για να πιέζουν τα όργανα πάνω στα τοιχώματα της γεώτρησης. Μέσα στο σωλήνα εκτός από τους αισθητήρες υπάρχουν και ειδικά εξαρτήματα όπως πηγές εκπομπής ακτίνων γ ή νετρονίων. Για τις ηλεκτρικές διαγραφίες χρησιμοποιούνται δακτυλοειδή ηλεκτρόδια από μόλυβδο (Βαφειδής, 2011). Τέλος, μέσα στο σωλήνα είναι εγκατεστημένος ηλεκτρονικός εξοπλισμός κατάλληλος για την ρύθμιση των γεωφυσικών οργάνων, για την προκαταρκτική επεξεργασία των μετρήσεων (π.χ. ενισχυτές, σύστημα ψηφιοποίησης) και για την μεταφορά των ψηφιοποιημένων σημάτων δια μέσου του καλωδίου στην επιφάνεια.

Ο κύλινδρος με τα γεωφυσικά όργανα τοποθετείται μέσα στο φρέαρ απέναντι από τον υπό μελέτη σχηματισμό διαμέσου της στήλης της λάσπης. Συνήθως οι μετρήσεις πραγματοποιούνται κατά την άνοδο του κυλίνδρου προς την επιφάνεια λόγω του ότι σ' αυτή τη περίπτωση η εκτίμηση του βάθους είναι ακριβέστερη. Τα όργανα εισάγονται μέσα στις γεωτρήσεις κατά τις περιόδους διακοπής των εργασιών διάτρησης και όταν αυτές είναι πλήρεις ρευστών. Μερικές από τις μεθόδους είναι δυνατόν να εφαρμοσθούν ακόμη και μετά τη σωλήνωση των γεωτρήσεων.

Τέλος, τα ψηφιοποιημένα σήματα (μετρήσεις) μεταφέρονται μέσω του καλωδίου στην επιφάνεια όπου γίνονται η καταγραφή και η επεξεργασία τους. Στην συνέχεια ακολουθεί ο

έλεγχος των μετρήσεων και η προκαταρκτική αξιολόγηση σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Η τελική αξιολόγηση και η ερμηνεία των διαγραφών γίνεται στα γραφεία της εταιρείας.

2.1.2 Είδη και μετρούμενα μεγέθη διαγραφών

Τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα είδη των γεωφυσικών διαγραφών είναι :

Λιθολογίας

- Φυσικού δυναμικού
- Φυσικής ραδιενέργειας

Πορώδους

- Νετρονίου
- Πυκνότητας
- Ακουστικές

Ηλεκτρικές

- Εστίασης
- Επαγωγής

Άλλες

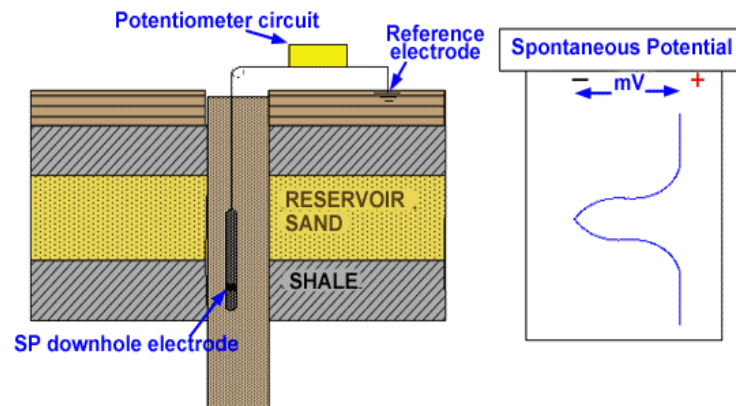
- Διαμετρήματος
- Θερμοκρασίας

Κάποια από τα μετρούμενα μεγέθη των διαγραφών είναι :

- Ηλεκτρικές ιδιότητες
- Φυσική ραδιενέργεια
- Σεισμική ταχύτητα
- Πυκνότητα
- Θερμοκρασία
- Βάθος

2.2 Διαγραφίες φυσικού δυναμικού (SP)

Η καμπύλη φυσικού δυναμικού είναι η καταγραφή συναρτήσει του βάθους της διαφοράς δυναμικού μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού εκ των οποίων το ένα είναι κινητό (μέσα στη γεώτρηση) και το άλλο είναι μόνιμα τοποθετημένο στην επιφάνεια (Σχήμα 2.2).



Σχήμα 2.2 : Αναπαράσταση καταγραφής της διαφοράς δυναμικού μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού συναρτήσει του βάθους (Τσούρλος, 2018).

Η καταγραφή του φυσικού δυναμικού (SP) περιγράφει το φυσικό ηλεκτρικό δυναμικό που παράγεται από την αλληλεπίδραση του νερού των σχηματισμών (Connate water), της αγωγίμης γεωτρητικής λάσπης και κάποιων πετρωμάτων που έχουν ικανότητα να συλλέγουν ιόντα (π.χ. αργιλοί σχιστόλιθοι).

Το φυσικό δυναμικό που παρατηρείται στις γεωτρήσεις είναι ηλεκτροκινητικής και ηλεκτροχημικής προέλευσης. Το ηλεκτροχημικό δυναμικό, το οποίο πιστεύεται πως συνεισφέρει σε μεγαλύτερο ποσοστό στις μετρήσεις, αποτελείται από: το δυναμικό διάχυσης και το δυναμικό μεμβράνης. Το δυναμικό διάχυσης εγείρεται όταν δύο ηλεκτρολύτες διαφορετικής χημικής δραστηριότητας είναι διαχωρισμένοι από ένα καθαρό πορώδες μέσο. Η δραστηριότητα σχετίζεται και με τον αριθμό και με το είδος των ιόντων. Ενώ το δυναμικό μεμβράνης εγείρεται όταν δύο ηλεκτρολύτες διαφορετικής συγκέντρωσης διαχωρίζονται από ένα πορώδες μέσο, όπου τα τοιχώματα των πόρων αποκτούν ένα διπλό ηλεκτρικό στρώμα (Bassiouni, 1994).

Οι εφαρμογές των διαγραφιών αυτών είναι :

- Διαχωρισμός περατών σχηματισμών (ψαμμίτης, ασβεστόλιθος, δολομίτης) από μη περατούς αργιλικούς σχιστόλιθους.
- Εκτίμηση του όγκου αργιλικών προσμίξεων περατών σχηματισμών
- Υπολογισμός της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του νερού του σχηματισμού, R_w .

2.3 Διαγραφίες φυσικής ραδιενέργειας

Η διαγραφή ακτίνων γ (Gamma Ray Log) και η διαγραφή φασματοσκοπίας ακτίνων γ (Natural Gamma Ray Spectrometry Log, NGS) αποτελούν τις κυριότερες διαγραφίες φυσικής

ραδιενέργειας. Η φυσική ραδιενέργεια ανιχνεύεται με απαριθμητή Geiger-Muller ή με απαριθμητή σπινθηρισμών. Μετρούμενο μέγεθος είναι ο αριθμός των ακτίνων γ (φωτονίων) που ανιχνεύει ο απαριθμητής στην μονάδα του χρόνου. Η μονάδα μέτρησης της φυσικής ραδιενέργειας η οποία χρησιμοποιείται στις διαγραφίες ακτίνων γ είναι το API.

Οι εφαρμογές των διαγραφιών φυσικής ραδιενέργειας είναι :

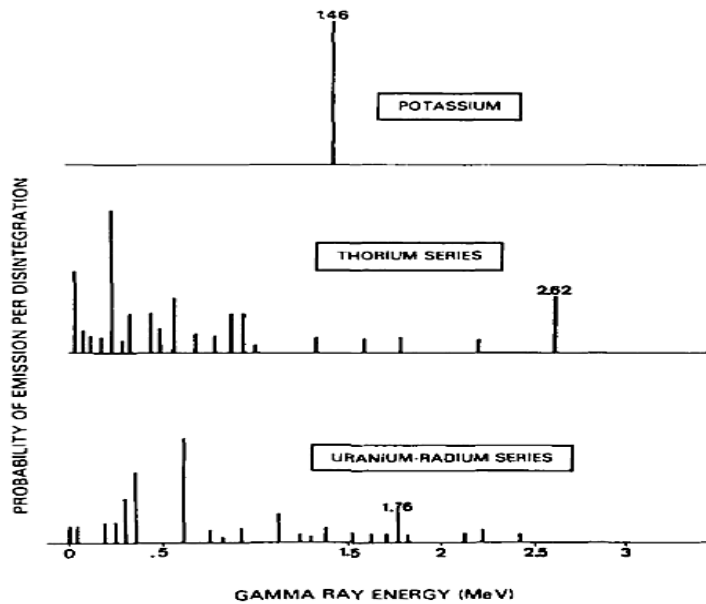
- Διαχωρισμός περατών πετρωμάτων (ψαμμίτης, ασβεστόλιθος, δολομίτης) από μη περατούς αργιλικούς σχιστόλιθους και αργίλους.
- Εκτίμηση του όγκου αργιλικών προσμίξεων περατού σχηματισμού
- Συσχέτιση γεωτρήσεων (είναι δυνατόν να καταγραφεί και σε σωληνωμένες γεωτρήσεις),
- Αντικαθιστά τη διαγραφή φυσικού δυναμικού όταν η γεωτρητική λάσπη έχει υψηλή συγκέντρωση διαλυμένων αλάτων, ή έχει σαν βάση το πετρέλαιο

2.3.1 Διαγραφίες ακτίνων γ (GR)

Η διαγραφή ακτίνων γ (GR) σε ιζηματογενείς σχηματισμούς συνήθως δίνει πληροφορίες σχετικά με την ύπαρξη αργιλικών προσμίξεων. Αυτό οφείλεται στο ότι τα ραδιενεργά στοιχεία τείνουν να συγκεντρώνονται στα αργιλικά ορυκτά. Ιζηματογενείς σχηματισμοί χωρίς αργιλικές προσμίξεις εμφανίζουν χαμηλές τιμές φυσικής ραδιενέργειας εκτός αν το νερό του σχηματισμού περιέχει ραδιενεργά άλατα.

Μπορούν να καταγραφούν σε γεωτρήσεις μεγάλου βάθους, κάτι το οποίο τις καθιστά πολύ χρήσιμες ως καμπύλες συσχέτισης στην ολοκλήρωση και τις εργασίες επεξεργασίας. Συχνά χρησιμοποιούνται συμπληρωματικά με τις διαγραφίες φυσικού δυναμικού (SP) ή/και σε αντικατάσταση αυτών, σε περίπτωση όπου η διατρητική λάσπη περιέχει άλατα, αέρα ή έχει ως βάση το πετρέλαιο. Σε κάθε περίπτωση, είναι χρήσιμες για τη γενική συσχέτιση γεωτρήσεων (Schlumberger, 1991).

Σχεδόν όλη η ακτινοβολία γ που συναντήθηκε στη γη εκπέμπεται από το ραδιενεργό κάλιο, ισότοπο ατομικού βάρους 40, και από τα ραδιενεργά στοιχεία των σειρών του ουρανίου και του θορίου.



Σχήμα 2.3 : Φάσματα εκπομπής ακτίνων γ - ραδιενεργών στοιχείων (ευγενική προσφορά του Schlumberger) (Serra, 1984).

Οι ακτίνες γ που εκπέμπονται από τις τρεις σειρές μεταστοιχείωσης αυτών των στοιχείων έχουν διάφορες διακριτές ενέργειες. Στο Σχήμα 2.3 φαίνονται τα τρία αντίστοιχα φάσματα εκπομπής ακτίνων γ.

2.3.2 Διαγραφίες φασματοσκοπίας ακτίνων γ

Η διαγραφή φασματοσκοπίας ακτίνων γ (NGS) καταγράφει όπως και η διαγραφή ακτίνων γ την φυσική ραδιενέργεια των σχηματισμών. Ενώ με τη δεύτερη μετράται η ολική φυσική ραδιενέργεια, με την πρώτη καθορίζεται το ενεργειακό φάσμα των ακτίνων γ. Από τη φασματική κατανομή των ακτίνων γ προσδιορίζεται η περιεκτικότητα των ραδιενεργών στοιχείων. Η φυσική ραδιενέργεια των ιζηματογενών πετρωμάτων κυρίως προέρχεται από τη μεταστοιχείωση τριών ραδιενεργών στοιχείων :

- του K^{40} με χρόνο υποδιπλασιασμού $1,3 \times 10^9$ χρόνια,
- του U^{238} με χρόνο υποδιπλασιασμού $4,4 \times 10^9$ χρόνια και
- του Th^{232} με χρόνο υποδιπλασιασμού $1,4 \times 10^{10}$ χρόνια.

Χρησιμοποιείται ανιχνευτής σπινθηρισμού ιωδιούχου νατρίου ο οποίος κατά τη διάρκεια της καταγραφής συγκρατείται έναντι του τοιχώματος της γεώτρησης με ένα τοξωτό ελατήριο. Οι ακτίνες γ που εκπέμπονται από τον σχηματισμό σπάνια φτάνουν απευθείας στον ανιχνευτή, καθώς διαχέονται και χάνουν ενέργεια μέσω των αλληλεπιδράσεων τους με τον σχηματισμό (Schlumberger, 1991).

2.4 Διαγραφίες νετρονίου

Οι διαγραφίες νετρονίου χρησιμοποιούνται κυρίως στην περιχαράκωση (delineation) πορώδων σχηματισμών και στον υπολογισμό του πορώδους τους. Αποκρίνονται κυρίως στη ποσότητα υδρογόνου η οποία υπάρχει στον υπό μελέτη σχηματισμό. Έτσι σε σχηματισμούς των οποίων οι πόροι πληρούνται από νερό ή πετρέλαιο, οι διαγραφίες νετρονίου δίνουν ενδείξεις του πορώδους. Επίσης από τον συνδυασμό τους με άλλες διαγραφίες πορώδους, προκύπτουν πληροφορίες σχετικά με τη λιθολογία του σχηματισμού. Είναι δυνατόν να υπολογισθεί το πορώδες με μεγαλύτερη ακρίβεια όταν συνδυασθούν περισσότερες από μία διαγραφίες πορώδους (π.χ. διαγραφίες νετρονίου και πυκνότητας). Τέλος, η κύρια εφαρμογή των διαγραφιών νετρονίου είναι ο εντοπισμός ταμιευτήρα φυσικού αερίου (σε συνδυασμό με τις διαγραφίες πυκνότητας).

Οι διαγραφίες αυτές είναι συνήθως ρυθμισμένες σε μονάδες πορώδους. Η ρύθμιση της συσκευής πραγματοποιείται με δείγμα ψαμμίτη ή ασβεστόλιθου. Αν ο υπό μελέτη σχηματισμός είναι διαφορετικής λιθολογίας από το πέτρωμα με το οποίο έγινε η ρύθμιση, τότε η τιμή του πορώδους πρέπει να διορθωθεί. Συνήθως χρησιμοποιείται η συσκευή διαγραφιών νετρονίου CNL, η οποία και έχει τα εξής χαρακτηριστικά :

- Ραδιενεργό πηγή νετρονίων
- Δύο ανιχνευτές θερμικών νετρονίων
- Χρησιμοποιείται σε σωληνωμένες ή μη γεωτρήσεις
- Ταχύτητα 20-30 fpm
- Ανάλυση 2 ft
- Διεισδυτική ικανότητα 1 ft

Μετρούμενο μέγεθος αποτελεί ο λόγος του αριθμού των νετρονίων που φθάνουν στον κοντινό ανιχνευτή προς τον αντίστοιχο αριθμό νετρονίων στον μακρινό ανιχνευτή στην μονάδα του χρόνου. Ο παραπάνω λόγος εξαρτάται από το πορώδες και τη λιθολογική σύσταση.

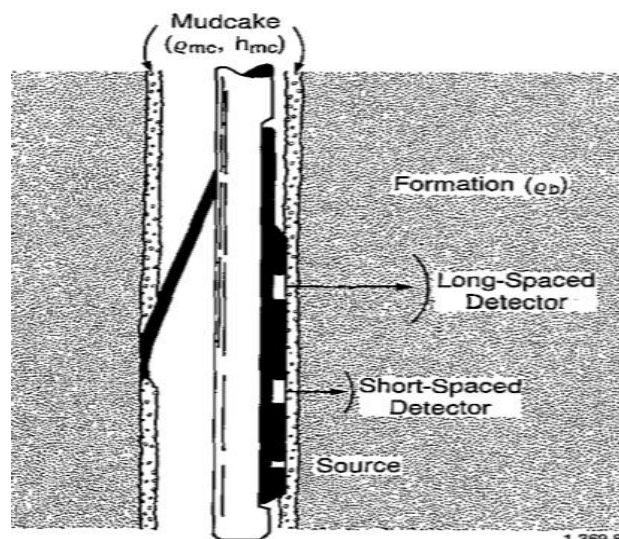
2.5 Διαγραφίες πυκνότητας

Οι διαγραφίες αυτές είναι γραφήματα της πυκνότητας συναρτήσει του βάθους από τις οποίες κυρίως προσδιορίζεται το πορώδες, αλλά και η πυκνότητα του σχηματισμού. Δίνουν χρήσιμες πληροφορίες για την ερμηνεία των βαρυτικών και σεισμικών δεδομένων και σε συνδυασμό με τις ακουστικές διαγραφίες χρησιμοποιούνται στο υπολογισμό των μηχανικών ιδιοτήτων των σχηματισμών.

Για τη μέτρηση της πυκνότητας χρησιμοποιούνται ανιχνευτές ακτίνων γ και ραδιενεργός πηγή (π.χ. Co^{60} , Cs^{137}) η οποία εκπέμπει ακτινοβολία γ γνωστής έντασης. Η ένταση των διαχεόμενων ακτίνων γ είναι αντιστρόφως ανάλογη της πυκνότητας των ηλεκτρονίων και η πυκνότητα του σχηματισμού προκύπτει από σχέση η οποία συνδέει την πυκνότητα του σχηματισμού και την πυκνότητα των ηλεκτρονίων. Η συσκευή διαγραφιών πυκνότητας που χρησιμοποιείται συνήθως είναι η FDC (Compensated Formation Density log) (Σχήμα 2.4). Η συσκευή αυτή ρυθμίζεται ώστε να μετρά τη σωστή πυκνότητα σε ψαμμίτη (ή ασβεστόλιθο) 100% κορεσμένο σε νερό. Το αποτέλεσμα αυτής της ρύθμισης είναι η εισαγωγή συστηματικού σφάλματος για σχηματισμούς διαφορετικής λιθολογίας.

Εφαρμογές των διαγραφιών πυκνότητας αποτελούν :

- Εντοπισμός ταμιευτήρα φυσικού αερίου (σε συνδυασμό με τις διαγραφίες νετρονίου)
- Εκτίμηση μηχανικών ιδιοτήτων (σε συνδυασμό με τις ακουστικές διαγραφίες)
- Ερμηνεία δεδομένων σεισμικής ανάκλασης και βαρυτικής μεθόδου



Σχήμα 2.4 : Συσκευή διαγραφιών πυκνότητας FDC (Schlumberger, 1991).

2.5.1 Διαγραφίες Litho-Density

Οι διαγραφίες Litho-Density αποτελούν βελτιωμένη έκδοση των διαγραφιών πυκνότητας όπου εκτός από την πυκνότητα, μετράται και ο δείκτης φωτοηλεκτρικής απορρόφησης (photoelectric absorption index) του σχηματισμού P_e . Είναι γνωστόν ότι η πυκνότητα ρ_b εξαρτάται κυρίως από το πορώδες και κατά δεύτερο λόγο από το είδος του πετρώματος και του ρευστού. Ο δείκτης φωτοηλεκτρικής απορρόφησης P_e εξαρτάται κυρίως από το είδος του πετρώματος και κατά δεύτερο λόγο από το πορώδες και το είδος του ρευστού.

Η συσκευή Litho-Density (LDT) είναι παρόμοια με την συσκευή διαγραφιών πυκνότητας (FDC tool). Στη συσκευή Litho-Density, ραδιενεργός πηγή εκπέμπει μονοχρωματική ακτινοβολία γ (662 KeV) και δύο ανιχνευτές απαριθμούν ακτίνες γ ενέργειας από 0 - 662 KeV.

Η ένταση των υψηλότερης ενέργειας ακτίνων γ (περιοχή φαινομένου Compton) είναι αντιστρόφως ανάλογη της πυκνότητας ηλεκτρονίων, δηλαδή η ένταση μειώνεται όταν αυξάνεται η πυκνότητα του σχηματισμού. Η ένταση των χαμηλότερης ενέργειας ακτίνων γ (περιοχή φωτοηλεκτρικού φαινομένου), είναι επίσης αντιστρόφως ανάλογη της πυκνότητας ηλεκτρονίων αλλά και της φωτοηλεκτρικής απορρόφησης. Από τη σύγκριση του φάσματος στις δύο περιοχές προσδιορίζεται ο δείκτης φωτοηλεκτρικής απορρόφησης, P_e .

2.6 Ακουστικές διαγραφίες

Οι τεχνικές των ακουστικών διαγραφιών περιλαμβάνουν τη χρήση μορφοτροπέα (transducer) για τη μετάδοση του ακουστικού κύματος μέσω του υγρού της γεώτρηση στα πετρώματα που την περιβάλλουν. Χρησιμοποιούνται διάφορα είδη ακουστικών διαγραφιών τα οποία διαφέρουν στις συχνότητες που επιλέγονται, στις μεθόδους καταγραφής του σήματος και στον σκοπό για τον οποίο πραγματοποιούνται. Αλλά όλα τα είδη απαιτούν τη ύπαρξη υγρού στη γεώτρηση, ώστε να φέρει σε επαφή τη πηγή ακουστικών κυμάτων με τα πετρώματα που την περιβάλλουν (Keys, 1990).

Στην απλούστερη μορφή της, η συσκευή ακουστικών διαγραφών αποτελείται από πηγή ακουστικών κυμάτων συχνότητας 20 KHz και δύο δέκτες πιεζοηλεκτρικού τύπου. Η ακουστική διαγραφή είναι η καταγραφή του χρόνου διαδρομής Δt , (Interval ή Transit time) και του συνολικού χρόνου διαδρομής του ακουστικού κύματος (Integrated transit time) ο οποίος ισούται με το άθροισμα των χρόνων διαδρομής Δt που αναφέρονται στον ίδιο σχηματισμό. Ο συνολικός χρόνος διαδρομής χρησιμοποιείται στην επεξεργασία και στην ερμηνεία των σεισμικών καταγραφών ανάκλασης.

Σύμφωνα με την αρχή λειτουργίας τους, το ακουστικό κύμα παράγεται από την πηγή, διαδίδεται μέσα στη γεωτρητική λάσπη και προσπίπτει στο τοίχωμα του φρεατίου όπου εμφανίζονται φαινόμενα ανάκλασης και διάθλασης. Μέσα στην γεωτρητική λάσπη διαδίδονται τα απευθείας κύματα και τα κύματα Stoneley, ενώ στον σχηματισμό διαδίδονται διαμήκη (P) και εγκάρσια (S) σεισμικά κύματα. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα μετωπικά κύματα τα οποία διαδίδονται στο τμήμα του σχηματισμού το οποίο βρίσκεται κοντά στο φρεάτιο.

Οι κυριότερες συσκευές ακουστικών διαγραφών είναι :

- η BHC (Borehole Compensated Sonic Tool)
- η LSS (Long Spaced Sonic Tool)
- και η συσκευή Array-Sonic.

Στις εφαρμογές των ακουστικών διαγραφιών περιλαμβάνονται η εκτίμηση μηχανικών ιδιοτήτων (σε συνδυασμό με τις διαγραφίες πυκνότητας), η εκτίμηση της ταχύτητας διάδοσης για την επεξεργασία δεδομένων σεισμικής ανάκλασης (ταχύτητα διάδοσης διαμήκων και εγκάρσιων κυμάτων) και η εκτίμηση δευτερογενούς πορώδους (σε συνδυασμό με άλλες διαγραφίες πορώδους).

2.7 Ηλεκτρικές διαγραφίες

Υπάρχουν τρεις κατηγορίες ηλεκτρικών διαγραφιών : οι κλασσικές, οι διαγραφίες επαγωγής και οι διαγραφίες εστίασης. Οι κλασσικές ηλεκτρικές διαγραφίες διακρίνονται σε δυο είδη τις κανονικές και τις πλευρικές των οποίων η ερμηνεία παρουσιάζει αρκετά προβλήματα με αποτέλεσμα να είναι δύσκολη έως αδύνατη.

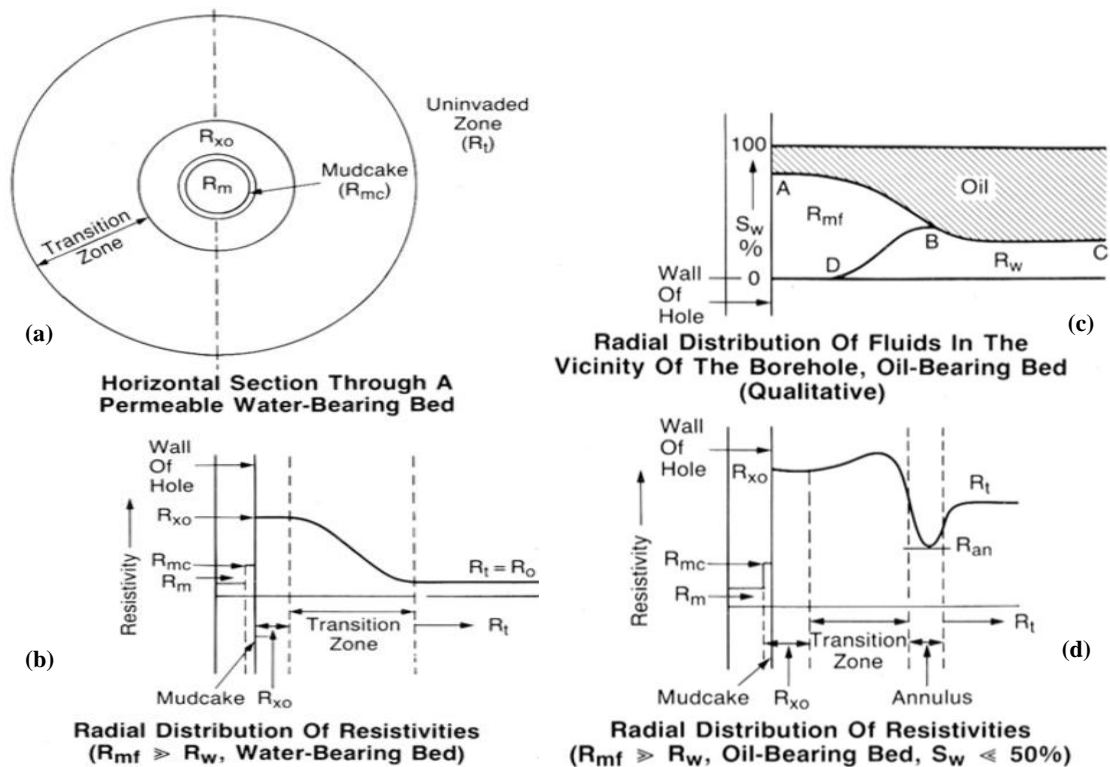
Όσον αφορά τις συσκευές που χρησιμοποιούνται στις διαγραφίες εστίασης και επαγωγής, παρατηρούνται κάποιες διαφορές μεταξύ τους. Οι συσκευές των ηλεκτρικών διαγραφιών επαγωγής έχουν την ικανότητα να μετρούν την ειδική ηλεκτρική αντίσταση σε γεωτρήσεις στις οποίες η γεωτρητική λάσπη έχει ως βάση όχι μόνο το νερό αλλά και το πετρέλαιο.

Γενικότερα, κατά τη διάνοιξη των γεωτρήσεων πετρελαίου, λόγω του ότι τα τοιχώματα τους έχουν την τάση να θραύονται και να καταρρέουν, έχει καθιερωθεί η χρήση κατάλληλου γεωτρητικού πολφού για την αποφυγή τέτοιων προβλημάτων. Σημαντικό στοιχείο αποτελεί το γεγονός πως πολύ κοντά στη γεώτρηση, τα ρευστά που βρίσκονται σε πορώδεις σχηματισμούς (πετρέλαιο και νερό του σχηματισμού) αντικαθίστανται από το διήθημα της λάσπης σχηματίζοντας τη αποκαλούμενη ζώνη διείσδυσης (Invasion or Flushed zone). Το μέγεθος της ζώνης αυτής είναι αντιστρόφως ανάλογο με το πορώδες του σχηματισμού, καθώς όσο πιο μικρό είναι το πορώδες τόσο πιο μεγάλη είναι η ζώνη διείσδυσης του. Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του διηθήματος της λάσπης συμβολίζεται ως R_{mf} . Στο Σχήμα 2.5 παρατηρείται σχηματικά η ζώνη διείσδυσης γύρω από τη γεώτρηση και η διαφοροποίηση της γεωηλεκτρικής καμπύλης σε υδροφόρο στρώμα και σε πετρελαιοφόρο σχηματισμό.

Εφαρμογές των ηλεκτρικών διαγραφιών αποτελούν οι εξής :

- Εντοπισμός πετρελαιοφόρων σχηματισμών.
- Καθορισμός του πάχους του ταμιευτήρα πετρελαίου.

- Διάκριση της πετρελαιοφόρου και της υδροφόρου ζώνης σε ταμιευτήρα πετρελαίου.

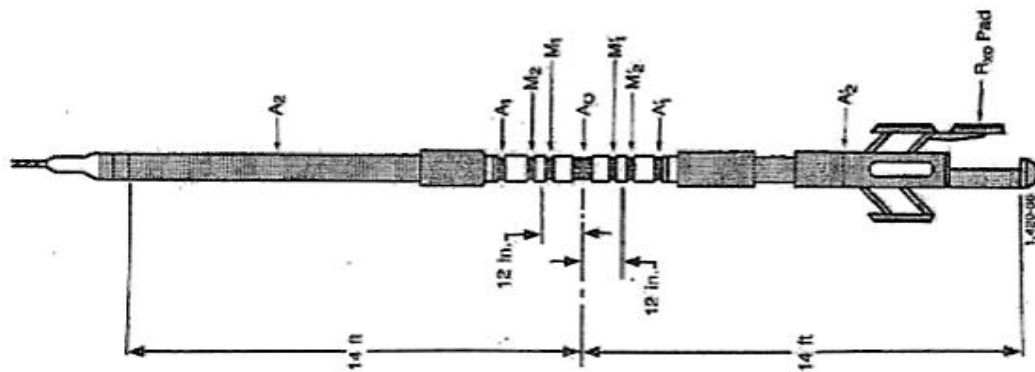


Σχήμα 2.5 : Σχηματική παράσταση της διείσδυσης του διηθήματος της λάσπης (a) καθώς και της μορφής της καμπύλης αντίστασης (b) σε ένα υδροφόρο στρώμα. Η πληρότητα (c) και η μορφή της καμπύλης αντίστασης (d) σε ένα πετρελαιοφόρο σχηματισμό (Βαφείδης, 2011).

2.7.1 Ηλεκτρικές διαγραφίες εστίασης

Καλύτερα αποτελέσματα σε σύγκριση με τις κλασσικές, δίνουν οι ηλεκτρικές διαγραφίες εστίασης όπου το ηλεκτρικό ρεύμα εστιάζεται σε λεπτό δίσκο και διεισδύει βαθύτερα μέσα στον υπό μελέτη σχηματισμό. Μετρούμενο μέγεθος είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση σε Ωm .

Ηλεκτρικές διαγραφίες εστίασης πραγματοποιούνται με συσκευές LATEROLOG και συσκευές σφαιρικής εστίασης (SFL). Τα συστήματα ηλεκτροδίων εστίασης σχεδιάστηκαν έτσι ώστε να παρουσιάζουν μικρή, ενδιάμεση ή μεγάλη διεισδυτική ικανότητα. Οι μετρήσεις της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με συσκευές μικρής διεισδυτικής ικανότητας (π.χ. SFL, LATEROLOG 8) χρησιμοποιούνται, για την εκτίμηση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στη ζώνη διείσδυσης R_{xo} . Από τις ενδιάμεσης και μεγάλης διεισδυτικής ικανότητας συσκευές (LATEROLOG 7, LATEROLOG 3) εκτιμάται η πραγματική ειδική ηλεκτρική αντίσταση R_t . Η πιο σύγχρονη συσκευή εστίασης είναι η DUAL LATEROLOG TOOL (DLL) (Σχήμα 2.6).



Σχήμα 2.6 : Σχηματική παράσταση της συσκευής Dual Laterolog (Schlumberger, 1991).

Η πραγματική ειδική ηλεκτρική αντίσταση R_t αποτελεί ένα από τα απαραίτητα μεγέθη για την εκτίμηση του βαθμού κορεσμού σε νερό S_w (ή του βαθμού κορεσμού σε υδρογονάνθρακες S_h), ενώ η ειδική ηλεκτρική αντίσταση R_{xo} στη ζώνη διείσδυσης, χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του S_w μόνο όταν το πορώδες του σχηματισμού δεν είναι γνωστό. Η R_{xo} είναι επίσης απαραίτητη για την εκτίμηση της κινητικότητας (mobility) των υδρογονανθράκων και για την καλύτερη εκτίμηση της R_t , όταν η διείσδυση είναι μεγάλης έκτασης. Ο ακριβής υπολογισμός της R_t είναι μέγιστης σημασίας λόγω της συσχέτισης της με το βαθμό κορεσμού σε υδρογονάνθρακες στο τμήμα του σχηματισμού όπου δεν έχει διεισδύσει το διήθημα της λάσπης.

2.7.2 Ηλεκτρικές διαγραφίες επαγωγής

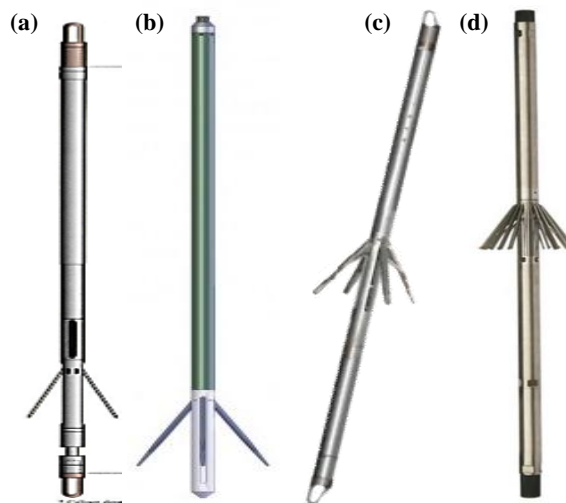
Οι συσκευές διαγραφιών επαγωγής αναπτύχθηκαν αρχικά για την μέτρηση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε γεωτρήσεις στα οποία η γεωτρητική λάσπη έχει ως βάση το πετρέλαιο. Εφόσον οι ηλεκτρικές διαγραφίες (κλασσικές ή εστίασης) χρησιμοποιούν ηλεκτρόδια για την διαβίβαση των ηλεκτρικών ρευμάτων, σε τέτοιου γεωτρήσεις δεν είναι δυνατή η ηλεκτρική επαφή μεταξύ ηλεκτροδίων ρεύματος και του σχηματισμού λόγω της παρεμβολής της μη αγώγιμης γεωτρητικής λάσπης.

Οι ηλεκτρικές διαγραφίες επαγωγής παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις άλλες ηλεκτρικές διαγραφίες ακόμη και στην περίπτωση που η γεωτρητική λάσπη έχει σαν βάση το νερό. Συνήθως σχεδιάζονται έτσι, ώστε να εμφανίζουν μεγάλη διεισδυτική ικανότητα. Για την μείωση των επιδράσεων που προέρχονται από το φρέαρ, από τους γειτονικούς σχηματισμούς και από την ζώνη διείσδυσης, οι συσκευές διαγραφιών επαγωγής χρησιμοποιούν κατάλληλο σύστημα εστίασης.

Επίσης, για τον υπολογισμό της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπό μελέτη σχηματισμού, R_i , πραγματοποιούνται περισσότερες από μια μετρήσεις της R . Για μη αγωγίμη λάσπη χρησιμοποιείται η συσκευή επαγωγής Dual Induction Log με την οποία πραγματοποιούνται δυο μετρήσεις RILD, RILM σε συνδυασμό με την συσκευή σφαιρικής εστίασης. Για αγωγίμη λάσπη χρησιμοποιούνται συσκευές ηλεκτρικής εστίασης που είναι πιο ακριβείς σε σχηματισμούς ενδιάμεσης ή μεγάλης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, ενώ η συσκευή επαγωγής είναι ευαίσθητη στην ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα και περισσότερο ακριβής απέναντι στους σχηματισμούς μικρής ή ενδιάμεσης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

2.8 Διαγραφίες διαμετρήματος

Οι διαγραφία διαμετρήματος αποτελεί μέσο προσδιορισμού της διαμέτρου και του σχήματος μιας γεώτρησης. Χρησιμοποιεί εργαλείο το οποίο διαθέτει 2, 4 ή περισσότερους βραχίονες που μπορούν να ανοιγοκλείνουν ανάλογα με το διαμέτρημα της γεώτρησης (Σχήμα 2.7). Η κίνηση αυτή μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα από ένα ποτενσιόμετρο.



Σχήμα 2.7 : Συσκευές διαγραφιών διαμετρήματος με (a) 2, (b) 3, (c) 4 και (d) περισσότερους βραχίονες [(a) Glover, 2014, (b) DELTA EPSILON, 2019, (c) LANDSEA, 2019, (d) GR Energy Services, 2019].

Με τις συσκευές των δύο βραχιόνων μετράται η διάμετρος της γεώτρησης. Σε πολλές γεωτρήσεις μπορεί να προκύψει ωοειδές σχήμα, το οποίο οφείλεται στο γεγονός ότι η πίεση στην επιφάνεια του φλοιού είναι διαφορετική προς κάθε κατεύθυνση ως αποτέλεσμα των τεκτονικών δυνάμεων. Σε τέτοιου τύπου γεωτρήσεις, η δαγκάνα του εργαλείου των δύο βραχιόνων μετρά την τιμή του μεγάλου άξονα της διατομής, δίνοντας μεγαλύτερες τιμές διαμέτρου από τις αναμενόμενες. Σε αυτή την περίπτωση απαιτούνται εργαλεία με περισσότερους βραχίονες (Glover, 2014).

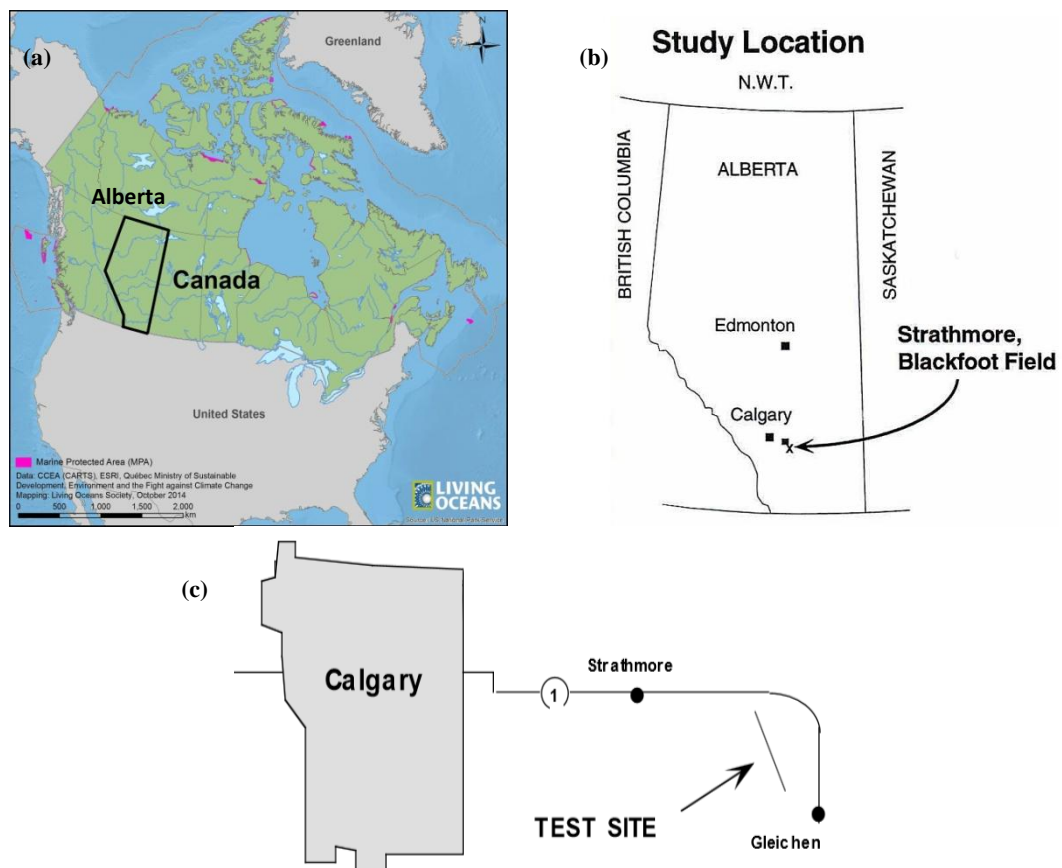
Κατά τη λειτουργία της συσκευής με τους 4 βραχίονες (dual caliper), τα δύο αντίθετα ζεύγη δουλεύουν μαζί δίνοντας τη διάμετρο της γεώτρησης σε δύο κάθετες κατευθύνσεις. Στις συσκευές πολλαπλών βραχιόνων είναι τοποθετημένοι μέχρι και 30 βραχίονες περιμετρικά της συσκευής που επιτρέπουν την καταγραφή του λεπτομερούς σχήματος της γεώτρησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

3.1 Θέση περιοχής μελέτης

Η περιοχή μελέτης του Blackfoot βρίσκεται περίπου 15 km ΝΑ της πόλης Strathmore στην περιοχή της Αλμπέρτα στον Καναδά (Σχήμα 3.1). Ειδικότερα, βρίσκεται σε γεωγραφικό μήκος και πλάτος 50°56'57.1"N και 113°10'04.6"W αντίστοιχα σύμφωνα με το παγκόσμιο γεωδαιτικό σύστημα WGS84.



Σχήμα 3.1 : Χάρτες απεικόνισης (a) των γεωγραφικών ορίων του Καναδά (b) της περιοχής μελέτης και (c) της θέσης πραγματοποίησης των μετρήσεων στο πεδίο Blackfoot [(a) LIVING OCEANS, 2015, (b) και (c) Gallant et al., 1995].

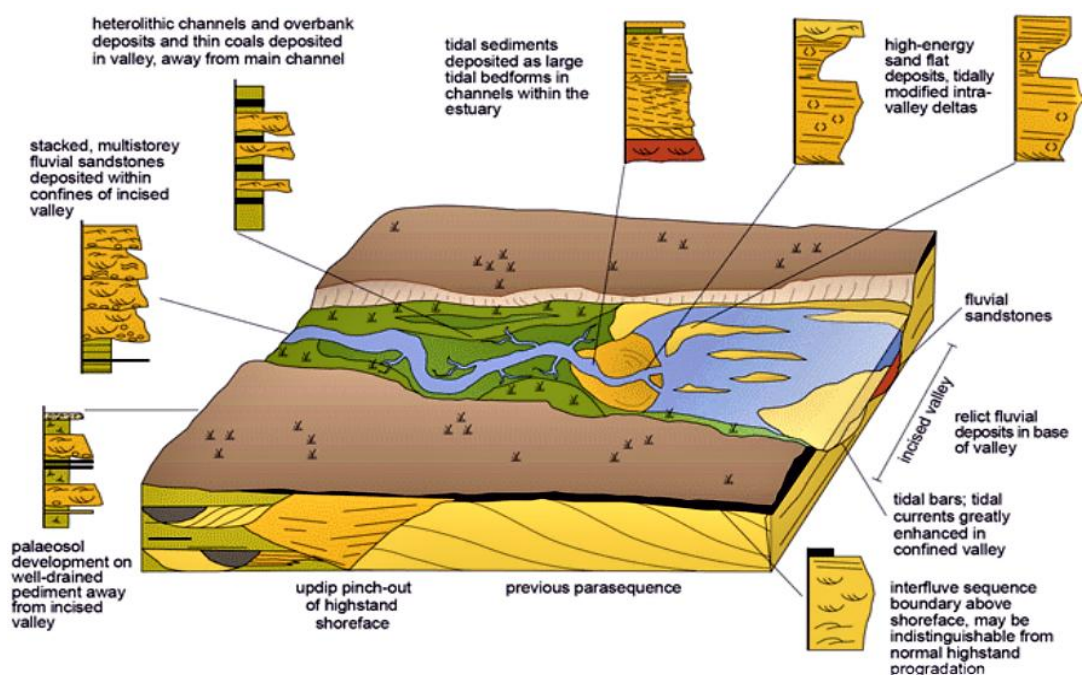
3.2 Γεωλογία περιοχής

Από έρευνες που έχουν διεξαχθεί στην περιοχή μελέτης έχουν εντοπιστεί θέσεις με οικονομικό ενδιαφέρον στην εκμετάλλευση ταμειντήρων υδρογονανθράκων. Οι ταμειντήρες αυτοί βρίσκονται συνήθως σε θέσεις όπου απαντάται γλαυκονιτική άμμος ποτάμιας προέλευσης του

Κατώτερου Κρητιδικού. Οι άμμοι αυτού του τύπου περιλαμβάνουν μερικούς από τους πιο παραγωγικούς ταμιευτήρες πετρελαίου και φυσικού αερίου στη Νότια Αλμπέρτα (Syhlonky, 1995). Απαντώνται σε βάθος περίπου 1550 m με εύρος πάχους από μερικά εκατοστά έως πάνω από 35 m (Layer et al., 1949).

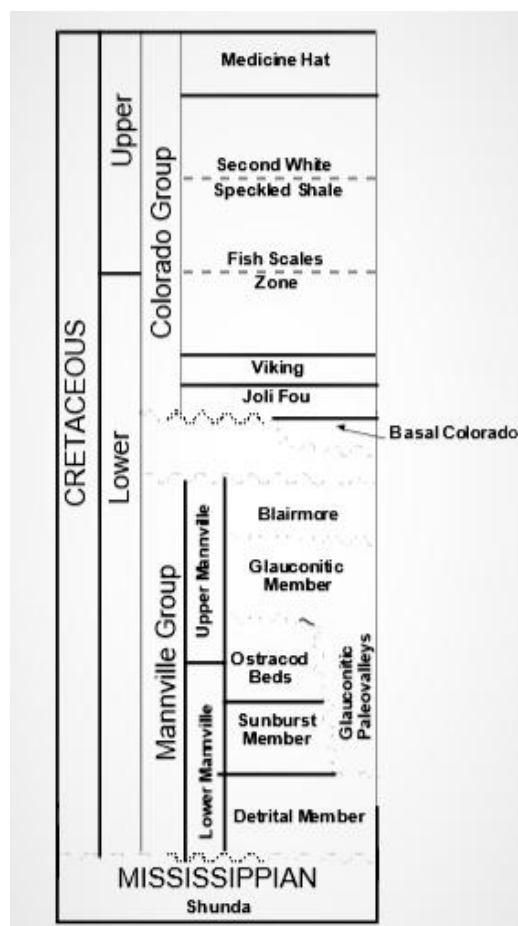
Το Γλαυκονιτικό Μέλος υποδιαιρείται σε τρία τμήματα που αντιστοιχούν σε τρεις αντίστοιχες φάσεις δημιουργίας της ιζηματογενούς λεκάνης (Miller et al., 1995). Και τα τρία τμήματα μπορεί να μην εμφανίζονται παντού. Το κατώτερο και το ανώτερο μέλος αποτελούνται από χαλαζιακούς ψαμμίτες με μέσο πορώδες περίπου 18%, ενώ το μεσαίο μέλος αποτελείται από λιθικό ψαμμίτη χαμηλού πορώδους. Το κάθε μέλος έχει εύρος πάχους 5-20 m. Οι ταμιευτήρες πετρελαίου και φυσικού αερίου εντοπίζονται παγιδευμένοι σε λεκάνες που περιέχουν χαλαζιακό ψαμμίτη ή σε κανάλια του Γλαυκονιτικού Μέλους (Yang et al, 1996). Ο πρωτεύον υδρογονάνθρακας στο Πεδίο Blackfoot είναι το πετρέλαιο, αν και στο ανώτερο μέλος μπορεί να υπάρχει και φυσικό αέριο. Η σημασία και το δυναμικό τους, τους καθιστούν ιδανικούς ταμιευτήρες για μελέτη (Stewart, 1995).

Τα πετρώματα στη περιοχή αποτελούν ιζήματα πλήρωσης μιας λεκάνης που δομείται από ιζηματογενείς αποθέσεις ποτάμιων και θαλάσσιων συστημάτων (Σχήμα 3.2). Η λεκάνη αυτή ή τα κανάλια δημιουργούνται από ποτάμια διάβρωση. Η ιζηματογενής λεκάνη, μπορεί να φτάσει σε βάθος αρκετών εκατοντάδων ποδιών και να κυμανθεί σε πλάτος από μισό μίλι έως πολλές δεκάδες μίλια.



Σχήμα 3.2 : Σχηματική αναπαράσταση ιζηματογενούς λεκάνης που δομείται από αποθέσεις ποτάμιων και θαλάσσιων συστημάτων (Incised valley) (SEPM STRATA, 2019).

Στην περιοχή μελέτης, τα πετρώματα που δομούν τη λεκάνη βρίσκονται εντός του Γλαυκονιτικού Σχηματισμού, ενός μέλους της Ομάδας του Ανώτερου σχηματισμού Mannville του Πρώιμου Κρητιδικού (Αλβιο) (Σχήμα 3.3). Πολυάριθμες τέτοιες Γλαυκονιτικές λεκάνες εμφανίζονται στη νότια Αλμπέρτα, έχουν συνήθως κατεύθυνση νοτιανατολικά-βορειοδυτικά και διαβαθμίζονται από μεγάλα συστήματα λεκανών, τα οποία μπορούν να συσχετιστούν σε γειτονικό επίπεδο, έως μικρές λεκάνες και συστήματα καναλιών που επηρεάστηκαν από τοπικές διακυμάνσεις της σχετικής στάθμης της θάλασσας. Η διάβρωση των καναλιών αυτών φτάνει σε ποικίλα βάθη και έτσι το κατώτερό τους τμήμα μπορεί να βρεθεί απευθείας επάνω ή εντός οποιουδήποτε από τους Σχηματισμούς Ostracod, Sunburst ή Detrital. Εντός του εύρους της περιοχής μελέτης, η Ομάδα του Σχηματισμού Mannville υπέρκειται ασύμφωνα τα Μισσισιπιάνια ανθρακικά ορυκτά του Σχηματισμού Shunda. Ο ρόλος της προγενέστερης Μισσισιπιάνιας τοπογραφίας στην επίδραση της θέσης των Γλαυκονικών λεκανών είναι αβέβαιος. Γενικά, το τοπογραφικό ανάγλυφο της ασύμφωνης επιφάνειας φαίνεται ότι αντισταθμίστηκε από την εποχή της απόθεσης των Γλαυκονικών ιζημάτων (Miller et al., 1995).



Σχήμα 3.3 : Στρωματογραφική ακολουθία του Πεδίου Blackfoot (Τροποποιήθηκε από Leckie et al., 1994, και Wood and Hopkins, 1992).

Η απόθεση των ιζημάτων ποτάμιας προέλευσης του Γλαυκονιτικού Σχηματισμού πραγματοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της μέγιστης επίκλυσης της Θάλασσας Moosebar από το βορρά και κατά τα πρώιμα στάδια της μεταγενέστερης απόσυρσής της. Το Γλαυκονιτικό Μέλος αποτελείται από πολύ λεπτό έως μεσαίου μεγέθους χαλαζιακό ψαμμίτη στο ανατολικό τμήμα της Αλμπέρτα, ενώ ο γλαυκονίτης βρίσκεται συνήθως βόρεια της Κεντρικής Αλμπέρτα. Στο νότιο τμήμα της η Γλαυκονιτική δελταϊκή ακολουθία, όπου το δέλτα του ποταμού αναπτύχθηκε όλο και περισσότερο προς τη θάλασσα με την πάροδο του χρόνου, καλύπτει τα υφάλμυρα ιζήματα κόλπων του Σχηματισμού Ostracod (Miller, 1996).

Τα Στρώματα Ostracod που υπόκεινται του Γλαυκονιτικού Σχηματισμού, σχηματίστηκαν από υφάλμυρους σχιστόλιθους, αργιλικούς, απολιθωματοφόρους ασβεστόλιθους και λεπτούς χαλαζιακούς ψαμμίτες και ιλυόλιθους (Layer et al., 1949). Το λεπτό Μέλος του Σχιστόλιθου Bantry υπόκειται του Ostracod αλλά δεν είναι πλευρικά σταθερό (Coveney, 1960). Το Μέλος Sunburst περιλαμβάνει ραβδωτούς και φυλλώδεις ψαμμίτες οι οποίοι σχηματίστηκαν από υπολιθαρενίτες και χαλαζιακούς αρενίτες. Επίσης, τα Στρώματα Detrital αποτελούν το βασικό τμήμα της Ομάδας Mannville. Αυτός ο σχηματισμός έχει λιθολογία με υψηλή ετερογένεια, περιλαμβάνοντας κροκάλες κερατολίθου, λιθικό ψαμμίτη, ιλυόλιθο και άφθονο σχιστόλιθο. Η κατανομή και το πάχος του ελέγχεται σε μεγάλο βαθμό από την τοπογραφία της προ-Κρητιδικής επιφάνειας διάβρωσης και επομένως μεταβάλλεται σε μεγάλο βαθμό σε μικρές αποστάσεις (Badgley, 1952).

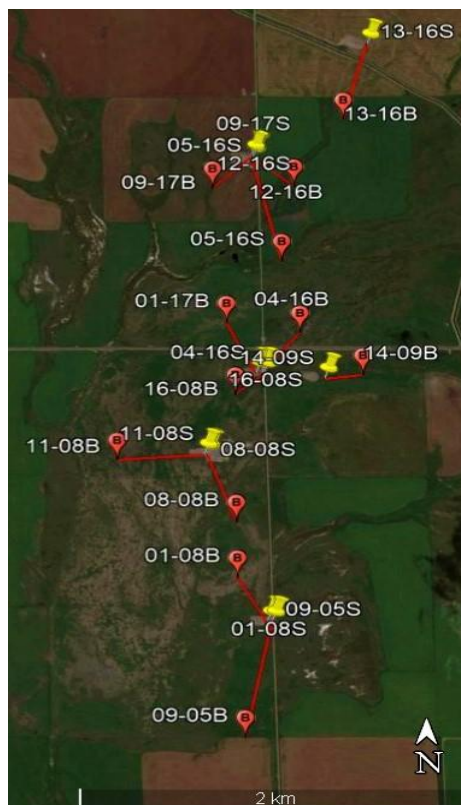
Το Γλαυκονιτικό σύνθετο σύστημα λεκανών, νοτιοανατολικά του Calgary, έχει τρεις διαφορετικούς κύκλους τομής και πλήρωσης: Ανώτερη, Λιθική και Κατώτερη. Η Ανώτερη και η Κατώτερη αποτελούν τους κύριους ταμιευτήρες.

Ο Γλαυκονιτικός Σχηματισμός χαρακτηρίζεται από αποθέματα σε μορφή καναλιών χαμηλής εγκόλπωσης, πλάτους 1 έως 5 km και βάθους έως 45 m, σε όλη τη Νότια και Κεντρική Αλμπέρτα (Zaitlin et al, 1994). Η απορροή αυτών των καναλιών ήταν από το νότο προς το βορρά. Συγκεκριμένα, ο σχηματισμός αυτός στην περιοχή αποτελείται από ένα σύνθετο σύστημα λεκανών, το οποίο έχει διαβρωθεί σε γειτονικά Γλαυκονιτικά αποθέματα, μετακίνησε τον Σχηματισμό Ostracod και έκοψε τόσο βαθιά ως το Σχηματισμό Detrital σε μέρη. Η βάση της Γλαυκονιτικής λεκάνης είναι 10 με 80 m πάνω από την προ-Κρητιδική ασυμφωνία, όπου τα πετρώματα του Κατώτερου Κρητιδικού υπέρκεινται τα Μισσισιπιάνια ανθρακικά ορυκτά του Σχηματισμού Pekisko.

Τα πολλαπλά στάδια τομής και επακόλουθης απόθεσης είναι εμφανή από τις λεπτομερείς συσχετίσεις της αξιολόγησης των σχηματισμών μέσω των γεωφυσικών διαγραφιών και τη μελέτη των πυρήνων των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων. Η πλήρωση μιας δεδομένης λεκάνης αποτελείται από τον συνδυασμό άμμου, ιλύος και σχιστόλιθου. Η σύνθεση του ψαμμίτη και η ποιότητα του ταμιευτήρα των τριών λεκανών διαφέρει. Οι φάσεις των ποτάμιων και μεταφορικών καναλιών αποτελούν τους ταμιευτήρες καλύτερης ποιότητας. Αυτές οι φάσεις αποτελούνται από χαλαζία και άμμο πλούσια σε κερατόλιθο με υψηλό πορώδες και διαπερατότητα. Τα αποθέματα της Λιθικής δεν έχουν ποιότητα ταμιευτήρα και λειτουργούν ως αδιαπέρατα φράγματα μεταξύ της Ανώτερης και Κατώτερης λεκάνης. Αποτελούνται σε μεγάλο βαθμό από μεταμορφωμένους και ηφαιστειακούς κόκκους (Dufour et al., 1998).

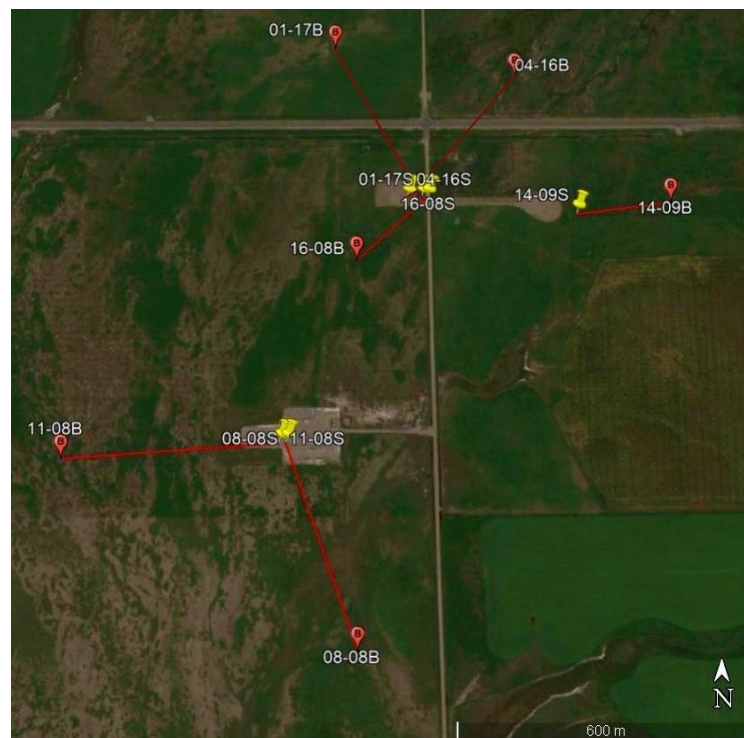
3.3 Περιγραφή γεωτρήσεων

Στην περιοχή μελέτης του Blackfoot της Αλμπέρτα πραγματοποιήθηκαν συνολικά 12 γεωτρήσεις (Σχήμα 3.4). Τα δεδομένα των γεωτρήσεων δόθηκαν σε αρχεία .las με ονομασίες 01-08, 01-17, 04-16, 05-16, 08-08, 09-05, 09-17, 11-08, 12-16, 13-16, 14-09, 16-08. Στα δεδομένα των γεωτρήσεων, συμπεριλαμβάνονται επίσης και οι συντεταγμένες της κεφαλής και του πυθμένα κάθε γεώτρησης καθώς και το συνολικό τους βάθος σε m.

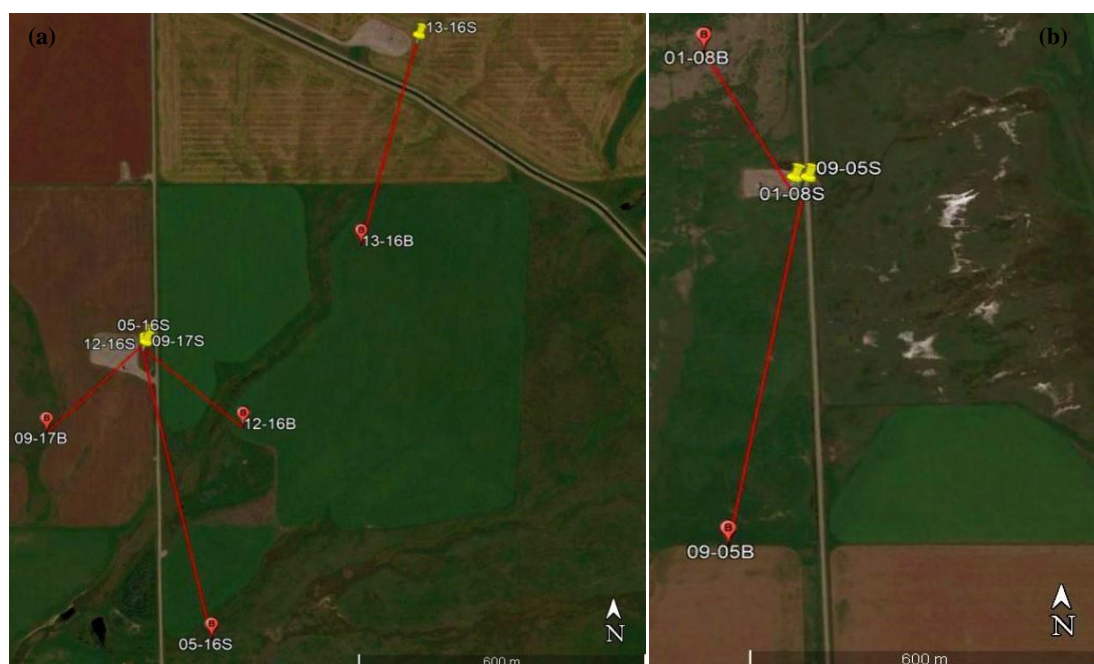


Σχήμα 3.4 : Απεικόνιση της κεφαλής των γεωτρήσεων στην επιφάνεια (S – κίτρινο χρώμα) και του πυθμένα τους (B – κόκκινο χρώμα) πάνω σε δορυφορικό χάρτη του Google Earth.

Μεγαλύτερη ακρίβεια στην απεικόνιση των γεωτρήσεων που βρίσκονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους παρατηρείται στα Σχήματα 3.5 και 3.6.



Σχήμα 3.5 : Απεικόνιση της κεφαλής των γεωτρήσεων 01-17, 04-16, 08-08, 11-08, 14-09 και 16-08 στην επιφάνεια (S – κίτρινο χρώμα) και του πυθμένα τους (B – κόκκινο χρώμα) πάνω σε δορυφορικό χάρτη του Google Earth.



Σχήμα 3.6 : Απεικόνιση της κεφαλής των γεωτρήσεων (α) 05-16, 09-17, 12-16, 13-16 και (β) 01-08, 09-05 στην επιφάνεια (S – κίτρινο χρώμα) και του πυθμένα τους (B – κόκκινο χρώμα) πάνω σε δορυφορικό χάρτη του Google Earth.

Στα παραπάνω Σχήματα (3.4 έως 3.6) παρατηρείται ότι οι 10 από τις 12 γεωτρήσεις διατρήθηκαν από 4 θέσεις στην επιφάνεια, οι οποίες στη συνέχεια αποκλίνουν προς διάφορες κατευθύνσεις.

Από τις γεωτρήσεις αυτές συλλέχθηκαν δεδομένα των εξής διαγραφιών :

- Διαγραφίες διαμετρήματος της γεώτρησης σε 2 διευθύνσεις (CALX, CALY)
- Διαγραφή πυκνότητας. Αντιστάθμιση με ψαμμίτη (DPSS)
- Ακουστική διαγραφή Ρ-κυμάτων (DT)
- Διαγραφή φυσικής ραδιενέργειας (GR)
- Ηλεκτρική διαγραφή επαγωγής μεγάλης διεισδυτικής ικανότητας (ILD)
- Ηλεκτρική διαγραφή επαγωγής ενδιάμεσης διεισδυτικής ικανότητας (ILM)
- Διαγραφή νετρονίου. Αντιστάθμιση με ψαμμίτη (NPSS)
- Διαγραφή πυκνότητας (RHOB)
- Ηλεκτρική διαγραφή σφαιρικής εστίασης (SFL)
- Διαγραφή φυσικού δυναμικού (SP)
- Ακουστική διαγραφή S-κυμάτων (DTS)

Συγκεκριμένα, τα διαθέσιμα δεδομένα από τη γεώτρηση 01-08 ήταν:

1. Βάθους (DEPTH) με μονάδα μέτρησης m
2. Διαμετρήματος (CALX) με μονάδα μέτρησης mm
3. Διαγραφίας πυκνότητας (DPSS) και μονάδα μέτρησης πορώδους %
4. Ακουστικής διαγραφίας Ρ-κυμάτων (DT) με μονάδα μέτρησης ms/m
5. Διαγραφίας φυσικής ραδιενέργειας (GR) με μονάδα μέτρησης API
6. Ηλεκτρικής διαγραφίας επαγωγής (ILD) με μονάδα μέτρησης φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης Ωm
7. Ηλεκτρικής διαγραφίας επαγωγής (ILM) με μονάδα μέτρησης φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης Ωm
8. Διαγραφίας νετρονίου σε αντιστάθμιση με ψαμμίτη (NPSS) με μονάδα μέτρησης πορώδους %
9. Διαγραφίας πυκνότητας (RHOB) με μονάδα μέτρησης kg/m^3
10. Ηλεκτρικής διαγραφίας σφαιρικής εστίασης (SFL) με μονάδα μέτρησης φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης Ωm
11. Διαγραφίας φυσικού δυναμικού (SP) με μονάδα μέτρησης mV

Τίδιου τύπου δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν και στις γεωτρήσεις 01-17, 05-16, 11-08, 13-16 και 14-09.

Η γεώτρηση 09-05 διαθέτει ίδιου τύπου δεδομένα με τη διαφορά πως η διαγραφή διαμετρήματος είναι άλλης διεύθυνσης (CALY), ενώ για την γεώτρηση 08-08 δεν υπάρχουν καθόλου δεδομένα διαμετρήματος.

Οι γεωτρήσεις 16-08 και 09-17 διαθέτουν, επιπλέον της 01-08, δεδομένα διαμετρήματος στην δεύτερη διεύθυνση (CALY) ενώ η τελευταία (09-17), διαθέτει και δεδομένα ακουστικής διαγραφίας S-κυμάτων (DTS).

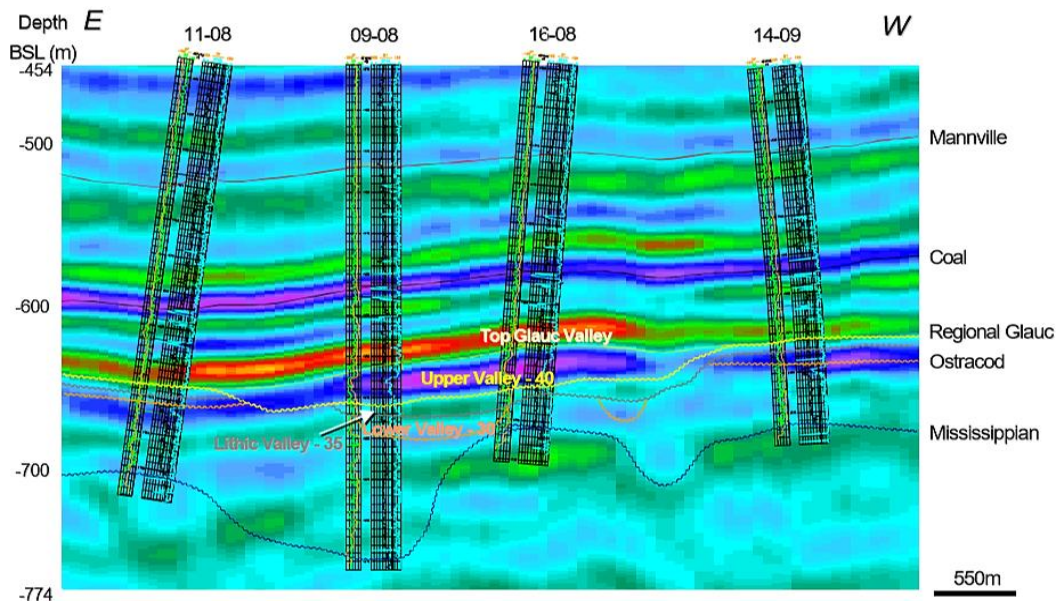
Στη γεώτρηση 04-16 συλλέχθηκαν μόνο τα εξής δεδομένα :

1. Βάθους (DEPTH) με μονάδα μέτρησης m
2. Ακουστικής διαγραφίας P-κυμάτων (DT) με μονάδα μέτρησης ms/m
3. Ακουστικής διαγραφίας S-κυμάτων (DTS) με μονάδα μέτρησης ms/m
4. Διαγραφίας πυκνότητας (RHOB) με μονάδα μέτρησης kg/m^3

Ίδια δεδομένα με την γεώτρηση 04-16 υπάρχουν και για τη γεώτρηση 12-16 με την προσθήκη δεδομένων διαγραφίας φυσικής ραδιενέργειας (GR).

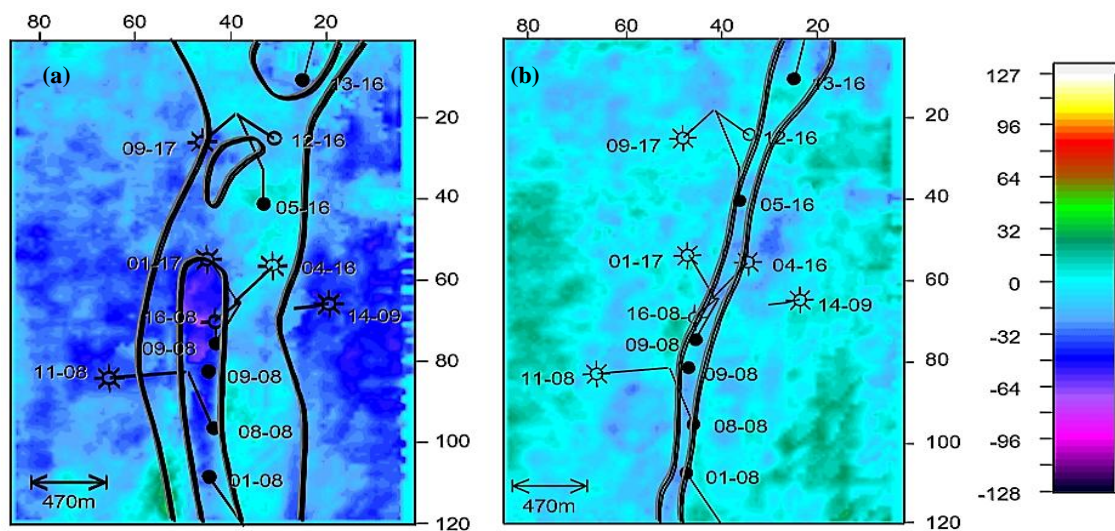
Επιπλέον πληροφορίες για τις παραπάνω γεωτρήσεις εντοπίστηκαν σε μελέτη που πραγματοποιήθηκε συνδυάζοντας τη γεωλογική και γεωφυσική ερμηνεία του πεδίου Blackfoot, και στην οποία χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα δεκαπέντε γεωτρήσεων εκ των οποίων μόνο τα δεδομένα των δώδεκα ήταν διαθέσιμα για την παρούσα διπλωματική εργασία. Στόχοι της προαναφερθείσας μελέτης αποτέλεσαν ο καθορισμός της έκτασης και της γεωμετρίας του σύνθετου συστήματος των Γλαυκονιτικών λεκανών στο πεδίο Blackfoot, η μεμονωμένη χαρτογράφηση κάθε λεκάνης, η διαφοροποίηση των λιθολογικών συστατικών τους και η αποτελεσματική σύνδεση της γεωλογικής και γεωφυσικής ερμηνείας του πεδίου (Dufour et al., 1998).

Από τη συγκεκριμένη μελέτη, προέκυψαν οι παρακάτω απεικονίσεις στις οποίες έχουν χρησιμοποιηθεί δεδομένα της γεώτρησης 09-08 μη διαθέσιμα για την παρούσα διπλωματική.



Σχήμα 3.7 : Γεωλογική και γεωφυσική ερμηνεία δεδομένων σεισμικής ανάκλασης για τη σύνθετη γλαυκονιτική λεκάνη του πεδίου Blackfoot (Dufour et al., 1998).

Στο Σχήμα 3.7 απεικονίζεται μια ερμηνευμένη σεισμική τομή της περιοχής μελέτης, όπως προέκυψε από τα στοιχεία των διαθέσιμων γεωτρήσεων. Παρατηρείται η εναλλαγή των γεωλογικών στρωμάτων σε συνάρτηση με το βάθος των γεωτρήσεων, καθώς και ο προσανατολισμός τους. Όπως είναι ευδιάκριτο οι γεωτρήσεις δεν είναι κατακόρυφες και η κάθε μία χαρακτηρίζεται από διαφορετική κλίση. Οι γεωτρήσεις 11-08 και 16-08 έχουν κλίση προς τα ανατολικά, ενώ η 14-09 προς τα δυτικά. Καθώς τα δεδομένα της γεώτρησης 09-08 δεν ήταν διαθέσιμα, δεν αναλύεται περαιτέρω. Στο σχήμα αυτό απεικονίζονται επίσης οι τρεις ενότητες (Ανώτερη, Λιθική και Κατώτερη) που αποτελούν τις σημαντικότερες δομικές μονάδες των ταμιεντήρων.



Σχήμα 3.8 : Οριζόντιες σεισμικές τομές από (a) το ανώτερο τμήμα της ιζηματογενούς λεκάνης και (b) το

κατώτερο τμήμα της ιζηματογενούς λεκάνης του πεδίου Blackfoot. Οι μαύρες γραμμές οριοθετούν τα κανάλια (Dufour et al., 1998).

Στο Σχήμα 3.8 απεικονίζονται οριζόντιες σεισμικές τομές της περιοχής μελέτης που αντιστοιχούν στην ανώτερη και κατώτερη επιφάνεια της λεκάνης, όπως προέκυψε από τα στοιχεία των διαθέσιμων γεωτρήσεων. Σύμφωνα με αυτό το σχήμα το μέγεθος των καναλιών που αναμένονται οι υδρογονάνθρακες μειώνεται καθώς το βάθος αυξάνεται από το ανώτερο προς το κατώτερο τμήμα της λεκάνης. Σημαντικό στοιχείο αποτελούν και οι ίδιες οι γεωτρήσεις που απεικονίζονται στα ακριβή σημεία τους πάνω στην λεκάνη, βοηθώντας στον χαρακτηρισμό των αποθεμάτων στα διάφορα σημεία της. Τέλος, στο σχήμα αυτό είναι ευδιάκριτη η θέση της κεφαλής και του πυθμένα κάθε γεώτρησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

4.1 Εισαγωγή

Αρχικά πραγματοποιήθηκε απεικόνιση των δεδομένων όλων των γεωτρήσεων σε αντίστοιχα διαγράμματα (διαγραφίες) ώστε να αξιολογηθούν σε πρώτο στάδιο. Έπειτα, επιλέχθηκαν τα τμήματα των γεωτρήσεων που αντιστοιχούσαν στις θέσεις ενδιαφέροντος, με σκοπό την καλύτερη απεικόνιση και ευκολότερη διαχείρισή των δεδομένων τους.

Στα επιλεγμένα τμήματα των γεωτρήσεων, η διαδικασία της επεξεργασίας σε κάθε γεώτρηση ακολουθεί τα εξής βήματα :

1. Εύρεση των τιμών του φυσικού δυναμικού απέναντι από τους περατούς (SP_{ss}) και τους μη περατούς σχηματισμούς (SP_{sh}) από όλες τις γεωτρήσεις
2. Υπολογισμός του όγκου των αργιλικών προσμίξεων (V_{sh}) με τη χρήση των τιμών SP_{ss} και SP_{sh} και πραγματοποίηση χαρακτηρισμού αργιλότητας
3. Εύρεση των τιμών της φυσικής ραδιενέργειας απέναντι από τους περατούς (GR_{ss}) και τους μη περατούς σχηματισμούς (GR_{sh}) από όλες τις γεωτρήσεις. Υπολογισμός του δείκτη των αργιλικών προσμίξεων (I_{sh}) και V_{sh} . Πραγματοποίηση χαρακτηρισμού αργιλότητας
4. Απεικόνιση περατών σχηματισμών στις διαγραφίες SP και GR με βάση τον αντίστοιχο χαρακτηρισμό τους. Επιλογή χαρακτηρισμού με βάση το SP
5. Απεικόνιση τιμών πορώδους (ϕ_N) από διαγραφίες νετρονίου, τιμών πορώδους (ϕ_D) από διαγραφίες πυκνότητας και τιμών (DT) από ακουστικές διαγραφίες P-κυμάτων σε πρότυπα διαγράμματα (cross-plots) $\phi_N-\phi_D$ και ϕ_N-DT (Schlumberger, 2009)
6. Υπολογισμός του ολικού πορώδους ϕ (%) από τις τιμές του ϕ_N και του ϕ_D
7. Υπολογισμός του πρωτογενούς πορώδους από τις ακουστικές διαγραφίες (ϕ_{sonic})
8. Δημιουργία διαγραμμάτων $\phi-\phi_{sonic}$ με στόχο τη σύγκριση των τιμών τους
9. Δημιουργία διαγραμμάτων ϕ και ϕ_{sonic} σε σχέση με το βάθος για κάθε γεώτρηση
10. Απεικόνιση μετρήσεων από ηλεκτρικές διαγραφίες επαγωγής μεγάλης διεισδυτικής ικανότητας (ILD), επαγωγής ενδιάμεσης διεισδυτικής ικανότητας (ILM) και σφαιρικής εστίασης (SFL) σε πρότυπα διαγράμματα RIM/RID-RSFL/RID (Schlumberger, 2009)

Η επεξεργασία πραγματοποιήθηκε χωρίς να ληφθεί υπόψη η ύπαρξη αργιλικών προσμίξεων και χωρίς να λάβει χώρα διαχωρισμός ζωνών ενδιαφέροντος στις γεωτρήσεις και χαρακτηρισμός παραγωγικότητας. Γεγονός που οφείλεται στη μη ύπαρξη πληροφοριών σχετικά με την κλίση

των γεωτρήσεων και την τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του διηθήματος της λάσπης (R_{mf}).

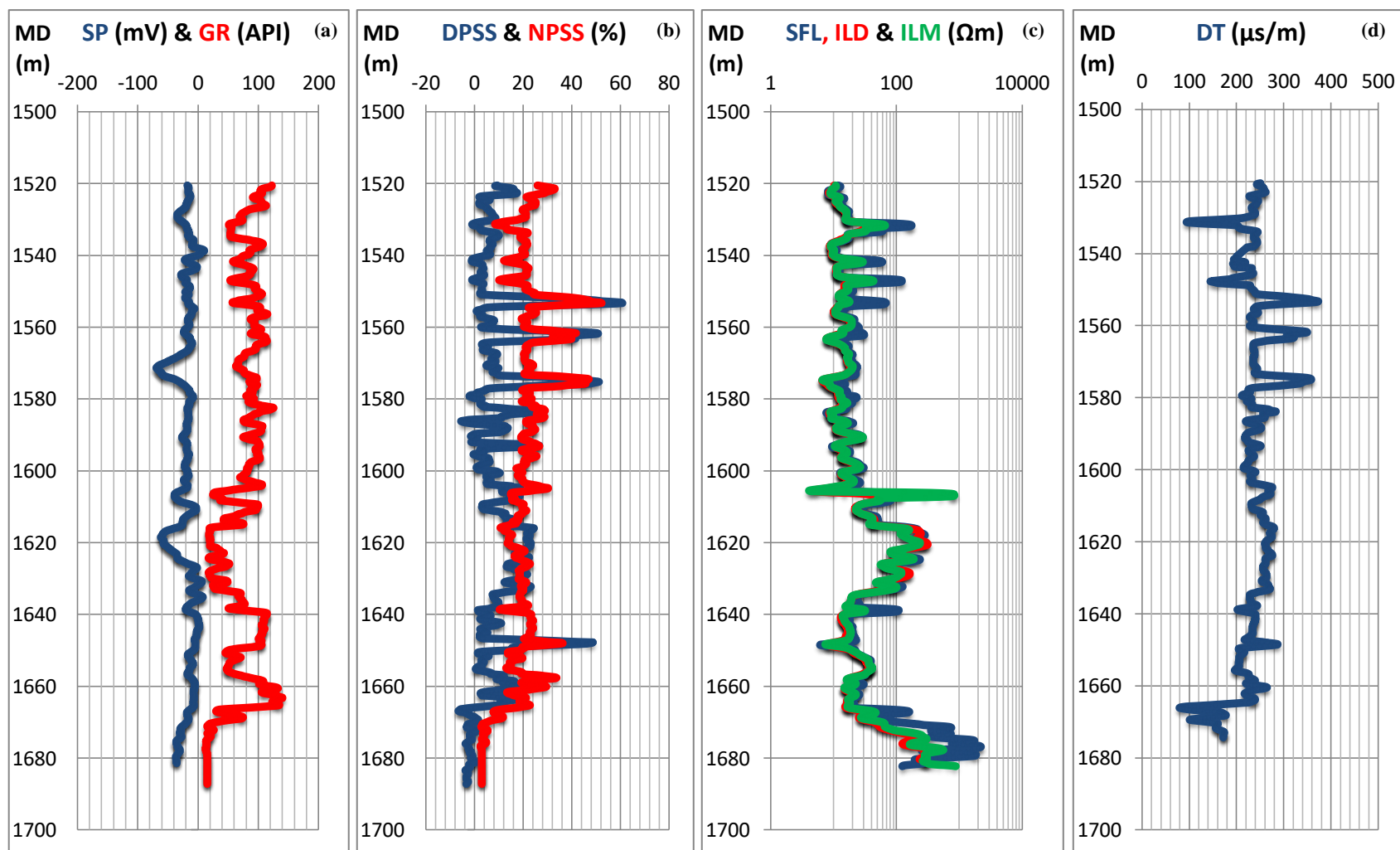
4.2 Επιλογή τμημάτων των γεωτρήσεων και απεικόνιση διαγραφιών

Έπειτα από την αρχική απεικόνιση των τιμών και τη δημιουργία των διαγραφιών στις δώδεκα διαθέσιμες γεωτρήσεις, επιλέχθηκαν οι δέκα από αυτές για περαιτέρω επεξεργασία καθώς οι δύο δεν διέθεταν όλες τις απαιτούμενες για επεξεργασία διαγραφίες.

Ακολούθως, πραγματοποιήθηκε σε φύλλο εργασίας του Microsoft Office Excel η εφαρμογή φίλτρου κινητού μέσου όρου 9 τιμών στις μετρήσεις των διαγραφιών και η εν νέου απεικόνισή τους. Το βήμα αυτό πραγματοποιήθηκε με σκοπό να εξομαλυνθούν ακραίες τιμές μετρήσεων (outliers) καθώς οι μετρήσεις είχαν πραγματοποιηθεί με πολύ πυκνή δειγματοληψία (ανά 0.125m).

Στη συνέχεια, επιλέχθηκε το εύρος βάθους κάθε γεώτρησης προς περαιτέρω επεξεργασία. Η επιλογή αυτή πραγματοποιήθηκε έπειτα από τη μελέτη των διαγραφιών φυσικού δυναμικού ελέγχοντας τα βάθη όπου εμφανίζονταν οι μικρότερες τιμές SP σε κάθε γεώτρηση. Η αναζήτηση αυτή στηρίχθηκε στο γεγονός πως τα βάθη με μικρότερες τιμές SP αντιστοιχούν σε πιθανούς ψαμμιτικούς σχηματισμούς με μικρότερη αργιλότητα, ενώ τα βάθη με τις μεγαλύτερες τιμές SP σε αργιλικούς σχηματισμούς. Οι σχηματισμοί με μειωμένη αργιλότητα παρουσιάζουν μεγαλύτερο ενδιαφέρον σχετικά με την παραγωγή υδρογονανθράκων και μελετώνται εκτενέστερα.

Από όλες τις διαγραφίες, μόνο τα δεδομένα από τις οκτώ (SP, GR, ϕ_D , ϕ_N , SFL, ILD, ILM & sonic) χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Οι διαγραφίες της γεώτρησης 01-08 απεικονίζονται παρακάτω (Σχήμα 4.1), ενώ οι αντίστοιχες των υπόλοιπων εννέα γεωτρήσεων οι οποίες και συλλέχθηκαν με τον ίδιο ακριβώς τρόπο, συγκεντρώνονται στο παράρτημα.



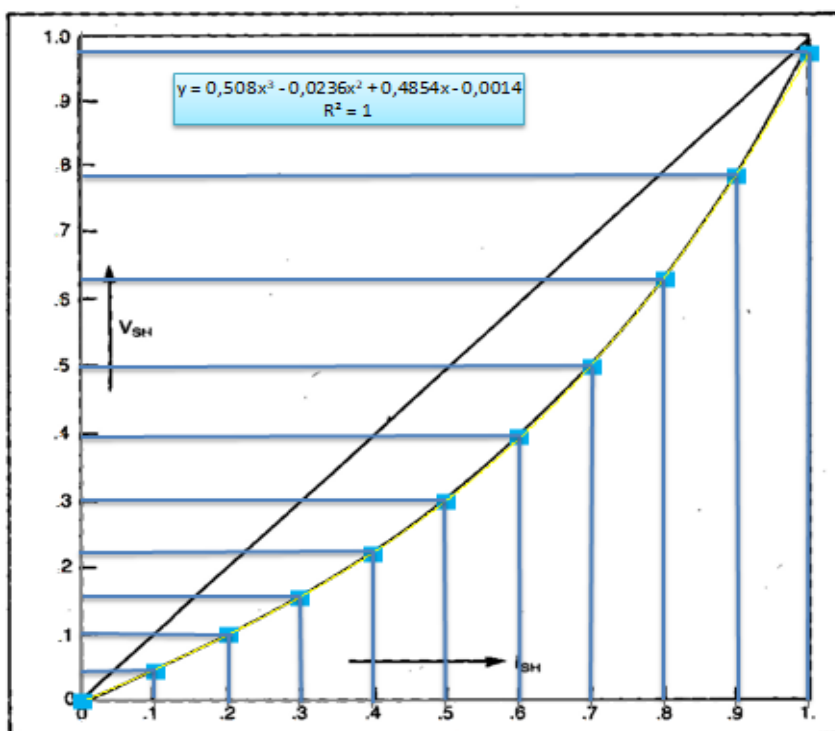
Σχήμα 4.1 : Γεώτρηση 01-08. Απεικόνιση (α) διαγραφιών φυσικού δυναμικού (SP) και φυσικής ραδιενέργειας (GR), (β) διαγραφιών πυκνότητας (DPSS) και νετρονίου (NPSS), (γ) ηλεκτρικών διαγραφιών (SFL, ILD, ILM) και (δ) της ακουστικής διαγραφίας (DT). Ο κατακόρυφος άξονας αποτελεί το μετρούμενο βάθος (measure depth) σε m.

4.3 Χαρακτηρισμός αργιλότητας

Για τον χαρακτηρισμό της αργιλότητας ακολουθήθηκαν τα ίδια βήματα για όλες τις γεωτρήσεις με βάση τον υπολογισμό του όγκου των αργιλικών προσμίξεων (V_{sh}) που προκύπτει, τόσο από τις διαγραφίες φυσικού δυναμικού (SP) όσο και από τις διαγραφίες ακτινών γ (GR). Από την εκτίμηση του όγκου αυτού με τις δύο μεθοδολογίες, συνήθως επιλέγεται η πιο συντηρητική τιμή.

Αρχικά, συγκεντρώθηκαν οι διαγραφίες φυσικού δυναμικού (SP) όλων των γεωτρήσεων και βρέθηκαν οι τιμές SP_{ss} και SP_{sh} σε κάθε μια. Δηλαδή, σημειώθηκε σε κάθε γεώτρηση η τιμή SP που αντιστοιχεί στον καθαρό (χωρίς αργιλικές προσμίξεις) περατό σχηματισμό (π.χ. ψαμμίτη - SP_{ss}) και στον αργιλικό σχιστόλιθο (SP_{sh}). Έπειτα, με την χρήση αυτών των τιμών και τη βοήθεια της εξίσωσης $V_{sh} = (SP - SP_{ss}) / (SP_{sh} - SP_{ss})$ υπολογίστηκε ο όγκος των αργιλικών προσμίξεων V_{sh} .

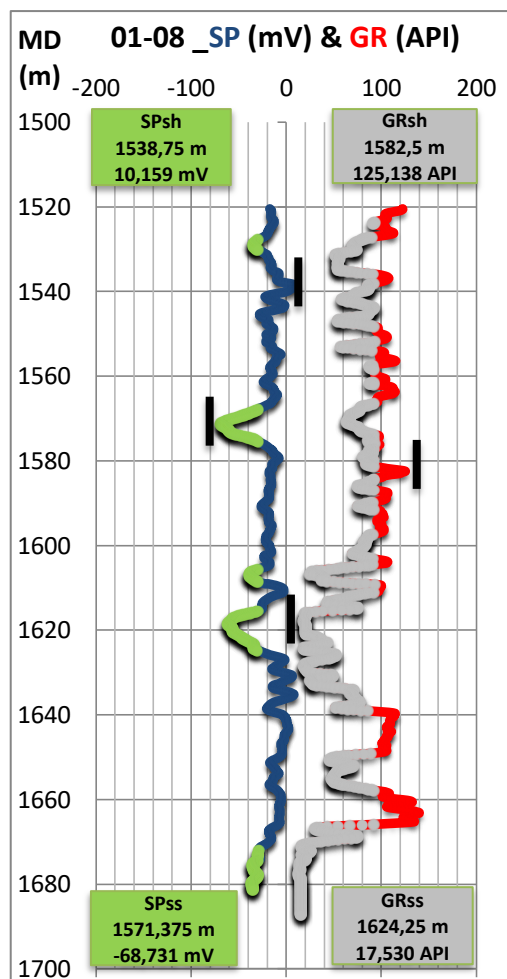
Στον δεύτερο χαρακτηρισμό αργιλότητας απομονώθηκαν οι διαγραφίες GR από όλες τις γεωτρήσεις και βρέθηκαν αντίστοιχα οι τιμές GR_{ss} και GR_{sh} σε κάθε μια. Έπειτα, με την χρήση αυτών των τιμών και τη βοήθεια της εξίσωσης $I_{sh} = (GR - GR_{ss}) / (GR_{sh} - GR_{ss})$ υπολογίστηκε ο δείκτης των αργιλικών προσμίξεων I_{sh} για κάθε τιμή GR της κάθε γεώτρησης. Με τη χρήση του διαγράμματος I_{sh} - V_{sh} (Σχήμα 4.2) γίνεται αντιστοίχιση των τιμών I_{sh} με τις τιμές V_{sh} .



Σχήμα 4.2 : Απεικόνιση αντιστοίχισης τιμών I_{sh} με τις τιμές V_{sh} επάνω σε διάγραμμα I_{sh} - V_{sh} .

Στην παρούσα διπλωματική από την εξίσωση του σχήματος 4.2 υπολογίστηκε το V_{sh} για κάθε τιμή I_{sh} .

Τέλος, πραγματοποιήθηκε απεικόνιση των περατών σχηματισμών με $V_{sh} < 50\%$ στις διαγραφίες SP και GR κάθε γεώτρησης με βάση τον αντίστοιχο χαρακτηρισμό τους. Ως επικρατέστερος ορίστηκε ο χαρακτηρισμός με βάση τις τιμές των διαγραφιών φυσικού δυναμικού (SP) καθώς φαίνεται ως πιο συντηρητικός. Παρακάτω απεικονίζονται οι διαγραφίες με τους δύο χαρακτηρισμούς στη γεώτρηση 01-08 (Σχήμα 4.3).

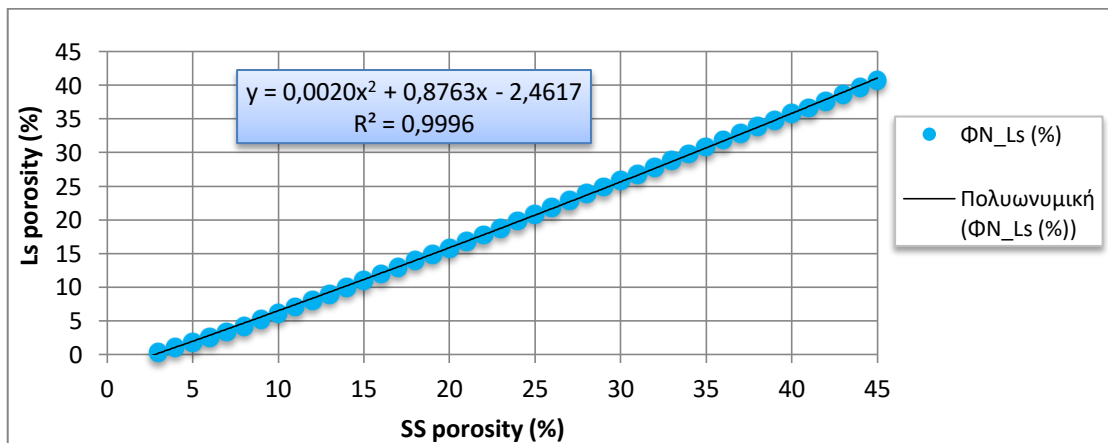


Σχήμα 4.3 : Γεώτρηση 01-08. Απεικόνιση των διαγραφιών SP (mV) και GR (API), των σημείων SP_{ss} , SP_{sh} , GR_{ss} , GR_{sh} και των περατών (πράσινο και γκρι χρώμα) σχηματισμών της με βάση τον υπολογισμένο όγκο των αργλικών προσμίξεων. Ο κατακόρυφος άξονας αποτελεί το μετρούμενο βάθος (measure depth) σε m.

4.4 Αντιστοίχιση τιμών διαγραφιών πορώδους DP_{SS} (%) και NP_{SS} (%) σε μετρήσεις με αντιστάθμιση σε ασβεστόλιθο

Η αντιστοίχιση των τιμών των διαγραφιών DP_{SS} (%) και NP_{SS} (%) σε ασβεστόλιθο ήταν απαραίτητη καθώς οι αρχικές τιμές ήταν αποτέλεσμα μετρήσεων με αντιστάθμιση με ψαμμίτη. Η αντιστοίχιση αυτή πραγματοποιήθηκε ώστε να είναι δυνατή και η απεικόνιση των τιμών σε πρότυπα διαγράμματα (cross-plots) ϕ_N - ϕ_D και ϕ_N - DT στα οποία τόσο το ϕ_N όσο και το ϕ_D αντιστοιχούν σε αντιστάθμιση με ασβεστόλιθο

Η αντιστοίχιση των τιμών των διαγραφιών NP_{SS} (%) σε ασβεστόλιθο πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του πρότυπου διαγράμματος (cross-plot) ϕ_N - ϕ_D , όπου οι τιμές που βρίσκονται επάνω στη γραμμή του ψαμμίτη αντιστοιχήθηκαν με τις τιμές που βρίσκονται στον άξονα x του γραφήματος. Δηλαδή, κάθε τιμή από 0 έως 45 της γραμμής του ψαμμίτη αντιστοιχήθηκε μέσω κάθετης γραμμής σε μια τιμή του άξονα ϕ_N με αντιστάθμιση σε ασβεστόλιθο. Έπειτα οι τιμές που προέκυψαν τοποθετήθηκαν σε διάγραμμα με άξονα x τις τιμές με αντιστάθμιση σε ψαμμίτη και με άξονα y τις τιμές με αντιστάθμιση σε ασβεστόλιθο. Η εξίσωση μεταξύ τους χρησιμοποιήθηκε για την αντιστοίχιση των τιμών των διαγραφιών NP_{SS} (%) σε τιμές με αντιστάθμιση σε ασβεστόλιθο σε κάθε γεώτρηση και απεικονίζεται παρακάτω (Σχήμα 4.4).



Σχήμα 4.4 : Απεικόνιση της αντιστοίχισης των τιμών με αντιστάθμιση σε ψαμμίτη (άξονας x) σε τιμές με αντιστάθμιση σε ασβεστόλιθο (άξονας y).

Στη συνέχεια, για να μετατραπούν και οι τιμές των διαγραφιών DP_{SS} (%) σε αντίστοιχες με αντιστάθμιση σε ασβεστόλιθο, χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθες αξιιώσεις :

$$\phi_{Dss} = \frac{\rho_{ma} - \rho_b}{\rho_{ma} - 1} \quad (4.1)$$

Όπου $\rho_{ma} = 2,65 \text{ g/cm}^3$ για ψαμμίτη και ρ_b η πυκνότητα του σχηματισμού.

$$\phi_{Dls} = \frac{\rho_{ma} - \rho_b}{\rho_{ma} - 1} \quad (4.2)$$

Όπου $\rho_{ma} = 2,71 \text{ g/cm}^3$ για ασβεστόλιθο και ρ_b η πυκνότητα του σχηματισμού.

Λύνοντας την πρώτη εξίσωση ως προς τον άγνωστο όρο ρ_b προκύπτει :

$$\rho_b = 2,65 - 1,65 * \phi_{Dss} \quad (4.3)$$

Έπειτα, η εξίσωση 4.3 αντικαθίσταται στην εξίσωση 4.2 :

$$\phi_{Dls} = \frac{0,06 + (1,65 * \frac{\phi_{Dss}}{100})}{1,71} * 100 \quad (4.4)$$

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση 4.4 υπολογίζονται όλες οι τιμές ϕ_D με αντιστάθμιση σε ασβεστόλιθο για όλες τις γεωτρήσεις.

4.5 Υπολογισμός του ολικού πορώδους ϕ (%) και του πρωτογενούς πορώδους ϕ_{sonic}

Ο υπολογισμός του ολικού πορώδους ϕ (%) πραγματοποιήθηκε με τη χρήση των αρχικών τιμών των διαγραφιών DP_{ss} (%) και NP_{ss} (%), πριν την αντιστάθμιση σε ασβεστόλιθο, και της εξίσωσης που ακολουθεί.

$$\phi (\%) = \frac{\phi_N + \phi_D}{2} \quad (4.5)$$

Όπου ϕ_N οι τιμές του πορώδους από τις διαγραφίες νετρονίου και ϕ_D οι τιμές του πορώδους από τις διαγραφίες πυκνότητας έπειτα από την αντιστάθμιση σε ασβεστόλιθο.

Στη συνέχεια, γνωρίζοντας την ύπαρξη ψαμμιτικών σχηματισμών από τη γεωλογία της περιοχής και την πληροφορία πως η βαθμονόμηση των οργάνων για τη συλλογή των αρχικών μετρήσεων πραγματοποιήθηκε με ψαμμίτη, θεωρείται $t_{ma} = 55,5 \text{ } \mu\text{s/ft}$, $t_f = 189 \text{ } \mu\text{s/ft}$ και χρησιμοποιώντας τις τιμές των διαγραφιών DT ($\mu\text{s/ft}$) υπολογίζεται το πρωτογενές πορώδες ϕ_{sonic} με βάση την εξίσωση που ακολουθεί.

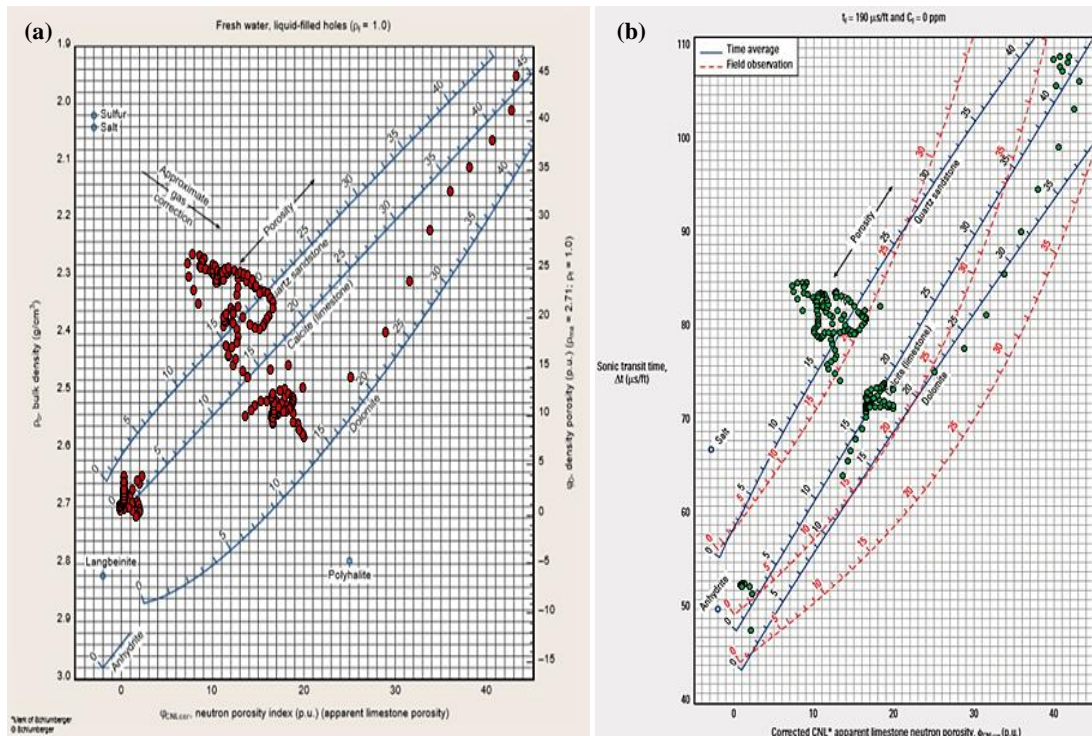
$$\varphi_{\text{sonic}} = \frac{t_{\log} - t_{\text{ma}}}{t_f - t_{\text{ma}}} \quad (4.6)$$

Όπου t_{\log} είναι οι τιμές των διαγραφιών DT (μs/ft).

Όπως είναι φυσικό, οι τιμές του ολικού πορώδους αναμένονται να είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τιμές του πρωτογενούς πορώδους.

4.6 Απεικόνιση τιμών περατών σχηματισμών σε διαγράμματα φ_N - φ_D και φ_N -DT

Έπειτα από την αντιστοίχιση των τιμών των διαγραφιών DP_{SS} (%) και NP_{SS} (%) σε μετρήσεις με αντιστάθμιση σε ασβεστόλιθο, πραγματοποιήθηκε η απεικόνιση των τιμών των περατών σχηματισμών σε διαγράμματα φ_N - φ_D και φ_N -DT (Schlumberger, 2009) μέσω της χρήσης φίλτρων σε φύλλο εργασίας του Microsoft Office Excel. Παρακάτω απεικονίζονται τα διαγράμματα που προέκυψαν.



Σχήμα 4.5 : Διαγράμματα (a) φ_N - φ_D και (b) φ_N -DT για τις περατές ζώνες της γεώτρησης 01-08.

(a) Fresh water, liquid-filled holes ($p_1 = 1.0$)

Y-axis: ρ_b bulk density (g/cm^3)

X-axis: $\phi_{NL, \text{app}}$ neutron porosity index (p.u.) (apparent limestone porosity)

Legend: \diamond Sulfur, \blacklozenge Salt

Annotations: Approximate gas correction, Porosity, Quartz sandstone, Limestone, Dolomite, Langbeinite, Anhydrite, Polyhalite.

(b) $t_0 = 190 \mu\text{s/ft}$ and $C_0 = 0 \text{ ppm}$

Y-axis: ρ_d density porosity (p.u.) ($\rho_{\text{lim}} = 2.71$; $p_1 = 1.0$)

X-axis: Soret transit time, Δt ($\mu\text{s/ft}$)

Legend: — Time average, - - - Field observation

Annotations: Porosity, Quartz sandstone, Limestone, Dolomite, Polyhalite, Salt.

Bottom X-axis: Corrected CNL* apparent limestone neutron porosity, $\phi_{NL, \text{app}}$ (p.u.)

(a) Fresh water, liquid-filled holes ($\rho_f = 1.0$)

Y-axis: ρ_b bulk density (g/cm^3)

X-axis: $\psi_{NL(\text{CM})}$ neutron porosity index (p.u.) (apparent limestone porosity)

Legend: \circ Sulfur, \diamond Salt

Approximate salt pile correction

Porosity

Dolomite anhydrous

Dolomite monohydrate

Calcite (limestone)

Langbeinite

Polyhalite

Anhydrite

ρ_b density porosity (p.u.) ($\rho_{\text{lim}} = 2.71$; $\rho_f = 1.0$)

(b) $t_s = 110 \mu\text{s/ft}$ and $C_0 = 0 \text{ ppm}$

Y-axis: Soric transit time, X_t ($\mu\text{s/ft}$)

X-axis: Corrected CM * apparent limestone neutron porosity $\Delta\psi_{NL}$ (p.u.)

Legend: — Time average, - - - Field observation

Porosity

Dolomite anhydrous

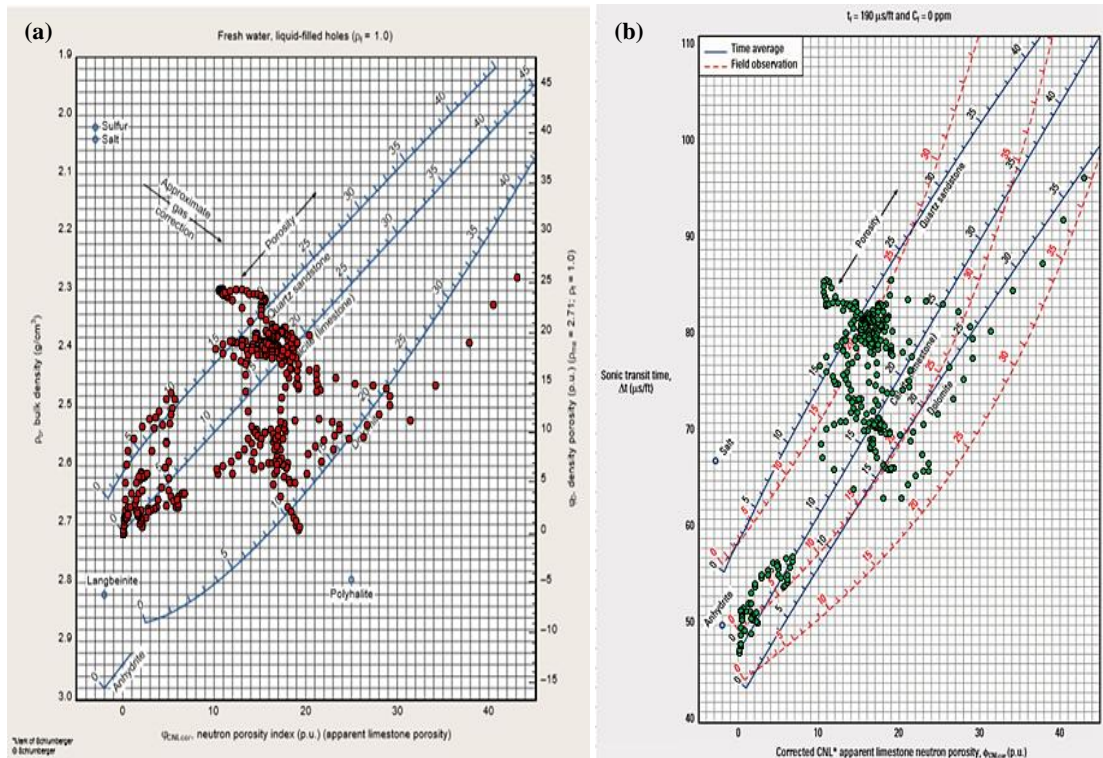
Dolomite monohydrate

Calcite (limestone)

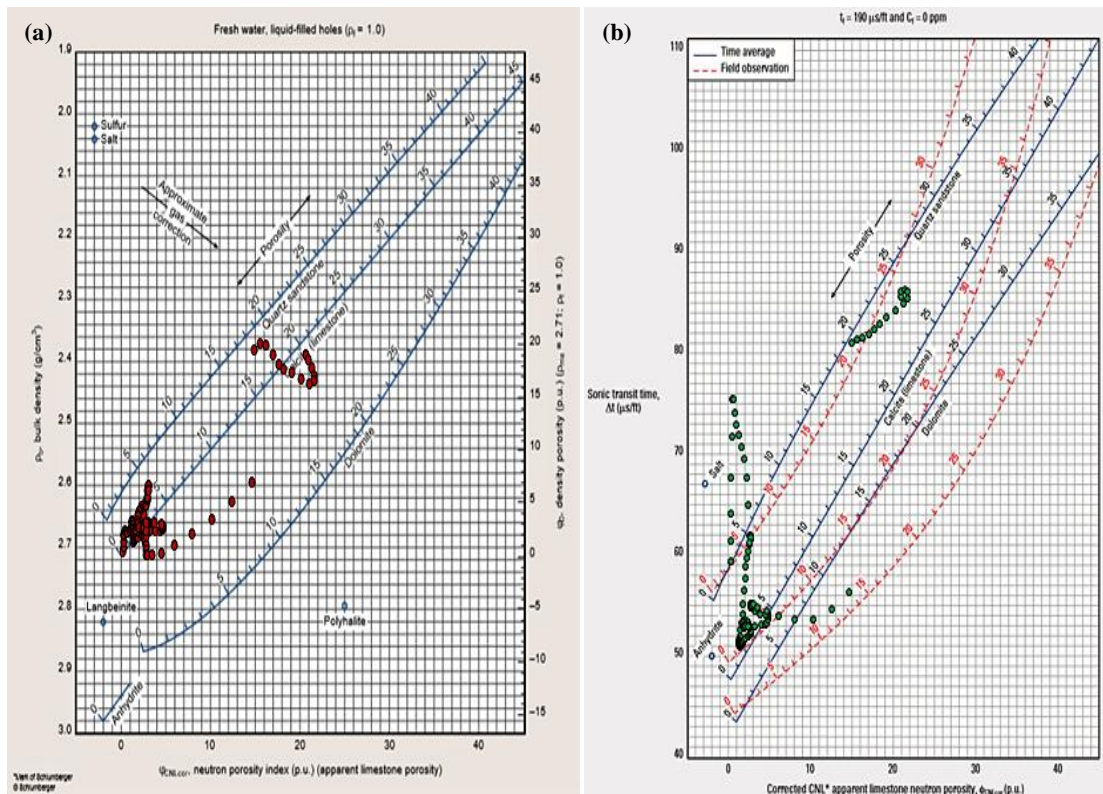
Dolomite

Salt

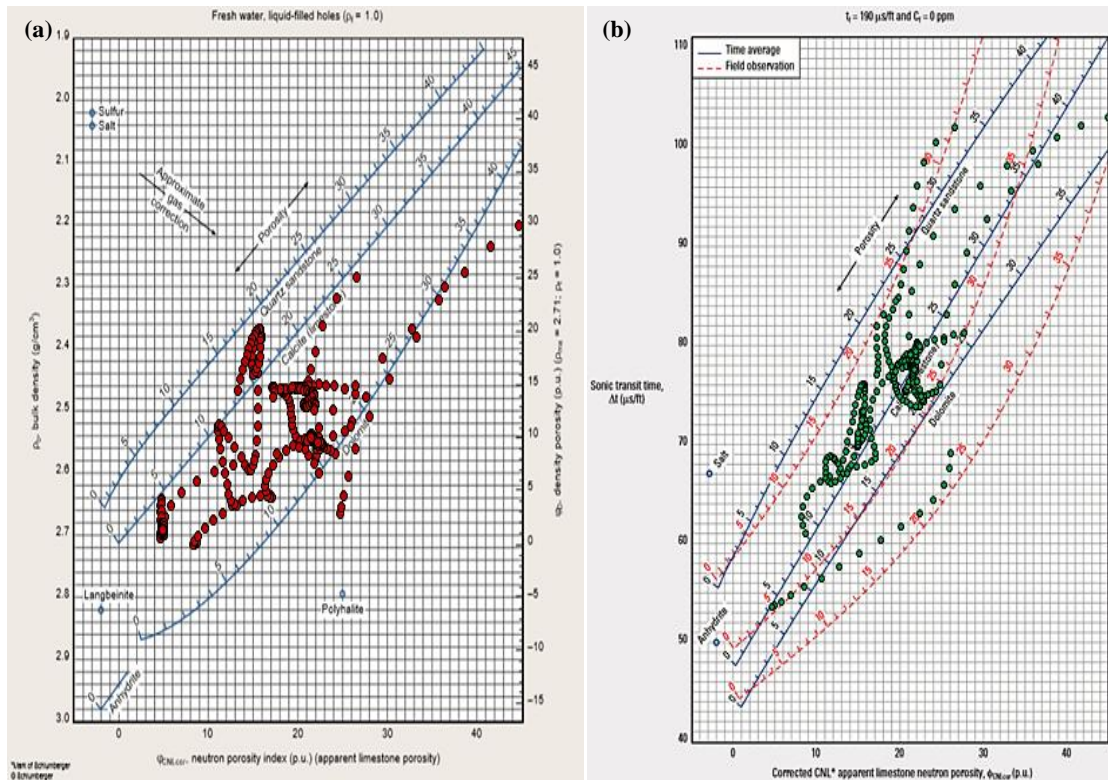
Anhydrite



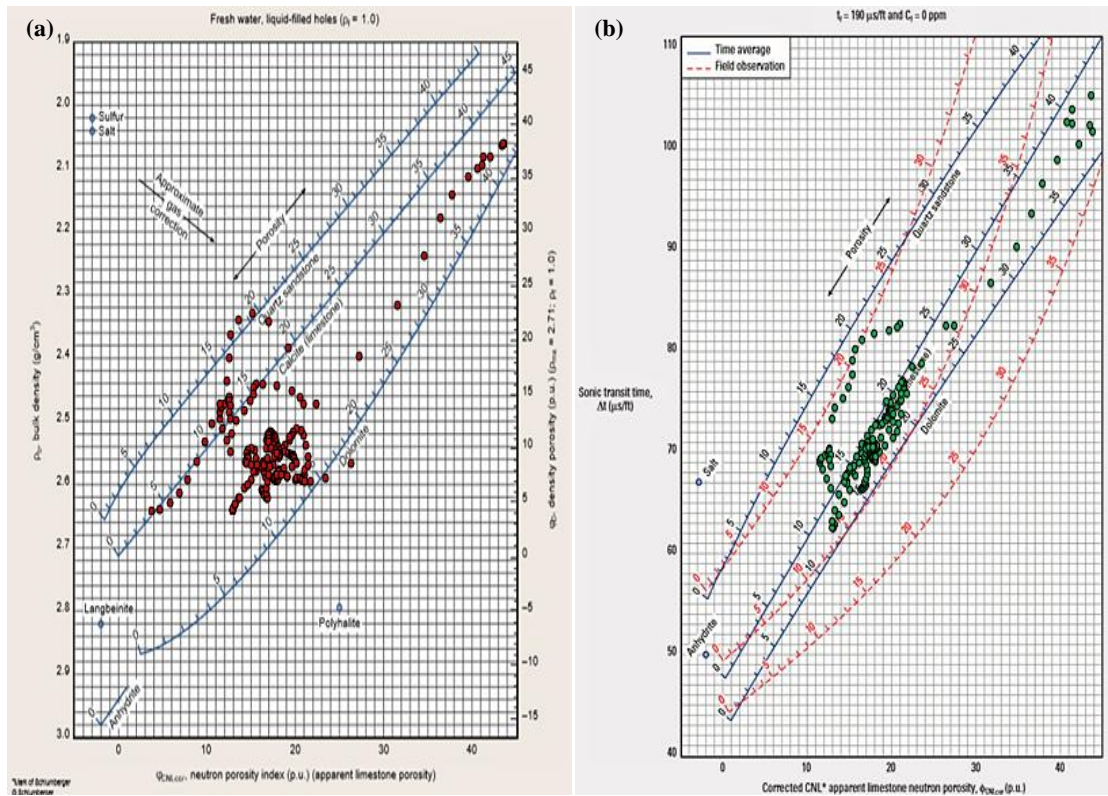
Σχήμα 4.8 : Διαγράμματα (a) ϕ_N - ϕ_D και (b) ϕ_N -DT για τις περατές ζώνες της γεώτρησης 08-08.



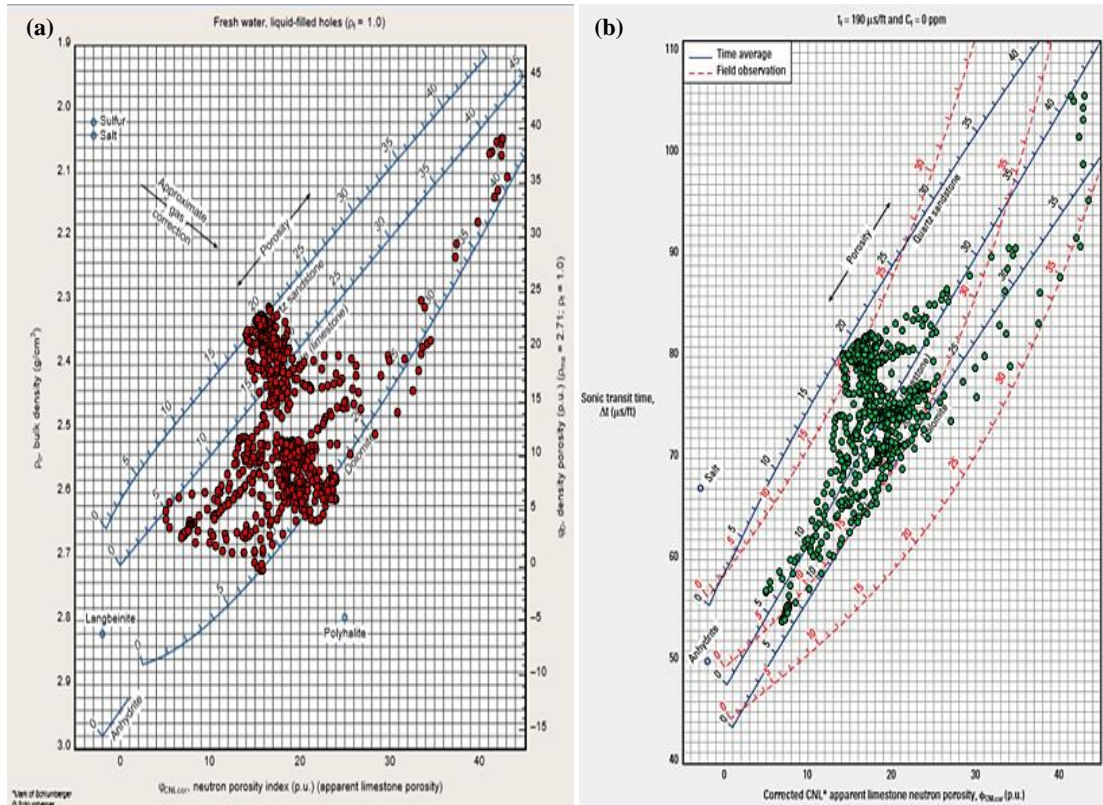
Σχήμα 4.9 : Διαγράμματα (a) ϕ_N - ϕ_D και (b) ϕ_N -DT για τις περατές ζώνες της γεώτρησης 09-05.



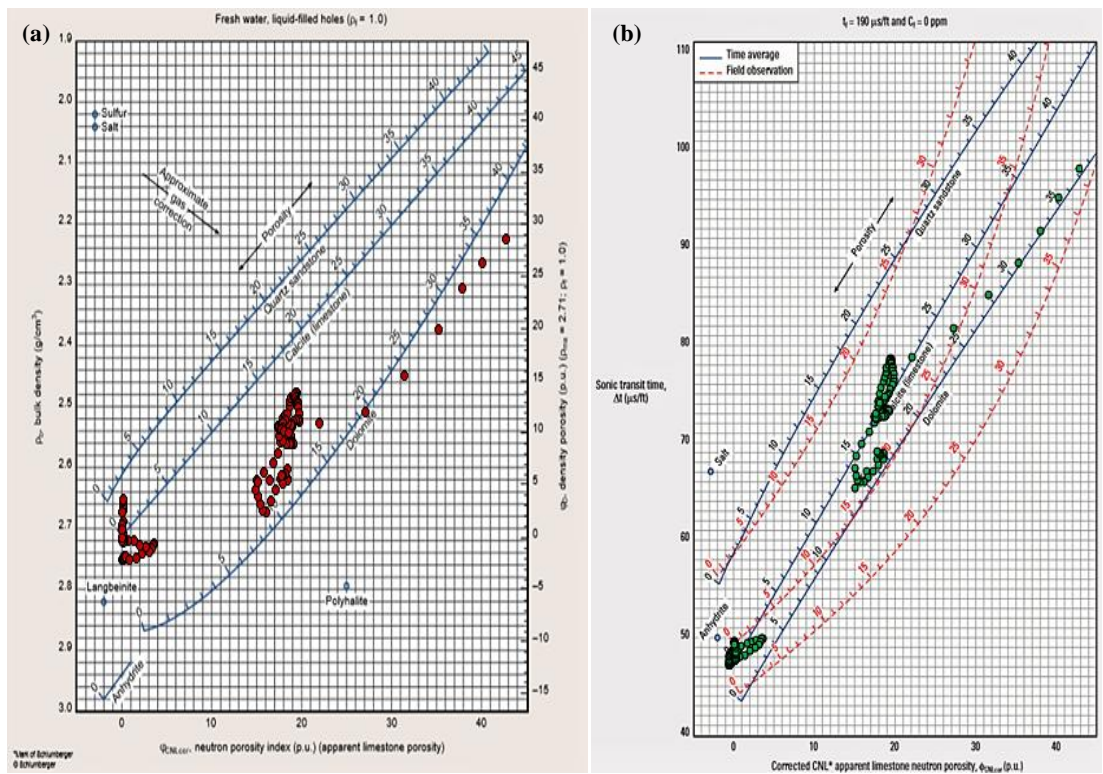
Σχήμα 4.10 : Διαγράμματα (a) ϕ_N - ϕ_D και (b) ϕ_N -DT για τις περατές ζώνες της γεώτρησης 09-17.



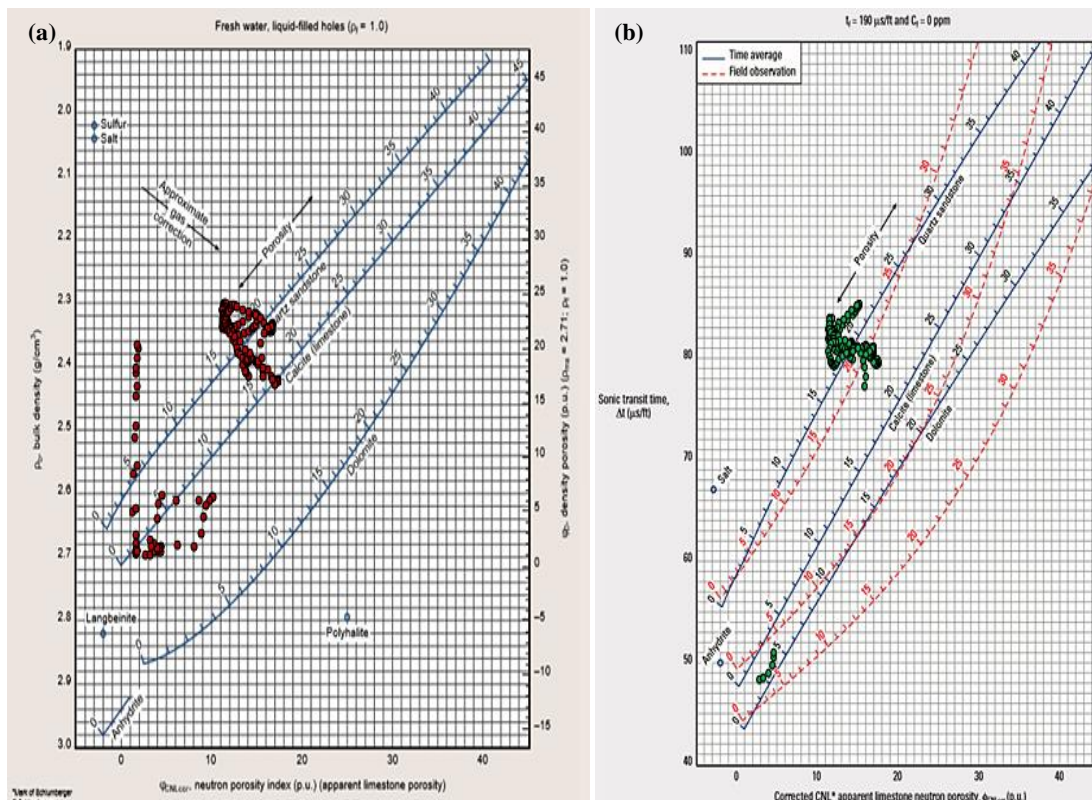
Σχήμα 4.11 : Διαγράμματα (a) ϕ_N - ϕ_D και (b) ϕ_N -DT για τις περατές ζώνες της γεώτρησης 11-08.



Σχήμα 4.12 : Διαγράμματα (a) Φ_N - Φ_D και (b) Φ_N -DT για τις περατές ζώνες της γεώτρησης 13-16.



Σχήμα 4.13 : Διαγράμματα (a) Φ_N - Φ_D και (b) Φ_N -DT για τις περατές ζώνες της γεώτρησης 14-09.



Σχήμα 4.14 : Διαγράμματα (α) ϕ_N - ϕ_D και (β) ϕ_N -DT για τις περατές ζώνες της γεώτρησης 16-08.

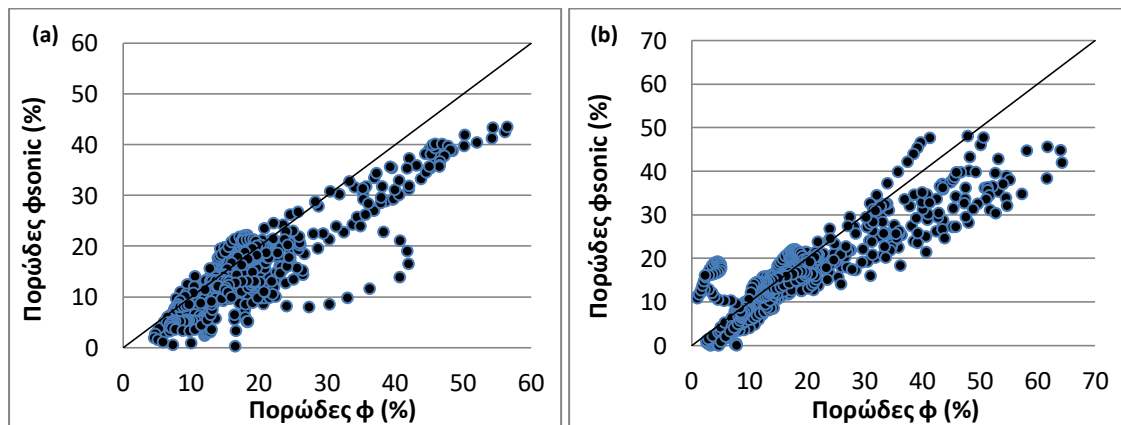
Από τα Σχήματα 4.5 έως 4.14 συμπεραίνεται πως οι τιμές των περατών σχηματισμών απλώνονται κυρίως στο εύρος ανάμεσα στις γραμμές ψαμμίτη-ασβεστόλιθου και ασβεστόλιθου-δολομίτη με κάποιες τιμές να βρίσκονται και στην περιοχή του φυσικού αερίου, οδηγώντας στο συμπέρασμα της ύπαρξης ψαμμιτικών και ασβεστολιθικών σχηματισμών με ποσοστά δολομίτη καθώς και την ύπαρξη φυσικού αερίου. Η γνώση όμως από τη γεωλογία της περιοχής πως οι λεκάνες πληρούνται κυρίως από ψαμμιτικούς σχηματισμούς και όχι από ασβεστόλιθο, οδηγεί στο συμπέρασμα για πιθανή ύπαρξη αργιλικών προσμίξεων στο συγκεκριμένο σχηματισμό, οι οποίοι έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα από τους ψαμμίτες και μπορούν να προκαλέσουν μετατοπίσεις των πραγματικών τιμών του πορώδους προς τις αντίστοιχες για τους σχηματισμούς του ασβεστολιθίου ή/και του δολομίτη στα διαγράμματα. Ένα ακόμη στοιχείο που συνηγορεί με την ύπαρξη ψαμμιτών στους διασκοπηθέντες σχηματισμούς αποτελεί και το γεγονός ότι η αρχική αντιστάθμιση των οργάνων μέτρησης πυκνότητας (FCD) και νετρονίου (CNL) για τη συλλογή των μετρήσεων έχει γίνει με ψαμμίτη και όχι με ασβεστόλιθο.

Επιπλέον, αμέσως μετά την αντιστοίχιση των τιμών των διαγραφιών DP_{SS} (%) και NP_{SS} (%) σε μετρήσεις με αντιστάθμιση σε ασβεστόλιθο, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των τιμών που προέκυψαν με τις αρχικές τιμές φ_N και φ_D των διαγραφιών. Από τη σύγκριση αυτή προέκυψε το

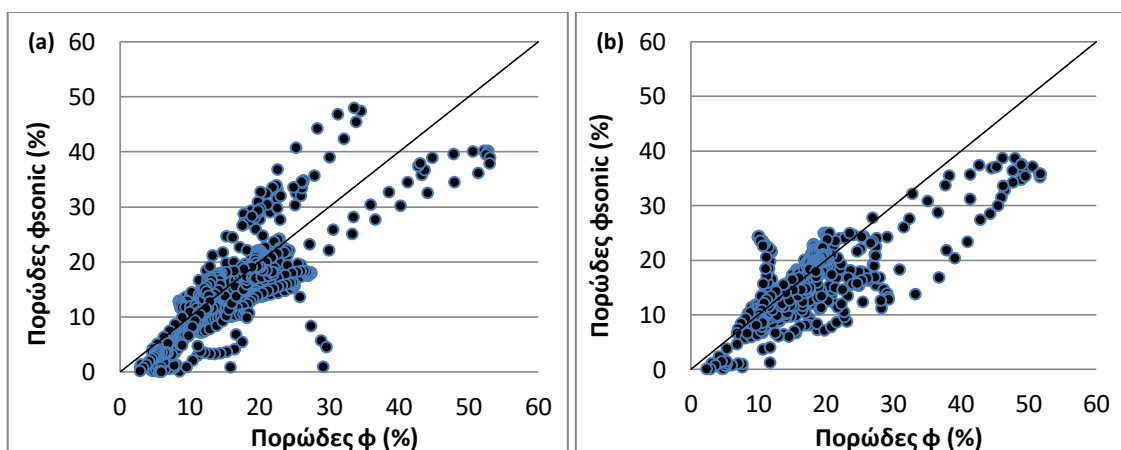
συμπέρασμα πως οι αρχικές τιμές φ_N είναι μικρότερες από τις διορθωμένες, ενώ όσον αφορά τις τιμές φ_D συμβαίνει το αντίθετο.

4.7 Δημιουργία διαγραμμάτων φ - φ_{sonic}

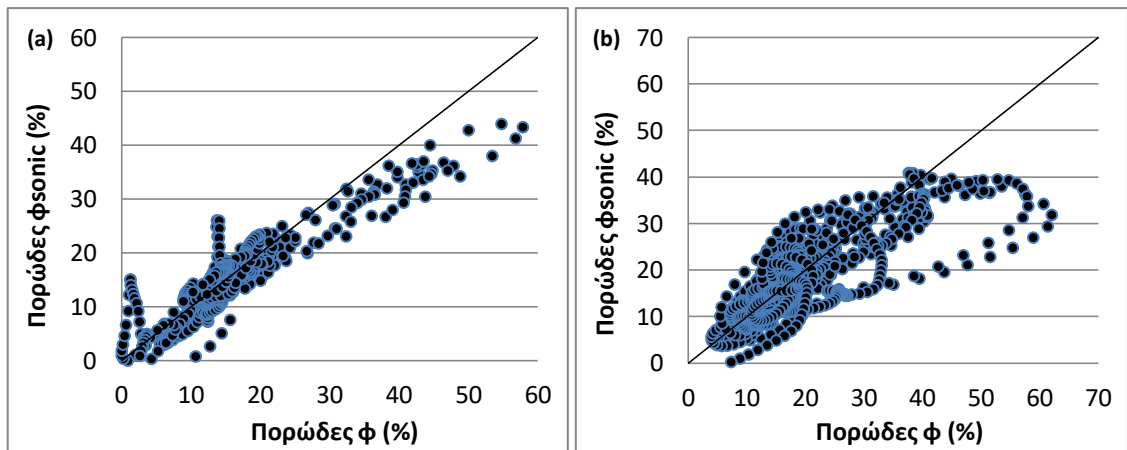
Με βάση τις τιμές του ολικού πορώδους φ (%), που υπολογίστηκε με τη χρήση των μη διορθωμένων τιμών φ_N και φ_D , και του πρωτογενούς πορώδους φ_{sonic} (%) περατών και μη περατών σχηματισμών δημιουργήθηκαν διαγράμματα φ - φ_{sonic} . Παρακάτω απεικονίζεται το σύνολο των διαγραμμάτων όλων των γεωτρήσεων. Κάθε διάγραμμα αντιστοιχεί σε μία γεώτρηση. Σε γενικές γραμμές και όπως ήταν αναμενόμενο, παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο μέρος των τιμών συγκεντρώνονται κάτω από την διαγώνιο των διαγραμμάτων, δηλαδή οι τιμές του ολικού πορώδους είναι μεγαλύτερες από αυτές των ακουστικών διαγραφιών (πρωτογενούς).



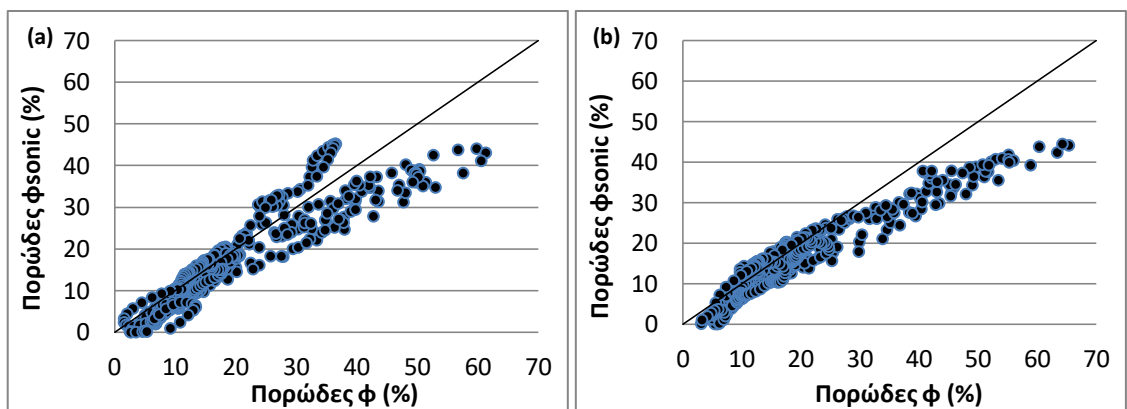
Σχήμα 4.15 : Διαγράμματα φ (%) - φ_{sonic} (%) των γεωτρήσεων (a) 01-08 και (b) 01-17.



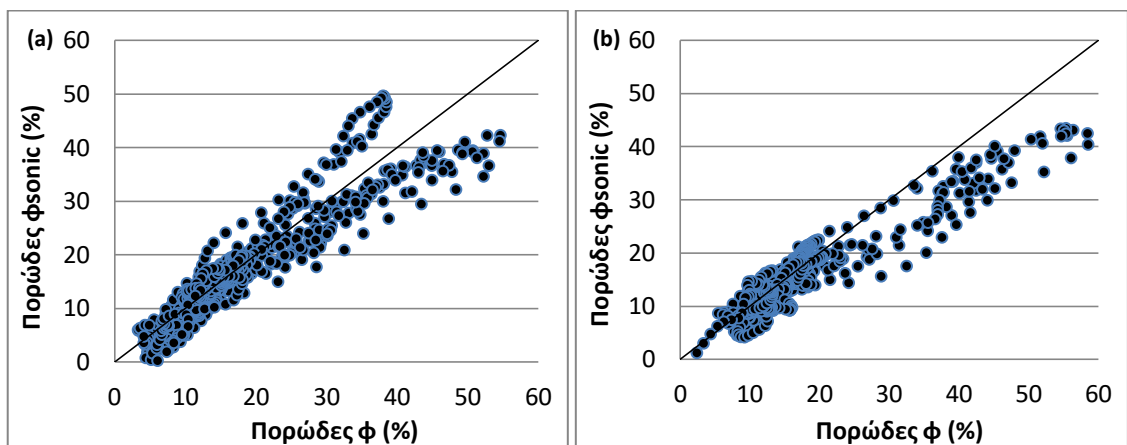
Σχήμα 4.16 : Διαγράμματα φ (%) - φ_{sonic} (%) των γεωτρήσεων (a) 05-16 και (b) 08-08.



Σχήμα 4.17 : Διαγράμματα ϕ (%) - ϕ_{sonic} (%) των γεωτρήσεων (a) 09-05 και (b) 09-17.



Σχήμα 4.18 : Διαγράμματα ϕ (%) - ϕ_{sonic} (%) των γεωτρήσεων (a) 11-08 και (b) 13-16.

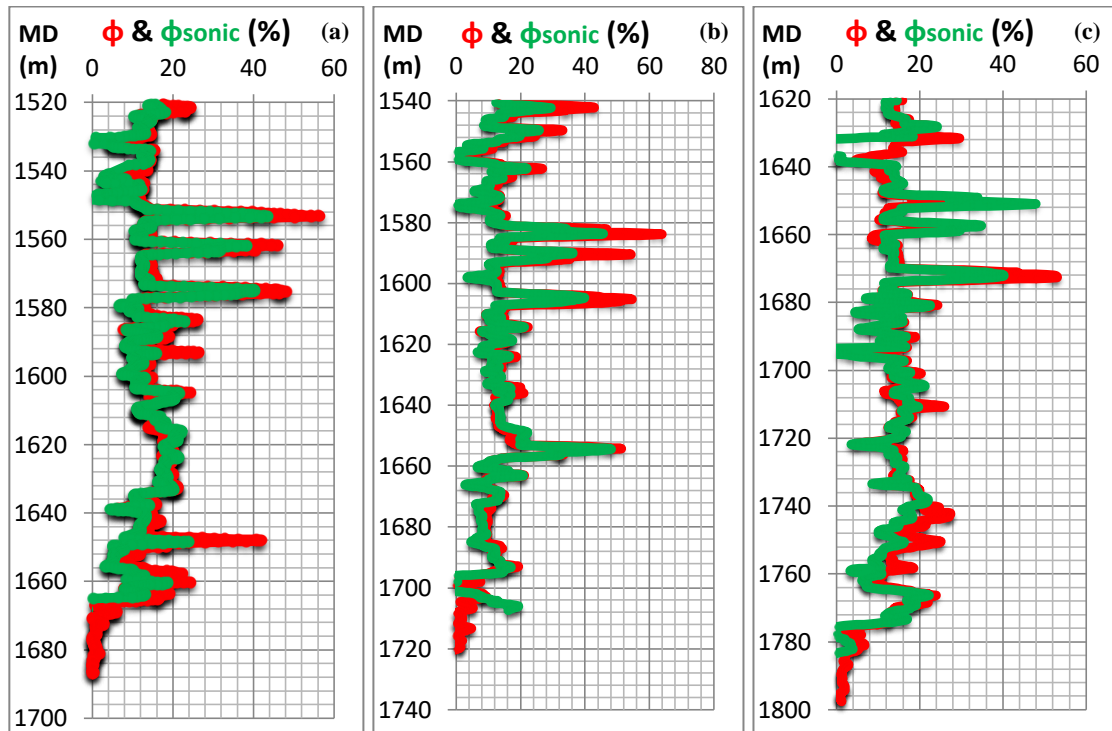


Σχήμα 4.19 : Διαγράμματα ϕ (%) - ϕ_{sonic} (%) των γεωτρήσεων (a) 14-09 και (b) 16-08.

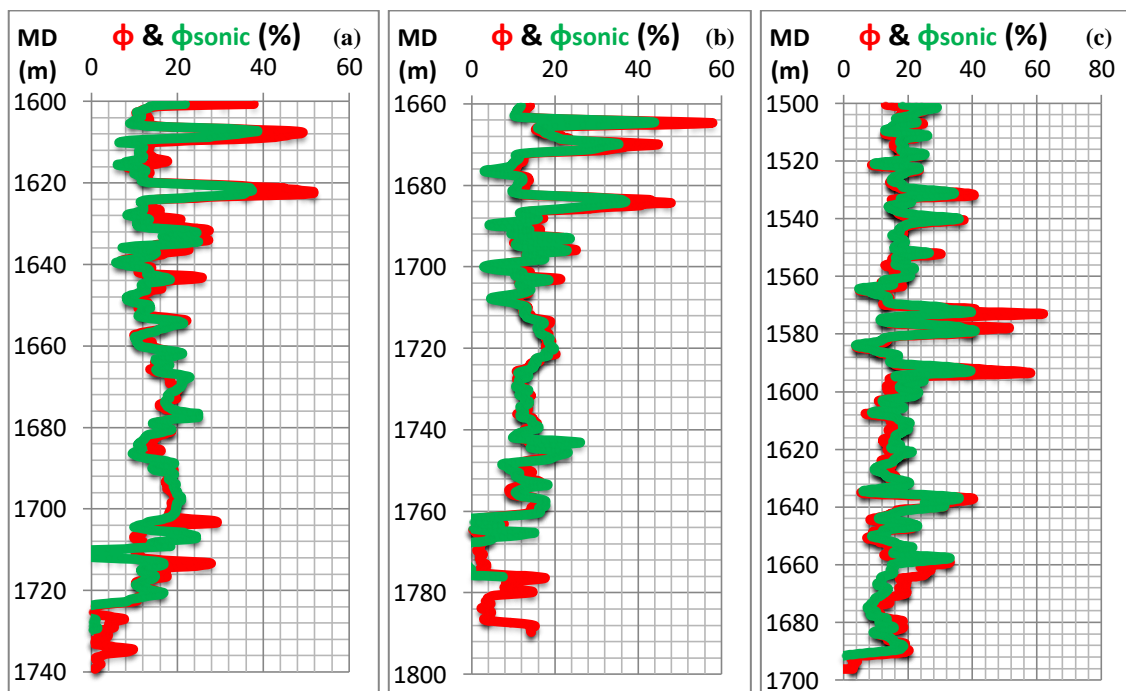
4.8 Δημιουργία διαγραμμάτων ϕ και ϕ_{sonic} σε σχέση με το βάθος

Δημιουργήθηκαν διαγράμματα ϕ και ϕ_{sonic} σε αντιστοίχιση με το βάθος κάθε γεώτρησης για τους περατούς και μη περατούς σχηματισμούς. Κάθε διάγραμμα αφορά τις τιμές μιας

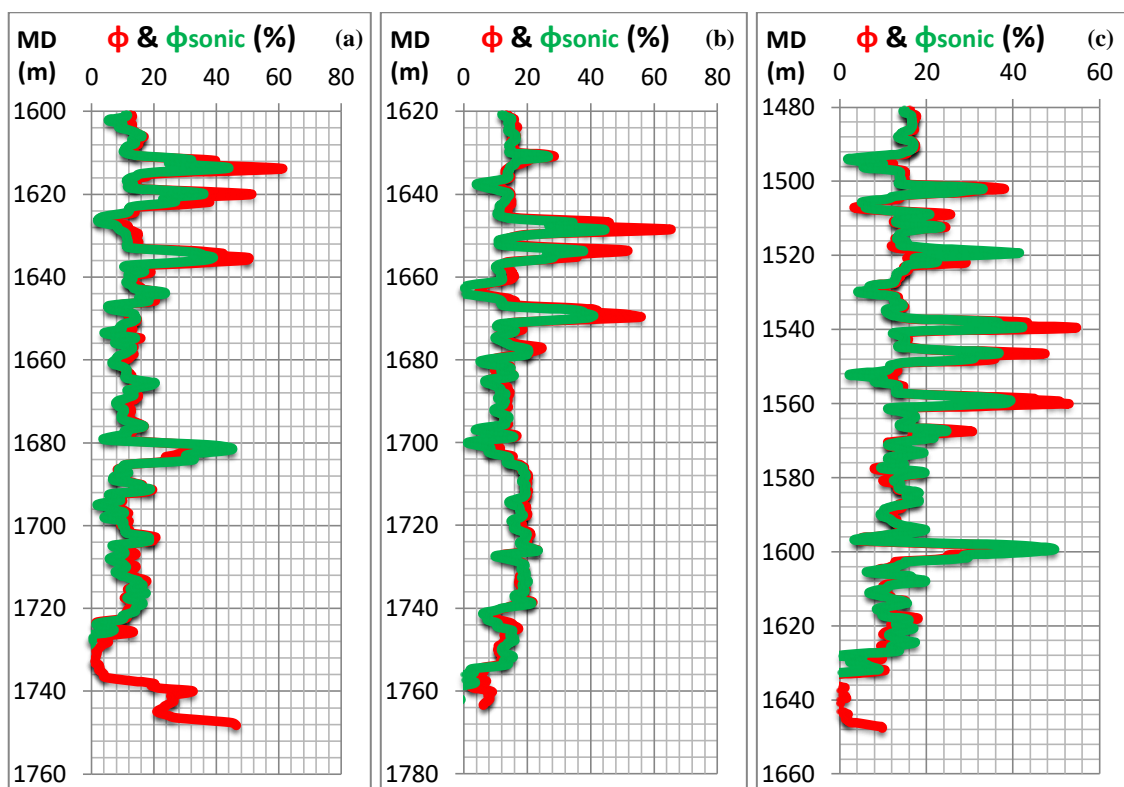
γεώτρησης. Όπως φαίνεται και στα ακόλουθα διαγράμματα (Σχήματα 4.20-4.23) οι τιμές του πορώδους από τις ακουστικές διαγραφίες (πρωτογενές) είναι μικρότερες από αυτές του ολικού πορώδους ειδικότερα στις θέσεις με υψηλό πορώδες.



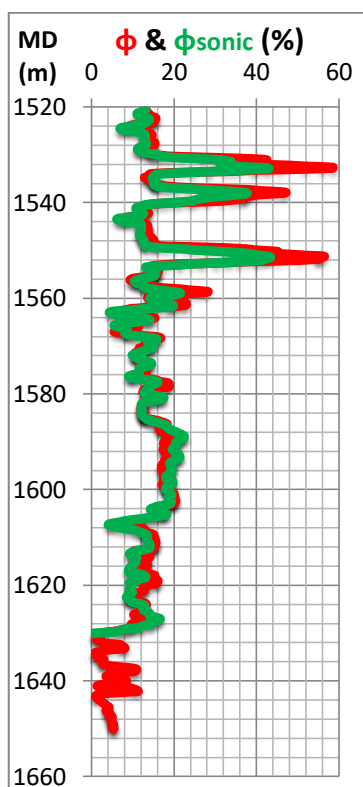
Σχήμα 4.20 : Διαγράμματα ϕ και ϕ_{sonic} σε σχέση με το βάθος των γεωτρήσεων (a) 01-08, (b) 01-17 και (c) 05-16. Ο κατακόρυφος άξονας αποτελεί το μετρούμενο βάθος (measure depth) σε m.



Σχήμα 4.21 : Διαγράμματα ϕ και ϕ_{sonic} σε σχέση με το βάθος των γεωτρήσεων (a) 08-08, (b) 09-05 και (c) 09-17. Ο κατακόρυφος άξονας αποτελεί το μετρούμενο βάθος (measure depth) σε m.



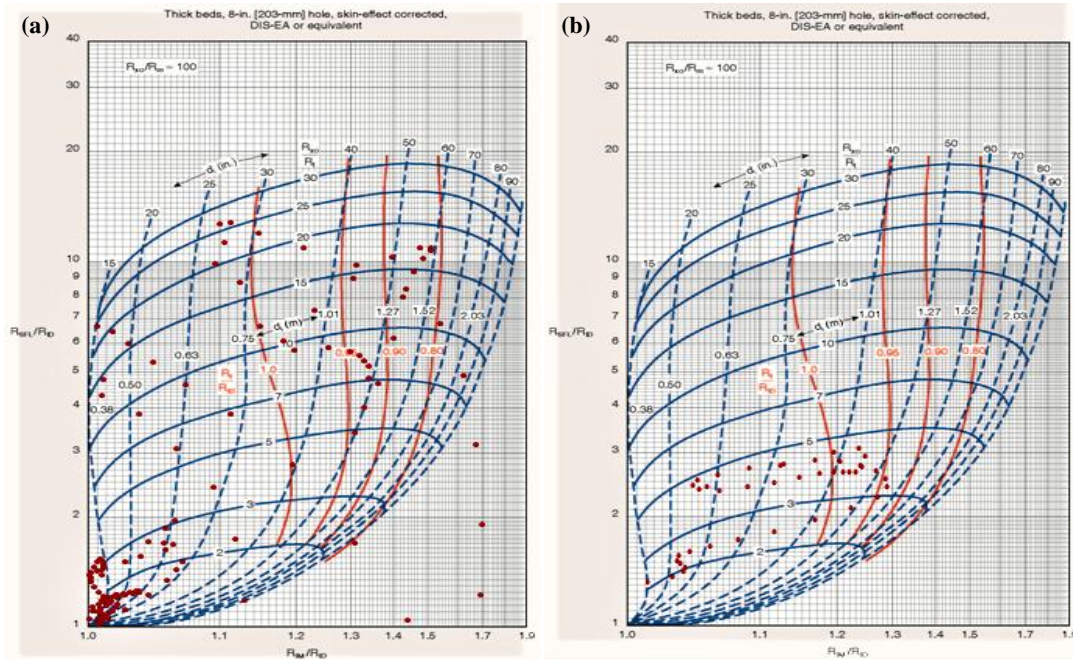
Σχήμα 4.22 : Διαγράμματα ϕ και ϕ_{sonic} σε σχέση με το βάθος των γεωτρήσεων (a) 11-18, (b) 13-16 και (c) 14-09. Ο κατακόρυφος άξονας αποτελεί το μετρούμενο βάθος (measure depth) σε m.



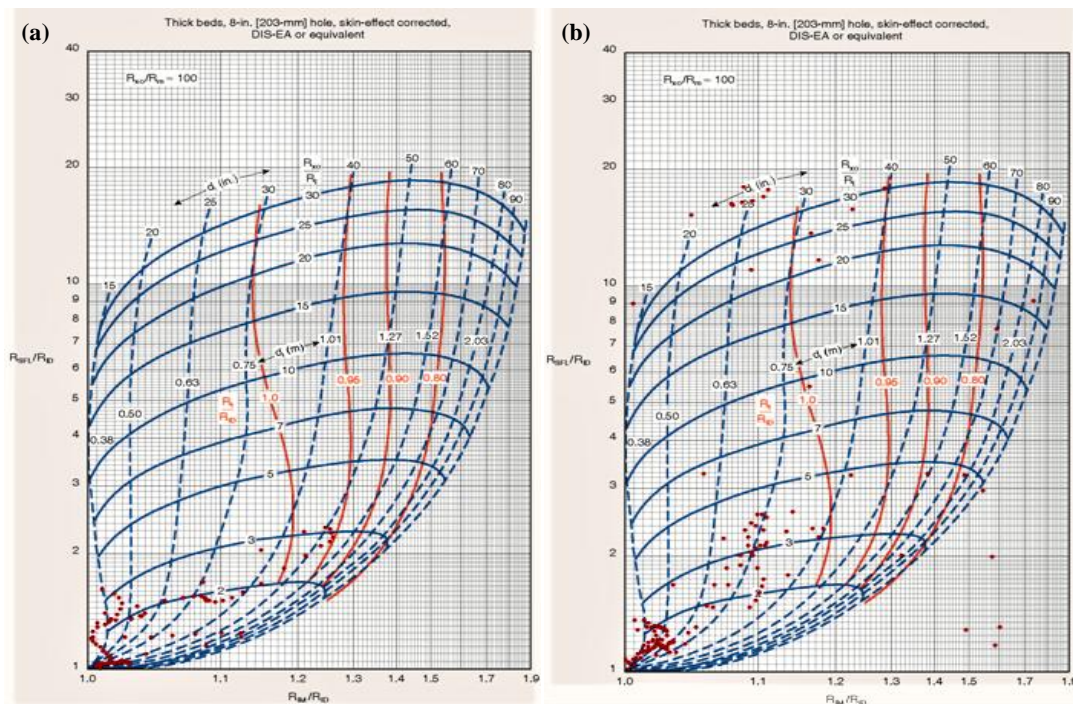
Σχήμα 4.23 : Διάγραμμα ϕ και ϕ_{sonic} σε σχέση με το βάθος της γεώτρησης 16-08. Ο κατακόρυφος άξονας αποτελεί το μετρούμενο βάθος (measure depth) σε m.

4.9 Απεικόνιση τιμών περατών σχηματισμών σε διαγράμματα R_{IM}/R_{ID} - R_{SFL}/R_{ID}

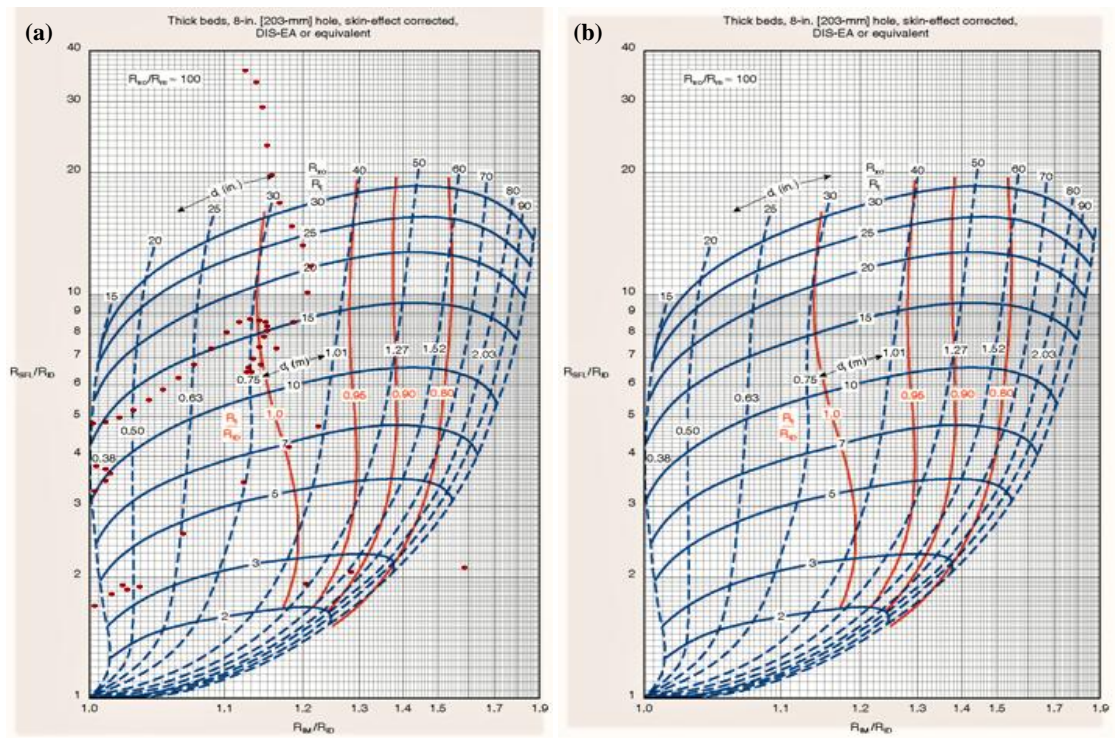
Πραγματοποιήθηκε απεικόνιση των τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης των ηλεκτρικών διαγραφιών για το σύνολο των περατών σχηματισμών σε διαγράμματα R_{IM}/R_{ID} - R_{SFL}/R_{ID} (Schlumberger, 2009). Κάθε διάγραμμα αντιστοιχεί στις τιμές μιας γεώτρησης.



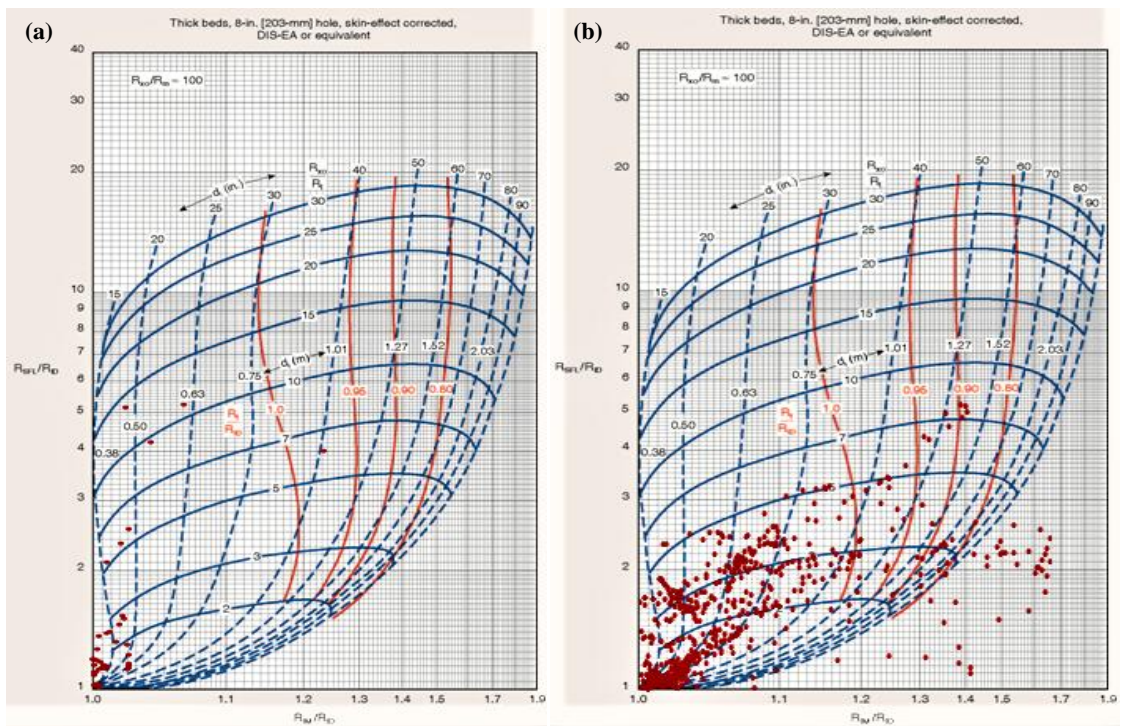
Σχήμα 4.24 : Διαγράμματα R_{IM}/R_{ID} – R_{SFL}/R_{ID} των γεωτρήσεων (α) 01-08 και (β) 01-17.



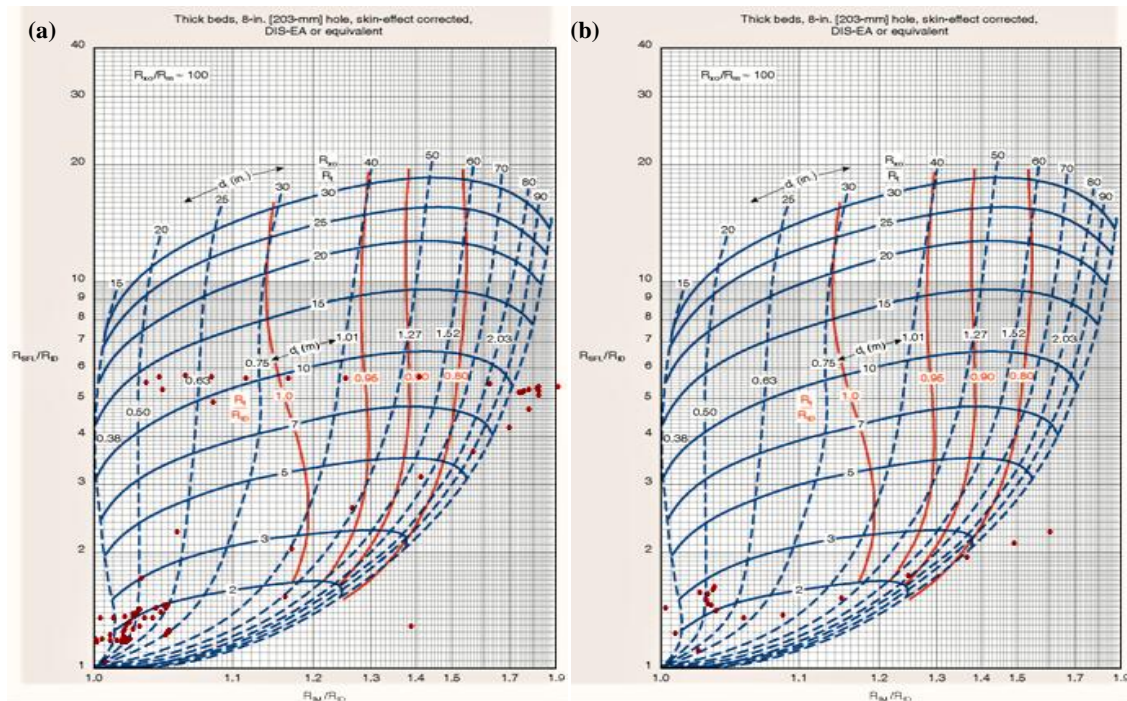
Σχήμα 4.25: Διαγράμματα R_{IM}/R_{ID} – R_{SFL}/R_{ID} των γεωτρήσεων (α) 05-16 και (β) 08-08.



Σχήμα 4.26 : Διαγράμματα $R_{IM}/R_{ID} - R_{SF/L}/R_{ID}$ των γεωτρήσεων (α) 09-05 και (β) 09-17.



Σχήμα 4.27 : Διαγράμματα $R_{IM}/R_{ID} - R_{SF/L}/R_{ID}$ των γεωτρήσεων (α) 11-08 και (β) 13-16.



Σχήμα 4.28 : Διαγράμματα $R_{IM}/R_{ID} - R_{SF/L}/R_{ID}$ των γεωτρήσεων (a) 14-09 και (b) 16-08.

Σύμφωνα με τα Σχήματα 4.24 έως 4.28, συμπεραίνεται πως οι περισσότερες τιμές R_{ILM}/R_{ILD} συγκεντρώνονται σε εύρος 1-1,1 και οι τιμές $R_{SF/L}/R_{ID}$ σε εύρος 1-2 ή 1-3 υποδηλώνοντας την ύπαρξη σχηματισμών με αργλικές προσμίξεις και μικρή ζώνη διεύθυνσης, καθώς οι τιμές $R_{SF/L}$ είναι μεγαλύτερες από τις τιμές R_{ILD} και R_{ILM} που βρίσκονται κοντά. Οι τιμές του d_i συγκεντρώνονται κυρίως σε εύρος 0,38-1,27 m, του λόγου R_t/R_{ID} θεωρούνται ίσες της μονάδας και του R_{x0}/R_t μικρότερες του πέντε. Να σημειωθεί πως στο διάγραμμα της γεώτρησης 09-17 [Σχήμα 4.26 (b)] δεν εμφανίζονται σημεία περατών σχηματισμών καθώς οι λόγοι R_{IM}/R_{ID} και $R_{SF/L}/R_{ID}$ λαμβάνουν τιμές μικρότερες της μονάδας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΕΥΡΕΣΗ ΒΑΘΜΟΥ ΚΟΡΕΣΜΟΥ ΣΕ ΝΕΡΟ (S_w)

5.1 Εισαγωγή

Για την εύρεση των τιμών του βαθμού κορεσμού σε νερό (S_w), είναι απαραίτητος ο υπολογισμός της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του νερού του σχηματισμού (R_w). Ο καθορισμός των τιμών R_w πραγματοποιήθηκε με τη χρήση δύο διαφορετικών μεθόδων. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε η τεχνική R_{wa} από όπου και προέκυψε μια τιμή για την κάθε γεώτρηση. Έπειτα, μέσω του συνδυασμού των διαγραφιών ηλεκτρικής αντίστασης και πορώδους δημιουργήθηκαν τα διαγράμματα Pickett και Hingle για το σύνολο των τιμών των γεωτρήσεων και προέκυψε από κάθε διάγραμμα μια συνολική τιμή R_w . Τέλος, βρέθηκαν οι τιμές S_w χρησιμοποιώντας την τιμή του R_w που προέκυψε από την τεχνική R_{wa} και πραγματοποιήθηκε η απεικόνισή τους σε σχέση με το βάθος.

5.2 Καθορισμός του R_w

Μέσω της τεχνικής R_{wa} έλαβε χώρα ο υπολογισμός της τιμής R_w για κάθε μία από τις δέκα γεωτρήσεις και εντοπίστηκε η γεώτρηση με την μικρότερη τιμή R_{wa} . Στη συνέχεια, μέσω των διαγραμμάτων Pickett και Hingle πραγματοποιήθηκε η απεικόνιση των τιμών και των δέκα γεωτρήσεων και υπολογίστηκε μια συνολική τιμή της R_w από κάθε διάγραμμα.

5.2.1 Καθορισμός του R_w μέσω της τεχνικής R_{wa}

Τα βήματα για τον καθορισμό του R_w μέσω της τεχνικής R_{wa} περιγράφονται στη συνέχεια λεπτομερώς.

Αρχικά, για τη χρήση της μεθόδου θα πρέπει να ισχύουν οι εξής προϋποθέσεις :

1. Το R_w να παραμένει σταθερό
2. Οι υπό αξιολόγηση περατοί σχηματισμοί να χαρακτηρίζονται από την ίδια λιθολογία
3. Να υπάρχει υδροφόρος ζώνη

Χρησιμοποιείται η εξίσωση του Archie για καθαρούς σχηματισμούς (χωρίς αργιλικές προσμίξεις) :

$$R_w = \frac{S_w^2 * R_t}{F} \quad (5.1)$$

Όπου S_w είναι ο βαθμός κορεσμού σε νερό, R_t η πραγματική ειδική ηλεκτρική αντίσταση του σχηματισμού και F ο συντελεστής σχηματισμού.

Αν και μέσω των διαγραμμάτων ϕ_N - ϕ_D και ϕ_N -DT (Σχήματα 4.5 έως 4.14) έχει προκύψει η ύπαρξη ψαμμιτικών και ασβεστολιθικών σχηματισμών με ποσοστά δολομίτη καθώς και ύπαρξη φυσικού αερίου, σύμφωνα με τα γεωλογικά στοιχεία, οι λεκάνες της περιοχής πληρούνται κυρίως από ψαμμιτικούς σχηματισμούς και όχι από ασβεστόλιθο. Για αυτό το λόγο ο υπολογισμός του R_{wa} πραγματοποιείται θεωρώντας ψαμμιτικούς σχηματισμούς και υπολογίζεται ως εξής :

$$R_{wa} = R_t / F \quad (5.2)$$

Όπου $R_t \approx R_{ILD}$ και R_{ILD} οι τιμές των ηλεκτρικών διαγραφιών επαγωγής μεγάλης διεισδυτικής ικανότητας (ILD)

$$\text{και } F = \alpha / \phi^2 \quad (5.3)$$

Όπου η τιμή α εξαρτάται από τη σκολιότητα και ισούται με 0,81 για ψαμμιτικούς σχηματισμούς. Ενώ η τιμή ϕ αντιστοιχεί στο ολικό πορώδες, το οποίο υπολογίστηκε με τη χρήση των μη διορθωμένων τιμών ϕ_N και ϕ_D και επιλέχθηκε έναντι του πρωτογενούς (ϕ_{sonic}), καθώς οι τιμές του είναι πιο αντιπροσωπευτικές στις πραγματικές τιμές του πορώδους.

Η επιλογή του $R_{wa(min)}$ πραγματοποιήθηκε αποκλείοντας τους σχηματισμούς tight καθώς διαθέτουν μικρό πορώδες, αλλά και όσους έχουν χαρακτηριστεί μη περατοί. Έπειτα επιλέχθηκε η μικρότερη τιμή των τιμών του R_{wa} ως $R_{wa(min)}$.

Από την επεξεργασία όλων των γεωτρήσεων προέκυψαν οι τιμές $R_{wa(min)}$ που ακολουθούν.

Πίνακας 5.1 : Τιμές $R_{wa(min)}$ (Ωm) των δέκα γεωτρήσεων.

Γεώτρηση	$R_{wa(min)}$ (Ωm)
01-08	0,172
01-17	6,704
05-16	0,420
08-08	0,514
09-05	0,530
09-17	0,429
11-08	0,176
13-16	0,190
14-09	0,396
16-08	1,507

Με ελάχιστη την τιμή $R_{wa(min)} = 0,172 \Omega m$ της γεωτρήσης 01-08.

Εφόσον προσδιορίστηκε η τιμή του R_w ακολούθως υπολογίστηκε και ο βαθμός κορεσμού σε νερό συναρτήσει της R_{wa} μέσω της εξίσωσης :

$$S_w = \sqrt{\frac{R_w}{R_{wa}}} \quad (5.4)$$

Όπου $R_w = R_{wa(min)}$

Μετά τον υπολογισμό του S_w πραγματοποιήθηκε ο χαρακτηρισμός σύμφωνα με τα παρακάτω όρια :

- tight \rightarrow Όταν το πορώδες ϕ είναι μικρό ($< 15\%$). Οι θέσεις αυτές θεωρούνται χωρίς οικονομικό ενδιαφέρον λόγω του μικρού τους πορώδους και κατά συνέπεια του μικρού όγκου ρευστών.
- wet \rightarrow Όταν το S_w είναι μεγάλο (≥ 0.58). Στις θέσεις αυτές οι τιμές του βαθμού κορεσμού σε νερό δηλώνουν την ύπαρξη υδροφόρου ζώνης.
- shaly \rightarrow Όταν υπάρχουν σχηματισμοί με μεγάλο όγκο αργιλικών προσμίξεων ($V_{sh} > 50\%$).
- pay \rightarrow Όταν το S_w είναι μικρό (< 0.58). Οι θέσεις αυτές αποτελούν σημεία οικονομικού ενδιαφέροντος και πιθανής εύρεσης υδρογονανθράκων.

Οι ζώνες ενδιαφέροντος (pay) οριοθετήθηκαν στις θέσεις όπου $R_{wa} \geq 3R_w$, που αντιστοιχεί σε βαθμό κορεσμού σε νερό μικρότερο ή ίσο με 57.7 % περίπου.

5.2.2 Καθορισμός του R_w μέσω διαγραμμάτων Pickett και Hingle

Για τη χρήση της μεθόδου θα πρέπει να ισχύουν οι εξής προϋποθέσεις :

1. Το R_w να παραμένει σταθερό
2. Οι υπό αξιολόγηση περατοί σχηματισμοί να χαρακτηρίζονται από την ίδια λιθολογία
3. Να υπάρχει υδροφόρος ζώνη

Για τη δημιουργία των διαγραμμάτων Pickett και Hingle, δοκιμάστηκαν και τα δύο είδη πορώδους αλλά επιλέχθηκε το ολικό πορώδες ϕ (%) ως καταλληλότερο για την απεικόνιση καθώς οι τιμές του ήταν πιο εύκολες στη διαχείριση, αλλά και πιο αντιπροσωπευτικές στις πραγματικές τιμές του πορώδους.

5.2.2.1 Διάγραμμα Pickett

Και στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιείται η εξίσωση του Archie για καθαρούς σχηματισμούς (χωρίς αργλικές προσμίξεις):

$$S_w = \sqrt[n]{\frac{F R_w}{R_t}} \Leftrightarrow R_t = \frac{F R_w}{S_w^n} \Leftrightarrow R_t = \frac{1}{\phi^m} \frac{\alpha R_w}{S_w^n} \Leftrightarrow \phi = \left[\frac{\alpha R_w}{S_w^n} \right]^{\frac{1}{m}} [R_t]^{-\frac{1}{m}} \quad (5.5)$$

Η τελική εξίσωση είναι της μορφής $y = a \cdot x^{-b}$, όπου $y = \phi$, $a = \left(\frac{\alpha R_w}{S_w^n} \right)^{\frac{1}{m}}$, $x = R_t$ και $b = 1/m$.

Μετατρέποντας σε λογάριθμο και τα δύο μέρη προκύπτει :

$$\log(R_t) = -m \log(\phi) + \log(\alpha R_w) - n \log(S_w) \quad (5.6)$$

Αρχικά, δημιουργήθηκε διλογαριθμικό διάγραμμα με άξονα x τις τιμές R_t όλων συνολικά των γεωτρήσεων και με άξονα y τις τιμές του ολικού πορώδους ϕ όλων των γεωτρήσεων επίσης. Οι τιμές αυτές ανήκουν μόνο στους περατούς σχηματισμούς ($V_{sh} < 50\%$). Τα σημεία που προέκυψαν διαχωρίστηκαν σε $R_{wa} - \text{tight}$, $R_{wa} - \text{wet}$ και $R_{wa} - \text{pay}$ σύμφωνα με τον χαρακτηρισμό των σχηματισμών που προέκυψε από την τεχνική R_{wa} (Σχήμα 5.1). Στη συνέχεια, από τα σημεία τα οποία έχουν χαρακτηριστεί ως wet και βρίσκονται στην αριστερή πλευρά του

διαγράμματος επιλέχθηκαν τρία, τα οποία διακρίνεται πως θα μπορούσαν να σχηματίσουν μια ευθεία γραμμή. Στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε και ένα σημείο το οποίο αν και έχει χαρακτηριστεί ως tight παρατηρείται πως θα μπορούσε να βρίσκεται στην ίδια ευθεία με τα προηγούμενα. Με τη χρήση των τεσσάρων αυτών σημείων δημιουργήθηκε η ευθεία $S_w = 1$ από την οποία και προέκυψε εξίσωση της μορφής $y = a \cdot x^{-b}$.

Έπειτα, σύμφωνα με τις εξισώσεις 5.5 και 5.6 και θεωρώντας $n = 2$, ορίζεται $S_w = 1$ και προκύπτει $\log(S_w) = 0$. Επομένως, η κλίση της ευθείας που δημιουργήθηκε στο διάγραμμα είναι ίση με $b = 1/m$. Ενώ, ορίζοντας $\phi = 1$ προκύπτει $\log(\phi) = 0$, με αποτέλεσμα να ισχύει πως $R_t = \alpha R_w$. Γνωρίζοντας πως $\alpha = 0,81$ για ψαμμιτικούς σχηματισμούς, γεγονός που βασίζεται στο χαρακτηρισμό των σχηματισμών από τη γεωλογία της περιοχής, υπολογίστηκαν μέσω της εξίσωσης της ευθείας $S_w = 1$ οι τιμές m και R_w (Ωm). Το σημείο R_w επάνω στο διάγραμμα ορίστηκε από το ζεύγος των τιμών $x = 0,137 \Omega m$ και $y = 1$ οι οποίες προέκυψαν κατά τον υπολογισμό του σύμφωνα με την εξίσωση της ευθείας $S_w = 1$. Τέλος, με τη χρήση της εξίσωσης 5.4 και γνωρίζοντας τις τιμές α , m και R_w , ορίστηκε $S_w = 0,58$ και υπολογίστηκαν οι τιμές του ολικού πορώδους ϕ για $R_t = 1$, $R_t = 10$ και $R_t = 100$. Τα τρία σημεία που προέκυψαν από τα ζεύγη τιμών (R_t, ϕ) που υπολογίστηκαν, χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία της ευθείας $S_w = 0,58$ και της αντίστοιχης εξίσωσής της με μορφή $y = a \cdot x^{-b}$.

Οι τιμές m και R_w που προέκυψαν είναι οι εξής :

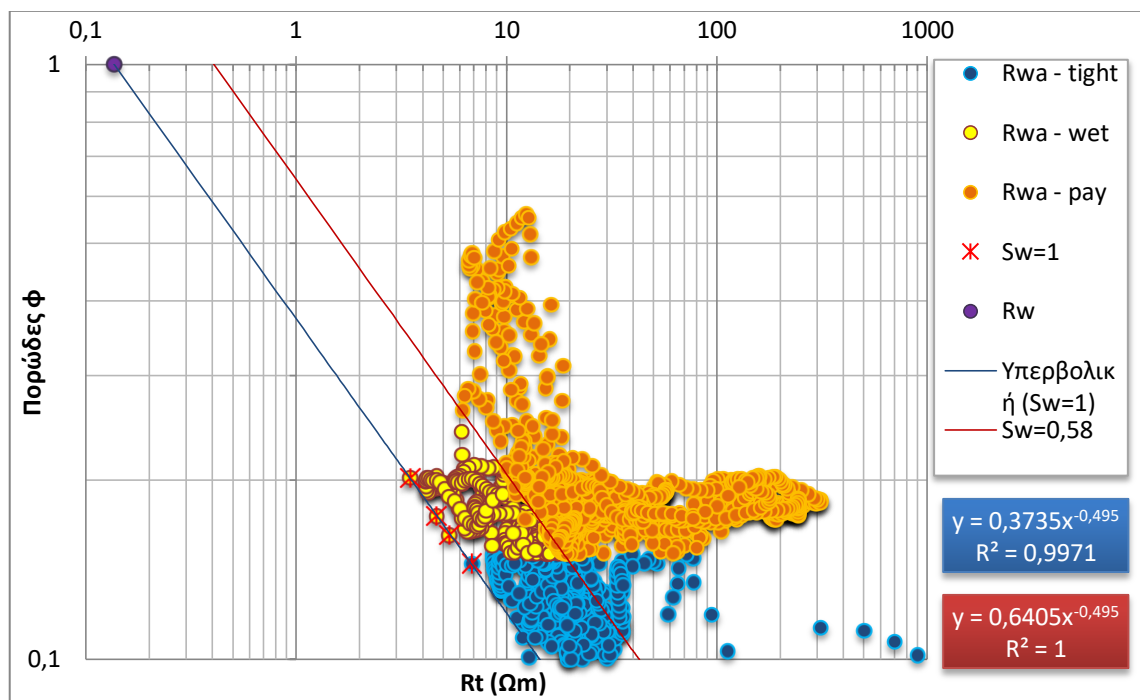
$$m = 2,02$$

$$R_w = 0,169 \Omega m$$

Ο συντελεστής m ονομάζεται συντελεστής διαγεννήσεως ή τσιμέντωσης (cementation factor). Η τιμή του κυμαίνεται μεταξύ του 1 (για ασύνδετα πετρώματα) και του 3 (για συμπαγή πετρώματα). Για ψαμμιτικούς σχηματισμούς ισούται με 2. Επομένως, η τιμή που υπολογίστηκε μέσω του διαγράμματος Pickett ($m = 2,02$) και είναι σχεδόν ίση με την τιμή 2 δηλώνει την ύπαρξη ψαμμιτικών σχηματισμών. Η τιμή R_w ($= 0,169 \Omega m$) που προέκυψε από το διάγραμμα Pickett είναι παραπλήσια με την αντίστοιχη τιμή που υπολογίστηκε μέσω της τεχνικής R_{wa} ($R_w = 0,172 \Omega m$).

Το διάγραμμα Pickett (Σχήμα 5.1) που ακολουθεί αφορά το σύνολο των δέκα γεωτρήσεων και απεικονίζει όλους τους περατούς σχηματισμούς τους. Με μπλε χρώμα απεικονίζονται οι σχηματισμοί που έχουν χαρακτηριστεί ως tight με βάση το ολικό πορώδες τους, με κίτρινο οι σχηματισμοί που έχουν χαρακτηριστεί ως wet και με πορτοκαλί οι pay σύμφωνα με τον χαρακτηρισμό που προέκυψε από την τεχνική R_{wa} . Το σημείο με μωβ χρώμα απεικονίζει το R_w

όταν η τιμή του ολικού πορώδους ϕ είναι ίση με 1 και ο βαθμός κορεσμού σε νερό λαμβάνει την τιμή $S_w = 100\%$. Η ευθεία με το μπλε χρώμα αποτελεί την $S_w = 1$ και η εξίσωσή της απεικονίζεται με μπλε χρώμα. Η ευθεία αυτή οριοθετεί τα σημεία με βάση τον βαθμό κορεσμού τους σε νερό. Στα σημεία του διαγράμματος που βρίσκονται δεξιότερα από αυτή, ο βαθμός κορεσμού σε νερό λαμβάνει μικρότερες τιμές από το 100%. Ενώ η ευθεία με κόκκινο χρώμα αποτελεί την $S_w = 0,58$ και η εξίσωσή της απεικονίζεται με κόκκινο χρώμα. Με τη σειρά της αποτελεί το όριο δεξιότερα από το οποίο ο βαθμός κορεσμού σε νερό των σχηματισμών λαμβάνει τιμές μικρότερες από 58%. Οι ευθείες αυτές χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό των σχηματισμών. Οι σχηματισμοί που βρίσκονται μεταξύ των ευθειών χαρακτηρίζονται ως wet ενώ αυτοί που βρίσκονται δεξιότερα της ευθείας $S_w = 0,58$ χαρακτηρίζονται ως pay. Όσοι σχηματισμοί έχουν χαρακτηριστεί ως tight με βάση το ολικό πορώδες τους δεν εξετάζονται περαιτέρω ούτε χαρακτηρίζονται με βάση τις ευθείες.



Σχήμα 5.1 : Διάγραμμα Pickett για το σύνολο των γεωτρήσεων.

Στο Σχήμα 5.1 παρατηρείται πως ένα σημείο το οποίο έχει χαρακτηριστεί ως pay μέσω της τεχνικής R_{wa} βρίσκεται εμφανώς μεταξύ των δύο ευθειών, ενώ αρκετά φαίνεται να βρίσκονται στα όρια της ευθείας. Γεγονός που τους προσδίδει τον χαρακτηρισμό wet μέσω του διαγράμματος Pickett. Επομένως, αφού το διάγραμμα Pickett αποκλείει σημεία από τους σχηματισμούς με τον χαρακτηρισμό pay μέσω της τεχνικής R_{wa} , θεωρείται η πιο συντηρητική μέθοδος από τις δύο.

5.2.2.2 Διάγραμμα Hingle

Και σε αυτή τη μέθοδο χρησιμοποιείται η εξίσωση του Archie για σχηματισμούς χωρίς αργλικές προσμίξεις ως εξής :

$$S_w^n = \frac{F R_w}{R_t} = \frac{\alpha}{\phi^m} \frac{R_w}{R_t} \Rightarrow \frac{S_w^n \phi^m}{\alpha R_w} = \frac{1}{R_t} \Rightarrow \sqrt[m]{\frac{S_w^n \phi^m}{\alpha R_w}} = \sqrt[m]{\frac{1}{R_t}} \Rightarrow \phi * \sqrt[m]{\frac{S_w^n}{\alpha R_w}} = \sqrt[m]{\frac{1}{R_t}}$$

$$\Rightarrow [R_t]^{-\frac{1}{m}} = \left[\frac{S_w^n}{\alpha R_w} \right]^{\frac{1}{m}} * \phi \quad (5.7)$$

Η τελική εξίσωση είναι της μορφής $y = a * x$, όπου $y = (R_t)^{-\frac{1}{m}}$, $a = \left(\frac{S_w^n}{\alpha R_w} \right)^{\frac{1}{m}}$ και $x = \phi$.

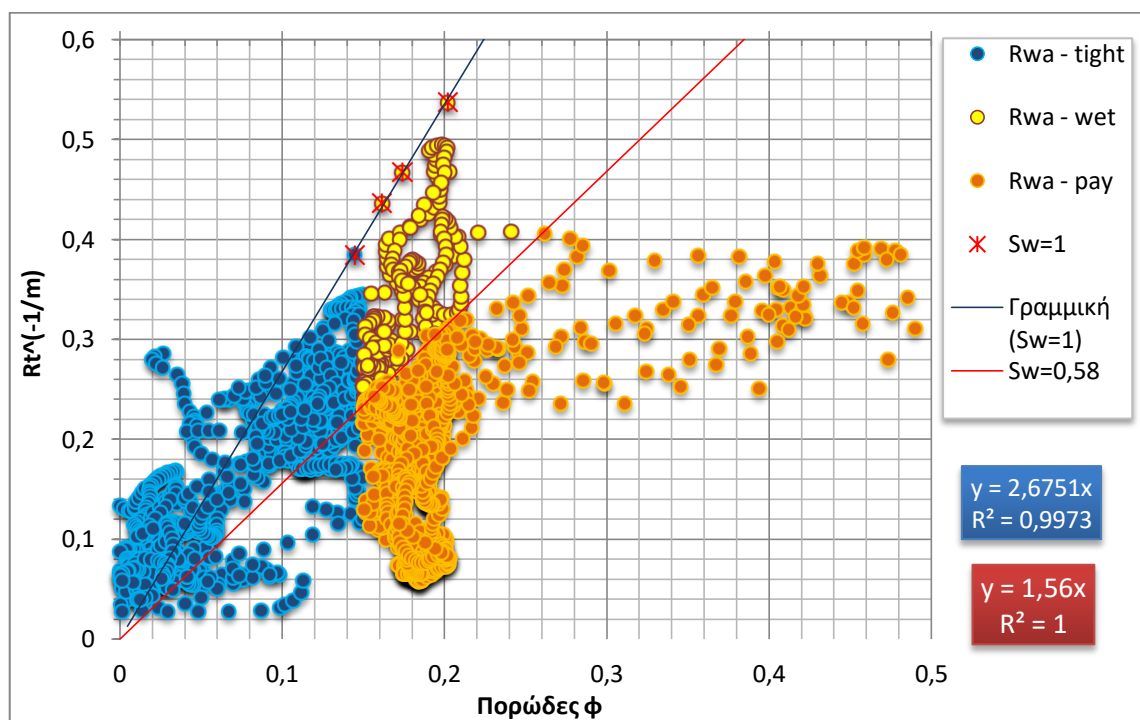
Αρχικά, δημιουργήθηκε διάγραμμα με άξονα x τις τιμές του ολικού πορώδους ϕ όλων των γεωτρήσεων και άξονα y τις τιμές $(R_t)^{-\frac{1}{m}}$, όπου R_t είναι οι αντίστοιχες τιμές των γεωτρήσεων και $m = 2,02$. Οι τιμές αυτές ανήκουν μόνο στους περατούς σχηματισμούς, ενώ η τιμή του m προήλθε από τα αποτελέσματα του διαγράμματος Pickett. Όπως και στο διάγραμμα Pickett (Σχήμα 5.1) τα σημεία διαχωρίστηκαν σε $R_{wa} - \text{tight}$, $R_{wa} - \text{wet}$ και $R_{wa} - \text{pay}$ σύμφωνα με τον χαρακτηρισμό των σχηματισμών που προέκυψε από την τεχνική R_{wa} . Ακολουθώντας, από τα σημεία που χαρακτηρίστηκαν ως wet και βρίσκονται στην επάνω αριστερή πλευρά του διαγράμματος επιλέχθηκαν τα ίδια τρία σημεία που επιλέχθηκαν και στο διάγραμμα Pickett, καθώς και το αντίστοιχο σημείο tight για τον ίδιο ακριβώς λόγο. Τα τέσσερα αυτά σημεία που διακρίνεται να σχηματίζουν μια νοητή ευθεία γραμμή, χρησιμοποιήθηκαν με αφετηρία την αρχή των αξόνων για τη δημιουργία της ευθείας $S_w = 1$ από την οποία και προέκυψε εξίσωση της μορφής $y = a * x$.

Στη συνέχεια, σύμφωνα με την εξίσωση 5.7 και τη χρήση της εξίσωσης που προέκυψε από την ευθεία $S_w = 1$, γνωρίζοντας την τιμή m από το διάγραμμα Pickett, την τιμή $\alpha = 0,81$, καθώς οι σχηματισμοί έχουν χαρακτηριστεί ψαμμιτικοί με βάση τη γεωλογία της περιοχής και ορίζοντας $S_w = 1$, υπολογίστηκε η τιμή $R_w (\Omega m)$. Έπειτα, με τη χρήση της εξίσωσης 5.7 και γνωρίζοντας τις τιμές α , m και R_w ορίστηκε $S_w = 0,58$. Επιλέγοντας ως R_t τις τιμές 0 και 10 υπολογίστηκαν οι όροι $(R_t)^{-\frac{1}{m}}$ και οι αντίστοιχες τιμές ϕ . Από τα δύο ζεύγη τιμών $[\phi, (R_t)^{-\frac{1}{m}}]$ που προέκυψαν, δημιουργήθηκε η ευθεία $S_w = 0,58$ με αφετηρία την αρχή των αξόνων και υπολογίστηκε η εξίσωσή της με μορφή $y = a * x$.

Η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του νερού για το σύνολο των γεωτρήσεων είναι :
 $R_w = 0,169 \Omega m$

Η τιμή του $R_w (= 0,169 \Omega m)$ που προέκυψε από το διάγραμμα Hingle είναι ίση με την τιμή που προέκυψε από το διάγραμμα Pickett ($R_w = 0,169 \Omega m$) με τη μικρή διαφορά τους να εντοπίζεται στο τέταρτο δεκαδικό ψηφίο. Επίσης, και οι δύο τιμές είναι παραπλήσιες με την αντίστοιχη τιμή που υπολογίστηκε μέσω της τεχνικής R_{wa} ($R_w = 0,172 \Omega m$).

Το διάγραμμα Hingle (Σχήμα 5.2) που ακολουθεί αφορά το σύνολο των δέκα γεωτρήσεων και απεικονίζει όλους τους περατούς σχηματισμούς τους.



Σχήμα 5.2 : Διάγραμμα Hingle για το σύνολο των γεωτρήσεων.

Όπως και στο διάγραμμα Pickett, με μπλε χρώμα απεικονίζονται οι σχηματισμοί που έχουν χαρακτηριστεί ως tight με βάση το ολικό πορώδες τους, με κίτρινο οι σχηματισμοί που έχουν χαρακτηριστεί ως wet και με πορτοκαλί οι pay σύμφωνα με τον χαρακτηρισμό που προέκυψε από την τεχνική R_{wa} . Η ευθεία με το μπλε χρώμα αποτελεί την $S_w = 1$ και η εξίσωσή της απεικονίζεται με μπλε χρώμα. Η ευθεία αυτή και σε αυτό το διάγραμμα οριοθετεί τα σημεία με βάση τον βαθμό κορεσμού τους σε νερό. Στα σημεία του διαγράμματος που βρίσκονται δεξιότερα από αυτή, ο βαθμός κορεσμού σε νερό λαμβάνει μικρότερες τιμές από το 100%. Ενώ η ευθεία με κόκκινο χρώμα αποτελεί την $S_w = 0,58$ και η εξίσωσή της απεικονίζεται με κόκκινο χρώμα. Με τη σειρά της αποτελεί το όριο δεξιότερα από το οποίο ο βαθμός κορεσμού σε νερό

των σχηματισμών λαμβάνει τιμές μικρότερες από 58%. Οι ευθείες αυτές χρησιμοποιούνται για να χαρακτηρίσουν τους σχηματισμούς. Οι σχηματισμοί που βρίσκονται μεταξύ τους χαρακτηρίζονται ως wet ενώ αυτοί που βρίσκονται δεξιότερα της ευθείας $S_w = 0,58$ χαρακτηρίζονται ως pay. Οι σχηματισμοί που έχουν χαρακτηριστεί ως tight με βάση το ολικό πορώδες τους δεν εξετάζονται ούτε χαρακτηρίζονται με βάση τις ευθείες.

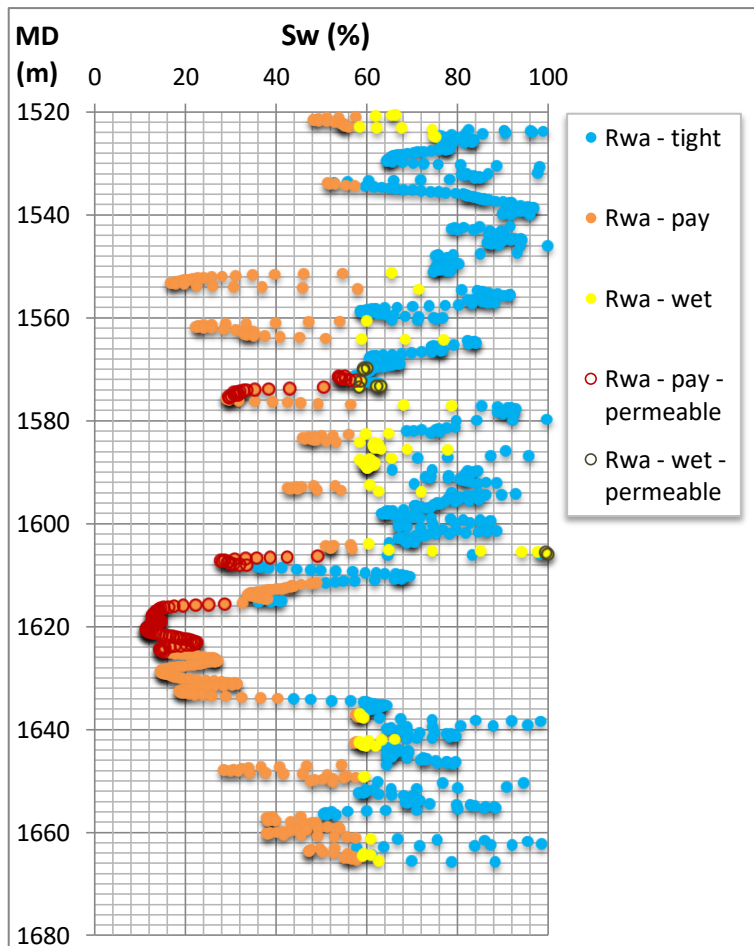
Από το Σχήμα 5.2 συμπεραίνεται πως ένα σημείο το οποίο έχει χαρακτηριστεί ως pay μέσω της τεχνικής R_{wa} βρίσκεται εμφανώς μεταξύ των δύο ευθειών, ενώ αρκετά φαίνεται να βρίσκονται στα όρια της ευθείας όπως και στο διάγραμμα Pickett. Για το λόγο αυτό λαμβάνουν τον χαρακτηρισμό wet μέσω του διαγράμματος Hingle. Επομένως, αφού το διάγραμμα Hingle αποκλείει σχηματισμούς pay οι οποίοι χαρακτηρίστηκαν με τη χρήση της τεχνικής R_{wa} , θεωρείται η πιο συντηρητική μέθοδος από τις δύο. Αλλά, επειδή αποκλείει και ελάχιστα περισσότερους σε σχέση με την Pickett θεωρείται και η πιο συντηρητική από τις τρεις τους.

5.3 Απεικόνιση τιμών S_w

Έπειτα από την εύρεση των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του νερού (R_w) μέσω της τεχνικής R_{wa} , επιλέχθηκε η μικρότερη τιμή η οποία είναι ίση με $R_{wa(min)} = 0,172 \Omega m$ (Πίνακας 5.1). Με τη χρήση αυτής της τιμής, η οποία αποτελεί και την πιο συντηρητική προσέγγιση για τον υπολογισμό του βαθμού κορεσμού σε υδρογονάνθρακες (S_{hyc}), πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός των τιμών του βαθμού κορεσμού σε νερό (S_w) και το εύρος του S_{hyc} για κάθε γεώτρηση μέσω της εξίσωσης 5.4. Οι τιμές που προέκυψαν απεικονίζονται παρακάτω σε σχέση με το βάθος για κάθε γεώτρηση.

5.3.1 Τιμές S_w της γεώτρησης 01-08

Μέσω της τεχνικής R_{wa} υπολογίστηκε η ελάχιστη τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του νερού του σχηματισμού στη γεώτρηση και βρέθηκε ίση με $R_{wa(min)} = 0,172 \Omega m$ (Πίνακας 5.1). Εδώ, θα πρέπει να σημειωθεί πως οι περατές ζώνες στην πραγματικότητα περιέχουν αργλικές προσμίξεις (V_{sh}) από 0 % έως 50%. Ωστόσο, για τον υπολογισμό του βαθμού κορεσμού σε νερό, έγινε η παραδοχή ότι είναι απαλλαγμένες από αργλικές προσμίξεις. Έτσι, με την βοήθεια της σχέσης του Archie για καθαρούς σχηματισμούς, υπολογίστηκαν οι τιμές του βαθμού κορεσμού σε νερό S_w και δημιουργήθηκε διάγραμμα των τιμών σε σχέση με το βάθος της γεώτρησης (Σχήμα 5.3) όπως απεικονίζεται παρακάτω.



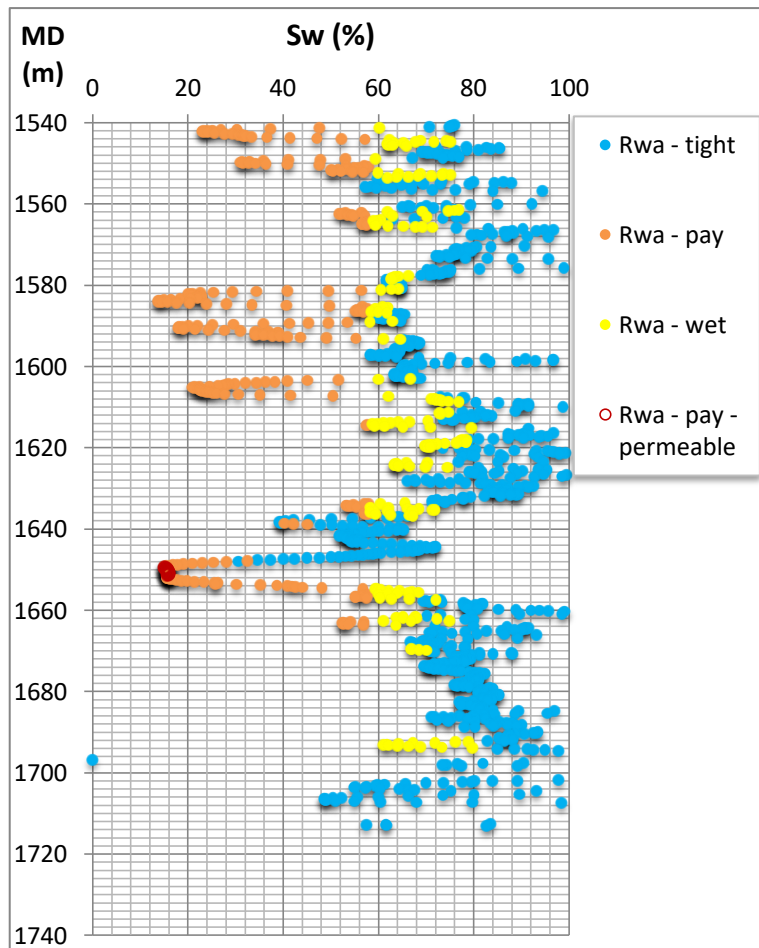
Σχήμα 5.3 : Διάγραμμα τιμών S_w της γεώτρησης 01-08 σε σχέση με το βάθος.

Στο παραπάνω διάγραμμα οι σχηματισμοί διακρίνονται σε pay, wet και tight ανάλογα με το ποσοστό κορεσμού τους σε νερό και το πορώδες τους. Ο χαρακτηρισμός περατότητας (permeable) πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τον όγκο των αργιλικών προσμίξεων από τις διαγραφίες φυσικού δυναμικού (SP).

Συνεπώς, από το Σχήμα 5.3 συμπεραίνεται πως (με βάση τις παραδοχές που υιοθετήθηκαν στην παρούσα εργασία) οι περατοί σχηματισμοί που έχουν χαρακτηριστεί ταυτόχρονα ως pay (Rwa-pay-permeable) και βρίσκονται σε βάθη 1571-1575 m, 1606-1608 και 1615-1625 m περίπου, θα μπορούσαν δυνητικά να παράξουν υδρογονάνθρακες με εύρος τιμών $S_{hyc} = 42,5 - 88,6 \%$.

5.3.2 Τιμές S_w της γεώτρησης 01-17

Μέσω της τεχνικής R_{wa} , οι τιμές του βαθμού κορεσμού σε νερό S_w για την εν λόγω γεώτρηση υπολογίστηκαν για R_w ίσο με την ελάχιστη τιμή R_{wa} ($= 0,172 \Omega m$) των γεωτρήσεων και κατόπιν δημιουργήθηκε διάγραμμα των τιμών του S_w σε σχέση με το βάθος της γεώτρησης (Σχήμα 5.4).



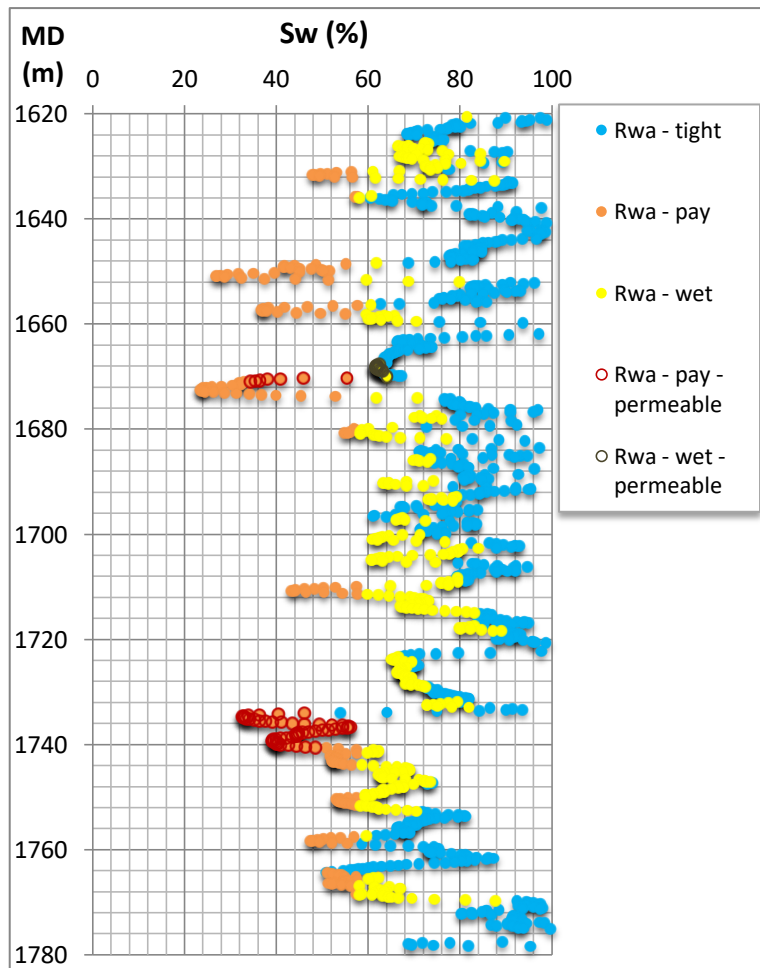
Σχήμα 5.4 : Διάγραμμα τιμών S_w της γεώτρησης 01-17 σε σχέση με το βάθος.

Στο παραπάνω διάγραμμα οι σχηματισμοί διακρίνονται με βάση τον χαρακτηρισμό τους από την τεχνική R_{wa} σε pay, wet και tight ανάλογα με το ποσοστό κορεσμού τους σε νερό και το πορώδες τους. Ενώ, ο χαρακτηρισμός περατότητας (permeable) πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τον όγκο των αργιλικών προσμίξεων από τις διαγραφίες φυσικού δυναμικού (SP).

Επομένως, από το Σχήμα 5.4 συμπεραίνεται πως (με βάση τις παραδοχές που υιοθετήθηκαν στην παρούσα εργασία) οι περατοί σχηματισμοί που έχουν χαρακτηριστεί ταυτόχρονα ως pay (R_{wa} -pay-permeable) και βρίσκονται σε βάθη 1649-1651 m περίπου, θα μπορούσαν δυνητικά να παράξουν υδρογονάνθρακες με εύρος τιμών $S_{hyc} = 84 - 84,9 \%$.

5.3.3 Τιμές S_w της γεώτρησης 05-16

Ομοίως με τις παραπάνω γεωτρήσεις, έπειτα από τον υπολογισμό των τιμών του βαθμού κορεσμού σε νερό S_w μέσω της τεχνικής R_{wa} , δημιουργήθηκε διάγραμμα των τιμών αυτών σε σχέση με το βάθος της γεώτρησης (Σχήμα 5.5).



Σχήμα 5.5 : Διάγραμμα τιμών S_w της γεώτρησης 05-16 σε σχέση με το βάθος.

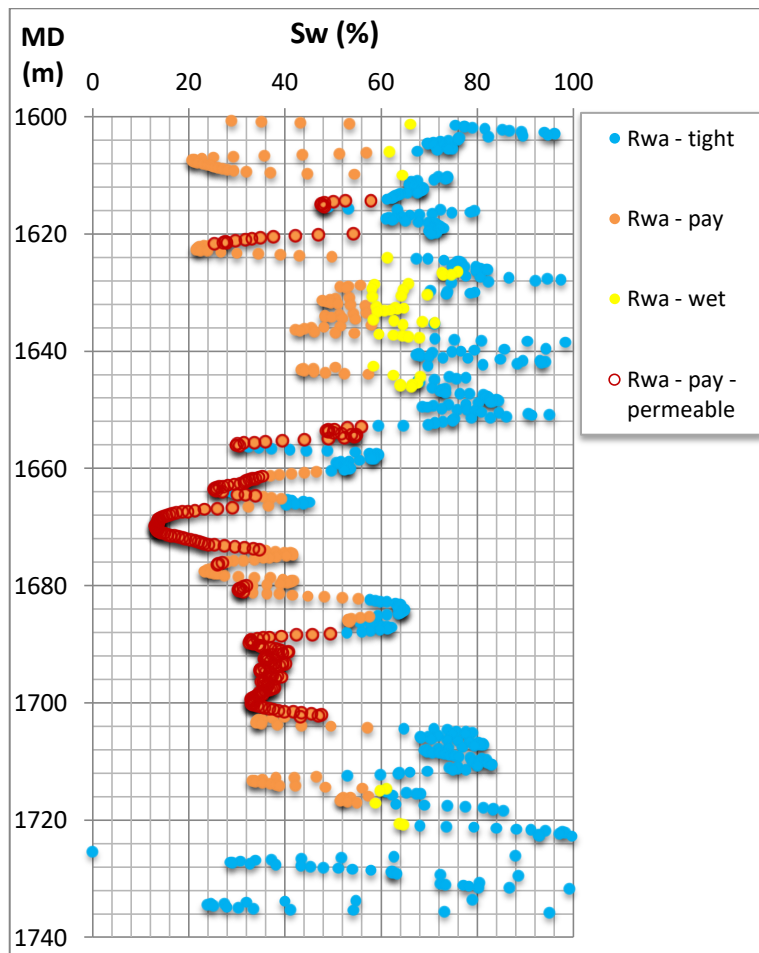
Στο διάγραμμα που απεικονίζεται παραπάνω, οι σχηματισμοί διακρίνονται με βάση τον χαρακτηρισμό τους από την τεχνική R_{wa} σε pay, wet και tight ανάλογα με το ποσοστό κορεσμού τους σε νερό και το πορώδες τους. Ο χαρακτηρισμός περατότητας (permeable) πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τον όγκο των αργιλικών προσμίξεων από τις διαγραφίες φυσικού δυναμικού (SP).

Ακολούθως, από το Σχήμα 5.5 συμπεραίνεται πως (με βάση τις παραδοχές που υιοθετήθηκαν στην παρούσα εργασία) οι περατοί σχηματισμοί που έχουν χαρακτηριστεί ταυτόχρονα ως pay (R_{wa} -pay-permeable) και βρίσκονται σε βάθη 1670-1671 m και 1734-1741 m περίπου, θα μπορούσαν δυνητικά να παράξουν υδρογονάνθρακες με εύρος τιμών $S_{hyc} = 44 - 67,4 \%$.

5.3.4 Τιμές S_w της γεώτρησης 08-08

Οι τιμές του βαθμού κορεσμού σε νερό S_w της γεώτρησης 08-08 υπολογίστηκαν με τη χρήση της μεθόδου R_{wa} όπως και στις προηγούμενες γεωτρήσεις. Έπειτα από τον υπολογισμό τους,

ακολούθησε η απεικόνισή τους σε σχέση με το βάθος της γεώτρησης (Σχήμα 5.6).



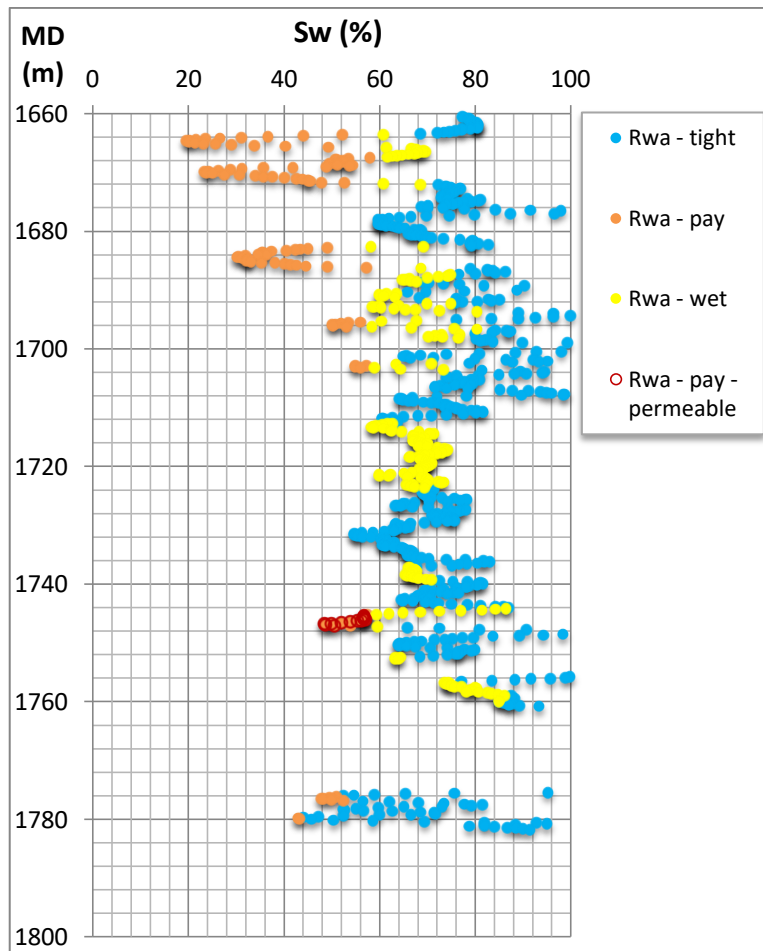
Σχήμα 5.6 : Διάγραμμα τιμών S_w της γεώτρησης 08-08 σε σχέση με το βάθος.

Στο παραπάνω διάγραμμα, οι σχηματισμοί διακρίνονται με βάση τον χαρακτηρισμό τους από την τεχνική R_{wa} σε pay, wet και tight ανάλογα με το ποσοστό κορεσμού τους σε νερό και το πορώδες τους. Ο χαρακτηρισμός περατότητας (permeable) πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τον όγκο των αργιλικών προσμίξεων από τις διαγραφίες φυσικού δυναμικού (SP).

Ακολούθως, από το Σχήμα 5.5 συμπεραίνεται πως (με βάση τις παραδοχές που υιοθετήθηκαν στην παρούσα εργασία) οι περατοί σχηματισμοί που έχουν χαρακτηριστεί ταυτόχρονα ως pay (R_{wa} -pay-permeable) και βρίσκονται σε βάθη 1614-1615 m, 1620-1622 m, 1653-1656 m, 1661-1674 m, 1676 m, 1680-1681 m και 1688-1702 m περίπου, θα μπορούσαν δυνητικά να παράξουν υδρογονάνθρακες με εύρος τιμών $S_{hyc} = 42,1 - 86,9 \%$. Βέβαια, οι περισσότερες από αυτές τις ζώνες είναι πολύ λεπτές και πιθανόν ασύμφορα εκμεταλλεύσιμες.

5.3.5 Τιμές S_w της γεώτρησης 09-05

Ο υπολογισμός πραγματοποιήθηκε μέσω της τεχνικής R_{wa} και τη χρήση της ελάχιστης τιμής $R_{wa(min)} = 0,172 \Omega m$. Από τις τιμές του βαθμού κορεσμού σε νερό S_w που προέκυψαν δημιουργήθηκε διάγραμμα σε σχέση με το βάθος της γεώτρησης (Σχήμα 5.7) όπως απεικονίζεται παρακάτω.



Σχήμα 5.7 : Διάγραμμα τιμών S_w της γεώτρησης 09-05 σε σχέση με το βάθος.

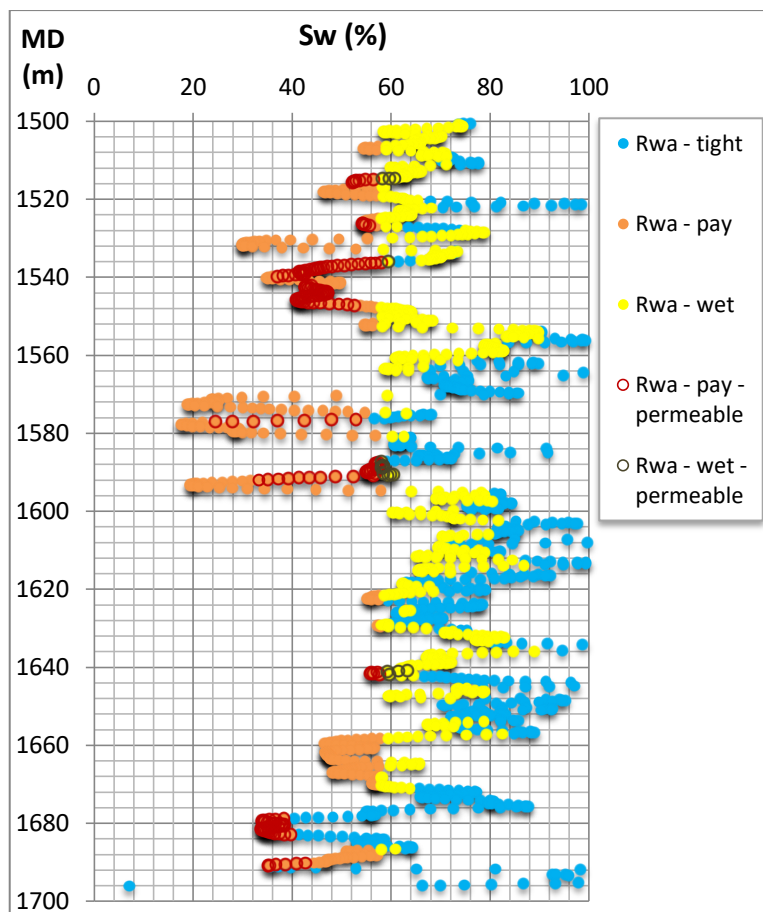
Στο διάγραμμα που απεικονίζεται παραπάνω, οι σχηματισμοί διακρίνονται με βάση τον χαρακτηρισμό τους από την τεχνική R_{wa} σε pay, wet και tight ανάλογα με το ποσοστό κορεσμού τους σε νερό και το πορώδες τους. Ο χαρακτηρισμός περατότητας (permeable) πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τον όγκο των αργιλικών προσμίξεων από τις διαγραφίες φυσικού δυναμικού (SP).

Από το Σχήμα 5.7 συμπεραίνεται πως (με βάση τις παραδοχές που υιοθετήθηκαν στην παρούσα εργασία) οι περατοί σχηματισμοί που έχουν χαρακτηριστεί ταυτόχρονα ως pay (R_{wa-pay} -

permeable) και βρίσκονται σε βάθη 1745-1747 m περίπου, θα μπορούσαν δυνητικά να παράξουν υδρογονάνθρακες με εύρος τιμών $S_{hyc} = 43 - 51,5 \%$.

5.3.6 Τιμές S_w της γεώτρησης 09-17

Ομοίως με τις προηγούμενες γεωτρήσεις, έπειτα από τον υπολογισμό του βαθμού κορεσμού σε νερό S_w , δημιουργήθηκε διάγραμμα των τιμών αυτών σε σχέση με το βάθος της γεώτρησης (Σχήμα 5.8) όπως απεικονίζεται παρακάτω.



Σχήμα 5.8 : Διάγραμμα τιμών S_w της γεώτρησης 09-17 σε σχέση με το βάθος.

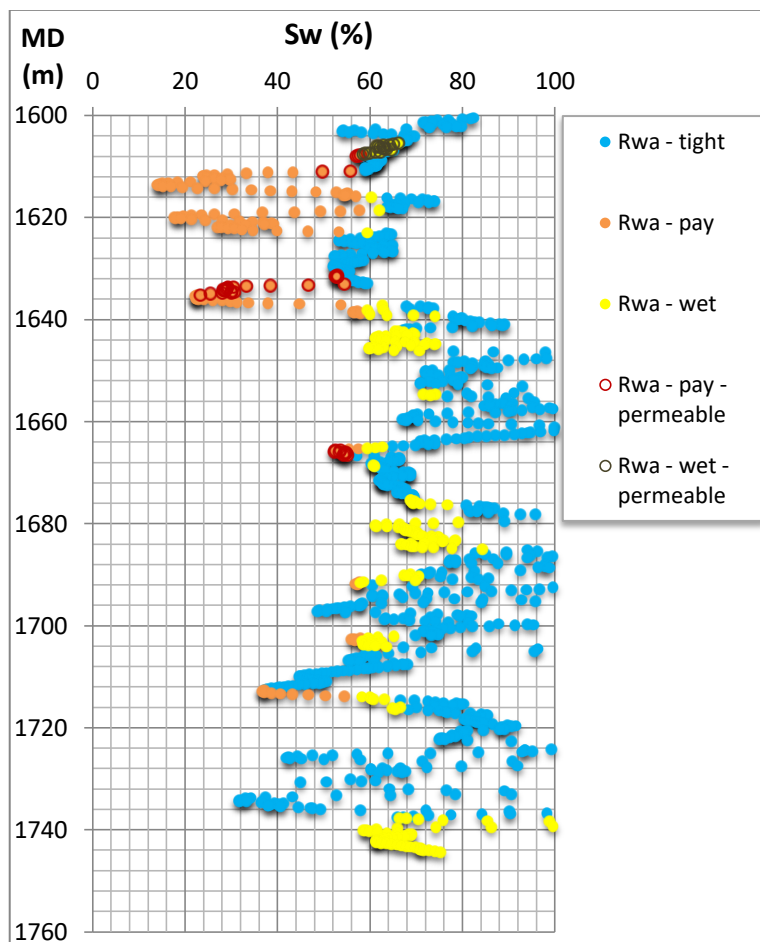
Στο παραπάνω διάγραμμα, οι σχηματισμοί διακρίνονται με βάση τον χαρακτηρισμό τους από την τεχνική R_{wa} σε pay, wet και tight ανάλογα με το ποσοστό κορεσμού τους σε νερό και το πορώδες τους. Ενώ, ο χαρακτηρισμός περατότητας (permeable) πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τον όγκο των αργιλικών προσμίξεων από τις διαγραφίες φυσικού δυναμικού (SP).

Επομένως, από το Σχήμα 5.8 συμπεραίνεται πως (με βάση τις παραδοχές που υιοθετήθηκαν στην παρούσα εργασία) οι περατοί σχηματισμοί που έχουν χαρακτηριστεί ταυτόχρονα ως pay

(Rwa-pay-permeable) και βρίσκονται σε βάθη 1515-1516 m, 1526-1527 m, 1536-1540 m, 1542-1547 m, 1576-1577 m, 1587-1592 m, 1641-1642 m, 1679-1683 m και 1690-1691 m περίπου, θα μπορούσαν δυνητικά να παράξουν υδρογονάνθρακες με εύρος τιμών $S_{hyc} = 42,1 - 75,5 \%$. Βέβαια, οι περισσότερες από αυτές τις ζώνες είναι πολύ λεπτές και πιθανόν ασύμφορα εκμεταλλεύσιμες.

5.3.7 Τιμές S_w της γεώτρησης 11-08

Ακολούθως, μετά τον υπολογισμό των τιμών του βαθμού κορεσμού σε νερό S_w με τη χρήση της τεχνικής Rwa, πραγματοποιήθηκε απεικόνιση των τιμών που προέκυψαν σε σχέση με το βάθος της γεώτρησης (Σχήμα 5.9).



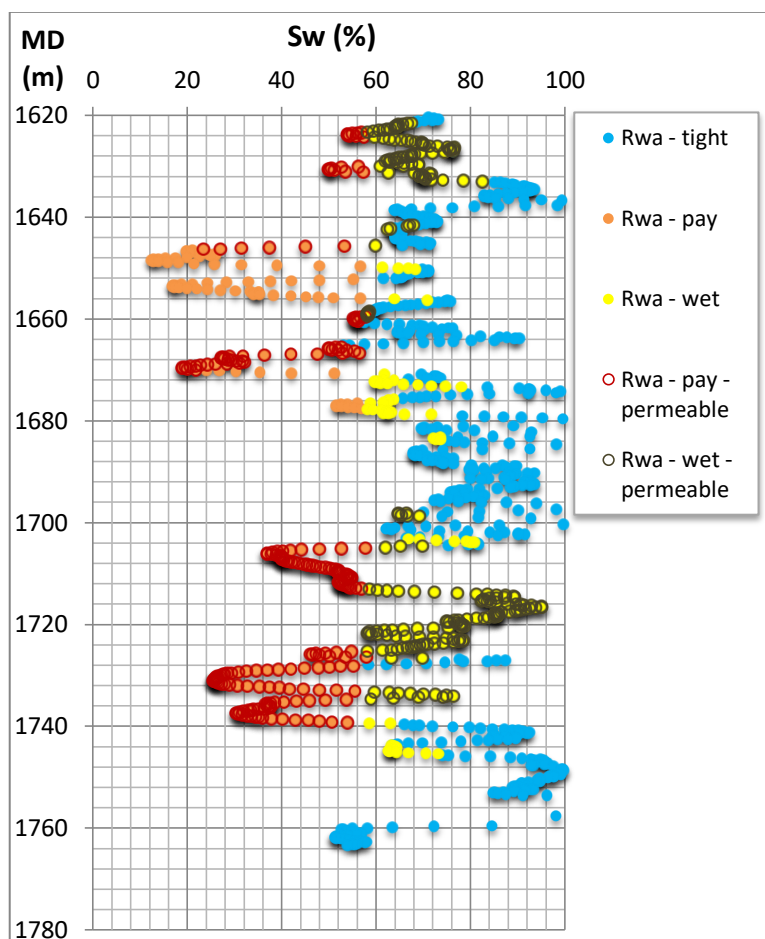
Σχήμα 5.9 : Διάγραμμα τιμών S_w της γεώτρησης 11-08 σε σχέση με το βάθος.

Στο παραπάνω διάγραμμα, οι σχηματισμοί διακρίνονται με βάση τον χαρακτηρισμό τους από την τεχνική R_{wa} σε pay, wet και tight ανάλογα με το ποσοστό κορεσμού τους σε νερό και το πορώδες τους. Ο χαρακτηρισμός περατότητας (permeable) πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τον όγκο των αργιλικών προσμίξεων από τις διαγραφίες φυσικού δυναμικού (SP).

Από το Σχήμα 5.9 συμπεραίνεται πως (με βάση τις παραδοχές που υιοθετήθηκαν στην παρούσα εργασία) οι περατοί σχηματισμοί που έχουν χαρακτηριστεί ταυτόχρονα ως pay (Rwa-pay-permeable) και βρίσκονται σε βάθη 1608 m, 1611 m, 1631-1635 m και 1666-1667 m περίπου, θα μπορούσαν δυνητικά να παράξουν υδρογονάνθρακες με εύρος τιμών $S_{hyc} = 42,1 - 76,6 \%$.

5.3.8 Τιμές S_w της γεώτρησης 13-16

Από τις τιμές του βαθμού κορεσμού σε νερό S_w που προέκυψαν από την επεξεργασία της γεώτρησης 13-16, δημιουργήθηκε διάγραμμα σε σχέση με το βάθος της (Σχήμα 5.10) όπως απεικονίζεται παρακάτω.



Σχήμα 5.10 : Διάγραμμα τιμών S_w της γεώτρησης 13-16 σε σχέση με το βάθος.

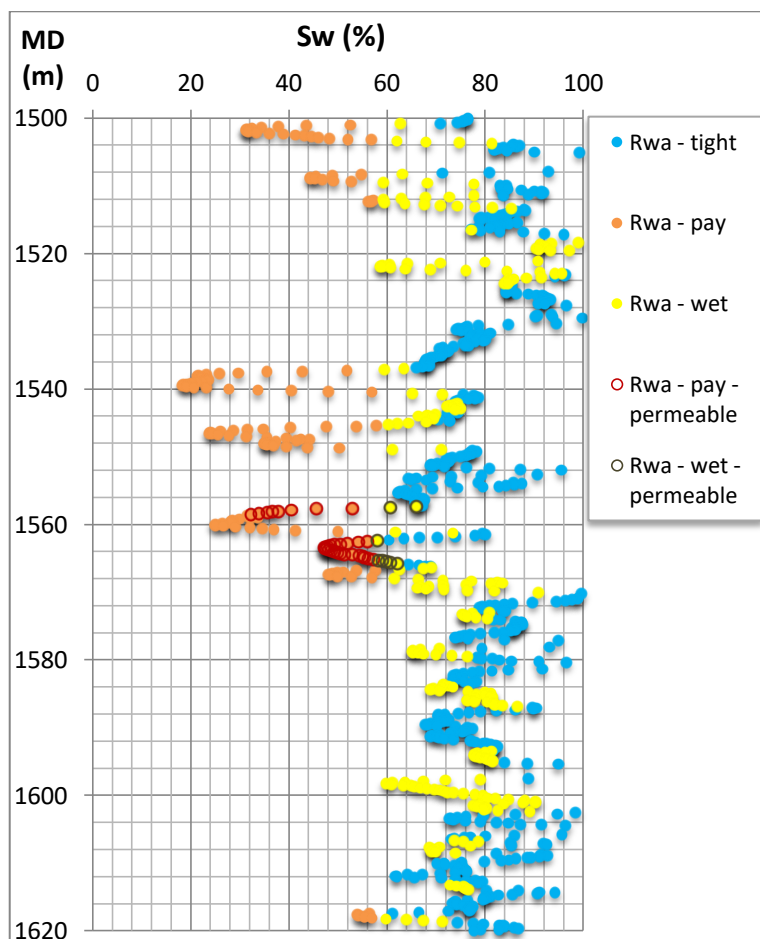
Στο διάγραμμα που απεικονίζεται παραπάνω, οι σχηματισμοί διακρίνονται με βάση τον χαρακτηρισμό τους από την τεχνική R_{wa} σε pay, wet και tight ανάλογα με το ποσοστό κορεσμού τους σε νερό και το πορώδες τους. Ο χαρακτηρισμός περατότητας (permeable)

πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τον όγκο των αργιλικών προσμίξεων από τις διαγραφίες φυσικού δυναμικού (SP).

Ακολούθως, από το Σχήμα 5.10 συμπεραίνεται πως (με βάση τις παραδοχές που υιοθετήθηκαν στην παρούσα εργασία) οι περατοί σχηματισμοί που έχουν χαρακτηριστεί ταυτόχρονα ως pay (Rwa-pay-permeable) και βρίσκονται σε βάθη 1623-1624 m, 1630-1631 m, 1646 m, 1660-1661 m, 1666-1670 m, 1705-1713 m και 1725-1739 m περίπου, θα μπορούσαν δυνητικά να παράξουν υδρογονάνθρακες με εύρος τιμών $S_{hyc} = 42,1 - 81,1 \%$. Αν και οι περισσότερες από αυτές τις ζώνες είναι πολύ λεπτές και πιθανόν ασύμφορα εκμεταλλεύσιμες.

5.3.9 Τιμές S_w της γεώτρησης 14-09

Το διάγραμμα των τιμών του βαθμού κορεσμού σε νερό S_w της γεώτρησης σε σχέση με το βάθος της (Σχήμα 5.11) απεικονίζεται παρακάτω. Οι τιμές του υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας της τεχνική Rwa.



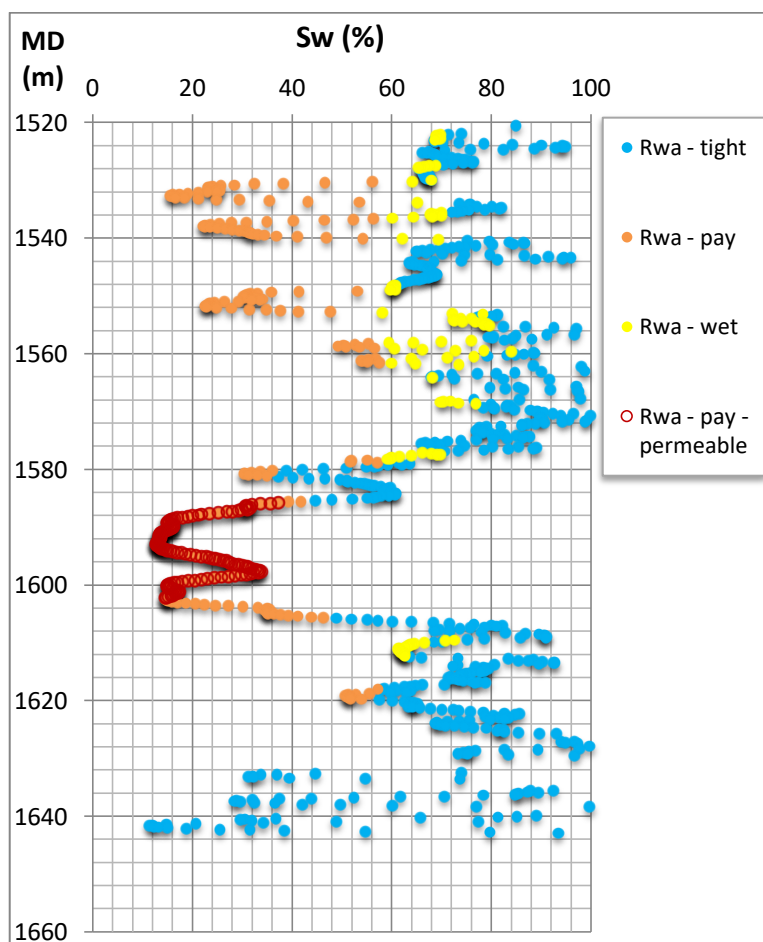
Σχήμα 5.11 : Διάγραμμα τιμών S_w της γεώτρησης 14-09 σε σχέση με το βάθος.

Στο παραπάνω διάγραμμα, οι σχηματισμοί διακρίνονται με βάση τον χαρακτηρισμό τους από την τεχνική R_{wa} σε pay, wet και tight ανάλογα με το ποσοστό κορεσμού τους σε νερό και το πορώδες τους. Ο χαρακτηρισμός περατότητας (permeable) πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τον όγκο των αργιλικών προσμίξεων από τις διαγραφίες φυσικού δυναμικού (SP).

Συνεπώς, από το Σχήμα 5.11 συμπεραίνεται πως (με βάση τις παραδοχές που υιοθετήθηκαν στην παρούσα εργασία) οι περατοί σχηματισμοί που έχουν χαρακτηριστεί ταυτόχρονα ως pay (R_{wa} -pay-permeable) και βρίσκονται σε βάθη 1558-1559 m και 1563-1565 m περίπου, θα μπορούσαν δυνητικά να παράξουν υδρογονάνθρακες με εύρος τιμών $S_{hyc} = 42,8 - 67,7 \%$.

5.3.10 Τιμές S_w της γεώτρησης 16-08

Το διάγραμμα των τιμών του βαθμού κορεσμού σε νερό S_w της γεώτρησης σε σχέση με το βάθος της (Σχήμα 5.12) απεικονίζεται παρακάτω.



Σχήμα 5.12 : Διάγραμμα τιμών S_w της γεώτρησης 16-08 σε σχέση με το βάθος.

Στο παραπάνω διάγραμμα, οι σχηματισμοί διακρίνονται με βάση τον χαρακτηρισμό τους από την τεχνική R_{wa} σε pay, wet και tight ανάλογα με το ποσοστό κορεσμού τους σε νερό και το πορώδες τους. Ενώ, ο χαρακτηρισμός περατότητας (permeable) πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τον όγκο των αργιλικών προσμίξεων από τις διαγραφίες φυσικού δυναμικού (SP).

Επομένως, από το Σχήμα 5.12 συμπεραίνεται πως (με βάση τις παραδοχές που υιοθετήθηκαν στην παρούσα εργασία) οι περατοί σχηματισμοί που έχουν χαρακτηριστεί ταυτόχρονα ως pay (R_{wa} -pay-permeable) και βρίσκονται σε βάθη 1586-1602 m περίπου, θα μπορούσαν δυνητικά να παράξουν υδρογονάνθρακες με εύρος τιμών $S_{hyc} = 62,7 - 87,2 \%$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

6.1 Εισαγωγή

Από τα διαγράμματα $R_{IM}/R_{ID} - R_{SFL}/R_{ID}$ παρατηρήθηκε το εύρος των τιμών d_i , R_t/R_{ID} και R_{xo}/R_t κάθε γεώτρησης για τη συλλογή πληροφοριών σχετικά με τη ζώνη διείσδυσης του διηθήματος της λάσπης. Στη συνέχεια, υπολογίστηκε το πρωτογενές πορώδες ϕ_{sonic} και το ολικό πορώδες ϕ (%). Ακολούθως, υπολογίστηκε η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του νερού του σχηματισμού (R_w) μέσω της τεχνικής R_{wa} αλλά και με τη χρήση των διαγραμμάτων Pickett και Hingle. Τέλος, υπολογίστηκαν οι τιμές του βαθμού κορεσμού σε νερό (S_w) των γεωτρήσεων με τη χρήση της τιμής του R_w που υπολογίστηκε με την τεχνική R_{wa} .

6.2 Συνολική εκτίμηση γεωτρήσεων

Έπειτα από την αρχική εκτίμηση των γεωτρήσεων επιλέχθηκε ένα εύρος βάθους για κάθε γεώτρηση προς περαιτέρω επεξεργασία. Το εύρος αυτό διέφερε σε κάθε γεώτρηση ανάλογα με το βάθος των περατών σχηματισμών που συναντώνται στην καθεμία. Συγκεκριμένα, στη γεώτρηση 01-08 οι περατοί σχηματισμοί εντοπίστηκαν σε βάθος 1520-1687 m, στη 01-17 σε βάθος 1540-1720 m και στη 05-16 σε βάθος 1620-1798 m περίπου. Ακολούθως, στη γεώτρηση 08-08 οι περατοί σχηματισμοί εντοπίστηκαν σε βάθος 1600-1749 m, στη 09-05 σε βάθος 1660-1790 m, στη 09-17 σε βάθος 1500-1708 m και στη 11-08 σε βάθος 1600-1748 m περίπου. Τέλος, στη γεώτρηση 13-16 οι περατοί σχηματισμοί βρέθηκαν σε βάθος 1620-1775 m, στη 14-09 σε βάθος 1480-1648 m και στη 16-08 σε βάθος 1520-1650 m περίπου.

Σύμφωνα με τα διαγράμματα $R_{IM}/R_{ID} - R_{SFL}/R_{ID}$ όλων των γεωτρήσεων, συμπεραίνεται πως οι σχηματισμοί που μελετήθηκαν περιλαμβάνουν αργλικές προσμίξεις και χαρακτηρίζονται από μικρή ζώνη διείσδυσης του διηθήματος της λάσπης.

Τα διαγράμματα $\phi_N - \phi_D$ και $\phi_N - DT$ όλων των γεωτρήσεων οδηγούν στο συμπέρασμα της ύπαρξης ψαμμιτικών καθώς και την ύπαρξη φυσικού αερίου. Γεγονός στο οποίο στηρίχθηκε και η επιλογή του ψαμμίτη για την αρχική βαθμονόμηση των οργάνων μέτρησης πυκνότητας (FCD) και νετρονίου (CNL) που χρησιμοποιήθηκαν για τη συλλογή των μετρήσεων.

Μέσω των διαγραμμάτων ϕ (%) - ϕ_{sonic} (%) των γεωτρήσεων παρατηρείται πως όταν οι τιμές τους είναι μικρές βρίσκονται αρκετά κοντά στη γραμμή τάσης, ενώ όσο μεγαλώνουν

αποκλίνουν από αυτή. Κάτι το οποίο αναμένεται να συμβεί καθώς οι τιμές του πρωτογενούς πορώδους (ϕ_{sonic}) είναι πάντα μικρότερες από τις τιμές του ολικού πορώδους (ϕ).

Στα διαγράμματα ϕ και ϕ_{sonic} (%) σε σχέση με το βάθος (Σχήματα 4.20 έως 4.23) παρατηρείται και πάλι η απόκλιση των τιμών ϕ και ϕ_{sonic} σε κάθε γεώτρηση, ενώ συμπεραίνεται πως συνολικά οι μεγαλύτερες τιμές τους συγκεντρώνονται σε βάθη 1580-1650 m περίπου.

Από την τεχνική R_{wa} προέκυψαν δέκα ελάχιστες τιμές $R_{\text{wa}(\text{min})}$ από τις ισάριθμες γεωτρήσεις. Από αυτές τις τιμές επιλέχθηκε η μικρότερη ως πιο αντιπροσωπευτική τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του νερού του σχηματισμού (R_w). Η τιμή που επιλέχθηκε ανήκει στη γεώτρηση 01-08 και είναι ίση με $R_w = 0,172 \Omega\text{m}$. Η τιμή αυτή είναι παραπλήσια με τις αντίστοιχες τιμές που προέκυψαν από τα διαγράμματα Pickett ($R_w = 0,169 \Omega\text{m}$) και Hingle ($R_w = 0,169 \Omega\text{m}$).

Από τα διαγράμματα των τιμών του βαθμού κορεσμού σε νερό (S_w) σε σχέση με το βάθος (τεχνική R_{wa}) παρατηρείται πως οι γεωτρήσεις που εμφανίζουν σχετικά περισσότερους περατούς σχηματισμούς με ικανοποιητικές συγκεντρώσεις υδρογονανθράκων (pay) είναι οι 01-08, 08-08, 16-08 και 13-16 με εύρος τιμών $S_{\text{hyc}} = 42 - 89 \%$ περίπου.

Τέλος, από τις μεθόδους χαρακτηρισμού του R_w που χρησιμοποιήθηκαν και σύμφωνα με τα αποτελέσματά τους, ως πιο συντηρητική αποδείχθηκε η χρήση του διαγράμματος Hingle, με τον χαρακτηρισμό των λιγότερων σημείων ως pay.

6.3 Προτάσεις

- Μελέτη των δεδομένων υπό την θεώρηση αργιλικών προσμίξεων καθώς η ύπαρξή τους επιβεβαιώνεται από τη γεωλογία της περιοχής. Οι ίδιες πληροφορίες συλλέχθηκαν και από τα αποτελέσματα των διαγραμμάτων $R_{\text{IM}}/R_{\text{ID}} - R_{\text{SFL}}/R_{\text{ID}}$ τα οποία υπέδειξαν την ύπαρξη αργιλικών προσμίξεων. Αλλά και η ασυμφωνία των διαγραμμάτων $\phi_N - \phi_D$ και $\phi_N - DT$ με τη γεωλογία για την ύπαρξη ψαμμιτικών σχηματισμών οδηγεί επίσης στο συμπέρασμα για πιθανή ύπαρξη αργιλικών προσμίξεων, καθώς λόγω μεγαλύτερης πυκνότητας από τους ψαμμίτες μπορούν να προκαλέσουν μετατοπίσεις των πραγματικών τιμών από τους ψαμμιτικούς σχηματισμούς προς αυτούς του ασβεστόλιθου ή/και του δολομίτη στα διαγράμματα.
- Αντιστοίχιση των αξιολογημένων γεωλογικών σχηματισμών με βάση τα γεωλογικά στοιχεία από τις γεωτρήσεις και τα σεισμικά δεδομένα.

- Πραγματοποίηση διαχωρισμού ζωνών ενδιαφέροντος στις γεωτρήσεις με βάση τη γεωλογία της περιοχής.
- Χαρακτηρισμός παραγωγικότητας για τις ζώνες ενδιαφέροντος των γεωτρήσεων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΕΛΛΗΝΙΚΗ

1. Βαφείδης, Α., (2011), *Αξιολόγηση Σχηματισμών με Γεωφυσικές Μεθόδους*, Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
2. Τσούρλος, Π., (2018), *Ηλεκτρομαγνητικές Μέθοδοι Γεωφυσικών Διασκοπήσεων, Γεωφυσικές Διαγραφίες (Logging)*, Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

ΔΙΕΘΝΗΣ

1. Badgley, P.C., (1952), *Detrital (Deville) Beds (Mannville Group)* in Glass, D.J., Ed., *Lexicon of Canadian Stratigraphy*, Vol. 4, Western Canada, Including Eastern British Columbia, Alberta, Saskatchewan, and Southern Manitoba, CSPG, 1990.
2. Bassiouni, Z., (1994), *Theory, Measurement, and Interpretation of Well Logs*, SPE Textbook, Series Vol. 4, Louisiana.
3. Coveney, J.W., (1960), *Bantry Shale Member (Lower Mannville Formation)*, in Glass, D.J., Ed., *Lexicon of Canadian Stratigraphy*, Vol. 4, Western Canada, Including Eastern British Columbia, Alberta, Saskatchewan, and Southern Manitoba, CSPG, 1990.
4. Dufour, J., Squires, J., Edmunds, A. and Shook, I., (1998), *Integrated geological and geophysical interpretation of the Blackfoot area, Southern Alberta*, Society of Exploration Geophysicists.
5. Gallant, E.V., Stewart, R.R., Bertram, M.B. and Lawton, D.C., (1995), *Acquisition of the Blackfoot broad-band seismic survey*, CREWES Research Report, Vol. 7, 36-9.
6. Glover, P.W.J., (2014), *Petrophysics and Geological analysis of Logs, Chapter 9. Caliper logs*, School of Earth and Environment, University of Leeds.
7. Keys, W.S., (1990), *Borehole Geophysics Applied to Ground-Water Investigations*, United States Geological Survey, Denver.
8. Layer, D.B. and Members of Staff, Imperial Oil Ltd., (1949), *Leduc oil field, Alberta, a Devonian coral reef discovery*: Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists, 33, 575-602.
9. Leckie, D.A., Bhattacharya, J.P., Bloch, J., Gilboy, C.F and Norris, B., (1994), *Cretaceous Colorado/Alberta Group of the Western Canada Sedimentary Basin*. In:

Geological Atlas of the Western Canada Sedimentary Basin. G.D. Mossop and I. Shetsen (comps.). Calgary, Canadian Society of Petroleum Geologists and Alberta Research Council, p. 335-352.

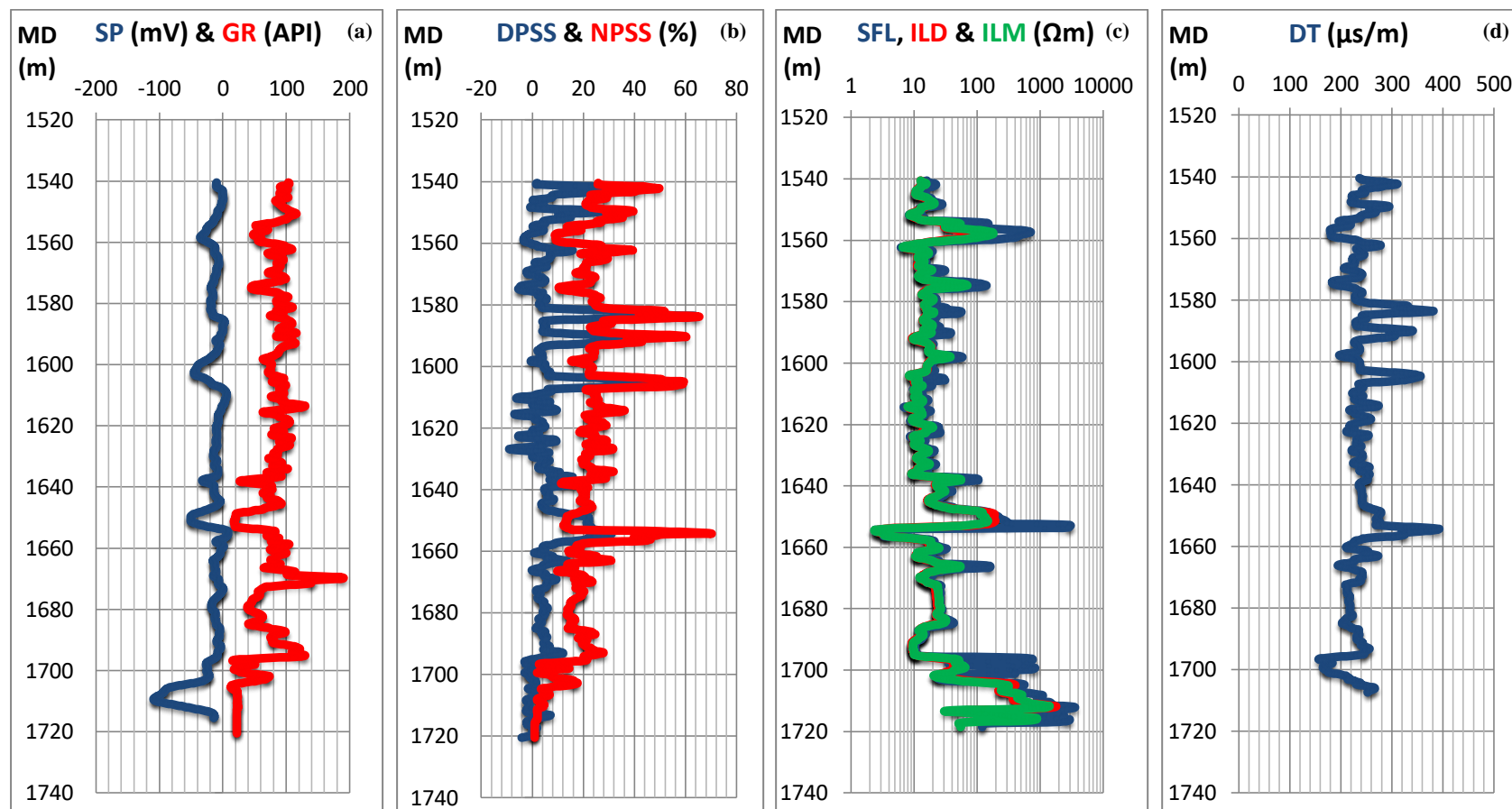
10. *Log Interpretation Charts*, (2009), Schlumberger Educational Services.
11. *Log Interpretation Principles/Applications*, (1991), Schlumberger Educational Services.
12. Miller, S.L.M., Aydemir, E.Ö. and Margrave, G.F., (1995), *Preliminary interpretation of P-P and P-S seismic data from the Blackfoot broad-band survey*, CREWES Research Report, Vol. 7, 42-18.
13. Miller, S.L.M., (1996), *Multicomponent Seismic Data Interpretation*, Department of Geology and Geophysics, University of Calgary, Calgary.
14. Serra, O., (1984), *Fundamentals of Well-Log Interpretation*, Elsevier Science Publishers B.V./Physical Sciences & Engineering Division, Amsterdam.
15. Stewart, R.R., (1995), *The Blackfoot broad-band 3-C seismic survey: Introduction*, CREWES Research Report, Vol. 7, 35-2.
16. Syhlonyk, G. E., (1995), *Proposal for a 3C-3D seismic survey over the Blackfoot field*, Strathmore, Alberta: Personal communication.
17. Wood, J.M. and Hopkins, J.C., (1992), *Traps associated with paleovalleys and interfluvies in an unconformity bounded sequence: Lower Cretaceous Glauconitic Member, Southern Alberta, Canada*: The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 76(6), 904-926.
18. Yang, G.Y.C., Lawton, D.C., Stewart R.R., Miller, S.L.M., Plotter C.C., and Simin V., (1996), *Interpretation and analysis of the Blackfoot 3C-3D seismic survey*, CREWES project Research Report 1996, vol.8, ch.46, pp 1-41.
19. Zaitlin, B., Dalrymple, R.W., Boyd, R., Leckie, D., and MacEachern, J., (1994), *The Stratigraphic Organization of Incised Valley Systems: Implications to Hydrocarbon Exploration and Production*, Canadian Society of Petroleum Geologists.

ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΟΙ ΤΟΠΟΙ

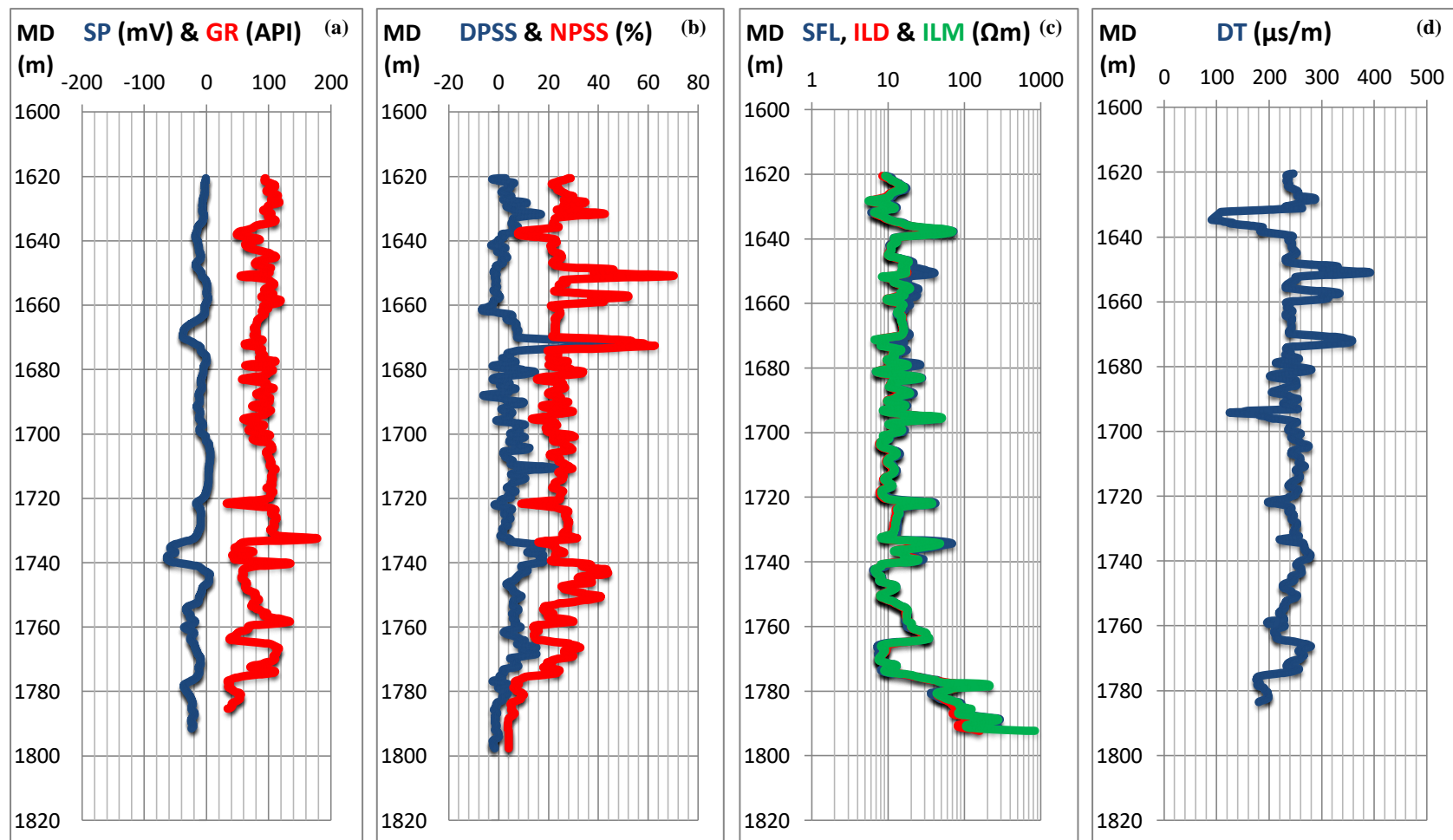
1. DELTA EPSILON Instruments Inc., *Borehole Caliper CA0909* [ONLINE]. Available at: <http://www.deltaepsilon.com/borehole-probes/> [Accessed 10 January 2019].

2. GR Energy Services, *Multifinger Caliper Tools with 3D Imaging* [ONLINE]. Available at: <https://grenergyservices.com/completion-services/logging/multifinger-caliper> [Accessed 10 January 2019].
3. LANDSEA, *Four-arm Caliper Logging Tool (FCAL)* [ONLINE]. Available at: <http://www.lsea.com.sg/oilandgas/accessorial-logging-tool/four-arm-caliper-logging-tool-fcal/> [Accessed 10 January 2019].
4. SEPM STRATA, SEPM Stratigraphy Web, *Incision in SB and below TS* [ONLINE]. Available at: <http://www.sepmstrata.org/Terminology.aspx?id=incised%20valley> [Accessed 8 February 2019].
5. LIVING OCEANS, (2015), *Can you spot Canada's MPAs?* [ONLINE]. Available at: https://livingoceans.org/sites/default/files/mpa_nationwide_aug2014_v3_noBorder_4.jpg [Accessed 12 January 2019].

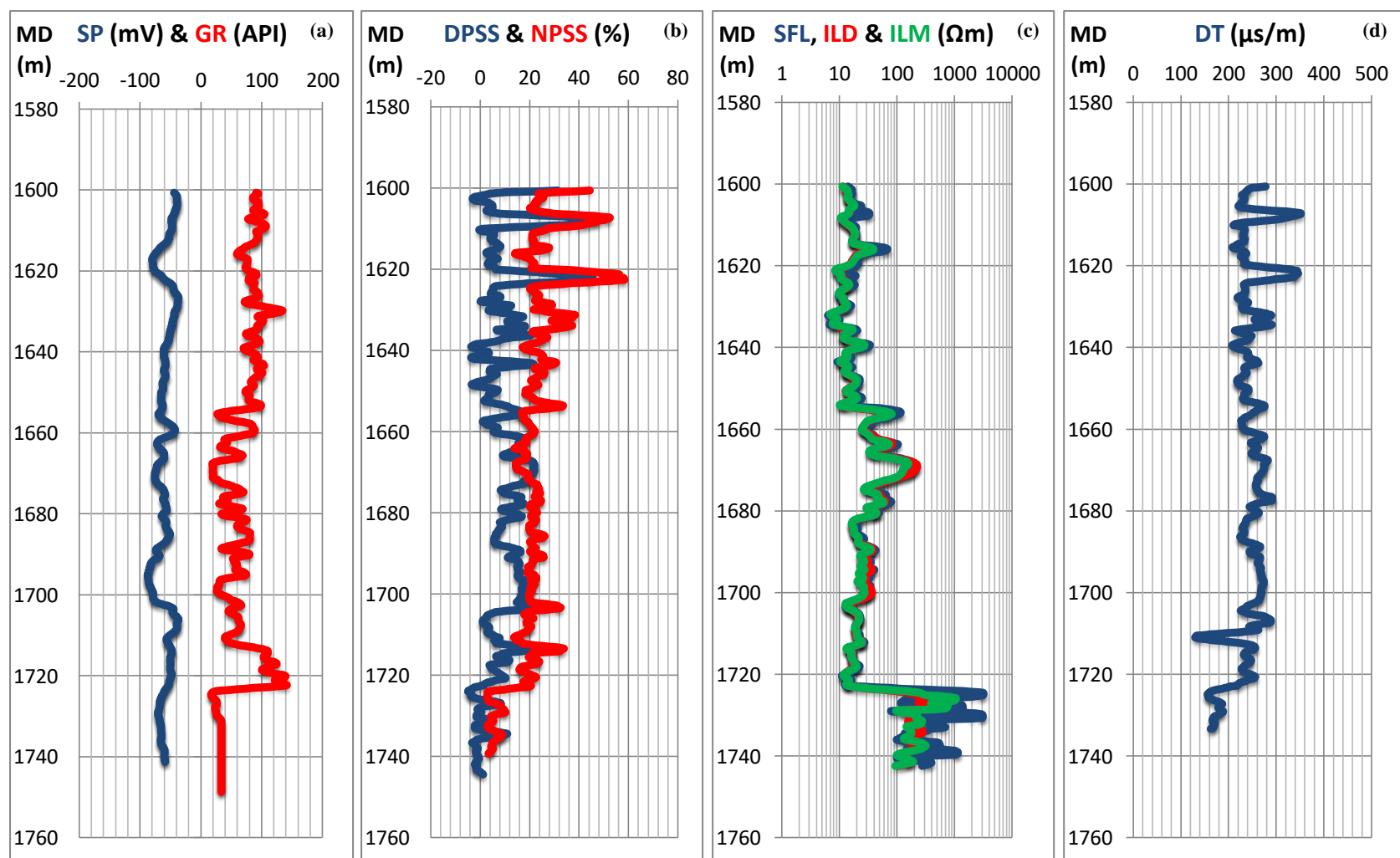
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ



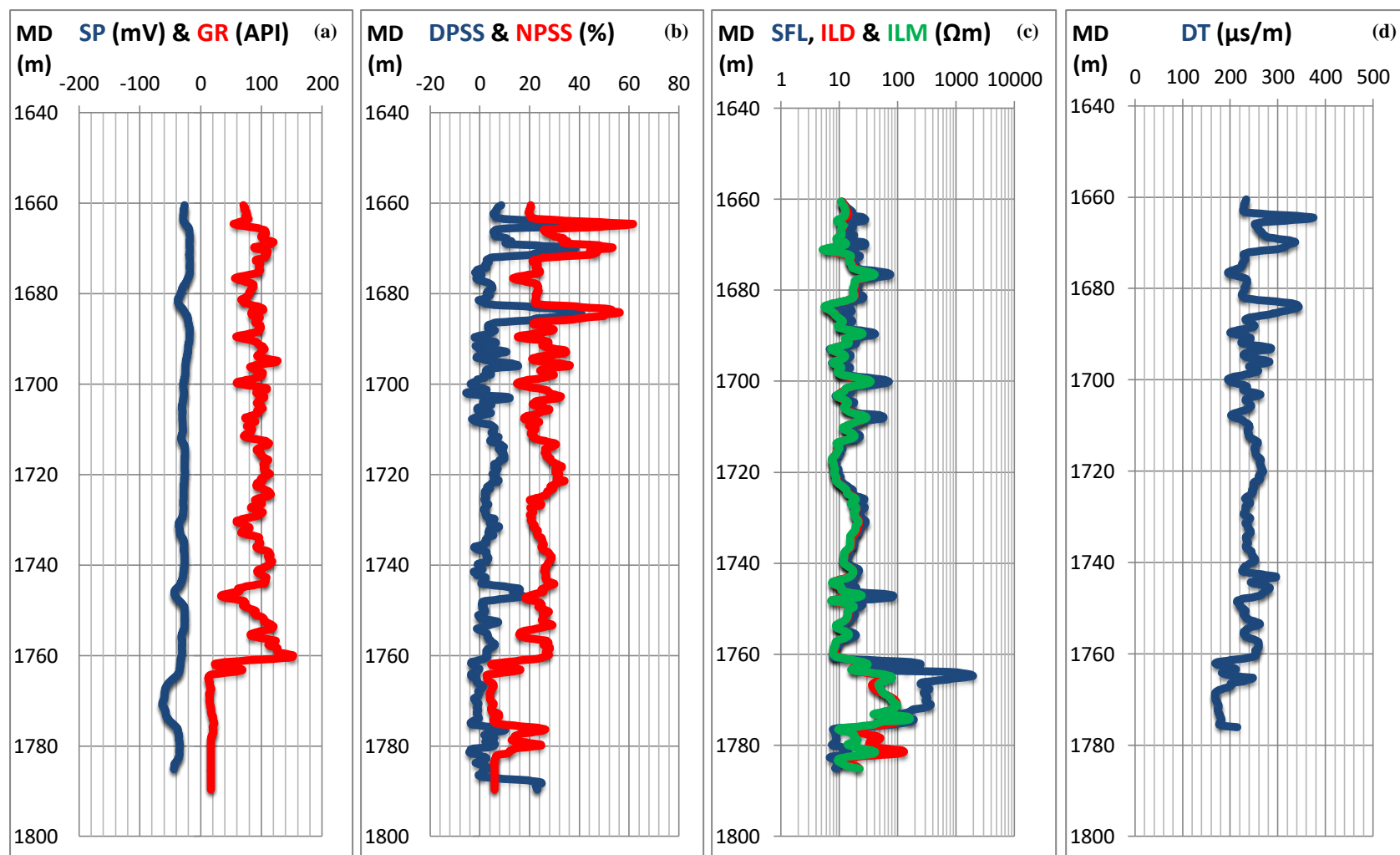
Σχήμα 1 : Γεώτρηση 01-17. Απεικόνιση (α) διαγραφιών φυσικού δυναμικού (SP) και φυσικής ραδιενέργειας (GR), (β) διαγραφιών πυκνότητας (DPSS) και νετρονίου (NPSS), (γ) ηλεκτρικών διαγραφιών (SFL, ILD, ILM) και (δ) της ακουστικής διαγραφίας (DT). Ο κατακόρυφος άξονας αποτελεί το μετρούμενο βάθος (measure depth) σε m.



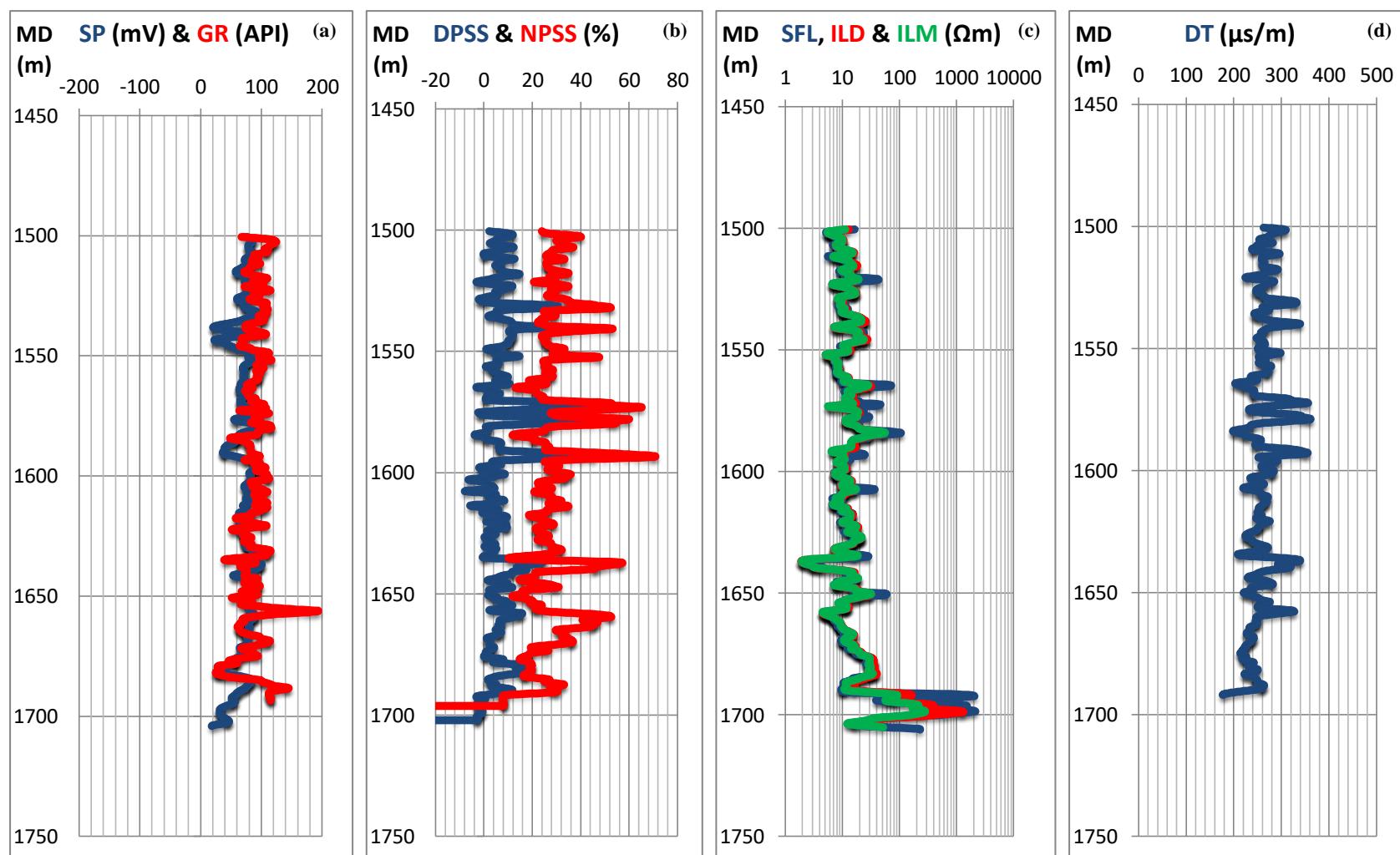
Σχήμα 2 : Γεώτρηση 05-16. Απεικόνιση (α) διαγραφιών φυσικού δυναμικού (SP) και φυσικής ραδιενέργειας (GR), (β) διαγραφιών πυκνότητας (DPSS) και νετρονίου (NPSS), (γ) ηλεκτρικών διαγραφιών (SFL, ILD, ILM) και (δ) της ακουστικής διαγραφίας (DT). Ο κατακόρυφος άξονας αποτελεί το μετρούμενο βάθος (measure depth) σε m.



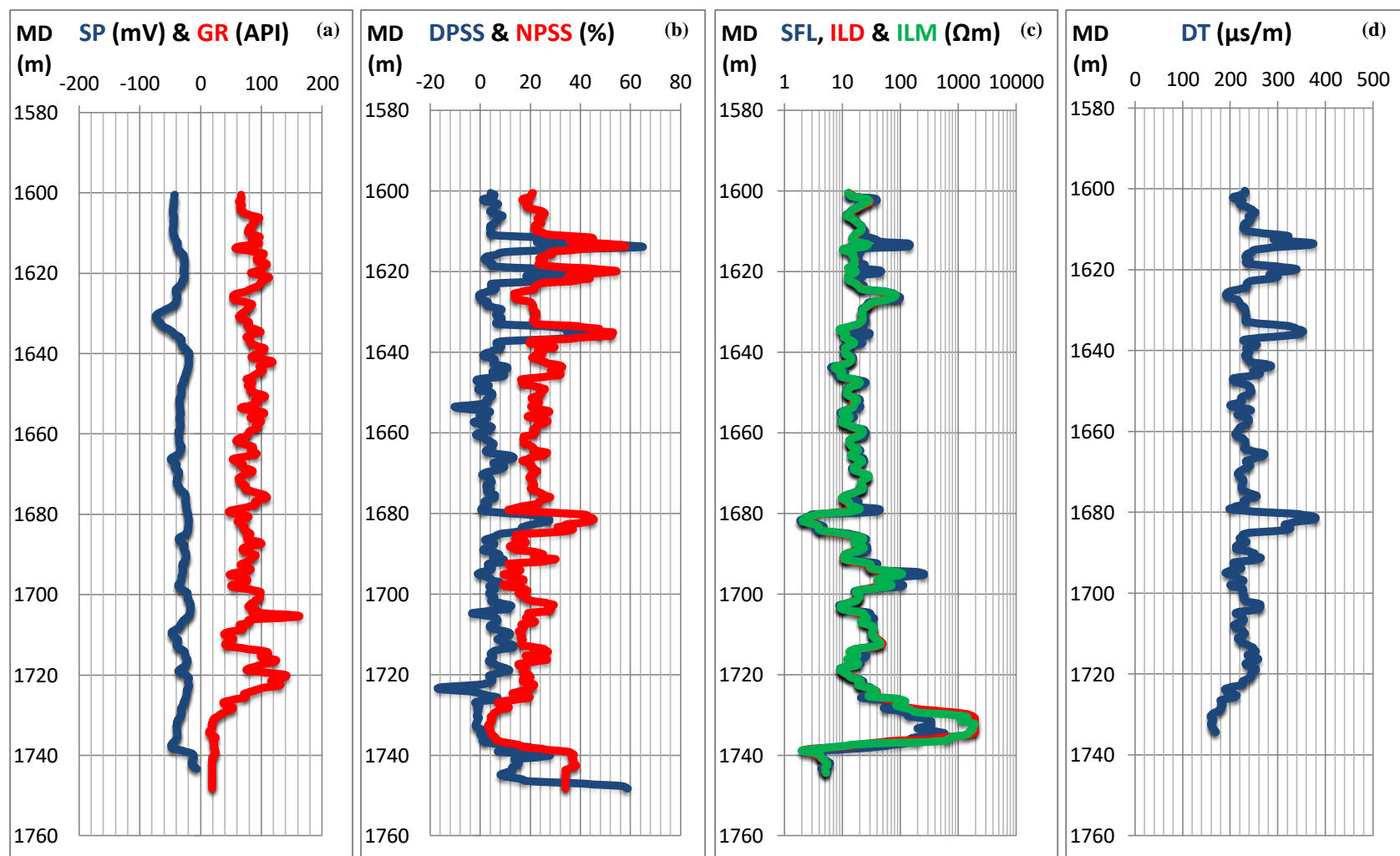
Σχήμα 3 : Γεώτρηση 08-08. Απεικόνιση (α) διαγραφιών φυσικού δυναμικού (SP) και φυσικής ραδιενέργειας (GR), (β) διαγραφιών πυκνότητας (DPSS) και νετρονίου (NPSS), (γ) ηλεκτρικών διαγραφιών (SFL, ILD, ILM) και (δ) της ακουστικής διαγραφίας (DT). Ο κατακόρυφος άξονας αποτελεί το μετρούμενο βάθος (measure depth) σε m.



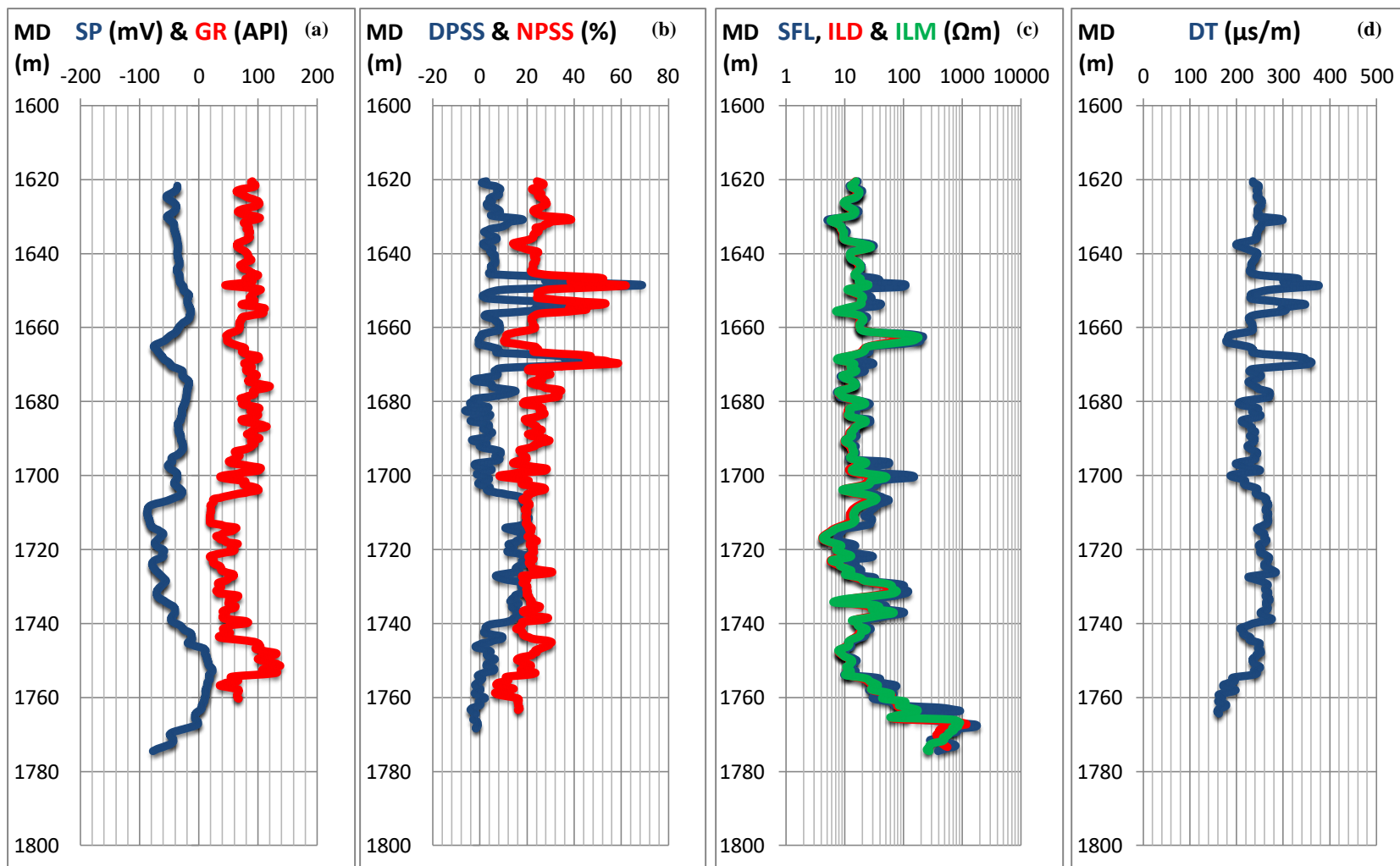
Σχήμα 4 : Γεώτρηση 09-05. Απεικόνιση (α) διαγραφιών φυσικού δυναμικού (SP) και φυσικής ραδιενέργειας (GR), (β) διαγραφιών πυκνότητας (DPSS) και νετρονίου (NPSS), (γ) ηλεκτρικών διαγραφιών (SFL, ILD, ILM) και (δ) της ακουστικής διαγραφίας (DT). Ο κατακόρυφος άξονας αποτελεί το μετρούμενο βάθος (measure depth) σε m.



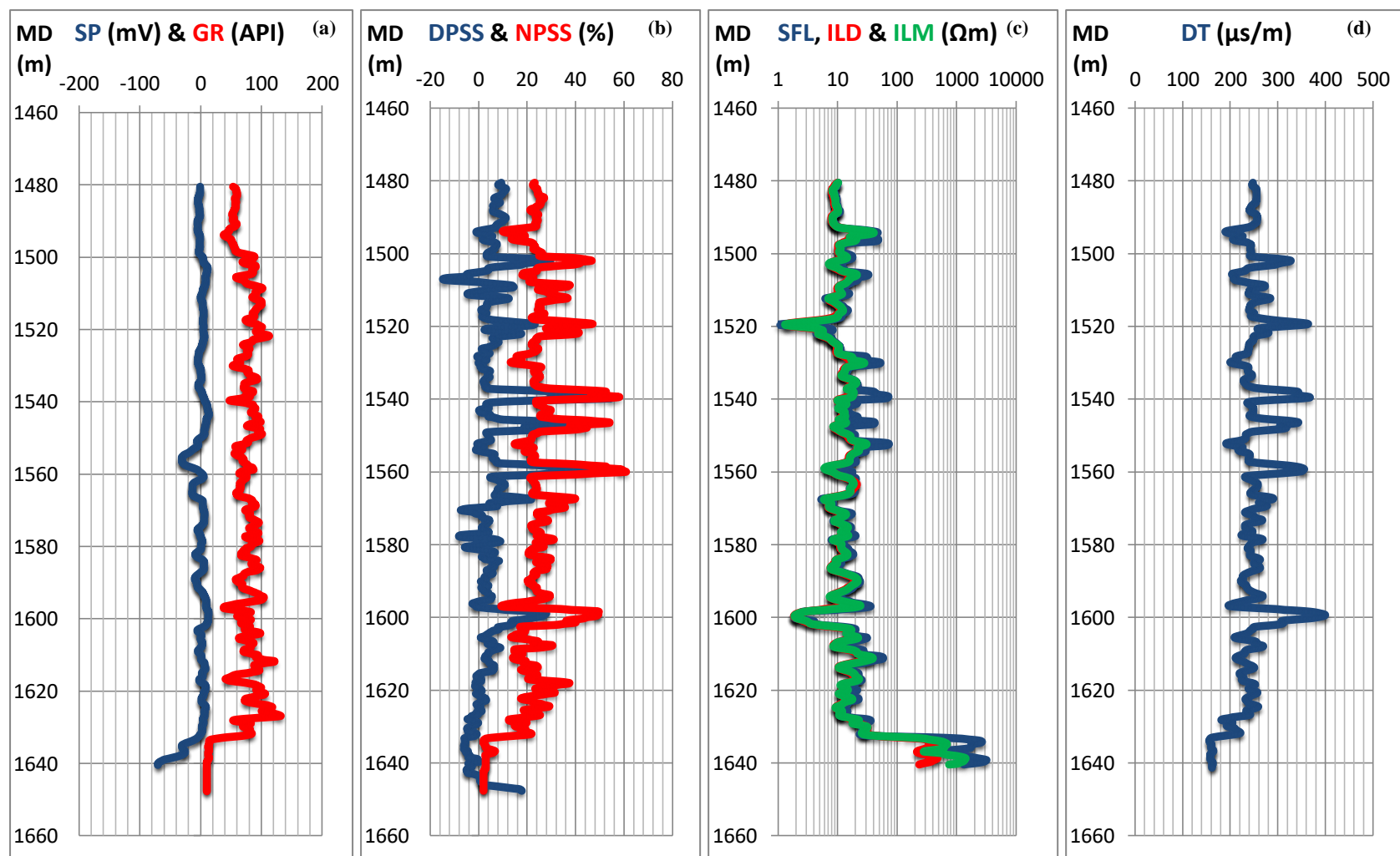
Σχήμα 5 : Γεώτρηση 09-17. Απεικόνιση (α) διαγραφιών φυσικού δυναμικού (SP) και φυσικής ραδιενέργειας (GR), (β) διαγραφιών πυκνότητας (DPSS) και νετρονίου (NPSS), (γ) ηλεκτρικών διαγραφιών (SFL, ILD, ILM) και (δ) της ακουστικής διαγραφίας (DT). Ο κατακόρυφος άξονας αποτελεί το μετρούμενο βάθος (measure depth) σε m.



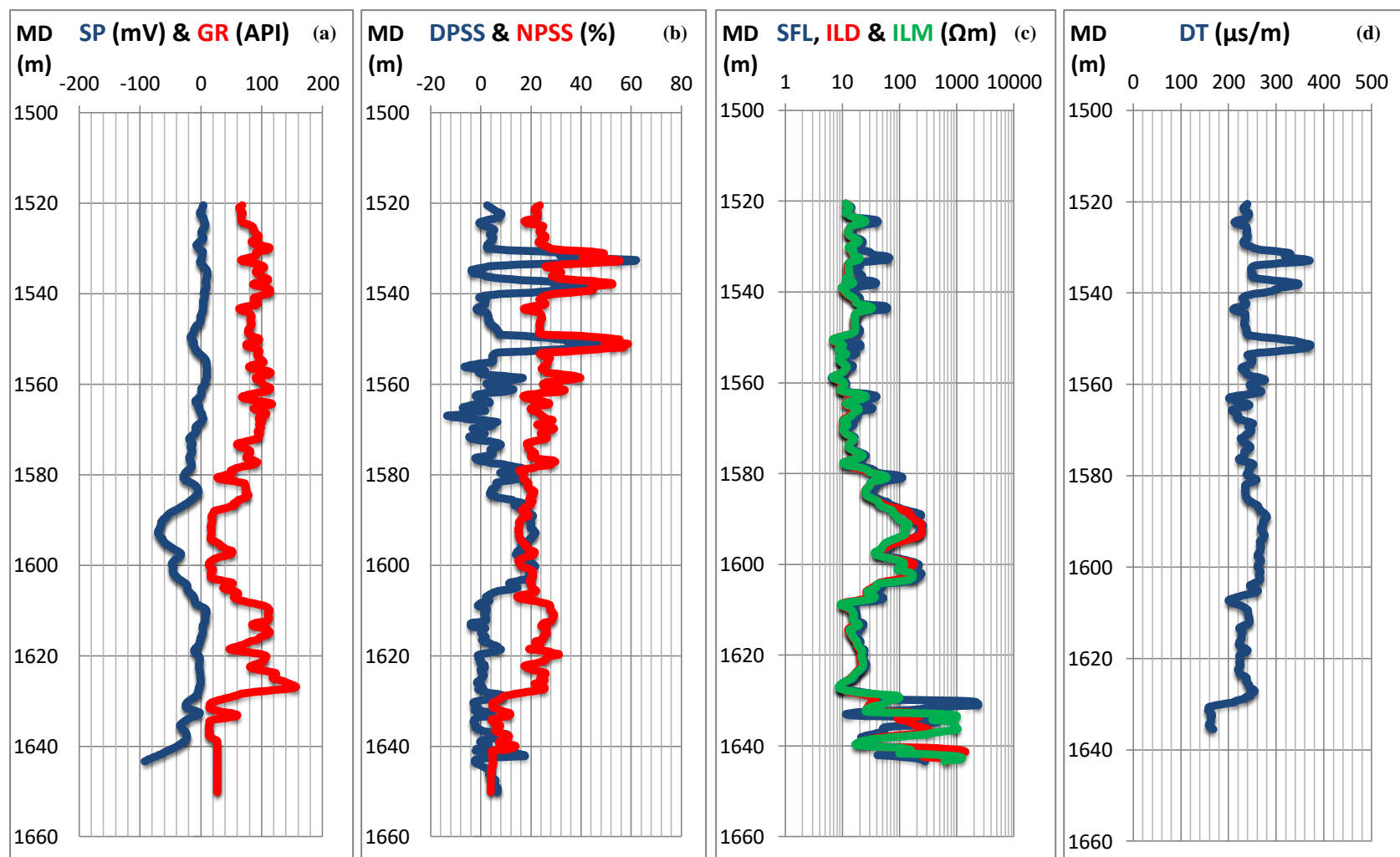
Σχήμα 6 : Γεώτρηση 11-08. Απεικόνιση (α) διαγραφιών φυσικού δυναμικού (SP) και φυσικής ραδιενέργειας (GR), (β) διαγραφιών πυκνότητας (DPSS) και νετρονίου (NPSS), (γ) ηλεκτρικών διαγραφιών (SFL, ILD, ILM) και (δ) της ακουστικής διαγραφίας (DT). Ο κατακόρυφος άξονας αποτελεί το μετρούμενο βάθος (measure depth) σε m.



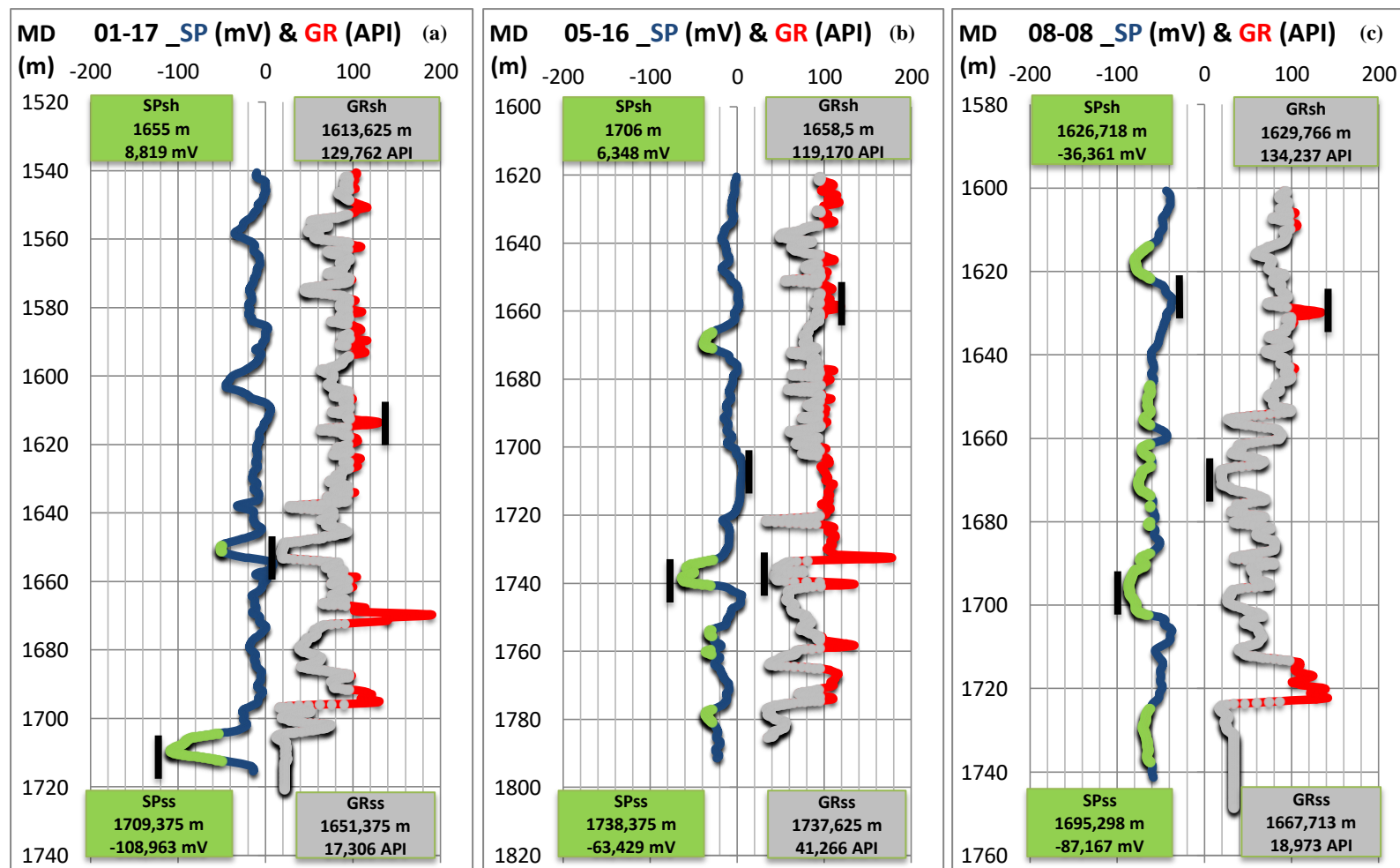
Σχήμα 7 : Γεώτρηση 13-16. Απεικόνιση (α) διαγραφιών φυσικού δυναμικού (SP) και φυσικής ραδιενέργειας (GR), (β) διαγραφιών πυκνότητας (DPSS) και νετρονίου (NPSS), (γ) ηλεκτρικών διαγραφιών (SFL, ILD, ILM) και (δ) της ακουστικής διαγραφίας (DT). Ο κατακόρυφος άξονας αποτελεί το μετρούμενο βάθος (measure depth) σε m.



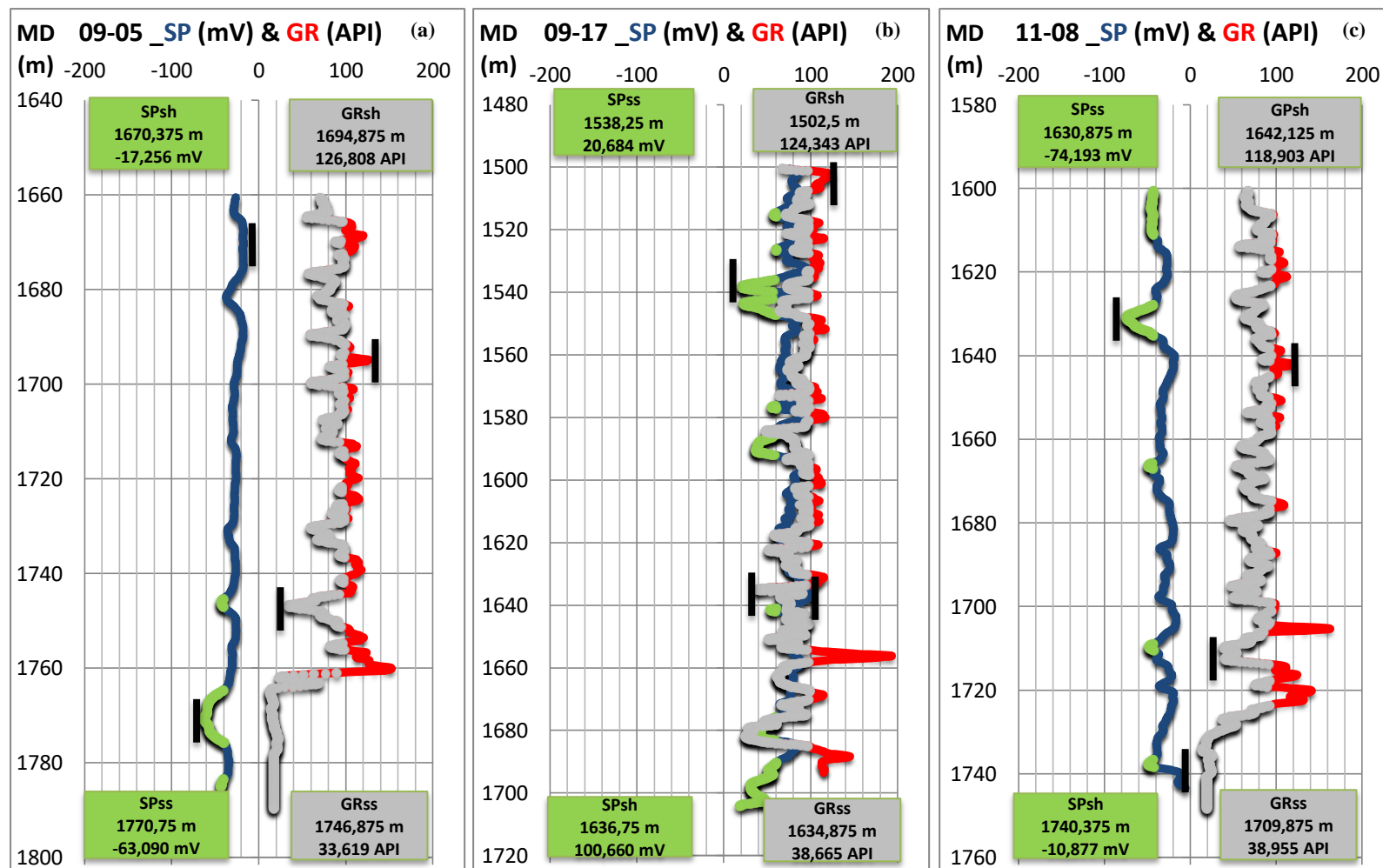
Σχήμα 8 : Γεώτρηση 14-09. Απεικόνιση (α) διαγραφιών φυσικού δυναμικού (SP) και φυσικής ραδιενέργειας (GR), (β) διαγραφιών πυκνότητας (DPSS) και νετρονίου (NPSS), (γ) ηλεκτρικών διαγραφιών (SFL, ILD, ILM) και (δ) της ακουστικής διαγραφίας (DT). Ο κατακόρυφος άξονας αποτελεί το μετρούμενο βάθος (measure depth) σε m.



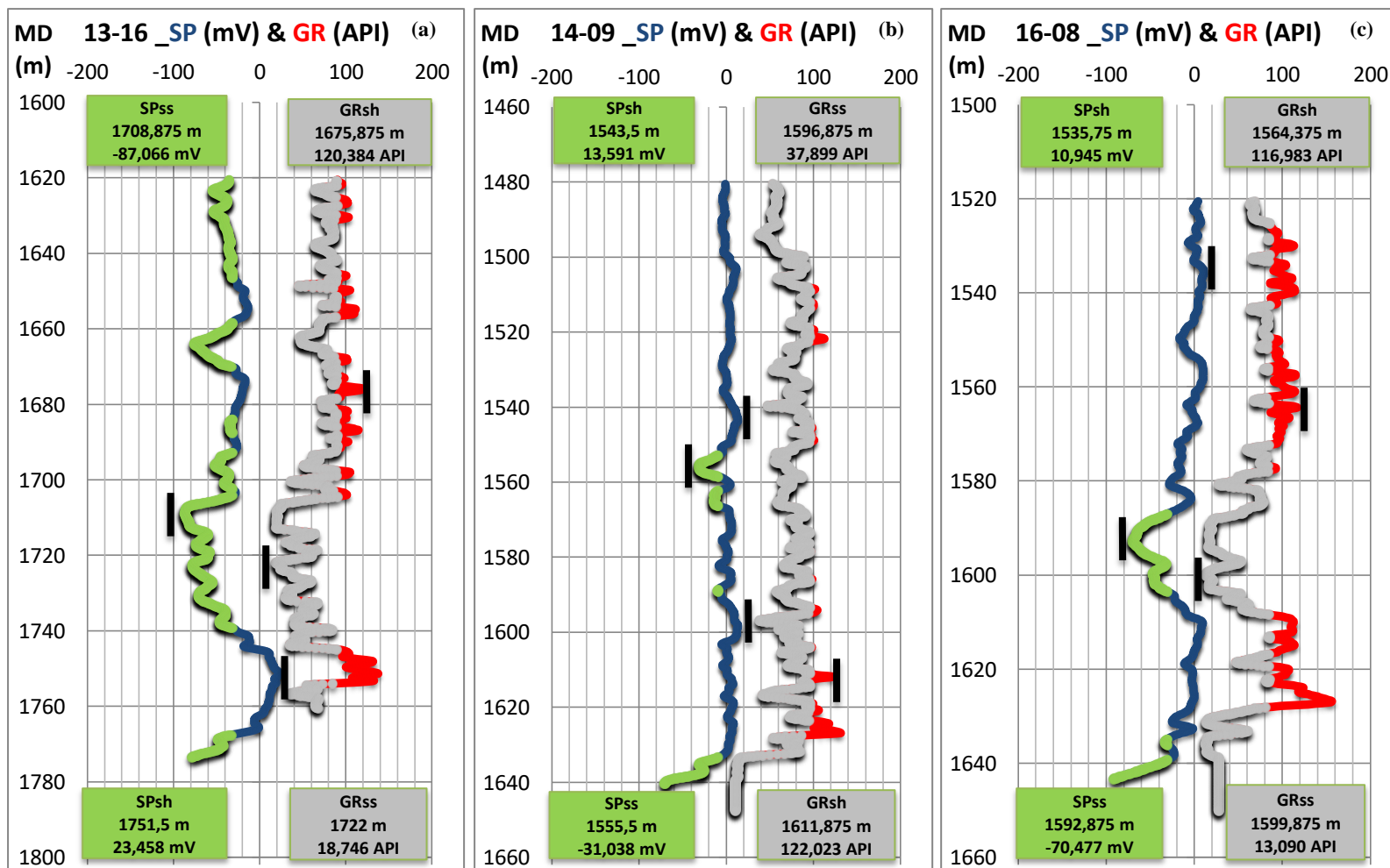
Σχήμα 9 : Γεώτρηση 16-08. Απεικόνιση (α) διαγραφιών φυσικού δυναμικού (SP) και φυσικής ραδιενέργειας (GR), (β) διαγραφιών πυκνότητας (DPSS) και νετρονίου (NPSS), (γ) ηλεκτρικών διαγραφιών (SFL, ILD, ILM) και (δ) της ακουστικής διαγραφίας (DT). Ο κατακόρυφος άξονας αποτελεί το μετρούμενο βάθος (measure depth) σε m.



Σχήμα 10 : Απεικόνιση των διαγραφιών SP (mV) και GR (API), των σημείων SP_{ss}, SP_{sh}, GR_{ss}, GR_{sh} και των περατών (πράσινο και γκρι χρώμα) σχηματισμών των γεωτρήσεων (a) 01-17, (b) 05-16 και (c) 08-08 με βάση τον υπολογισμένο όγκο των αργιλικών προσμίξεών τους. Ο κατακόρυφος άξονας αποτελεί το μετρούμενο βάθος (measure depth) σε m.



Σχήμα 11 : Απεικόνιση των διαγραφιών SP (mV) και GR (API), των σημείων SP_{ss}, SP_{sh}, GR_{ss}, GR_{sh} και των περατών (πράσινο και γκρι χρώμα) σχηματισμών των γεωτρήσεων (a) 09-05, (b) 09-17 και (c) 11-08 με βάση τον υπολογισμένο όγκο των αργιλικών προσμίξεών τους. Ο κατακόρυφος άξονας αποτελεί το μετρούμενο βάθος (measure depth) σε m.



Σχήμα 12 : Απεικόνιση των διαγραφιών SP (mV) και GR (API), των σημείων SP_{ss}, SP_{sh}, GR_{ss}, GR_{sh} και των περατών (πράσινο και γκρι χρώμα) σχηματισμών των γεωτρήσεων (a) 13-16, (b) 14-09 και (c) 16-08 με βάση τον υπολογισμένο όγκο των αργιλικών προσμίξεών τους. Ο κατακόρυφος άξονας αποτελεί το μετρούμενο βάθος (measure depth) σε m.