

Πρακτικά		3ου Συνεδρίου		Μάιος 1986	
Δελτ. Ελλ. Γεωλ. Εταιρ.	Τομ. XX/3	σελ. 197-215	Αθήνα 1988		
Bull. Geol. Soc. Greece	Vol.	pag.	Athens		

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΙΣ ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

Ε. ΧΙΩΤΗΣ*

A B S T R A C T

On the basis of reliable bottom-hole temperature measurements from oil wells in Greece the evaluation of static formation temperature and heat flow is attempted.

Two different methods were applied for the calculation of formation temperature, both with similar results.

The cooling effect of mud circulation was simulated respectively with linear and cylindrical heat source.

Seismic velocity of either elastic or carbonate rocks measured with sonic log was used for the estimation of rock thermal conductivity at formation temperature. The cooling effect of sedimentation in areas of recent or continuing sedimentation was taken into account for the heat flow estimation.

The available heat flow measurements in Eastern Mediterranean in conjunction with the estimated heat flow at well positions allow the conclusion that Greece can be subdivided presently into three tectonic provinces, i.e. the Aegean Sea with high heat flow, the Serbo-macedonian and Rhodope massives with values close to the world average and Central-Western Greece with heat flow below the average.

* Μεταλλειολόγος Μηχ., Ε.Μ.Π. (1966)
M.Sc., D.I.C, Imperial College, Τμ.Γεωλογίας (1975)
M.Sc., D.I.C, Imperial College, Τμ.Πετρελαίου (1976)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή περιγράφεται η τεχνική των μετρήσεων θερμοκρασίας στις γεωτρήσεις πετρελαίου και οι μέθοδοι εκτίμησης της αδιατάρακτης θερμοκρασίας των γεωλογικών σχηματισμών. Επίσης επιχειρείται με Ελληνικά δεδομένα η εκτίμηση της γεωθερμικής βαθμίδας, της θερμικής αγωγιμότητας των ιζημάτων και της ροής θερμότητας δια μέσου της στήλης των ιζημάτων. Για περιοχές με πρόσφατη ή συνεχιζόμενη ιζηματογένεση υπολογίστηκε επίσης η ροή θερμότητας στη βάση της ιζηματογενούς λεκάνης.

1.1 Μετρήσεις θερμοκρασίας στις γεωτρήσεις πετρελαίου

Στις γεωτρήσεις πετρελαίου οι μετρήσεις θερμοκρασίας είναι είτε συνεχείς διαγραφίες θερμοκρασίας συναρτήσει του βάθους, είτε μεμονωμένες μετρήσεις σε ωρισμένο βάθος που γίνονται μαζί με τις ηλεκτρικές διαγραφίες ή τις δοκιμές παραγωγής. Και στις δύο περιπτώσεις μετρείται η θερμοκρασία της λάσπης της γεωτρήσεως και όχι η θερμοκρασία των γεωλογικών σχηματισμών. Αυτό είναι και το μεγάλο μειονέκτημα των μετρήσεων αυτών, αφού η θερμοκρασία της λάσπης διαφέρει από την αδιατάρακτη θερμοκρασία των πετρωμάτων. Τούτο εξ'άλλου, είναι και μία από τις λειτουργίες της λάσπης, η ψύξη δηλαδή του κοπτικού και των πετρωμάτων στον πυθμένα της γεώτρησης. Για να αποκατασταθεί θερμική ισορροπία, δηλαδή να επανέλθει η θερμοκρασία στις αρχικές αδιατάρακτες τιμές της, θα πρέπει η λάσπη να διατηρηθεί ακίνητη αρκετές ημέρες, πράγμα που προσκρούει σε τεχνικούς και οικονομικούς περιορισμούς.

Γενικά, οι μετρήσεις θερμοκρασίας στις γεωτρήσεις πετρελαίων γίνονται μερικές ώρες έως λίγες δεκάδες ωρών μετά την παύση της κυκλοφορίας και επομένως πολύ πριν αποκατασταθεί θερμική ισορροπία. Από την άποψη αυτή οι μετρήσεις που γίνονται παράλληλα με τις δοκιμές παραγωγής (DST) είναι οι πιο αξιόπιστες, γιατί έχει μεσολαβήσει περισσότερος χρόνος από την παύση της κυκλοφορίας.

Στο τυπικό διάγραμμα του Σχ.1 φαίνεται η καμπύλη της υπολογιζόμενης αδιατάρακτης θερμοκρασίας των πετρωμάτων συναρτήσει του βάθους καθώς και της μετρημένης θερμοκρασίας της λάσπης, λίγες ώρες μετά την παύση της κυκλοφορίας. Στο ανώτερο τμήμα της γεώτρησης η λάσπη είναι θερμότερη από τα γειτονικά αδιατάρακτα πετρώματα, ενώ στο κατώτερο είναι ψυχρότερη.

Επομένως για την απόκτηση αξιόπιστων τιμών θερμοκρασίας στις γεωτρήσεις πετρελαίου θα πρέπει είτε να παραμείνει στάσιμη η γεώτρηση για αρκετές ημέρες, πράγμα που είναι ασύμφορο οικονομικά, είτε βάσει διαδοχικών μετρήσεων να εκτιμηθεί υπολογιστικά η αδιατάρακτη θερμοκρασία. Οι διάφορες μέθοδοι εκτίμησης προϋποθέτουν επανειλημμένες μετρήσεις θερμοκρασίας σε ωρισμένο βάθος και σε διάφορες χρονικές στιγμές. Η εκτίμηση της αδιατάρακτης θερμοκρασίας γίνεται με προβολή των μετρήσεων σε άπειρο χρόνο, μετά την παύση κυκλοφορίας. Από την άλλη πλευρά, το πλεονέκτημα των γεωτρήσεων πετρελαίου είναι ότι αποτελούν πρακτικά το μόνο μέσο μετρήσεων θερμοκρασίας σε μεγάλα βάθη.

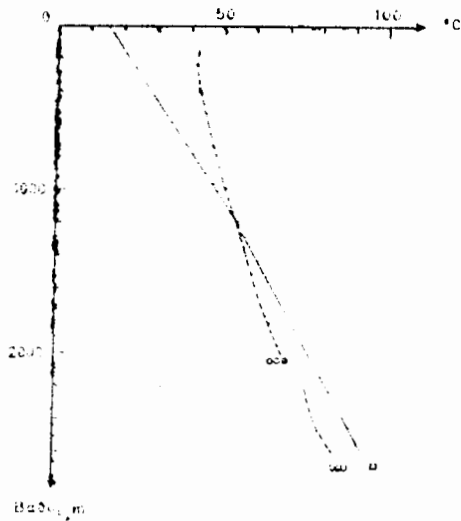
1.2 Μέθοδοι εκτίμησης της αδιατάρακτης θερμοκρασίας

Στο Σχ.2 δίνεται συναρτήσει του χρόνου από την παύση της κυκλοφορίας η εξέλιξη της θερμοκρασίας σε διάφορες γεωτρήσεις στην Ελλάδα. Οι μεμονωμένες μετρήσεις μπορεί να είναι 15 έως 30°C χαμηλότερες από την αδιατάρακτη θερμοκρασία ανάλογα με το χρόνο μέτρησης γι' αυτό και είναι απαραίτητη η διόρθωσή τους. Η προβολή της θερμοκρασίας σε άπειρο χρόνο σε διαγράμματα, όπως αυτό του σχήματος είναι υποκειμενική.

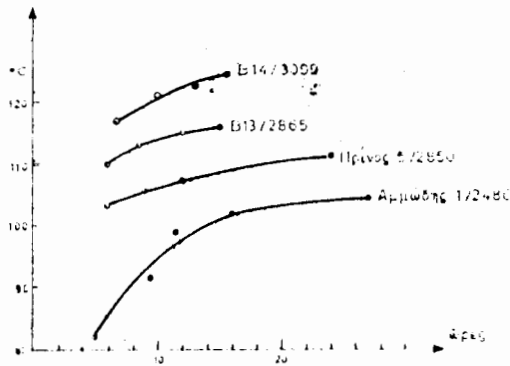
Οι θεωρητικές μέθοδοι διόρθωσης στηρίζονται στην προσαρμογή μιάς θεωρητικής συνάρτησης στις συγκεκριμένες μετρήσεις και τον προσδιορισμό ωρισμένων παραμέτρων. Κατόπιν, από την σχετική συνάρτηση υπολογίζεται η θερμοκρασία σε άπειρο χρόνο, από την παύση κυκλοφορίας που είναι και η εκτίμηση της αδιατάρακτης θερμοκρασίας.

1.2.1 Μέθοδος γραμμικής πηγής

Οι Lachenbruch & Brewer (1959), βάσει της θεωρίας αγωγής θερμότητας, προτείνουν την εφαρμογή της εξίσωσης γραμμικής πηγής απείρου μήκους, οπότε :



Σχ.1. Διαγραφή θερμοκρασίας (διακεκομμένη καμπύλη) στη γεώτρηση ΣΤΡΥΜΩΝ-1 μετρημένη 23 ώρες μετά την παύση κυκλοφορίας και εκτίμηση αδιατάρακτης θερμοκρασίας (συνεχής καμπύλη).
 Fig.1. Mud temperature log (dashed line) measured 23 hours after circulation stop versus estimated formation temperature of well STRYMON-2.



Σχ. 2. Αποκατάσταση θερμικής ισορροπίας συναρτήσει του χρόνου από την παύση κυκλοφορίας σε γεωτρήσεις του Πρίνου (αναφέρεται η γεώτρηση και ακολουθεί το βάθος σε μέτρα).
 Fig. 2. Temperature stabilization as a function of time after circulation stop at Prinos wells (well name is followed by depth of measurement in meters).

$$T = T_0 - \frac{q}{4\pi\lambda} \ln \frac{\Delta t}{t+\Delta t} \quad (1)$$

όπου

- t : η διάρκεια της κυκλοφορίας
- Δt : ο χρόνος μέτρησης από την παύση κυκλοφορίας
- T : η αντίστοιχη μέτρηση θερμοκρασίας στο κέντρο της γεώτρησης
- T_0 : η αδιατάρακτη θερμοκρασία
- q : η παροχή της γραμμικής πηγής ανά μονάδα χρόνου και μήκους, θεωρούμενη σταθερή κατά την διάρκεια της κυκλοφορίας
- λ : η θερμική αγωγιμότητα, επίσης σταθερή

Οι Fertl & Wichmann (1977), χωρίς να αναφερθούν στην παραπάνω εξίσωση, προτείνουν τον υπολογισμό της αδιατάρακτης θερμοκρασίας ανάλογα με τον υπολογισμό της στατικής πίεσης πορώδους σχηματισμού κατά την δοκιμή παραγωγής (DST). Αναλυτικότερα, προτείνουν την προβολή της θερμοκρασίας σε γραμμική κλίμακα, συναρτήσει του λόγου $\frac{\Delta t}{t+\Delta t}$ σε λογαριθμική κλίμακα και τη χάραξη της σχετικής ευθείας (διάγραμμα Horner). Η εκτίμηση της αδιατάρακτης θερμοκρασίας προκύπτει από την παραπάνω ευθεία για άπειρο χρόνο Δt , οπότε $\frac{\Delta t}{t+\Delta t} = 1$. Είναι φανερό ότι η παραλλαγή αυτή στηρίζεται στην προαναφερθείσα εξίσωση (1). Για μικρή διάρκεια κυκλοφορίας t η μέθοδος δίνει καλά αποτελέσματα. Για μεγάλους χρόνους κυκλοφορίας, πάνω από 24 ώρες, η μέθοδος οδηγεί σε εκτιμήσεις χαμηλότερες από τις πραγματικές τιμές.

1.2.2 Μέθοδος κυλινδρικής πηγής

Οι Leblanc et al (1981) εφήρμοσαν την εξίσωση στιγμιαίας κυλινδρικής πηγής, οπότε :

$$T_t = T_m + (T_0 - T_m) e^{-a^2/4Kt}$$

T_m : Η θερμοκρασία στο κέντρο της γεώτρησης κατά την παύση της κυκλοφορίας

T_t : Η αντίστοιχη θερμοκρασία μετά χρόνο t από την παύση κυκλοφορίας

T_0 : Η αδιατάρακτη θερμοκρασία του σχηματισμού

a : η ακτίνα της γεώτρησης

t : ο χρόνος από την παύση της κυκλοφορίας και

k : ο συντελεστής θερμικής διάχυσης

Και οι δύο μέθοδοι στηρίζονται σε απλοποιητικές παραδοχές. Στη μέθοδο γραμμικής πηγής η γεώτρηση εξομοιώνεται με ευθεία, αλλά γίνεται δεκτό ότι η ψύξη της γεώτρησης έχει χρονική διάρκεια. Αντίστροφα, στην μέθοδο κυλινδρικής πηγής λαμβάνεται υπόψη η κυλινδρική γεωμετρία της γεώτρησης, αλλά γίνεται δεκτό ότι η ψύξη της γεώτρησης συμβαίνει ακαριαία.

1.3 Εκτίμηση θερμικής αγωγιμότητας και ροής θερμότητας

Όταν η θερμότης διαδίδεται με αγωγή ισχύει ο νόμος Fourier :

$$q = \lambda \cdot G \quad (3)$$

όπου q η ροή θερμότητας, λ η θερμική αγωγιμότης και G η γεωθερμική βαθμίδα. Η εφαρμογή της εξίσωσης αυτής προσκρούει στην έλλειψη μετρήσεων λ στις γεωτρήσεις πετρελαίου, καθώς και στο μεγάλο εύρος της θερμικής αγωγιμότητας για ωρισμένη λιθολογία.

Οι Houbolt & Wells (1980) ανέπτυξαν μέθοδο βάσει της οποίας μπορεί να εκτιμηθεί η θερμική αγωγιμότης από την σεισμική ταχύτητα και την θερμοκρασία των ιζημάτων. Η μέθοδος στηρίζεται σε πειραματικά δεδομένα και σε μονάδες τεχνικού συστήματος εκφράζεται με την εξίσωση :

$$\lambda = \frac{V \cdot q_B}{1,039 (80,031 + T)} \quad (4)$$

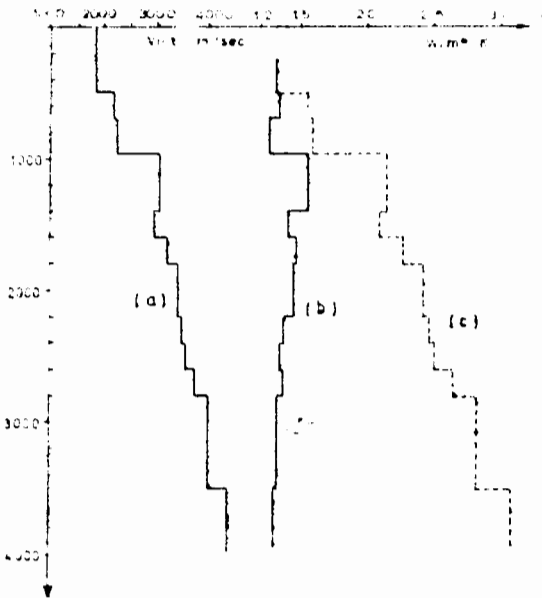
όπου V η σεισμική ταχύτης, T η θερμοκρασία σε βαθμούς Κελσίου και q_B η θερμική ροή μιάς συγκεκριμένης γεώτρησης (Bolderij) που ελήφθη σαν βάση αναφοράς. Η τιμή q_B δεν έχει μετρηθεί αλλά εκτιμάται σε 0,077 W/m² με σφάλμα μικρότερο από 15%. Αξιοσημείωτο είναι ότι οι αριθμητικοί συντελεστές της εξίσωσης (4) ισχύουν τόσο για ανθρακικά, όσο και για κλαστικά ιζήματα, όχι όμως για εβαπορίτες.

Βάσει των (3) και (4) και για την ανωτέρω τιμή q_B προκύπτει:

$$q = \frac{0,0741}{\Delta t} \ln \frac{T_2 + 80,031}{T_1 + 80,031} \quad (5)$$

όπου Δt ο χρόνος διάδοσης σεισμικού κύματος μεταξύ των σημείων 1 και 2 μιας γεώτρησης και T_1, T_2 οι αντίστοιχες θερμοκρασίες ($T_2 > T_1$).

Στο Σχ. 3 δίδεται η σεισμική ταχύτης της γεώτρησης Νέστος 2, όπως μετρήθηκε με την ακουστική διαγραφή, και η θερμική αγωγιμότης που υπολογίστηκε απο την εξίσωση (4) τόσο στην



Σχ. 3 Γεώτρηση Νέστος 2: (α) ακουστική ταχύτης, (β) θερμική αγωγιμότης σχηματισμών σε θερμοκρασία υπεδάφους, (γ) θερμική αγωγιμότης στους 25°C

Fig.3. Well Nestos 2: (a) acoustic velocity, (b) thermal conductivity at formation temperature, (c) thermal conductivity at 25°C.

θερμοκρασία υπεδάφους, όσο και για σταθερή θερμοκρασία δωματίου (25°C). Είναι χαρακτηριστικό ότι η θερμική αγωγιμότητα σε θερμοκρασία υπεδάφους κυμαίνεται σε πολύ στενότερα όρια και είναι αρκετά μικρότερη από την θερμική αγωγιμότητα σε θερμοκρασία δωματίου. Για το λόγο αυτό, εκτιμήσεις θερμικής αγωγιμότητας βάσει της λιθολογίας μόνο, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η θερμοκρασία υπεδάφους, μπορεί να οδηγήσουν σε μεγάλα σφάλματα.

2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ ΒΑΣΕΙ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

2.1 Εκτίμηση αδιατάρακτης θερμοκρασίας

Οι μετρήσεις θερμοκρασίας στις διάφορες γεωτρήσεις στην Ελλάδα χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της αδιατάρακτης θερμοκρασίας με τις μεθόδους γραμμικής και κυλινδρικής πηγής. Στη μέθοδο γραμμικής πηγής, οσάκις δεν υπάρχουν στοιχεία, η διάρκεια κυκλοφορίας ελήφθη κατά προσέγγιση ίση με 5 ώρες. Στη μέθοδο κυλινδρικής πηγής ο συντελεστής θερμικής διάχυσης ελήφθη ίσος με $0.0075 \text{ cm}^2/\text{sec}$. Στον Πίνακα 1 δίνονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών για αντιπροσωπευτικές γεωτρήσεις.

Η αξιοπιστία των εκτιμήσεων αδιατάρακτης θερμοκρασίας μπορεί να ελεχθεί στο κοίτασμα του Πρίνου, όπου υπάρχει πλήθος μετρήσεων θερμοκρασίας από ηλεκτρικές διαγραφίες και δοκιμές παραγωγής. Από την αξιολόγηση του συνόλου των δεδομένων προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα.

α) Η εκτίμηση αδιατάρακτης θερμοκρασίας είναι πρακτικά η ίδια και με τις δύο μεθόδους. Οι διαφορές τους σπάνια υπερβαίνουν τους δύο ή τρεις βαθμούς Κελσίου.

β) Μεμονωμένες μετρήσεις θερμοκρασίας από ηλεκτρικές διαγραφίες μπορεί να είναι μέχρι και 30 έως 40° C χαμηλότερες από τις αδιατάρακτες θερμοκρασίες.

γ) Ο υπολογισμός της γεωθερμικής βαθμίδας με βάση μεμονωμένες μετρήσεις θερμοκρασίας από ηλεκτρικές διαγραφίες μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλο σφάλμα, γιαυτό πρέπει να χρησιμοποιούνται εκτιμήσεις της αδιατάρακτης θερμοκρασίας.

2.2 Ροή θερμότητας και θερμοδιαγράμματα

Με τη μέθοδο της παραγράφου 1.3 προσδιορίστηκε η ροή θερμότητας

ΠΙΝΑΚΑΣ 1

Διόρθωση μετρήσεων θερμοκρασίας για τον υπολογισμό της αδιατάρακτης θερμοκρασίας σε αντιπροσωπευτικές γεωτρήσεις.

No.	Γεώτρηση	Βάθος m	Μετρήσεις θερμοκρασίας, °C (χρόνος από παύσης κυκλοφο- ρίας h)	Αδιατάρακτη θερμοκρασία °C	
				Για γραμ- μική πηγή	Για κυλινδρι- κή πηγή
1.	Δέλτα Έβρου 1	2740	79 (9) , 90 (15) , 96 (21,5)	111.1	109.6
	" "	3975	126 (12) , 132 (17) , 136 (23)	143.5	147.3
2.	Νέστος 2	2370	84 (5,5) , 89 (9) , 92 (12)	100.7	99.9
	"	3104	125 (7,5) , 127 (11)	132.3	131.6
3.	Αιμώδης 1	2486	82.2 (5) , 91.5 (9.5) , 98.9 (12.5) , 101.7 (16) , 104.4 (27)	112.6	111.3
	"	3560	113.9 (6) , 120 (10) , 126.7 (13.5) 129.4 (18.5)	139.4	137.1
4.	Πρίνος 20	3180	115.6 (6) , 122.2 (9.5) , 126.7 (13) , 129.4 (16.5)	139.9	137.5
5.	Ν.Καβάλα 2	3225	129.5 (6) , 144.4 (18)	151.0	152.7
6.	Πέραμος 1	3441	147.8 (6) , 153.9 (12)	162.1	160.6
7.	Στρυμών 1	3650	110 (10) , 120 (14) , 135 (32)	149.0	147.0
8.	Γιαννάδες	3940	58 (9) , 60 (16) , 63 (20)	66.6	65.8
9.	Γάιος 1X	4148	77.5 (15.5) , 78.4 (23) , 79.0 (31.5) , 79.2 (38)	80.6	80.6
	"	4494	82 (11.5) , 83 (15.5) , 83.5 (21.5)	85.7	85.5
10.	Πάργα 1	1100	43.3 (6) , 43.9 (9) , 44.4 (13)	45.7	45.2
	"	3111	62.2 (6) , 62.8 (8.5) , 63.3 (11)	65.0	64.6
11.	Κατάκολο 102	2958	71 (7) , 72 (12) , 74 (17) , 75 (22)	77.0	76.4
12.	Κατάκολο 104	1200	50 (8) , 51 (12) , 52 (16.5)	54.3	54.4
	"	1828	43 (7) , 45 (9)	54.0	53.2

σε αντιπροσωπευτικές γεωτρήσεις (Πίνακας 2). Οι χρόνοι διάδοσης που υπεισέρχονται στην εξίσωση (5) ελήφθησαν από την ακουστική διαγραφή ή κατά προτίμηση από έρευνα ταχύτητας (well velocity survey), εφόσον υπήρχε. Στον Πίνακα 2 περιλαμβάνονται μόνο οι γεωτρήσεις με αξιόπιστες μετρήσεις θερμοκρασίας και δίνονται οι τιμές θερμικής ροής, μέσης γεωθερμικής βαθμίδας και μέσης θερμικής αγωγιμότητας. Είναι ενδιαφέρον ότι η μέση θερμική αγωγιμότητα των νεογενών κλαστικών ιζημάτων συσχετίζεται με την μέση γεωθερμική βαθμίδα (Σχ.4), λόγω της εξάρτησης της θερμικής αγωγιμότητας από την θερμοκρασία. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι γεωτρήσεις του Πίνακα 2, εκτός από τις γεωτρήσεις Λάβδανη 1 και Γάιος 1 X διέτρησαν μολασσικά νεογενή κλαστικά ιζήματα. Εξ'αυτών οι γεωτρήσεις θερμαϊκός Α1, Λουδίας και Δέλτα Έβρου 1 διέτρησαν επίσης και παλαιότερα τριτογενή ιζήματα. Επιπλέον, στη γεώτρηση Δέλτα Έβρου 1 συναντήθηκαν ηφαιστείτες μεγάλου πάχους. Η γεώτρηση Γάιος 1X διέτρησε ανθρακικά πετρώματα, ενώ η Λάβδανη 1 συνάντησε μέχρι τα 2.380 μ φλύσχη και στη συνέχεια την ανθρακική σειρά της Ιονίου ζώνης.

Εκτός από την ροή θερμότητας υπολογίστηκε επίσης για τις ίδιες γεωτρήσεις η αδιατάρακτη θερμοκρασία συναρτήσεως του βάθους.

Για λόγους οικονομίας χώρου από τα σχετικά διαγράμματα παρουσιάζονται ορισμένα μόνο στο σχ. 5.

Εκτίμηση της θερμικής ροής βάσει μετρήσεων θερμοκρασίας στις γεωτρήσεις πετρελαίων επιχείρησαν επίσης οι Fytikas & Kolios (1979). Δεν αναφέρουν διόρθωση των μετρήσεων και οι τιμές γεωθερμικής βαθμίδας που δίνουν είναι σημαντικά χαμηλότερες από τις αντίστοιχες του Πίνακα 2, μέχρι και 50%. Αντίθετα οι τιμές τους για την θερμική αγωγιμότητα είναι υψηλότερες μέχρι 50% και ελήφθησαν κατ'εκτίμηση βάσει της λιθολογίας, χωρίς να υπολογίζεται η επίδραση της θερμοκρασίας.

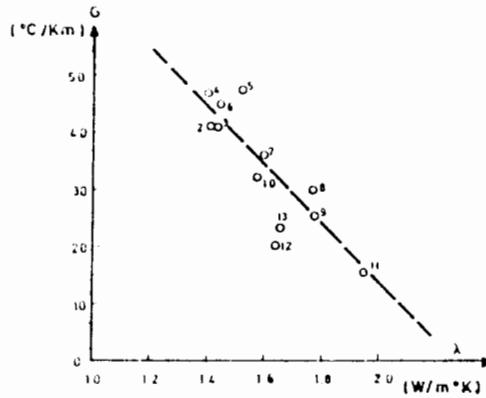
2.3 Διόρθωση ροής θερμότητας για την ιζηματογένεση

Η αιόθυση ιζημάτων έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της ροής θερμότητας προς την επιφάνεια, δεδομένου ότι μέρος της θερμότητας διατίθεται για την θέρμανση των αποτιθεμένων ιζημάτων. Η μείωση αυτή είναι μεταβατική μέχρις ότου αποκατασταθεί θερμική ισορροπία.

Πίνακας 2

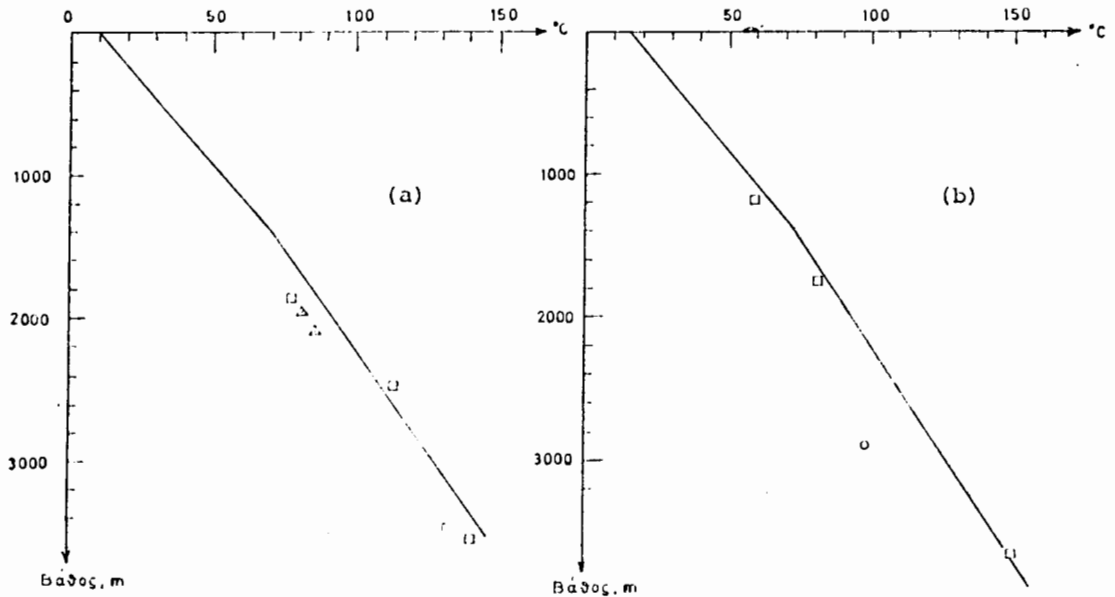
Υπολογισμοί ροής θερμότητας μέσης γεωθερμικής βαθμίδας και
θερμικής αγωγιμότητας λ σε διάφορες γεωτρήσεις

α/α	Γεώτρηση	Ροή θερμότητας			G °C/Km	λ W/m.k
		q _B	mW/m ²	HFU		
1.	Ορεστιάς 3	0,80	61.6	1.47	34.3	1.80
2.	Δέλτα Έβρου 1	0.80	61.6	1.47	32.6	1.89
3.	Νέστος 2	0.75	57.8	1.38	41.1	1.41
4.	Αιμώδης 1	0.78	59.7	1.43	41.0	1.46
5.	Πρίνος 1	0.85	65.5	1.57	46.9	1.40
6.	Νότιος Καβάλα 2	0.83	63.5	1.52	47.3	1.34
7.	Πέραμος 1	0.85	65.5	1.57	45.1	1.45
8.	Στρυμών 1	0.75	57.8	1.38	36.1	1.60
9.	Στρυμών 2	0.70	53.9	1.29	30.0	1.77
10.	Λουδίας 1	0.55	42.4	1.01	25.3	1.68
11.	Θερμαϊκός Δ1	0.65	50.1	1.20	31.9	1.57
12.	Γιαννάδες	0.40	30.8	0.74	15.8	1.95
13.	Πάργα 1	0.43	32.7	0.78	19.9	1.64
14.	Γάιος 1X	0.68	52.0	1.24	16.1	3.22
15.	Λάβδανη 1	0.70	53.9	1.29	20.4	2.64
16.	Κατάκολο 102	0.50	38.5	0.92	23.2	1.66



Σχ. 4 Συσχετισμός μέσης γεωθερμικής βαθμίδας και μέσης θερμικής αγωγιμότητας για τις γεωτρήσεις του Πίνακα 2.

Fig.4 Correlation of average geothermal gradient with average thermal conductivity for the wells at table 2.



Σχ. 5 Θερμοδιαγράμματα γεωτρήσεων Αμμόθης 1 (α) και Στρυμών 1 (β). Εκτίμηση αβιατάκτης θερμοκρασίας από μετρήσεις στον πυθμένα (□) και DST (Δ).

Fig.5. Temperature profile at well Ammothi 1 (a) and Strymon 1 (b). Estimated formation temperature from bottom hole measurements (□) and DST (Δ).

Στις νεογενείς λεκάνες και μάλιστα όπου απετέθησαν μεγάλα πάχη ιζημάτων δεν έχει αποκατασταθεί ακόμη θερμική ισορροπία. Επομένως, στην περίπτωση αυτή, οι τιμές ροής θερμότητας στη βάση των ιζηματογενών λεκανών είναι μεγαλύτερες από τις τιμές του Πίνακα 2. Εξάλλου, η ανάδυση και διάβρωση μιάς περιοχής οδηγεί στο αντίθετο αποτέλεσμα.

Για την εκτίμηση της θερμικής διαταραχής που προκαλείται στο φλοιό της γής από την ταχεία απόθεση ιζημάτων μεγάλου πάχους ο Grossling (1959) μελέτησε θεωρητικά την θερμική αποκατάσταση μετά από ακαριαία ιζηματογένεση. Κατέληξε στο συμπέρασμα ότι κατά τα 20 πρώτα εκατομμύρια χρόνια η θερμοκρασία των ιζημάτων αυξάνει γρήγορα, ενώ κατόπιν η ταχύτης αύξησης είναι πολύ μικρότερη. Ειδικότερα για ακαριαία απόθεση ιζημάτων πάχους 6km υπολογίζεται ότι μετά από 5Ma οι θερμοκρασίες ανέρχονται στα 74% των τελικών τους τιμών και μετά από 20Ma στα 85% περίπου.

Η θερμική διαταραχή λόγω της ιζηματογένεσης ή ανάδυσης μπορεί να υπολογισθεί από την διαφορική εξίσωση αγωγής θερμότητας σε κινούμενο μέσο. Με ωρισμένες προϋποθέσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ακόλουθη αναλυτική λύση της εξίσωσης (Jaeger, 1965):

$$T' = T_0 + g(Z - Vt) + \frac{1}{2}(g + b/V) \left\{ (Z + Vt) \exp(VZ/K) \operatorname{erfc} \left(\frac{Z + Vt}{2\sqrt{kt}} \right) + (Vt - Z) \operatorname{erfc} \left(\frac{Z - Vt}{2\sqrt{kt}} \right) \right\} \quad (6)$$

Από την (6) υπολογίζεται η θερμοκρασία T' σε βάθος Z και χρόνο t από την έναρξη ιζηματογένεσης ή ανάδυσης. Το βάθος Z λαμβάνεται θετικό προς τα κάτω από την επιφάνεια, όπου $Z=0$, και η ταχύτης του μέσου V είναι θετική για ιζηματογένεση και αρνητική για ανάδυση. Για χρόνο $t=0$ η αρχική θερμοκρασία T θεωρείται γραμμική συνάρτηση του βάθους, $T=T_0+gz$, όπου T_0 η θερμοκρασία στην κορυφή των ιζημάτων και g η γεωμετρική βαθμίδα. Σε περίπτωση ανάδυσης με σταθερή ταχύτητα η θερμοκρασία στην επιφάνεια μειώνεται γραμμικά με τον χρόνο και είναι (T_0+bt) , ενώ κατά την ιζηματογένεση η θερμοκρασία στην κορυφή των ιζημάτων, είναι πρακτικά σταθερή ($b=0$). Στους υπολογισμούς μας ελήφθη $T_0=10^\circ\text{C}$

και συντελεστής θερμικής διάχυσης $K=0,01\text{cm}^2/\text{sec}$. Στην εξίσωση (6) οι παράμετροι T_0 , V , K & g λαμβάνονται σταθερές και επομένως δεν λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της διαγένεσης των ιζημάτων.

Για συνεχή ιζηματογένεση πάχους 6km και με έναρξη ιζηματογένεσης πριν 5Ma ή 20Ma υπολογίζεται από την (6) ότι η θερμοκρασία στην βάση των ιζημάτων ανέρχεται σήμερα στα $62,5$ ή 78% αντίστοιχα της τελικής τιμής.

Συνεπώς είναι χαμηλότερη από την θερμοκρασία που υπολογίζεται για ακαριαία ιζηματογένεση.

Βάσει της (6) υπολογίσθηκαν οι τιμές θερμοκρασίας T' σε διάφορα βάθη για τις γεωτρήσεις του Πίνακα 3. Στη συνέχεια υπολογίσθηκε η τιμή της θερμικής ροής στην βάση των ιζημάτων από την εξίσωση (5). Οι τιμές συνολικού πάχους των ιζημάτων και διάρκειας ιζηματογένεσης που χρησιμοποιήθηκαν κατά τους υπολογισμούς φαίνονται στον Πίνακα 3, μαζί με τις διορθωμένες τιμές ροής θερμότητας, ενώ οι θέσεις των γεωτρήσεων φαίνονται στο σχ.6.

3. ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΕΠΙ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Λαμβάνοντας υπόψη τις εκτιμήσεις ροής θερμότητας του Πίνακα 4 καθώς και προηγούμενες μετρήσεις (Erickson et al) συμπεραίνεται ότι η Ελλάδα μπορεί να διαιρεθεί σε τρεις ευδιάκριτες θερμοτεκτονικές επαρχίες. α) Την περιοχή του Αιγαίου με τον γνωστό ενεργό μαγματισμό και την υψηλή ροή θερμότητας. β) Την περιοχή της Σερβομακεδονικής Μάζας και της Μάζας της Ροδόπης με μέση ροή θερμότητας και τέλος γ) Την κεντρική Ελλάδα, συμπεριλαμβανομένης της ζώνης Αξιού, και την δυτική Ελλάδα με ροή θερμότητας κάτω της μέσης τιμής για ηπειρωτικές περιοχές. Τα λίγα διαθέσιμα στοιχεία στην τελευταία περιοχή δεν επιτρέπουν την διαφοροποίηση μεταξύ κεντρικής και δυτικής Ελλάδας.



Σχ.6. Θέσεις γεωτρήσεων του Πίνακα 3 και αντίστοιχες τιμές ροής θερμότητας σε HFU.

Fig.6 Position of wells of Table 3 and corresponding heat flow values in HFU.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3

Υπολογισμοί ροής θερμότητας στη βάση των τριτογενών υζηματογένεση ολικού πάχους z σε διάρκεια Λ εκατομμυρίων ετών.

α/α	Γεώτρηση	Ροή Θερμότητας mW/m ²	HFU	Z (m)	Λ (ΜΑ)
1.	Ορεσιτιάς 3	64.7	1.55	4000	45
2.	Δέλτα Έβρου 1	65.5	1.57	5000	45
3.	Νέστος 2	62.4	1.49	4000	15
4.	Λιμνώδης 1	64.7	1.55	3500	10
5.	Πρίνος 1	70.8	1.69	5000	15
6.	Νότιος Καβάλα 2	69.3	1.66	4000	10
7.	Πέραμος 1	70.8	1.69	3500	10
8.	Στρυμών 1	62.4	1.49	3500	15
9.	Στρυμών 2	60.1	1.44	3000	15
10.	Λουδιάς 1	45.4	1.09	4000	45
11.	Θερμαϊκός Α1	53.9	1.29	5000	45
12.	Γιαννάδες	34.7	0.83	4000	20
13.	Πάργα 1	36.2	0.87	3700	20
14.	Γάιος 1X*	52.0	1.24	-	-
15.	Λάβδανη 1*	53.9	1.29	-	-
16.	Κατάκολο 102	43.9	1.05	3000	5

* Η διόρθωση για ανάδυση είναι αμελητέα.

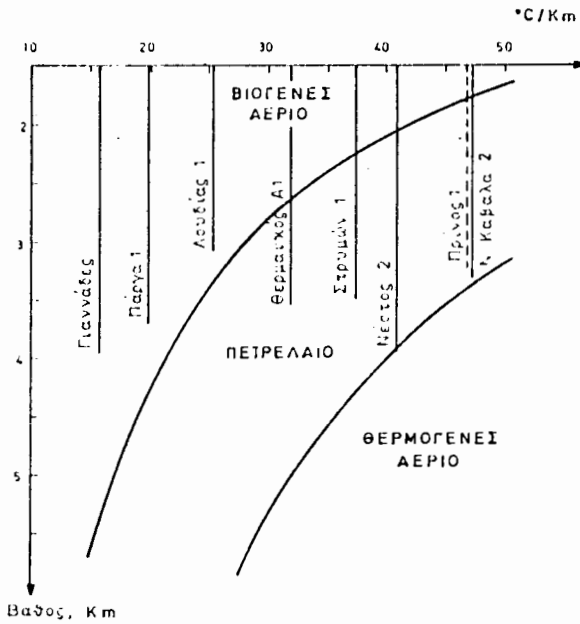
Για την επίδραση της θερμοκρασίας στην πετρελαιογένεση αναφέρεται ο εμπειρικός κανόνας του " παραθύρου του πετρελαίου ". Η έννοια του κανόνα αυτού είναι ότι η οργανική ύλη των μητρικών πετρωμάτων οριμάζει αυξανόμενης της θερμοκρασίας με διαδοχικά προϊόντα πετρέλαιο, ένυγρο αέριο και ξηρό αέριο. Επιπλέον ότι το πετρέλαιο απαντά ανάμεσα σε ορισμένα όρια θερμοκρασία που τοποθετούνται στους 65°C και 175°C περίπου. Επομένως, το βάθος της ζώνης πετρελαίου εξαρτάται από την γεωθερμική βαθμίδα.

Ο παραπάνω κανόνας είναι μία απλουστευμένη προσέγγιση της πετρελαιογένεσης γιατί δεν λαμβάνεται υπόψη ο σοβαρός ρόλος του χρόνου. Σε νεότερα μητρικά πετρώματα η θερμοκρασία έναρξης πετρελαιογένεσης είναι υψηλότερη, έτσι ώστε ο συντομότερος χρόνος θέρμανσης αντισταθμίζεται από υψηλότερες θερμοκρασίες και αντίστροφα η θέρμανση σε χαμηλότερες θερμοκρασίες αντισταθμίζεται με παρατεταμένη διάρκεια θέρμανσης. Πιο συγκεκριμένα, η ταχύτης πετρελαιογένεσης αυξάνεται εκθετικά με την θερμοκρασία. Από τα παραπάνω είναι φανερό ότι για να αρχίσει η πετρελαιογένεση στις τριτογενείς λεκάνες (μικρή διάρκεια θέρμανσης) θα πρέπει να είναι υψηλή η γεωθερμική βαθμίδα. Για την εκτίμηση του βάθους έναρξης πετρελαιογένεσης των τριτογενών λεκανών της Χώρας σε πρώτη προσέγγιση, θεωρήθηκε ότι η πετρελαιογένεση αρχίζει στους 100°C περίπου. Ο Philippi (1965) διαπίστωσε έναρξη πετρελαιογένεσης σε ανωμειοκαινικά ιζήματα στους 115 °C. Από το Σχ. 7 φαίνεται για τις διάφορες λεκάνες το βάθος έναρξης πετρελαιογένεσης και το μέγιστο βάθος διατήρησης πετρελαίου. Πρέπει να σημειωθεί ότι για υψηλές τιμές γεωθερμικής βαθμίδας η πετρελαιογένεση αρχίζει σε μικρότερο βάθος αλλά και το πάχος της ζώνης πετρελαίου είναι μικρότερο.

Ένα ενδιαφέρον θερμικό φαινόμενο είναι οι θετικές ανωμαλίες θερμοκρασίας 10 έως 15°C, που συνδέονται με πολλά κοιτάσματα υδρογονανθράκων και αποδίδονται (Roberts , 1980) στην ταυτόχρονη μεταφορά θερμότητας και υδρογονανθράκων προς τις παγίδες με κοινό φορέα το νερό. Οι παγίδες θεωρούνται σαν δυναμικά συστήματα, όπου το "αδιαπέρατο" πέτρωμα είναι στην πραγματικότητα εκλεκτική ημιπερατή μεμβράνη που επιτρέπει την διαρροή του νερού και εμποδίζει με τριχοειδείς δυνάμεις την ροή των υδρογονανθράκων.

Από τα δεδομένα για το κοίτασμα του Πρίνου δεν διαπιστώνεται ^{με βεβαιότητα} κάποια θερμική ανωμαλία, ούτε όμως μπορεί και να αποκλειστεί γιατί οι εκτιμήσεις αδιατάρακτης θερμοκρασίας δεν είναι αρκετά ακριβείς.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η ροή θερμογένεσης στον Πρίνο (Πίνακας 3) υπολογίζεται υψηλότερη, κατά 10% από εκείνη στη γειτονική γεώτρηση Αμμόδης 1.



Σχ. 7. Διάφορες γεωτρήσεις σε σχέση με το παράθυρο πετρελαίου.

Fig.7. Various wells in relationship with oil window.

REFERENCES

- Erickson, A.J., Simmons, G., Ryan, W.B.F., 1976, Review of Heatflow Data from the Mediterranean and Aegean Seas : Int. Symp. Struct. History Mediterr. Basins, p.263-280 Split (YU).
- Fertl, W.H., and P.A. Wichmann, 1977, How to determine static BHT from well log data: World Oil, v.183, p.105-106.
- Fytikas M.D. and N.P.Kolios, 1979, Preliminary Heat Flow Map of Greece : in Terrestrial Heat Flow in Europe. Cermak V. and L.Rybach (ed.), p.197-205, Springer-Verlag.
- Grossling, B.F., 1959, Temperature variations due to the formation of a geosyncline : Geol.Soc. America Bull., v.70, p.1253-1282.
- Jaeger, J.C., 1965, Application of the theory of heat conduction to geothermal measurements: in Terrestrial Heat Flow, Am.Geoph.Union, p.7-23.
- Houbolt, J.J. and P.R.Wells, 1980, Estimation of heat flow in oil wells based on a relation between heat conductivity and sound velocity : Geol.Mijnbouw, v.59, p. 215-224.
- Lachenbruch, A.H., and M.C. Brewer, 1959, Dissipation of the Temperature Effect of Drilling a Well in Arctic Alaska : Am.Geol.Surv. Bull. 1083-C, p.73-109.
- Leblanc, Y., H.L.Lam, L.J.Pascoe and F.W.Jones, 1982, A comparison of two methods of estimating static formation temperatures from Well logs : Geoph. Prosp., v.30, p.348-357.
- Philippi, G.T., 1965, On the depth, time and mechanism of petroleum generation : Geochim.Cosmochim. AAPG Studies in Geology No.10, p.217-240.
- Roberts, W.H., 1980, Design and function of oil and gas traps: In Problems of petroleum Migration, AAPG Studies in Geology No,10, p 217-240.