

ΘΕΡΜΙΚΗ ΡΟΗ ΚΑΙ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ ΤΗΣ ΛΙΘΟΣΦΑΙΡΑΣ ΣΤΟ ΑΙΓΑΙΟ*

Σ.Κ. ΣΤΕΙΡΟΣ

Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ)

Μεσογείων 70, Αθήνα 11527

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η υψηλή μέση τιμή της θερμικής ροής στο Αιγαίο έχει ερμηνευτεί ως αποτέλεσμα εφελκυσμού της λιθόσφαιρας. Η ερμηνεία αυτή προϋποθέτει ότι πριν αρχίσει η θεωρούμενη εφελκυστική περίοδος (πριν 5-13 εκ. χρ.) η θερμική ροή ήταν πολύ μικρότερη από την αντίστοιχη μέση τιμή σε σταθερό ηπειρωτικό φλοιό, και ότι οι τιμές της θερμικής ροής έχουν ισχυρή συσχέτιση με το πάχος του φλοιού, υποθέσεις που όμως δεν επιβεβαιώνονται από πληθώρα διαθέσιμων στοιχείων.

Τα συμπεράσματα αυτά, καθώς και η γεωγραφική κατανομή των "θερμών" περιοχών της λιθόσφαιρας του Αιγαίου και της Βαλκανικής (που συνάγονται από μετρήσεις γεωτρήσεων, θερμοπηγές και την Πλειο-Τεταρτογενή ηφαιστειότητα) οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η αυξημένη θερμική ροή στο Αιγαίο συσχετίζεται ισχυρά με ωρισμένες ρηξιγενείς ζώνες, και ότι εν μέρει μόνο οφείλεται σε τανυσμό του φλοιού, και εν μέρει σε μή παθητική άνοδο υλικού του μονδύα κατά μήκος των ρηξιγενών ζωνών όπου παρατηρείται και υψηλή θερμική ροή.

* Συμβολή Νο 24 του Έργου ΔΕ-8661704 -ΙΓΜΕ "Μελέτη σύγχρονου Γεωδυναμικού Καθεστώτος του Ελλαδικού χώρου".

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μετρήσεις του Jongsma (1974) (σχ. 1) έδειξαν ότι η μέση τιμή της θερμικής ροής στο Αιγαίο, 2.1 HFU, είναι σημαντικά ανώτερη από την μέση τιμή της ηπειρωτικής λιθόσφαιρας (1.5 HFU) και περίπου διπλάσια από την αντίστοιχη τιμή νότια της Κρήτης. Η υψηλή αυτή θερμική ροή συσχετίστηκε από τον McKenzie (1978α,β) με την παρατηρούμενη μείωση του πάχους του φλοιού και τη μεγάλη εξάπλωση κανονικών ρηγμάτων και αποδόθηκε σε έντονο (της τάξης του 100%) λιθοσφαιρικό μετα-μεσοκαινικό εφελκυσμό.

Η θεωρία αυτή παρότι έχει γίνει ευρύτατα αποδεκτή δεν μπορεί να ερμηνεύσει τα υπάρχοντα στοιχεία ούτε να αποτελέσει οδηγό για την έρευνα γεωθερμικής ενέργειας, όπως θα αναλυθεί στην συνέχεια.

ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Η βασική υπόθεση του McKenzie (1978 α,β) είναι ότι ένας ομοιόμορφος λιθοσφαιρικός εφελκυσμός (δηλαδή εφελκυσμός με μηδενική κατακόρυφη βαθμίδα για όλο το πάχος της λιθόσφαιρας) μεγέθους β προκαλεί λέπτυνση της λιθόσφαιρας και του φλοιού κατά ποσό β και αντίστοιχη αύξηση της έκτασης της εφελκυσόμενης περιοχής λόγω διατήρησης της μάζας, και βύθιση. Η μείωση όμως του πάχους του "μονωτικού" στρώματος της λιθόσφαιρας προκαλεί συγχρόνως και "παθητική" ανύψωση του ορίου λιθόσφαιρας-σθενόσφαιρας και αύξηση της θερμικής ροής κατά συντελεστή β (σχ. 2).

Η υπόθεση αυτή, βασισμένη στα στοιχεία του Jongsma (1974) από το Αιγαίο, αποτέλεσε τη βάση για ένα οικουμενικό μοντέλο εξέλιξης ιζηματογενών λεκανών, τόσο για το στάδιο της τεκτονικής βύθισης, όσο και στο στάδιο της επακόλουθης μη τεκτονικής βύθισης, πχ την μέχρι το Ιουρασικό και μετέπειτα εξέλιξη της Βόρειας Θάλασσας (McKenzie 1978β).

ΠΡΟΒΛΕΨΕΙΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Εάν η παρατηρούμενη υψηλή θερμική ροή στο Αιγαίο είναι αποκλειστικά και μόνο αποτέλεσμα μετά-Μειοκαινικού εφελκυσμού της λιθόσφαιρας, θα έπρεπε:

Πρώτο, οι παρατηρούμενες τιμές θερμороής να είναι ανάλογες προς το αντίστοιχο πάχος του φλοιού, ή τουλάχιστο να υπήρχε ισχυρή συσχέτιση μεταξύ βάθους φλοιού και θερμικής ροής.

Δεύτερο, πριν τον εφελκυσμό η αντίστοιχη μέση τιμή της θερμικής ροής να ήταν περίπου το μισό της σημερινής, αφού ο συντελεστής εφελκυσμού από τον οποίο και μόνο θεωρείται ότι εξαρτάται η θερμική ροή υπολογίζεται σαν $\beta=2$.

Τρίτο, οι περιοχές υψηλής θερμικής ροής να περιορίζονται και να συμπίπτουν με τις περιοχές μικρού πάχους του φλοιού.

Το σχήμα 3 παρουσιάζει γράφημα της θερμικής ροής σε σχέση με το αντίστοιχο βάθος του φλοιού. Είναι φανερό ότι κανένας συσχετισμός των δύο μεταβλητών δεν υπάρχει, ώστε να δικαιολογείται η υπόθεση ότι η θερμороή είναι αποκλειστικά και μόνο προϊόν εφελκυσμού. Αυτό φαίνεται χαρακτηριστικά στο Κρητικό Πέλαγος, όπου ενώ το βάθος του φλοιού είναι ελάχιστο, περίπου 20 km, σε κατάφωρη αντίθεση με το μοντέλο του McKenzie παρατηρείται ιδιαίτερα χαμηλή θερμική ροή, αφού και οι τρεις μετρήσεις που υπάρχουν δίνουν τιμές μεταξύ 1.0 και 1.6 HFU (σχ. 1).

Και η δεύτερη πρόβλεψη όμως δεν επιβεβαιώνεται από τα υπάρχοντα στοιχεία: Η υπόθεση ότι η σημερινή μέση τιμή της θερμороής στο Αιγαίο (2.1 HFU) είναι διπλάσια της τιμής πριν τον βεωρούμενο εφελκυσμό, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι στο τέλος του Μειόκαινου η αντίστοιχη τιμή θα ήταν περίπου 1.05 HFU, πολύ κατώτερη της μέσης τιμής της ηπειρωτικής λιθόσφαιρας (1.5 HFU). Το μοντέλο αυτό προβλέπει δηλαδή ότι στην περίοδο αυτή η λιθόσφαιρα στο Αιγαίο ήταν ιδιαίτερα ψυχρή. Το συμπέρασμα βέβαια αυτό συγκρούεται με πολυάριθμα στοιχεία που δείχνουν ότι στο Μειόκαινο ή και το

κατώτερο Πλειόκαινο συμπύεση (επωθήσεις) και άνοδος γρανοδιοριτών είχαν οδηγήσει σε σημαντική αύξηση της θερμορροής κυρίως λόγω αύξησης του πάχους του ραδιενεργού στρώματος του φλοιού (crustal thickening) και λόγω άνοδου θερμού υλικού του μανδύα (πχ. Lister et al. 1984, Chiotis 1984).

Τέλος, πρόσφατοι χάρτες θερμοικής ροής (Fyticas and Koliou 1979) και άλλα ποιοτικά στοιχεία (η Πλειο- Τεταρτογενής ηφαιστειότητα και οι θερμές πηγές (βλέπε Fyticas et al 1984, Borjesson and Rondogianni 1983) δεν αφήνουν καμιά αμφιβολία ότι οι περιοχές υψηλής θερμοικής ροής δεν συμπίπτουν με τις περιοχές μικρού πάχους του φλοιού (σύγκρισε με σχ. 1).

ΘΕΡΜΙΚΗ ΡΟΗ ΤΟΥ ΜΑΝΔΥΑ ΚΑΙ ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΡΟΗ

Η θερμοική ροή που προέρχεται από το μανδύα είναι γενικά διαφορετική από αυτή που προκύπτει από επιφανειακές μετρήσεις. Αυτό συμβαίνει γιατί με τις επιφανειακές μετρήσεις εκτιμάται η θερμοική ροή που έχει διαμορφωθεί από ωρισμένους παράγοντες, οι κυριώτεροι από τους οποίους είναι το πάχος των Καινοζωικών βασικά ιζημάτων και η ραδιενέργεια του φλοιού. Τα μεν ιζήματα λειτουργούν ως "μονωτικό" κάλυμμα που μειώνει την ποσότητα της θερμοικής ροής που προέρχεται από το μανδύα και τείνει να φθάσει στην επιφάνεια, ενώ αντίθετα η ραδιενέργεια του φλοιού προστίθεται στη θερμοική ροή του μανδύα και τείνει να αυξάνει την τιμή της παρατηρούμενης θερμοικής ροής.

Συνεπώς, προκειμένου να εξαχθούν αξιόπιστα συμπεράσματα για την τεκτονοφυσική σημασία της θερμοικής ροής, θα έπρεπε οι διαθέσιμες επιφανειακές μετρήσεις να υποστούν κατάλληλες διορθώσεις και αναγωγές. Για την περίπτωση του Αιγαίου, οι αντίστοιχες διορθώσεις και αναγωγές δεν είναι σημαντικές, ούτε επιρρεάζουν τα συμπεράσματα για το χαρακτήρα και ποσό της θερμορροής, γιατί

Πρώτο, η ραδιενέργεια προέρχεται βασικά από τα ανώτερα στρώματα του φλοιού, τα οποία σύμφωνα με το πρότυπο του ομοιόμορφου εφελκυσμού

έφελκύνονται κατά το ίδιο ποσοστό με το σύνολο του φλοιού και της λιθόσφαιρας, και επομένως ο εφελκυσμός μειώνει αντίστοιχα και την ποσότητα της ραδιενεργού θερμικής ροής.

Δεύτερο, ιζηματικό κάλυμμα λεκανών με πάχος ικανό να μειώσει σημαντικά τη θερμική ροή του μανδύα (δηλαδή κάλυμμα με πάχος άνω των 3-4χλμ) υπάρχει μόνο στην τάφρο του Βορείου Αιγαίου (LePichon et al 1984). Στην περιοχή όμως αυτή παρατηρούνται ανώμαλα υψηλές τιμές επιφανειακής θερμικής ροής (Jongsma 1974, LePichon et al 1984) και οποιαδήποτε διόρθωση τους λόγω πάχους ιζημάτων θα οδηγούσε σε ακόμη υψηλότερες τιμές θερμικής ροής του μανδύα και σε περαιτέρω τονισμό της έλλειψης συσχέτισης μεταξύ της τελευταίας και του πάχους του φλοιού (σχ. 3).

Συνεπώς οι προβλέψεις που προκύπτουν λογικά από το μοντέλλο του McKenzie και δεν επιβεβαιώνονται από τα υπάρχοντα στοιχεία ισχύουν όχι μόνο για τη θερμική ροή του μανδύα, αλλά και για τη μετρούμενη επιφανειακή θερμική ροή. Τα ανωτέρω οδηγούν αναγκαστικό στο συμπέρασμα ότι η παρατηρούμενη υψηλή θερμική ροή στο Αιγαίο δεν μπορεί να οφείλεται κύρια ή αποκλειστικά σε εφελκυσμό της λιθόσφαιρας που άρχισε πριν 5 η το πολύ 13 εκ. χρόνια, όπως έχει προταθεί (McKenzie 1978α, β, LePichon & Angelier 1979).

ΜΙΑ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΑΠΟΨΗ

Μιά εναλλακτική ερμηνεία της πρόλευσης της θερμικής ροής στο Αιγαίο έχει προτείνει ο Stiros (in press), ο οποίος διατύπωσε την άποψη ότι η παρατηρούμενη μεγάλη συσχέτιση μεταξύ των περισσότερων περιοχών υψηλής θερμικής ροής και ορισμένων ρηξιγενών ζωνών διευθύνσεων περίπου ΒΑ και ΑΒΑ (π.χ. τάφρο Β. Αιγαίου, τάφρο Στρυμώνα, λεκάνες Θεσσαλίας, σχ. 4 και Csernak 1979) πιθανώτατα υποδηλώνει και γενετική σχέση.

Ενώ τα υπάρχοντα στοιχεία δεν επιτρέπουν πλήρη διάγνωση του χαρακτήρα των τεκτονικών αυτών ασυνεχειών, είναι δυνατόν να

σημειωθούν μερικά βασικά χαρακτηριστικά τους:

1) Η μεταφορά θερμότητας κατά μήκος των ζωνών αυτών συνδέεται και με μαγματική δράση, ηφαιστειότητα (πχ. περιοχή Σερρών, Παπαδόπουλος 1982) και πλουτωνισμό (τάφος Βορείου Αιγαίου, Chiotis 1984 και Κυκλάδες, Makris 1977).

2) Η τεκτονομαγματική και θερμική δράση κατά μήκος των ζωνών αυτών άρχισε τουλάχιστο το Ολιγόκαινο ή το Μειόκαινο (Lister et al 1984, Maltezos and Brooks 1989), και συνεπώς εκτός από έλλειψη γεωγραφικής συσχέτισης των περιοχών υψηλής θερμικής ροής και περιοχών μικρού πάχους του φλοιού (βλέπε πιο πάνω), υπάρχει και έλλειψη χρονικής συσχέτισης ανάμεσα στη θερμική ροή και την περίοδο του νεώτερου ρηματογόνου τεκτονισμού (5-13 εκ. χρόνια, McKenzie 1978a, Le Pichon & Angelier 1979).

3) Τουλάχιστο μερικές από τις ζώνες αυτές συνδέονται με διατμητικές κινήσεις (πχ. τάφος Βορείου Αιγαίου).

Φαίνεται επομένως ότι η θερμική ροή σε μεγάλο βαθμό συνδέεται με διαπυρισμό του μανδύα, που δεν είναι "παθητικό" αποτέλεσμα πρόσφατου τανυσμού της λιθόσφαιρας όπως είχε προτείνει ο McKenzie, ούτε περιορίζεται στις Κυκλάδες, όπως είχε προτείνει παλαιότερα ο Makris (1977), αλλά εκλεκτικά συνδέεται και ελέγχεται από κινηματικές συνθήκες για τις οποίες η γνώση μας είναι πολύ περιορισμένη.

ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Η αποδοχή ενός προτύπου θερμικής ροής είναι φυσικό να επιρρεάζει και τη στρατηγική αναζήτησης γεωθερμικών πεδίων, τόσο από άποψη γεωγραφίας των περιοχών έρευνας, όσο και από άποψη ειδικότερης μεθοδολογίας. Για παράδειγμα, η αποδοχή της υπόθεσης του McKenzie ουσιαστικά θα περιόριζε την έρευνα στις περιοχές με λεπτό φλοιό και θα απέκλειε περιοχές όπως την τάφο του Στρυμώνα όπου είναι γνωστό ότι έχει εντοπιστεί και συνεχίζεται η έρευνα από το ΙΓΜΕ μεγάλου

γεωθερμικού πεδίου, ή ακόμη και στα Ελληνο-Αλβανικά σύνορα όπου υπάρχουν σημαντικές ενδείξεις γεωθερμικού πεδίου που συνδέεται με πλουτωνισμό σε βάθος 2-5 χλμ (Thanassoulas et al in press) σε μία περιοχή που βρίσκεται αναμφίβολα σε συμπιεστικό καθεστώς.

Κοθίσταται επομένως προφανές ότι μία περαιτέρω επεξεργασία ενολλακτικών υποθέσεων γένεσης της υψηλής θερμικής ροής στον Ελλαδικό χώρο μπορεί να συμβάλει στην πρόβλεψη νέων γεωθερμικών πεδίων, ή και στην οικονομικότερη έρευνα των ήδη εντοπισμένων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Bornovas, J. and Rondogianni, T., 1983. Geological map of Greece, 1:500,000 scale. Institute of Geology and Mineral Exploration, Athens.
- Cermak, V., 1979. Heat flow map of Europe. In: V. Cermak and L. Rybach (Editors), Terrestrial heat flow in Europe. Springer Verlag, pp. 3-40.
- Chiotis, S., 1984. A Middle Miocene thermal event in northern Greece confirmed by coalification measurements. In: J. Dixon and A. Robertson (Editors), The Geological evolution of the Eastern Mediterranean, Sp. Publ. Geol. Soc. London no 17:815-818.
- Fyticas, M. and Kolios, N., 1979. Preliminary heat flow map of Greece. In: V. Cermak and L. Rybach (Editors), Terrestrial heat flow in Europe. Springer Verlag, pp. 197-205.
- Fyticas, M., Innocenti, F., Manetti, P., Mazzuoli, R., Peccerillo, A. and Villari, L., 1984. Tertiary to Quaternary evolution of volcanism in the Aegean region. In: J. Dixon and A. Robertson (Editors), The Geological evolution of the Eastern Mediterranean, Sp. Publ. Geol. Soc. London no 17:687-699.
- Jongsma, D., 1974. Heat flow in the Aegean Sea. Geophys. J. R. astr. Soc. 37: 337-346

- LePichon, X. and Angelier, J., 1979. The Hellenic arc and trench system: a key to the neotectonic evolution of the Eastern Mediterranean. *Tectonophysics*, 60: 1-42.
- LePichon, X., Lyberis, N. and Alvarez, F., 1984. Subsidence history of the North Aegean Trough. In: J. Dixon and A. Robertson (Editors), *The Geological evolution of the Eastern Mediterranean*, Sp. Publ. Geol. Soc. London no 17:727-741.
- Lister, G., Banga, G. and Feenstra, A., 1984. Metamorphic core complexes of Cordilleran type in the Cyclades, Aegean Sea, Greece. *Geology* 12, 221-225.
- Makris, J., 1977. Geophysical investigations of the Hellenides. *Hamburger Geophysikalische Einzelschriften*, A, 34, 124 pp.
- Maltezos, F. & Brooks, M., 1989. A geophysical investigation of post-Alpine granites and Tertiary sedimentary basins in Northern Greece. *J. Geol. Soc. Lond.* 146, 53-59.
- McKenzie, D., 1978a. Active tectonics of the Alpine- Himalayan belt: the Aegean Sea and surrounding regions. *Geophys. J. royal astron. Soc.*, 55: 217-254.
- McKenzie, D., 1978b. Some remarks on the development of sedimentary basins. *Earth and Planetary Science Letters*, 40: 25-32.
- Παπαδόπουλος, Γ., 1982. Συμβολή στη μελέτη της ενεργού τεκτονικής βάθους του ευρύτερου χώρου του Αιγαίου. Διδ. Διατριβή, ΑΠΘ.
- Stiros, S. Heat flow and thermal structure of the Aegean Sea and the Southern Balkans. In: V. Cermak (ed.), *Terrestrial Heat flow and the lithosphere structure*, Springer Verlag, Heidelberg, Berlin, New York (in press).
- Thanassoulas, C., Gioni, G. & Dimitriadis, K., An integrated geophysical investigation of Kavassila low-enthalpy geothermal field (NW Greece). *First Break*, in press.

HEAT FLOW AND LITHOSPHERE STRETCHING IN THE AEGEAN

S.C. Stiros

Institute of Geology and Mineral Exploration (IGME)
70, Messoghion St., Athens 11527

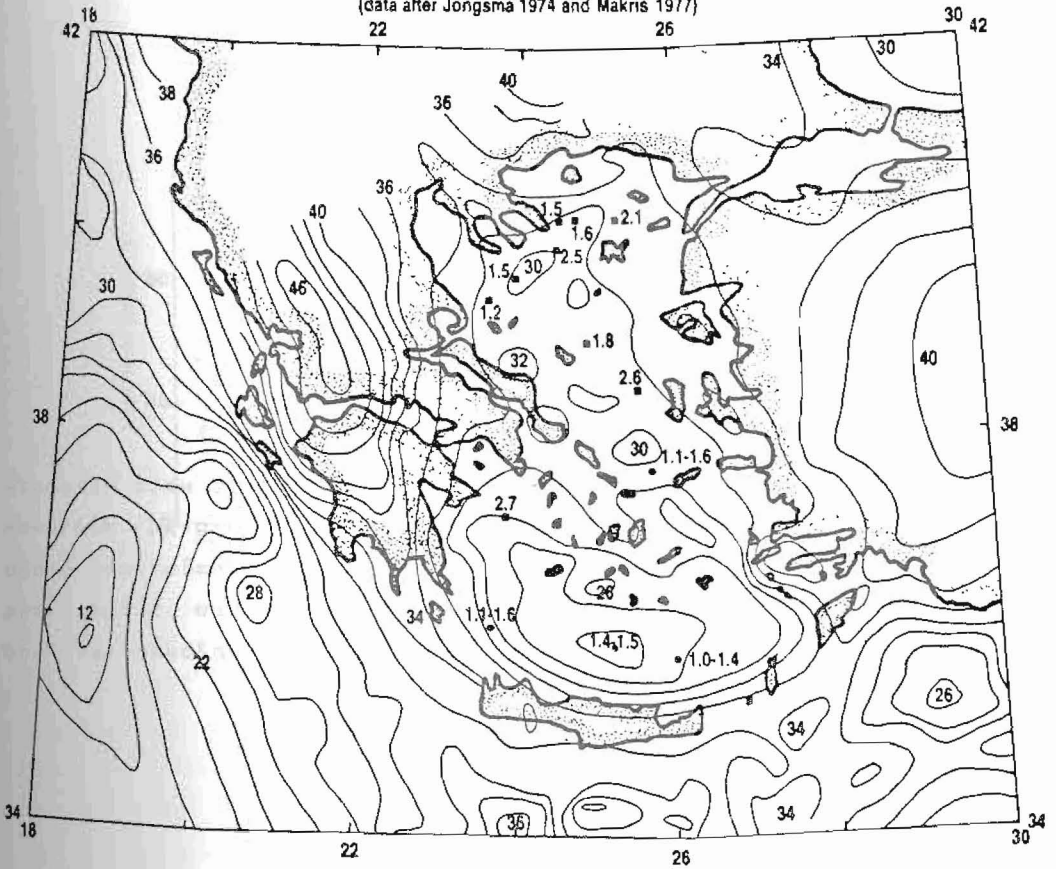
ABSTRACT

The elevated heat flow in the Aegean has been explained as a result of lithosphere stretching. This interpretation predicts that just before the postulated extensional period (5 to 13 m.y.) the mean heat flow in the Aegean was much lower than the continental average, and that heat flow and depth of Moho are strongly correlated; these predictions cannot be reconciled with the existing data.

This result, as well as the geographical distribution of areas of "warm" lithosphere in the Aegean and the Balkans (deduced from measurements in boreholes and from the distribution of hot springs and of Plio-Pleistocene volcanos) lead to the conclusion that the elevated heat flow in this area is strongly correlated with certain fracture zones, and that it results partly from lithosphere stretching, and partly from non-passive uplift of mantle material along these fracture zones.

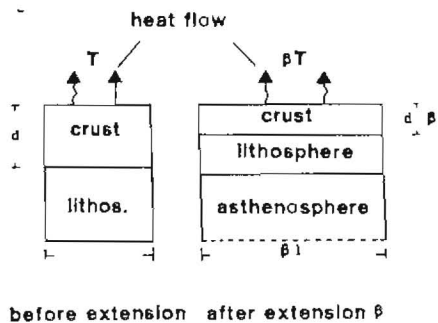
HEAT FLOW MEASUREMENTS AND DEPTH OF MOHO

(data after Jongsma 1974 and Makris 1977)



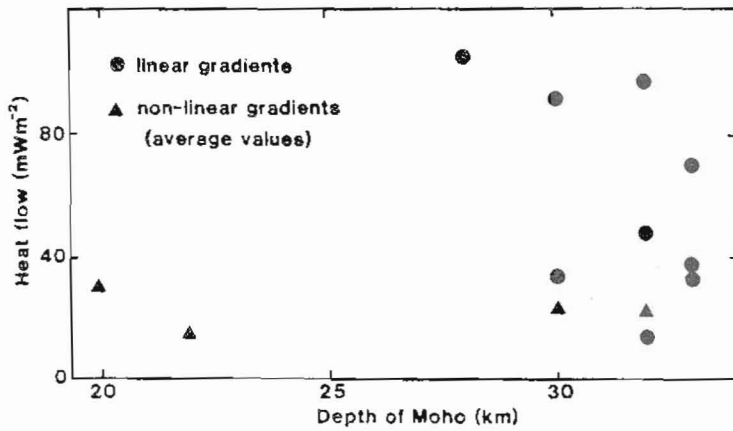
ΣΧ. 1

Μετρήσεις θερμικής ροής του Jongsma (1974) και πάχος του φλοιού κατά Makris (1977) στο Αιγαίο.



Σχ. 2

Το πρότυπο του ομοιόμορφου εφελκυσμού της λιθόσφαιρας κατά McKenzie (1978). Εφελκυσμός κατα συντελεστή β προκαλεί αντίστοιχη πλάτυνη και λείπτυνση της λιθόσφαιρας (και του φλοιού) και "παθητική" άνοδο του ορίου λιθόσφαιρας-ασθενόσφαιρας, με αποτέλεσμα αύξηση της θερμικής ροής T σε βT . Η αναδιάταξη αυτή ακολουθείται από ισοστατική βύθιση.



Σχ. 3

Γράφημα των παρατηρουμένων τιμών θερμικής ροής του Jongsma (1974) ως προς το πάχος του φλοιού κατά Makris (1977). Η έλλειψη συσχέτισης είναι εμφανής.



Σχ. 4

Περιοχές υψηλής θερμικής ροής κατά Fyticas and Kolios (1979). Μερικές από αυτές συμπίπτουν με μεγάλες ρηξιγενείς ζώνες στο Αιγαίο και την ηπειρωτική χώρα (πχ. την τάφρο του Β. Αιγαίου, της Θεσσαλίας, του Στρυμώνα). Από τη σύγκριση με το σχ. 1 καθίσταται εμφανές ότι δεν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ περιοχών υψηλής θερμικής ροής και περιοχών που κατά τον McKenzie (1978α) έχουν υποστεί μετα-Μειοκαινικό εφελκυσμό.