

الفصل العاشر

طرق الحرارة الأرضية Geothermal Methods

1.10 مقدمة Introduction:

دراسة السلوك الحرارى للأرض من أهم فروع الجيوفيزياء.

تأتى الحرارة التى يشعر بها عند سطح الأرض أساسا من الشمس. مع ذلك، فإن أغلب الحرارة الشمسية التى اكتسبها سطح الأرض تعود إلى الفراغ، ويستطيع جزء صغير جدا فقط اختراق عمق لعدة مئات الأمتار القليلة أسفل سطح الأرض. لذلك يكون تأثيره على داخل الأرض صغير جدا مقارنة بالحرارة التى تحدث داخل الأرض.

حاضرا، يعتقد أن المصدر الرئيسى للطاقة الحرارية فى داخل الأرض هى التحلل الإشعاعى لطول حياة النظائر. ربما تكون مصادر حرارية أخرى مثل الحرارة الأصلية وهى الحرارة المنطلقة بواسطة التجمع (بسبب عمل الجاذبية فى تجميع ودمج الأجسام من مكونات صغيرة) أساس أولى فى تاريخ الحرارة الأرضية.

فى بعض الأحيان، تتحول الحرارة تدريجيا من داخل الأرض للسطح، وأغلب الأمثلة لذلك هى البراكين والعيون الحارة. الحرارة المتسربة خلال الأرض، مباشرة أو غير مباشرة، تطلق عمليات جيولوجية مختلفة، والتى لها علاقة بالحركات التكتونية ونشاط الصخور النارية والمتحولة. يكون توزيع الحرارة أسفل عمق 100 كم غير مؤكد وتوزيع مصادرها وميكانيكية تحولها غير معروفة. برغم ذلك، يكون الموضوع كبير الأهمية لأنه اتجاه مهم للنظريات والفروض المتعلقة بأصل ونمو الأرض.

فى السنوات العشر الحديثة، أمدت الدراسات الواسعة للإنسياب الحرارى من الأرض بمعلومات عن خواص إقليمية واسعة لحالات حرارية أسفل الظواهر الجيولوجية الكبيرة للقارات والمحيطات. هذه المعلومات لها أهمية خاصة لنظرية تيارات الحمل فى الستار والتى بها فروض إنحراف القارات وتباعد أرضية البحار، وتطابق فواصل حركة الألواح. على المستوى المحلى، تستخدم القياسات الحرارية (خاصة شذوذ درجات الحرارة) للاستدلال عن مواقع التركيبات مثل قباب الأملاح الضحلة، الطيات المحدبة، الفوالق، الشقوق... إلخ. بالإضافة، تستخدم قياسات درجات الحرارة فى الآبار لمقارنة المستويات الاستراتيجرافية (الطبقيّة).

2.10 الخواص الحرارية للصخور Thermal Properties of Rocks:

يلاحظ في الآبار والمناجم، وغالبا في أى مكان على الأرض زيادة الحرارة مع العمق. لذلك تنساب الحرارة في الأرض من أسفل لأعلى. تعتمد كمية الإنسياب الحرارى iq على معامل التوصيل الحرارى لمادة الصخر والتدرج الحرارى الشامل له. وتبين المعادلة الآتية هذه العلاقة

$$q = -K \text{ grad. } T \quad (10-1)$$

حيث T التدرج الحرارى وهى معدل زيادة الحرارة مع العمق، وتقاس q بوحدة الطاقة لكل وحدة مساحة لكل وحدة زمن (W/m^2 بوحدة SI) وفى نظام c.g.s، تكون وحدة الشغل (ميكروكالورى/سم²/ث).

قياس المعامل الحرارى للمادة هو سهولة الإنسياب الحرارى خلالها. تدل بعض الملاحظات البسيطة على أن المعامل الحرارى للأرض منخفض، مثال ذلك يكون التغير اليومي لدرجة الحرارة السطحية صعب الشعور به لعمق 1 م وتأثيراتها التى تخترق هذا العمق عند وصول نصف النهار أو أكثر تأخرا. يمكن إكتشاف تأثير درجات الحرارة لأمتار قليلة نوعا ما أسفل السطح فقط كتغيرات موسمية، وتصل لشهور متأخرة. مازال وجود دلالة عند عمق 1 كم تقريبا لبقاء درجات حرارة منخفضة من العصر الجليدى المتأخر (منذ حوالى 10,000 سنة)، حيث وضعت هذه التقديرات على عمق إختراق لموجه حرارية تمثل تغير (يومي، موسمي أو تغير فترة طويلة في درجة الحرارة السطحية) للأرض وأمكن الحصول عليها من حل معادلة إتجاه واحد لمعادلة معامل حرارى.

يعتمد تأثير تباطؤ درجة الحرارة مع الزمن على الإنتشارية الحرارية d وتتحدد كالاتى

$$d = K/\rho C_p \quad (10-2)$$

حيث K معامل التوصيل الحرارى، ρ الكثافة، C_p الحرارة النوعية عند ضغط ثابت. وحدة d بنظام SI هى متر²/ث.

تكون الإنتشارية الحرارية (وكذلك معامل التوصيل الحرارى) منخفض جدا لأغلب الصخور، حيث يكون مدى d ($10^{-6} \times 2-0.5$ متر²/ث) أو على المقياس الجيولوجى (15-60 كيلومتر²/مليون سنة). هذا يعنى أن حدوث نشأة الحرارة على عمق لبعض عشرات من الكيلومترات سوف لاتدرك (تحس) بالقرب من السطح لمكان ما بين 10 & 100 مليون سنة، إذا انتقلت الحرارة بواسطة التوصيل مفردا.

يعطى جدول (10-1) قيم نموذجية لمعاملات التوصيل لصخور ومعادن مختلفة. تتحكم المعادن الموجودة في الصخور بامتداد كبير في معامل التوصيل، ولكن يكون من المهم أيضا تأثيرات المسامية وزيادة درجة الحرارة والضغط أحسن تقدير لمعامل التوصيل هو ($2.5 W/m^2c$) أسفل عمق حوالى 50 كم، أسفل هذا العمق يكون معامل التوصيل غير مؤكد.

جدول (1-10) معاملات توصيل حرارية عند درجة حرارة وضغط عاديين (كلارك

Clark 1966، پارازنس 1971 (Parasnis).

معامل التوصيل بوحدات ($^{\circ}\text{W}/\text{mc}$) SI	المادة	معامل التوصيل بوحدات ($^{\circ}\text{W}/\text{mc}$) SI	المادة
3.2-2.5	حجر رملي	(2.7) 3.2-1.9	جرانيت
(1.4) 1.8-1.3	طفلة	(3.0) 3.5-2.6	جرانودايوريت
(2.5) 3.0-2.0	صخر جيري	(3.1) 3.7-2.5	نيس (أ) موازي للتورق
(5.7) 7.2-5.3	صخر ملحي		
10.5	خام هيماتيت بلورة هيماتيت	(2.7) 3.2-1.9	(ب) عمودي على التورق
12.1	(أ) موازي محور ج	2.2-1.5	بازالت
14.8	(ب) عمودي على محور ج	(2.2) 2.3-2.1	ديابيرز
	مجنيوتيت		
5.3	(متعدد البلور)	(2.15) 2.3-2.0	جابرو
0.59 عند 25 $^{\circ}$ مئوية	ماء	(2.3) 3.8-2.0	سربنتين
2.2 عند صفر درجة مئوية	ثلج	5.2-3.7	ديونيت

* لتحويل وحدات SI إلى وحدات c.g.s (10^{-3} كالوري/سم.ثانية (درجة حرارة) يضرب المقدار في 2.39.**3.10 إنسياب الحرارة الأرضية Terrestrial Heat Flow:**

تطلق هذه التسمية على الحرارة التي تنساب من داخل الأرض للسطح وتتسرب للفراغ، وتعتبر هذه كمية الطاقة الحرارية التي تفقدها الأرض، بمعنى آخر، ميزانية الحرارة المستهلكة. يكون معدل فقد الحرارة من سطح الأرض حوالي 4×10^{13} وات أو 1.25×10^{21} جول/سنة. في مسطحات الطاقة يكون هذا الإنسياب المخرج للحرارة أكثر تأثيراً للعمليات الجيوفيزيائية، حيث تكون أنظمة الطاقة المحتوية المفقودة في الزلازل والبراكين قيمة منخفضة.

1.3.10 قياسات إنسياب الحرارة Heat Flow Measurements:

لتحديد إنسياب الحرارة يتطلب قياسين منفصلين، التدرج الحرارة $\frac{\partial T}{\partial Z}$ ومعامل التوصيل الحراري K

للصخور التي تقاس فيها درجات الحرارة. يحسب إنسياب الحرارة عبر وحدة مساحة بواسطة الصيغة (K-2)

$$(q-K \frac{\partial T}{\partial Z})$$

يوضح الشكل الخطى (1-10) جهاز حس (مسبار probe) لقياس إنسياب الحرارة فى رسوبيات لينة على أرضية المحيط. يلاحظ التدرج الحرارى فى الرسوبيات من قياسات درجة الحرارة على طول المسبار. بعد ذلك، يطبق التسخين الكهربى بأسفل المسبار عند معدل معروف، وبعد الوصول لحالة الثبات، يعاد قياس التدرج الحرارى. يحسب معامل التوصيل الحرارى K من الوضع الثانى للإرصادات ويكون الزمن المأخوذ لرصد إنسياب حرارى واحد 15 دقيقة.



شكل (1-10): جهاز حس يستخدم لقياس إنسياب الحرارة فى رواسب لينة لقاع المحيط

يستخدم على الأرض مسبار ثرمستور* (Thermistor) فى المناجم والآبار لقياس درجة الحرارة. ويمكن قراءة درجات الحرارة خلال 0.01 درجة الحرارة. ويمكن قراءة درجات الحرارة خلال 0.01 درجة مئوية بواسطة جهاز قنطرة مقاومة، ويمكن إعادة القراءات خلال أبعاد قصيرة للعمق. وحقيقة، فإن جميع الآبار تكون مملوءة بسائل، إذا مثلت حرارة السائل بدرجات غير مشوشرة لصخور عند نفس العمق، فإنه يجب أن يكون السائل خالى من التوصيل وتنتج الشوشرة الحرارية الأخرى بواسطة الحفر. يحتاج ترك البئر لأزمنة طالما تجرى عملية الحفر ليصل لتوازن حرارى. وتقاس معاملات التوصيل الحرارية لعينات البئر فى المعمل.

بدأت قياسات إنسياب الحرارة على الأرض فى عام 1930، وبعد عام 1980 بلغ عدد القياسات 2800، ووزعت هذه القياسات العشوائية برغم بداية القياسات عند أرضية المحيط فى عام 1950 بعمل راند لبيولارد ومساعدوه E.C. Bullard and his associates، فإن البيانات التى حصل عليها 1980 خارج العدد الذى أخذ على الأرض بأكثر من 6.0%. هذا يرجع لحقيقة أن القياسات أكثر سهولة للأخذ عند أرضية المحيط منها على الأرض، حيث تكون درجة حرارة الماء عادة مستقرة عند أرضية المحيط خلال طول العام، ولذلك لا يوجد إحتياج لحفر بئر عميق. برغم التوزيع الكبير المتساوى لبيانات المحيط الملائمة فإنه يرى فجوات هامة فى مناطق كبيرة الإتساع.

2.3.10 بيانات إنسياب الحرارة العالمية Global Heat Flow Data:

قدم لى Lee 1970 تحاليل لحوالى 3130 قياسات إنسياب حرارى متاحة لهذا الوقت، حيث وجد أن معدل الإنسياب الحرارى العالمى من مساحة متساوية ($5 \times 5^\circ$) هو 61 ولا يوجد اختلاف لهم بين معدل الإنسياب الحرارى القارى والمحيطى.

* معامل ذو معامل مقاومة حرارى كبير سالب (تقل مقاومته بارتفاع الحرارة).

أشارت تحاليل بيانات الإنسياب الحرارى العالمى عام 1980 والمقارنة عبر 7200 قياس بواسطة دافس Davies 1980 وسكلاتر وآخرين Sclater et al 1980 أن معدل الإنسياب الحرارى المحيطى أكبر بحوالى 70-80% من الإنسياب الحرارى الأرضى وهذا اختلاف هام عن لى Lee 1970. لم يقدر فى الماضى بالضبط الإنسياب الحرارى المحيطى لملاحظة أن الفقد الحرارى بسبب النشاط الهيدروثرمل (حرمانى-الحرارة المائية) عند النتوءات نسبيا صغير. الآن، يلاحظ أن حوالى ثلث الإنسياب الحرارى المحيطى يعطى بواسطة دوران هيدروثرمل عند نتوءات المحيطات. يعطى جدول (10-2) قيم لإنسياب حرارى عالمى وإنخفاضه المفاجئ لمشاركات قارية وبحرية.

3.3.10 العلاقات بين العمر-الإنسياب الحرارى :heat Flow-Age Relationships

بنمو ملاحظات الإنسياب الحرارى عبر مناطق مختلفة التكتونية، أصبح من المظاهر مقارنة إتساع الإنسياب الحرارى مع عمر القشرة الأرضية لمكان الإقياس، هذا العمر للقشرة الماقية فى المحيطات، حيث الوضع الماجمى والنقل بعيدا عن نتوءات المحيطات. وتكون علاقة العمر على القارات مع الحدث الأخير للحركات الحرارية المؤثر على مكان القياس. يكون نقص الإنسياب الحرارى مع زيادة عمر القشرة ظاهرة مميزة لكلا من المحيطات والقارات شكل (10-2).

جدول (10-2) قيم معدل الإنسياب الحرارى (q) والحرارة الكلية المفقودة (Q) من داخل الأرض.

المرجع	$Q \times 10^{13}$ (م٣ وات/متر ^٢)	* (مت وات/متر ^٢)	نوع المنطقة
لى Lee 1970	0.90	61	قارات جافة
	2.21	61	محيطات ورنوف قارية (بواسطة التوصيل)
	3.11	61	إتساع عالمى
(سكلاترو وآخرين Sclater et al 1980)	1.15	57	قارات ورفوف
	2.03	66	محيطات (بواسطة توصيل)
	1.01	33	محيطات (حرمانى)
	3.04	99	محيطات (كلية)
	4.20	82	إتساع عالمى
دافيس Davies 1980	1.09	53	قشرة قارية (شابمان وبلاك Chapman & Pallach 1975)
	3.06	100	أحواض محيطية (توصيل + حرمانى)
	4.15	81	إتساع عالمى

يتميز الإنسياب الحرارى المحيطى بواسطة كبر لافت للنظر وقيم عالية التغير حديثا مكونة القشرة عند حافات القمم، حيث يقل إلى معدل منخفض وقيم قليلة موزعة عبر أحواض المحيطات بعيدا عن النتوءات،

* يكون عدم التأكد فى تقدير معدل قيم q من المحتمل حوالى 10%. لتحويل هذه القيم لوحدات c.g.s (µ كالورى/سم^٢ث) يضرب فى 10^{٢٣}. $Q = sq$ حيث s المساحة السطحية. المساحة السطحية للأرض 5.1×10^{١٤} م^٢، أحواض المحيطات 3.06×10^{١٤} م^٢ والقشرة القارية 0.4×10^{١٤} م^٢.

ويحدث معدل القيم المنخفضة (~45 متر وات/م²) عند أخاديد المحيطات شكل (10-3). يتكون إنخفاض الإنسياب الحرارى المحيطى مع زيادة عمر أرضية المحيط مع الوضع الماجماتيكي لقشرة محيطية حديثة التى تبرد تدريجيا لكما إنتشرت بعيدة عن النتوء. قدر بارسونس وسكلاتر Parsons and Sclatter 1977 الحرارة الداخلية لبرودة طبقة المحيط 1350 درجة مئوية وسمكها بحوالى 125 كم. يمكن إعتبار نموذج تبريد هذا النوع لحوالى 85% من الإنسياب الحرارى الكلى للمحيط، ويمكن توضيح أن 15% الباقية بواسطة الإنسياب الحرارى للغلاف الصخرى (الليثوسفير) من الستار الأسفل ونسبيا اشترك صغير من المولد بالحرارة الإشعاعية المنتجة خلال الغلاف الصخرى (ليثوسفير).

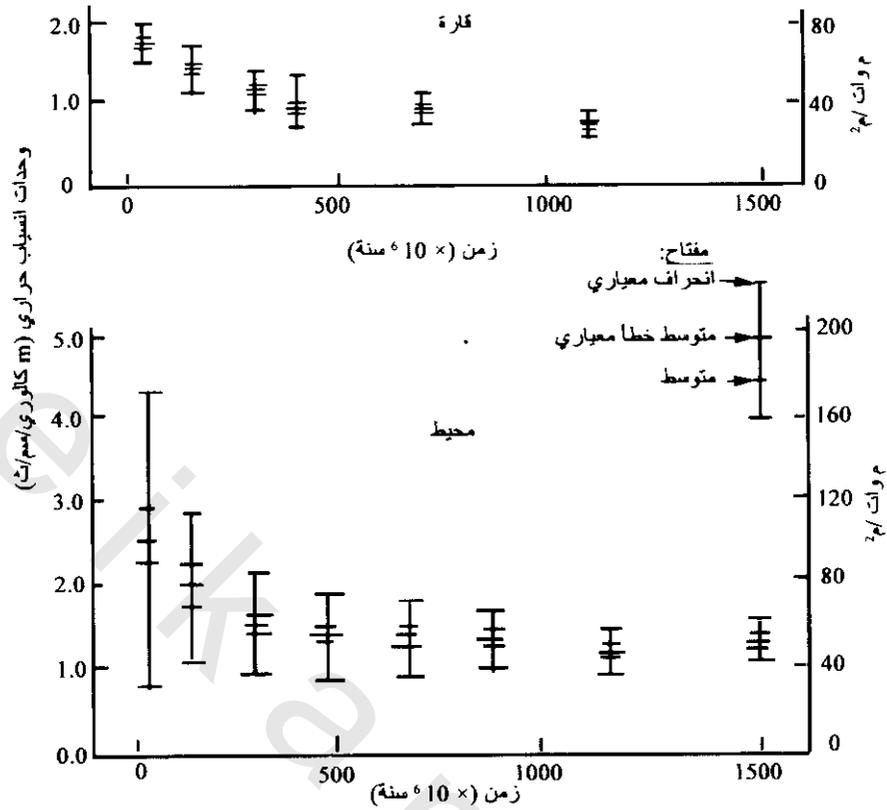
يمتد إنخفاض الإنسياب الحرارى القارى مع العمر (شكل 10-2) عبر فترات طويلة من الزمن ويكون أكثر تعقيدا من مثله للمحيطات. تكون أكبر قيمة ملاحظة (~90 م وات/م²) فى مناطق دروع البركامبرى القديم. يعمل النشاط الإشعاعى لصخور القشرة العلوية مشاركة هامة للإنسياب الحرارى القارى. يمكن فصل مشاركة النشاط الإشعاعى للقشرة العلوية للإنسياب الحرارى من عميقة المصدر ظاهريا بالطريقة الآتية.

إذا كانت A (وات/م³) الحرارة الناتجة من صخر لكل وحدة حجم. عندئذ، فإنه لعمود قشرة أرضية حيث تتسرب الحرارة للسطح عند نفس المعدل التى تنتج عندها، يكون إنسياب الحرارة السطحية زائدة فوق عمود متشابه (b) (بالمتر) bA (وات /م³) عند إنسياب الحرارة لقاعدة العمود حيث يتوقع علاقة خطية بين A, q من الصيغة

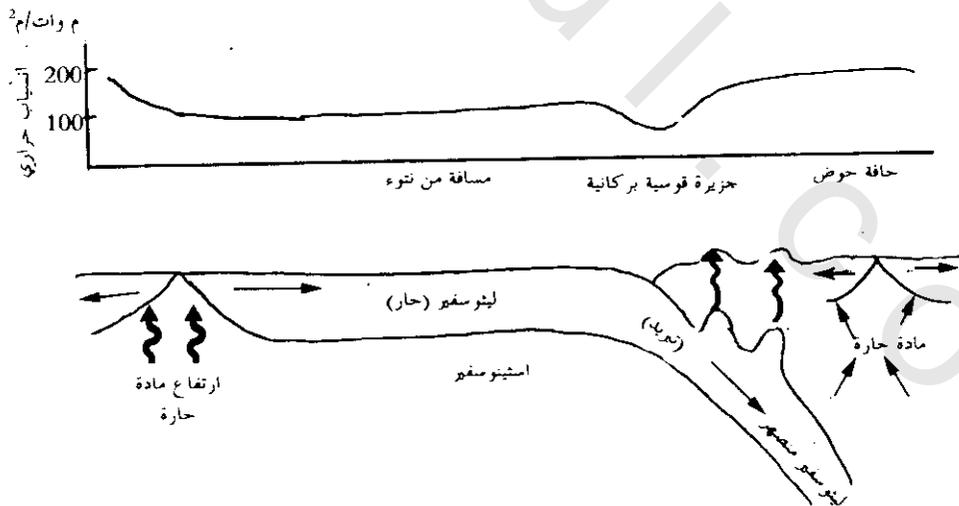
$$q = q_0 + bA \quad (10-3)$$

حيث يعطى الجزء المقطوع q_0 الفيض الحرارى من المصادر العميقة تحت طبقة السطح. يرى شكل (10-4) لتتقيط الملاحظ لأنسياب الحرارة السطحية (q) والمنتجة (A) لثلاث مناطق تكتونية مختلفة فى الولايات المتحدة. يعطى ميل الخط المستقيم الملائم لمجموعة الأرصاد السمك b لإشعاع "القوى" الطبقة السطحية، لخصت النتائج من مناطق إنسياب حرارى بواسطة فيتوريللو وبولاك Vitorella and Pollack 1980، أدرجت التحديدات الموضوعية فى جدول (10-3) على أربع أو أكثر إرصاد.

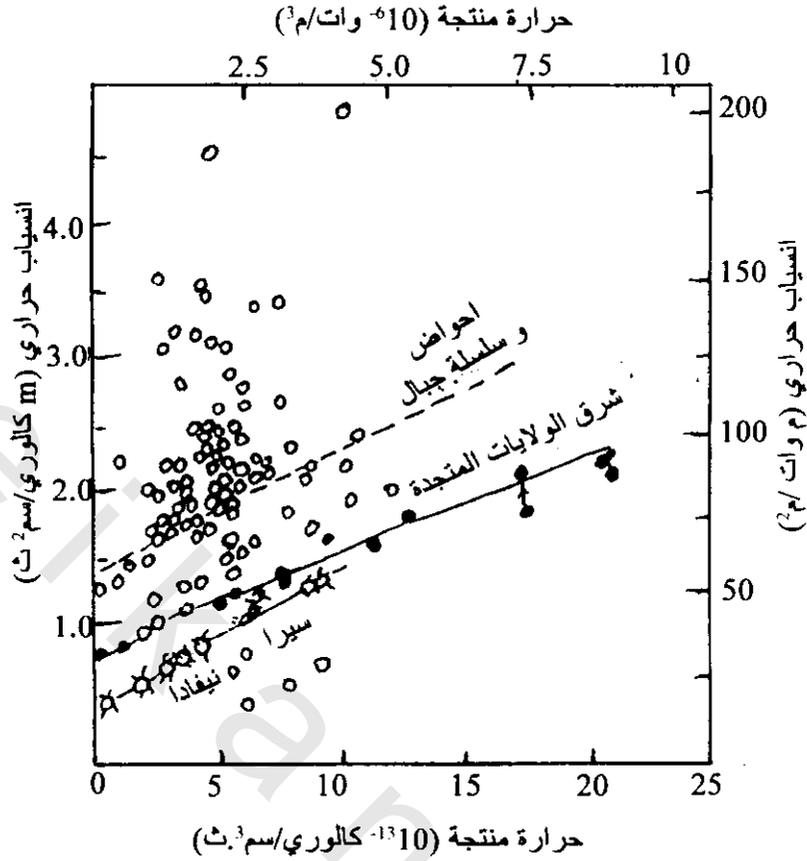
تبعاً لفيتوريللو وبولاك Vitorella & Pollack فسر تقليل الإنسياب الحرارى القارى مع العمر التكتونى فى مصطلحات لنموذج ثلاث مركبات المركبة الأولى هى مولد إشعاع حرارى من منطقة غنية النظائر فى القشرة العلوية، والتى تشترك بحوالى 40% من الإنسياب الحرارى المرصود فى تضاريس لجميع الأعمار التكتونية. المركبة الثانية هى الحرارة المتبقية من الحرارة المضطربة العابرة المصاحبة لتقدم تبريد المحيط القارى التالى لحدث التكتونحرارية المتأخرة. هذا الإضطراب العابر يصل تقريبا إلى 30% من الإنسياب الحرارى المرصود فى مناطق تكتونية الثلاثى، بتأثير توصيل مستدق للصفر فى تضاريس البركامبرى الأقدم، المركبة الثالثة هى خلفية فيض حرارى لحوالى 27 متر وات/م² لمنطقة عميقة، محتمل اتيانها من مصادر مولد إشعاع حرارى أسفل القشرة العلوية الغنية بالمواد المشعة وبواسطة الإنسياب لأعلى الستار أسفل المحيط القارى الصخرى. وهى توضح أن هذه فقط نموذج تجريبي (غير نهائى).



شكل (10-2): رصد متغير لقيم إنسياب حراري في قارة ومحيط واعتماده على زمن صخور القشرة (شابمان وبلاك & Chapman) Poccack 1975.



شكل (10-3): نموذج لإنسياب حراري محيطي (المنحنى العلوي) يمكن توضيحه بواسطة نموذج لخلق لوح ليثوسفير حديث والذي يبرد تدريجيا كلما بعد عن النتوء وأخيرا انغمس لأسفل الاستينوسفير. تنتج الحرارة العالية المناسبة في الجزيرة القوسية من ارتفاع المجاما من صهير الليثوسفير. (معدل من برس وسيفر Press & Siever 1978)



شكل (10-4): إرسادات لإنسياب حراري وحرارة إشعاعية منتجة من صخور بلورية في الولايات المتحدة. منحنيات التراجع الخطي من (روي وآخرين 1968 Roy et al) من مناطق أحواض وسلسلة جبال (الخط المقطع)، شرق الولايات المتحدة Eastern U.S.، وسييرا نييفادا Sierra Nevada. الثلاث دوائر المفتوحة على منحنى شرق الولايات المتحدة عند حوالي الكالوري/سم³.ث (= 42 م وات/م²) من جبال كلامات Kalamath في جنوب كاليفورنيا Claifornia (لاشينبروش وساس 1977 Lachenbruch & Sass)

4.3.10 مناطق شذوذ الإنسياب الحراري: Regions of Anomalous Heat Flow

في مناطق كثيرة حيث عملت قياسات كافية، لوحظ تغيرات هامة لمعدل الإنسياب الحراري. وكما هو متوقع فإن كثير من مناطق الإنسياب الحراري العالمي حددت مواقعها قرب تنوعات محيطية أساسية، حيث يكون الإنسياب الحراري عالي التغير في هذه المناطق. محليا، لوحظت قيم عالية خمس مرات للمعدل العالمي، وذلك لأن هذه المواقع تكافئ البراكين ومناطق الحرارة الأرضية على الأرض، وتشارك هذه المواقع في تحديد مصادر الحرارة (بقع حرارية) الواقعة عند أعماق ضحلة خلال عشرات كيلومترات قليلة من السطح. تتكون الماجما المنتجة لهذه البقع الحرارية عند أعماق كبيرة جدا، وذلك من المحتمل بواسطة إنشطار جزئي لمواد الستار في رفع تيار الحمل.

جدول (3-10) متوسط إنسياب حرارى (q)، تقليل الإنسياب الحرارى (%)، عمق مميز (b) لعدة مناطق إنسياب حرارى. N عدد نقط البيانات المستخدمة فى علاقة خطية بين الإنسياب الحرارى والحرارة الناتجة. (فيتوريللو & بولاك Vitorello & Polack)

قارات ومناطق	N	q (م وات/م ²) ± s.d	q ₀ (م وات/م ²) ± أمر غير محقق	b (كم)	قارات ومناطق	N	q (م وات/م ²) ± s.d	q ₀ (م وات/م ²) ± أمر غير محقق	b (كم)
أمريكا الشمالية									
حوض ونتوء	86	33±92	34±69	10	أوروبا				
سيرانغادا	10	13±37	3±18	10.0	أوكرانيا	12	8±37	7.1	2±25
شرق الولايات المتحدة	15	17±57	4±33	7.5	انجلترا وديلز	10	23±59	160	3±23
أعلى كندا	11	8±34	1±21	14.4	أستراليا				
جنوب أمريكا					غرب	9	8±39	4.5	8±26
الدرع الشاطئي	4	15±36	7±28	13.1	وسط	10	21±83	11.1	6±27
البرازيلى					الدرع الهندي				
					الروتوزدى المتأخر	4	(1±7)	14.8	2±38

* تقليل الإنسياب الحرارى (%) هو الإنسياب الحرارى المقطوع لصفى حرارة منتجة معادلة (3-10)

كثير من مناطق شذوذ الإنسياب الحرارى على القارات بعيدة عن مناطق البراكين وأنظمة الوديان الأخرى. ترى أغلب مناطق الأنشطة التكتونية أعلى قيم، وأغلب مناطق الإستقرار (دروع البريكامبرى القديم) تشير لأقل القيم. تملك سلسلة الجبال الحديثة مثل الألب وأيضا بعض المناطق الغير تكتونية إنسياب حرارى حوالى 50% فوق معدل الإنسياب الحرارى للقارات. أساسا، ربما يكون الإنسياب الحرارى لمساحات نشوء الجبال الحديثة نتيجة تكثيف القشرة الأرضية خلال بناء الجبال. ترى بعض المناطق إنسياب حرارى عالى بدون دلالة لتكثيف القشرة الأرضية. مثلا فى جنوب شرق أستراليا يكون الإنسياب الحرارى المرصود حوالى 50% فوق معدل القيم القارية (ساس 1964). تكون هذه الشواذ الإقليمية بسبب التركيز العالى الغير عادى لمصادر الحرارة الإشعاعية فى القشرة أو فى أعلى الستار، والمثال الآخر موجود فى حوض هيونجاريان (المجر Hungarian) بمناطق أوروبا. هذا الحوض لرسوبيات الثلاثى السميكة محاطة بكارباتيارس Carpathiaris ودينارك dinaric الألب، حيث يكون الإنسياب الحرارى المرتفع مشارك لمنشأ التكتونية البركانية للحوض. تكون المياه الحارة المسحوبة من أعماق 1000-2000 متر فى الحوض مصدر هام للطاقة الحرارية فى المجر Hungary.

فى الولايات المتحدة، يرى الحوض ومنطقة السلسلة شاذات إنسياب حرارى عالى مع تشتت كبير فى الأرصاد. هنا، يكون التغير فى الإنسياب الحرارى منسوب كبيرا للمصادر العميقة (مثل نقل الحرارة الحرمانية والمagma)، التى تكون مشاركة للإنسياب الحرارى أكثر من طبقة النشاط الإشعاعى المشع.

4.10 الحرارة المنتجة وانتقالها في الأرض: Heat Production and Transfer in the Earth

يعتقد أن النشاط الإشعاعي وتحول الجاذبية إلى طاقة حرارية هما أكبر مصادر للحرارة في داخل الأرض حقيقة أن جميع حرارة النشاط الإشعاعي تنتج بواسطة نظائر اليورانيوم والثوريوم والبوتاسيوم المتوافرة في أنواع صخر أساسية والتي تبني القشرة والستار كما هو موضح في جدول (10-4) والذي يعطى أيضا تقديرات للحرارة المنتجة لكل كيلوجرام لمادة الصخر. يشمل الجدول أيضا تقديرات من بعض مواد متعلقة بتاريخ الحرارة الأرضية.

حتى أواخر 1960 كان الإنسياب الحرارى القارى مشارك لسمك (30-35 كم) "السليسيك Silicic من طبقة القشرة الأرضية مع حرارة ناتجة مولدة بالإشعاع. منذ أن قدرت الحرارة الناتجة في قشرة المحيط (فرضت بـ 5 كم من البازلت) فقط بـ 3% من حرارة المحيط المرصودة، نوظرت بأن ستار المحيط ربما 500 كم لأسفل وله تركيز أكبر لعناصر نشاط إشعاعي من الستار القارى (ماكدونالد 1965 Macdoland). والآن عدلت هذه الأفكار. كما ذكر سابقا، أن متوسط حوالى 60% من إنسياب حرارى القارات تأتي من الداخل العميق وحوالى 40% يشترك بواسطة النشاط الإشعاعي القشرى. فى المقابل، تكون القشرة البازلتية المحيطية الرفيعة غير محتملة الإشتراك بأكثر من نسبة مئوية قليلة للإنسياب الحرارى المحيطى، لذلك فوق 95% من الإنسياب الحرارى المحيطى الملاحظ يجب أن يأتى من تحت القشرة المحيطية. فى كل الأحوال، فإن الإنسياب لأعلى من الستار أسفل القشرة يكون مطلوب. لهذا، فإن الستار يجب أن يتضمن فى إنتاج الحرارة لتنفيذ رصد الإنسياب الحرارى.

يوجد مصدرين محتملين كبيرين وكافيين لإنتاج حرارة أساسية فى الستار. الأولى حرارة من النواة تسلم إلى قاعدة الستار. هذه لأن أى مصدر طاقة يحتاج لدوران دينامو جيومجنك (مغناطيسية أرضية) فى النواة الخارجية. هذه ربما تكون بسبب إما إنحلال النشاط الإشعاعي للبوتاسيوم ^{40}K أو نمو النواة الداخلية. هذه التقديرات غير مؤكدة ولكن تتراوح من 10%-30% من الحرارة المفقودة من الأرض، (إلسر وآخرين Elasser)

et al

جدول (10-4) تقديرات الحرارة المنتجة فى مواد أرضية

منتج الحرارة الحاضرة (10 وات/كجم)	(تكون جزء لكل مليون ppm)			المادة	منتج الحرارة الحاضرة (10 وات/كجم)	(تكون جزء لكل مليون ppm) ⁽¹⁾			المادة
	بوتاسيوم K	ثوريوم Th	يورانيوم U			بوتاسيوم K	ثوريوم Th	يورانيوم U	
2.7	100	0.06	0.015	بيرنوتيت ₍₃₎	940	38000	18	5	جرانت
5.2	850	0.043	0.012	كهوندريت	170	8000	3	0.6	بازلت
4.2 ⁽⁴⁾	170	0.065	0.018	متوسط أرضى	390	19000	6	1.6	القشرة القارية العليا

1. أخذت القيم من جدول (2) مع إضافة بيانات من توركيان 1972 Turekian وأندرس 1977 Anders

2. حسبت من معدل الحرارة الناتجة بواسطة نظائر النشاط الإشعاعي لليورانيوم (U) والثوريوم (Th) والبوتاسيوم (K) من جدول 3.

3. ممثلة لمادة الستار.

4. قورنت الحرارة الناتجة مع متوسط الحرارة المفقودة لكل كجم للأرض (7×10^{-12} وات/كجم). حصل على هذا بواسطة ضرب إنسياب الحرارة

السطحية المرصودة (0.081 وات/م²) بواسطة المعامل (المساحة السطحية للأرض (د))/(كتلة الأرض (M)). من المهم ملاحظة أن الحرارة

الحاضرة المفقودة للأرض أكبر من حرارتها الناتجة.

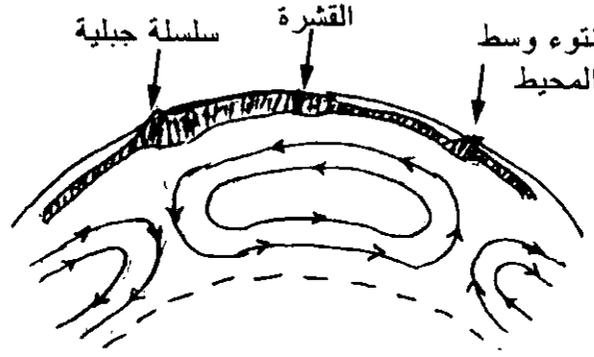
1979. المصدر الثانى هو حرارة مؤكدة إشعاعيا فى الستار. حيث أن النظائر الكبيرة لليورانيوم U، والثوريوم Th والپوتاسيوم K تكون قوية السيليكية، لذلك تكون مركزة جدا فى القشرة الأرضية العلوية كنتيجة أن الستار مستنفذ كثيرا فى العناصر الإشعاعية (جدول 10-4) بالمقارنة بالقشرة القارية. بما، لكبره الكتللى فإن الحرارة الكلية الناتجة فى الستار ربما تكون كافية لعمل مشاركة هامة للانسياب الحرارى الكلى المرصود. لذلك، فإن الانسياب الحرارى السطحى يكون أساسا مشاركا لإنتاج النشاط الحرارى الإشعاعى فى القشرة القارية والستار مع مشاركة من النواة.

غالبا تنتقل الحرارة المتسربة خلال المحيط اليابس بواسطة التوصيل الحرارى. تكون حرارة الإشعاع منخفضة جدا لارتباطها الهام لإنتقال الحرارة. يكون السماح بحدوث التوصيل للمحيط اليابس صعب جدا ماعدا عند نتوءات المحيطات فإن التوصيل يتم بواسطة دوائر حرمانية. مشكلة انتقال الحرارة أكثر تعقيدا فى الستار أسفل المحيط اليابس، حيث التوصيل الحرارى غير محتمل التأثير الميكانيكى لنقل الحرارة من عمق الأرض الداخلى. بسبب شموله ثبات زمن كبير. بفرض نفس الخواص الحرارية لصخور القشرة، فإن إنتقال الحرارة بواسطة التوصيل خلال المائة كيلومتر الأعلى للأرض ستأخذ 5 بليون سنة، والتي تكون أكبر من مسافة امتداد الحياة للأرض. لذلك، لابد للنظر بقوة لميكانيزم آخر لإنتقال الحرارة فى الستار. عند درجات الحرارة العالية، مثل الساندة فى الستار، فإن إنتقال الحرارة بالإشعاع تسود على التوصيل. ربما، تكون المعادن المكونة للستار نسبيا معتمة، وربما تقلل زيادة العتمة مع العمق فاعلية الإنتقال الإشعاعى. لذلك يكون الإشعاع غير محتمل الإرتباط الهام لإنتقال الحرارة فى داخل الأرض.

وهذا يجعل اللجوء للتوصيل المعروف كميكانيزم مؤثر لإنتقال الحرارة فى السوائل مطلوب. ومع أن علم الزلازل يشير إلى أن الستار أساسا متبلور، ولكن تحت حالات معينة من الممكن أن تسلك المواد الحالة الصلبة عبر أزمنة قصيرة وسوائل لزجة عبر فترات طويلة. وتحت حالات تحمل طويلة للضغط العالى ودرجات الحرارة العالية، ربما يتزحف الستار ويصبح نهائى شبه مادة لزجة. لذلك، فى الحقيقة يمكن أن يكون التوصيل ممكنا (محتملا). أدت هذه الفكرة الجاذبة لبيولارد وآخرين Bulard et al 1956 للاقتراح أن أغلب إنسياب حرارة المحيط المحمولة خلال الستار العلوى تكون بسبب التوصيل.

ربما يعتمد احتمال التوصيل الحادث فى الستار العلوى على أغلب عياريته اللزوجية η . حيث اقترح احتمالية أن اللزوجة للستار الأسفل لا يكون أكثر كبيرا من التى للستار العلوى وهذا يؤدى لتوصيلية الستار، وإذا وجدت هذه الاحتمالية فإنها تشمل الستار ككل.

تفاصيل نموذج التوصيل، سواء كان الستار واسع أو محدد إلى عدة كيلومترات قليلة علوية فقط شكل (5-10) سوف تعتمد على تركيبات الستار، والتي تشمل وجود تغيرات طورية، كعلاقة اللزوجة والعمق وتوزيع حجم مصادر الحرارة. مازالت هذه التغيرات قليلة المعرفة، ولكن يوافق أغلب الجيوفيزيقيون اليوم على أن توصيل الستار، فى بعض الشكل، يكون ممكن ويظهر تأثيره الميكانيكى لنقله الحرارة من الستار أسفل المحيطات.



شكل (10-5): نموذج للحمل الحراري في الستار العلوي، ترتفع تيارات الحمل بالقرب من نتوءات المحيط والتفريغ الحراري كأنه ينساب باتجاه القارات

5.10 درجات الحرارة داخل الأرض: Temperatures Within The Earth

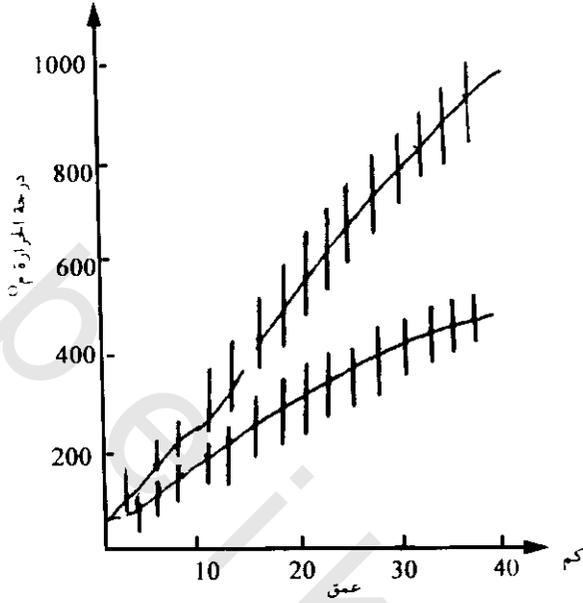
أبسط طريقة لدراسة درجات الحرارة الأرضية هي حفر بئر واستخدام قياس حراري حساس أو مسبار ثيرمستور^١، وليس من الضروري الحفر دائما، حيث يمكن استخدام وجود مداخل المناجم، الأنفاق وأبار البترول لهذا الغرض. أظهرت الدراسات التي حصل عليها بهذه الطريقة أن درجة الحرارة الأرضية عند أي موقع تزيد مع العمق، ويكون متوسط معدل الزيادة (المسمى بتدرج الحرارة الأرضية) حوالي 3 درجات مئوية لكل 100 متر عمق في المناطق الغير بركانية.

لتقدير درجة حرارة الأرض خلف عمق عدة كيلومترات فإن قياس إنسياب الحرارة السطحية q تكون الحل لهذا التقدير، ويمكن فصلها إلى مشتركات حرارة من صخور النشاط الإشعاعي السطحي ومن المناطق تحتها بواسطة رسومات خطية مثل التي في شكل (10-4). يكون معرفة هذين للحرارة كافيًا للحصول على توزيع درجة الحرارة-العمق في القشرة الأرضية. يظهر شكل (10-6) تقديرات درجات حرارة تحت عمق 4 كيلومتر في منطقتين مختلفتين بالولايات المتحدة. ترى إنسياب الحرارة العالية في حوض نشاط تكتوني وسلسلة جبال (مرتفعات) زيادة سرعة أكثر للحرارة مع العمق. يكون معدل تدرج الحرارة في الجيولوجيا القديمة وشرق الولايات المتحدة المستقر أقل كثيرا من التي في منطقة الحوض وسلسلة الجبال.

سمك قشرة المحيط 6 كم فقط ويكون نتاج النشاط الإشعاعي منخفض التأثير جدا على تقدير التدرج الحراري. تكون درجات الحرارة أسفل سطح المحيط سائدة بواسطة الحرارة المتوالية في قاعدة المحيط اليابس من الستار أسفل. يكون أحسن تخمين لدرجة حرارة حوالي 1200 درجة مئوية عند قاعدة لوح المحيط اليابس عندما يكون في تلامس مع جزء الغلاف المائع المنصهر (من الستار). هذه تعطي تقديري تقريبي لدرجات الحرارة عند أعماق 70-100 كم أسفل المحيطات العادية (بعيدة عن النتوءات المحيطية).

لتقدير درجة الحرارة في الستار والنواة يجب الرجوع إلى الطرق المباشرة، وضعت الاستنتاجات حول توزيع درجات الحرارة عند أعماق كبيرة على رصد السرعات السيزمية وتغيرات التوصيلية الكهربائية، ولكن تعتمد هذه على افتراضات الخواص الفيزيائية بافتراض أن مادة الستار (بيردوتيت؟) عند الضغوط ودرجات الحرارة العالية.

^١ مقاوم ذو معامل مقاومة سالبة حرارية كبيرة (تقل مقاومته بارتفاع الحرارة).



شكل (10-6): تقديرات درجات حرارة أسفل عمود 40 كم في حوض - سلسلة جبال (BR) وشرق الولايات المتحدة (EUS) لمناطق بالولايات المتحدة الأمريكية. وضعت التقديرات على معرفة إنسياب حراري وحرارة منتجة في المنطقتين ، ترى الأعمدة الرأسية تقديرات غير مؤكدة (بلاكويل 1971 Blackwell ولاشنيروس و Lachenbruch & Sass 1997) وساس

تمد الزائدتين السريعتين في سرعة الموجات السيزمية عند أعماق 400، 600 كم دلالات هامة، حيث يظن أن قفزات هذه السرعة بسبب تغيرات طورية والتي تحدث عند الوصول للضغوط ودرجات الحرارة الحرجة. حقق طول التغير عند عمق 400 كم في المعمل بواسطة تجارب على معدن الأوليفين بواسطة تعريضه لزيادة الضغوط ودرجات الحرارة. تقرر هذه التجارب أن درجة الحرارة تقترب إلى 1500° مئوية عند عمق 400 كم، أما درجة الحرارة المطلوبة لتغير الطور عند 700 كم قدرت نظريا بالإضافة لبيانات السيزمية وطبيعة الحالة الصلبة لتكون حول 1900° مئوية. بالإتجاه عمقا للستار، عامة افترض أن درجات الحرارة ترتفع مع زيادة العمق أكثر إنحدارا من التدرج الأديباتيكي (تدرج حراري يرجع لإنضغاط مواد الأرض).

أيضا عرف من علم الزلازل أن الستار يكون صلب وأن النواة الخارجية تكون سائلة. لذلك فإن درجة الحرارة خلال الستار تحت نقطة منحنى الصهير للستار، حيث يجب أن تزداد درجة الحرارة عند حد الستار - النواة عن نقطة انصهار الحديد لتقليل سيولة النواة، وتبقى أسفل درجة حرارة صهير الستار لتقلل صلابته، هذه الدرجة الأخيرة، تبعا لبعض تقديرات التصحيح، تكون مناسبة في المدى من 3000°-3800° درجة مئوية.

مد الدليل الآخر لتقدير درجة الحرارة بواسطة الحد بين النواة الخارجية والنواة الداخلية والتي شدد على صلابتها بواسطة علماء الزلازل بفرض أن هذا الحد يميز صلابة خليط Fe-FeS، فقد قدرت درجة الحرارة عنده بواسطة ستاسي 1977 Stacey حول 4000° مئوية. يأخذ هذه كواحدة من نقط درجات الحرارة الثابتة وبفرض أن توزيع درجات الحرارة مع العمق في النواة الخارجية تتبع التدرج الأديباتيكي، فإن درجة الحرارة عند الحد بين الستار والنواة يقدر حول 3000° مئوية.

بتلخيص المناقشة السابقة، فإن المنحنى المشروط لشكل (10-7) يستخدم لتقدير خام لتوزيع درجة الحرارة داخل الأرض.

6.10 طرق التنقيب الإشعاعي Thermal Prospecting Methods

تستخدم قياسات الحرارة الأرضية لاستطلاع مصادر الحرارة تحت سطحية والقريبة من السطح، حيث تجلب حول التغيرات المحلية في درجة الحرارة تحت الأرض بواسطة عدة أسباب

- (i) تأثير تحلل الماء الأرض
- (ii) التأثيرات الكيميائية الناتجة في تفاعل اكوثرمي (طارد للحرارة)
- (iii) وجود مصادر حرارة لنشاط إشعاعي محلي.
- (iv) الاختلاف في معاملات توصيل الصخور.
- (v) وجود مصادر بركانية وحرمانية (هيدروثيرمل)

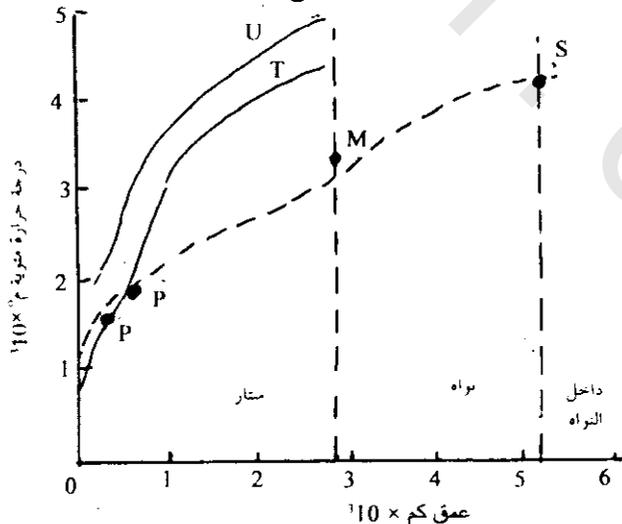
لاستطلاع مصادر الحرارة عند أعماق كبيرة، من المهم ان تشمل قياسات الإنسياب الحراري عبر المنطقة. ربما، في التنقيب لمصادر حرارية ضحلة، في أغلب الأحيان تكون قياسات درجات الحرارة عند عمق 2 متر كافية، وتفسير شذوذ درجات الحرارة نسبيا عادلة. هذه الظواهر تجعلها طريقة جاذبة للحصول على معلومات تحت سطحية للإستخدام الإقليمي للإضافة إلى البيانات السيزمية والمقاومة الكهربائية.

في السنوات الحديثة زاد استخدام الطرق الحرارية في التنقيب عن المياه الأرضية، الثلجات ومستودعات المياه الرسوبية، خزانات حرارية، قباب ملحية ضحلة، فولق، شقوق... الخ.

1.6.10 تقنيات القياس Measuring Techniques

صممت عدة وحدات للقياسات الحرارية (ثرمستور Thermisto) دقيقة للاستعمال الحقلى. وأحد من التصميمات (كركمار وماس 1970 Krckmar and Masin) قادر للقياس من 0° - 70° مئوية ودقته النسبية 0.01° مئوية. يحفظ (يحمى) العنصر الحساس بواسطة حقيبة صغيرة وتوصل لقضيب فلزي بطول 2-5 متر أو بطول الكابل إذا عملت القياسات في آبار عميقة.

تأخذ طرق القياسات وتصحيحاتها في الاعتبار بعض تأثيرات مضطربة، وأكثرها أهمية يكون بسبب التغيرات اليومية لدرجة الحرارة المسببة بواسطة الإشعاع الشمسى. لابد من ملاحظة التغيرات في التربة أسفل



شكل (10-7): توزيع مقترح لدرجات الحرارة في الأرض عند p , p موضوع على فرض تغير طوري عند أعماق تقترب من 400، 600 كم، U منحنى نقطة صهير للستار (يوفن 1952 Uffe)، T درجة حرارة مستنتجة من التوصيلية الكهربائية (توزر 1957 Tozer)، M درجة الحرارة عند الحد بين الستار-النواة (مكينزيس 1967 McKenzies) معدلة من منحنى توزر، S درجة الحرارة في داخل الحد الخارجى للنواة مميزة بواسطة صلابة Fe-FeS (سناسى 1977 Stacey)

عمق حوالي 1.5 متر. لإزالة تأثير التغير اليومي، تقاس درجات الحرارة في الآبار الضحلة والمحفورة بواسطة جهاز حفر خفيف أو محفورة بواسطة قضيب صلب ومطرقة. خلال فصل الشتاء، تنجز قياسات فرضية بواسطة قياس تحت الغطاء الثلجي، كما أشار إليها كركمار 1968. للوصول لتماس حسن بين التربة ومسبار الحس، يدفع الأخير لحوالي 5 سم لقاع البئر إلى أن يصل ثبات درجة الحرارة في أغلب الحالات خلال نصف ساعة.

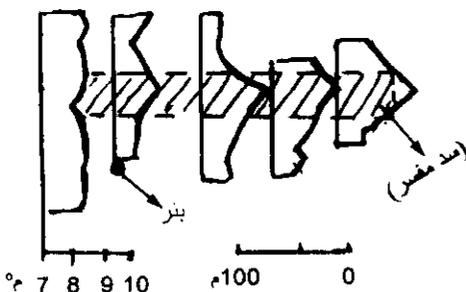
حيث أن القياسات تأخذ عادة بعض الأسابيع لتغطية مساحة معينة، يكون من الضروري عمل التصحيحات لإراحة صغيرة منتظمة معينة، يكون من الضروري عمل التصحيحات لإراحة صغيرة منتظمة في مستوى درجة الحرارة السنوي. لهذا الغرض تحفظ حساسات عند مواقع محطات مرجعية ملائمة، وتؤخذ القراءات منها كل يوم خلال المسح. حديثاً جداً تطور استخدام مقاسات الأشعة تحت الحمراء (infrared radiometers IR) للطيران لتخريط صورة تحت حمراء لمناطق حرارية كبيرة مثل الموجودة بجزر الثلج (بلماسون وآخرين 1970). أيضاً استخدمت أقمار صناعية جوية مداراتها على ارتفاعات عالية وزودت بأجهزة تحليل عالية لقياسات الأشعة تحت الحمراء. (Palmason et al 1970). أيضاً استخدمت أقمار صناعية جوية مداراتها على ارتفاعات عالية وزودت بأجهزة تحليل عالية لقياسات الأشعة تحت الحمراء (High resolution to infrared radiometers (HRIR)) لتسجيل انبعاث الأشعة تحت الحمراء. المسح بواسطة الأقمار الصناعية الأرضية تقنية حديثة تنمو بأهمية، كمسجل طويل المدى جداً لدرجة الحرارة والذي يشير إلى شذات يكون من الصعب اكتشافها عند أرباع أخرى (مارش وآخرين 1976).

2.6.10 أمثلة من المسح الحراري الأرضي :Examples of Geothermal Surveys

1.2.6.10 رسوبيات خام الكبريت في سولفاكيا :Sulfide Ore Deposits in Solvokia

أخذ هذا المثل من كركمان وماس 1970 Krcckmar and Masin لمنطقة سيس-جمر من سولفاكيا Spis-Gemer, Solvokia، حيث يوجد خامات كبريتيدات السديرايت في بلورات صخور نارية متحولة (شبيست) من زمن الباليوزوي. مع طبقات جرافيت. عامة، لاحتوى الخامات على معادن مغناطيسية ومعامل التوصيل الكهربى لها نفس معامل الجرافينات. لهذا السبب فإن كلا من المسح المغناطيسى والكهربى لم يعطيا نتائج مرضية. ربما، تحدث تفاعلات طرد الحرارة (أوكسوثرمى) في منطقة التأكسد لرسوبيات الكبريت حيث تجعل من الممكن تطبيق استطلاعات الحرارة الأرضية.

يرى شكل (8-10) بروفيلات بشادة درجة حرارة مرصودة عبر جزء من المنطقة. تسبب التضاريس الغير منتظمة والغطاء النباتى المتغير اختلافات في مستوى ا درجة الحرارة، ولذلك، ميزت فقط شذات محلية أعلى من أنبوبة، أختيرت منطقة شذات درجات الحرارة الموجيه بالتفصيل وطبقت بواسطة الحفر، وخلال الحفر قطع عرق بتمعدن كبريتى.



شكل (8-10): شذات حرارية (خط متصل ثقيل) عبر رسوبيات كبريت في سولفاكيا (كركمار وماس 1970 Krcckmar & Masin)

2.2.6.10 Thermal Mapping of Fissures and Cracks: لشقوق وشرخ

نجحت تطبيقياً عدد من طرق حالات الحرارة لإيجاد الشقوق والشرخ التي على طولها أخذ انتقال الحمل الحرارى للحرارة مكانه من عمق خلال فاعلية الماء أو الغاز. أعطى كابلميو وهانيل Kappelmeied and Haenel 1974 مثال لاستطلاع جيوب لمياه حرارية فى كهوف حجر جبرى. يرى شكل (9-10) خريطة تساوى الحرارة الأرضية فى منطقة نكرتال (جنوب ألمانيا) (Nerkertal (S. Germany) حيث ينساب الماء الحار من عمق 100-150 متر لأعلى خلال الشقوق والشرخ ويشوش على إنتشار الحرارة الإقليمية. يوضح هذا المثال أنه من الممكن تحديد أماكن الشقوق التحت سطحية التى يرتفع خلالها الماء من عمق كبير ويدخل لمستودعات الماء تحت السطح بواسطة قياسات حرارية عند أعماق ضحلة.

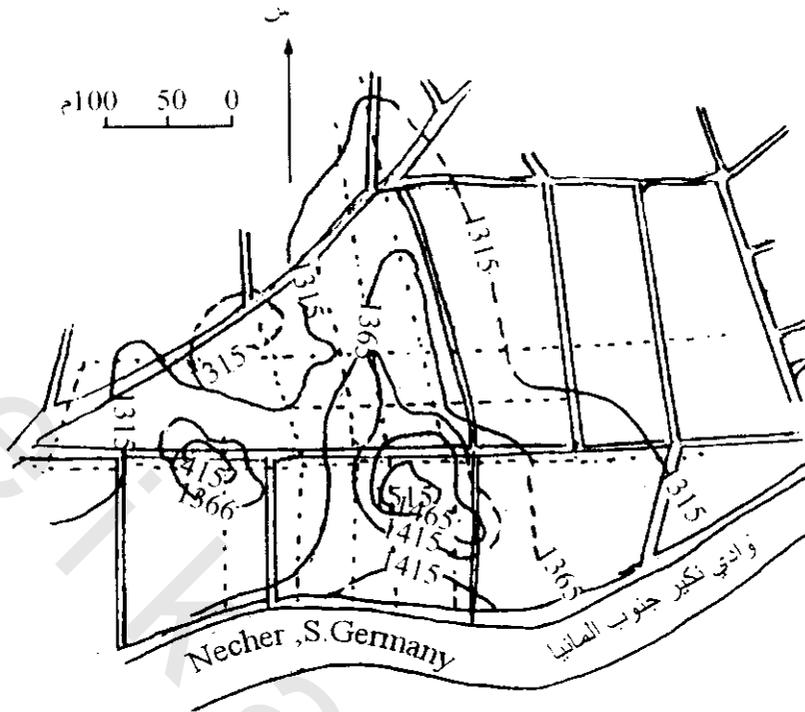
عندما تنتقل الحرارة بواسطة تسرب الغاز أو البخار، فإن شاذات درجات حرارة لقيم أكبر من 50° م تظهر عبر بعض مناطق الشقوق على جزيرة اسشيا فى ايطاليا Ischia in Italy.

3.2.6.10 تركيبات ملحية وجرانيتية :Salt and Granite Structures

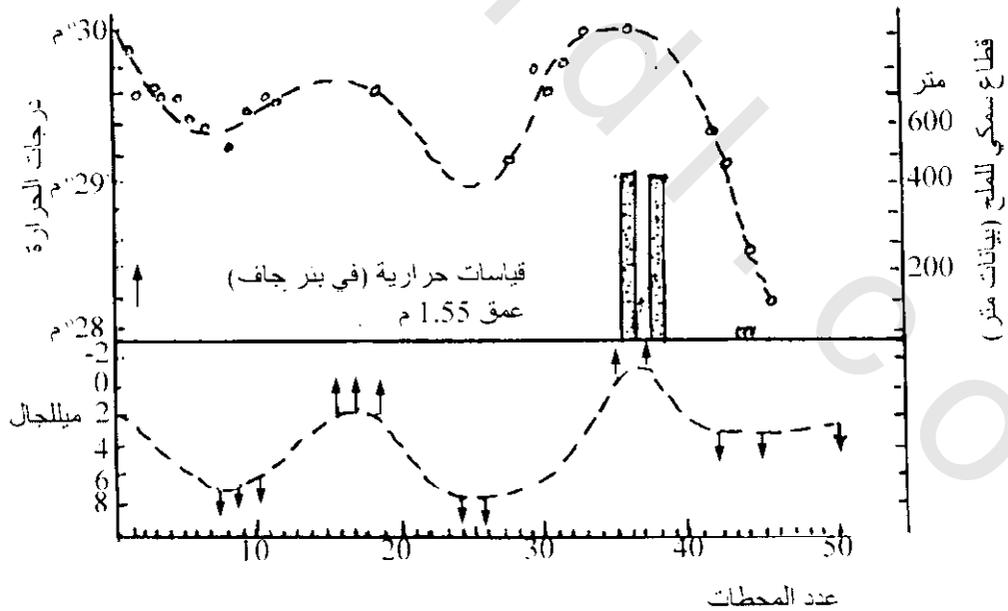
وضحت دراسات عديدة أن تداخل ملح عالى التوصيل تسبب اضطراب قوى فى درجات الحرارة للرسوبيات التى فوقها. مثال المسح الحرارى المستخدم لتحديد تركيبات الملح الخطية معطاه بواسطة بولى وفان ستيفينك Poly and Van Steveninch 1970. يرى شكل (10-10) بروفييل درجة حرارة على طول خط بروفييل طوله حوالى 10 كم، أكبر أبعاد المحطات 200 متر. يشمل الشكل بيانات الجاذبية على طول خط البروفيل، وكذلك أسماك طبقات الملح المواجهة فى الآبار العميقة. مقياس بروفييل الجاذبية معكوس ليرى التوافق أكثر وضوحاً. يرى أن المقارنة 1:1 توجد بين الحرارة العالية (أكبر ملح) وجاذبية منخفضة. توزيع الملح فى الآبار تؤكد التنبؤات الحرارية.

أخذ المثال فى شكل (10-11) من جاكوسكى Jaksoky 1950، حيث اكتشف فيه شاذة حرارة عبر تداخل الجرانيت فى تلامس مع الحجر الجبرى عند أعماق ضحلة. يشبه منحنى الشاذة فى شكل بروفييل الجاذبية المتوقع عبر تركيب فائق. واضح من المثال أن شاذة درجة الحرارة تنسب أكثر إلى حرارة النشاط الإشعاعى العالى المولد فى الجرانيت أكثر من توصيلها.

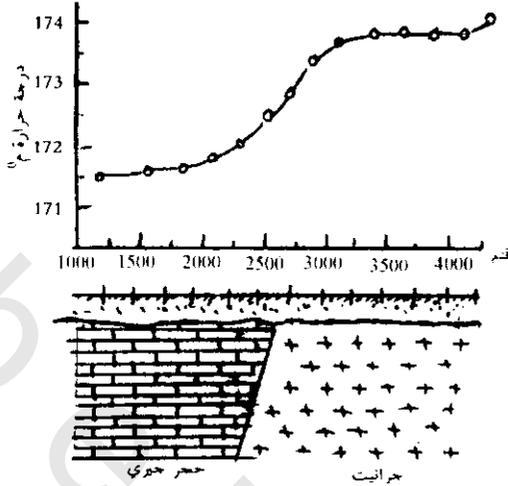
فى هذا الإرتباط، ربما يذكر بعض الملاحظات الهامة لتدرج درجات الحرارة التى حصل عليها خلال إنشاء النفق الكبير (ست جوتشارد فى سويسرا St. Gotthard in Switzerland). أثناء العمل فى النفق، عند المرور خلال النيس والشيست كان معدل تدرج الحرارة 1/47 م° متر وأصبح التدرج 1/21 م° متر عند قطع الجرانيت فى نهاية الشمال. من تحليلات عينات الصخور وجد أن الجرانيت يحتوى على غير العادة نسبة عالية من مواد نشاط أشعاعى، والتى تكون هامة لتسجيلات درجات الحرارة العالية، وضح ريباخ Rybach 1973 أن ناتج درجات الحرارة فى صخور الألب بسويسرا تحكم كلية بواسطة احتوائها للنشاط الإشعاعى، ولا تعتمد على التغير فى معامل التوصيل الحرارى.



شكل (9-10): شاذة حرارية عند عمق 1.5 متر في كينجين، وادي نكير (جنوب ألمانيا) Krabingen, Necker Vally (South Germany). المسافة الكنتورية 0.5° م. الشاذة بسبب ماء كارست Karst والذي برز من عمق عدة مئات من الأمتار في داخل المياه الأرضية. (كابلمير وهانيل 1974 Kappelmeier and Hanel)



شكل (10-10): تماثل بروفيلات الجاذبية (مليجال) مع الحرارة (°م) عبر تركيب ملحي ضحل المسافة بين المحطات 200 م (بولي وفان ستيفينيك 1970 Polye & Steveninck)



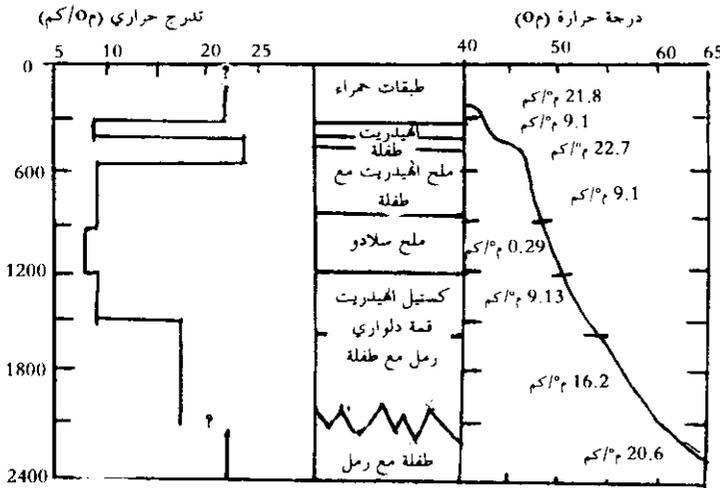
شكل (10-11): بروفيل حراري ضحل عبر تداخل جرانيتي في تلامس مع الحجر الجيري (جاكوسكى 1950 Jakosky)

4.2.6.10 المعلومات الليثولوجية (علم وصف الصخور) من تسجيلات الحرارة Lithology Information from Temperature Logs:

بتغير التدرج الرأسى لدرجات الحرارة في الأرض خلال حدود واسعة (5-70°/كم)، معتمد على الخواص الحرارية للصخور، ويمكن استخدام درجات الحرارة في الآبار العميقة في مضاهاة المستويات الاستراتجرافية. كمثل، يرى شكل (10-12) تسجيل لدرجة حرارة، تدرج حراري، ليثولوجي في بئر نوثروب Northrup غرب تكساس Texas، حيث يستدل على التغيرات الهامة بوضوح للتدرج الحراري مع التغير الليثولوجي. يحدث التدرج الحراري الكبير في الطفلة والأقل في طبقات الملح والأنهيدريت. هذا متوقع، حيث أن الملح والأنهيدريت له معامل توصيل عالي وتبعاً لذلك يظهر تدرج حراري منخفض.

7.10 إستكشاف لمصادر الحرارة الأرضية: Exploration for Geothermal Resources

يزداد إدراك مصادر الحرارة الأرضية كمصدر طاقة بديل في مشهد متطلبات الطاقة العالمية، والتي تنمو كمعدل أسى. أعطى أرمستيد 1978 Armstead اعتبار عام لمصادر طاقة الحرارة الأرضية واستخداماتها. وجدت أكثر علاقة تطويرية حديثة تتعلق بالإستكشاف والأستثمار لحقول الحرارة الأرضية في خط بياني أحادي monograph بواسطة جيبوتنا 1980 Gupta، وأعطيت عدة حالات سيزمية (تاريخية) بواسطة ريباخ وموفلر 1981 Rybach and Muffler.



شكل (10-12): درجات حرارة، تدرج حراري وليثولوجي لبئر نوثروب، تكساس Northrup, Texas (هرن وكلارك 1956 Herring and Clark)

ربما يحدد حقل الحرارة الأرضية كنظام مخزون حرارى والذى منه يمكن استخراج المتطلبات الاقتصادية والخدمية المنزلية والصناعية. الطرق الرئيسية التى تستخدم عامة لتحديد مواقع حقول الحرارة الأرضية المحتملة وهى:

(أ) الطرق الجيولوجية والهيدروجيولوجية

(ب) الطرق الجيوكيميائية

(ج) الطرق الجيوفيزيائية

ومن الطرق الجيوفيزيائية، الطرق الحرارية، الكهربائية، الكهرومغناطيسية، أما الطريقة السيزمية فهى محدودة للآن.

1.7.10 الطرق الحرارية Thermal Methods:

من أوائل الطرق أهمية للتقيب الحرارى هى مسبار درجة الحرارة فى الآبار وخرائط إنسياب الحرارة السطحية، حيث تكون قاعدة مكونات درجة الحرارة هى أهم الخواص الفيزيائية للتقيب عن الحرارة الأرضية، فقط، مازال قياس درجات الحرارة فى الآبار العميقة هى الطريقة الملائمة للحصول على معلومة عن درجة الحرارة الأساسية لخزان حرارة أرضية محتمل. أيضا، تمتد آبار الأستكشاف ببيانات عن الجيوكيمياه والهيدروولوجيا والنفاذية، كذلك يساعد تخريط إنسياب الحرارة السطحية فى تحديد منطقة الحرارة المركزة للخزان وفى تقييم إنتاجه الحرارى.

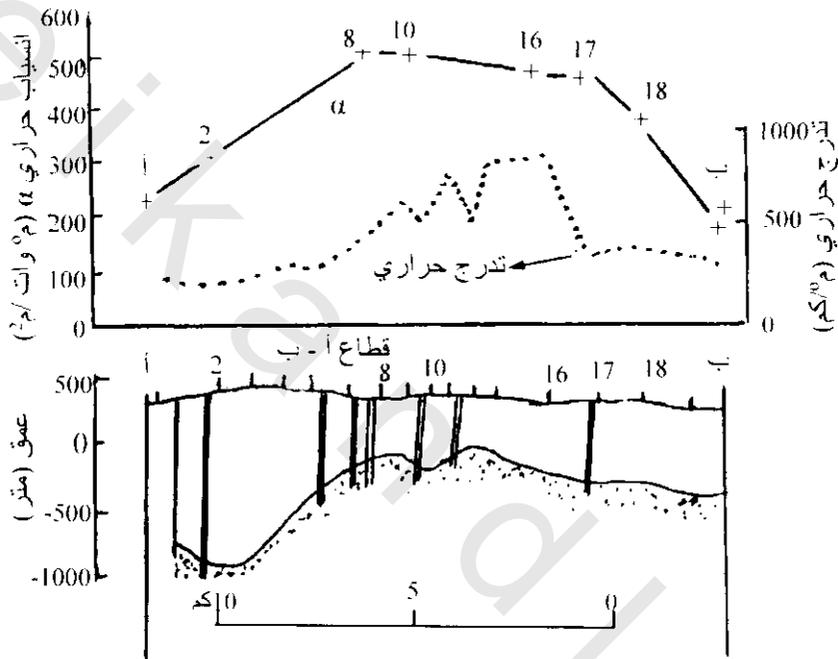
أعطى بولدزسار 1963 Boldizsal مثال لقياسات إنسيابات حرارية نافعة فى تحديد خطى لمنطقة مركز إنتاج فى حقل بخار طبيعى عند لارديرللو، إيطاليا Larderello, Italy. يرى شكل (10-13) قياسات نتائج تدرج حرارى وإنسياب حرارى عبر قطاع حقل إنتاج بخار. من الأهمية ذكر أن الإنسياب الحرارى يرتفع بين محطات أ، 8 بشدة وبعد ذلك يقل بثبات إلى ب. منحنى تدرج الحرارة غير منتظم يرى أكبر قيمة عند محطة 16 حيث أن معامل التوصيل الحرارى (محدد من قياسات معملية) صغيرة قيمة الإنسياب الحرارى 580 م/ات/م²، وهى أكثر حوالى 10 مرات من معدل الإنسياب الحرارى القارى. الصخور القريبة من السطح عبارة عن طفلة غير نافذة ذات معامل توصيل حرارى منخفض. وهذا يفسر الإنسياب الحرارى العالى وانخفاض معامل التوصيل ولماذا يكون تدرج الحرارة عاليا نوعا ما بين 300-800 م²/كم. وحيث أن الحجر الجيرى تحت الطفلة الغير منفذة مشقق لذلك ينقل الحرارة الآتية من أسفل. تتفق منطقة إنتاج البخار المركزة مع القطاع الموضح لقيم إنسياب حرارى عالى أكثر نوعا ما من تدرجات درجات الحرارة.

2.7.10 الطرق الكهربائية والكهرومغناطيسية: Electrical and Electromagnetic Methods:

وضعت تطبيقات طرق الكهربائية والكهرومغناطيسية لقياسات الحرارة الأرضية على حقيقة ان معامل التوصيل الكهربى للصخور يزداد بسرعة مع زيادة درجات الحرارة. عامة، يشار لظهور حقول المياه الحارة كمنطقة معامل توصيل عالية (مقاومة قليلة) باعتبار وجود أملاح مذابة، بينما يشار لظهور حقول البخار كمنطقة معامل توصيل منخفض (مقاومة عالية). ربما تحجب هذه الدلالات بواسطة عوامل خاطئة. فمثلا، وجود

تكوينات الطين تعطى ارتفاع للمقاومة المنخفضة ولهذا يحدث اضطراب في تفسير النتائج. وبما أن الماء المالح البارد أو ماء البحر لهما مقاومة أقل من أوم متر، لذلك فإن كثير من الأحواض الرسوبية، حيث يتجمع الماء المالح، تبرز مقاومة منخفضة بدون أى إتصال مع درجات الحرارة التحت سطحية.

عملت مسوحات جيوفيزيائية لمناطق حرارة أرضية، خاصة بالطرق الكهربائية فى عدة أجزاء من العالم. أمدت هذه المسوحات لمنطقة الطين البركاني فى يلوستون ناشونال بارك، بالولايات المتحدة الأمريكية Yellow Stone National Park (U.S.A.) بمثال جيد لقياسات المقاومة، الاستقطاب الحثى (IP) والجهد الذاتى (SP) التى عملت لتقييم الخواص الكهربائية الأرضية لبخار حقل حرارة أرضية معروف وسائد.



شكل (10-13): إنسياب حرارى، تدرج حرارى وقطاع جيولوجى خلال حقل إنتاج بخار عند لاردريلو، إيطاليا Larderello, Italy (بولدزسار 1963 Boldrsar)

يرى شكل (10-14) بيانات الكهربائية الأرضية التى حصل عليها بواسطة زهدى وآخرين Zohdy et al 1973 عبر قطاع لحقل حرارة أرضية. قيست المقاومة الظاهرية والاستقطاب الحثى بأبعاد أقطاب من 300-180 متر بينما قيست أبعاد أقطاب الجهد الذاتى بـ 120 متر.

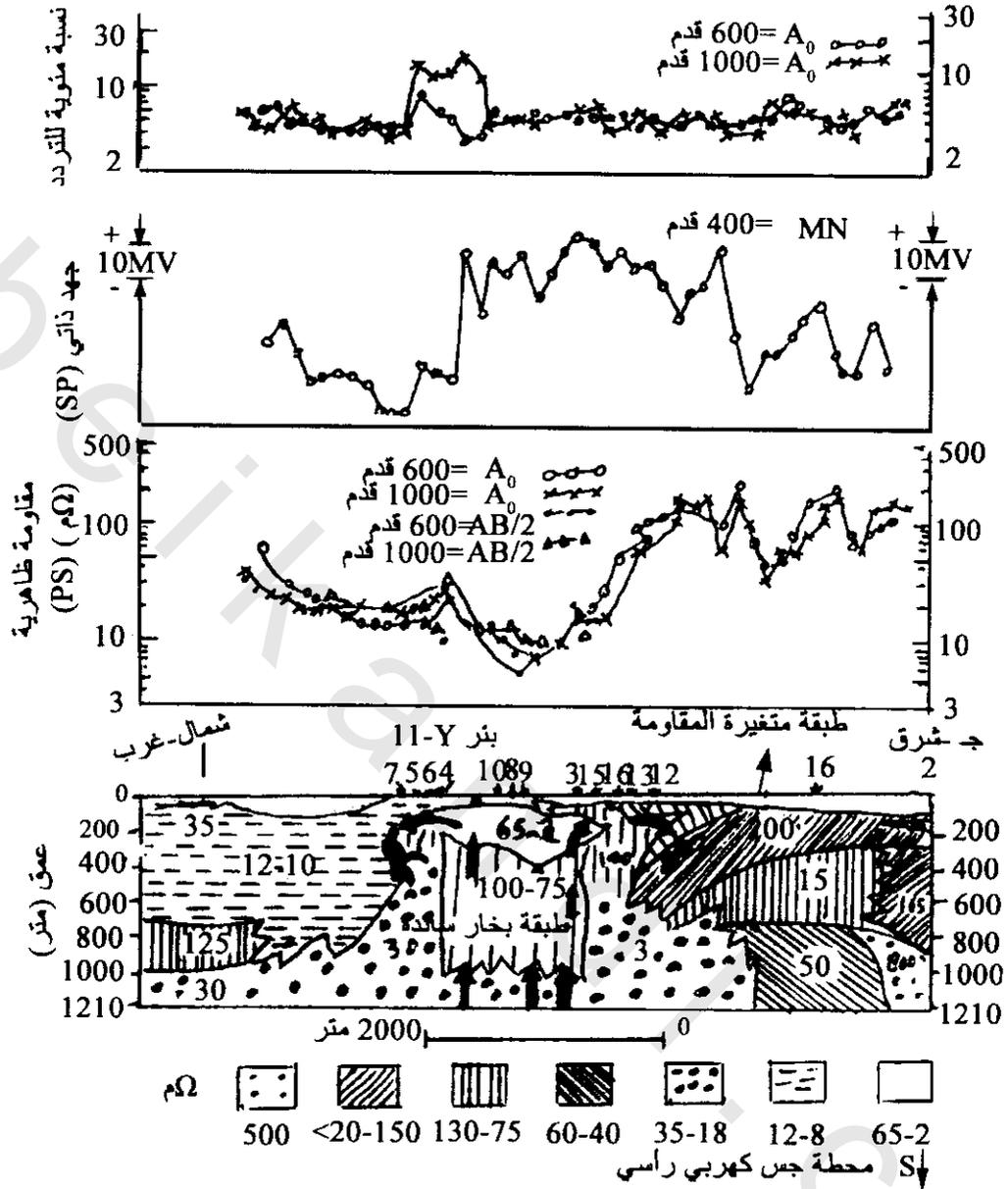
رصدت أقل قيم للمقاومة الظاهرية من بيانات البروفيل الأفقى عبر مركز الحقل الحرارى، بينما أسماك قيم 2-65 أوم تكون الأكبر. فسرت المقاومة الظاهرية عند أكبر مسافات أقطاب بعبارات عن وجود طبقات عميقة عالية المقاومة (بخار سائد) تمت طبقة ضحلة منخفضة المقاومة. أنتجت قياسات الجهد الذاتى شاذات عريضة موجبة عبر منطقة الحرارة والتى فسرت بعبارات لمياه متحركة لأعلى فى حركة متصلة بواسطة مصدر حرارى عميق.

تمت قياسات الجهد الذاتي في تردد ساند عند 0.1، 1.0 هرتز، وتأثير نسبة منوية التردد ورسمت هذه القياسات على مقياس لوغاريتمي. من المحتمل أن تكون الزيادة النسبية في تأثير الجهد الذاتي في الحد الشمالي الغربي المجاور للنطاق الحراري بسبب زيادة كمية إنتشار رسوبيات البيريت بواسطة دورة المياه الحرارية. عضد هذا التفسير بواسطة بيانات معدنية لبيتر 11-7 والتي اشارت لوجود البيريت من أعماق 15 متر إلى قاع البيتر عند 106 متر. والحقيقة، تغطي الأبعاد الكبيرة للأقطاب ($A^\circ = 1000$ قدم ≈ 300 متر) أكبر شاذة جهد ذاتي، لذلك اقترح ان البيريت و إنتشاره يزيد مع العمق عند حد نطاق الحرارة.

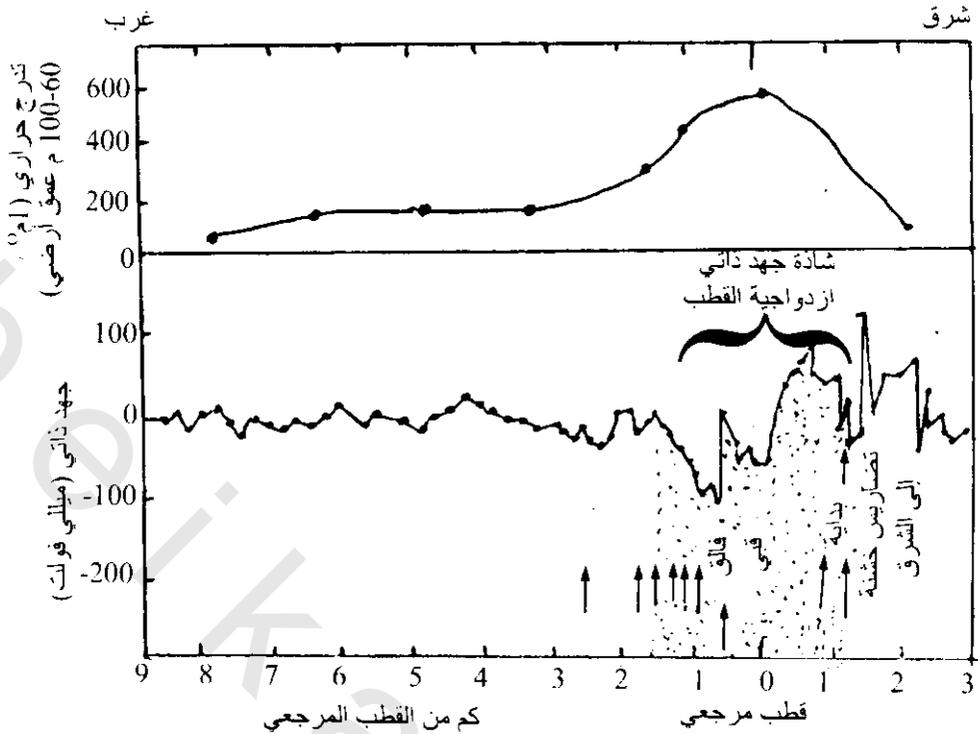
سجلت مدى شاذات للجهد الذاتي بسعة من حوالي 50 ميللي فولت إلى أعلى من 2 فولت عبر مسافات من 100 متر إلى عدة كيلومترات قليلة عبر اثني عشر منطقة حرارة أرضية. شكل (10-15) يوضح مثال لعلاقة شاذة الجهد الذاتي لنشاط الحرارة الأرضية الموجودة في منطقة عيون روزفلت الحارة، يوتاوا، الولايات المتحدة (Roosevelt Hot Spring Area, Utah, U.S.).

استعرضا وقدرا كوروين وهوفر Corwin & Heover 1979 تطبيقات لطريقة الجهد الذاتي في استكشاف الحرارة الأرضية. تبعا لهذين المؤلفين، فإن أغلب إستخدامات مسوحات الجهد الذاتي الواعدة في مناطق الحرارة الأرضية تظهر عند الكشف أو تتبع أثر الفوالق والتي تتحكم في إنسياب السوائل الحرارية. يكون غالبا للتدرج الحاد لشاذات الجهد الذاتي مصاحبة لنطاقات الفوالق الحاوية على السوائل الحرارية، بينما الإتساع، نسبيا يقارن بشاذات جهد ناعم مضطرب بمناطق الإنسياب الحراري.

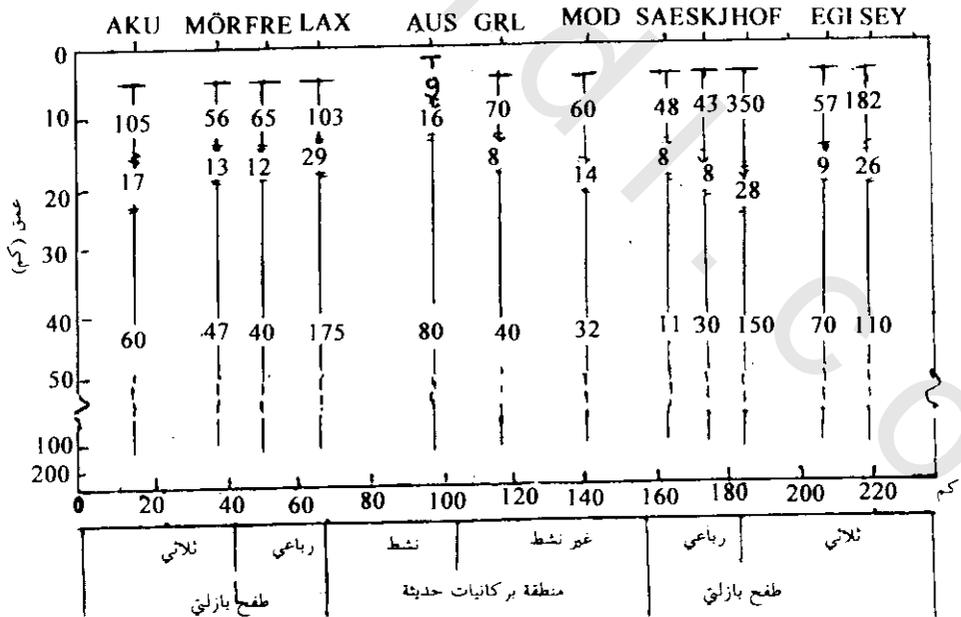
ساد إستخدام طرق للتنقيب عن الحرارة الأرضية في عدد من المناطق، حيث يمكن إستخدامها بمميزات في مواقع لايمكن استخدام الطرق الكهربائية بها بفعولية، مثال ذلك، مناطق تكوينات السطوح العالية المقاومة. الميزة الأخرى، والتي لا تمتلك بواسطة طرق التيار المستمر، هي أن العمق المخترق يختلف بواسطة تبدل إشارة التردد بدون تغير هندسة نظام الحقل. أعطى كلر Keller 1971 وكلر و رابولا Keller and Rapella 1974 مراجع تطبيقات طرق الكهربائية والكهرومغناطيسية في إكتشاف الحرارة الأرضية. يمثل شكل (10-16) (شرق وغرب أيسلاند Iceland)، (10-17) (منطقة AFAR الحارة) جس ماجنتوتيليورك (MT) لدراسة تغيرات التوصيلية المسببة بواسطة مصادر حرارية عميقة في أماكن مختلفة.



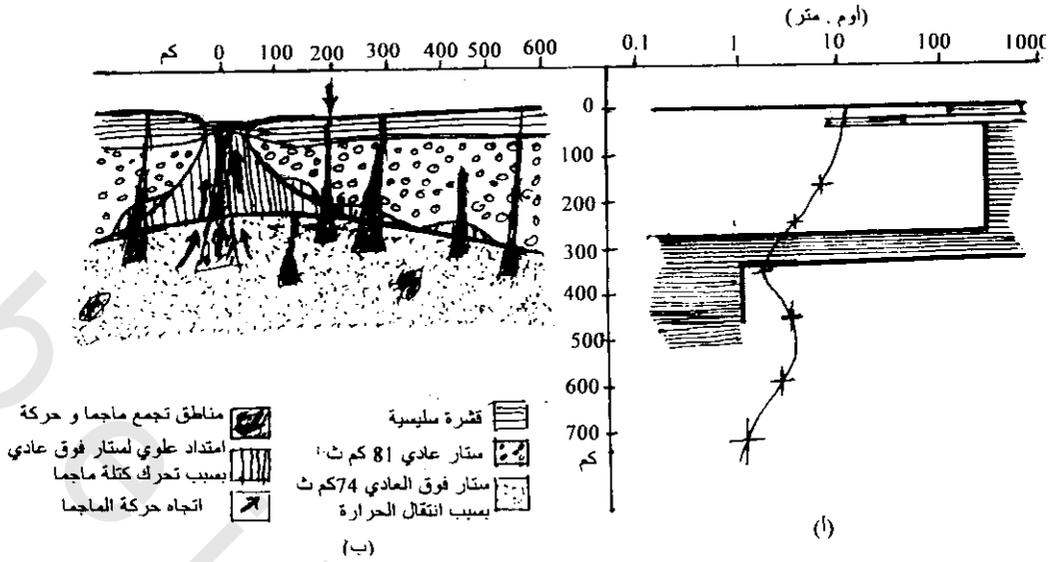
شكل (10-14): بيانات بروفيلات أفقية للمقاومة مع جهد ذاتي (SP)، حث ذاتي (IP) تشير الأسهم إلى حركة البخار والماء، AO أبعاد أقطاب التيار الكهربى، MU أبعاد أقطاب الجهد، AB/2 أبعاد شلبرجير لمنحنيات جس رأسى (زهدى وآخرين (Zohedy et al 1973



شكل (10-15): بروفيلات تدرج حراري وجهد ذاتي عبر فائق قبي، عين روزفلت الحرة، يوتاوا، Roselvelt Hots Spring، Utah، تشير الأسهم للنقط التي عندها خرطت الفوالق بواسطة المساحة الجيولوجية قاطعة خط مسح الجهد الذاتي (كوروين وهوفر 1979 Corwin and Hoover)



شكل (10-16): نماذج لثلاث طبقات على طول شرق-غرب بروفيل مجنتيورك (MT) محسوبة من فترة زمنية قصيرة (15 ثانية إلى 1 ساعة) لقياسات مقاومة ظاهرية. تدل المنطقة المهشرة على طبقة منخفضة المقاومة بالقرب من حد القشرة - الستار مقتربة من السطح الداخلى فى بركانيات حديثة. تدل الأرقام على المقاومة (أوم متر). (ببلو وبجورنسون 1978 Beblo and Bjornsson)



شكل (10-17): (أ) توزيع مقاومة-عمق مشتقة بواسطة قياسات ماجنيتو تيليورك (MT) طويلة الفترة. ترى المنطقة المهشمة حدود المقاومات الصغرة والكبرى. للمقارنة، فإن بروفيل مقاومة العمق لمنطقة حرارة هواي Hawaii تدرج كمنحنى مسلسل (منتظم) (لارسن 1975). (ب) نموذج صخري مقترح بواسطة جاس 1975 Gass للقبعة الأفريقية - العربية (أفرو-أرابيان Afro-Arabian) في أثيوبيا Ethiopia. يشير السهم العلوي على المكان التقريبي لموقع قياس مقابل الأخدود الرئيسي (المركزي) (هاك 1980 Haak)