ن. فیزیک زمین و فضا، جلد ۲۶، شماره ۱، (۱۳۷۹)، صفحهٔ ۲۷ - ۳۳

طراحی و ساخت یک دستگاه دو میله برای اندازه‌گیری ضریب رسانش گرمایی سنگها

عباسعلی علی‌اکبری‌بیدختی * و محمد نظریان **

چکیده

ضریب رسانش گرمایی یک عامل بسیار متغیر وابسته به خواص و ساختار سنگها و بسیار مهم برای اندازه‌گیری شار گرمای زمین محسوب می شود. در این مقاله با معرفی یک دستگاه دو میله که براساس شار گرمایی معلوم در یک نمونه سنگ به صورت مانا کار می کند، ضریب رسانش گرمایی چند نمونه سنگ از مکانهای مختلف ایران اندازه‌گیری شده و با مقادیر گزارش شده توسط افراد دیگر مقایسه و بحث می‌شود. دستگاه مذکور که توسط امکانات موجود طراحی و ساخته شده، با یک نمونه استاندارد آزمایش شده و خطایی حدود یک درصد دارد. دستگاه توسط یک کامپیوتر کنترل می‌شود و تقریبا به طور خودکار ضرایب و مقادیر مورد نیاز به ویژه ضریب رسانش گرمایی را می دهد. نحوه تهیه و جاگذاری نمونه سنگ در دستگاه بسیار مهم است و خطای دستگاه می‌تواند به آن وابسته باشد و خطای یک درصد ذکر شده، مربوط به زمانی است که این کار بدرستی انجام شده باشد. با استفاده از ضریب رسانش گرمایی اندازه‌گیری شده و شیو زمین گرمایی چند منطقه در ایران، مقدار شار زمین گرمایی این مناطق تخمین زده شده است که بر اساس این داده‌ها، به طور متوسط، از حدود ۴۵ تا ۷۰ mW/m^2 متغیر است.

کلیدواژه‌ها : رسانش گرمایی، شیو زمین گرمایی، شار زمین گرمایی، دستگاه دو میله

۱ مقدمه

شار گرمای زمین که به طور متوسط در سطح کل زمین حدود ۵۰ mW/m^2 است، یکی از مقادیر بسیار مهم از نظر زمین گرمایی و همینطور نحوه بالغ شدگی میدانهای نفتی (بریگاد[1] و همکاران، ۱۹۹۲) و زغالی زمین می‌باشد. یکی از عوامل بسیار مهم برای تخمین شار، ضریب رسانش گرمایی سنگهای پوسته زمین بوده که باید دقیقا اندازه‌گیری شود (جسوپ[2]، ۱۹۹۰).

روشهای متعددی برای اندازه‌گیری ضریب رسانش گرمایی سنگها و سایر مواد وجود دارد که هر کدام دارای ویژگیهای خاصی می‌باشد (هورای و شنکلند[3]، ۱۹۸۷). البته روشهای اندازه‌گیری ضریب رسانش گرمایی سنگها به طور کلی بر اساس نحوه کار آنها به دو گروه مانا[4] و غیرمانا میزان شار گرمایی در دستگاه تقسیم می‌شوند. اساس روشهای غیرمانا بر تغییرات منظم شار گرمایی در یک نمونه به صورت موج گرمایی استوار است. بنابراین بر پایه فاز موج گرمایی در عمقهای مختلف

* مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، صندوق پستی ۶۴۶۶-۱۴۱۵۵، تهران.
** مرکز ملی اقیانوس‌شناسی - تهران، خیابان بزرگمهر.

1. Brigaud
2. Jessop
3. Horai and Shankland
4. steady

نمونه می‌توان ضریب رسانش گرمایی را بدست آورد. قابل ذکر است که مثلا از تغییرات موج گرمایی روزانه سطح زمین در اثر گرمایش خورشید می‌توان خواص گرمایی لایه‌های سطحی خاک را بدست آورد (آریا[1]، ۱۹۸۸). این اندازه‌گیری به نحوی شبیه به روشهای غیرمانا می‌باشد. روشهای مانا بر اساس ایجاد شار گرمایی ثابتی در یک نمونه و شیوهای حاصل از آن کار می‌کنند. روش دو میله از جمله روشهای مانا است.

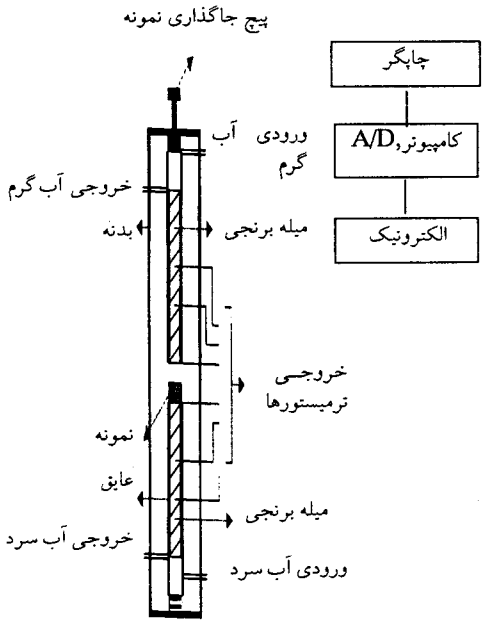
دستگاه دو میله نیز دارای طرحهای متفاوت از نظر ساختاری است، ولی با توجه به اینکه سطح مقطع نمونه‌ای که ضریب رسانش گرمایی آن با این دستگاه اندازه‌گیری می‌شود بزرگ است و بنابراین اغلب کانیهای سازنده سنگ را در بردارد، از نظر دقت یکی از متداول‌ترین روشها است. بزرگی نمونه که با دربرگیری اغلب کانیهای سنگ همراه است، خواص گرمایی متوسط بهتری را می‌دهد.

از طرفی با توجه به اینکه می‌توان آنرا توسط کامپیوتر کنترل نمود (مثل دستگاهی که اینجا طراحی و مورد استفاده قرار گرفته است)، می‌تواند دستگاه بسیار مناسبی برای اندازه‌گیری رسانش گرمایی سنگها باشد.البته این دستگاه دارای ابعاد بزرگی بوده و استفاده از آن تنها در آزمایشگاه مقدور است.برای استفاده میدانی می‌توان دستگاه کوچکی ساخت.

۲ نحوه کار دستگاه دو میله

دستگاه دو میله طراحی و ساخته شده در این پژوهش که بر اساس شار گرمای ثابت با زمان کار می‌کند، در شکل ۱ دیده می‌شود.

قسمت عمده آن شامل دو میله برنجی همگن



شکل ۱. ساختار دستگاه دو میله طراحی و ساخته‌شده

هر کدام به قطر ۴ سانتیمتر و طول ۴۹ سانتیمتر می‌باشد که بین آنها نمونه سنگ به قطر مشابه قرار می‌گیرد. در انتهای یکی از میله‌ها آب گرم با دمای ثابت و در انتهای دیگر آب سرد با دمای ثابت گردش می‌کند. میله‌ها از خارج کاملا عایق شده و توسط ترمیستورهایی که در نزدیک محور میله برنجی جاسازی شده، دماهای آن مرتب اندازه‌گیری می‌شود (برای جزییات بیشتر به نظریان، ۱۳۷۷ مراجعه کنید). قسمت مکانیکی دستگاه باعث بسته و باز شدن فاصله بین دو میله شده و بنابراین جاسازی نمونه را ممکن می سازد. ضخامت نمونه می تواند تا ۷ سانتیمتر باشد.

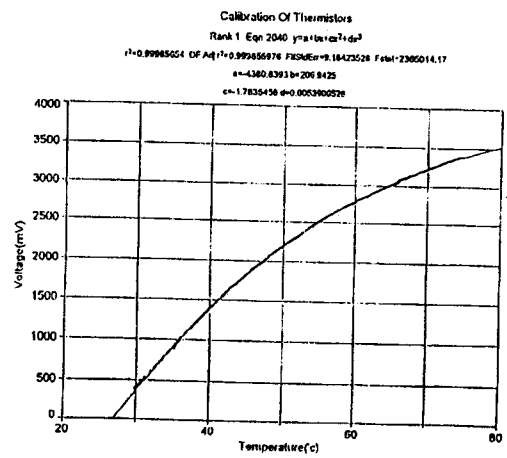
سیستم دو میله در یک محفظه شفاف پلکسی گلاس قرار می‌گیرد، بنابراین اثر حرکات هوا در اطراف سیستم و تبادل گرما، با آن راکم می‌کند.

برای اندازه‌گیری دما در طول میله از

1. Arya

ترمیستورهای با دقت ۰/۰۱°C استفاده شده که توسط کامپیوتر همراه سیستم زینه‌بندی می‌شوند. موجکهای متناسب با دما که توسط دستگاه الکترونیکی طراحی شده در موسسه ژئوفیزیک (بر اساس پل وتستون) ایجاد می‌شود، با یک کارت A/D رقمی شده وکامپیوتر توسط یک برنامه مدون می‌تواند سیستم راکنترل نماید.

شکل ۲ نمونه‌ای از منحنی زینه‌بندی یکی از ترمیستورهای دستگاه می‌باشد که توسط یک تابع



Temperature(C)

شکل ۲. نمونه‌ای از زینه‌بندی یکی از ترمیستورهای الکترونیکی دستگاه

درجه ۳ برازش شده است. این منحنی‌ها می‌توانند دما را با دقت ۰/۰۱°C بدهند. شار گرمایی در طول میله ایجاد می‌شود، که از رابطه زیر بدست می‌آید

$$Q = -S_r K_r \left[\frac{\partial T}{\partial Z}\right]_r \qquad (۱)$$

که در آن Q شار گرما (W/m^2)، S_r سطح مقطع میله (m^2)، K_r ضریب رسانش گرمایی (W/mK) و $\left[\frac{\partial T}{\partial Z}\right]_r$ شیو قائم دما (K/m) درطول میله است. شار گرما در نمونه باید مشابه میله باشد، بنابراین شار گرما در نمونه عبارتست از

$$Q = -S_s K_s \left[\frac{\partial T}{\partial Z}\right]_s \qquad (۲)$$

که s مربوط به نمونه می‌باشد. با توجه به مساوی بودن این شار در طول سیستم می‌توان نوشت

$$K_s = K_r \frac{\left[\frac{\partial T}{\partial Z}\right]_r}{\left[\frac{\partial T}{\partial Z}\right]_s} \qquad (۳)$$

با اندازه‌گیری شیوهای دما در طول میله‌ها ودر طول نمونه و باداشتن ضریب رسانش گرمایی میله (K_r= ۱۴۰ W/mK در دمای ۴۰°C) می‌توان K_s رابدست آورد.

نرم‌افزار ساخته شده برای کنترل دستگاه مرتب دماها را در قسمتهای مختلف اندازه‌گیری کرده و روی مانیتور کامپیوتر نمایش می دهد. هنگامیکه دماها به صورت ثابت (مانا) با زمان در آمد، ضریب رسانش گرمایی محاسبه و روی دستگاه چاپگر چاپ می‌شود.

دمای آب گرم در حدود ۷۰°C و دمای آب سرد حدود ۲۰°C برای کار دستگاه مناسب به نظر می‌رسد. نمونه تهیه شده حتی الامکان باید هم قطر میله‌ها (۴ سانتیمتر) و سطوح آن باید توسط گریس هادی مثل گریس سیلیس پوشانده شود که تماس نمونه با میله‌ها خوب باشد. مانا شدن سیستم از هنگام روشن کردن دستگاه حدود ۲ ساعت طول می‌کشد و تا حدی به ضخامت نمونه و ضریب رسانش گرمایی آن وابسته است (جسوپ، ۱۹۹۰)، دمای متوسط نمونه برای این حالت حدود ۴۰°C است.

۳ نتایج

با استفاده از دستگاه ساخته شده ابتدا بیش از ده بار سیلیس غیر متبلور گداخته شده استاندارد، با K_s شناخته شده مورد اندازه‌گیری قرارگرفت. هر نوبت میزان خطای مطلق، نسبی و درصد خطای اندازه‌گیری برآورده شده و نتایج در جدول ۱ ثبت شده است.

پس از اینکه دستگاه به حالت تعادل رسید، (توسط استفاده کننده با مشاهده مقادیر تکرار شده ضریب رسانش گرمایی اندازه‌گیری می‌شود و روی صفحه مانیتور کامپیوتر، مشخص می‌شود مرحله اندازه‌گیری شروع شده است). در این مرحله، دستگاه برای ده بار اندازه‌گیری می‌کند (با فاصله زمانی قابل تغییر که اینجا حدود یک دقیقه انتخاب شده است) و سپس مقدار میانگین ضریب رسانش گرمایی را محاسبه می‌کند. انحراف معیار از میانگین برای این ده اندازه‌گیری، خطاهای نسبی و درصد خطا را نیز محاسبه می‌کند. اما خطای مطلق از اختلاف میانگین هرنوبت با میانگین ۱۰ نوبت اندازه‌گیری بدست آمده‌است. خطای مطلق هنگامیکه مقدارمیانگین ضریب رسانش گرمایی در هر نوبت کمتراز مقدار میانگین ۱۲ نوبت باشد، منفی است و برعکس.

اختلاف در اندازه گیریها مربوط به چند عامل است، یکی از آنها تغییرات دمای نمونه در نوبتهای مختلف است (تا ۳/۷ °C) که خطایی حدود ۰/۰۰۱W/mK ایجاد می‌کند و نسبت به خطای برآورد شده کوچک است. اما قسمت عمده این اختلاف مربوط به نحوه جاسازی نمونه و نحوه تماس بین‌نمونه و میله‌ها، که بسیار مهم است ، می‌باشد.

جدول ۱. اندازه‌گیری دمای متوسط و ضریب رسانش گرمایی سیلیس غیر متبلور گداخته شده در ۱۲ نوبت اندازه‌گیری همراه با خطای آنها.

شماره‌اندازه‌گیری	دمای متوسط‌نمونه (°C)	ضریب‌رسانش‌گرمایی W/M°K	خطای مطلق	خطای نسبی	درصد خطا
1	42.12	1.396	-0.015	0.011	1.1
2	43.83	1.424	0.013	0.009	0.9
3	43.72	1.394	-0.017	0.012	1.2
4	43.87	1.411	0.0	0.0	0.0
5	45.86	1.449	0.038	0.026	2.6
6	44.37	1.383	-0.028	0.02	2.0
7	42.14	1.398	-0.013	0.009	0.9
8	43.87	1.409	-0.002	0.001	0.1
9	43.85	1.416	0.005	0.004	0.4
10	43.86	1.411	0.0	0.0	0.0
11	43.74	1.44	0.029	0.02	2.0
12	42.14	1.40	-0.011	0.008	0.8
مقدار متوسط	43.83	1.411	0.0	0.01	1.0

جدول ۲. اندازه‌گیری ضریب رسانش گرمایی چند نمونه سنگ همراه با ابعاد، شیو دما، دمای متوسط و ترکیب کانی شناسی هر یک.

محل سنگ	ترکیب کانی شناسی	ضریب رسانش گرمایی (W/m.K)	گرادیان دما (K/cm)	دمای نمونه (°C)	ضخامت (cm)	قطر (cm)	نمونه سنگ	شماره
چالوس	کلسیت	2.42	7.799	45.98	1.35	4.1	سنگ آهک	1
منطقه سراب	فلدسپار، نفلین، پیروکسین، آنالسیم سینیت	1.61	11.484	45.89	0.85	4.0	آنالسیم سینیت	2
البرز مرکزی	فلدسپار، کوارتز، پیروتیت	1.85	10.385	45.63	1.0	4.2	میکروسینیت	3
البرز مرکزی	پیروتیت، فلدسپار، کوارتز، سیدریت	1.94	9.833	45.09	1.0	4.2	پیروتیت	4
همدان	فلدسپار، کوارتز، مسکویت، تورمالین	1.63	11.873	46.14	1.0	3.8	پگماتیت	5
طالقان	پلاژیوکلاز، پیروکسین، الیوین، مگنتیت	1.69	11.29	45.33	1.1	4	گابرو- دیوریت	6
جاسک	کلسیت، کوارتز، ذرات سنگ	2.01	8.504	44.32	1.35	4	سنگ آهک ماسه‌ای متخلخل	7
	فلدسپار، پیروکسین، مگنتیت، هورنبلند	1.81	9.624	45.49	1.0	4.1	تراکی آندزیت	8

بر اساس این اندازه‌گیریها خطای اندازه‌گیری حدود ۰/۰۱W/mK است (حدود یک درصد). خطای دستگاه با مقادیر گزارش شده دیگران قابل مقایسه است (جسوپ، ۱۹۹۰ و هورای و شنکلند، ۱۹۸۷).

بعداز اینکه دستگاه با نمونه استاندارد آزمایش و خطای آن برآورد شد، ضریب رسانش گرمایی هشت نمونه از سنگهای گوناگون از نقاط مختلف ایران اندازه‌گیری شد. این سنگها عبارتند از سنگ آهک (سازند چالوس) با همگنی نسبتا خوب با ضخامت ۱/۳۵ سانتیمتر و قطر ۴/۱ سانتیمتر وکانی اصلی آن کلسیت است، آنالسیم سینیت به ضخامت ۰/۸۵ سانتیمتر و قطر ۴ سانتیمتر که دارای همگنی مناسب‌است، میکروسینیت نمارکه دارای رگه‌های پیروتیت بوده و قطر آن ۴/۲۵ سانتیمتر و ضخامت آن ۱ سانتیمتر است، پگماتیت با همگنی نسبتا خوب با قطر ۳/۸ سانتیمتر و ضخامت ۱ سانتیمتر و دارای کوارتز زیاد، گابرودیوریت با قطر ۴ سانتیمتر و ضخامت ۱/۱ سانتیمتر و سنگ آهک ماسه‌ای با قطر ۴ سانتیمتر و ضخامت ۱/۳۵ سانتیمترکه با توجه به تخلخل زیاد توسط آب اشباع و با گریس سیلیس عایق رطوبتی با محیط شد و بالاخره آندزیت سد لار با قطر ۴/۱ سانتیمتر و ضخامت ۱ سانتیمتر و دارای ریز بلورهای آذرین. نتایج اندازه‌گیریهای انجام شده در جدول شماره ۲ آمده است.

مقادیر اندازه‌گیری شده برای این نمونه‌ها با مقادیر گزارش شده توسط افراد دیگر همخوانی خوبی دارد (جسوپ، ۱۹۹۰ و مکنا[1] و همکاران، ۱۹۹۶). البته برای برآورد دقیق ضریب رسانش گرمایی هر منطقه لازم است در زمان حفاری، نمونه‌هایی از عمقهای مختلف گرفته شده و اندازه‌گیری شوند.

۴ بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به امکانات موجود یک دستگاه رسانش گرمایی از نوع دو میله طراحی و ساخته شده است. نرم‌افزار دستگاه قادر است به راحتی مشخصه‌های

1. Mckenna

دستگاه و نمونه را همراه زمان به استفاده کننده بدهد. دستگاه بعد از حدود ۲ ساعت به حالت تعادل رسیده و مقدار ضریب رسانش گرمایی و دمای نمونه را ثبت می‌کند. یکی از نکات بسیار مهم که در هنگام استفاده از دستگاه، باید رعایت شود این است که اولا قطر نمونه نباید خیلی با قطر میله‌ها (۴cm) متفاوت باشد و ثانیا ارتباط سطوح نمونه با میله‌ها باید بسیار خوب برقرار شود. این عمل با استفاده از یک لایه گریس سیلیسی (هادی) مقدور می‌شود. افراد دیگر مثل هورای و شنکلند (۱۹۸۷) و جسوپ (۱۹۹۰) نیز به این نکته توجه خاصی دارند. این مورد می‌تواند عامل اصلی بروز خطا در اندازه‌گیری دستگاه باشد.

بر اساس اندازه‌گیریهای مکرر بر روی نمونه استاندارد کوارتز خطای دستگاه برای دامنه دمایی حدود ۲۰°C در حدود یک درصد برآورد شده است. لازم است این عمل بر روی نمونه‌های استاندارد دیگر از جنس متفاوت (با ضریب رسانش گرمایی متفاوت) نیز انجام شود. این نوع نمونه‌ها باید از خارج تهیه شوند و ما تنها موفق به گرفتن نمونه‌های کوارتز شده‌ایم.

با توجه به ابعاد دستگاه، استفاده از آن تنها در آزمایشگاه مقدور است. با کاهش ابعاد سیستم به ویژه طول میله‌ها (مثلا با اضافه نمودن لایه‌های غیرفلزی) می‌توان آن را برای اندازه‌گیریهای میدانی مناسب نمود. با طراحی خاص، برای بررسی اثرات سایر عوامل مثل دما، فشار، رطوبت و غیره بر روی ضریب رسانش گرمایی، می‌توان قسمت جاگذاری نمونه را تغییر داد، (هورای و شنکلند، ۱۹۸۷).

با استفاده از این دستگاه ضریب رسانش تعدادی از نمونه‌های سنگ از نقاط مختلف ایران اندازه‌گیری شد. نتایج حاصله با نتایج دیگران مثلا جسوپ، ۱۹۹۰، مکنا و همکاران، ۱۹۹۶ و بریگاد و همکاران، ۱۹۸۸ همخوانی خوبی دارد. دستگاه مذکور می‌تواند برای نمونه‌هایی از سنگهای مناطق دیگر مورد استفاده قرار گیرد.

با استفاده از ضریب رسانش گرمایی این سنگها و شیو زمین گرمایی که از چاههای حفاری شده شرکت نفت از مناطق مختلف ایران (عمدتا جنوبی)، (حسن زاده و همکاران، ۱۳۷۷)، بدست آمده، دامنه تغییرات شار زمین گرمایی در این مناطق (مناطقی که اندازه‌گیری وجود دارد) محاسبه شده است. دامنه این تغییرات به طور متوسط از حدود ۴۵ تا ۷۰ mW/m^2m می‌باشد (علی اکبری‌بیدختی، ۱۳۷۸). تغییرات شیو زمین گرمایی در بعضی از مناطق، بر اساس دماهای کف چاه، کاملا محسوس است که احتمالا مربوط به تغییرات نوع سنگ در عمقهای مختلف با ضریب رسانش گرمایی متفاوت است. بیشترین مقادیر مربوط به مناطق جنوبی خلیج فارس است که ضخامت پوسته زمین کمترین مقدار خود را دارا می‌باشد (حسن زاده و همکاران، ۱۳۷۷).

قدردانی

از کمک مالی معاونت پژوهشی دانشگاه تهران (طرح پژوهشی شماره ۶۵۱/۱/۲۶۵) قدردانی می شود.همچنین از آقای دکتر حسن‌زاده برای نظرات مفیدشان در رابطه با این کار و در اختیار قرار دادن نمونه‌ها، سپاسگزاری می‌شود.

منابع

Arya, P., 1988, An Introduction to Micro-meteorology, Academic Press.

Brigaud, F., Vasseur, G., and Caillet, G.,

1992, Thermal State of the North Viking Graben (North Sea) Determined From Oil Exploration Well Data: Geophysics, 57, **1**, 69-88.

Horai, K., and Shankland, T., 1987, Thermal Conductivity of Rocks and Minerals: Methods of Experimental Physics: AC. Press, **24**, 271-302.

Jessop, A. M., 1990, Thermal Geophysics: Elsevier, 21-56.

Mckenna, T. E., Sharp, J.M., and Lynch, F. L., 1996, Thermal Conductivity of Wilcox and Frio Sandstones in South Texas (Gulf of Mexico Basin): AAPG Bulletin, **80**, 1203-1215.

حسن زاده، ج.، اسماعیلی فرد، ص. و ظریفی، ز.، ۱۳۷۷، داده‌های زمین گرمایی ایران و تعبیرهای زمین ساختی آن: نشریه تحقیقاتی فیزیک زمین و فضا، ۲۴، ۱و۲، ۲۷.

علی اکبری بیدختی، ع.، ۱۳۷۸، مطالعه ضریب هدایت گرمایی سنگها برای تعیین شار گرمایی زمین در ایران: گزارش نهایی طرح تحقیقاتی شماره ۶۵۱/۱/۲۶۵ موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران.

نظریان، م.، ۱۳۷۷، طراحی و ساخت یک دستگاه اندازه‌گیری رسانش گرمایی سنگها به روش دو میله و اندازه‌گیری چند نمونه سنگ، پایان نامه کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران.