

ارتباط داده‌های زمینگرمایی با ساختار زمین‌شناختی ساختگاه سد سلمان فارسی

محمدعلی ریاحی*، رضا نظریان** و عباس ابراهیمی علویجه*

چکیده

در مطالعه حاضر سعی بر آن شده است تا ضمن معرفی شیوه اندازه‌گیری گرمای درون چاهی در اعماق کم، ارتباط بی‌هنجاری‌های گرمایی مشاهده شده با پدیده‌های زمینساختی واقع در محدوده لایه‌های رسوبی پوسته زمین نشان داده شود. بدین منظور داده‌های حاصل از اندازه‌گیری‌های درون چاهی در ساختگاه سد سلمان فارسی واقع در جنوب شیراز از نقطه نظر زمینگرمایی مورد مطالعه قرار گرفت. برای اینکار ابتدا نمودارهای دما نسبت به عمق تهیه و سپس با استفاده از عمل برازش خطی بررسی مقدماتی انجام شد. این بررسی نشان داد که یک بی‌هنجاری گرمایی بالا در محل ساختگاه سد وجود دارد. در این مرحله با استفاده از معادله گرمای فوریه مقادیر شیو زمینگرمایی منطقه تخمین زده شد. با استفاده از اطلاعات زمین‌شناختی منطقه مورد مطالعه، یک گسل محلی بعنوان عامل بی‌هنجاری گرمایی مشاهده شده شناخته شد.

کلید واژه‌ها: شیو زمینگرمایی، بی‌هنجاری گرمایی، چاه‌نگاری

۱ مقدمه

نواحی با رژیم فرورانش را می‌توان مشاهده کرد. اما در کارهای مربوط به ژئوفیزیک مهندسی و زیستی هدف از اندازه‌گیری گرما با آنچه که در کارهای مربوط به تعیین شیو زمینگرمایی^۱ یک منطقه بزرگ زمین صورت می‌گیرد متفاوت است. با توجه به این اصل که رسانش گرمایی لایه‌های مختلف زمین متفاوت از یکدیگر می‌باشد، تعیین لایه‌های مختلف زمین با توجه به رسانش گرمایی و نیز تعیین کیفیت جریانهای آب زیرزمین و اثر آن بر مسایل زیستی انسان، از اهداف این کارها است. ملاحظه شده است که کاوش گرمایی زمین حتی در عمقهای ۱/۵ تا ۲/۵ متری می‌تواند ساختارهای عمیق زمین

اندازه‌گیری دما در چاهها شاید یکی از قدیمی‌ترین شیوه‌های چاه‌نگاری است و قدمت آن به سال ۱۶۶۹ میلادی باز می‌گردد. اهمیت این شیوه تاکنون بطور روزافزونی مورد توجه قرار گرفته است، زیرا علاوه بر سادگی روش میزان اطلاعات حاصل بسیار با ارزش و ضروری است. در نواحی با رژیمهای زمینساختی فرورانشی و فشارشی، چنانکه انتظار می‌رود جریان شارش گرمایی زیادتر از حد انتظار است. هر جا که حضور گنبدیهای نمکی در این مناطق مشاهده می‌شود مانند صفحه ایران و صفحه عربی، شار گرما به صورت ناحیه‌ای افزایش می‌یابد و حداکثر شارش گرمایی در

1. thermal gradient

* موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، صندوق پستی ۶۴۶۶-۱۴۱۵۵، تهران.
** شرکت ول سرویس ایران، خیابان شهید بهشتی، تهران.

گرمایی است.

۱.۲ منشا گرما در عمق زمین

منشا گرما در عمق زمین صرف نظر از شیو زمینگرایی زمین که عمدتاً در پوسته و ناشی از فعالیت عناصر رادیواکتیو می‌باشد، در نزدیکی سطح آن ناشی از فعالیتهای زمینساختی شامل انرژی تولید شده توسط زلزله‌ها، گسلش و جابجایی صفحات گسل می‌باشد. همچنین واکنشهای شیمیایی بویژه در نواحی نفت خیز در ایجاد جریانهای گرمایی حاصل از توده‌های نفوذی و انتقال حرارت ناشی از رسانش توده‌های هادی مانند نمک، نیز موثر است.

۲.۲ نگار دما

در سال ۱۶۶۹ میلادی آتاناسیوس کیرشر^۲ به اندازه‌گیری گرمای سنگها اقدام نمود (پولاک^۳ و همکاران، ۱۹۹۳). بعدها در سال ۱۸۳۰ میلادی اندازه‌گیری‌های قابل اعتمادتری با استفاده از دماسنجهای سرریزی^۴ انجام شد (پولاک و همکاران، ۱۹۹۳). در سال ۱۹۲۴ میلادی استراند^۵ اندازه‌گیری‌های دقیقی با دماسنج‌های نوع بیشینه^۶ انجام داد (پولاک و همکاران، ۱۹۹۳). سپس گرماسنج‌های نوع مقاومتی^۷ برای ثبت پیوسته گرمای درون چاه بکار گرفته شد، و اخیراً ترمیستورها^۸ بطور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

اندازه‌گیری گرما برحسب عمق برای بررسی وجود ناهمگنی‌های مربوط به نوع سنگ درون چاه، جریان مایعات و گازها، محل ورود گاز به

را نشان دهد (پولی و استونینک^۱، ۱۹۷۰). آنها در مطالعه مذکور نشان دادند که باید به این نکته توجه داشت که بی‌هنجاریهای گرمایی در اعماق ۱/۵ متری می‌تواند به خوبی بیانگر همانگونه بی‌هنجاریها در اعماق زیاد باشد.

۲ فیزیک زمینگرایی و انتقال گرما

انرژی گرمایی هنگام جابجایی در اجسام از قوانین ساده‌ای پیروی می‌کند. برای درک بهتر این پدیده غالباً از مدل میله باریکی استفاده می‌شود که گرما در آن از نقطه A به نقطه B به فاصله x جریان دارد. با تقریب این مدل برای حالت یک بعدی می‌توان نوشت

شار انرژی = نرخ تغییرات انرژی در واحد زمان تولیدی داخل جسم + شار انرژی عبوری از فاصله محدود در واحد زمان

یعنی

$$\frac{\partial e}{\partial f} = \frac{-\partial q}{\partial x} + Q \quad (1)$$

که e چگالی انرژی گرمایی در واحد حجم، Q شار انرژی تولید شده در داخل جسم و q شار انرژی گرمایی در واحد سطح در واحد زمان است. از طرف دیگر $q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}$ است که در آن T دما و λ رسانش گرمایی می‌باشد. با جایگذاری این رابطه در معادله ۱ خواهیم داشت

$$\frac{\partial e}{\partial f} = \frac{-\partial}{\partial x} \left(-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + Q \quad (2)$$

و $e = CpT$ که در آن ρ ظرفیت گرمایی بر واحد حجم سنگ و C گرمای ویژه می‌باشد. باید توجه داشت که $\lambda = k\rho C$ می‌باشد که k همان ضریب نفوذ

1. Poley & Steveninck

2. Athanasius Kircher

3. Pollack

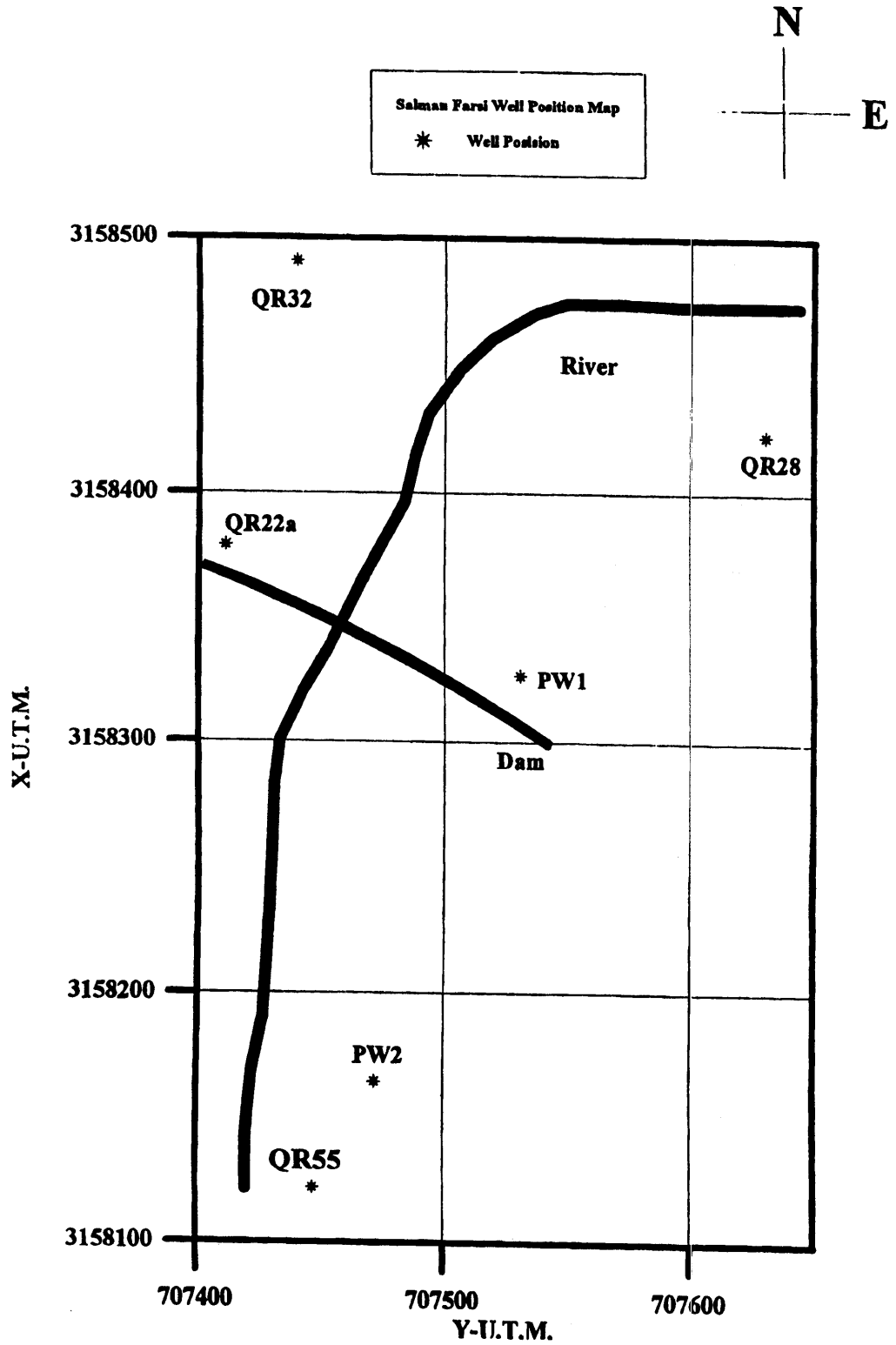
4. overflow thermometer

5. Ostrander

6. maximum thermometer

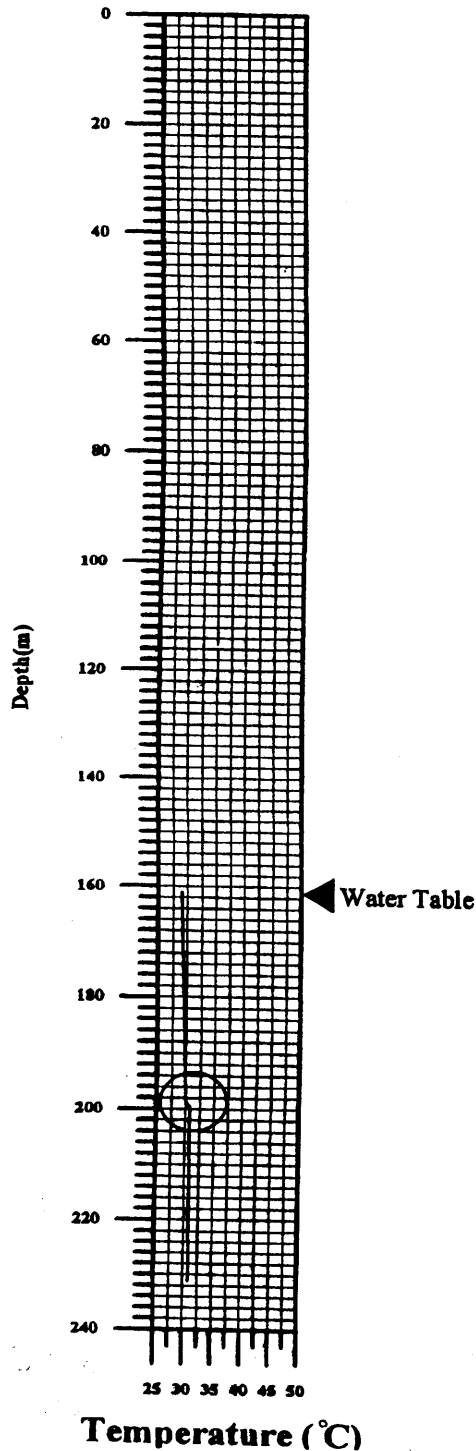
7. resistance thermometer

8. thermistor



شکل ۱. محل تقریبی چاههای مورد مطالعه.

Water Well [Temperature]



شکل ۲. وضعیت دما در داخل چاه آب.

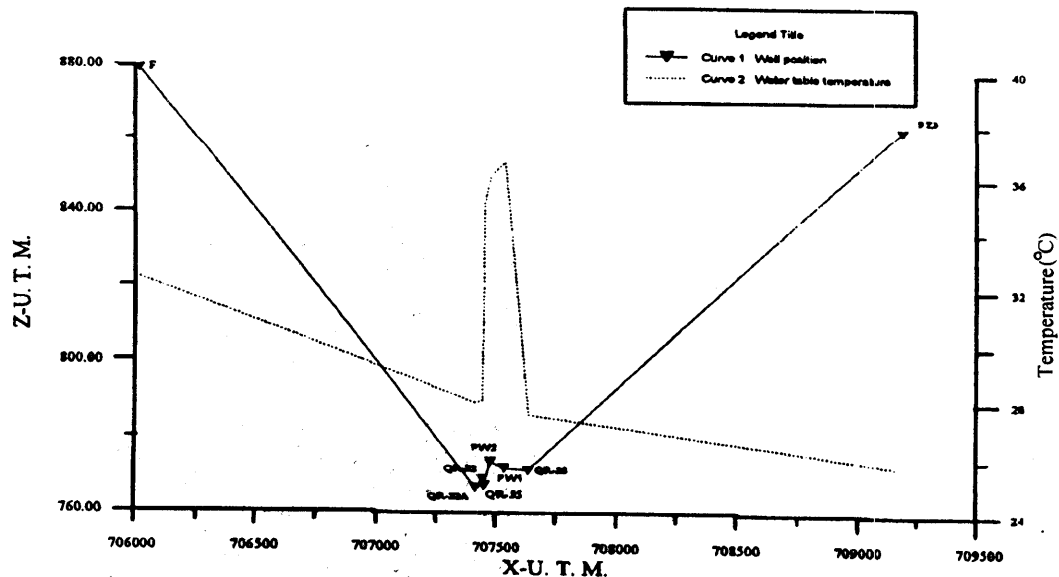
درون چاه، وجود کانال گازی، نشت جداره‌ها، ورود آب و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای اندازه‌گیری‌های اختلاف دما، دو عدد ترمیستور در فاصله ۱/۵ الی ۲ متری (در آزمایش حاضر در فاصله ۱ متری) قرار داده می‌شود و اختلاف دمای دو ترمیستور را محاسبه می‌کنند که این اختلاف با شیو زمین‌گرمایی در هر نقطه متناسب است. در یک سازند یکنواخت نمودار حاصل یک خط راست است. نوع گرمای ناهمخوان را می‌توان بسادگی نسبت به خط مبنای شیو تشخیص داد. وجود ترمیستورها باعث شده تا بتوان نگار دما را بصورت پیوسته بر روی کاغذ ثبت نمود (گورباچف^۱ و همکاران، ۱۹۹۵).

۳ شرح آزمایشها

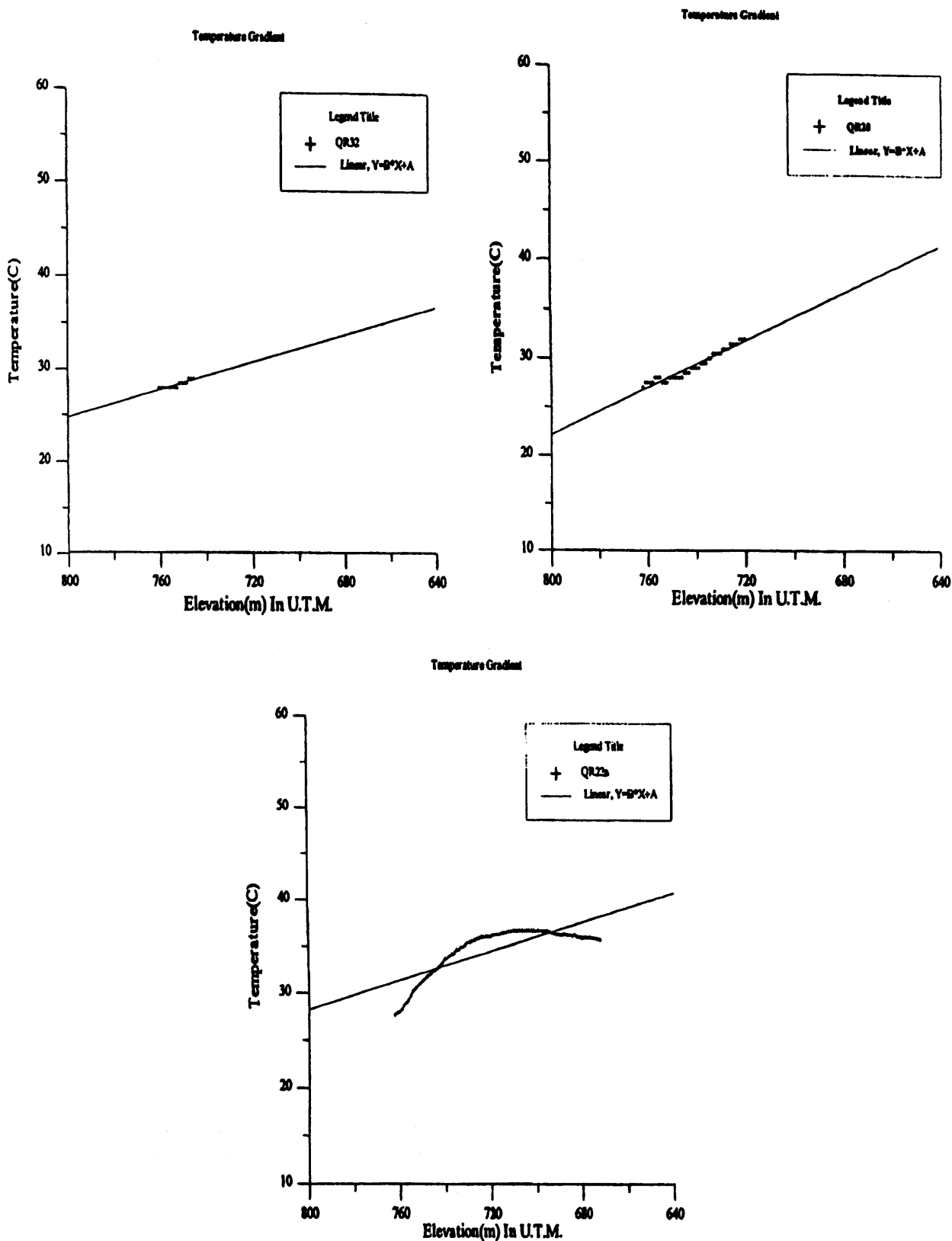
در زمستان سال ۱۳۷۶ و بهار سال ۱۳۷۷ اندازه‌گیری داده‌های درون چاهی بر روی نه حلقه چاه در محل ساختگاه سد سلمان فارسی (شکل ۱) انجام شد. هدف از این مطالعات شناسایی دقیق لایه‌های زیرزمینی تا ژرفای متوسط ۱۰۰ متر، ارتباط بین لایه‌ها و وضعیت زمین‌ساختی در منطقه مورد مطالعه بود. پس از بررسی تمام نگارهای بدست آمده، نگاه اصلی متوجه نگارهای دما شد که در آن رفتار گرمایی هر چاه مورد بررسی قرار گرفت. اولین آزمایش انجام شده مربوط به چاه آبی بود که به منظور تامین آب آشامیدنی ساکنین آینده محل احداث سد حفر شده بود. کیفیت پایین آب آشامیدنی و دمای بالای آن مسئولین را به این فکر واداشته بود که تغییرات گرما و کیفیت آب درون چاه، مورد بررسی قرار گیرد. همانگونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود در عمق ۱۹۹ متری درون

نزدیکی و یا در محل ساختگاه سد حفر شده است. در نزدیکی گمانه‌های PW1 و QR55 چشمه‌های آب گرم با دمای حدود 41°C وجود دارد که در طول مدت اندازه‌گیری در محل مورد نظر بطور دایم دمای آب چشمه‌ها و نیز دمای آب رودخانه در ساعت معینی از روز طی مدت چند ماه اندازه‌گیری شد، ولی ارتباط مشخصی بین تغییرات دمای آب رودخانه یا همان آب سطحی منطقه و دمای آب چشمه‌های آب گرم مشاهده نشد. تغییرات غیر یکنواخت مقادیر اندازه گرفته شده بر روی نگار دمای چاهها، سبب شد تا برای هر چاه بطور جداگانه شیو زمینگرمایی رسم شود (شکل‌های ۴a و ۴b). هم چنین برای کلیه چاهها شیو کلی محاسبه و رسم شد (شکل ۵a). با توجه به نمودار مذکور، مشاهده شد که از نظر توزیع گرما تفکیک چاهها به دو گروه مجزا امکان پذیر است. لذا برای این دو دسته از چاهها نیز شیو زمینگرمایی بطور جداگانه محاسبه و رسم شد (شکل‌های ۵b و ۵c).

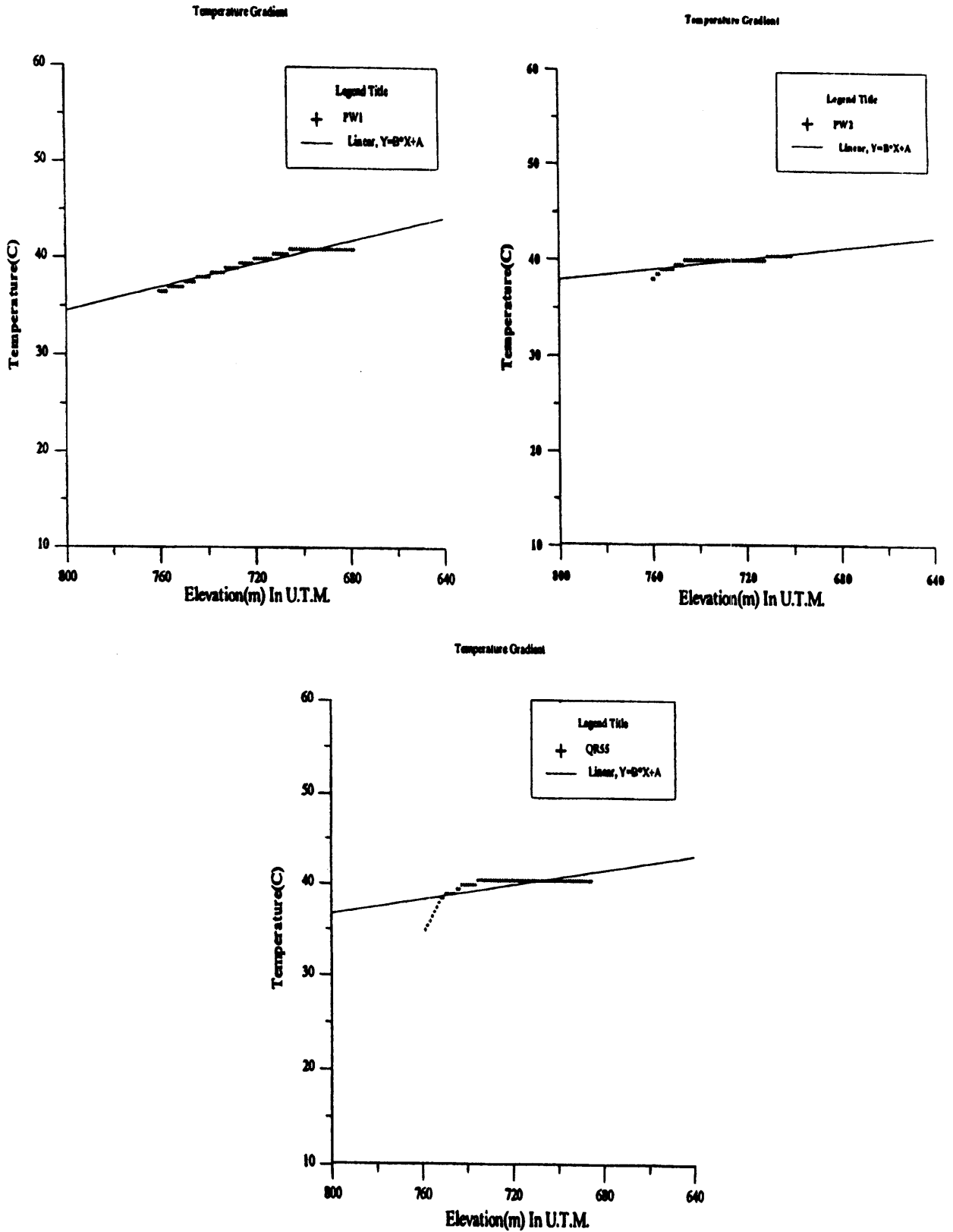
چاه ورود یک جریان آب گرم موجب افزایش ناگهانی دمای درون چاه شده است. احتمالاً یکی از علل عمده بدی کیفیت آب درون چاه که با فاصله نسبتاً زیادی از محل احداث سد حفر شده است ورود جریان آب گرم و املاح همراه با آن می‌باشد. گذشته از مطلب مذکور وضعیت ویژه زمینگرمایی منطقه بویژه در ساختگاه سد ما را بر آن داشت تا دقت بیشتری نسبت به توزیع گرمای منطقه و احتمالاً ارتباط این وضعیت با ساختارهای شناخته شده زمین شناسی صورت گیرد. شکل ۱ محل تقریبی چاههای مورد نظر را نشان می‌دهد که در این شکل سه حلقه چاه از جمله چاه آب بدلیل بعد مسافت گنجانده نشده است. شکل ۳ محل نسبی چاهها را در راستای شرقی غربی نشان می‌دهد که به همراه آن گرمای سطح آب هر چاه آورده شده است. این شکل تا حدی بیانگر این مطلب است که اساساً چرا توجه اصلی به نواحی مرکزی جلب شده، یعنی جایی که ۶ حلقه چاه در



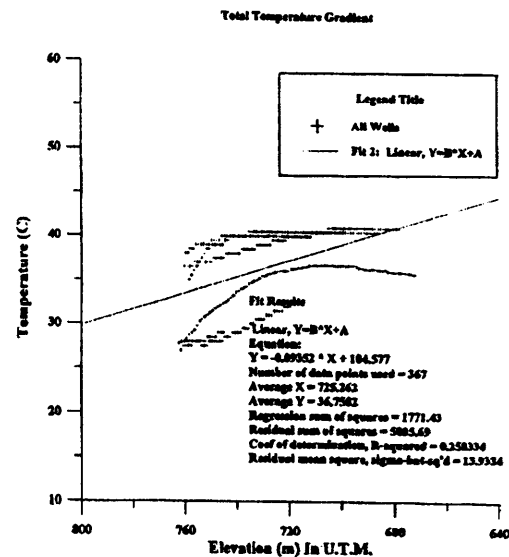
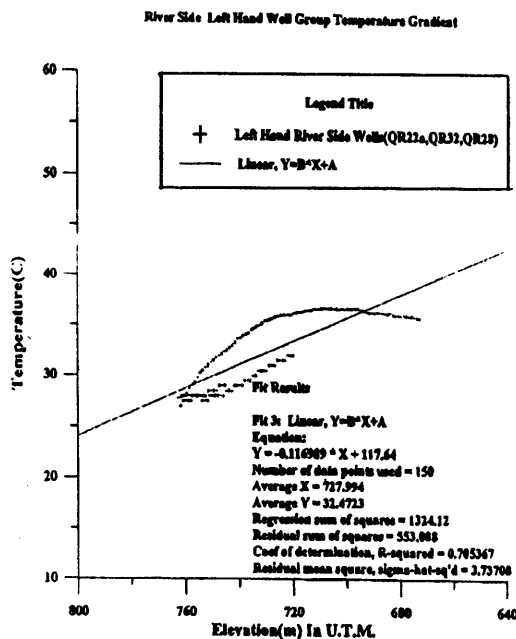
شکل ۳. محل نسبی چاهها در راستای شرقی غربی که به همراه آن نمودار دمای سطح آب چاهها در زیر لایه انتقال سطحی آورده شده است.



شکل ۴a. وضعیت شیو زمینگرمایی درون چاههای QR-22a, QR-32, QR-28

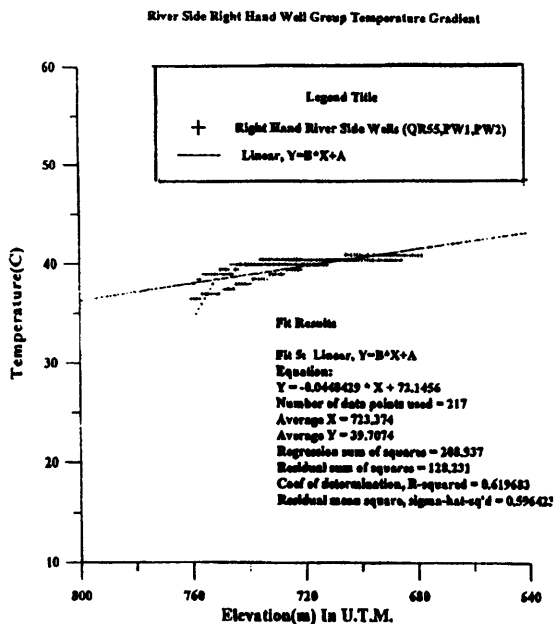


شکل ۴b. وضعیت شیو زمینگرمایی درون چاههای PW1, PW2, QR55.



شکل ۵a. وضعیت شیو زمینگرایی کلیه چاهها.

شکل ۵b. وضعیت شیو زمینگرایی چاههای گروه ۱ (سمت چپ رودخانه).



شکل ۵c. وضعیت شیو زمینگرایی چاههای گروه ۲ (سمت راست رودخانه).

از این نمودارها مشاهده می شود که متوسط دمای هر دو گروه چاه متفاوت است و نیز شیو زمینگرایی هر دو گروه با یکدیگر تفاوت دارد، که خلاصه آن در جدول ۱ آمده است.

اگر ادامه خطوط برازش خطی شیو زمینگرایی هر دو گروه ۱ و ۲ را با یکدیگر تلاقی دهیم حدودا در ژرفای ۱۳۰ متری همدمای می شوند که به بیان اولیه نشانگر دمای تعادل هر دو گروه چاه است. هر سه منحنی شیو زمینگرایی گروه ۱ و گروه ۲ و کل چاهها در دمای بین ۴۴ تا ۴۶ درجه سانتیگراد همدیگر را قطع می کنند.

باید به این نکته توجه داشت که نگارهای دما به صورت توزیع مکانی (نسبت به عمق یا در طول یک نیمرخ) و یا به صورت مکانی-زمانی برداشت می شود. دمای اندازه گیری شده می تواند به ویژگیهای گرما فیزیکی سنگها و یا پیراسنجهای میدان زمینگرایی و میدانهای موضعی (بصورت مصنوعی یا طبیعی) مرتبط شود.

طبق معادله گرمای فوریه داریم:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{\lambda}{\rho c} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (۳)$$

جدول ۱. مقادیر زمینگرایی بدست آمده برای شش چاه مورد مطالعه.

گروه	شماره چاه	شیو زمین گرمایی °C/m	Res.m.s	دمای متوسط °C	شیو زمین گرمایی °C/m	Res.m.s	دمای متوسط °C	شیو زمین گرمایی °C/m	Res.m.s	دمای متوسط °C
۱	PW1	۰/۰۶۱	۰/۱۷۲	۳۹/۵	۰/۰۴۵	۰/۵۹۶	۳۹/۷	۰/۰۹۴	۱۳/۹۳۳	۳۶/۷۵
	PW2	۰/۰۲۸	۰/۱۱۳	۳۹/۸						
	QR55	۰/۰۴۰	۰/۸۲۶	۳۹/۹						
۲	Qr22a	۰/۰۷۸	۲/۳۴۴	۳۴/۷	۰/۱۱۷	۳/۷۳۷	۳۲/۵	۰/۰۹۴	۱۳/۹۳۳	۳۶/۷۵
	QR32	۰/۰۷۵	۰/۰۳۸	۲۸/۳						
	QR28	۰/۱۲۱	۰/۱۳۲	۲۹/۳						

گرما و ارسانش گرمایی محیط است و $\frac{\partial T}{\partial z}$ بیانگر شیو زمینگرایی است. در نواحی دور از فعالیتهای زمینساختی و یا سایر پدیده‌های تاثیرگذار میدانهای حرارتی داریم

$$q \cong (1.3 \pm 0.5) \times 10^{-6} \text{ cal m}^{-2} \text{ sec}^{-1}$$

که برای نواحی تحت تاثیر فعالیتهای زمینساختی این رقم افزایش می‌یابد. بهتر است که به اعداد ارایه شده توسط اربل^۱ (۱۹۷۷) برای جنوب غرب ایران در جدول ۲ توجه شود.

کاستر^۴ (۱۹۷۴) از میدان نفتی مسجد سلیمان

که در آن دمای موضعی، t زمان، z عمق، ρ ظرفیت گرمایی بر واحد حجم سنگ، α ضریب پخش گرما^۱، ارسانش گرمایی^۲ و C گرمای ویژه می‌باشد. در حالت جریان ثابت دما یعنی در حالتی که جریان دما در داخل محیط در طول زمان دچار تحول نشود خواهیم داشت

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (۴)$$

با انتگرال‌گیری از معادله (۳) خواهیم داشت

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \quad (۵)$$

چنانکه قبلاً گفته شد در آن مقدار چگالی شار

جدول ۲. میزان شار گرمایی با توجه به منابع و مکانهای مختلف.

شیو زمینگرایی °C/km	مکان	توضیح
۱۱-۲۷	خوزستان، شمال غرب زاگرس	اربل (۱۹۷۷)
۱۱-۳۳	فارس، هرمزگان، زاگرس شرقی	" "
حدود ۱۰	زاگرس مرتفع چین خورده	" "

1. thermal diffusivity
3. Orbel

2. thermal conductivity
4. Coster

می‌باشد که رقم قابل توجهی است. شایان ذکر است که شار گرمای زمین گستره وسیعی از ۲۰ تا ۱۸۰ میلی وات بر متر مربع را در بر می‌گیرد و میانگین آن به حدود ۶۰ میلی وات بر متر مربع می‌رسد (پولاک و همکاران، ۱۹۹۳). این مقدار بالای شار گرمای در محل احداث سد یک پدیده موضعی است و مربوط به وجود سیستمهای گرمایی کم عمق مناطق خرد شده گسلی است. اگر برای هر دو گروه چاههای محل آزمایش مقدار شار گرمایی بطور جداگانه محاسبه گردد، خواهیم داشت

$$q_1 = 191 \text{ mWm}^{-2}$$

گروه یک (سمت چپ رودخانه)

$$q_2 = 72 \text{ mWm}^{-2}$$

گروه دو (سمت راست رودخانه)

به هر حال هر چند اعداد و ارقام فوق بدور از خطا نیست ولی مقدار بالای شار گرمای منطقه کاملاً محسوس است و اختلاف آن در دو سمت راست و چپ رودخانه قابل تأمل می‌باشد. از طرف دیگر نزدیک بودن گنبد های نمکی به محل مورد مطالعه می‌تواند یکی از عوامل توجیه کننده شیو زمینگرایی بالای منطقه باشد. در این ارتباط جنسن^۱ (۱۹۸۳) با استفاده از مقایسه بین گرماهای اندازه گیری شده و محاسبه شده توانست مدل های مختلف توزیع گرما را برای منطقه مورد نظر آزمایش کند. او سپس نشان داد که اندازه گیری شیو زمینگرایی در چاههایی که در آنها چرخه آبهای زیرزمینی جریان دارد می‌تواند جهت تشخیص گنبد های نمکی استفاده شود.

اختلاف میان شار گرمایی دو طرف رودخانه بیشتر می‌تواند بیانگر وجود گسل مورد نظر باشد.

چگالی شار گرمایی سنگ آهک آسماری گروه فارس و سازند کلنگلومرای بختیاری را بین ۲۲ تا 51 mWm^{-2} تعیین نموده که میانگین آن $36/5 \text{ mWm}^{-2}$ می‌باشد. چون محل اندازه گیری چاههای مورد نظر بر روی سازند آسماری و رسوبات آبرفتی روی آن است لذا عدد مذکور می‌تواند تا حدی بعنوان مبنای مقایسه در ارتباط با مطالعه حاضر مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین با استفاده از مقادیر متوسط اندازه گیری شده و با استفاده از معادله (۵) میزان رسانش گرمایی سازندهای مذکور معادل

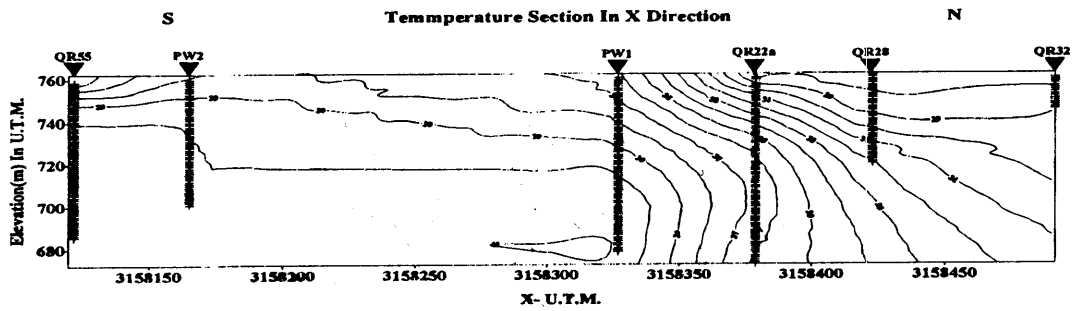
$$\lambda = 3.9 \times 10^{-3} \text{ cal cm}^{-1} \text{ sec}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}$$

می‌باشد که با احتساب شیو متوسط زمینگرایی مقدار 22°C/km بدست آمده است. به این نکته باید توجه نمود که اصولاً آب بدلیل داشتن رسانش کمتر گرما نسبت به سنگ و اینکه اندازه گیریهای دما در زیر سطح ایستابی انجام شده است باید انتظار داشت که شیو واقعی زمینگرایی در حالت خشک اندکی کمتر از این مقدار باشد.

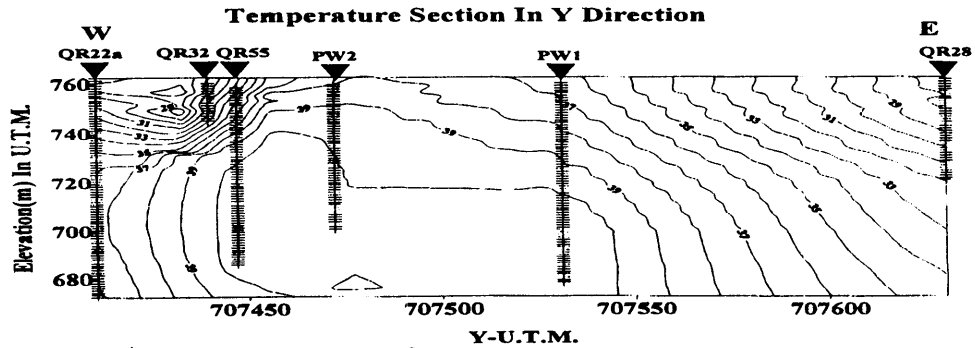
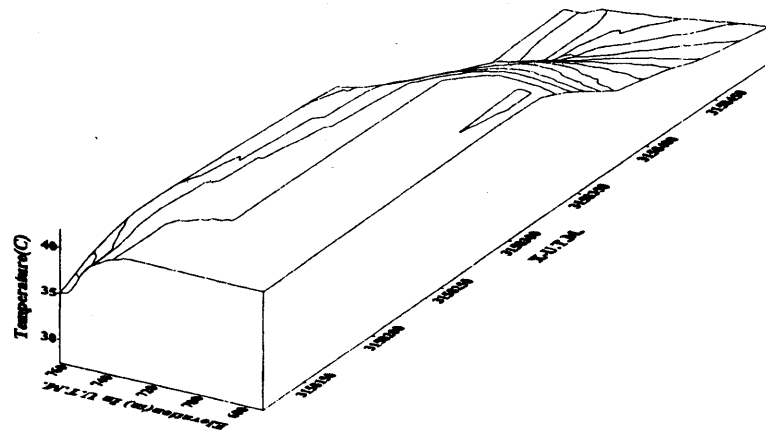
به هر حال برای بدست آوردن ضریب رسانش گرمایی بدلیل در دسترس نبودن اطلاعات کافی جز با بکار بردن تقریبهای مورد اشاره راه دیگری وجود ندارد. اگر مقدار λ بدست آمده در بالا را برای محل انجام آزمایش مذکور قبول داشته باشیم می‌توان چگالی شار گرمای ناحیه آزمایش را از معادله (۵) چنین بدست آورد

$$q = -\lambda \times \frac{\partial T}{\partial z} = 3.9 \times 10^{-3} \times 0.094 \times 10^{-2} \\ = 3.7 \times 10^{-6} \text{ cal cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$$

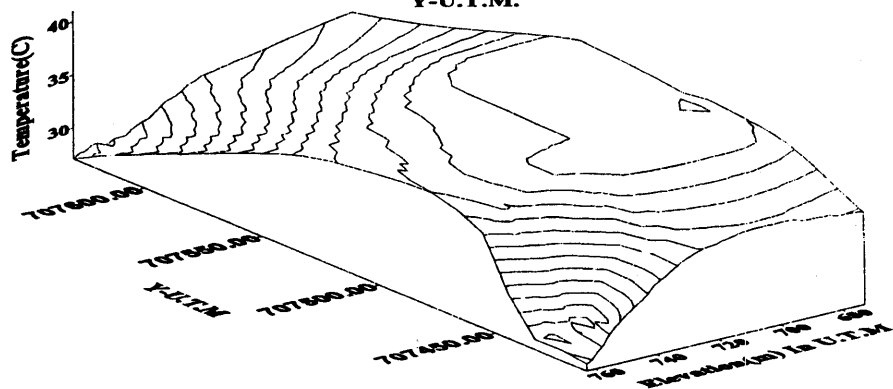
که در محل آزمایش معادل آن 153 mWm^{-2}



(a)



(b)



شکل ۶. مقاطع منحنی‌های همدمای محل مورد مطالعه در جهت‌های X و Y.

شار گرمایی دو دسته چاه موجود در محل ساختگاه سد را ناشی از وجود گسل در این ناحیه دانست.

تشکر و قدردانی

از شورای محترم پژوهشی دانشگاه تهران بخاطر کمک مالی در قالب طرح تحقیقاتی شماره ۶۵۱/۱/۳۸۴ سپاسگزاری می شود همچنین از مسئولین محترم موسسه ژئوفیزیک که تجهیزات چاهنگاری را در اختیار مجری این طرح قرار دادند تشکر و قدردانی بعمل می آید.

منابع

- Coster, H.P., 1974, Terrestrial heat flow in Persia: Monthly Notices, Royal Astronomical Society, Geophysical Supplement, 5, 131-145.
- Ellis, V.D., 1987, Well logging for earth scientists: Elsevier, The Netherlands.
- Geertsma, J., 1970, Finite-element analysis of shallow temperature anomalies: Geophysical Prospecting, 19, 662-681.
- Gorbachev, Y.I., 1995, Well logging fundamental of methods: John Wiley, London, U.K.
- Jensen, P.K., 1983, Calculations on the thermal conditions around a salt diapir: Geophysical Prospecting, 31, 481-489.
- Orbel, G., 1977, The revised geothermal gradient map of S.W. Iran and its application: Technical Note No. 19/1977, Oil Service Company of Iran

نمودار منحنی های مقاطع همدمای چاهها در جهت X و Y (شکل های ۶a و ۶b) نشان می دهد که الگوی رفتاری نیمرخهای گرما در اعماق مختلف با آنچه (پولی و استونینگ، ۱۹۷۰)، گیرتسما^۱ (۱۹۷۰) و بدنبال آنها راونیک و راجور^۲ (۱۹۹۸) ارائه کرده اند، مطابقت دارد و می تواند نشان دهنده یک ناحیه خرد شده گسلی باشد. در این رابطه راونیک و راجور (۱۹۹۸) با استفاده از وارونگی زمینگرایی مشاهده شده توانستند محل یک کانال کارست را زیر گالری اکتشافی در ساختگاه یک سد در نزدیکی دوبرونیک تخمین بزنند.

۴ نتیجه گیری

با توجه به نتایج حاصل از نگارها و تفسیر انجام شده می توان ناحیه مورد نظر را جزء نواحی بی هنجار زاگرس چین خورده دانست، و بی هنجاری گرمایی مشاهده شده را به یک ساختار زمین شناسی مانند ناحیه خرد شده گسلی نسبت داد. با توجه به نحوه توزیع دما و رسانش گرمایی سنگهای منطقه و نیمرخهای گرمایی، این ساختار را می توان یک گسل دانست که اثر آن تا اعماق ۱۳۰ متری و حتی پایین تر گسترش دارد. اختلاف شیو زمینگرایی در دو طرف رودخانه قابل توجه است و نشان می دهد که چگونه می توان با استفاده از داده های زمینگرایی درون چاهی اولاً ساختارهای زمین شناسی مانند نواحی خرد شده گسلی را تشخیص داد و ثانياً کمیت های دیگر چون رسانش و چگالی شار زمینگرایی را بدست آورد. با توجه به وجود شار گرمایی بالا در منطقه مورد مطالعه، این پدیده را می توان به حضور مواد رساننده گرما مانند گنبد های نمکی نسبت داد و همچنین اختلاف

- (OSCO).
- Poley, J., PH., and Van Steveninck, J., 1970, Geothermal prospecting delineation of shallow salt domes and surface faults by temperature measurements at a depth of approximately two meters: *Geophysical Prospecting*, **18**, 666-700.
- Pollack, N.H., Hurter, S.J., and Johnson, J.R., 1993, Heat flow from the earth's interior: analysis of the global data set: *Reviews of Geophysics*, **31**, 267-280.
- Ravnik, D., and Rajver, D., 1998, The use of inverse geotherms for determining underground water flow at the Ombla karst spring near Dubrovnik, Balkman, Croatia.