

## مطالعات انرژی زمین گرمایی محدوده مشکین شهر با استفاده از ژئوشیمی

### ۱- احسان قدمی ۲- افشین شهام

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی معدن گرایش اکتشاف دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

۲- استادیار گروه مهندسی معدن گرایش اکتشاف دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

### چکیده

یکی از اصلی‌ترین مؤلفه‌های امنیت ملی تمام کشورها دسترسی به انرژی مورد نیاز است. به همین دلیل کشورها تنوع‌بخشی به منابع انرژی را اصلی‌ترین راهبردهای خود قرار می‌دهند تا از وابستگی به یک یا دو نوع انرژی به شدت احتراز کرده و آسیب‌پذیری خود را به حداقل ممکن کاهش دهند و عواملی همچون کاهش طول عمر منابع فسیلی در کنار افزایش جمعیت و رشد اقتصادی، افزایش آلودگی هوا و محیط‌زیست، لزوم استفاده از منابع انرژی‌های نو و تجدیدپذیر را با توجه به توجیه اقتصادی آنها ضروری می‌سازد. در این میان انرژی زمین‌گرمایی یکی از منابع عمده انرژی‌های نو و سازگار با محیط‌زیست است که در صورت بهره‌برداری صحیح و مبتنی بر پارامترهای محیط‌زیستی نقش مهمی را در موازنه انرژی کشور و اهداف توسعه پایدار ایفا می‌کند اما آنچه که می‌تواند راهگشای برنامه‌ریزان و متولیان امر انرژی باشد شناسایی و اکتشاف آن با استفاده از روش‌های نوین و کم‌هزینه در مقابل پیمایش‌های زمینی آن هم در مناطق دورافتاده است. از میان پتانسیل‌های متعدد کشور در زمینه انرژی زمین‌گرمایی منطقه سبلان با توجه به حضور شواهد منابع زمین‌گرمایی از سطح مناسب و مستعدی برای تولید این انرژی برخوردار است که با مدیریت صحیح و امکان توجه برنامه‌ریزان می‌باید زمینه اکتشاف و مکان‌یابی آن با ابزارهای نوین و مقرون به صرفه در بررسی‌های بزرگ مقیاس فراهم شود. پروژه زمین‌گرمایی شمال غرب سبلان در بخش شمال غربی توده آتشفشانی سبلان در نزدیکی جنوب مشکین شهر (استان اردبیل) واقع شده است. مشکین شهر نزدیک‌ترین شهر به منطقه مورد مطالعه (دره موئیل) است. راه ارتباطی این شهر به چاه‌های حفاری شده از طریق جاده آسفالت به طول ۱۸ کیلومتر و جاده خاکی به طول ۱۴ کیلومتر است.

### کلید واژه

انرژی زمین گرمایی، مشکین شهر، ژئوشیمی، سبلان

### مقدمه

گرما نوع خاصی از انرژی است و انرژی ژئوترمال در لغت به معنای حرارت موجود در داخل زمین است که باعث وقوع پدیده‌های زمین‌شناسی می‌شود با این حال امروزه از واژه (انرژی ژئوترمال) برای اشاره به آن بخشی از حرارت زمین استفاده می‌شود که می‌تواند یا می‌توانسته است توسط بشر استحصال و استخراج گردد و ما نیز با ملاحظه همین معنا و از هم اکنون این واژه را عنداللزوم به کار خواهیم برد. وجود کوه‌های آتشفشان باید نیکان ما را از این حقیقت آگاه ساخته باشد که برخی نقاط درونی زمین داغ هستند. احتمالاً نخستین اندازه‌گیری‌ها به وسیله دماسنج در سال ۱۷۴۰ و در معدنی نزدیک «Belfort» در کشور فرانسه انجام پذیرفت. در سال ۱۸۷۰ از روش‌های علمی پیشرفت‌های برای مطالعه نوع رفتار حرارتی زمین استفاده می‌گردید، تا اینکه در قرن بیستم و کشف نقشی که حرارت ناشی از مواد رادیواکتیو ایفا کرد پرده از راز برخی پدیده‌ها نظیر موازنه حرارتی و همچنین تاریخچه زمین گرمایی برداشته شد. تمامی مدل‌های پیشرفته حرارتی زمین در واقع بر حرارت تولید شده به واسطه زوال ایزوتوپ‌های طول‌العمر و رادیو اکتیو اورانیوم، پتاسیم و توریم موجود در اعماق زمین پایه ریزی شده‌اند. سایر منابع بالقوه حرارت زمین از اهمیت نسبتاً کمتری برخوردار هستند. پتانسیل انرژی زمین گرمایی در ایران بر اساس مطالعات انجام شده در بیش از ۱۰ منطقه شناسایی شده است. این مناطق بر اساس میزان فعالیتهای تکتونیکی، میزان چشمه‌های آب گرم و ظهورهای سطح الارضی و سایر شواهد زمین‌شناسی شناسایی شده‌اند. بر اساس گزارش ارائه شده توسط (سازمان انرژی‌های نو ایران، ۱۳۷۷) این مناطق به شرح زیر می‌باشند:

منطقه سبلان ( مشکین شهر - سرعین - بوشلی )

منطقه دماوند ناحیه ناندل

منطقه ماکو ناحیه سیاه چشمه

منطقه خوی ناحیه قطور

منطقه سهند

منطقه تفتان - بزمان

منطقه نایبند

منطقه بیرجند - فردوس

منطقه تکاب - هشتروند

منطقه خور - بیابانک

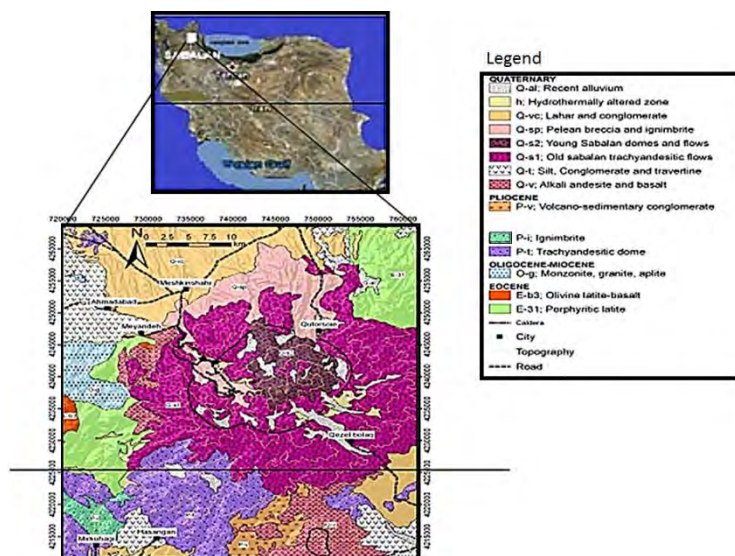
منطقه اصفهان - محلات

منطقه رامسر

منطقه بندرعباس - میناب

منطقه بوشهر - کازرون

منطقه لار - بستک

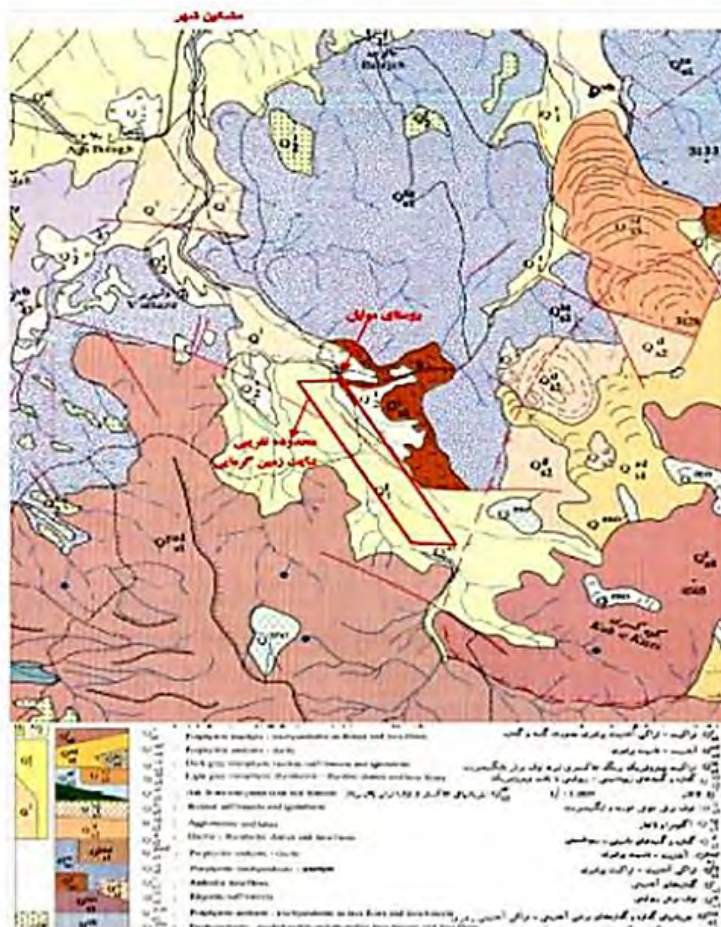


نقشه زمین شناسی آتشفشان سبلان در جنوب شرقی چهارگوش مشکین شهر

### پیشینه تحقیق و لزوم اجرای آن

رشد روزافزون جمعیت، توسعه شهری و نیز اقتصاد انرژی در کشور ما، تولید ۹۰ هزار مگاوات برق در سال ۲۰۲۰ را اجتناب ناپذیر ساخته است. در حدود ۹۸ درصد ظرفیت تولید فعلی نیروگاه‌های برق کشور به کاربرد سوخت های فسیلی متکی است. حال آنکه محدودیت منابع سوخت فسیلی، رشد مصرف داخلی و نبود منابع کافی برای صادرات از یک سو و موازین و معیارهای زیست محیطی توسعه ی پایدار از سوی دیگر، کاربرد انرژی های تجدیدپذیر در بستر تولید را اجتناب ناپذیر ساخته است. به رغم پتانسیل های بسیار مناسب به منظور کاربرد انرژی زمین گرمایی، به دلیل نبود سیاستگذاری های کلان در زمینه به کارگیری انرژی تجدیدپذیر و فقدان

فناوری مناسب در خصوص حفاری عمیق، مهندسی مخازن، ساخت و نیز بهره برداری از نیروگاه های زمین گرمایی و بالاخره وجود رقیب سرسخت منابع ارزان سوخت های فسیلی، بهره برداری از پتانسیل های مزبور کماکان جدی گرفته نشده است. در کشور ما ایران از سال ۱۳۵۴ و به منظور شناسایی پتانسیل های منبع انرژی زمین گرمایی مطالعات گسترده ای توسط وزارت نیرو با همکاری مهندسین مشاور ایتالیایی ENEL در نواحی شمال و شمال غرب ایران در محدوده ای به وسعت ۲۶۰ هزار کیلومتر مربع آغاز گردید. نتیجه این تحقیقات مشخص نمود که مناطق سبلان، دماوند، خوی، ماکو و سهند با مساحتی بالغ بر ۳۱ هزار کیلومتر مربع جهت انجام مطالعات تکمیلی و بهره برداری از انرژی زمین گرمایی مناسب می باشند. در همین راستا برنامه اکتشاف، مشتمل بر بررسی های زمین شناسی، ژئوفیزیک و ژئوشیمیایی برنامه ریزی شد. در سال ۱۳۶۱ با پایان یافتن مطالعات اکتشاف مقدماتی در هر یک از مناطق ذکر شده، نواحی مستعد با دقت بیشتری شناسایی شده و در نتیجه در منطقه سبلان: نواحی مشکین شهر، سرعین و بوشلی، در منطقه دماوند ناحیه: نونال، در منطقه ماکو- خوی نواحی: سیاه چشمه و قطور و در منطقه سهند پنج ناحیه کوچکتر جهت تمرکز فعالیت های فاز اکتشاف تکمیلی انتخاب شدند. پس از یک وقفه نسبتاً طولانی و با هدف فعال نمودن مجدد طرح، گزارشهای موجود مجدداً در سال ۱۳۶۹ توسط کارشناسان UNDP بازنگری شده و منطقه زمین گرمایی مشکین شهر به عنوان اولین اولویت جهت ادامه مطالعات اکتشافی معرفی شد. در اولویت اول به منظور ادامه مطالعات قبلی و تکمیل نمودن فاز اکتشاف در ناحیه مشکین شهر در سال ۱۳۷۴ کارشناسان معاونت امور انرژی وزارت نیرو با هدف نصب اولین نیروگاه زمین گرمایی در کشور برنامه فاز اکتشاف تکمیلی را تهیه و بخش مطالعات سطح الارضی شامل عملیات ژئوفیزیکی، زمین شناسی و بررسیهای ژئوشیمیایی و ماهواره ای آغاز گردید این مطالعات توسط مهندسین مشاور کینگستون موریسون از کشور نیوزلند و با مدیریت سازمان انرژیهای نو ایران طی سال ۱۳۷۷ به انجام رسید که حاصل این مطالعات منجر به تخمین درجه حرارت احتمالی مخزن در حد ۲۴۰ درجه سانتیگراد و تعیین نقاط حفاریهای اکتشافی در دامنه های شمالی سبلان مشرف به جنوب شهرستان مشکین شهر گردید. عملیات حفاری اولین چاه در پایان اردیبهشت ماه سال ۱۳۸۲ خاتمه یافت و طی مدت ۱۸ ماه حفاری های اکتشافی شامل سه حلقه چاه اکتشافی عمیق با عمق ۳۲۰۰ متر، ۳۱۷۶ و ۲۲۶۰ متر و دو حلقه چاه تزریقی با عمق حدود ۶۵۰ متر به پایان رسید. پس از به پایان رسیدن عملیات حفاری، تجهیزات فلزی تست جریان چاه در محل مورد نظر نصب گردید و در سال ۱۳۸۳ عملیات تست اولین چاه زمین گرمایی کشور در سایت A آغاز گردید. تست دومین چاه زمین گرمایی نیز در همان سال در سایت B انجام شد. همزمان با کلیه فعالیت های ذکر شده سازمان انرژیهای نو ایران با همکاری سازمان بهره وری انرژی ایران، ضمن تجهیز آزمایشگاه و ایستگاه پایش صحرایی، مطالعات سیستماتیک و گسترده ای را جهت پایش محیط زیست منطقه و کنترل اثرات زیست محیطی ناشی از اجرای طرح انجام داد. در سال ۱۳۸۸ پس از انجام مطالعات اولیه ارزیابی مخزن زمین گرمایی سبلان و نیز توسعه مطالعات ژئوفیزیک سایت های D و E برای توسعه میدان زمین گرمایی انتخاب گردید. با انجام عملیات عمرانی مورد نیاز، عملیات حفاری سه حلقه چاه در سایت D، دو حلقه چاه در سایت E و یک حلقه چاه در سایت C انجام شد. پس از پایان یافتن تست چاهها اطلاعات مورد نیاز جهت انجام مدلسازی و مطالعات مهندسی مخزن و در نتیجه برآورد پتانسیل حرارتی مخزن زمین گرمایی در منطقه مشکین شهر فراهم شده و در نهایت مطالعات امکان سنجی طرح ضمن ارائه طرح توسعه و بهره برداری از میدان زمین گرمایی سبلان ادامه خواهد یافت.



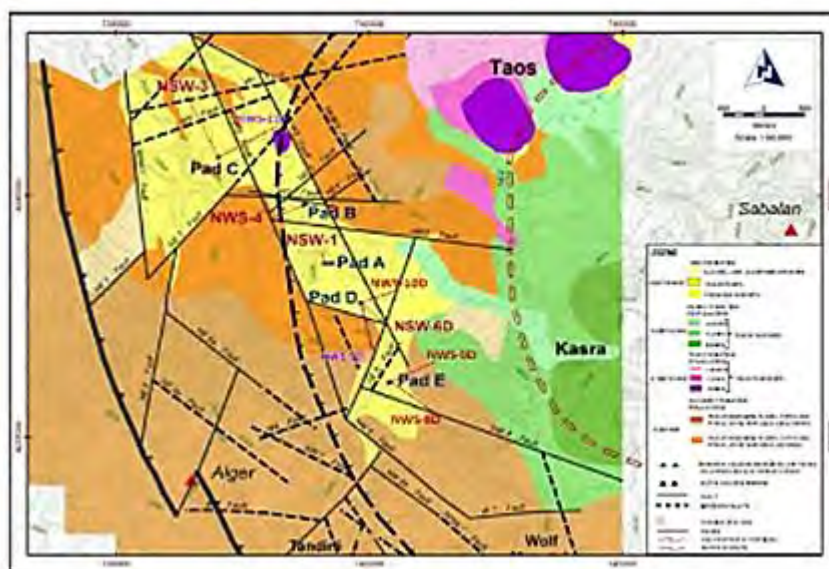
موقعیت پروژه زمین گرمایی شمال غرب سیلان (نوراللهی و همکاران، ۱۹۹۸).

### زمین شناسی ساختمانی

از نظر تکتونیکی منطقه مورد مطالعه بخشی از دامنه‌های شمال غربی سیلان می‌باشد که جزئی از فلات مرتفع آذربایجان است. فعالیت تکتونیکی منطقه مذکور تحت تأثیر حرکات صفحات تکتونیکی در محل برخورد صفحات ایران، کاسپین، اوراسیا و عربی قرار گرفته است. در فاصله ۱۴ کیلومتری جنوب غربی دهانه آتشفشان، یک گسل کمانی بزرگ وجود دارد. در محدوده داخل این گسل، سری

گسل‌های خطی دیگری دیده می‌شوند که به نوبه خود محدوده گسلی مهمی را به وجود آورده که در ایجاد دره موئیل نقش بسیار مهمی ایفا کرده است. مجموعه آتشفشان سبلان از شمال غرب و جنوب شرق به وسیله دو گسل مهم امتداد لغز (راستگرد) با روند NE-SW در بر گرفته شده است. این دو گسل مهمترین و طولیترین گسل‌های موجود در منطقه مورد بررسی می‌باشند. بعضی از این گسل‌ها از داخل دهانه عبور کرده و دره قطور سویی را در شمال منطقه به وجود آورده‌اند که به سری گسل‌های شمالی- جنوبی معروف هستند. مسائل زمین شناسی منطقه سبلان از جمله شرایط تکتونیکی، مورفولوژی و زمین‌گرمایی عمدتاً مرتبط با فعالیت‌های آتشفشان سبلان می‌باشد. فعالیت‌های ماگمایی از ائوسن تا کواترنری قابل مشاهده است. طی فاز کوه‌زایی دانین در پالئوسن زیرین حجم عظیمی از ماگما خارج شده و در ادامه یک فاز کششی در تمام آذربایجان حاکم گردیده است (دیدون و ژومن، ۱۹۷۹) فاز کششی گفته شده باعث ایجاد بازشدگی قارهای شده و حضور گنبد ماگمایی زیر آذربایجان در طول دوره ائوسن را نیز مرتبط با این پدیده میدانند (ریو، ۱۹۷۹). آتشفشان سبلان در ۴۰ کیلومتری جنوب غربی اردبیل و در ۲۵ کیلومتری جنوب شرق مشگین شهر قرار دارد. ارتفاع آن از سطح دریا ۴۸۱۱ متر و دهانه آن به ابعاد  $12 \times 14$  کیلومتر در امتداد تقریباً شمال غربی - جنوب شرقی گسترش یافته است و گدازه‌های آن مساحتی معادل ۱۲۰۰ کیلومتر مربع را اشغال نموده است. به علت فروریختگی و ریزش دهانه (کالدر)، شکل مخروط قطعه قطعه و سه قله آن به شدت فرسایش یافته است. مکانیسم آن شبیه آتشفشان استرومبولی در ایتالیا است که در محل تقاطع شکستگی‌های اصلی بر روی هورست قدیمی با روند شرقی- غربی فوران کرده است (دیدون و ژومن، ۱۹۷۹). فازهای شکل گیری این آتشفشان را به سه مرحله می‌توان دسته‌بندی کرد:

- ۱- فازهای گدازه‌های سبلان قدیم که شامل ۵ مرحله ماگمایی است.
- ۲- فاز فرونشینی کالدر و فعالیت انفجاری که با انباشت حدود ۱۰۰۰M نهشته‌های آذرآوری در دامنه شمالی همراه بوده است.
- ۳- فاز تشکیل گنبدها و جریان‌های گدازه‌های سبلان جدید که با تشکیل روانه‌های تراکی آندزیت تا تراکی داسیتی و شکل گیری بلندترین قسمت آتشفشان همراه بوده است



نقشه تکتونیکی به همراه نقشه زمین شناسی منطقه زمین گرمایی سبلان (بوگ و همکاران، ۲۰۰۰)

تنوع سنگ شناسی رخنمون ها در منطقه مورد مطالعه، مربوط به تشکیل واحدهای سنگی در فازهای مختلف آتشفشانی است. لذا براساس واحدهای سنگی- زمانی موجود می توان توالی سنگ چین های را در منطقه برحسب افزایش سن از بالا به پایین به شرح زیر مشخص نمود:

۱- رسوبهای آبرفتی

۲- روانه های گدازه های تراکی- آندزیتی، گنبدها و لاهارهای پلیوستوسن پایانی که مربوط به بعد از تشکیل دهانه هستند.

۳- گنبدها و روانه های گدازه های از جنس تراکی- داسیت و تراکی- آندزیت با سن پلیوستوسن آغازی که همزمان با به وجود آمدن دهانه تشکیل شده اند.

۴- گدازه های تراکی- آندزیتی، توف ها و آذر آواری های پلیوسن که قبل از تشکیل دهانه فوران کرده و در سطح گسترده شده اند. چهار واحد سنگ چین های ذکر شده برای اهداف کاربردی و به ویژه به منظور سهولت استفاده در برنامه های اکتشاف منابع زمین گرمایی منطقه سبلان، توسط کارشناسان خارجی سازمان تحت عنوان سازند و با نام های محلی معرفی شده اند.

Period	Epoch	Formation	Rock Sequence	PETROLOGICAL DESCRIPTION
QUATERNARY	HOLOCENE DIZUE	[Symbol]	[Symbol]	رسوبت لافسی، مخروط لافسی
				گنبد و روانه های گدازه ای از جنس تراکی آندزیت همراه توفه لاهار و برش های آذر آواری
				گنبد و روانه های گدازه ای از جنس تراکی داسیت و تراکی آندزیت
TERTIARY	PLIOCENE VALHAZIR	[Symbol]	[Symbol]	گنبد و گدازه های تراکی آندزیتی گدازه شده
				توفه لاهار و برش های آذر آواری

ستون استراتیگرافی سنگ های شمال غرب سبلان (سحابی، ۱۳۷۸).

### مکانیزم اصلی سیستم های ژئوترمال

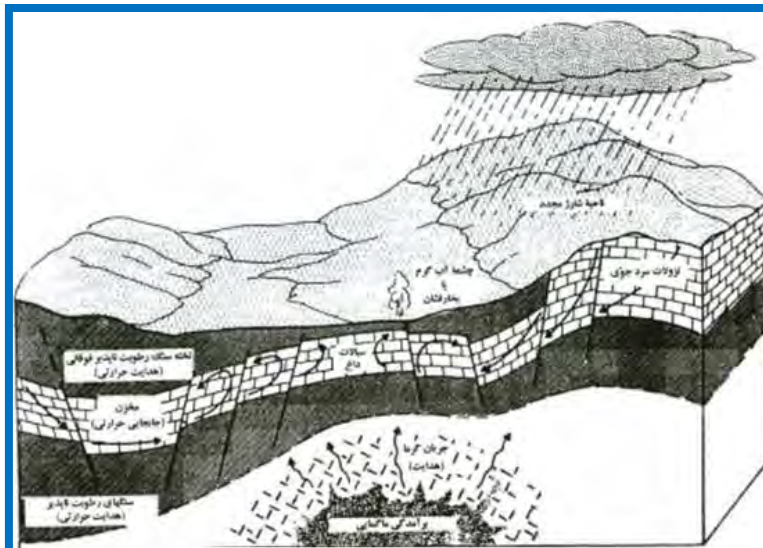
مکانیزم اصلی سیستم های ژئوترمال روی هم رفته تحت تأثیر جابجایی سیال قرار دارد. سیال گرم شده که از دانسیته پایین تری برخوردار است، تمایل دارد که به سمت بالا حرکت کرده و جای خود را به سیال سردتری بدهد که از دانسیته بالاتری برخوردار است. فرایند جابجایی به واسطه طبیعتش تمایل دارد که دمای بخش فوقانی سیستم را افزایش داده و دمای بخش تحتانی آن را کاهش دهد. از میان تمامی اجزاء یک سیستم ژئوترمال، منبع حرارتی، تنها جایی است که الزاماً باید طبیعی باشد. انرژی ژئوترمال در صورت بهره برداری صحیح می تواند نقش مهمی را در موازنه انرژی بسیاری از کشورها ایفا کند. منابع کوچک ژئوترمال به طور خاص قادر به رفع معضلات متعدد محلی و ترقی استانداردهای زندگی جوامع کوچک مجزا می باشند. جا دارد به منافع انرژی ژئوترمال به عنوان یک ثروت ارزشمند بسیاری از کشورها اشاره نماییم.

۱- انرژی ژئوترمال یک انرژی 'ملی' است که در شرایط مناسب می تواند منجر به کاهش واردات سوخت های گرانتر رایج، یا بالعکس، افزایش صادرات آنها شود

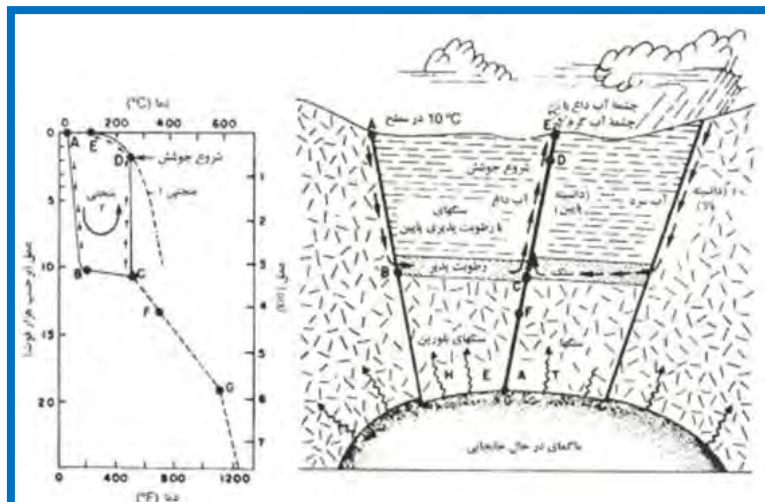
۲- در برخی نواحی و در بعضی مواقع، ممکن است انرژی ژئوترمال، تنها منبع موجود انرژی باشد  
۳- هیچ هزینه‌ای بابت 'سوخت' نیروگاه پرداخت نمی‌شود.



صفحات لیتوسفری و توزیع جهانی سیستم‌های اصلی ژئوترمال



شماتیک یک سیستم ژئوترمال ایده‌آل



شکل مدل یک سیستم آب داغ - ژئوترمال



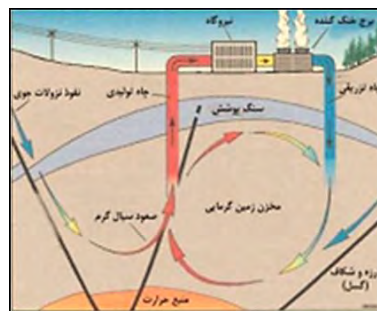
منابع زمین گرمایی در ایران (ساشیو اهارا و همکاران، ۲۰۰۷).

### عوامل اساسی تشکیل منابع زمین گرمایی

به طور کلی برای شکل گیری و تکامل یک سیستم زمین گرمایی وجود چهار عامل اصلی ضروری است که عبارتند از:

- (۱) منبع حرارتی
- (۲) سنگ مخزن
- (۳) سنگ پوششی
- (۴) سیال

سیستم‌های زمین گرمایی در مناطقی تشکیل می‌شوند که این چهار عامل در کنار هم قرار گرفته باشند (آندرسن و لوند، ۱۹۸۷). در شکل زیر چگونگی تشکیل یک مخزن زمین گرمایی و رابطه بین چهار عامل اساسی در تشکیل یک مخزن زمین گرمایی نشان داده شده است.



عوامل اساسی تشکیل دهنده یک مخزن زمین گرمایی

### منبع حرارتی



تمرکز حرارت در پوسته زمین در مقیاس ناحیه‌ای و موضعی توسط چندین فرآیند صورت می‌گیرد. مهمترین منبع تولید حرارت در داخل پوسته زمین واپاشی عناصر رادیواکتیو می‌باشد. علاوه بر منبع مذکور، عوامل دیگری نیز در تولید حرارت نقش دارند که از آن جمله می‌توان به فعالیت‌های آذرین درونی، آتشفشان‌ها، فعالیت‌های تکتونیکی و همچنین فرونشینی سریع رسوبات در حوضه‌های رسوبی فعال اشاره کرد. واپاشی رادیواکتیو باعث تبدیل شدن بخشی از ماده به انرژی تشعشعی می‌شود که این انرژی نیز به نوبه خود به انرژی حرارتی تبدیل می‌شود. ایزوتوپ‌های رادیواکتیو طبیعی به میزان متفاوتی حرارت تولید می‌کنند، ولی بیشترین میزان واپاشی سری ایزوتوپ‌های اورانیوم ( $U^{238}$  و  $U^{235}$ ) و توریم  $Th^{232}$  که در نهایت ایزوتوپ پتاسیم  $K^{40}$  ایجاد می‌کند تولید می‌شود. در نتیجه می‌توان گفت که تولید حرارت در سنگ‌ها توسط واکنش‌های رادیواکتیو و به تناسب مقدار اورانیوم، توریم و پتاسیم موجود در آنها صورت می‌گیرد. سرد شدن توده‌های نفوذی تزریق شده به درون پوسته، غالباً به عنوان یک منبع تولید حرارت برای سیستم‌های زمین‌گرمایی به -شمار می‌رود. این توده‌ها که غالباً حرارتی بین  $700$  تا  $1200$  درجه سانتیگراد دارند، با ایجاد سیستم‌های چرخشی و یا هدایتی در درون پوسته زمین، حرارت نواحی مجاور خود را به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهند. بطور کلی فعالیت‌های مرتبط با قرارگیری توده‌های ماگمائی در مقیاس جهانی از فرضیه جداسدن قاره‌ها و عملکرد صفحه‌های تکتونیکی تبعیت می‌نماید (آندرسن و لوند، ۱۹۸۷).

### سنگ مخزن

سنگ مخزن که وجود آن یکی از الزامات عمده در شکل‌گیری یک سیستم زمین‌گرمایی است می‌تواند شامل یک توالی از سنگ‌هایی با ویژگی‌های خاص باشد که به طور معمول شامل ضخامتی از سنگ‌های رسوبی یا آذرآواری است. این قبیل سنگ‌ها دارای تخلخل و ضخامت قابل ملاحظه‌ای بوده و می‌توانند حجم عظیمی از سیالات زمین‌گرمایی را در خود ذخیره نمایند. شایان ذکر است که علاوه بر دو عامل تخلخل و ضخامت، عامل تراوایی نیز در تشکیل مخازن زمین‌گرمایی نقش مهمی ایفا می‌نماید. به عبارت دیگر اقتصادی بودن یک مخزن زمین‌گرمایی در درجه اول بستگی به حجم سیال موجود در سیستم و در درجه دوم بستگی به میزان تراوایی سنگ‌ها دارد، چنانکه بسیاری از رسوبات یا سنگ‌های رسوبی با وجود اینکه به دلیل تخلخل بالا حاوی حجم قابل ملاحظه‌ای از سیالات هستند، اما به دلیل تراوایی ناچیز، امکان استخراج و بهره‌برداری اقتصادی از سیالات مذکور وجود ندارد (منوچهر فتوحی و نوراللهی، ۱۳۸۱).

### سنگ پوشش

سنگ پوشش شامل ضخامتی از طبقات غیر قابل نفوذ و یا با نفوذپذیری ناچیز است که بر روی سنگ مخزن قرار گرفته و مانع از فرار سیال از مخزن می‌شود. سنگ پوشش معمولاً از طبقات سنگ‌های رسی، انیدریتی، ژیپسی و یا نمکی تشکیل می‌شود. این سنگ‌ها معمولاً دارای هدایت حرارتی پائین بوده و تقریباً بصورت عایق حرارتی عمل مینمایند. بدلیل انتقال حرارت از منبع حرارتی به سنگ مخزن و عدم انتقال آن توسط سنگ پوششی به لایه‌های بالاتر درجه حرارت سنگ مخزن بتدریج افزایش پیدا می‌کند. لایه‌های سنگ پوشش ممکن است در طول تکامل یک سیستم، ایجاد شوند، ولی اغلب به نظر می‌رسد که در اثر فرایندهای زمین‌شناسی بسیار قدیمی رسوب‌گذاری شده باشند. گاهی اوقات فعالیت‌های شدید تکتونیکی باعث ایجاد شکستگی‌هایی در سنگ پوشش می‌شود که در چنین شرایط موجب خروج سیال از سنگ مخزن و نفوذ آن به طبقات فوقانی و در نهایت موجب ظهور چشمه‌های آبگرم و گازفشان‌ها در سطح زمین می‌شود که در بررسی‌ها و تحقیقات زمین‌گرمایی یکی از عالئم وجود انرژی زمین‌گرمایی محسوب می‌شوند (آندرسن و لوند، ۱۹۸۷).

### سیال

یکی از عوامل اصلی در تکوین و شکل‌گیری سیستم‌های زمین‌گرمایی و بهره‌برداری اقتصادی از آن وجود سیالات زمین‌گرمایی است که عامل انتقال حرارت از مخازن و منابع مربوطه به سطح می‌باشند. نکته مهم در بهره‌برداری اقتصادی از مخازن زمین‌گرمایی برقراری

حالت تعادل بین میزان استخراج سیالات زمین‌گرمایی و میزان تغذیه مخزن می‌باشد که باید بطور طبیعی و از طریق منابع فوق و یا به صورت مصنوعی انجام پذیرد. سیستم‌های زمین‌گرمایی از سنگ‌های داغ و سیالاتی تشکیل شده است که سنگ‌ها تحت اثر سیالات حفره دار شده‌اند. سیال اولیه در مخزن مایع می‌باشد، یعنی مایع غالب است. در سیستم‌های جوشان مایع به همراه حجم کمی از بخار وجود دارد. در سیستم‌های بخار غالب شاهد بخار به همراه حجم کمی از مایع هستیم. سیالات اولیه‌ی مربوط به سیستم‌های زمین‌گرمایی غالباً در سطح یافت نمی‌شوند به جز در نواحی که مخزن در زیر آب دریا بوده باشد سیالات قابل دسترس در سطح که برای تحقیقات از آنها استفاده می‌شود همگی از فرایندهای پیچیده‌ای از قبیل عوامل زیر تأثیر پذیرفته‌اند و به نوعی سیال ثانویه در نظر گرفته می‌شوند که این عوامل عبارت هستند از :

۱- جوشش و فاز جدایش

۲- خنک‌سازی

۳- اکسایش ( ترکیب با اکسیژن)

۴- اختلاط

طبقه‌بندی اصلی مربوط به سیالات زمین‌گرمایی ثانویه که در سطح مطرح است به صورت زیر می‌باشد :

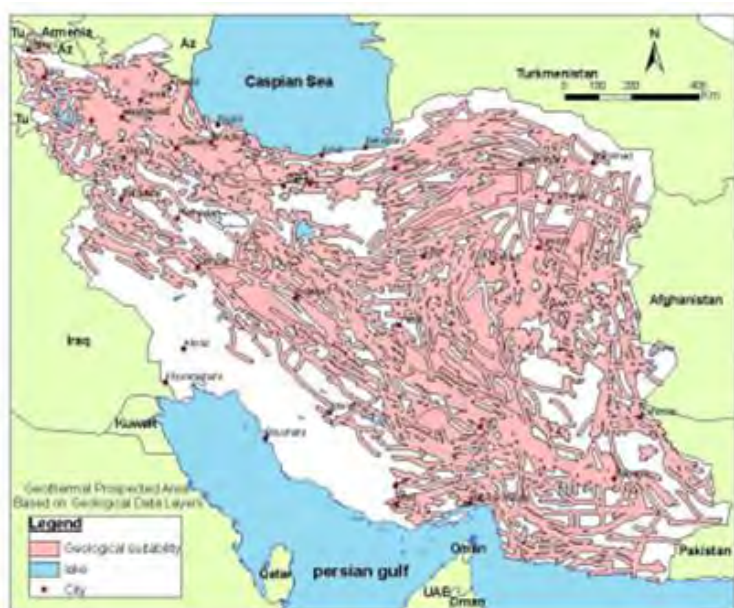
الف- بخار زمین‌گرمایی

ب- محلول‌های زمین‌گرمایی جوشان و یا خنک

ج- بخار داغ آب‌های سطحی

د- اختلاط محلولها (که شامل آب‌های زیرزمینی کمعمق و محلول زمین‌گرمایی می‌باشد که می‌تواند بخار هم باشد و حتی جوشان یا غیر جوشان باشد)

با استفاده از این سیالات و سیالات جوشان زمین‌گرمایی می‌توان اطلاعات مفیدی راجع به دمای مخزن زمین‌گرمایی بدست آورد. با استفاده از اختلاط محلولها می‌توان دمای مخزن را حدس زد، در صورتی که از روی بخار آب‌های سطحی به این هدف نمی‌توان دست یافت (دی‌آمر و آنورسون، ۲۰۰۰).



منابع زمین‌گرمایی بر پایه لایه‌های اطلاعاتی زمین‌شناسی (ساشیو اهارا و همکاران، ۲۰۰۷).

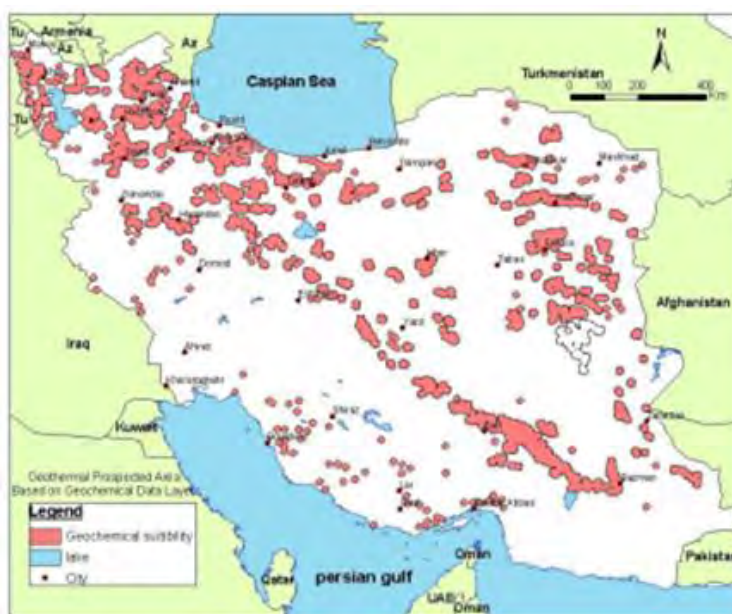
### انواع مخازن زمین گرمایی

بطور کلی براساس ویژگی‌های زمین شناسی، هیدرولوژیکی و انتقال حرارت، مخازن زمین گرمایی به چهار گروه اصلی طبقه‌بندی می‌شوند:

- ۱) مخازن گرمایی
- ۲) مخازن سنگ داغ خشک
- ۳) مخازن زمین تحت فشار
- ۴) مخازن ماگماتیک

### جریان‌های گدازه سبلان قدیم

اولین مرحله از فعالیت آتشفشانی سبلان قبل از فروریختن بخش مرکزی است، که طی آن جریان‌های گدازه وسیعی که بیشترین قسمت کوه سبلان را تشکیل می‌دهند بیرون ریخته‌اند. این گدازه‌ها به طور کلی بر روی سنگ‌های آتشفشانی ائوسن بالایی یا توده‌های مونزونیتی الیگوسن (بخش غربی) و یا سنگ‌های آتشفشانی پلیوسن و کواترنری پیشین (بخش جنوبی) فرار گرفته‌اند که بافت پورفیری داشته و در سرتاسر ناحیه ظاهری یکسان دارند و از آندزیتی (بخش زیرین) تا تراکی آندزیتی (بخش میانی) و داسیتی (بخش بالایی) تغییر می‌کنند. این گدازه‌ها دارای درزهای ستونی و ساخت ورقه‌ای است. پس از خروج گدازه‌های سبلان قدیم، خزانه ماگمایی زیر دهانه آتشفشان خالی از گدازه شده و در اثر سنگینی سنگ‌های سقف، بخش مرکزی فروریخته و یک گودال دایره‌ای شکل (کالدرا) به قطر حدود ۲۰ کیلومتر ایجاد کرده است. فروافتادگی لبه‌های این گودال یا کالدرا از دور به خوبی نمایان است که نیمرخ خاص سبلان را نشان می‌دهد. اختلاف ارتفاع بین لبه و کف گودال به ۴۰۰ متر می‌رسد. فروریزش در دو مرحله صورت گرفته، که مرحله دوم با فعالیت انفجاری شدید همراه بوده است.



منابع زمین گرمایی بر پایه لایه‌های اطلاعاتی ژئوشیمی (ساشیو اهارا و همکاران، ۲۰۰۷).

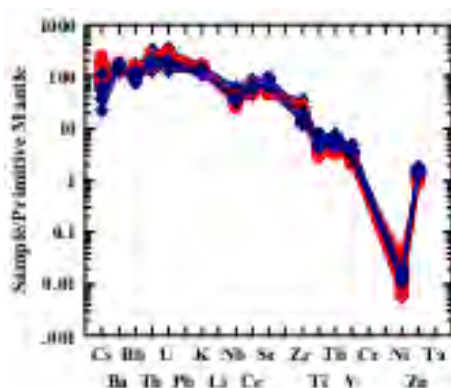
### مطالعات ژئوشیمی

سنگ های سری قبل از کالدرا شامل تناوبی از گدازه‌های تراکی‌آندزیتی، گندهای داسیتی -آندزیتی و گدازه‌های تراکی‌آندزیتی- داسیتی است. این سنگ ها ملانوکرات تا مزوکرات با بافت پرفیریتیک می‌باشند. در متن آنها درشت‌بلورهای فراوان پلاژیوکلاز به مقدار کمتر آمفیبول، پیروکسن و بیوتیت قابل مشاهده است. پلاژیوکلازها از نوع الیگوکلاز تا آندزین هستند. برخی از پلاژیوکلازها دارای منطقه بندی نوسانی و ریزساخت های غربالی و آمفیبول ها بر اساس ویژگیهای نوری از نوع هورنبلند با شواهدی از حاشیه انحلالی است. این آمفیبول ها دارای حاشیه های گرد تا نیمه گرد هستند. پیروکسن از نوع اوژیت به صورت درشت بلور و بلورهای ریز در زمینه سنگ مشاهده می‌شوند. بیوتیت با حاشیه انحلالی و ادخال های آپاتیت است. خمیره از میکروولیت های پلاژیوکلاز و پیروکسن پدید آمده است. سنگ های آتشفشانی پس از تشکیل شدن کالدرا شامل گندهای تراکی آندزیتی - داسیتی و مواد آذرآواری و ایگنیمبریتی و روانه‌های تراکی‌آندزیتی می باشد. بیشتر روانه‌های دارای بافت جریانی هستند و نسبت به گدازه های قبل از کالدرا دارای درشت بلورهای پیروکسن فراوان می باشند. پلاژیوکلازها (الیگوکلاز تا آندزین) با شواهد ریزساختی غربالی، هورنبلند دیگر درشت بلورهای سنگ هستند. خمیره از میکروولیت های آلکالی فلدسپار با ماکل کارلسباد، پلاژیوکلاز، پیروکسن، کانی های اوپاک و شیشه تشکیل یافته است. خمیره شیشه ای تا حدی توسط کانی های رسی جایگزین شده است. کاربرد روش‌های ژئوشیمیایی در اکتشافات انرژی زمین‌گرمایی موضوع بسیار مهمی است که مسائل مختلفی را در بر می‌گیرد. نقشه منابع زمین‌گرمایی بر پایه لایه‌های اطلاعاتی ژئوشیمی در ایران نیز به صورت زیر است که در آن از لایه‌های اطلاعاتی زیر استفاده شده است:

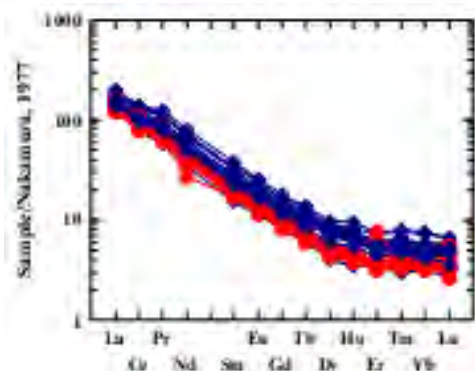
۱. چشمه‌های داغ

۲. زون‌های آلتراسیون

در مطالعات حاضر از نتایج تجزیه شیمیایی ۳۵ نمونه استفاده شده است. این نمونه ها به روش ICP-MS در آزمایشگاه SGS کشور کانادا آنالیز شده اند. برپایه نامگذاری ژئوشیمیایی ترکیب سنگ های آتشفشانی قبل از کالدرا آلکالی بازالتی تا تراکی‌آندزیت و سنگ های آتشفشانی بعد از کالدرا تراکی‌آندزیتی تا داسیتی است در نمودار چند عنصری (عادی سازی شده نسبت به ترکیب گوشته اولیه) و عناصر نادر خاکی (عادی شده نسبت به کندریت) سنگ های آتشفشانی سیلان (قبل و بعد از کالدرا) رفتار ژئوشیمیایی به تقریب مشابهی دارند. در نمودارهای چند عنصری عادی سازی شده نسبت به ترکیب گوشته اولیه غنی شدگی عناصر LIL نسبت به عناصر HFS کاملاً مشخص می‌باشد. همچنین در این نمودار ناهنجاری مشخص Nb و Ti به طور مشخص وجود دارد. در الگوی توزیع عناصر نادر خاکی عادی شده نسبت به کندریت، غنی شدگی عناصر LREE نسبت به HREE کاملاً مشخص می‌باشد همچنین در نمودار Y در برابر Sr / Y تمامی سنگ‌های آتشفشانی در محدوده آداکیت قرار می‌گیرند. بالا بودن نسبت Sr / Y منعکس کننده عمق ذوب است، زیرا با افزایش فشار، پلاژیوکلاز ناپایدار می‌شود، بنابراین Sr آزاد شده، در حالی که پایداری گارنت منجر به کاهش Y میگردد و در نهایت Sr / Y افزایش می یابد.

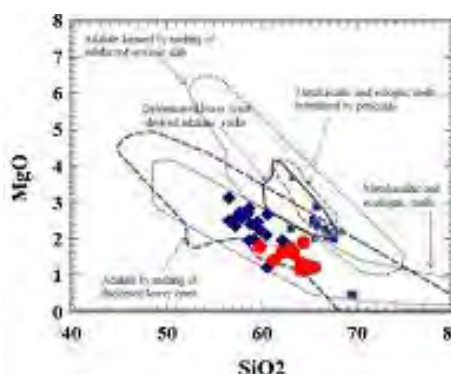


میانگین سنگهای منطقه، عادی سازی شده به ترکیب گوشته اولیه

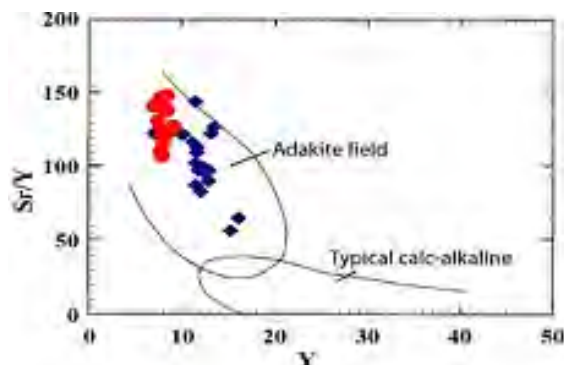


میانگین سنگهای منطقه، عادی سازی شده به ترکیب کندریت

رفتار ژئوشیمیایی به تقریب مشابه سنگهای آتشفشانی قبل و بعد از کالدرای سبلان در نمودار چند عنصری و عناصر نادر خاکی نشانگر منشاء و سرگذشت مشابه ماگمای مادر آنها میباشد. همچنین تمامی سنگهای آتشفشانی سبلان به دلیل وجود نسبتهای بالای  $Sr/Y$  و  $La/Yb$  آداکیتی هستند. با توجه به غنی شدگی از عناصر LILE و LREE به همراه تهی شدگی از عناصر HFSE و HREE در سنگهای آتشفشانی سبلان به نظر میرسد که این آتشفشان در ارتباط با محیط فرورانش تشکیل شده است. از طرف دیگر نسبتهای بالای  $Sr/Y$  و  $Na_2O/K_2O$  به همراه مقادیر بالای  $Sr$ ،  $Mg$ ، و ویژگیهای ماگماتیسم آداکیتی سبلان است که منشاء مرتبط با زون فرورانش را تایید می کنند.



نمودار  $SiO_2$  در مقابل  $MgO$ .



نمودار  $Y$  در مقابل  $Sr/Y$  از که برای تفکیک ماگماهای آداکیتی از ماگماهای کالکوالکالن تیپیک به کار می رود.

آن برای بدست آوردن اطلاعاتی درباره دما، سرچشمه و جهت حرکت سیال برای تعیین محل مخزن زیر سطحی است. همچنین تعادل بین گونه‌های شیمیایی که می‌توان از طریق برنامه‌های مربوط به محاسبه‌ی گونه‌های شیمیایی و شبیه‌سازی فرایندها از طریق جوشش و خنک‌سازی برای بدست آوردن اطلاعات بیشتر برای تشریح مخزن استفاده کرد. قابل ذکر است که با بدست آوردن اطلاعات مربوط به محیط مورد مطالعه می‌توان اطلاعاتی کلی راجع به مدل مخزن زمین-گرمايي بدست آورد (آندرسون، ۱۹۸۷). یکی از فعالیت‌های مهم در مطالعات ژئوشیمیایی در میدان‌های زمین‌گرمايي انجام نمونه‌برداری از چشمه‌های آب گرم و سرد، گاز فشان‌ها و آبفشان‌های موجود در منطقه می‌باشد. این نمونه‌برداریها دقیقاً بایستی از محل اصلی خروج آب‌های گرم در چشمه‌ها صورت گرفته و نمونه‌ها ترجیحاً در ظروف پلی اتیلن جمع آوری شود، زیرا ظروف شیشه‌ای ممکن است باعث دگرگونی در تمرکز  $\text{SiO}_2$  و تغییر در تمرکز عناصر و ترکیبات شیمیایی قلیایی بشود (الیس و ماهون، ۱۹۷۷). در چشمه‌های آبگرم ابتدا خصوصیات فیزیکی و شیمیایی چشمه شامل pH، دما، دی، رنگ، بو، مزه، و مشخصات کلی چشمه ثبت و سپس با استفاده از کاغذ صافی، آب مورد نیاز برای آنالیز صاف می‌شود. جهت کاهش فعل انفعالات شیمیایی در نمونه‌های برداشت شده در طول مدت انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه مقداری اسیدنیتریک غلیظ به نمونه‌ها اضافه می‌شود تا pH نمونه‌ها به کمتر از ۳ کاهش پیدا کند. سپس جهت تعیین غلظت عناصری نظیر سدیم (Na) پتاسیم (K) کلسیم (Ca) منیزیم (Mg) لیتیم (Li) سیلیس  $\text{SiO}_2$  به آزمایشگاه ارسال می‌شود. نتایج حاصل از تجزیه شیمیایی نمونه‌های برداشت شده در مراحل اولیه اکتشافات منابع زمین‌گرمايي می‌تواند منجر به دستیابی به اطلاعات زیر شود که در مراحل استخراج و تولید سیال از مخزن و روند نگهداری تجهیزات وابسته به تأسیسات تولید نیرو و یا سایر تجهیزات جانبی نیروگاه حائز اهمیت هستند (نوراللهی، ۱۳۸۱):

- ۱- تعیین گستره ترکیبات شیمیایی و همگن آب‌های داغ
- ۲- برآورد دمای سیال در مخزن زمین‌گرمايي
- ۳- تعیین نوع سیستم گرمايي مورد بررسی
- ۴- تعیین نوع سنگ‌های زیرسطحی در تماس با سیال داغ
- ۵- تعیین منشأ آب‌های گرم و مدت زمان احتمالی چرخش آب
- ۶- تعیین پتانسیل رسوب‌گذاری کانی‌ها در سیال زمین‌گرمايي
- ۷- تعیین جهت یا مسیر حرکت آب‌های زیرزمینی
- ۸- تعیین موقعیت گسل‌ها و نواحی گسلش و شکستگی‌ها

### بخار زمین‌گرمايي و محلول‌های جوشان زمین‌گرمايي

منفذهای بخار زمین‌گرمايي (دودخان‌ها) در سطح بالای سیستم‌های زمین‌گرمايي با آنتالپی بالا دیده می‌شوند. اگرچه بعضی سیستم‌های زمین‌گرمايي از این نظر فعال نمی‌باشند یعنی بخار یا دودخان از آنها در سطح دیده نمی‌شود. در صورتی که دودخان‌ها یا منفذهای خروجی بخارها دارای قدرت بالا باشند بدین منظور که بخار زیادی خارج شود از دور نیز آشکارا به نظر می‌رسند که بخار از زمین خارج می‌شود و توسط ویژگی‌های مربوط به آن نظیر بوی شبیه تخم مرغ گندیده و یا بوی  $\text{H}_2\text{S}$  که در اکثر سیستم‌های زمین‌گرمايي یافت می‌شود نیز مشخص می‌شود. بخارهای زمین‌گرمايي و فعالیت آنها نشان دهنده این است که در زیر سطح آنها آب‌های زمین‌گرمايي وجود دارد ولی به سطح نرسیده است (فردریکسون و آرمانسون، ۲۰۰۷). در محلول‌های خنک شده یا جوشان زمین‌گرمايي برعکس بخارهای زمین‌گرمايي آب داغ به سطح زمین می‌رسد. چشمه‌های داغ نیز مثل بخارهای زمین‌گرمايي در تمامی سیستم‌های زمین‌گرمايي با دمای بالا مشاهده نمی‌شوند ولی در اکثر آنها از قبیل آمریکای مرکزی که در ارتباط با ولکانیکهای آندزیتی می‌باشند، دارای دمای بالایی نیز هستند (دی‌آمر و آرنورسون، ۲۰۰۰) در این سیستم‌ها چشمه‌های آبگرم در ارتفاعات کم و در مجاورت ولکانیکها قرار می‌گیرند در حالیکه منفذهای بخار در سطح وسیع و در ارتفاعات گسترش یافته و فعال هستند. در کل محلول‌های خنک شده زمین‌گرمايي دارای pH کمتری هستند و این به دلیل نداشتن گازهای  $\text{CO}_2$  و  $\text{H}_2\text{S}$  می‌باشد. چشمه‌های

آبگرم به وسیله ویژگی‌هایی که دارند مشخص می‌شوند که از جمله آنها به نهشته‌های جالب از سیلیس در دهانه چشمه‌ها و نهشته‌های کربناتی می‌شود اشاره کرد (فردریکسون و آرمانسون، ۲۰۰۷). انواع مختلف زیرشاخه‌های مربوط به محلول‌های مخلوط را می‌توان در داخل و اطراف مناطق زمین‌گرمایی یافت. آب‌هایی غنی از CO<sub>2</sub> که می‌توانند آبخانه‌ها را از گاز CO<sub>2</sub> غنی سازند و به طور مشابه با آب‌های زیرزمینی ترکیب شوند. ترکیب محلول‌های جوشان زمین‌گرمایی و آب‌های زیرزمینی نتایج زیر را به همراه خواهد داشت:

۱- این ترکیب دارای گاز کمی خواهد بود ولی از نظر دما و غلظت هر یک از اجزاء غیر فرار به نسبت ترکیب مقدار متوسطی مقادیر آب زیرزمینی و محلول زمین‌گرمایی خواهد بود به -طوری‌که آب‌های غنی از CO<sub>2</sub> معمول در مرز سیستم‌های ژئوترمالی و ولکانیک‌های فعال (استفانسون و همکاران، ۲۰۰۷) و در محدوده‌های ولکانیکی یافت شوند (آیوپا، ۲۰۰۳)

۲- مقادیر غلظت خیلی بالای CO<sub>2</sub> اغلب اوقات در سیالات مربوط به مخزن در سیستم‌های زمین‌گرمایی خنک شده قدیمی دیده شده‌اند.

۳- از دیگر انواع محلول‌های مخلوط در اطراف سیستم‌های زمین‌گرمایی که سطح آب زیرزمینی بالاست یافت می‌شوند. محلول‌های مخلوط معمولاً با ویژگی‌های نزدیک به سیستم‌های زمین‌گرمایی و با دمای تند و تغییرات شیمیایی بین آب‌های زیرزمینی و سیستم‌های زمین‌گرمایی دارند.

### بخار داغ آب‌های سطحی

بخار داغ آب‌های سطحی با مقدار pH کمتر از یک مشخص می‌شوند و این به دلیل اکسیداسیون H<sub>2</sub>S به خاطر واکنش با اکسیژن آب‌های سطحی است. حاصل این اکسیداسیون، اسید سولفوریک می‌باشد. بخار داغ آب‌های سطحی به طور معمول در تالاب‌ها و منفذهای اطراف زمین‌هایی که دارای بخار هستند نیز یافت می‌شوند. این آب‌ها حاوی مقادیر زیادی از جامدهای حل شده در خود هستند که از سنگ‌های سطحی در آنها حل شده است و بنابراین این دسته از سیالات زمین‌گرمایی گویای وضعیت سیستم زمین‌گرمایی نخواهند بود چون چیزی به آن صورت از سیستم زمین‌گرمایی در آنها باقی نمانده است. همچنین اسید سولفوریک حاصل از فرایند اکسیداسیون سولفید هیدروژن به طور عمده باعث به وجود آمدن اکسیداسیون می‌شود که در ارتباط با منفذهای بخار و درجه حرارت بالا هستند (فردریکسون و آرمانسون، ۲۰۰۷). از بخارهای زمین‌گرمایی و محلول‌های زمین‌گرمایی برای ارزیابی دمای مخزن استفاده می‌شود، در حالی که محلول‌های مخلوط هم اطلاعات مهمی درباره دما و شرایط سیستم به دست می‌دهند و آلتراسیون‌هایی که توسط آنها ایجاد می‌شود می‌تواند مفیدتر باشد که همگی کمک می‌کنند تا ساختار درستی از سیستم زمین‌گرمایی مشخص شود و به طور مشابه چشمه‌های آبگرم غنی از بخار نیز نشان دهنده این است که در جوانب آن سیستم زمین‌گرمایی وجود دارد که به محیط‌های اطراف خودش فشار وارد می‌کند (فردریکسون و آرمانسون، ۲۰۰۷).

### اکتشافات در منطقه زمین‌گرمایی مشکین شهر

در منطقه سبلان، تعداد بسیار زیادی از شواهد سطحی انرژی زمین‌گرمایی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به ۱۷ چشمه آبگرم در این منطقه اشاره نمود. این چشمه‌ها از شمال غربی تا جنوب غربی سبلان در گروه‌های مشکین شهر، بوشلی و سرعین پراکنده شده‌اند. میانگین دمای چشمه‌ها در حدود ۴۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. گرمترین چشمه‌ها در گروه مشکین شهر (۸۵ درجه سانتیگراد) و در گروه بوشلی (۷۷ درجه سانتیگراد) واقع می‌باشند. حداکثر دبی جریان در گروه مشکین شهر ۹۰۰۰ لیتر بر دقیقه و در گروه سرعین در حدود ۴۰۰۰ لیتر بر ثانیه می‌باشد، بررسی‌ها نشان می‌دهند که همه چشمه‌ها بطور قابل ملاحظه ای دارای دبی بیشتری در ماه اردیبهشت نسبت به مرداد می‌باشد.

موقعیت	دما	ارتفاع	دبی	ph
مونیل	۴۵	۲۲۰۰	۱.۵	۵

۷	۷	۲۱۲۰	۸۳	قینرجه
۶	۴	۲۰۱۰	۳۴	ایلاندو
۵	۱	۱۹۹۰	۵۱	دو دو
۳	۰.۳	۲۵۰۰	۳۲	آق سو
۶	۲	۲۲۵۰	۴۵	ملک سو

### اکتشافات ژئوشیمیایی

مطالعات ژئوشیمیایی منطقه سبلان تعداد ۶۵ نوع آب چشمه، ۱۴ نوع گاز، ۳۰ مورد منطقه دگرسانی گرمائی و ته نشینی و ۳۳۵ مورد آب های هرز را ثبت نموده است. نمونه گیری از چهار منطقه سرعین، بوشلی، مشکین شهر و اهر انجام شد. نتیجه گیری اصلی حاصل از آزمایش نمونه ها در این منطقه به شرح زیر می باشد:

۱- آب گرم با آب زیرزمینی مخلوط می شود. اختلاف دمای آب مخلوط شده و شرایط آب های زیرزمینی محلی، نتایج محاسبات شیمیایی معمول شرایط زیرزمینی را همانند یک دماسنج زمینی متعادل می کند.

۲- میزان برم و کلر در آب گرم منطقه سبلان مشخص می کند که آبهای گرم در مشکین شهر، بوشلی و سرعین می توانند منشاء مشترک داشته باشند.

۳- آبهای گرم در منطقه سبلان از یک منبع زمین گرمائی با دمای بالا سرچشمه می گیرد. انتظار می رود دماهای بیشتر از ۱۵۰ درجه سانتیگراد در چاه های عمیق یافت شوند.

۴- انتظار می رود که در حدود ارتفاعات بالای سبلان منطقه ای با جریان بالا یافته شود که این منطقه جزو مناطق با شانس بیشتر برای اکتشافات حفاری می باشد [ ۱ ].

ردیف	نام سایت	شماره چاه	عمق (متر)	وضعیت موجود
۱	سایت A	NWS-1 NWS-2	۳۱۹۷ ۶۵۲	آزمایش در می ۲۰۰۴. قابلیت تولید ۲.۲ MWe چاه تزریقی برای چاه NWS-1
۲	سایت B	NWS-4 NWS-5	۲۲۶۵ ۴۹۴	آزمایش در سپتامبر ۲۰۰۴. قابلیت تولید ۲.۱ MWe چاه تزریقی برای چاه NWS-1
۳	سایت C	NWS-3	۳۱۷۰	حداکثر دما ۱۴۸ درجه سانتیگراد در عمق ۲۶۰۰ متری. به احتمال فزونی جهت چاه تزریقی مورد استفاده قرار می گیرد همچنین برای استفاده مستقیم مناسب است.

مشخصات و وضعیت موجود چاه های حفر شده در سایت زمین گرمایی سبلان

### بررسی سنگ شناسی و ژئودینامیک گنبد های آتشفشانی سبلان

گنبد های مورد مطالعه در منطقه سبلان که دارای ترکیب اسیدی تا حد واسط می باشند به صورت تجمع زبانه های متوالی و مجزای توده های گدازه بر روی یکدیگر و یا به صورت انفجارات برون زاد رشد کرده اند به همین دلیل در زمره گنبد های برون زاد طبقه بندی می شوند. با فرو ریزش کالدرای بر روی بخش فوقانی ماگمای مرکب (ماگمای بازیک زیرین و ماگمای اسیدی بالایی حاصل از ذوب بخشی پوسته) فعالیت های آتشفشانی اسیدی تا حد واسط به صورت فوران های نقطه ای و شکافی با پراکنگی های اغلب جهت یافته توسط ساختارهای کمانی و خطی ایجاد شده در کالدرای گاه با توزیع تصادفی این محل های خروج گدازه بالا فاصله پس از فرو نشست کالدرای شروع شده و در فاصله ی زمانی بعد از آن نیز ادامه می یابد این فرایندها سبب ایجاد گنبد های خروجی متشکل از گدازه های گرانرو شده است. با توجه به داده های زمین شیمی بهترین محیط زمین ساختی برای این توده ها محیط پس از کوهزایی است. تبلور بخشی عامل منحصر بفرد در ایجاد سنگ های این گنبد ها نبوده و پدیده های هضم و آغشتگی پوسته ای نیز در تشکیل آنها دخیل بوده است .



## الف: ژئو دینامیک جایگیری گنبد ها

به طور کلی گنبد های آتشفشانی بر اساس ساز و کار رشد به چهار دسته تقسیم می شوند:

۱- گنبد های درون زاد (Dome Endogenous): در این گنبدها هر مرحله از ماگما به پوسته قبلی نفوذ کرده و درونی ترین بخش گنبد با آخرین تغذیه ماگما مربوط است

۲- گنبد های برون زاد (Dome Exogenous): به موجب خروج ماگمای روان تر و دارای گر انرژی کمتر شکل می گیرد

۳- گنبد های ژرف زاد (Dome Hypogenous): بر خلاف گنبد های درون زاد که رشد درونی دارند و تحذب آنها رو به بالاست در این مورد رشد گنبد باعث پس زدن لایه های همبر و گاه راندگی سنگی مجاور می گردد

۴- نهان گنبد ها (Cryptodome): در این نوع گنبد ها تجمع مواد درست در زیر زمین صورت می گیرد. این مواد گاه سنگ و خاک رویی را بلند میکنند و یک برجستگی می سازد

بر اساس شواهد موجود گنبد های مورد مطالعه از نوع برون زاد می باشند که اغلب آنها گدازه های خود برشی ای (autobrecciated) هستند که قطرشان بیش از دو کیلومتر نیست. تنها گدازه های داسیتی قره گل به درازای ۷/۵ کیلومتر و پهنای ۳ کیلومتر می باشد. گدازه ای با گر انرژی زیاد بر روی یک سرایشی جریان یافته، که در آغاز یک گنبد تشکیل داده ولی بر روزدی همچون یک بازوی بر آمده به شکل زبانه ای به سوی پایین روان شده است. این جریان گدازه سبب بسته شدن دره هایی گردیده که پیش از این بخشی از آنها را مواد آذر آوری پر کرده بود. تغییرات فشار محفظه ماگمایی طی مراحل مختلف حرکت رو به بالای ماگما هنگام فوران، تزریق و نفوذ جانبی، سبب ایجاد شکستگی هایی در پوسته حبس کننده محفظه ی ماگمایی و سقف آن می شود که بخشی از تاریخچه تکاملی محفظه ی ماگمایی را تشکیل دهد. افزایش فشار هیدروستاتیک محفظه ی ماگمایی و انبساط ماگما بیشتر به جدایش فاز گازی محلول در ماگما که همزمان با صعود ماگما و کاهش فشار لیتوستاتیک سنگ های رویی صورت می گیرد. فوران قائم مواد فرار، نفوذ جانبی به سنگ دیواره، جایگیری نفوذی های ورقه ای به صورت دایکهای شعاعی، حلقوی و مخروطی و فوران از دهانه ها و شکاف های ایجاد شده در دامنه مخروط آتشفشان از عوامل کاهش فشار محفظه ی ماگمایی هستند. در مرحله ی افزایش فشار، زمانی که فشار کلاهیک ماگمایی غنی از مواد فرار توسط سنگ های سقف حجره قابل تحمل نمی شود، شکافها و شکستگی های توسعه یافته از اعماق به سوی سطح در سنگ های سقف، طی پدیده شکافت هیدرولیک ماگمایی (و همچنین برخی شکستگی های موجود قبلی) معبر هایی را برای خروج پامیس و خاکستر مهیا می سازند، این ذرات ابتدا به صورت ستونهای فوران تظاهر یافته. سپس نهشته های پامیس را تشکیل می دهند. طی این فوران حجیم مواد فرار ماگمایی، فرایند فروریزش ناگهانی یا فرونشست تدریجی کالدر را بر روی سری هایی از شکستگی های با آرایش محیطی، پر شیب تا قائم و با جهات شیب درونی و بیرونی رخ می دهد. از دیدگاه منشا ماگمایی بیشتر کالدرها در مناطقی رخ می دهند که بواسطه واکنشهای بین پلوم 'گوشته ای بالا آمده و پوسته میزبان، آتشفشانی بایو مدال نشان می دهند، توده ماگمایی در این مناطق مرکب از بخش ماگمای بازیک زیرین و بخش ماگمای اسیدی است که بخش اسیدی بالایی طی فرایند ذوب بخشی پوسته بوجود آمده است و صعود منفعل آن را مرهون ماگمای بازیک زیرین است که با گر انرژی کمتر و دمای زیادتر در حال صعود دیاپیری است ولی به سبب غلظت ماگمای اسیدی بالا جای گرفته به تله افتاده و صعود آن سرکوب می شود. با فرو ریزش بر روی بخش فوقانی ماگمای مرکب فعالیت های آتشفشانی اسیدی تا حدو اسط (به سبب اختلاط ماگمایی) به صورت فورانها ی نقطه ای و شکافی با پراکنگی های اغلب جهت یافته توسط ساختارهای کمانی و خطی ایجاد شده در کالدر و گاه با توزیع تصادفی این محل های خروج گدازه بالا فاصله پس از فور نشست کالدر شروع شده و به فاصله ی میلیونها سال پی از آن ادامه می یابد این فرایندها سبب ایجاد گنبد های خروجی متشکل از گدازه های گر انرژی و هم سبب جایگیری توده های نفوذی کم عمق و سامانه دایکهای پی از تشکیل کالدرها شوند. مدل سازی جریان یافتگی حرارتی در اطراف کالدرهای جوان نشانگر آنند که افت حرارت مربوط به کنوکسیون هیدروترمال آنقدر زیاد است که سیستم های ماگمایی کم عمق مرتبط با این کالدرها بدون اینکه از اعماق به آنها ماگمای اضافی برسد نمی توانند بیش از چند صد هزار سال داغ باقی بمانند و به سرعت افول می کنند اما در مورد بسیاری از کالدرها وجود سابقه و تاریخچه ولکانیسم پس از فرو رانش نشانگر آن است که معمولاً به این محفظه ها و سیستم ها

ماگمایی، ماگما رسانی به تعدد صورت می‌گیرد. بالا آمدگی ماگما پس از فور ریزش کالدرا سبب می‌شود که کف سطح کالدرا به بالا فشرده شده و سبب آپلیفت کالدرا و به اصطلاح احیاء آن می‌شود. این بالا آمدگی ممکن است فقط سبب گنبدی شدن هسته کالدرا شود یا اینکه به یک بالا آمدگی ناحیه ای وسیع در اطراف میدان آتشفشانی بیانجامد. بسیاری از کالدرهای ما قبل تاریخ Holocene-Pre به طور بخشی تا کامل توسط گدازه های جوان و مواد اذر اوری فوران یافته پس از فروریزش این کالدرها و رسوبات و قطعات سنگی حاصل از فرسایش دیواره کالدرا و گنبد ها انباشته شده اند (۲۰۰۰). Sigurdsson, کالدرا سیلان نیز به سبب ولکانیسم بعدی با مواد حاصل از فورانهای شکافی و دهانه ای متعدد و با ترکیب های متغییر از ریولیت تا آندزیت تقریباً پر شده است طوری که توپوگرافی بوجود آمده تا بیش از هزار و پانصد متر از کف کالدرا امروزی بالاتر ایستاده است. (فریدی ۱۳۸۹)

## نتایج

- ۱- برای اکتشاف مخازن زمین‌گرمایی، باید مواردی از قبیل مطالعات زمین‌شناسی، مطالعات هیدرولوژیکی، مطالعات ژئوفیزیکی و از همه مهمتر مطالعات ژئوشیمی را مورد بررسی قرار داد.
- ۲- با توجه به تقسیم‌بندی آلیس و ماهون که تقسیم‌بندی بر پایه یون‌های اصلی است، می‌توان گفت که آب‌های زمین‌گرمایی سیلان در دسته آلکالی - کلراید قرار می‌گیرد که دارای ویژگی‌هایی از قبیل: دارای pH در بازه ۴-۱۱، در سنگ‌های جوان کمتر حضور دارند، این دسته دارای مقادیر زیادی از آب‌های سدیم کلراید و پتاسیم کلراید می‌باشد.
- ۳- از مهمترین ابزارهای ژئوشیمی برای تحلیل آب‌های زیرسطحی استفاده از دیگرامهای سه‌گوش و نمودار  $\log(Q/k)$  می‌باشد، همچنین می‌توان از ایزوتوپ‌های پایدار و ایزوتوپ‌های رادیو اکتیو و CFCS (کلروفلوئوروکربنات ها) و اجزاء تشکیل دهنده سنگ که از تمامی آنها برای پیشبینی رفتار مخزن زمین‌گرمایی، پتانسیل، دمای آب‌های زیرزمینی و تحلیل آنها به کار برده می‌شود استفاده کرد.
- ۴- گنبد‌های اسیدی تا حدواسط مورد مطالعه از نوع برون زاد (dome Exogenous) می‌باشند بالا آمدگی ماگما پس از فور ریزش کالدرا سبب فشرده شدن کف سطح کالدرا به بالا و بالا آمدگی کالدرا و به اصطلاح احیاء آن شده است. این بالا آمدگی هم سبب گنبدی شدن هسته کالدرا و هم به یک بالا آمدگی ناحیه ای وسیع در اطراف میدان آتشفشانی منجر شده است که ماگمای ماگمای اسیدی و گرانرو بالا آمده به واسطه حضور گسل ها و شکستگیها همروند با ساختار های اصلی منطقه قادر به صعود به تراز های سطحی زمین شده است. از دیدگاه سنگ شناسی گنبد‌های منطقه ترکیب اسیدی تا حدواسط ریولیتی، داسیتی و تراکی داسیتی دارند. فراوانی درشت بلور در این سنگها دلالت بر پیشرفت تبلور ماگمای گرانرو ضمن صعود به سطح زمین دارد. از نظر ژئو دینامیکی معادل توده های اسیدی گرانیتوئیدی پس از برخورد (Collisional-Post) می‌باشد. تنوع سنگ شناختی منطقه نه تنها وابسته به تفریق تبلور بخشی بوده بلکه پدیده های هضم و آغستگی پوسته ای نیز در تمرکز و تحول ماگمای اسیدی دخیل بوده است
- ۵- برای تشکیل یک سیستم زمین‌گرمایی وجود منبع حرارتی، سنگ مخزن، سنگ پوششی و سیال لازم و ضروری می‌باشد و در صورت فقدان یکی از این چهار عامل، تشکیل یک سیستم زمین‌گرمایی قابل اکتشاف و بهره‌برداری، نمی‌باشد و در اکتشافات اولیه منابع زمین‌گرمایی، اساس کار پی بردن به وجود چهار عامل فوق است.
- ۶- آب‌های زمین‌گرمایی از نوع آب‌های اقیانوسی و آب‌های جوی می‌باشند.
- ۷- کاربرد روش‌های ژئوشیمیایی در اکتشافات انرژی زمین‌گرمایی موضوع بسیار مهمی است که مسائل مختلفی را در بر می‌گیرد.
- ۸- نهشته شدن کلسیت در چاه شماره ۶ بیشتر از چاه شماره ۴ است، زیرا خروجی کلسیم از چاه شماره ۶ کمتر است. آب خروجی از چاه‌ها از نظر وجود بی‌کربنات در حد متوسط قرار دارد. گاز CO<sub>2</sub> با ۹۶٪ بیشترین سهم در فاز بخار خروجی دارد. با توجه به دیگرام اشولر مشخص می‌شود که سدیم (Na) و پتاسیم (K) کاتیون شاخص و کلر (Cl) آنیون شاخص نمونه‌های برداشت شده از هر دو چاه می‌باشد. از دیگرام پایپر نتیجه گرفته می‌شود که آب خروجی از چاه‌های زمین‌گرمایی سیلان مربوط به دسته  $Cl / SO_4 - Na / K$  می‌باشد.

۹- مخزن زمین‌گرمایی سبلان، مربوط به یک سیستم هیدروترمال قدیمی است. آب‌های زمین‌گرمایی سبلان در دسته waters Mature قرار دارد. آب‌های زمین‌گرمایی سبلان غنی از کلر می‌باشند. سیستم زمین‌گرمایی در منطقه سبلان به سمت بالا در گردش است.

۱۰- در تفسیر داده‌های ژئوترموتری باید کاملاً هوشیار بود و به این نکته که سیال زمین‌گرمایی از مخازن عمیقی می‌جوشد که فرایندهای مهم و زیادی بین آب و سنگ روی داده است را در نظر داشت که همگی به دما وابسته‌اند و تأثیر زیادی روی ترکیب شیمیایی آنها رخ داده است.

۱۱- از دمای ۱۱۰ تا حدوداً ۲۳۰ درجه سانتیگراد، شاخص اشباع کلسیت با افزایش دما تقریباً به‌طور خطی رفتار می‌کند و بعد از آن از این حالت خارج شده و تغییرات شاخص اشباع کمتر و تا حدودی ثابت می‌شود که این امر به احتمال زیاد به‌خاطر خروج گاز از سیال در حین صعود به بالا و یا تغییرات pH می‌تواند باشد.

۱۲- کلسیت از کانی‌هایی است که انحلال‌پذیری آن به‌طور قهقراپی است، چون با افزایش دمای محلول قابلیت حل شدنی آن با شیب بالایی دنبال می‌شود.

۱۳- دما، گاززدایی و pH از مهمترین عوامل اثرگذار بر روی شاخص اشباع کانی‌های موجود در سیال زمین‌گرمایی می‌باشند.

۱۴- تحلیل مولفه‌های اصلی می‌تواند برای کاهش ابعاد داده مورد استفاده قرار بگیرد، به این ترتیب مولفه‌هایی از مجموعه داده را که بیشترین تأثیر در واریانس را دارند حفظ می‌کند. بنابراین از این روش می‌توان برای مطالعه گونه‌های موجود در مخزن زمین‌گرمایی استفاده کرد.

۱۵- با توجه به اینکه هر چه تعداد نمونه‌های برداشت شده بیشتر باشد، نتیجه حاصل از روش تحلیل مولفه‌های اصلی قابل اعتمادتر خواهد بود، پیشنهاد می‌شود از این روش با تعداد داده‌های بیشتری نیز استفاده شود تا نتایج مطلوبتری حاصل گردد.

۱۶- با توجه به اطلاعات هیدروژئوشیمی و ایزوتوپی موجود از چشمه‌های آبگرم منطقه، منشاء آب چشمه‌ها جوی بوده و چنین به نظر می‌رسد که آبهای سطحی توسط شکستگی‌ها، درزه‌ها و گسل‌های موجود در منطقه به سمت پایین حرکت کرده و در طی یک چرخش عمیق، بر اثر گرادیان حرارتی و تأثیر توده‌های نفوذی گرم شده و به سمت بالا صعود کرده است که در حین صعود با آبهای سرد سطحی اختلاط پیدا کرده که خروج چشمه‌های آبگرم در امتداد گسل‌ها موید این مطلب می‌باشد.

❖ قابلیت حل شدن کوارتز با افزایش pH زیادتر می‌شود.

❖ با توجه متن فرمول‌های آورده شده برای ژئوترموتر  $Na / K$ ، هرچه مقدار  $Na / K$  بیشتر باشد دمای حاصل کمتر خواهد بود.

❖ میانگین نسبت  $Na / K$  در چاه شماره ۴ کمتر از چاه شماره ۶ است که در نتیجه دمای حاصل از ژئوترموتری  $K/Na$  برای چاه شماره ۴ بزرگتر خواهد بود.

❖ در تمامی ژئوترموترها به‌جز ژئوترموتر  $K/Na$  دمای چاه شماره ۶ بزرگتر از دمای چاه شماره ۴ است.

❖ در استفاده از ژئوترموتر  $K - Mg$  باید در نظر داشت که هر گونه اختلاط با دیگر سیال‌ها که باعث افزایش  $Mg$  شود باعث می‌شود که این ژئوترموتر دمای بیشتری نسبت به دمای واقعی به دست دهد.

❖ با به‌کارگیری ژئوترموتر  $Ca - Na - K$  در چاه شماره ۶ به‌طور میانگین دمای  $271/76$  و در چاه شماره ۴ دمای  $262$  درجه سانتیگراد محاسبه شد که با توجه به متن فرمول که در بردارنده غلظت سدیم و پتاسیم است، همخوانی خوبی با ژئوترموتر  $Na / K$  دارد. نتایج ژئوترموتر  $H2S$  با نتایج حاصل از ژئوترموتر  $Na / K$  همخوانی خیلی بالایی دارد.

❖ ژئوترموتر  $CO2$  دمای بزرگتری نسبت به سایر ژئوترموترهای گازی و جسم حل شده نشان می‌دهد.

❖ مخزن زمین‌گرمایی سبلان با توجه به چاه‌های شماره ۴ و ۶ از نظر در تعادل بودن کانی‌ها در عمق، با توجه به خط تعادلی موجود بر روی دیاگرام  $Na - K - Mg$  در حالت تعادل می‌باشد.

❖ با افزایش دما تعادل یونی نیز افزایش می‌یابد.

- ❖ با توجه به نمودارهای رسم شده برای مقایسه بین pH مخزن و pH نمونه‌های برداشت شده، این نکته نتیجه گرفته می‌شود که با کاهش یا افزایش pH در مخزن، مقدار pH برای نمونه‌های برداشت شده نیز کاهش یا افزایش می‌یابد .
- ❖ تنها کانی که در دمای مخزن (دمایی که توسط نرم‌افزار به عنوان دمای مرجع قرار گرفته) در حال تعادل است، کانی کوآرتز می‌باشد .
- ❖ سیلیس آمورف در امر نهشتگی تهدید محسوب نمی‌شود.
- ❖ کانی کوآرتز در دماهای بیشتر از دمای تعادل به حالت غیر اشباع در می‌آید و در دماهای کمتر از دمای تعادل، سیال زمین‌گرایی از کوآرتز فوق اشباع می‌شود و امکان رسوب آن وجود دارد .
- ❖ کانی آنهیدریت در دماهای کمتر از دمای ۲۴۳ °C به حالت غیراشباع درآمده و امکان نهشتگی این کانی در تاسیسات و چاه‌ها وجود ندارد..

### تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از دکتر سید علیرضا آشفته بابت در اختیار گذاشتن اطلاعات و داده های خام و همکاری در این پژوهش کمال سپاسگزاری را دارند.

### منابع

- ۱- امینی و همکاران، (۱۹۹۹) ، گزارش نقشه ۱ / ۱۰۰۰۰۰ مشکین شهر، سازمان زمین شناسی کشور
- ۲- پیر محمدی علیشاه، ف.، (۱۳۹۰) ، ژئوشیمی آداکیت های سهند، سی امین گردهمایی علوم زمین
- ۳- قاسمی، ح.، صادقیان، م.، خانعلیزاده، ع. (۱۳۸۹). (سنگشناسی، ژئوشیمی و سن تابش سنجی گنبدهای آداکیتی پرسیلیس کمان قارهای نئوزن، جنوب قوچان"، مجله بلورشناسی و کانیشناسی ایران، ص ۳۷۰ تا ۳۴۷
- ۴- نبوی، م.، (۱۳۵۵) ، مقدمه ای بر زمین شناسی ایران، سازمان زمین شناسی کشور.
- ۵- امامی، ۱۳۷۹، ماگماتیسم در ایران، انتشارات سازمان زمین شناسی کشور
- ۶- امامی، م.، ۱۳۶۹، دیاپیریسم و گنبدهای آتشفشانی-مجموعه مقالات سمپوزیوم دیاپیریسم
- ۷- درویش زاده ۱۳۶۵، اصول آتشفشان شناسی، انتشارات دانشگاه تهران
- ۸- فریدی، م.، ۱۳۸۹: زمین شناسی ساختمانی سبلان، آرشیو سازمان انرژی های نو ایران (سانا)، دفتر انرژی زمین گرمایی. ۷۴ صفحه
- ۹- باباخانی، ۱۳۶۰، شرح نقشه زمین شناسی چهار گوش اهر، سازمان زمین شناسی کشور
- ۱۰- مهندس بهروز امینی، نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ مشکین شهر، سازمان زمین شناسی کشور
- ۱۱- معین وزیری، ح.، احمدی، ع.، ۱۳۷۱، پتروگرافی و پترولوژی سنگهای آذرین، انتشارات دانشگاه تربیت معلم، ۵۳۹ص