



منابع زمین گرمایی

(رشته زمین شناسی)

دکتر سیدرضا مهرنیا

امروزه کتاب‌خوانی و علم‌آموزی، نه تنها یک وظیفه‌ی ملی، که یک واجب دینی است.

مقام معظم رهبری

در عصر حاضر یکی از شاخصه‌های ارزیابی رشد، توسعه و پیشرفت فرهنگی هر کشوری میزان تولید کتاب، مطالعه و کتاب‌خوانی مردم آن مرز و بوم است. ایران اسلامی نیز از دیرباز تاکنون با داشتن تمدنی چندهزارساله و مراکز متعدد علمی، فرهنگی، کتابخانه‌های معتبر، علما و دانشمندان بزرگ با آثار ارزشمند تاریخی، سرآمد دولت‌ها و ملت‌های دیگر بوده و در عرصه‌ی فرهنگ و تمدن جهانی به‌سان خورشیدی تابناک همچنان می‌درخشد و با فرزندان نیک‌نهاد خویش هنرنمایی می‌کند. چه کسی است که در دنیا با دانشمندان فرزانه و نام‌آور ایرانی همچون ابوعلی سینا، ابوریحان بیرونی، فارابی، خوارزمی و ... همچنین شاعران برجسته‌ای نظیر فردوسی، سعدی، مولوی، حافظ و ... آشنا نباشد و در مقابل عظمت آنها سر تعظیم فرود نیاورد. تمامی این افتخارات ارزشمند، برگرفته از میزان عشق و علاقه فراوان ملت ما به فراگیری علم و دانش از طریق خواندن و مطالعه منابع و کتاب‌های گوناگون است. به شکرانه‌ی الهی، تاریخ و گذشته ما، همیشه درخشان و پربار است. ولی اکنون در این زمینه در چه جایگاهی قرار داریم؟ آمار و ارقام ارائه‌شده از سوی مجامع و سازمان‌های فرهنگی در مورد سرانه‌ی مطالعه‌ی هر ایرانی، برایمان چندان امیدوارکننده نمی‌باشد و رهبر معظم انقلاب اسلامی نیز از این وضعیت بارها اظهار گله و ناخشنودی نموده‌اند.

کتاب، دروازه‌ای به سوی گستره‌ی دانش و معرفت است و کتاب خوب، یکی از بهترین ابزارهای کمال بشری است. همه‌ی دستاوردهای بشر در سراسر عمر جهان تا آنجا که قابل کتابت بوده است، در میان دست‌نوشته‌هایی است که انسان‌ها پدید آورده و می‌آورند. در این مجموعه‌ی بی‌نظیر، تعالیم الهی، درس‌های پیامبران به بشر، و همچنین علوم مختلفی است که سعادت بشر بدون آگاهی از آنها امکان‌پذیر نیست. کسی که با دنیای زیبا و زندگی‌بخش کتاب ارتباط ندارد بی‌شک از مهم‌ترین دستاوردهای انسانی و نیز از بیشترین معارف الهی و بشری محروم است. با این دیدگاه، به‌روشنی می‌توان ارزش و مفهوم رمزی عمیق در این حقیقت تاریخی را دریافت که اولین خطاب خداوند متعال به پیامبر گرامی اسلام (ص) این است که «بخوان!» و در اولین

سوره‌ای که بر آن فرستاده‌ی عظیم‌الشان خداوند، فرود آمده، نام «قلم» به تجلیل یاد شده‌است: «اقْرَأْ وَ رَبُّكَ الْأَكْرَمُ. الَّذِي عَلَّمَ بِالْقَلَمِ» در اهمیت عنصر کتاب برای تکامل جامعه‌ی انسانی، همین بس که تمامی ادیان آسمانی و رجال بزرگ تاریخ بشری، از طریق کتاب جاودانه مانده‌اند.

دانشگاه پیام‌نور با گستره‌ی جغرافیایی ایران‌شمول خود با هدف آموزش برای همه، همه‌جا و همه‌وقت، به‌عنوان دانشگاهی کتاب‌محور در نظام آموزش عالی کشورمان، افتخار دارد جایگاه اندیشه‌سازی و خردورزی بخش عظیمی از جوانان جویای علم این مرز و بوم باشد. تلاش فراوانی در ایام طولانی فعالیت این دانشگاه انجام پذیرفته تا با بهره‌گیری از تجربه‌های گرانقدر استادان و صاحب‌نظران برجسته کشورمان، کتاب‌ها و منابع آموزشی درسی شاخص و خودآموز تولید شود. در آینده هم، این مهم با هدف ارتقای سطح علمی، روزآمدی و توجه بیشتر به نیازهای مخاطبان دانشگاه پیام‌نور با جدیت ادامه خواهد داشت. به‌طور قطع استفاده از نظرات استادان، صاحب‌نظران و دانشجویان محترم، ما را در انجام این وظیفه‌ی مهم و خطیر یاری‌رسان خواهد بود. پیشاپیش از تمامی عزیزانی که با نقد، تصحیح و پیشنهادهای خود ما را در انجام این وظیفه‌ی خطیر یاری می‌رسانند، سپاسگزاری می‌نماییم. لازم است از تمامی اندیشمندانی که تاکنون دانشگاه پیام‌نور را منزلگاه اندیشه‌سازی خود دانسته و ما را در تولید کتاب و محتوای آموزشی درسی یاری نموده‌اند، صمیمانه قدردانی گردد. موفقیت و بهروزی تمامی دانشجویان و دانش‌پژوهان عزیز آرزوی همیشگی ما است.

دانشگاه پیام‌نور

فهرست مطالب

نه	پیشگفتار
۱	فصل اول: کلیات
۱	هدف کلی
۱	هدف‌های یادگیری
۱	مقدمه
۲	۱-۱ منشأ گرمای درون زمین
۴	۱-۱-۱ پیدایش جریان‌های زمین گرمایی (فرایند ژئوترمیک)
۶	۱-۱-۲ منشأ شیب حرارتی پوسته
۸	۲-۱ انتقال گرمای درون زمین
۹	۱-۲-۱ سازوکار انتقال گرما در حوزه‌های زمین گرمایی
۱۱	۲-۲-۱ ارزیابی تغییرات دمایی حوزه‌های زمین گرمایی از دیدگاه زمین‌ریاضی
۱۲	۳-۱ رابطه زمین‌ساخت صفحه‌ای با تغییرات دمایی حوزه‌های زمین گرمایی
۱۸	خودآزمایی فصل اول
۲۱	فصل دوم: انواع سامانه‌های زمین گرمایی
۲۱	هدف کلی
۲۱	هدف‌های یادگیری
۲۲	مقدمه
۲۲	۱-۲ ساختار منابع زمین گرمایی
۲۲	۱-۲-۱ منبع حرارتی (سنگ بستر داغ)
۲۳	۲-۱-۲ مخزن سیال گرمایی
۲۳	۳-۱-۲ سد حرارتی ناتراوا (پوش سنگ)
۲۴	۴-۱-۲ ساختمان‌های زمین‌شناسی مناسب

۲۴	۲-۲ تأمین آب منابع زمین گرمایی
۲۵	۳-۲ انواع منابع زمین گرمایی
۲۵	۱-۳-۲ سامانه تحت فشار با چیرگی فاز ترکیبی بخار و مایع
۳۰	۲-۳-۲ سامانه تحت فشار با چیرگی فاز مایع پرحرارت (آب داغ)
۳۲	۳-۳-۲ سامانه تحت فشار با چیرگی فاز مایع کم حرارت (چشمه های آبگرم)
۳۴	۴-۳-۲ منبع زمین گرمایی با سنگ پایه خشک و داغ
۳۷	۴-۲ کاربردهای متناسب با نوع منبع
۳۹	خودآزمایی فصل دوم

۴۱	فصل سوم: اکتشاف منابع زمین گرمایی
۴۱	هدف کلی
۴۱	هدف های یادگیری
۴۲	مقدمه
۴۲	۱-۳ شناسایی منابع زمین گرمایی در مقیاس ناحیه ای (مرحله مقدماتی)
۴۳	۱-۱-۳ ژئوفیزیک هوایی
۵۶	۲-۳ اکتشافات زمین گرمایی در مقیاس محلی (مراحل تفصیلی و تکمیلی)
۵۷	۱-۲-۳ اکتشافات ژئوفیزیک سطحی
۶۴	۲-۲-۳ زمین ساخت حوزه های زمین گرمایی
۶۶	۳-۲-۳ اکتشافات ژئوشیمیایی
۶۹	۴-۲-۳ زمین شناسی حوزه های زمین گرمایی
۷۱	۵-۲-۳ مرحله اکتشافات تکمیلی (حفریات زمین گرمایی)
۷۳	۳-۳ تولید نقشه پیش داوری در اکتشاف منابع زمین گرمایی
۷۴	۱-۳-۳ کاربرد نقشه های ترکیبی در اکتشاف منابع زمین گرمایی
۷۵	۲-۳-۳ کاربرد نقشه های تلفیقی در اکتشاف منابع زمین گرمایی
۷۷	۳-۳-۳ تجمیع معیارهای اکتشافی (در محیط GIS)
۷۸	۴-۳ اکتشاف منابع زمین گرمایی در ایران
۷۸	۱-۴-۳ معرفی حوزه های زمین گرمایی ایران
۸۵	۲-۵-۳ سابقه فعالیت های اکتشافی در ایران
۱۰۱	خودآزمایی فصل سوم

۱۰۵	فصل چهارم: ارزیابی منابع زمین گرمایی
۱۰۵	هدف کلی
۱۰۵	هدف های یادگیری
۱۰۶	مقدمه
۱۰۶	۱-۴ حفاری در حوزه های زمین گرمایی
۱۰۹	۲-۴ تحلیل هندسی و فیزیکوشیمیایی مخازن زمین گرمایی

۱۱۱	۳-۴ مدل سازی مخازن زمین گرمایی
۱۱۶	۱-۴ کاربرد روش های آماری در مدل سازی مخازن زمین گرمایی
۱۲۴	۲-۳-۴ ارزیابی تغییرات فشار و حرارت در حوزه زمین گرمایی سرعین (استان اردبیل)
۱۲۹	خودآزمایی فصل چهارم
۱۳۱	فصل پنجم: بهره برداری از منابع زمین گرمایی
۱۳۱	هدف کلی
۱۳۱	هدف های یادگیری
۱۳۱	مقدمه
۱۳۲	۱-۵ حفاری حوزه های زمین گرمایی
۱۳۲	۱-۱-۵ تجهیزات
۱۳۴	۲-۱-۵ روکش کردن دیواره چاه ها
۱۳۵	۳-۱-۵ روش های حفاری
۱۳۸	۴-۱-۵ قدرت حفاری
۱۳۹	۲-۵ نمونه برداری
۱۴۰	۳-۵ هزینه ها
۱۴۱	۴-۵ عوامل فیزیکی شیمیایی محیط حفاری
۱۴۷	۵-۵ بهره برداری از مخازن زمین گرمایی
۱۵۲	۱-۵-۵ آزمون های قبل از بهره برداری
۱۵۴	۲-۵-۵ انواع چاه های بهره برداری
۱۶۳	خودآزمایی فصل پنجم
۱۶۵	فصل ششم: آثار زیست محیطی منابع زمین گرمایی
۱۶۵	هدف کلی
۱۶۵	هدف های یادگیری
۱۶۵	مقدمه
۱۶۶	۱-۶ مزایای زیست محیطی منابع زمین گرمایی
۱۶۸	۲-۶ معایب زیست محیطی منابع زمین گرمایی
۱۶۸	۱-۲-۶ قوانین و ملاحظات
۱۶۹	۲-۲-۶ انتشار گازها
۱۷۲	۳-۲-۶ آلودگی آب های جاری و سفره های آب زیرزمینی
۱۷۴	۴-۲-۶ رسوب گذاری ترکیبات جامد
۱۷۵	۵-۲-۶ آلودگی های صوتی
۱۷۷	۶-۲-۶ اشغال اراضی
۱۷۸	۷-۲-۶ فرونشست زمین های مجاور نیروگاه
۱۸۰	۸-۲-۶ زمین لرزه های القایی

۱۸۲	۹-۲-۶ مصرف آب‌های سطحی
۱۸۶	۱۰-۲-۶ زمین لغزش
۱۸۷	۱۱-۳-۶ فرسایش سرزمین
۱۸۸	۳-۶ بررسی آثار زیست‌محیطی نیروگاه مشکین‌شهر (استان اردبیل)
۱۹۳	۴-۶ بررسی آثار زیست‌محیطی در حوزه زمین‌گرمایی سرعین (استان اردبیل)
۱۹۵	۵-۶ آثار زیست‌محیطی سایر منابع زمین‌گرمایی در ایران
۱۹۷	خودآزمایی فصل ششم
۱۹۹	فصل هفتم: کاربرد منابع زمین‌گرمایی
۱۹۹	هدف کلی
۱۹۹	هدف‌های یادگیری
۲۰۰	مقدمه
۲۰۰	۱-۷ معرفی صنایع زمین‌گرمایی
۲۰۰	۱-۱-۷ صنایع نیروگاهی
۲۰۴	۲-۱-۷ انواع نیروگاه‌های زمین‌گرمایی
۲۲۸	۳-۲-۷ صنایع غیرنیروگاهی
۲۴۳	خودآزمایی فصل هفتم
۲۴۷	پاسخ‌نامه
۲۴۹	منابع

پیشگفتار

قرن بیست و یکم مبدأ تحولات فکری انسان با تأکید بر حفظ موازین زیست محیطی است. به طوری که اغلب سازوکارهای پژوهشی این قرن معطوف دستیابی به فناوری های محیط محور بوده و برخورداری از صنایع سبز (فاقد آلاینده های شیمیایی و تابش مضر) در اولویت برنامه های تحقیقاتی و استاندارد سازی کشورهای توسعه یافته قرار دارد. استفاده از انرژی های تجدید پذیر با توجه به کاهش محتوای آلاینده ها و هم سویی آنها با فرایندهای زیست محیطی مورد توجه کشورهایی است که از امکانات بالقوه ای برای تأمین این انرژی ها برخوردارند. به طور مثال در ایالات متحده آمریکا، ایتالیا، نیوزیلند، کانادا، روسیه، ژاپن، فرانسه و ایسلند، بستر مناسبی برای بهره برداری از منابع زمین گرمایی در چرخه صنایع مولد برق، گرمایش خانگی و صنعتی، پرورش آبزیان و آب درمانی به وجود آمده است.

فلات ایران دارای استعداد های زمین شناختی متعددی است که بخشی از آن با وفور فعالیت های آتشفشانی جوان در ارتباط بوده و موجبات گسترش حوزه های زمین گرمایی را در اقصی نقاط کشور فراهم کرده است. با توجه به راهبردهای ارائه شده در برنامه های اقتصادی کشور و ضرورت دستیابی به منابع تجدید پذیر در افق توسعه ۱۴۰۴ خورشیدی، بخش قابل توجهی از ملاحظات پژوهشی سال های پیش رو معطوف توسعه میدان های زمین گرمایی کشور خواهد شد تا با اتکا بر اصول اقتصاد مقاومتی، بستر مناسبی را برای تأمین انرژی های پاک فراهم نماید.

بر این اساس، مفاهیم پایه کتاب حاضر طی فصل‌های اول و دوم معرفی شده‌اند. در فصل سوم، روش‌های اکتشاف منابع زمین‌گرمایی با تأکید بر فناوری‌های نوین مورد بحث قرار گرفته و کوشش مؤلف بر آن بوده تا مطالعات موردی ذکرشده (در متن تحقیق) مبتنی بر پایگاه داده‌های علوم زمین کشور باشند. تخمین و ارزیابی منابع زمین‌گرمایی موضوع بحث فصل چهارم کتاب است و در ادامه اصول بهره‌برداری از منابع زمین‌گرمایی مطابق مندرجات فصل پنجم بررسی شده‌اند. موضوع فصل ششم با مسائل زیست‌محیطی در ارتباط بوده و آثار توسعه صنایع زمین‌گرمایی با تأکید بر ملاحظات ملی و جهانی مورد نقد و بررسی قرار گرفته‌اند. در فصل هفتم نیز به موضوع کاربردهای صنعتی منابع زمین‌گرمایی اشاره گردیده و با ذکر مثال‌هایی از اقصای نقاط جهان، چشم‌انداز توسعه صنایع زمین‌گرمایی در مقیاس ملی معرفی شده‌است. نقطه قوت این تألیف، استفاده از مثال‌های بومی و ذکر مطالعات موردی موفق در سطح ملی است که متعاقباً با معرفی روش‌های اکتشافی کارآمد و ارائه رهیافت‌های نوین به‌منظور ارزیابی ذخایر زمین‌گرمایی کشورمان همراه بوده‌است. مؤلف انتظار دارد که دانشجویان و اساتید گرمایی با درج انتقادات و ارسال نقطه‌نظرات ارزشمند خود، فرایند بازبینی کتاب را تسهیل نمایند.

با آرزوی توفیق روزافزون برای همه دست‌اندرکاران دانشگاه پیام‌نور که موجبات ارزیابی، داوری، ویرایش و چاپ این کتاب را فراهم نموده‌اند.

سیدرضا مهرنیا

دانشیار گروه زمین‌شناسی دانشگاه پیام‌نور

شهریور ۱۳۹۴ خورشیدی

r_mehrniya@pnu.ac.ir

فصل اول

کلیات

هدف کلی

در این فصل با منشأ گرمای درون زمین و رابطه آن با پیدایش منابع زمین گرمایی آشنا می شوید و دید کلی از روش های انتقال گرما و نظریه زمین ساخت صفحه ای با تأکید بر پدیده ها و تحولات ترمودینامیکی درون زمین کسب می نمایید.

هدف های یادگیری

- انتظار می رود پس از مطالعه این فصل، بتوانید:
۱. مفهوم درجه زمین گرمایی و تغییرات آن را برحسب عمق زمین بیان کنید.
 ۲. منشأ گرمای درون زمین و پدیده های مرتبط با آن را شرح دهید.
 ۳. سازوکارهای مرتبط با شیب حرارتی پوسته زمین را بشناسید.
 ۴. نقش نظریه زمین ساخت صفحه ای را در توضیح پدیده های ژئوترمیک بیان کنید.

مقدمه

منابع زمین گرمایی^۱، بخشی از مناطق آتشفشانی با حوزه آبرگیر وسیع می باشند که به دلیل برخورداری از سازندهای زمین شناسی تراوا و مجاورت با آشیانه های ماگمایی (کم عمق تا نیمه عمیق)، تحت تأثیر چرخه سیالات گرمایی^۲ پوسته قرار گرفته و گرمای حاصل از

1. Geothermal
2. Hydrothermal

جریان‌ات همرفت در مخازنی با پوش سنگ ناتراوا ذخیره می‌گردد (Gupta, 2006). فاز سیال موجود در مخازن زمین گرمایی تحت فشار لیتواستاتیک بالایی قرار دارد که در امتداد ساختمان‌های گسلی، فرصت صعود و رسیدن به بخش‌های سطحی زمین را به دست می‌آورد. معمولاً تظاهرات گرمایی به صورت بخارات و چشمه‌های آب گرم بوده که در مخازن تحت فشار منجر به تولید آب‌فشان‌ها^۱، بخارفشان‌ها^۲ و چشمه‌های آب گرم می‌شود. برحسب دمای سیالات، ترکیب شیمیایی و فشار مخازن زمین گرمایی، امکان استفاده از آن‌ها در نیروگاه‌های برق، صنایع کشاورزی، صنایع خانگی، پزشکی و زمین‌گردشگری فراهم می‌گردد. منابع زمین گرمایی رابطه نزدیکی با نواحی آتشفشانی داشته و به دلیل برخورداری از شبکه زهکشی گسترده (در مناطق کوهستانی)، دارای چرخه پایدار و تجدیدپذیر از انرژی گرمایی هستند (Calvin & Coolbaugh, 2002). این انرژی در مقایسه با سوخت‌های فسیلی و راکتورهای اتمی، منبعی پاک و جایگزین با شرایط سازگار با محیط زیست است. آب موجود در مخازن زمین گرمایی دارای منشأ جوی بوده و به ندرت توسط منابع ماگمایی، آب‌های فسیل و دگرگونی (رخساره شایست سبز) تأمین می‌گردد (Hunsbedt et al, 1976). فرایند گرم شدن آب‌ها با سازوکار حرارتی حاکم بر حوزه‌های آتشفشانی در ارتباط بوده و چرخه انتقال حرارت (از سنگ پایه به بخش‌های سطحی زمین)، به دو روش رسانایی و همرفت انجام می‌شود (White et al 1971). این فصل به بررسی منشأ و سازوکار انتقال گرما در اعماق زمین پرداخته و تغییرات انرژی گرمایی حوزه‌های زمین گرمایی را از دیدگاه نظریه زمین‌ساخت صفحه‌ای (با تأکید بر کمربندهای لرزه‌خیزی و آتشفشانی جهان) معرفی می‌نماید.

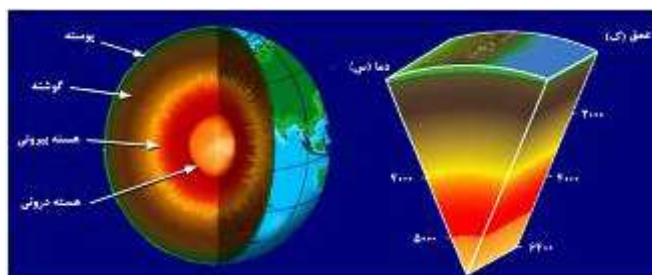
۱-۱ منشأ گرمای درون زمین

تغییرات درجه زمین گرمایی، فرایند پیچیده‌ای است که براساس قوانین ترمودینامیک و با استناد بر سازوکارهای درونی زمین، موجبات تغییر شکل سنگ‌ها و تبدیل حالت آن‌ها را فراهم می‌نماید. از ذوب بخشی پوسته تا پیدایش حالت خمیری نرم‌کره، همگی متأثر از تغییرات دما و فشارهای همه‌جانبه است. معمولاً افت فشار لیتواستاتیک به دلیل

1. Geysers
2. Fumaroles

کلیات ۳

گسیختگی در بخشی از ساختمان درونی زمین می‌باشد که در پی آن، حجم قابل توجهی از مواد مذاب به درون مخازن ماگمایی تزریق می‌شوند (گارلند، ۲۰۰۳). این مخازن مبدأ پیدایش منابع زمین‌گرمایی پوسته هستند. تاکنون تحقیقات متعددی پیرامون منشأ انرژی گرمایی درون زمین به عمل آمده که در این فصل ضمن بررسی اجمالی آن‌ها، به سازوکارهای مرتبط با حوزه‌های زمین‌گرمایی اشاره خواهد شد. مطابق شکل ۱-۱، چهار واحد اصلی سازنده زمین شامل پوسته، گوشته، هسته بیرونی و هسته درونی با تغییرات انرژی گرمایی درون زمین در ارتباط می‌باشند.



شکل ۱-۱. ساختمان درونی زمین براساس شیب حرارتی گوشته، هسته بیرونی و هسته درونی (گارلند، ۲۰۰۳)

براساس شواهد ژئوفیزیکی، هسته و گوشته تحتانی، با نابسامانی گرمایی مناطق عمیق در ارتباط هستند. معمولاً شار حرارتی این مناطق، مستقل از سازوکارهایی است که بخش‌های فوقانی گوشته را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Sass, 2003). شیب حرارتی گوشته فوقانی، عامل تغییرات انرژی درونی این ناحیه بوده و در خلال تحولات فیزیکوشیمیایی نرم‌کره، موجب حرکات دینامیکی سنگ‌کره با الگوی ارائه‌شده در نظریه زمین‌ساخت صفحه‌ای می‌گردد (Wilson, 1973). پوسته زمین دارای حالت صلب و شکننده است که بر اثر لغزش سنگ‌کره و جابه‌جایی آن در مسیر جریان‌ات همرفتی، شرایط ذوب‌بخشی و شکل‌گیری آشیانه‌های ماگمایی را فراهم می‌کند (Morgan, 1979). غالب ماگماتیسم‌های پوسته از عمق کم و آنتالپی بالا برخوردار هستند که به سبب مهاجرت و گذار از مراحل تفریق پسا ماگمایی، شرایط ظهور منابع زمین‌گرمایی را در بخش فوقانی تنوره‌های آتشفشانی فراهم می‌نمایند (Wilson, 1973). از این‌رو، کمربندهای آتشفشانی جوان واقع در نقاط لرزه‌خیز جهان، مکان‌های داغ و مناسب برای شکل‌گیری حوزه‌های زمین‌گرمایی هستند (شکل ۱-۲).

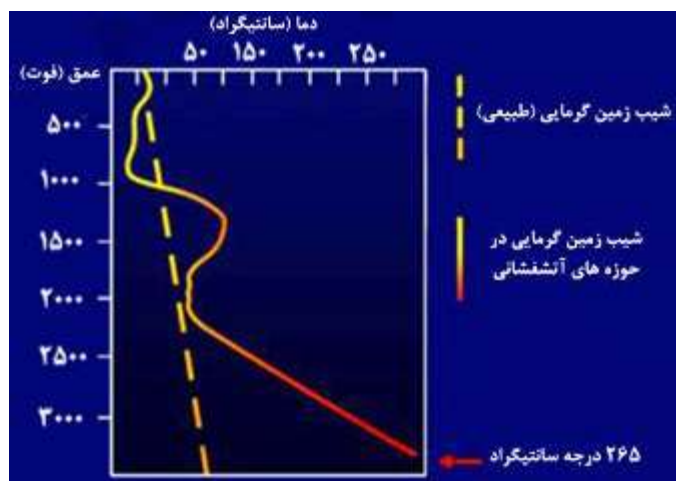


شکل ۱-۲. نقاط داغ و لرزه خیز جهان (قرمز)؛ منطق بر کمر بند آتشفشانی حاشیه قاره ها و اقیانوس ها (Sass, 2003)

۱-۱-۱ پیدایش جریان‌ات زمین گرمایی (فرایند ژئوترمیک)

در پوسته و گوشته فوقانی (قبل از شروع نابسامانی حرارتی نرم کره)، به ازای یک کیلومتر افزایش عمق زمین، ۳۰ درجه سانتی گراد به دمای آن افزوده می گردد که اصطلاحاً به شیب زمین گرمایی معروف است. بنابراین مطابق شکل ۱-۳، سنگ های واقع در عمق ۳ کیلومتری (۳۰۰۰ فوت)، از دمای کافی برای تولید چرخه های زمین گرمایی برخوردار نیستند (Sass, 2003). لذا در اغلب موارد، گرمای بیشتری لازم است تا انرژی مورد نیاز میدان های زمین گرمایی را تأمین نماید. یعنی شیب طبیعی دمای زمین با شیب زمین گرمایی مطابقت نداشته و در اغلب موارد، منبع تولید انرژی دیگری نظیر تنوره های آتشفشانی ساب و لکانیک وجود دارند که در دمای ۲۶۵ درجه سانتی گراد (آستانه تحولات ژئوترمیک)، موجب شکل گیری چرخه های ماگمایی - گرمایی شده و مخازن عظیم زمین گرمایی را در سازندهایی با درجه تراوایی بالا به وجود می آورند.

شیب زمین گرمایی پوسته تابع ضخامت و جنس مواد تشکیل دهنده آن بوده و با نزدیک شدن به حاشیه صفحات فرورو، افزایش می یابد. در نگاه کلی، پوسته قاره ای (با ترکیب سیالیک) از درجه زمین گرمایی همگون تری نسبت به پوسته های اقیانوسی (با ترکیب سیمما) برخوردار است (گارلند، ۲۰۰۳). توزیع حرارت در اعماق پوسته تابع شیب زمین گرمایی محلی بوده و با سه عامل فعالیت های ماگمایی، حرکات زمین ساختی و فرایندهای دگرگونی در ارتباط می باشد.



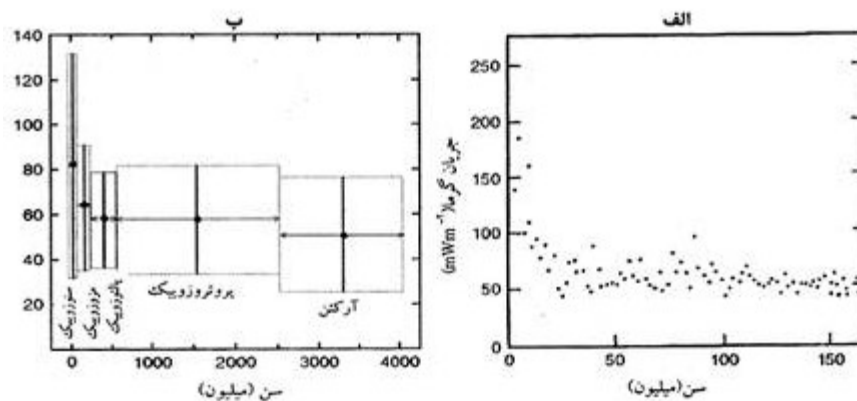
شکل ۳-۱. مقایسه شیب زمین گرمایی طبیعی (خط منقطع) با شیب حوزه های آتشفشانی (خط پیوسته) (Sass, 2003)

در شکل ۴-۱، چرخه کاملی از تحولات ماگمایی نرم کره و اثرات ترمودینامیکی آن بر سنگ کره مشاهده می گردد. مناطق گسترش کف اقیانوس و نواحی فرو رانش حاشیه صفحات قاره ای و اقیانوسی از بیشترین شیب درجه زمین گرمایی برخوردار بوده و مکان های مناسبی برای شکل گیری تنوره های آتشفشانی و گسترش حوزه های زمین گرمایی قلمداد می شوند (گارلند، ۲۰۰۳).



شکل ۴-۱. تغییرات درجه زمین گرمایی سنگ کره براساس الگوی به دست آمده از نظریه زمین ساخت صفحه ای. جریانات همرفتی گوشته موجب گسترش صفحات اقیانوسی در نواحی فرو رانش شده و با تشدید فعالیت ماگمایی همراه است.

میانگین جریان حرارتی قاره‌ها و اقیانوس‌ها به ترتیب، ۶۵ و ۱۰۱ میلی وات بر مترمربع است. بیشینه جریان حرارتی قاره‌ها متعلق به کمربندهای آتشفشانی در نواحی فرورانش است. کمترین جریان حرارتی نیز در درون قاره‌ها و بر روی سپرهای آرکشن ثبت شده است (Morgan, 1979). جریان حرارتی پوسته اقیانوسی نظم بیشتری از قاره‌ها داشته و با نزدیک شدن به پشته‌های میان اقیانوسی، افزایش می‌یابد. مطابق شکل ۵-۱، برای پوسته‌های قاره‌ای و اقیانوسی، شیب حرارتی با افزایش سن سنگ‌ها کاهش می‌یابد. شکل ۵-۱الف کاهش آنتالپی به ازای افزایش سن گدازه‌های بازالتی کف اقیانوس را نشان می‌دهد و شکل ۵-۱ب تغییرات دمایی قاره‌ها را از آرکشن تا سنوزوئیک به تصویر کشیده است.



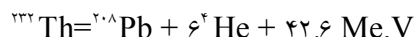
شکل ۵-۱. رابطه سن پوسته‌های اقیانوسی (الف) و قاره‌ای (ب) با گرمای درونی زمین (Morgan, 1979)

۲-۱-۱ منشأ شیب حرارتی پوسته

جریان حرارتی پوسته از دو الگوی ثابت (زمینه‌ای) و متغیر (شیب نامتعارف محلی) برخوردار است. جریان‌های حرارتی که با ظهور بی‌هنجاری‌های محلی در داخل و اطراف حوزه‌های آتشفشانی در ارتباط هستند، ناشی از فعالیت‌های کوه‌زایی جوان‌بوده و حوزه‌های زمین گرمایی درون قاره‌ای را به وجود می‌آورند (Morgan, 1979). صرف نظر از عوامل زمین‌ساختی، بخش قابل توجهی از انرژی درونی گواشته ناشی از وجود مواد رادیوایزوتوپ طبیعی است که در حین فروپاشی و تولید عناصر دختر،

کلیات ۷

انرژی گرمایی لازم را برای ایجاد چرخه‌های همرفتی و ذوب بخشی سنگ کره تأمین می‌نماید (گارلند، ۲۰۰۳). از بین عناصر پرتوزای موجود در گوشته فوقانی، نقش عناصر اورانیوم (^{235}U و ^{238}U)، توریم (^{232}Th) و پتاسیم (^{40}K) در تأمین گرما و تولید جریان‌ات حرارتی سنگ کره بیش از سایر عناصر پرتوزای طبیعی است. ایزوتوپ‌های ناپایدار اورانیوم و توریم مطابق زنجیره‌های واکنشی زیر، موجب تولید ایزوتوپ سرب شده و حجم قابل توجه انرژی (برحسب مگا الکترون ولت، Me.V) در خلال این فرایندها آزاد می‌شود (گارلند، ۲۰۰۳).



از بین ایزوتوپ‌های پتاسیم، فقط ^{40}K دارای خواص پرتوزایی بوده ولی فراوانی آن بسیار ناچیز است (کمتر از ۰/۰۲ درصد). لذا واپاشی هسته پتاسیم نقش کمتری در تولید انرژی گرمایی پوسته ایفا می‌کند. واکنش زنجیره‌ای ^{40}K دارای روند دوگانه بوده و منجر به تولید عناصر دختر ^{40}Ar (با گرفتن الکترون) و ^{40}Ca (از دست دادن الکترون) می‌گردد.

گرمای حاصل از فروپاشی هسته ایزوتوپ ^{40}K از گرمای فروپاشی هسته ایزوتوپ ^{232}Th بیشتر است اما محتوای ژئوشیمیایی توریم (در گوشته فوقانی) به مراتب بیشتر از پتاسیم رادیوژنیک بوده و نقش مؤثرتری در تولید شار حرارتی پوسته دارد. گرمای کلی حاصل از واحد حجمی پوسته به صورت مجموع واپاشی هسته اورانیوم، توریم و پتاسیم محاسبه می‌گردد. رابطه ۱-۱ برای محاسبه گرما ارائه شده است (Rybach, 1979) (گارلند، ۲۰۰۳).

$$Q = 10^{-5} \rho (3.48 C_K + 9.52 C_U + 2.56 C_{Th}) \quad (1-1)$$

در این رابطه، کمیت‌های C_U و C_{Th} به ترتیب عیار توریم و اورانیوم برحسب گرم بر تن (ppm) بوده و C_K نشان‌دهنده درصد وزنی پتاسیم می‌باشد. ρ چگالی سنگ برحسب کیلوگرم بر مترمکعب (Kg/m^3) و Q انرژی گرمایی برحسب میکرو وات بر مترمکعب ($\mu\text{W/m}^3$) است. در مقام مقایسه، پوسته‌های قاره‌ای غنای رادیوژنیکی

بیشتری از پوسته‌های اقیانوسی دارند. لذا شار حرارتی صفحات اقیانوسی منسوب به جریان‌ات همرفتی نرم‌کره بوده و با سازوکار پیدایش نقاط داغ در ارتباط است. علاوه بر حرکات زمین‌ساختی و واپاشی مواد پرتوزای طبیعی، عامل دیگری در پیدایش جریان‌ات حرارتی پوسته مؤثر است که عمدتاً با فرایند دگرگونی (ناحیه‌ای و تدفینی) در مناطق انباشته‌شده از رسوبات ضخیم حاشیه دریاها و اقیانوس‌ها (بزرگ ناودیس‌ها) در ارتباط می‌باشد (گارلند، ۲۰۰۳) (Sass, 2003). دگرگونی در مقیاس وسیع به‌همراه عوامل زمین‌ساختی و واکنش‌های هسته‌ای، نقش مؤثری در تولید شار حرارتی پوسته ایفا می‌کند که در حضور توده‌های آتشفشانی، سنگ‌های نفوذپذیر و پوش‌سنگ ناتراوا، موجبات شکل‌گیری منابع زمین گرمایی را فراهم می‌نماید (Rybach, 1989).

۲-۱ انتقال گرمای درون زمین

انتقال گرما در مواد به سه روش رسانش، همرفت و تابش انجام می‌شود. پدیده رسانایی ناشی از جنبش ملکولی ضعیف و پیوسته است که در قالب تغییرات دمایی (آنتالپی) بین اجسام گرم و سرد ظاهر می‌شود. بنابراین در جامدات، روش غالب انتقال گرما از نوع رسانش است. نظیر این فرایند در بخش‌های وسیعی از گوشته و پوسته مشاهده می‌شود و عامل اصلی توزیع دما در بخش‌های مختلف زمین است (گارلند، ۲۰۰۳). برای محاسبه جریان گرمایی متناسب با تغییرات دما در واحد زمان از رابطه ۲-۱ استفاده می‌شود (Fournier, 1981).

$$q = -k \nabla T \quad (2-1)$$

در این رابطه، q جریان حرارتی در سطح جسم رسانا بر حسب میلی‌وات بر مترمربع و k ضریب رسانایی جسم همگون است. این ضریب با سرعت جنبش ملکول‌ها در واحد سطح (∇T) نسبت عکس دارد. علامت منفی نشان می‌دهد که سوی بردار گرما (جریان حرارتی)، از جسم گرم به جسم سرد بوده و واکنش در جهت کاهش آنتالپی پیش می‌رود.

با افزایش فاز سیال و کاهش جاذبه ملکولی، از قدرت رسانایی مواد کاسته‌شده و فرایند انتقال گرما به‌صورت همرفت ادامه می‌یابد. بنابراین در بخش‌های وسیعی از هسته بیرونی، نرم‌کره و آشیانه‌های ماگمایی (در پوسته)، سازوکار انتقال گرما به‌صورت

همرفتی بوده و چرخه سیالات داغ موجب توزیع انرژی درونی زمین می‌شود. تابش سهم عمده‌ای در انتقال گرمای درونی زمین ندارد (به‌استثنای هسته)، اما این پدیده در سطوح وسیعی از هواکره فعال بوده و عامل اصلی جابه‌جایی گرما در گازهای اطراف زمین می‌باشد.

رسانایی سنگ‌کره، عامل انتقال گرما از گوشته فوقانی به پوسته بوده و تحت فشار لیتواستاتیک بالا، موجب پایداری حرارتی آن می‌گردد (Rybach, 1979). حتی پیدایش ماگما و انتقال گرمای آن به سطوح مجاور نیز به روش رسانایی صورت گرفته و تنها در درون آشیانه‌های ماگمایی از نوع همرفت است. همچنین بخش قابل‌توجهی از انرژی گرمایی ذخیره‌شده در پشته‌های میان‌اقیانوسی، به روش همرفتی و با استفاده از چرخه آب اقیانوس‌ها جابه‌جا می‌شود. در مقام مقایسه، اهمیت همرفت و تابش در اعماق زمین بیش‌تر از پدیده رسانایی بوده ولی در بخش‌های وسیعی از گوشته (تا پوسته)، روش غالب از نوع رسانایی است. از دیدگاه ژئودینامیکی، نقش جریانات همرفتی نرم‌کره برای شکل‌گیری تحولات زمین‌ساختی اجتناب‌ناپذیر بوده و تغییرات آن موجب دگرشکلی و تحولات عظیم فیزیکوشیمیایی پوسته می‌شود.

۱-۲-۱ سازوکار انتقال گرما در حوزه‌های زمین‌گرمایی

دمای چشمه‌های آب گرم ۵۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد است که در حضور فشارهای لیتواستاتیک و تجمع سیالات داغ در مخازن زمین‌گرمایی، وارد شرایط بحرانی گردیده و سنگ دیواره یا مجاری منتهی به سطح زمین را دگرسان می‌نماید. انتقال گرما به دو صورت رسانش و جریان همرفت می‌باشد که برحسب موقعیت سامانه و ساختارهای متناسب با هر بخش شناسایی می‌گردد. انتقال انرژی در آشیانه‌های ماگمایی عمدتاً به روش رسانایی صورت گرفته و حرارت موردنیاز برای داغ‌شدن سنگ مخزن را تأمین می‌نماید (گارلند، ۲۰۰۳). نفوذ آب‌های جوی (و ندرتاً ماگمایی) به مخازن زمین‌گرمایی، نقطه عطف تحولات ترمودینامیکی آن بوده و سازوکار انتقال گرما به‌صورت همرفت و با تولید چرخه سیالات داغ ادامه می‌یابد. در اغلب موارد، چرخه‌های زمین‌گرمایی تا رسیدن به سطح زمین (تظاهر چشمه‌های گرم) ادامه می‌یابند اما در بعضی از موارد قبل از رسیدن به سطح زمین متوقف‌شده و آثار حرارتی آن‌ها به

روش رسانایی به سطح فرسایش کنونی می‌رسد که در این صورت حوزه زمین گرمایی مدفون و فاقد آثار سطحی خواهد بود (Sass, 2003). همچنین در سامانه‌هایی که از مخزن خشک و داغ برخوردارند (منابعی که فاقد چرخه سیالات گرمایی بوده و بهره‌برداری از آن‌ها در خلال تزریق آب به اعماق زمین و پمپاژ آن توسط چاه‌های بهره‌برداری انجام می‌شود)، روش انتقال حرارتی حوزه از نوع رسانایی بوده و بدون تزریق آب به اعماق مخزن (از طریق حفر چاه‌های عمیق)، امکان تولید چرخه گرمایی و بهره‌برداری از انرژی زمین گرمایی وجود ندارد (Rybach, 1989). بنابراین فرایند رسانایی، شرط لازم برای گرم‌شدن مخازن زمین گرمایی است، اما برای ایجاد چرخه سیالات داغ، روش همرفت به عنوان شرط لازم و کافی قلمداد می‌گردد (Sass, 2003).

پوش سنگ حوزه‌های زمین گرمایی، واحد ناتراوایی است که علاوه بر نفوذناپذیری بالا، از توانایی کمی برای انتقال گرما به روش رسانش برخوردار است (Rybach, 1989). این ویژگی موجب پایداری حرارتی مخزن شده و سامانه زمین گرمایی را تحت فشار بالای سیال حفظ می‌نماید. در مناطقی که از پوش سنگ ناتراوا با قابلیت هدایت حرارتی بالایی برخوردارند، علی‌رغم مخلوط‌نشدن آب‌های سطحی با منابع زمین گرمایی، نشت حرارتی به روش رسانایی اتفاق افتاده و فاز بخار تولید نمی‌گردد؛ چنین منابعی برای تأمین بخار نیروگاه‌ها مناسب نیستند (Rybach, 1989).

اصولاً افزایش ذخیره انرژی گرمایی منجر به تغییر آنتالپی حوزه‌های زمین گرمایی می‌شود که با افزایش فشار سیال همراه است. در حضور فشار لیتواستاتیک وارد بر مخزن، افزایش فشار سیال (به دلیل آنتالپی زیاد)، موجب افزایش رسانایی سنگ دیواره گردیده و در چرخه همرفت، فرایند جایگزینی فاز بخار برای برقراری تعادل ترمودینامیکی سامانه رخ می‌دهد (Rao et al, 2003). بدین ترتیب در سامانه‌های تحت فشاری که از ترکیب فازهای بخار و مایع به وجود آمده‌اند، بخش‌های سطحی‌تر، تحت تأثیر پدیده همرفت هستند و با افزایش عمق احتمال تبادل حرارتی مخزن با سنگ دیواره بیشتر می‌شود.

سنگ‌های متخلخل که به قدر کافی از سیالات ماگمایی-گرمایی اشباع شده باشند، دارای ظرفیت گرمایی بالایی بوده و بخش قابل توجهی از انرژی درونی مخزن صرف غلبه بر گرمای نهان تبخیر خواهد شد. بنابراین با تغییر درجه شوری و

محتوای ایزوتوپی سیال داغ، ظرفیت گرمایی و انرژی نهفته در سامانه تغییر خواهد کرد (Rao et al, 2003). این بدان معناست که منابع زمین گرمایی با ایزوتوپ‌های سنگین (منشأ آب ماگمایی) و درجه شوری بالا، مقدار زیادی از انرژی درونی خود را صرف غلبه بر گرمای نهان تبخیر سیالات نموده و انتقال حرارت به روش رسانایی (به دلیل جنبش ملکولی کمتر) غالب می‌گردد. در این صورت بخشی از انرژی درونی حوزه به سنگ درون گیر منتقل شده و سیالات در فاز مایع باقی می‌مانند (Sass, 2003).

یکی دیگر از عوامل مؤثر بر انرژی درونی سامانه‌های زمین گرمایی، تقریب شاخص همسان گردی منابع زمین گرمایی در فرایند انتقال حرارت به روش رسانایی است، این شاخص تابعی از جنس سنگ‌ها و کانی‌های موجود در مخازن زمین گرمایی بوده و متناسب با خواص همسان گردی - ناهمسان گردی واحدهای زمین شناسی برآورد می‌گردد (Rybach, 1989). سرعت رسانایی در محیط همسان گرد کمتر از محیط ناهمسان گرد است اما نشت حرارتی در انواع ناهمسان گرد بیشتر است (گارلند، ۲۰۰۳). از دیدگاه نظری، همسان گردی و ناهمسان گردی محیط انتشار تابع تغییرات کانیایی و گوناگونی سنگ‌ها در یک سازند معین است. به طور مثال کنگلومراها دارای خواص ناهمسان گردی شدید هستند در حالی که سنگ‌های کربناتی خالص از خواص همسان گردی نسبتاً بالایی برخوردارند. لذا در مخازنی که از سنگ‌ها و رسوبات مختلف تشکیل شده و یا سنگ پایه آن‌ها دارای ترکیب کانیایی نامشخص باشد، الگوی توزیع حرارتی پراکنده‌ای به وجود می‌آید که با افت آنتالپی و کاهش بازدهی منبع زمین گرمایی همراه خواهد بود (Rao et al, 2003).

۲-۲-۱ ارزیابی تغییرات دمایی حوزه‌های زمین گرمایی از دیدگاه زمین ریاضی

استفاده از توابع ریاضی برای تحلیل رفتار گرمایی حوزه‌های زمین گرمایی، فرایندی است که به دلیل تنوع محیط‌های زمین شناسی و تعدد متغیرهای مورد نظر (در این توابع)، ارزیابی مبتنی بر الگوهای ژئوترمیک را دشوار و در مواردی غیرممکن می‌نماید. در زیر مثالی از تغییرات دمایی حوزه‌های زمین گرمایی ارائه شده است که با رعایت شرایط حدی و تنها برای مخازنی که در عمق کم پسته قرار دارند صدق می‌نماید. در غیاب فعالیت‌های آتشفشانی (نبود حرکات نوزمین ساختی)، الگوی تغییرات دمایی فاقد