بررسی تأثیر نقاط داغ بر پوسته‌ی زمین

روش همانندسازی آزمایشگاهی

گردآوری: مریم نژاد وکیلی*

مقدمه

با وجود پیشرفت‌های شایانی که نظریه ی «زمین ساخت ورقه‌ای» حاصل کرده، هنوز هم مسئله‌ی حرکت صفحات سنگ کره، از جمله مسائلی است که پاسخ قطعی نیافته است. منطقی‌ترین توجیه برای حرکت این صفحات، وجود جریان‌های همرفتی در قسمت فوقانی گوشته است که براساس آن‌ها، در زیر سنگ کره و در قسمت فوقانی گوشته، در نتیجه‌ی حرکت مواد خمیری، جریاناتی به‌وجود می‌آیند که پس از حرکت افقی، مجدداً به داخل گوشته برمی‌گردند و حرکت صفحات را موجب می‌شوند.

از دیگر نظریات ارائه شده برای حرکت صفحات، نظریه‌ی مراکز حرارتی یا «نقاط داغ»[1] است. طبق این نظریه، زیر صفحات سنگ کره در داخل گوشته، بعضی مراکز حرارتی وجود دارند که موقعیتشان برای مدت طولانی ثابت می‌ماند. درست بالای این مراکز حرارتی، آتشفشان‌هایی خطی به‌وجود می‌آیند که خروج گدازه از داخل آن‌ها، سبب حرکت صفحات سنگ کره در طرفین آن می‌شود.

آخرین مطالعاتی که در این زمینه انجام گرفته است نشان می‌دهد موقعیت مراکز حرارتی نسبت به‌هم، حداقل در طول ۱۰ میلیون سال گذشته ثابت بوده است. ولی نظر اغلب دانشمندان بر آن است که این وضعیت، از زمان‌های خیلی پیش‌تر وجود داشته است. براساس سازوکار «زبانه‌های گرمایی»[2] حرکت روبه‌بالای مواد گوشته، در مجموع حدود ۲۰ زبانه‌ی گرمایی را تشکیل می‌دهد که از مرز هسته و گوشته بالا می‌آیند و هنگامی که به سنگ کره می‌رسند، جریانشان افقی می‌شود و به‌طور شعاعی در همه‌ی جهان پخش می‌شوند. همین پدیده است که عامل به‌وجود آمدن نقاط داغ و فعالیت آتشفشانی می‌شود. در ادامه‌ی آن، به‌منظور ایجاد موازنه با جریان روبه‌بالایی که در زبانه‌ها متمرکز است، جریان برگشتی ایجاد می‌شود که با حرکت بسیار آرام و روبه‌پایین بقیه‌ی گوشته همراه است.

پلوم صعود کننده در قاره، باعث گنبدی‌شدن پوسته می‌شود و در ادامه، معمولاً سه کافت شعاعی اصلی ظاهر می‌شوند. که در اغلب موارد یکی از بازوها به طور کامل باز نمی‌شود و یک کافت ناقص را تشکیل می‌دهد که با عنوان «اولاکوژن»[3] شناخته می‌شود. لیکن در دو بازوی دیگر، بازشدگی فعال‌تر به تشکیل پوسته‌ی اقیانوسی و در نهایت ایجاد اقیانوس منجر خواهد شد.

آشکار است، مشاهده‌ی چنین پدیده‌ای در مقیاس

آزمایشگاهی، هرچند به صورت یک همانندسازی بسیار ساده، علاوه بر این که تا حد زیادی جالب توجه خواهد بود، می‌تواند ما را در شناخت تأثیرات عمده‌ی ناشی از صعود زبانه‌های گرمایی از گوشته‌ی پایینی بر پوسته یاری رساند. بدین منظور، با کمک وسایل بسیار جزئی و قابل دسترس، نمونه‌ای را می‌توان ساخت که به طور ساده و در حالت کلی، چنین پدیده‌ای را به نمایش بگذارد و تأثیر آن را بر پوسته نشان دهد.

مختصری درباره‌ی نقاط داغ

۱. منشأ کافت‌ها

شواهد زمین‌شناختی به‌دست آمده از چند منطقه‌ی کافتی نشان می‌دهند که توالی رویدادها، در ایجاد کافت، نخست آتشفشانی، سپس گنبدی شدن و در پی آن کافتش است. فعالیت آتشفشانی و فراخاست، از ایجاد منطقه‌ای گرم در گوشته‌ی بالایی نتیجه می‌شود که آن‌هم احتمالاً از فراچاهندگی[۴] در گوشته‌ی پایینی سرچشمه می‌گیرد و پوسته‌ی فوقانی بر اثر قوس برداشتن، دستخوش کشش می‌شود. پژوهشگرانی به نام **بات**[۵] و **کوزنیر**[۶] در سال ۱۹۷۹ نشان داده‌اند، اگر فقط رفتار پوسته‌ی بالایی به گونه‌ی کشسان باشد و پوسته‌ی پایینی به‌طور شکل‌پذیر عمل کند، تنش‌های کششی به پوسته‌ی بالایی محدود می‌شوند و بزرگی آن‌ها به اندازه‌ای تشدید می‌شود که گسیختگی پوسته رخ دهد. گسیختگی پوسته بر اثر این سازوکار، فقط در یک نقطه رخ می‌دهد که با پهنه‌ی روی نقطه‌ی داغ متناظر است. تنش کششی، به احتمال در پاسخ به فراخاست همراه با صعود شناور پلوم گوشته ایجاد می‌شود. این تصور، با این مشاهده که پوسته پیش از کافتش گنبدی می‌شود، هم‌خوانی دارد.

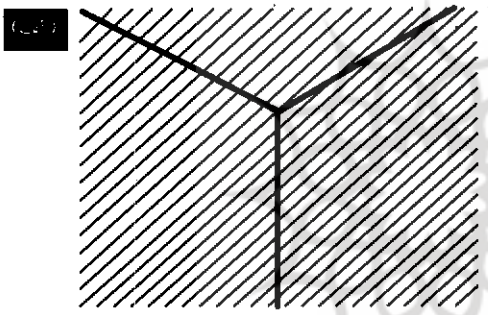
۲. لازمه‌های شکافت قاره

وجود خطوارگی‌های ساختاری قدیمی در صفحه‌ی قاره‌ای [ویندلی، ۱۹۸۴]، مانند روندها و بافت زمین ساختی کمربندهای جنبا و زمین درزهای پرکامبرین، و یا خطوط ضعف ناحیه‌ای موجود در صفحه که در جهت‌های مناسب قرار دارند، تا حدودی مکان شکافت قاره را معین می‌کنند. باز فعال‌شدگی اولاکوژن‌ها به‌عنوان مراکز رسوب‌گذاری، احتمالاً با شکافت قاره که ترجیحاً در طول خطوط ضعف موجود رخ می‌دهد، قابل توجیه است. این امر نشان می‌دهد، گسترش بستر دریا ممکن است در طول زمین درزهای قدیمی شروع شود [ونیک و دیگران، ۱۹۸۴].

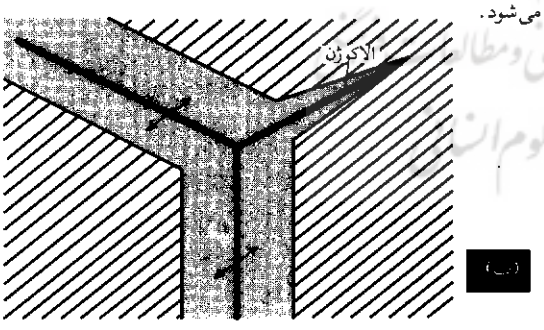
دیویی و **برک** در سال ۱۹۷۴ اظهار کردند، شکافت قاره‌ای، در پاسخ مستقیم به توسعه‌ی یک دسته پیوستگاه سه گانه‌ی کافت-کافت-کافت در نقاط داغ واقع در یک صفحه‌ی قاره‌ای رخ می‌دهد. در هر نقطه‌ی داغ، دو کافت گسترش می‌یابند تا به کافت‌های مجاور بپیوندند، ولی کافت سوم یک اولاکوژن می‌شود. حال این فرایند، حاشیه‌ای قاره‌ای با شکل نامنظم است که دندانه‌دار بودن آن، نتیجه‌ی مکان پیوستگاه‌های سه گانه است. از این روست که اولاکوژن‌ها تقعرهای حاشیه‌ای قاره‌ای را اشغال می‌کنند.

۳. اولاکوژن‌ها

اولاکوژن‌ها (به معنی زاده به صورت شیار)، ناوه‌های رسوبی به شدت فرو نشیننده‌ی دیرپا و اغلب محدود به گسله‌اند که با زاویه‌ی بزرگ از حاشیه‌ی قاره‌ها به درون کراتون‌ها ادامه می‌یابند [دیکینسون، ۱۹۷۴]. تصور می‌شود اولاکوژن‌ها در نتیجه‌ی تحول یک پیوستگاه سه گانه‌ی کافت-کافت-کافت در صفحه‌ی قاره‌ای شکل می‌گیرند (شکل ۱-الف). با پیشرفت جداشدگی صفحه، یکی از شاخه‌های پیوستگاه سه گانه غیرفعال و به صورت کافت وامانده یا اولاکوژن در قاره حفظ می‌شود (شکل ۱-ب).



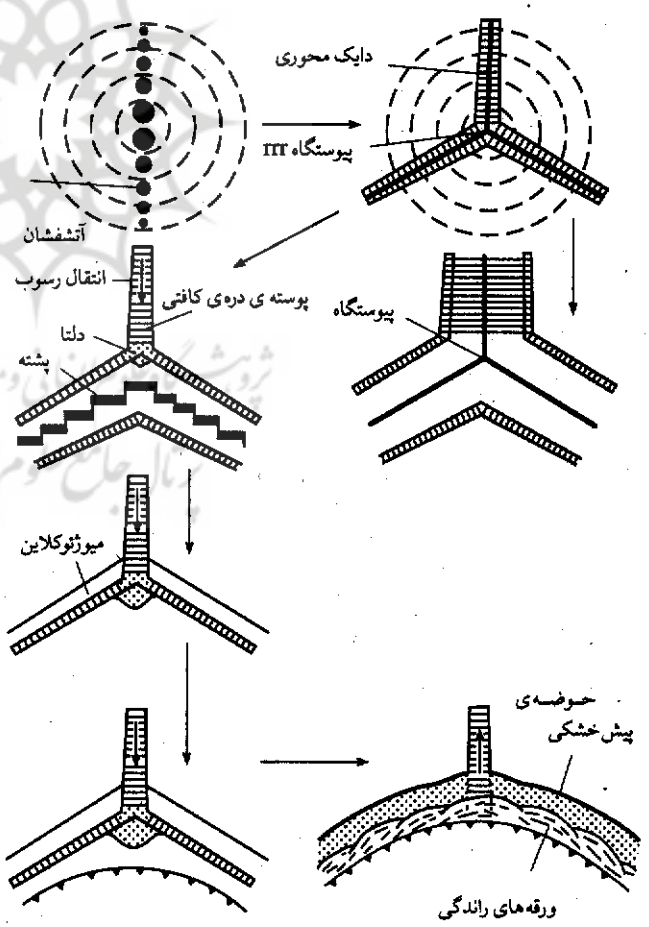
شکل ۱. الف) پیوستگاه سه گانه‌ی کافت-کافت-کافت.
ب) اولاکوژن از راه گسیختگی یکی از بازوهای نشان داده شده در شکل الف ایجاد می‌شود.



۴. منشأ و نحوه‌ی تکامل پیوستگاه‌های سه گانه‌ی حاصل از پلوم

برک و دیویی (۱۹۷۳) اظهار داشتند، در سنگ کره‌ی قاره‌ای، به‌ویژه اگر نسبت به گوشته ثابت باشد، در پاسخ به اثرهای پلوم گوشته‌ی زیرین آن، پیوستگاه سه گانه‌ی کافت-کافت-کافت به‌وجود می‌آید (شکل ۲-الف). شارش گرمایی فزونی یافته، سبب فراخاست و ایجاد سه کافت می‌شود که به‌طور

معمول با زاویه‌ی ۱۲۰ درجه به هم می‌رسند (شکل ۲ـب). غالباً یکی از شاخه‌های پیوستگاه سه‌گانه غیرفعال می‌شود و یک اولاکوژن به‌وجود می‌آید. هافمن و دیگران (۱۹۷۴) نیز اظهار کرده‌اند، چون قطب‌های چرخش اغلب صفحه‌های امروزی در عرض‌های جغرافیایی بالا قرار دارند، بیشتر احتمال دارد که شاخه‌های کافتی شرقی ـ غربی وابمانند. اگر واماندگی کافت، پیش از نفوذ مواد آذرین رخ دهد، بستر اولاکوژن از سنگ کره‌ی قاره‌ای (شکل ۲ـج)، و اگر پس از جای‌گیری دایک‌های محوری باشد، از سنگ کره‌ی اقیانوسی (شکل ۲ ـ د) خواهد بود. اولاکوژن، مکان بسیار مناسبی برای توسعه‌ی یک سیستم رودخانه است (شکل ۲ـ هـ) که آوار را از کراتون حمل می‌کند. اگر شرایط محلی مناسب باشد، دلتای بزرگی تشکیل می‌شود که رفته رفته به سمت اقیانوس پیشروی می‌کند. چنانچه اقیانوس مجاور شروع به کوچک شدن کند (شکل ۲ ـ و)، این وضعیت حفظ می‌شود و هنگام بسته شدن کامل اقیانوس (شکل ۲ ـ ز) یک کوه‌زایی برخوردی رخ می‌دهد و جهت انتقال رسوب وارونه می‌شود. بنابراین، اولاکوژن حفظ می‌شود و با زاویه‌ی بزرگی به رشته‌کوه برخورد می‌کند.

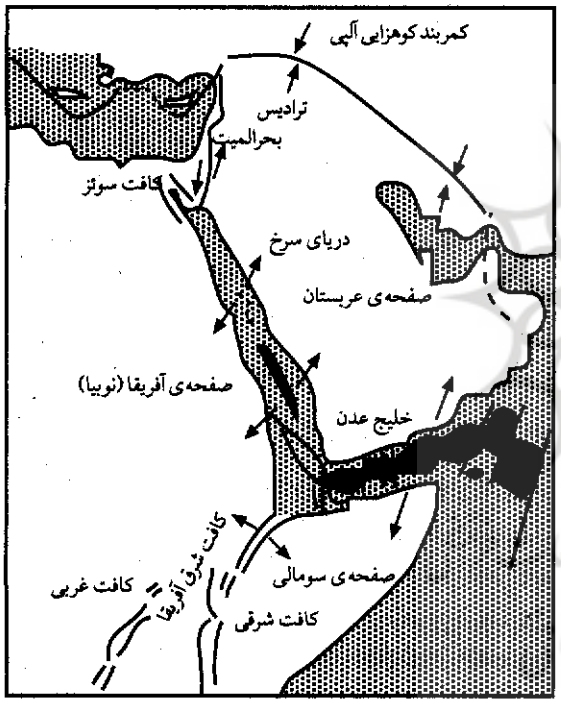


شکل ۲. منشأ و تکامل پیوستگاه‌های سه‌گانه‌ی حاصل از پلوم

۵. مثال امروزی

از هر نقطه‌ی داغ، در آغاز یک پیوستگاه سه‌گانه‌ی کافت‌ـکافت‌ـکافت به‌وجود می‌آید. پس از آن، یک شاخه از ادامه‌ی تحول باز می‌ماند و یک اولاکوژن پدید می‌آید، در حالی که تحول شاخه‌های دیگر کافت ادامه می‌یابد و با به‌هم پیوستگی، یک سیستم کافت پدید می‌آید.

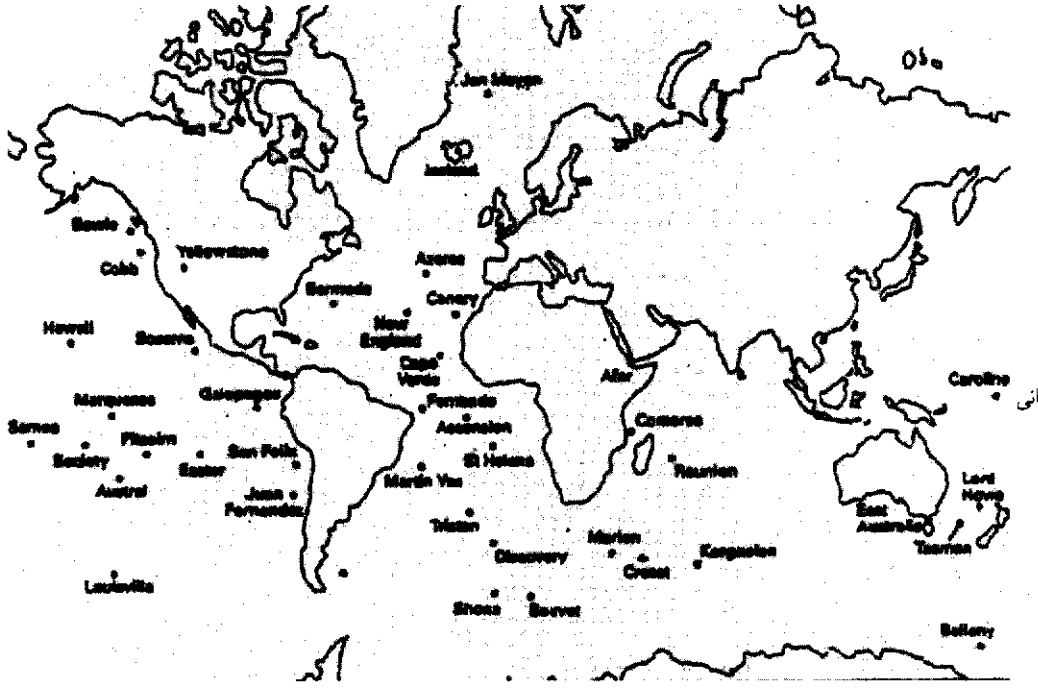
سیستم کافتی منطقه‌ی افار [باربری و دیگران، ۱۹۷۴] مثال امروزی چنین تحولی است. در این محل، گسترش بستر دریا در دو شاخه‌ی دریای سرخ و خلیج عدن صورت می‌گیرد. در این مرحله می‌توان آن‌ها را یک اقیانوس جنینی به حساب آورد؛ لیکن کافتش در شاخه‌ی سوم، یعنی سیستم کافتی شرق آفریقا در اتیوپی، یک اولاکوژن را به‌وجود آورده است (شکل ۳). هم‌چنین به‌نظر می‌رسد این سازوکار، کافتش اولیه‌ی اقیانوس اطلس را به گونه‌ای کاملاً رضایت‌بخش توضیح می‌دهد.



شکل ۳. چارچوب ساده‌شده‌ی زمین‌ساخت صفحه‌ای ناحیه‌ی دریای سرخ ـ خلیج عدن. نواحی سیاه، پوسته‌ی اقیانوسی، و نواحی نقطه‌نقطه‌ی روشن، پوسته گذاری شامل پوسته‌ی قاره‌ای نازک شده و کشیده شده تحت هجوم دایک‌های بازالتی هستند.

۶. پراکندگی جهانی نقاط داغ

به عقیده‌ی مورگان [۱۹۷۱ و ۱۹۷۲a]، پلوم‌های گوشته نسبت به یکدیگر و نسبت به گوشته‌ی پایینی ساکن می‌مانند و عمر آن‌ها دراز است. نقاط داغ در این صورت، چارچوب مرجع ثابتی برای تعیین حرکت مطلق صفحات ارائه می‌کنند. تازه‌ترین براورد شمار امروزی نقاط داغ حدود ۴۰ عدد است [استوترز، ۱۹۹۳] (شکل ۴).



شکل ۴. توزیع جهانی نقاط داغ

مورگان (۱۹۸۱) از این فرضیه برای توصیف حرکت صفحات روی گوشته در ۲۰۰ میلیون سال گذشته استفاده کرده است. بنابر تجزیه و تحلیل او به نظر می‌رسد، نقاط داغ نسبت به یکدیگر ثابت هستند یا با سرعت‌های نسبی فقط چند میلی‌متر در سال حرکت می‌کنند. به این ترتیب ممکن است سنگ کره را ضعیف کنند؛ به گونه‌ای که کافت‌های آینده در طول مسیر آن‌ها رخ دهند.

همانندسازی آزمایشگاهی نقاط داغ

به منظور درک ملموس‌تر تأثیرات عمده‌ی ناشی از صعود زبانه‌های گرمایی بر روی پوسته، سعی شد نمونه‌ای ساده از این پدیده در مقیاس آزمایشگاهی تهیه شود.

۱. مراحل ساخت مدل

در این همانندسازی، چند نکته‌ی جزئی ولی اساسی را باید مورد نظر قرار داد:

● حین مشاهده‌ی تغییرات سطحی، همواره باید در نظر داشت که در ساخت مدل، هدف اصلی مشاهده‌ی تأثیر این عمل روی سطح پوسته است. این‌که ارتباط این پلوم صعود کننده با جریان‌های همرفتی گوشته، به چه نحو موجب صعود آن به طرف قاعده‌ی پوسته شده، در این نمونه چندان لحاظ نشده و تنها بر این نکته تأکید شده است که پلوم‌های صعود کننده، از گوشته‌ی پایینی و در نزدیکی هسته (درجه‌ی حرارت بیشتر) منشأ می‌گیرند و تا گوشته‌ی بالایی در نزدیکی پوسته (درجه حرارت کمتر) صعود می‌کنند.

● محور اصلی که به‌عنوان پلوم صعودکننده در نمونه به‌کار برده خواهد شد، با عمل چرخاندن به سمت بالا حرکت خواهد کرد. لیکن باید در نظر داشت، با وجود چرخش این محور، رأس آن باید بدون چرخش باشد و به‌طور ثابت به طرف بالا حرکت کند تا موجب چرخاندن رسوبات رویی نشود؛ مشابه آنچه که هنگام چرخاندن چسب جامد[۷] مشاهده می‌کنیم.

همانندسازی مورد بحث به این ترتیب انجام شد:

۱. برای ساخت محور اصلی (پلوم صعود کننده) می‌توان از چسب جامد استفاده کرد یا مشابه آن را ساخت؛ به ترتیبی که یک محور توخالی روی پیچ گرداننده سوار باشد و چرخش محور توسط زایده‌های کوچکی که در جدار داخلی محفظه‌ی بیرونیِ محور وجود دارند و نیز شیارهای روی بدنه‌ی محور که این زایده‌ها را در خود جای می‌دهند، مهار شود. چنانچه از خود چسب جامد استفاده می‌کنیم، برای استحکام محور و کارایی بیشتر آن، بهتر است چسب را تخلیه کرد و به‌جای آن از یک استوانه‌ی چوبی توخالی که روی پیچ مرکزی سوار می‌شود، استفاده کرد.

۲. به منظور تأثیر هرچه بهتر بر رسوبات رویی، در بالای محور اصلی می‌توان از یک سطح کروی استفاده کرد تا همان‌طور که گفته شد، حین چرخاندن پیچ، بدون چرخش باشد و تنها به سمت بالا حرکت کند. در این نمونه، از یک قطعه‌ی نیمه‌کروی بریده شده از یک توپ لاستیکی استفاده شده است که توسط پیچ کوچکی، در بالای محور اصلی ثابت می‌شود.

۳. به‌دلیل این‌که این سازوکار در حالتی کلی همانندسازی شده است، ابعاد آن اهمیت چندانی ندارند. همچنین، به‌دلیل این‌که هدف اصلی، مشاهده‌ی تغییرات سطحی است، این‌که برای ساخت محیط عمل از شیشه، چوب، فلز یا... استفاده شود، چندان مهم نیست. اما در این‌جا برای زیبایی بیشتر، مساحتی به ابعاد ۳۴×۲۴ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده و نیز به منظور مشاهده‌ی جزئیات عملکرد نمونه، برای ساخت محیط

عمل، شیشه به‌کار رفته است.

در مرحله‌ی بعد، ارتفاع جعبه‌ی ساخته شده را سه قسمت در نظر می‌گیریم که بعد از یک سوم پایینی آن، صفحه بین هسته و گوشته قرار خواهد گرفت که در حقیقت، صفحه‌ی قرارگیری محور اصلی است و قبلاً در مرکز آن سوراخی به قطر محور اصلی ایجاد کرده‌ایم و محور اصلی داخل آن قرار گرفته است. بعد از دوسوم پایینی نیز، مرز گوشته و پوسته (و در حقیقت ضخامت پوسته) قرار خواهد گرفت که البته به ارتفاع محور اصلی ساخته شده بستگی دارد و رأس محور مماس با آن قرار می‌گیرد. بدیهی است که در این جا مقیاس‌ها رعایت نشده‌اند.

۴. به منظور عملکرد صحیح پی سنگ زیرین و رسوبات رویی، رسوبات باید در یک سطح در فضا، به گونه‌ای قرار می‌گرفتند که حرکت رو به‌بالای پلوم صعود کننده، به قاعده‌ی آن فشار آورد و در حین گنبدی شدن، شکستگی‌های کششی ویژه‌ای را سبب شود. بنابراین، از قابی استفاده شد که بتوان برای هربار آزمایش، یک ورقه‌ی سلفون روی آن کشید؛ چرا که سلفون قابلیت انعطاف‌پذیری لازم در این شرایط را دارد و در حقیقت می‌تواند به‌عنوان مرز بین گوشته و پوسته در نظر گرفته شود.

۵. همان‌طور که گفته شد، خطوارگی‌های قدیمی در صفحه‌ی قاره‌ای، مانند خطوط ضعف ناحیه‌ای یا زمین درزهای پرکامبرین که در جهت مناسب قرار دارند، تا حدودی مکان شکافت قاره را تعیین می‌کنند. بر این اساس، باید از لایه‌ای به عنوان پی سنگ زیرین استفاده و این خطوط ضعف را در آن ایجاد کرد.

بدین منظور، از یک ورقه‌ی فوم خاص که دو ویژگی مهم ضخامت مناسب و انعطاف‌پذیری (لختی) هرچه بیشتر را داشته باشند، استفاده می‌شود. ضخامت فوم بر این اساس تعیین می‌شود که بتوان در آن سه شکاف ایجاد کرد؛ به طوری که دو شکاف به‌طور کامل بریده شوند و بریدگی شکاف سوم تنها تا بخشی از ضخامت آن پیش رود تا بتواند مشابه بازوی وامانده (اولاکوژن) عمل کند.

حال بر فوم تهیه شده که خود روی قاب پوشیده با سلفون قرار گرفته است، مصالح (رسوبات) مناسب، به ضخامتی تقریبی در حدود ضخامت فوم، ریخته می‌شود که بهتر است از مصالح بسیار دانه‌ریز نظیر سیمان استفاده شود.

۶. برای مشاهده‌ی بهتر تأثیر این برخاستگی روی سطح، از یک صفحه‌ی نازک مشبک فلزی یا طلقی استفاده می‌شود. به این ترتیب که پیش از گنبدی شدن، آن را روی سطح صاف مصالح ریخته شده قرار می‌دهند و مقدار کمی پودرگچ (یا هر پودر رنگی دیگر) روی آن پاشیده می‌شود. با برداشتن این صفحه‌ی مشبک، مربع‌های منظمی روی سطح تشکیل شده‌اند که هرگونه تغییر در سطح را به وضوح نمایان می‌سازند.

۳. نحوه‌ی عملکرد مدل

پس از انجام مراحل فوق، مدل ساخته شده قابل آزمایش است. بنابراین پیچ واقع در پایین محور اصلی را می‌چرخانیم و محور اصلی (پلوم صعود کننده) به طرف بالا حرکت می‌کند. بدین ترتیب، پوسته‌ی متشکل از فوم (پی سنگ زیرین) و سیمان (رسوبات رویی) ابتدا به‌صورت گنبدی شکل، برخاسته می‌شوند و در حین برخاستگی، در بخش برآمده شکستگی‌های کششی شعاعی و حلقوی حاصل می‌شوند. هم‌چنان که انتظار می‌رفت، در این میان، سه شکستگی اصلی با زاویه‌ی ۱۲۰ درجه نسبت به یکدیگر ظاهر می‌شوند که دوتا از آن‌ها به‌طور کامل باز شده‌اند و شکستگی دیگر به‌طور ناقص باز می‌شود که در حکم بازوی مرده یا وامانده (اولاکوژن) خواهد بود.

نتیجه‌گیری

با عبور صفحات قاره‌ای از روی نقاط داغ واقع در گوشته، برخاستگی‌های گنبدی شکلی به‌وجود می‌آید. این نقاط داغ از پلوم‌های گوشته که از گوشته‌ی پایینی بالا می‌آیند و سنگ کره‌ی رویی خود را نازک می‌کنند، منشأ می‌گیرند. پلوم صعود کننده در قاره باعث گنبدی شدن پوسته می‌شود و در ادامه معمولاً سه کافت شعاعی اصلی ظاهر می‌شود که کم‌وبیش زاویه‌ی ۱۲۰ درجه با یکدیگر می‌سازند.

در اغلب موارد، یکی از بازوها به‌طور کامل باز نمی‌شود و یک کافت ناقص را تشکیل می‌دهد که به‌صورت گودالی باریک، عمیق و انباشته از رسوب تحت عنوان «اولاکوژن» مشاهده می‌شود. اما در دو بازوی دیگر، بازشدگی فعال‌تر به تشکیل پوسته‌ی اقیانوسی و در نهایت ایجاد اقیانوس منجر خواهد شد.

در نمونه‌ی آزمایشگاهی ساخته شده، تأثیرات ناشی از پلوم‌های صعود کننده‌ی گوشته روی پوسته در حالت کلی نمایان است. به‌طوری که مشاهده می‌شود، در ناحیه‌ی بالا آمده، پس از برخاستگی و گنبدی شدن، دو دسته شکستگی‌های شعاعی و حلقوی ایجاد می‌شوند که سه شکستگی اصلی (کافت‌ها) با زاویه‌ی ۱۲۰ درجه نسبت به هم، به احتمال زیاد در مناطق ضعف پی سنگ زیرین تشکیل خواهد شد. چنانچه در نمونه مشاهده می‌شود، یکی از این شکستگی‌ها به‌طور کامل باز شده که به «اولاکوژن» معروف است، ولی در دو بازوی دیگر، کشیدگی ادامه خواهد یافت.

* دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد

زیرنویس

1. Hot spots
2. Thermal plumes
3. Aulacogen
4. Upwelling
5. Bott
6. Kusznir
7. Glue stick

منابع

۱. زمین ساخت جهانی. ترجمه‌ی دکتر جمشید حسن‌زاده و دکتر سروش مدبری. انتشارات دانشگاه تهران.

۲. مدنی، حسن. زمین شناسی ساختمانی و تکتونیک. انتشارات جهاد دانشگاهی، واحد علامه طباطبایی.

۳. قرشی، جزوه‌ی درسی درس ژئوتکتونیک(۲). نیم‌سال دوم ۸۵-۱۳۸۴.