زمین ساخت ورقه‌ای

چرا فقط روی زمین؟

هنس کپلر
ترجمه‌ی مجید کوهستانیان
دبیر آموزش‌وپرورش شهرستان قوچان

همرفت در گوشته‌ی زمین، به علت دگرشکلی حالت جامد سنگ‌ها، همان پدیده‌ای است که در نهایت حرکت ورقه‌ای روی سطح زمین را باعث می‌شود

اعتقاد اغلب صاحب‌نظران بر این است که انتقال از لیتوسفر سخت و صلب به آستنوسفر عبور از مرزی صرفاً حرارتی است

اعتقاد بر این است که بالاترین لایه‌ی زمین جامد (لیتوسفر)، شامل «ورقه»[1]های سخت مکانیکی است که روی لایه‌ای نرم‌تر در گوشته‌ی زمین حرکت می‌کنند. زمین‌ساخت ورقه‌ای می‌تواند بیشتر ساختارها و فرایندهای مؤثر در سطح سیاره‌ی ما را شرح دهد. برای مثال، در جایی که ورقه‌ها باهم برخورد می‌کنند، رشته‌کوه‌ها تشکیل می‌شوند.

در برخی جاهای دیگر، لیتوسفر اقیانوسی به درون گوشته فرو می‌رود. این مناطق فرورانش، عامل فعالیت آتشفشانی نیز هستند؛ «حلقه‌ی آتش»[2] که اقیانوس آرام را احاطه کرده است. مثالی بارز از این مورد است. از سوی دیگر، در اثر فرایندهای آتشفشانی، لیتوسفر جدیدی در پشته‌های میان‌اقیانوسی تولید می‌شود.

در این باره که مفهوم زمین‌ساخت ورقه‌ای توضیح می‌دهد که زمین در حال حاضر چگونه کار می‌کند و در چندصد میلیون سال اخیر چگونه فعالیت می‌کرده است، شک و تردید اندکی وجود دارد. سؤال دشوارتر این است که در ۴/۶ میلیارد سال سرگذشت زمین، زمین‌ساخت ورقه‌ای به سمت عقب در زمان، تا کجا قابل پی‌گیری است. به هر حال شواهد ژئوشیمیایی روزافزونی وجود دارند مبنی بر این‌که زمین‌ساخت ورقه‌ای در سرگذشت زمین، خیلی زود (شاید طی یک میلیون سال اول) برقرار شده است. بنابراین قدری عجیب است که هیچ‌کدام از سیارات زمینی دیگر (عطارد، مریخ و زهره) در حال حاضر یا در سرگذشت زمین‌شناسی خود، هیچ نشانه‌ای از زمین‌ساخت ورقه‌ای نشان نمی‌دهند.

زمین‌ساخت ورقه‌ای باعث تشکیل ساختارهای سطحی روی یک سیاره می‌شود که با سنجش از دور و حتی بدون نمونه‌برداری دقیق زمین‌شناسی، می‌توان آن‌ها را به راحتی تشخیص داد. پستی و بلندی سطح زمین، توزیع دوگانه‌ی بارزی دارد، به گونه‌ای که بیشتر قاره‌ها تقریباً یک کیلومتر بالاتر از سطح دریا و بیشتر بسترهای اقیانوسی تقریباً ۴ کیلومتر در زیر سطح دریا قرار دارند. پستی و بلندی‌های بین این دو حدّ یا فراتر از آن‌ها، نادرند. این توزیع دوگانه، نتیجه‌ی مستقیم زمین‌ساخت ورقه‌ای است و به تفاوت ترکیب پوسته‌ی قاره‌ای و اقیانوسی مربوط می‌شود که باز هم این مورد را می‌توان به تفاوت در فرایندهای ذوب در زیر پشته‌های میان‌اقیانوسی و مناطق فرورانش نسبت داد. در هیچ‌یک از سیارات شناخته شده‌ی دیگر، چیزی شبیه این وجود ندارد و سایر نشانه‌های زمین‌ساخت ورقه‌ای نیز دیده نمی‌شوند. بنابراین چرا زمین‌ساخت ورقه‌ای فقط روی زمین وجود دارد؟

کلیدواژه‌ها: زمین‌ساخت ورقه‌ای، لیتوسفر، گرانروی، آستنوسفر، گوشته‌ی زمین، گوشته‌ی آب‌دار، انحلال‌پذیری آب.

اهمیت آستنوسفر

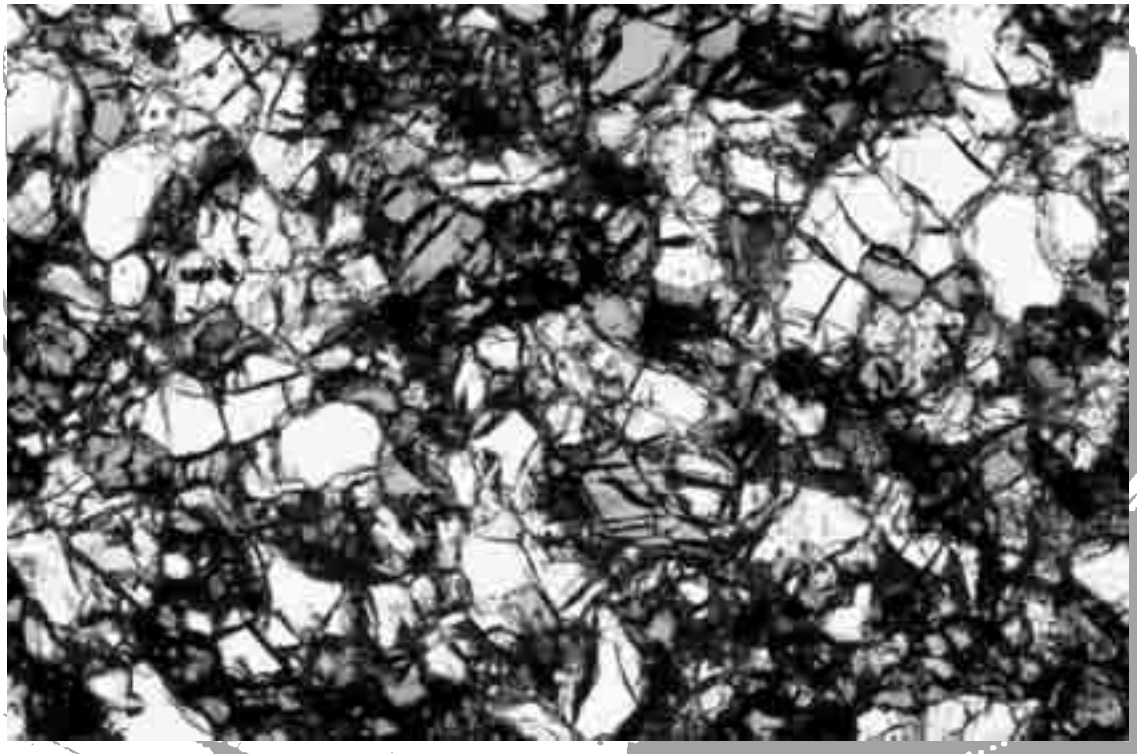
گوشته‌ی زمین جامد است، چرا که مشاهدات صورت گرفته درباره‌ی زمین‌لرزه‌ها حاکی از آن است که گوشته، امواج بُرشی کشسان را از خود عبور می‌دهد. به هر حال، سنگ‌ها و کانی‌های گوشته ظاهراً در مقیاس زمان زمین‌شناسی، می‌توانند به‌طور کشسان تغییر شکل پیدا کنند. به گونه‌ای که در مقیاس زمانی بسیار طولانی، گوشته هم‌چون مایعی فوق‌العاده «گرانرو»[3] رفتار می‌کند. این موضوع واقعاً بیش از یک قرن پیش، یعنی مدت‌های طولانی قبل از ظهور زمین‌ساخت ورقه‌ای شناخته شده بود. بالا آمدن پیوسته‌ی اسکاندیناوی به اندازه‌ی چندین میلی‌متر در سال که امروز قابل مشاهده است. پاسخی به ناپدید شدن بارِ (وزن) یخچال‌ها در پایان عصر یخبندان بوده و نشان‌دهنده‌ی رفتار مایع‌گونه‌ی مواد در زیر لیتوسفر است.

همرفت در گوشته‌ی زمین، به علت دگرشکلی حالت جامد سنگ‌ها، همان پدیده‌ای است که در نهایت حرکت ورقه‌ای روی

سطح زمین را باعث می‌شود. بخشی از انرژی مورد نیاز برای این همرفت، ناشی از واپاشی پرتوزا و قسمتی از آن حاصل گرمای بازمانده از منشاء زمین است. «الگو»[۴]های ژئودینامیکی همرفت گوشته می‌توانند بسیاری از ویژگی‌های حرکت ورقه‌ای در چندصد میلیون سال اخیر را به درستی بازسازی کنند. جالب است که این الگوها نشان می‌دهند دست یافتن به یک الگوی فعالیت زمین‌شناختی مشابه با زمین‌ساخت ورقه‌ای بسیار مشکل است. در گستره‌ی وسیعی از پارامترها، بیشتر الگوها یا سیاراتی با لیتوسفر سخت و صلب یا سیاراتی بدون هرگونه لیتوسفر پایدار را ارائه می‌دهند.

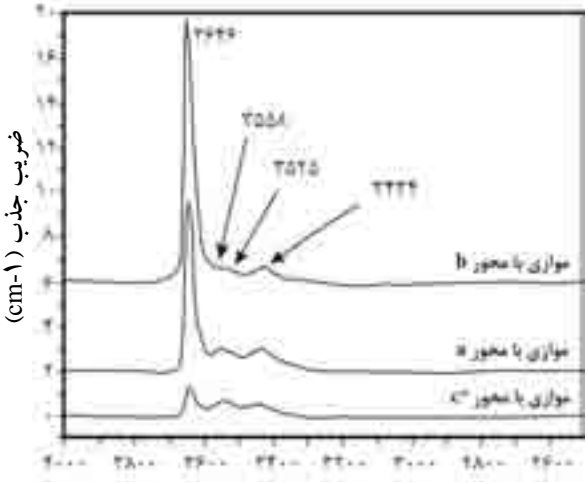
به‌منظور دست یافتن به چیزی شبیه به زمین‌ساخت ورقه‌ای، ظاهراً مجرایی از مواد دارای «گرانروی»[۵] کم در زیر لیتوسفر مورد نیاز است. شواهد مستقلی برای حضور چنین مجرایی در زمین وجود دارد. اندازه‌گیری‌های لرزه‌ای نشان می‌دهند که بین عمق حدود ۶۰ کیلومتر و ۲۲۰ کیلومتر در زیر اقیانوس‌ها، سرعت امواج بُرشی کشسان و امواج فشارشی کاهش می‌یابد که بیانگر مدول کل و مدول بُرشی[۶] کاهش یافته (یعنی حضور مواد نرم‌تر) است. مرز بالایی این «منطقه‌ی کم‌سرعت لرزه‌ای»[۷] در زیر قاره‌ها تا عمق ۱۵۰ کیلومتر افت می‌کند. بنابراین، منطقه‌ی کم‌سرعت لرزه‌ای غالباً با نام آستنوسفر (لایه‌ی مکانیکی ضعیف در گوشته‌ی که حرکت صفحات را امکان‌پذیر می‌سازد) شناخته می‌شود.

شکل ۱. مقطع نازک یک بیگانه‌سنگ گوشته‌ای (یک تکه از گوشته‌ی زمین که توسط فوران آتشفشانی به سطح آورده شده است). دانه‌های تقریباً بی‌رنگ الیوین $((Mg,Fe)_2SiO_4)$، قهوه‌ای انستاتیت $((Mg,Fe)SiO_3)$، سبز پررنگ دیوپسید کروم‌دار $(CaMgSi_2O_6)$ ، و قرمز گارنت $((Mg,Fe)_3Al_2(SiO_4)_3)$ هستند. فرمول همه‌ی کانی‌ها ساده شده است؛ به‌ویژه اینکه انستاتیت و دیوپسید مقداری AL نیز دارند. اندازه‌ی دانه حدود یک میلی‌متر است. نمونه از پالی ـ آیکی در پاتاگونیا. عکس از سیلوی دموچی، CNRS مونپلییه.



اعتقاد اغلب صاحب‌نظران بر این است که انتقال از لیتوسفر سخت و صلب به آستنوسفر عبور از مرزی صرفاً حرارتی است. هم‌گام با افزایش دما با عمق، مقاومت مکانیکی سنگ‌ها باید کاهش یابد. با وجود این، داده‌های لرزه‌ای جدید وجود مرزی کاملاً ناگهانی و تیز را بین لیتوسفر و آستنوسفر نشان می‌دهند که طی آن، تغییراتی عمده در سرعت‌های لرزه‌ای، درست در فاصله‌ی چند کیلومتر رخ می‌دهد [۱]. این مسئله را نمی‌توان با تغییر تدریجی دما توجیه کرد؛ در عوض این مشاهده حاکی از تغییر فاز (مقداری تغییر در کانی‌شناسی گوشته) است. به‌علاوه، افزایش تدریجی دما نمی‌تواند شرح دهد که چرا آستنوسفر ظاهراً یک مرز پایینی نیز دارد، و افزایش دما به سمت مرکز زمین ادامه پیدا می‌کند. بنابراین، شناخت منشأ آستنوسفر زمین احتمالاً کلید حل این معماست که چرا زمین ساخت ورقه‌ای روی زمین مشاهده می‌شود، اما روی سیارات دیگر (مثلاً زهره) وجود ندارد.

زهره به لحاظ اندازه، جرم و ترکیب تقریباً دوقلوی زمین محسوب می‌شود. اما چرا زمین‌شناسی زهره این‌قدر متفاوت است؟ مشاهده آشکارا نشان می‌دهد که عملاً هیچ آبی روی زهره یافت نمی‌شود. سطح آن داغ و پوشیده از هواکره‌ای چگال و غنی از CO_2 است؛ آب به موجب اثر گل‌خانه‌ای به فضا فرار کرده است. آیا الگوی زمین‌ساختی ویژه روی زمین، می‌تواند تا حدودی با حضور آب ارتباط داشته باشد؟



شکل ۲. طیف‌های جذبی قطبیده‌ی فروسرخ مربوط به بلور دیوپسید ($CaMgSi_2O_6$) کروم‌دار. همه‌ی نوارها مربوط به نقص‌های نقطه‌ای OH در محیط‌های ساختاری متفاوت در این بلور هستند. براساس وابستگی جذب فروسرخ به جهت بردار میدان الکتریکی، جهت‌گیری گروه OH در بلور را می‌توان تعیین کرد. اقتباس از [۵].

رفتار متفاوت الیوین و انستاتیت، کمترین انحلال‌پذیری آب در فاصله‌ی عمقی دقیقاً مربوط به منطقه‌ی کم‌سرعت لرزه‌ای در گوشته را باعث می‌شود. در این عمق، همه‌ی آب نمی‌تواند بیش از این در کانی‌های جامد حل شود. آب اضافی به‌صورت مذاب بخشی درمی‌آید

آب در گوشته‌ی زمین

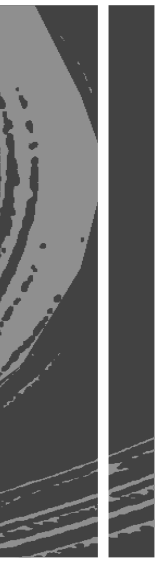
گوشته‌ی بالایی زمین شامل سیلیکات‌هایی هم‌چون الیوین ($(Mg,Fe)_2SiO_4$)، انستاتیت ($(Mg,Fe)SiO_3$) و دیوپسید ($CaMgSi_2O_6$) است که هیچ‌گونه‌ی آبی در فرمول شیمیایی خود ندارند. به این دلیل، مدت‌های طولانی اعتقاد بر این بود که تقریباً همه‌ی آب سیاره‌ی ما در اقیانوس‌ها قرار دارد و گوشته اصولاً خشک و بی‌آب است. فوران‌های آتشفشانی شدید، گهگاه قطعاتی از سنگ‌های گوشته را با خود به سطح زمین می‌آورند (شکل ۱). غالباً چنین به نظر می‌رسید که آنالیزهای شیمیایی دقیق روی کانی‌های به‌دست آمده از این نوع نمونه‌ها، آثاری از آب را نشان می‌دهند. به هر حال این موضوع معمولاً به علت آلودگی سطحی یا ادخال‌های مواد بیگانه، منتفی دانسته می‌شد. این دیدگاه در دهه‌ی ۱۹۶۰، وقتی که چند کانی‌شناس به کمک «طیف‌بینی فروسرخ»[۸]، مطالعه‌ی چنین نمونه‌هایی را شروع کردند، به آرامی تغییر پیدا کرد. این روش به آثار آب مولکولی یا گروه‌های OH بسیار حساس است. به‌علاوه، می‌توان داده‌هایی در مورد محیط شیمیایی پروتون‌های (H^+) موجود در ماده نیز به‌دست آورد. اگر تشعشع فروسرخِ «قطبیده»[۹] مورد استفاده قرار گیرد، جذب فروسرخ وقتی که دوقطبی OH با بردار میدان الکتریکی موازی است، قوی‌ترین حالت را خواهد داشت. در حالی که اگر دوقطبی OH و بُردار میدان الکتریکی بر یکدیگر عمود باشند، هیچ جذبی رخ نخواهد داد.

مطالعات تک‌بلورهای کانی‌های گوشته‌ی دارای کیفیت جواهری و جهت‌یابی نوری واضح، به کمک طیف‌بینی فروسرخ نشان داد که کانی‌های مذکور همیشه آثاری از آب را به شکل گروه‌های OH در خود دارند که نسبت به محورهای بلورشناسی جهت‌گیری مشخصی دارند (شکل ۲). این موضوع نمی‌تواند به ناخالصی‌های تصادفی مربوط باشد. ظاهراً مقداری آب به‌صورت «نقص‌های نقطه‌ای OH»[11] در این کانی‌های گوشته به‌طور شیمیایی حل شده است [۱]. به‌نظر نمی‌رسد این مقادیر زیاد و چشم‌گیر باشند (چندصد تا چندهزار پی‌پی‌ام، یا ۰/۰۱ تا ۰/۱ درصد وزنی).

به هر حال، با توجه به جرم عظیم گوشته، این کانی‌ها ذخیره‌ای از آب را تشکیل می‌دهند که به لحاظ اندازه، با جرم همه‌ی اقیانوس‌ها قابل مقایسه است. به‌علاوه وجود آثار آب، خواص فیزیکی کانی‌ها را به شدت تغییر می‌دهد. مقدار ۱۰۰۰ پی‌پی‌ام یا ۰/۱ درصد وزنی آب حل شده به‌صورت نقص‌های OH در شبکه‌ی بلور، «مقاومت خزشی»[11] الیوین را تا سه مرتبه کاهش می‌دهد [۳]. این موضوع احتمالاً بدان علت است که ورود پروتون‌ها، «فضاهای خالی کاتیونی»[12] را ایجاد می‌کند که پویایی و تحرک «جابه‌جایی‌ها»[13] را افزایش می‌دهند. الگوهای عددی نشان می‌دهند که این کاهش گرانروی گوشته به علت وجود آثار آب حل شده در شبکه‌ی بلوری، پیش‌نیازی برای توسعه‌ی زمین‌ساخت ورقه‌ای است. اما آیا آب می‌تواند وجود مجرایی با گرانروی کم در آستنوسفر زمین را توجیه کند؟

زمین، سیاره‌ی آبی

آب نقطه‌ی ذوب سیلیکات‌ها را به شدت کاهش می‌دهد. در فشار ۱ بار، بازالت خشک در دمای حدود ۱۲۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد ذوب می‌شود. با وجود این در حضور ۱۰ درصد آب، و اگر فشار همه‌جانبه به اندازه‌ی کافی بالا باشد تا از فرار آب از سیستم جلوگیری کند، نقطه‌ی ذوب تا ۸۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد یا حتی کمتر از آن افت می‌کند. علت این موضوع آن است که آب در مذاب‌های سیلیکاتی فوق‌العاده انحلال‌پذیر است. به‌علاوه، حتی وجود مقدار بسیار کوچکی از مذاب در سنگ، می‌تواند مقاومت خزشی و گرانروی آن را به شدت کاهش دهد. از سوی دیگر، سرعت امواج کشسان برشی و امواج فشارشی کاهش خواهد یافت که این موضوع با مشاهدات لرزه‌ای برای آستنوسفر مطابقت دارد. دمای آستنوسفر آن‌قدر پایین است که اجازه‌ی ذوب در غیاب آب را نمی‌دهد. به هر حال با وجود مقداری آب، ذوب امکان‌پذیر می‌شود. اما اگر حضور مذاب به



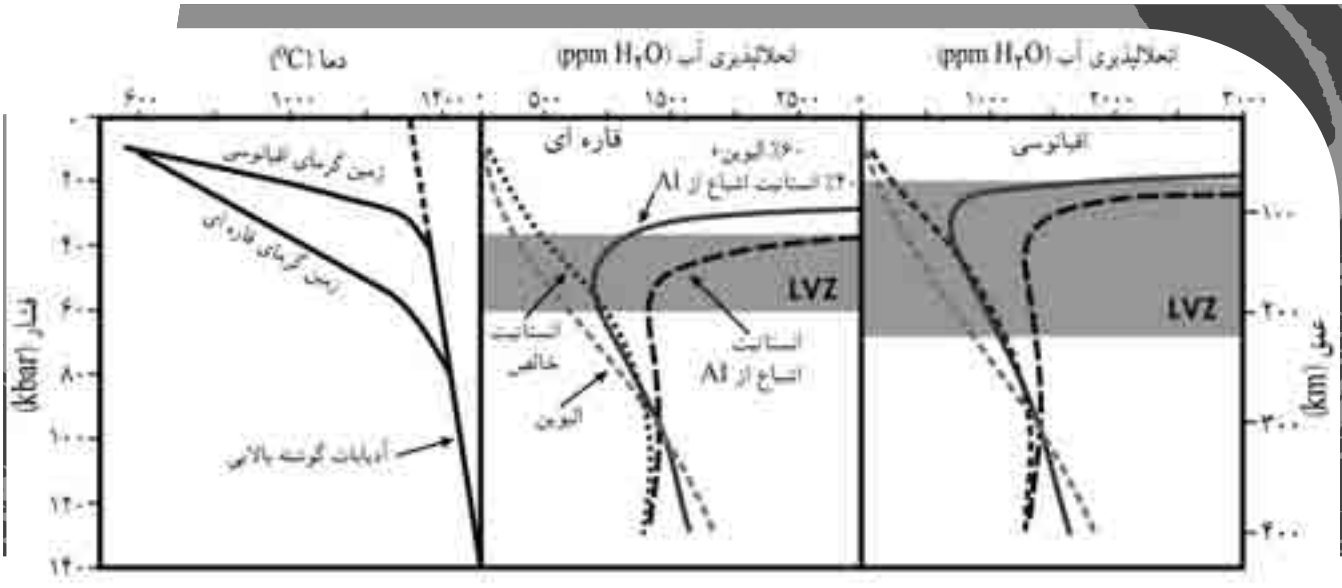
تشکیل آستنوسفر و بنابراین وجود زمین‌ساخت ورقه‌ای فقط در سیاره‌ای امکان‌پذیر است که گوشته‌ی آب‌دار داشته باشد، و این خود با نبود زمین‌ساخت ورقه‌ای در زهره مطابقت دارد

آب در مذاب‌های سیلیکاتی فوق‌العاده انحلال‌پذیر است. به‌علاوه، حتی وجود مقدار بسیار کوچکی از مذاب در سنگ، می‌تواند مقاومت خزشی و گرانروی آن را به شدت کاهش دهد

آستنوسفر محدود شود، دلیل آن‌چه می‌تواند باشد؟ آیا امکان دارد که مقدار اب در آستنوسفر نسبت به سایر بخش‌های گوشته بالاتر باشد؟ با توجه به «اختلاط همرفتی کارامد»[14] در کل گوشته، این موضوع ظاهراً غیرمحتمل به‌نظر می‌رسد.

اخیراً الگوی جدیدی پیشنهاد شده است [۴] که تشکیل «مذاب بخشی» در آستنوسفر زمین را به زیبایی توضیح می‌دهد (شکل ۳). در میان کانی‌های گوشته‌ی بالایی، الیوین و انستاتیت ALدار میزبان‌های اصلی آب هستند. مطالعات تجربی نشان می‌دهد که انحلال‌پذیری آب به‌صورت نقص‌های OH در الیوین، با فشار و دما و لذا با افزایش عمق در گوشته، به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد. با وجود این، انحلال‌پذیری آب در انستاتیت با عمق به‌طور ناگهانی کاهش پیدا می‌کند. این رفتار متفاوت ناشی از تفاوت‌ها در سازوکار جانشینی است که مسبب ورود آب محسوب می‌شود. در الیوین، دو پروتون به جای Mg^{2+} می‌نشینند و فضای خالی کاتیونی حاصله، باعث تراکم‌پذیری بیشتر بلور می‌شود. بنابراین، انحلال در آب در فشار بالا چشم‌گیرتر است. با این حال، در انستاتیت، H^{+} و Al^{3+} به‌جای Si^{4+} می‌نشینند. موضوع مذکور باعث انبساط شبکه‌ی بلور می‌شود و بنابراین انحلال‌پذیری آب در فشار بالا کاهش می‌یابد.

این رفتار متفاوت الیوین و انستاتیت، کمترین انحلال‌پذیری آب در فاصله‌ی عمقی دقیقاً مربوط به منطقه‌ی کم‌سرعت لرزه‌ای در گوشته را باعث می‌شود. در این عمق، همه‌ی آب نمی‌تواند بیش از این در کانی‌های جامد حل شود. آب اضافی به‌صورت مذاب بخشی درمی‌آید. با حضور جزء کوچکی از مذاب بخشی (حدود ۱٪)،



شکل ۳. انحلال‌پذیری آب در کانی‌های گوشته‌ی زمین. انحلال‌پذیری کلی آب (منحنی قرمز)، میانگین وزنی انحلال‌پذیری آب در الیوین (منحنی سبز) و انستاتیت ALدار (منحنی سیاه) است. انحلال‌پذیری کلی آب در فاصله‌ی عمقی آستنوسفر، مقدار حداقل آشکاری را نشان می‌دهد که به منطقه‌ی کم‌سرعت لرزه‌ای (LVZ و محدوده‌ی سایه‌دار) مربوط است. در این منطقه، همه‌ی آب نمی‌تواند بیش از این در کانی‌های جامد ذخیره شود؛ آب اضافی باعث ذوب بخشی می‌شود. در اثر وجود مقدار اندکی از مذاب، مقاومت مکانیکی سنگ به شدت کاهش می‌یابد. این الگو، عمق‌های متفاوت آستنوسفر در زیر قاره‌ها و اقیانوس‌ها (به‌علت تفاوت‌های موجود در نیمرخ‌های دمایی؛ بخش سمت چپ شکل) را به درستی پیش‌گویی می‌کند. اقتباس از [٤].

مقاومت سنگ به شدت کاهش می‌یابد. چنین الگویی عمق متفاوت منطقه‌ی کم‌سرعت لرزه‌ای در زیر قاره‌ها و اقیانوس‌ها را به درستی پیش‌گویی می‌کند. به‌علاوه، به‌طور صحیح پیش‌بینی می‌کند که مرز بالایی این منطقه باید بسیار ناگهانی و تیز باشد، در حالی که مرز پایینی آن تدریجی‌تر است (منحنی‌های قرمز در شکل ۳ را مقایسه کنید).

پس می‌توان نتیجه گرفت، تشکیل آستنوسفر و بنابراین وجود زمین‌ساخت ورقه‌ای فقط در سیاره‌ای امکان‌پذیر است که گوشته‌ی آب‌دار داشته باشد، و این خود با نبود زمین‌ساخت ورقه‌ای در زهره مطابقت دارد. زمین، سیاره‌ای آبی است؛ نه تنها به علت وجود اقیانوس‌هایش، بلکه به علت الگوی زمین‌ساختی‌اش.

پی‌نوشت

1. plate
2. ring of fire
3. viscous
4. model
5. viscosity
6. bulk and shear modulus
7. seismic low – velocity zone (LVZ)
8. infrared spectroscopy
9. polarized
10. OH point defects
11. creep strength
12. cation vacancies
13. dislocation
14. efficient convective mixing

منبع اصلی

Keppler, Hans (2009) Plate Tectonics: why only on Earth? Europhysics News, DOI: 10.1051/epn/2009604.

منابع متن

1. C.A. Rychert et al., Nature 436, 542 (2005)
2. H. Keppler and J.R. Smyth, Water in nominally anhydrousminerals (Mineralogical Society of America, Chantilly, 2006).
3. S.J.Mackwell et al., J. Geophys. Res. 90, 11319(1985).
4. K.Mierdel et al., Science 315, 364 (2007).
5. G. Bromiley et al., Am.Mineral. 89. 941 (2004).