درس ٤

سفر به اعماق زمین

آیا سفر به اعماق زمین امکان پذیر است؟ شعاع کره زمین حدود **۶۴۰۰ کیلومتر** است. در شرایط و تکنولوژی امروزی امکان سفربه اعماق زمین وجود ندارد. عمیق‌ترین چاهی که انسان تاکنون حفر کرده **حدود۱۳ کیلومتر** است یعنی حدود **۰/۲ درصد** از شعاع زمین.

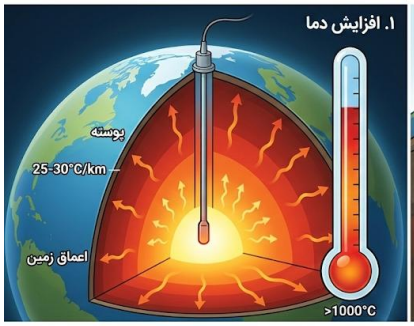
دو مشکل بزرگ برای سفر به اعماق زمین

در سفر به اعماق زمین دو مانع اساسی وجود دارد:

۱ -افزایش دما: در پوستهٔ زمین، دما به طور میانگین به ازای هر کیلومتر عمق **حدود ۲۵ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد** افزایش می‌یابد، اگرچه در اعماق بیشتر این افزایش کمتر می‌شود.

۲ -افزایش فشار: با افزایش عمق، فشار وارد بر سنگ‌ها به شدت افزایش یافته و در هنگام حفاری، آزاد شدن ناگهانی این تنش‌ها می‌تواند باعث **خردشدگی و ترک‌های شدید** در سنگ‌ها شود.

دو مشکل بزرگ برای سفر به اعماق زمین



در پوستهٔ زمین، دما به‌طور میانگین به ازای هر کیلومتر عمق حدود 25 تا 30 درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد.



با افزایش عمق، فشار وارد بر سنگ‌ها به شدت افزایش یافته و در هنگام حفاری، آزاد شدن ناگهانی این تنش‌ها می‌تواند باعث خردشدگی و ترک‌های شدید در سنگ‌ها شود.

روش های مطالعه ساختمان زمین

الف) روش‌های مستقیم

۱- سنگ‌های به دست آمده از **حفاری‌ها**

۲- **مواد مذاب آتشفشانی**

۳- **ترکیبات چشمه‌های آب گرم**

ب) روش‌های غیرمستقیم

۱- **خاصیت مغناطیسی زمین**

۲- **شتاب جاذبه** زمین در نقاط مختلف

۳- **شهاب سنگ‌ها**

۴- **امواج لرزه‌ای**، این امواج بر دو نوع هستند مصنوعی و طبیعی

دلیل طبقه‌بندی	نوع اطلاعات	مستقیم / غیرمستقیم	روش
تماس مستقیم با مواد	نمونه واقعی	مستقیم	**حفاری**
خروج مواد از عمق	ترکیب درون زمین	مستقیم	**مواد آتشفشانی**
تماس با لایه‌ها	ترکیب شیمیایی	مستقیم	**چشمه‌های آب گرم**
استنتاج فیزیکی	سرعت و مسیر موج	غیرمستقیم	**امواج لرزه‌ای**
میدان مغناطیسی	ساختار هسته	غیرمستقیم	**مغناطیس زمین**
اختلاف شتاب	چگالی لایه‌ها	غیرمستقیم	**جاذبه زمین**
منبع مشابه	ترکیب احتمالی هسته	غیرمستقیم	**شهاب‌سنگ**

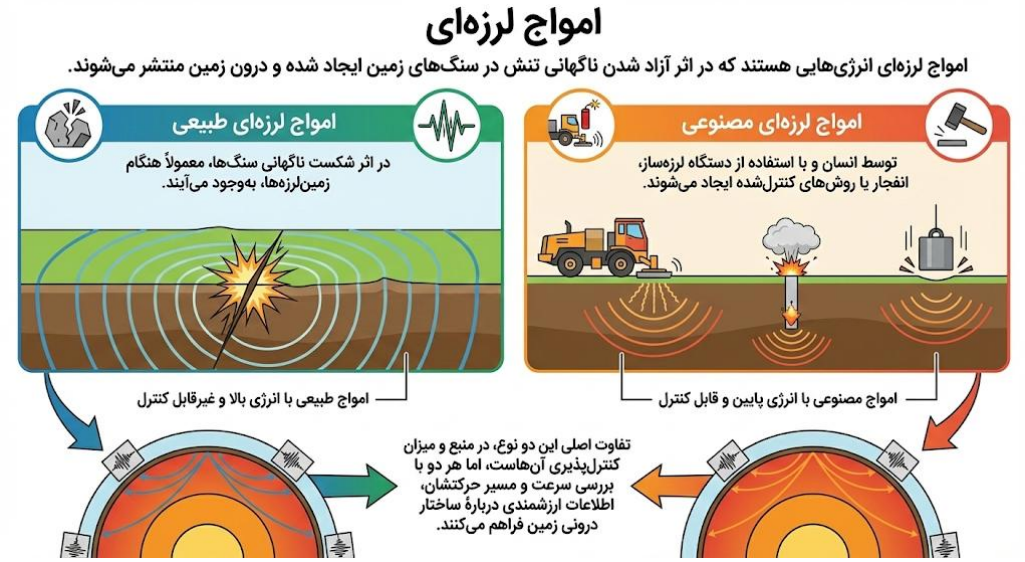


امواج لرزه‌ای

امواج لرزه‌ای انرژی‌هایی هستند که در اثر آزاد شدن ناگهانی تنش در سنگ‌های زمین ایجاد شده و درون زمین منتشر می‌شوند.

امواج لرزه‌ای طبیعی: در اثر شکست ناگهانی سنگ‌ها، معمولاً هنگام زمین‌لرزه‌ها، به‌وجود می‌آیند.
امواج لرزه‌ای مصنوعی: توسط انسان و با استفاده از دستگاه لرزه‌ساز، انفجار یا روش‌های کنترل‌شده ایجاد می‌شوند.

تفاوت اصلی این دو نوع، در **منبع و میزان کنترل‌پذیری** آن‌هاست، اما هر دو **با بررسی سرعت و مسیر حرکتشان**، اطلاعات ارزشمندی دربارهٔ ساختار درونی زمین فراهم می‌کنند.

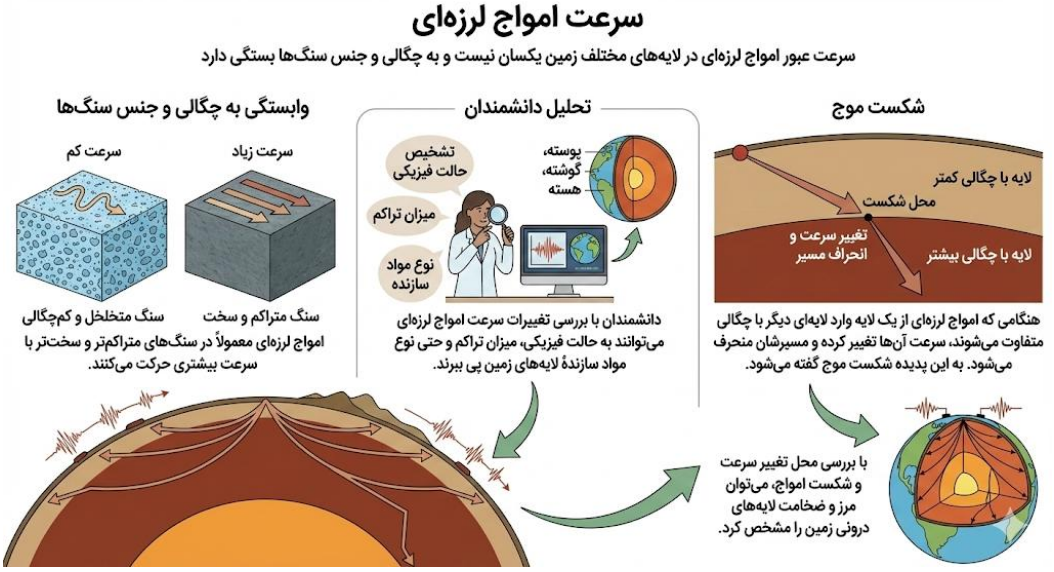


سرعت امواج لرزه‌ای

سرعت عبور امواج لرزه‌ای در لایه‌های مختلف زمین یکسان نیست و به **چگالی و جنس سنگ‌ها** بستگی دارد؛ به‌طوری‌که امواج لرزه‌ای معمولاً در سنگ‌های متراکم‌تر و سخت‌تر با سرعت بیشتری حرکت می‌کنند.

دانشمندان با بررسی تغییرات سرعت امواج لرزه‌ای می‌توانند به **حالت فیزیکی، میزان تراکم و حتی نوع مواد سازندهٔ لایه‌های زمین** پی ببرند.

هنگامی که امواج لرزه‌ای از یک لایه وارد لایه‌ای دیگر با چگالی متفاوت می‌شوند، سرعت آن‌ها تغییر کرده و مسیرشان منحرف می‌شود. به این پدیده **شکست موج** گفته می‌شود. با بررسی محل تغییر سرعت و شکست امواج، می‌توان **مرز و ضخامت لایه‌های درونی زمین** را مشخص کرد

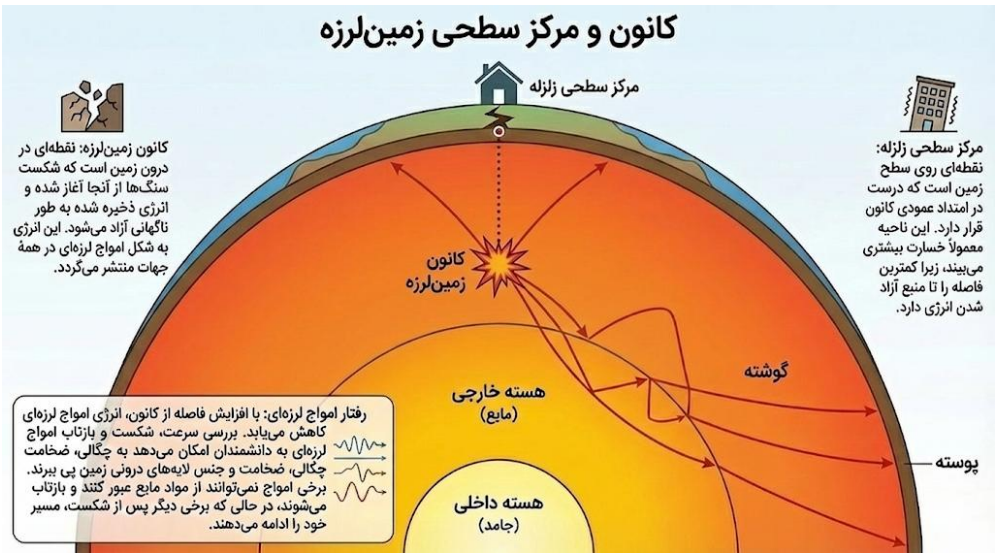


کانون زمین‌لرزه: نقطه‌ای در **درون زمین** است که شکست سنگ‌ها از آنجا آغاز شده و **انرژی ذخیره شده** به طور **ناگهانی** آزاد می‌شود. این انرژی به شکل **امواج لرزه‌ای** در همهٔ جهات منتشر می‌گردد.

امواج لرزه‌ای از کانون به صورت **شعاعی** پخش شده و با رسیدن به سطح زمین، به شکل **لرزش** احساس می‌شوند.

مرکز سطحی زلزله: نقطه‌ای روی سطح زمین است که **درست در امتداد عمودی کانون** قرار دارد. این ناحیه معمولاً **خسارت بیشتری** می‌بیند، زیرا **کمترین فاصله** را تا منبع آزاد شدن انرژی دارد.

با افزایش فاصله از کانون، انرژی امواج لرزه‌ای کاهش می‌یابد. بررسی **سرعت، شکست و بازتاب امواج لرزه‌ای** به دانشمندان امکان می‌دهد به **چگالی، ضخامت و جنس لایه‌های درونی** زمین پی ببرند. برخی امواج نمی‌توانند از مواد مایع عبور کنند و بازتاب می‌شوند، در حالی که برخی دیگر پس از شکست، مسیر خود را ادامه می‌دهند.



مقایسه چگالی سنگ‌ها

به طور کلی، **بسیاری از سنگ‌های دگرگونی** به دلیل فشردگی و بازآرایی بلوری، چگالی و سختی بیشتری نسبت به سنگ‌های رسوبی دارند و در نتیجه، امواج لرزه‌ای **معمولاً با سرعت بیشتری** در آن‌ها منتشر می‌شوند. با این حال، سرعت امواج لرزه‌ای به **جنس، ساختار و میزان تراکم سنگ** بستگی دارد و **مقایسهٔ مطلق بین همهٔ انواع سنگ‌ها درست نیست.**

ساختمان درونی زمین

کرهٔ زمین از نظر ترکیب شیمیایی به سه لایه تقسیم می‌شود:

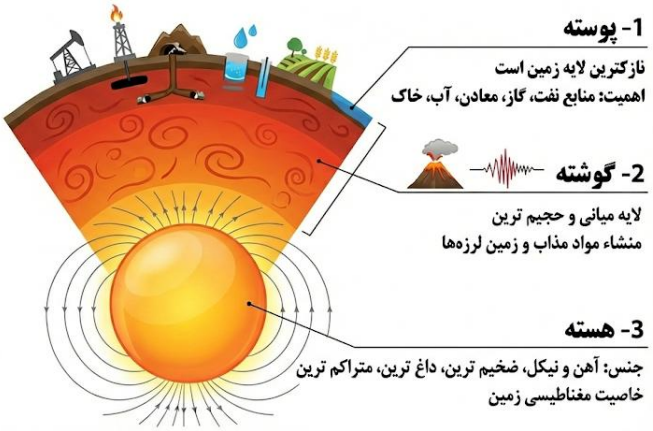
۱ -**پوسته:** **نازک‌ترین** لایهٔ زمین است و از **سنگ‌های سبک‌تر** تشکیل شده است. اهمیت پوسته در این است که تمام منابع قابل دسترس انسان مانند نفت، گاز، معادن فلزی و غیرفلزی، آب‌های زیرزمینی و

خاک‌های کشاورزی در این لایه قرار دارند. **ضخامت پوسته در زیر اقیانوس‌ها کمتر و در نواحی کوهستانی بیشتر است**.

۲ -**گوشته:** لایهٔ میانی و **حجیم‌ترین** بخش زمین است که از **زیر پوسته تا مرز هسته** ادامه دارد. **ترکیب شیمیایی آن با پوسته و هسته متفاوت است** و **منبع اصلی مواد مذاب آتشفشان‌ها** به شمار می‌رود.

۳ -**هسته:** درونی‌ترین لایهٔ زمین است که ترکیب آن عمدتاً از **آهن و نیکل** تشکیل شده و **چگال‌ترین و داغ‌ترین** لایهٔ زمین محسوب می‌شود. میدان مغناطیسی زمین به حرکات مواد فلزی در این لایه مربوط است.

ساختار درونی زمین: لایه‌های شیمیایی



ب) لایه‌های زمین از نظر حالت مواد (فیزیکی)

۱- **سنگ کره:** حدود **۱۰۰ کیلومتر** ضخامت دارد و **شامل پوسته و بخش جامد بالایی گوشته** می‌شود.
حالت آن جامد و شکننده است و در بسیاری از نواحی روی خمیرکره حرکت می‌کند.
ضخامت سنگ‌کره در قاره‌ها بیشتر از اقیانوس‌ها است.

۲- **خمیرکره:** خمیرکره که به آن نرم‌کره یا سست‌کره نیز گفته می‌شود، از عمق حدود ۱۰۰ تا ۳۵۰ کیلومتری امتداد دارد و **ضخامتی نزدیک به ۲۵۰ کیلومتر** دارد. در این لایه حدود ۱۰٪ سنگ‌ها ذوب شده و ۹۰٪ جامد هستند که همین ترکیب باعث رفتار خمیری می‌شود.

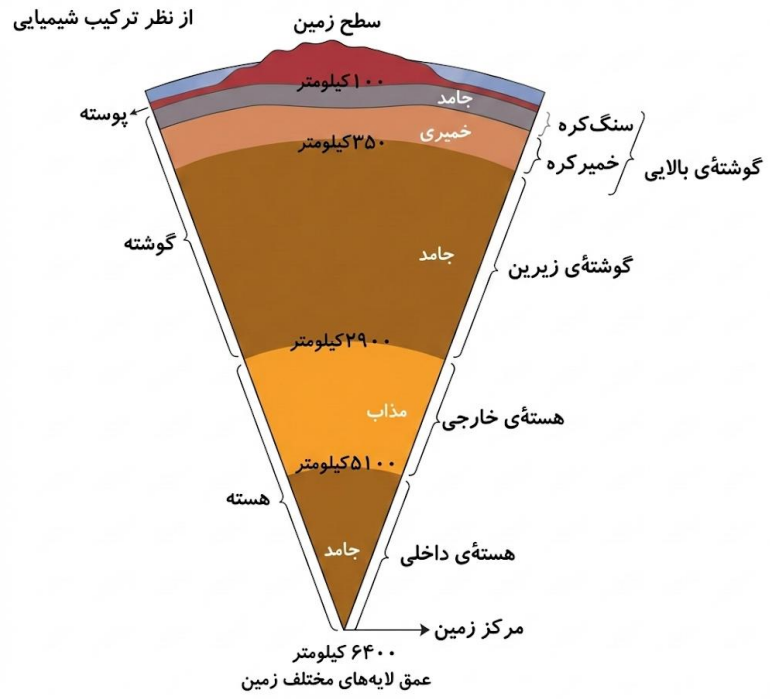
در خمیرکره به‌علت کاهش سختی سنگ‌ها، سرعت امواج لرزه‌ای کاهش می‌یابد.
خمیرکره نقش غیرمستقیم در آتشفشان‌ها دارد، اما بیشتر زمین‌لرزه‌ها در سنگ‌کره رخ می‌دهند نه در خمیرکره.

۳ـ گوشتهٔ زیرین: گوشتهٔ زیرین از **عمق حدود ۳۵۰ کیلومتری تا ۲۹۰۰ کیلومتری** امتداد دارد. **ضخامت آن حدود ۲۵۵۰ کیلومتر** است. این لایه **جامد، بسیار متراکم و داغ** است.

با افزایش عمق در گوشتهٔ زیرین، به‌علت افزایش تراکم و فشردگی، **سرعت امواج لرزه‌ای به‌تدریج افزایش می‌یابد** و در میان لایه‌های جامد زمین، به بیشترین مقدار خود می‌رسد.

۴ـ هستهٔ خارجی: هستهٔ خارجی از **عمق حدود ۲۹۰۰ تا ۵۱۰۰ کیلومتری** امتداد دارد. **ضخامتی نزدیک به ۲۲۰۰ کیلومتر** دارد.
با وجود چگالی بسیار بالا، به‌دلیل **مایع بودن، سرعت امواج لرزه‌ای در این لایه کاهش می‌یابد** و برخی از **امواج نمی‌توانند از آن عبور کنند.**

۵ـ هستهٔ داخلی: هستهٔ داخلی از **عمق حدود ۵۱۰۰ تا ۶۴۰۰ کیلومتری** امتداد دارد. **ضخامت آن حدود ۱۳۰۰ کیلومتر** است.
با وجود دمای بسیار بالا، به‌علت **فشار فوق‌العاده زیاد لایه‌های بالایی**، حالت آن **جامد** باقی مانده است. جنس هستهٔ داخلی و خارجی عمدتاً **آهن و نیکل** است.





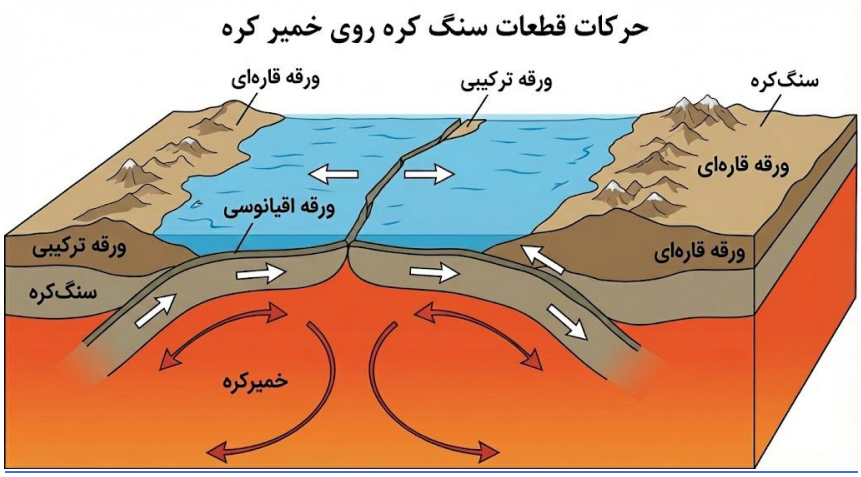
حرکات قطعات سنگ کره روی خمیر کره

مطابق یک نظریهٔ علمی، **سنگ‌کره یکپارچه نیست** بلکه از **چندین قطعهٔ جدا از هم** تشکیل شده است که به آن‌ها **ورقه‌ها** **(صفحه‌های) سنگ‌کره** می‌گویند.

برخی از این ورقه‌ها:

- فقط شامل **خشکی‌ها** هستند.
- برخی فقط شامل **اقیانوس‌ها** هستند.
- و برخی شامل **خشکی‌ها و اقیانوس‌ها** به طور همزمان می‌باشند

این ورقه‌ها **روی لایه‌ای به نام خمیرکره قرار دارند و روی آن حرکت می‌کنند.**



نقش خمیرکره در حرکت ورقه‌ها

ورقه‌های سنگ‌کره به صورت مستقیم روی گوشته حرکت نمی‌کنند، بلکه روی **خمیرکره** که **رفتار خمیری و نرمتری** دارد، جابه‌جا می‌شوند.

مکانیسم حرکت ورقه‌ها (جریان همرفتی)

مکانیسم حرکت ورقه‌های سنگ‌کره بر اساس **جریان همرفتی** در خمیرکره است.

وقتی یک **مایع، گاز یا مادهٔ خمیری** گرم می‌شود:

- چگالی آن کاهش می‌یابد

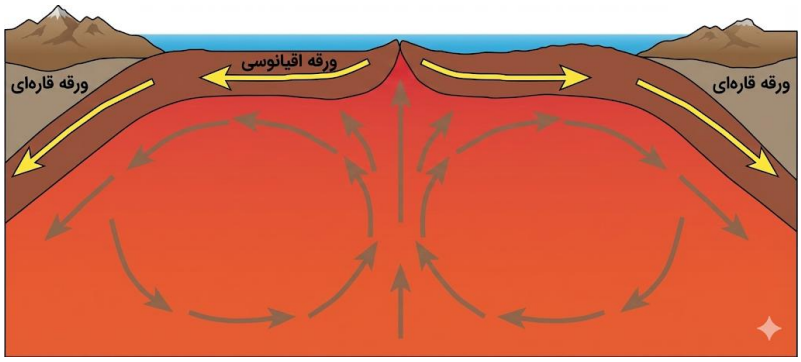
- سبک‌تر می‌شود.
- و به سمت بالا حرکت می‌کند

پس از سرد شدن:

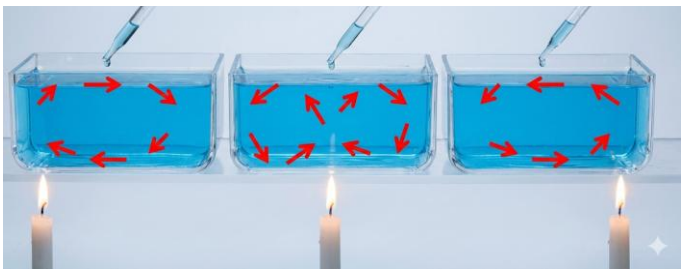
- چگالی آن افزایش می‌یابد.
- سنگین‌تر می‌شود
- و به سمت پایین فرو می‌رود

این **حرکت دورانی مواد خمیرکره**، سبب **حرکت تدریجی ورقه‌های سنگ‌کره** در سطح زمین می‌شود.

نکته: ورقه‌ها «با خود جریان بالا نمی‌آیند،بلکه **تحت تأثیر نیروی حاصل از جریان‌های همرفتی جابه‌جا می‌شوند**.



شکل حرکت همرفتی



۱. این تصویر چه پدیده‌ای را نشان می‌دهد؟
پاسخ: پدیده‌ی **جریان همرفتی** در مایعات را نشان می‌دهد، که در اثر گرم شدن در قسمت پایین و سرد شدن در قسمت بالا ایجاد می‌شود

۲. چرا در این تصویر مایع (آب) شروع به حرکت دورانی کرده است؟
پاسخ: زیرا گرما از شعله به کف ظرف منتقل شده، باعث کاهش چگالی آب پایین شده و آن را به سمت بالا رانده است. آب سردتر در بالا چگال‌تر شده و به پایین بازمی‌گردد و این **حرکت چرخشی** ایجاد می‌شود

۳. چرا جهت حرکت پیکان‌ها در تصویر از پایین به بالا و سپس بالا به پایین است؟

پاسخ: چون **آب گرم سبک‌تر** شده و به بالا می‌آید و **آب سردتر سنگین‌تر** شده و به پایین می‌رود، بنابراین یک **جریان دایره‌ای همرفتی** شکل می‌گیرد

---

۴. ارتباط این جریان‌ها با درون زمین چیست؟
پاسخ:درون زمین نیز جریان‌های **همرفتی در خمیرکره** (بخش خمیری گوشته) باعث حرکت **ورقه‌های سنگ‌کره** می‌شود، درست مانند حرکت مایع در این شکل

---

۵. اگر در این آزمایش از رنگ یا چای خشک استفاده شود، چه چیزی را بهتر می‌توان مشاهده کرد؟
پاسخ: با افزودن رنگ یا ذرات چای خشک، **مسیر حرکت آب و جریان همرفتی** به‌وضوح مشخص می‌شود و گردش آن قابل دیدن می‌گردد.

جابجایی ورقه‌های سنگ کره

۱ـ دو ورقه قاره‌ای دور شونده

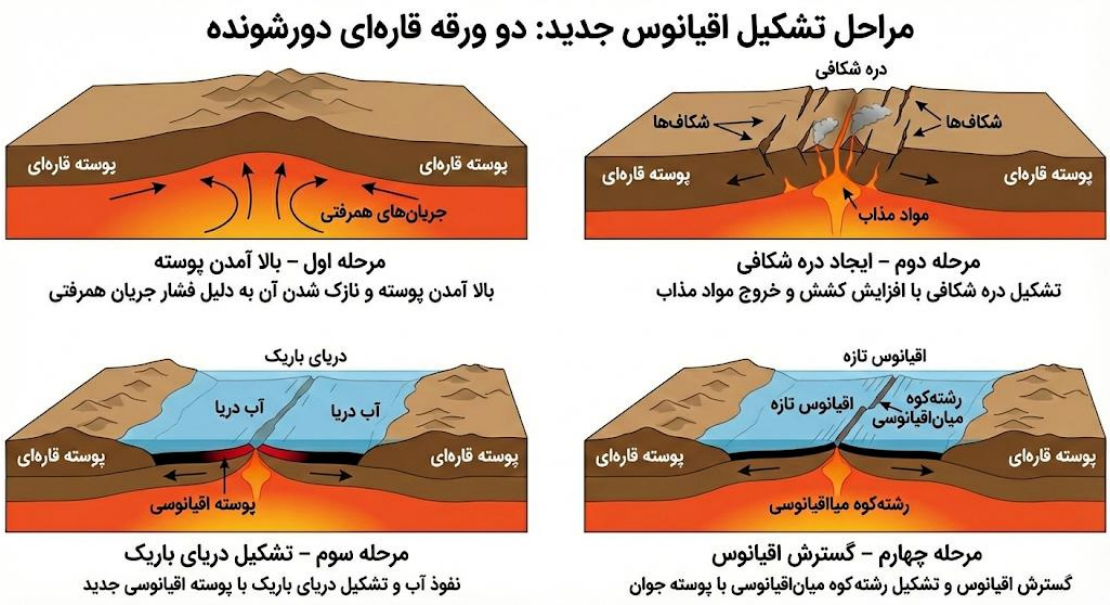
تصویر فرایند جدا شدن ورقه‌های قاره‌ای و تشکیل یک اقیانوس جدید را به صورت مرحله‌به‌مرحله نشان می‌دهد. این فرایند یکی از مهم‌ترین نمودهای حرکت ورقه‌های سنگ‌کره است.

مرحله اول – بالا آمدن پوسته: در این مرحله، جریان‌های همرفتی در گوشته (خمیرکره) به سمت بالا حرکت می‌کنند. این فشار از درون باعث بالاآمدن پوسته قاره‌ای می‌شود. در اثر این کشش، لایه‌های پوسته کشیده و نازک می‌شوند.

مرحله دوم – ایجاد دره شکافی: کشش ادامه پیدا می‌کند و شکاف‌هایی در سطح زمین به وجود می‌آید. یک دره شکافی عمیق شکل می‌گیرد. ممکن است در این مرحله مواد مذاب از درون زمین بالا بیاید.

مرحله سوم – تشکیل دریای باریک: با گسترش بیشتر شکاف، آب دریا به داخل دره شکافی نفوذ می‌کند. این منطقه اکنون به صورت یک دریای باریک و نوظهور درمی‌آید. پوسته جدید از سرد شدن مواد مذاب به‌تدریج تشکیل می‌شود.

مرحله چهارم – گسترش اقیانوس و تشکیل پوسته اقیانوسی:شکاف عریض‌تر شده و اکنون بین دو ورقه قاره‌ای، اقیانوس تازه‌ای ایجاد شده است. در وسط این اقیانوس یک رشته‌کوه میان‌اقیانوسی وجود دارد که محل خروج مواد مذاب است.
دو ورقه قاره‌ای از هم دورتر شده‌اند و در وسط آن‌ها پوسته اقیانوسی جوان دیده می‌شود.

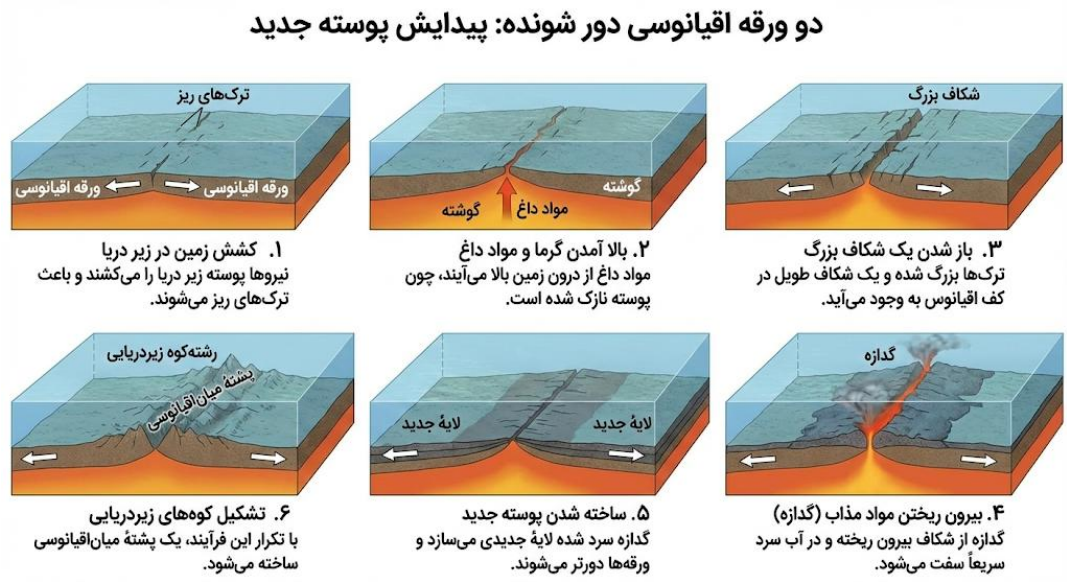


جمع‌بندی کلی:

این تصویر، مسیر ایجاد یک اقیانوس جدید را از قاره‌ی یکپارچه ← دره شکافی ← دریای باریک ← اقیانوس کامل نشان می‌دهد. این فرآیند امروزه در دریای سرخ در حال رخ دادن است و مشابه آن در گذشته باعث تشکیل اقیانوس اطلس شده است.

۲- دو ورقه اقیانوسی دور شونده:

تصویر مراحل جدا شدن دو ورقه اقیانوسی را نشان می‌دهد.



۱ .کشش آمدن زمین در زیر دریا: در بعضی جاهای زمین، پوستهٔ زیر دریا کمی کشیده می‌شود، یعنی نیروها آن را از دو طرف می‌کشند. این کشش کم‌کم باعث می‌شود پوسته ترک‌های ریزی بردارد.

۲ .بالا آمدن گرما و مواد داغ از درون زمین: در زیر پوسته، مواد داغی وجود دارند که همیشه در حال حرکت‌اند. وقتی پوسته کشیده و نازک می‌شود، این مواد داغ راحت‌تر به سمت بالا می‌آیند.

---

۳ .باز شدن یک شکاف بزرگ: کم‌کم ترک‌ها بزرگ‌تر می‌شوند و یک **شکاف طویل** در کف اقیانوس به وجود می‌آید. این شکاف مثل یک خط طولانی است که دو طرفش از هم فاصله می‌گیرند.

---

۴ .بیرون ریختن مواد مذاب (گدازه):مواد داغی که از پایین آمده‌اند، از این شکاف بیرون می‌ریزند. چون آب اقیانوس سرد است، گدازه خیلی سریع سفت می‌شود و سنگ تازه می‌سازد.

---

۵ .ساخته شدن پوستهٔ جدید: هر بار که گدازه از شکاف بیرون می‌ریزد و سرد می‌شود، یک «لایهٔ جدید» از کفِ دریا ساخته می‌شود. ورقه‌ها هم کمی از هم دورتر می‌شوند.

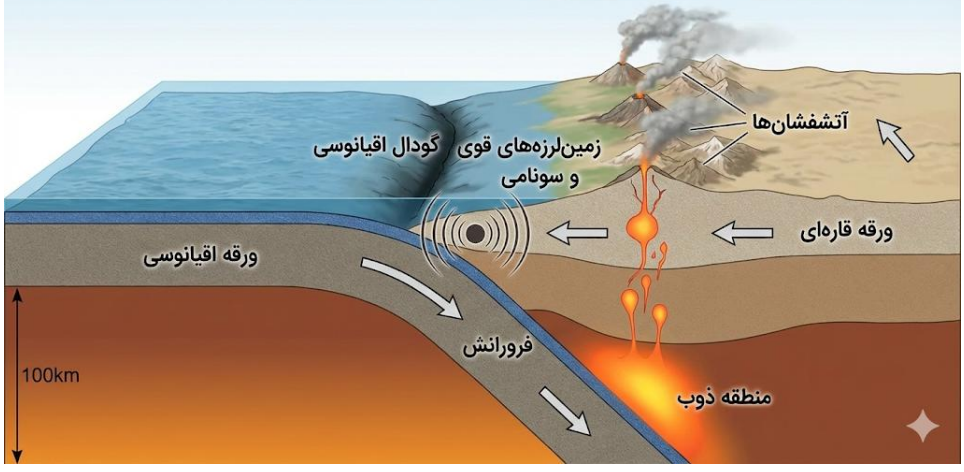
---

۶ .تشکیل کوه‌های زیردریایی: با تکرار این کار، وسط اقیانوس کم‌کم یک رشته‌کوه بلند اما زیر آب ساخته می‌شود که به آن **پشتهٔ میان‌اقیانوسی** می‌گوییم.

ب) ورقه‌های نزدیک شونده

۱ـ ورقه‌های قاره‌ای – اقیانوسی

برخورد ورقه اقیانوسی و ورقه قاره‌ای: فرورانش و پیامدهای آن



۱.ورقه اقیانوسی: به دلیل چگالی بیشتر، به سمت پایین خم شده و به زیر ورقه قاره‌ای فرو می‌رود (فرورانش).

۲.ورقه قاره‌ای: بالا باقی می‌ماند چون سبک‌تر است و نمی‌تواند به زیر اقیانوسی برود.

۳.گودال اقیانوسی: در محل تماس اولیه این دو ورقه، گودالی عمیق در بستر اقیانوس شکل می‌گیرد.

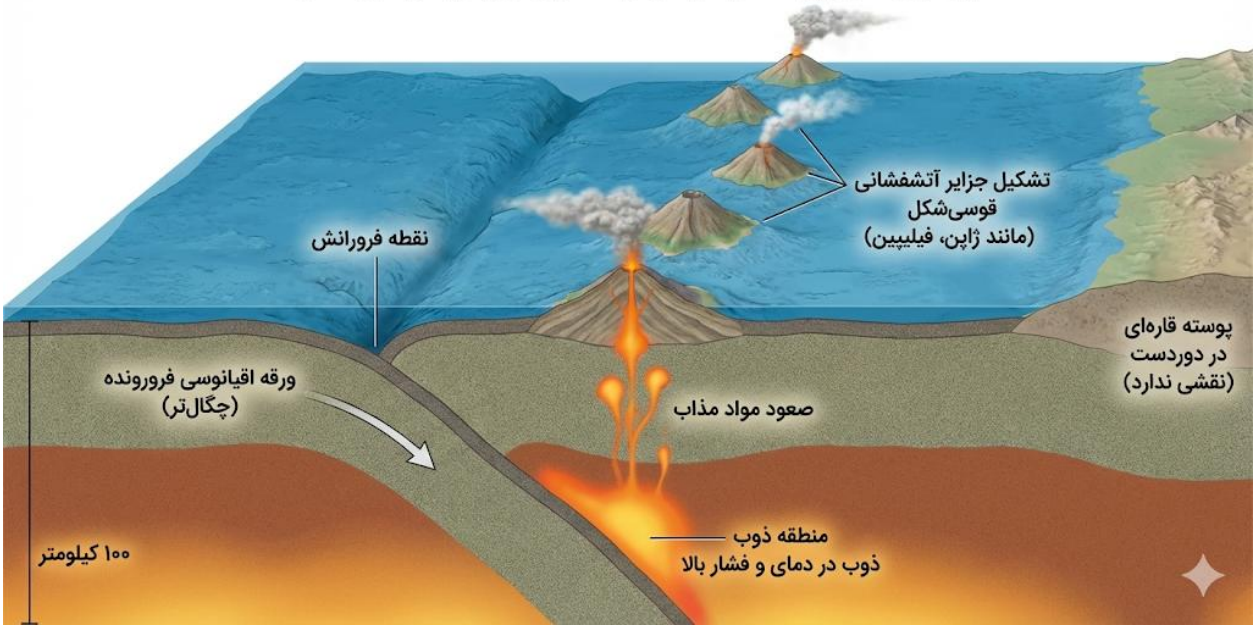
۴.منطقه ذوب: بخشی از ورقه اقیانوسی که به اعماق می‌رود، در عمق حدود ۱۰۰ کیلومتری ذوب شده و مواد مذاب ایجاد می‌شود.

۵.آتشفشان‌ها: مواد مذاب حاصل از ذوب شدن به بالا حرکت کرده و با عبور از شکاف‌های سنگ‌کره قاره‌ای، **آتشفشان‌ها** را در خشکی ایجاد می‌کند.

۶.زمین‌لرزه‌ها: برخورد شدید بین دو ورقه منجر به زلزله‌های بسیار قوی و گاه ایجاد **سونامی** می‌شود.

ورقه‌های اقیانوسی - اقیانوسی

برخورد دو ورقه اقیانوسی و تشکیل جزایر قوسی‌شکل



۱.دو ورقه اقیانوسی: هنگام برخورد، یکی از ورقه‌ها (معمولاً چگال‌تر یا سردتر) به زیر دیگری رانده می‌شود (فرورانش).

۲.نقطه فرورانش (ذوب): ورقه‌ای که به عمق حدود ۱۰۰ کیلومتری می‌رسد، در اثر دمای زیاد و فشار بالا شروع به ذوب شدن می‌کند.

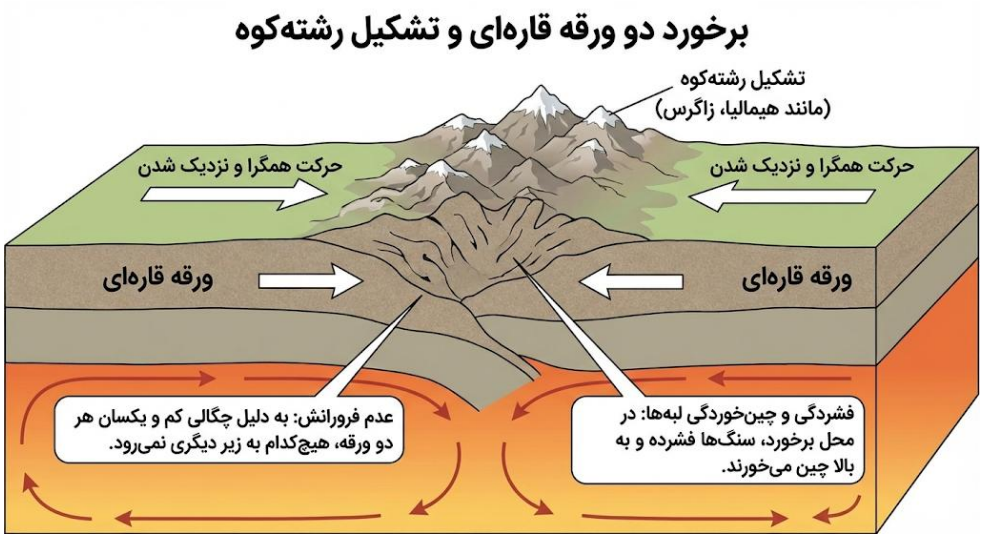
۳.صعود مواد مذاب: مواد مذاب حاصل از ذوب ورقه‌ی فرو رفته، به سمت بالا حرکت کرده و از شکاف‌های پوسته عبور می‌کند.

۴.تشکیل آتشفشان و جزایر: مواد مذاب در بستر دریا انباشته می‌شود و به‌تدریج به سطح آب می‌رسد. نتیجه‌ی آن، **تشکیل جزایر آتشفشانی قوسی‌شکل** مانند **ژاپن، فیلیپین یا هاوایی** است.

۵.پوسته قاره‌ای در دوردست: در این نوع برخورد، ورقه قاره‌ای نقشی ندارد و برخورد فقط بین دو ورقه اقیانوسی رخ می‌دهد.

ورقه‌های قاره‌ای- قاره‌ای

برخورد دو ورقه قاره‌ای و تشکیل رشته‌کوه



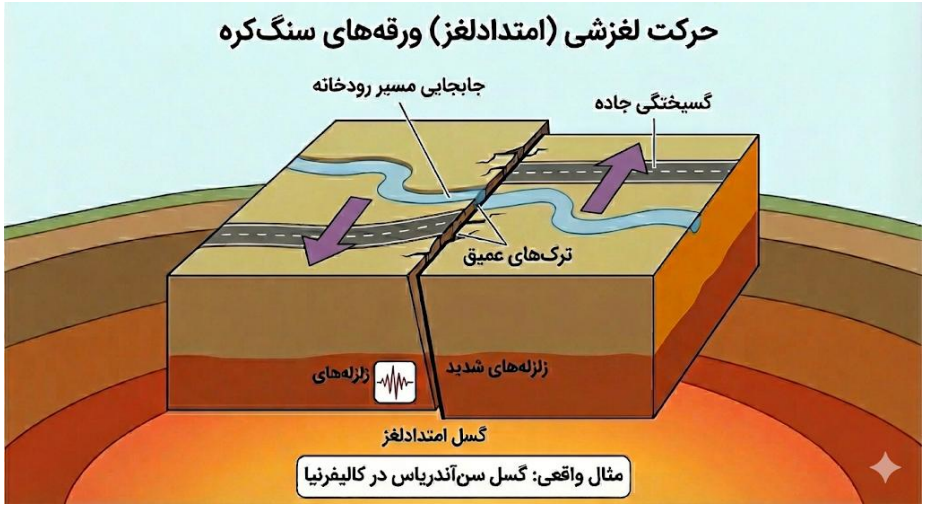
۱.حرکت دو ورقه قاره‌ای به سمت یکدیگر: فلش‌های سفید نشان می‌دهند که ورقه‌ها در حال **حرکت همگرا** و نزدیک شدن به یکدیگر هستند.

۲.عدم فرورانش: به دلیل پایین بودن چگالی هر دو ورقه، هیچ‌کدام به زیر دیگری نمی‌رود.

۳.فشردگی لبه‌های ورقه‌ها: در محل برخورد، سنگ‌ها به شدت فشرده می‌شوند و به سمت بالا **چین‌خورده و تا می‌شوند**.

۴.تشکیل رشته‌کوه: نتیجه‌ی این برخورد، **ایجاد رشته‌کوه‌های عظیم** است. نمونه‌های واقعی شامل **رشته‌کوه هیمالیا** و **زاگرس** هستند.

ورقه‌های لغزنده



۱.گسل امتدادلغز: گسلی است که دو تکه از پوسته زمین **در امتداد یکدیگر و به صورت افقی** می‌لغزند، نه به سمت بالا یا پایین.

۲.جهت حرکت: فلش‌های بنفش نشان می‌دهند که دو قطعه سنگی **در خلاف جهت هم و به‌صورت افقی** حرکت می‌کنند.

۳.تغییر شکل در سطح زمین: در اثر این نوع حرکت، ممکن است **پدیده‌هایی مانند جابجایی مسیر رودخانه، ترک‌های عمیق، گسیختگی جاده‌ها و زلزله‌های شدید** رخ دهد.

۴.مثال واقعی: گسل معروف **سن‌آندریاس** در ایالت کالیفرنیای آمریکا نمونه‌ای از گسل امتدادلغز است.

نکته: در تمام حرکت‌های شرح داده شده زلزله رخ می‌دهد.

پایان