



پترولوژی سنگ‌های آذرین (۱)

(رشته زمین‌شناسی)

دکتر وحید احدنژاد

بسم الله الرحمن الرحيم

پیشگفتار ناشر

کتاب‌های دانشگاه پیام نور حسب مورد و با توجه به شرایط مختلف یک درس در یک یا چند رشته دانشگاهی، به صورت کتاب درسی، متن آزمایشگاهی، فرادرسی، و کمک‌درسی چاپ می‌شوند.

کتاب درسی ثمره کوشش‌های علمی صاحب اثر است که براساس نیازهای درسی دانشجویان و سرفصل‌های مصوب تهیه و پس از داوری علمی، طراحی آموزشی، و ویرایش علمی در گروه‌های علمی و آموزشی، به چاپ می‌رسد. پس از چاپ ویرایش اول اثر، با نظرخواهی‌ها و داوری علمی مجدد و با دریافت نظرهای اصلاحی و متناسب با پیشرفت علوم و فناوری، صاحب اثر در کتاب تجدیدنظر می‌کند و ویرایش جدید کتاب با اعمال ویرایش زبانی و صوری جدید چاپ می‌شود.

متن آزمایشگاهی (م) راهنمایی است که دانشجویان با استفاده از آن و کمک استاد، کارهای عملی و آزمایشگاهی را انجام می‌دهند.

کتاب‌های فرادرسی (ف) و کمک‌درسی (ک) به منظور غنی‌تر کردن منابع درسی دانشگاهی تهیه و بر روی لوح فشرده تکثیر می‌شوند و یا در وبگاه دانشگاه قرار می‌گیرند.

مدیریت تولید محتوا و تجهیزات آموزشی

فهرست مطالب

نه	پیشگفتار
۱	فصل ۱. ماگما و سنگ آذرین
۲	۱-۱ تعریف
۳	۲-۱ فراوانی سنگ‌های آذرین در پوسته و گوشته
۳	۳-۱ اهمیت سنگ‌های آذرین
۴	۴-۱ ترکیب پوسته، گوشته و هسته
۶	۵-۱ تشکیل هسته، گوشته و پوسته
۷	۶-۱ تعریف ماگما
۸	۷-۱ خواص فیزیکی ماگما
۱۶	۸-۱ ترکیب شیمیایی ماگماها
۱۸	۹-۱ تشکیل ماگماها
۲۳	۱۰-۱ ساختار سیالات سیلیکاته
۲۴	۱۱-۱ مواد فرّار ماگماها
۲۶	۱۲-۱ جابه‌جایی ماگماها
۳۱	خودآزمایی فصل ۱
۳۳	فصل ۲. طبقه‌بندی سنگ‌های آذرین
۳۴	۱-۲ مقدمه
۳۸	۲-۲ انواع روش‌های طبقه‌بندی سنگ‌ها
۴۱	۳-۲ سنگ‌های پیروکلاستیک (آذرآواری) و تفرا
۴۵	۴-۲ کربناتیت‌ها
۴۶	۵-۲ سنگ‌های ملیت دار
۴۸	۶-۲ سنگ‌های کالسیلیت دار
۵۰	۷-۲ کیمبرلیت‌ها
۵۳	۸-۲ لامپروئیت‌ها

۵۶	۹-۲ سنگ‌های لوسیت‌دار
۵۷	۱۰-۲ لامپروفیرها
۵۹	۱۱-۲ سنگ‌های شارنوکییتی
۶۰	۱۲-۲ سنگ‌های آذرین درونی (پلوتونیک)
۷۳	۱۳-۲ سنگ‌های آتش‌فشانی
۸۸	خودآزمایی فصل ۲

۸۹	فصل ۳. فازدیاگرام‌ها
۹۰	۱-۳ مقدمه
۹۲	۲-۳ مفاهیم کلی
۹۵	۳-۳ قانون فاز
۹۷	۴-۳ قانون اهرم
۹۹	۵-۳ ذوب در سیستم‌های دوسازنده
۱۱۹	۶-۳ فازدیاگرام سیستم‌های سه‌سازنده
۱۲۴	۷-۳ کاربرد فازدیاگرام‌ها در پترولوژی
۱۲۵	خودآزمایی فصل ۳

۱۲۹	فصل ۴. مکانیسم‌های تحول ماگمایی
۱۳۰	۱-۴ مقدمه
۱۳۰	۲-۴ تفریق
۱۴۵	۳-۴ اختلاط
۱۵۳	۴-۴ آلیش
۱۵۹	۵-۴ عناصر کمیاب در تحول ماگمایی
۱۶۷	۶-۴ کاربردهای عناصر کمیاب در پتروژنز سنگ‌های آذرین
۱۷۱	خودآزمایی فصل ۴

۱۷۳	فصل ۵. تبلور کانی‌ها و بافت‌های سنگ‌های آذرین
۱۷۳	۱-۵ مقدمه
۱۷۶	۲-۵ بافت
۱۷۹	۳-۵ میزان تبلور کانی‌ها
۱۸۱	۴-۵ اندازه دانه‌ها
۱۸۵	۵-۵ شکل بلورها
۱۹۱	۶-۵ ارتباط متقابل اجزا سنگ با یکدیگر (بافت)
۲۱۹	خودآزمایی فصل ۵

۲۲۱	فصل ۶. گازهای ماگمایی و عناصر فرار
۲۲۲	۱-۶ مقدمه
۲۲۳	۲-۶ مایعات فرار در مذاب‌ها

۲۲۹	۳-۶ آب
۲۳۲	۴-۶ سایر مواد فرّار
۲۳۵	۵-۶ برون‌رفت یا جدایش مواد فرّار از یک مذاب
۲۳۷	۶-۶ فوم‌رول‌ها، محلول‌های هیدروترمال، منابع معدنی و ذخایر زمین‌گرمایی
۲۴۰	۷-۶ منشأ مواد فرّار گوشته‌ای
۲۴۱	خودآزمایی فصل ۶
۲۴۳	فصل ۷. آلاینش و اختلاط ماگمایی
۲۴۴	۱-۷ مقدمه
۲۴۴	۲-۷ هضم
۲۴۶	۳-۷ روش‌های تشخیص هضم و آلاینش
۲۵۶	۴-۷ محاسبه اختلاط
۲۶۰	خودآزمایی فصل ۷
۲۶۱	منابع

پیشگفتار

پترولوژی متشکل از لغت یونانی پترا به معنی سنگ و لوگوس به معنی شناختن است که به مطالعه سنگ‌ها و شرایط تشکیل آن‌ها می‌پردازد. این شاخه از علم زمین‌شناسی شامل سه بخش پترولوژی سنگ‌های آذرین، دگرگونی و رسوبی است. در پترولوژی سنگ‌های آذرین ترکیب کلی سنگ حائز اهمیت است به این دلیل که می‌تواند محیط تکتونیکی تشکیل سنگ‌های یاد شده را تعیین کند.

این کتاب در هفت فصل تألیف شده است که در ابتدا به بررسی مفاهیم پایه‌ای مرتبط با ماگما و خواص آن می‌پردازد. پس از فراگیری این مفاهیم، طبقه‌بندی سنگ‌های آذرین بر اساس آخرین تغییرات مورد نظر IUGS ارائه می‌شود. یکی از مشکلات اساسی دانشجویان زمین‌شناسی در زمینه مطالعات سنگ‌شناسی عدم آشنایی با فازدیاگرام‌هاست که معمولاً در کتاب‌های موجود در این زمینه مباحث مبسوطی ارائه نشده است. فازدیاگرام‌ها به صورت گرافیکی نتایج مطالعات تجربی فرایندهای پیچیده طبیعی در شرایط دما و فشار معین برای یک سیستم مشخص ارائه می‌کند و فازهایی را در این شرایط پایدار هستند را تعیین می‌کند. در این کتاب سعی شده است به تفصیل انواع فازدیاگرام‌ها مورد بررسی قرار گیرد. تحولات ماگمایی و مکانیسم‌های این

فرایندها، تبلور و بافت‌های میکروسکوپی نیز در این کتاب مورد بحث قرار گرفته است. نقش گازها و سیالات ماگمایی در سنگ‌های آذرین و بالاخره آلیش و اختلاط ماگمایی مباحث ارائه شده در این کتاب می‌باشند.

لازم می‌دانم از زحمات ارزیاب محترم که زحمت تطبیق مطالب کتاب با سرفصل‌های وزارت علوم و ضوابط دانشگاه پیام نور را متقبل شده‌اند سپاسگزاری کنم. از سرکار خانم دکتر فریمه آیتی (دانشگاه پیام نور مرکز شهرکرد) که ویراستاری علمی کتاب را برعهده داشته‌اند و همچنین داور محترم سرکار خانم دکتر فاطمه سرجوقیان (دانشگاه کردستان) که موجب ارتقای سطح علمی کتاب شدند سپاسگزاری می‌نمایم. از سرکار خانم قطبی که در بخش تدوین کتاب زحمات زیادی متقبل شده‌اند نیز تشکر می‌کنم. در پایان این کتاب را به پاس صبر و بردباری به همسر و دخترانم آیدا و آیلین تقدیم می‌کنم.

وحید احدنژاد

عضو هیئت علمی گروه زمین‌شناسی

دانشگاه پیام نور - تابستان ۱۳۹۳

فصل اول

ماگما و سنگ آذرین

هدف کلی

شناخت تمام فرایندهای سنگ‌شناسی آذرین وابسته به شناخت ویژگی‌های ماگماهای تشکیل‌دهنده آن سنگ‌هاست. از آنجاکه محل تشکیل ماگماها عمدتاً در اعماق پوسته زیرین و گوشته است از این‌رو در این فصل به بررسی ساختمان زمین پرداخته خواهد شد تا با شناخت لایه‌های مختلف آن، چگونگی تشکیل انواع ماگماها در قسمت‌های گوناگون زمین مشخص شود. در ادامه خواص فیزیکی و شیمیایی پایه ماگماها بررسی شده و عوامل جابه‌جایی آن‌ها مشخص خواهند شد.

هدف‌های یادگیری

با توجه به هدف کلی یاد شده شما قادر خواهید بود که با مطالعه این فصل از کتاب موارد زیر را فراگیرید:

۱. بخش‌های مختلف ساختاری زمین را توضیح دهید.
۲. با شناخت تعریف کلی ماگما، با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن را نیز آشنا خواهید شد.
۳. چگونگی تشکیل ماگماها را می‌توانید توضیح دهید.
۴. ساختار سیالات سیلیکاته به‌عنوان پیکره اصلی ماگما برای شما معین خواهد شد.
۵. به‌طور کلی مواد فرار درون ماگماها را خواهید شناخت.

۶. جابه‌جایی ماگماها پس از تشکیل نیز موضوع مهمی است که آن را یاد خواهید گرفت.

۱-۱ تعاریف

پترولوژی^۱: به مطالعه سنگ‌ها گفته می‌شود. سنگ‌شناسی آذرین^۲ شاخه‌ای از پترولوژی است که به مطالعه سنگ‌هایی که قبلاً مذاب (ماگما یا گدازه) بوده‌اند می‌پردازد. آتشفشان‌شناسی^۳ زیرشاخه‌ای از سنگ‌شناسی آذرین است که به مطالعه تمام جنبه‌های آتشفشان‌ها و محصولات آن‌ها می‌پردازد. سنگ‌شناسی دگرگونی^۴ مطالعه کل سنگ‌هایی است که از طریق تبلور دوباره در فاز جامد و در شرایط دما و فشار فراتر از دیاژنز تشکیل می‌شوند. به‌طور کلی، تمام شاخه‌های پترولوژی (آذرین، رسوبی یا دگرگونی) دارای دو بخش اساسی است:

الف) پترولوژی: که بخش توصیفی است و عمدتاً به توصیف سنگ‌ها در زیر

میکروسکوپ می‌پردازد.

ب) پتروژنز^۵: بخشی از پترولوژی است که به بررسی منشأ سنگ‌ها می‌پردازد. بنابراین مطالعه سنگ‌های آذرین، که برای فهم تاریخچه تکتونیکی یک منطقه بسیار مهم است، شامل مراحل زیر است:

۱. مطالعات صحرایی که ارتباطات بین انواع سنگ‌ها (عمدتاً با کمک نقشه زمین‌شناسی) را بررسی می‌کند و انواع شاخص نمونه‌ها را می‌توان برای مطالعات آزمایشگاهی انتخاب کرد.

۲. توصیف پتروگرافی نمونه‌های مهم که در آن مجموعه‌های کانی‌شناسی و بافت‌های مهم مشخص شده و توالی تبلور کانی‌ها مشخص می‌شود.

۳. تعیین شیمیایی انواع کانی‌ها به‌ویژه آن‌هایی که دارای واکنش‌های معینی هستند.

۴. تعیین ترکیب شیمیایی نمونه‌های شاخص برداشت‌شده در مطالعات صحرایی.

۵. تعیین ارتباطات کلی ترکیبات شیمیایی نمونه‌های شاخص.

1. Petrology
2. Igneous Petrology
3. Volcanology
4. Metamorphic Petrology
5. Petrogenesis

۶. تعیین ارتباطات کلی شیمیایی بین نمونه‌های مختلف در منطقه مورد مطالعه و ماگمای مادر (در صورت امکان) به منظور تشخیص منشأ انواع سنگ‌های مورد مطالعه. لازم به ذکر است که این بخش از مطالعات پترولوژی به شدت به مطالعات پترولوژی تجربی^۱ و معادلات و مدل سازی نظری وابسته است.
۷. تعیین سن تبلور انواع کانی‌ها از طریق روش‌های مناسب رادیومتری.
۸. تفسیر تکتونیکی منطقه مورد مطالعه.

۱-۲ فراوانی سنگ‌های آذرین در پوسته و گوشته

گرچه سنگ‌های آذرین و دگرگونی فقط ۲۵ درصد کل سنگ‌های رخنمون یافته در قاره‌ها را تشکیل می‌دهند ولی در واقع ۹۵ درصد کل پوسته را تشکیل می‌دهند به این دلیل که پوسته اقیانوسی تماماً از سنگ‌های آذرین که فقط یک پوشش رسوبی نازک آن‌ها را دربرگرفته، تشکیل شده است. از سویی دیگر، گوشته نیز عمدتاً از سنگ‌های دگرگونی (گارنت یا اسپینل پریدوتیت‌ها + اکلوژیت‌ها) تشکیل شده است. با این وجود، سنگ‌های گوشته‌ای دچار ذوب بخشی شده و بر اساس عمقی که ذوب رخ می‌دهد، ماگماهای مختلف را تشکیل می‌دهد. تمام مذاب‌ها الزاماً به سطح زمین و یا حتی پوسته راه پیدا نمی‌کنند. تبلور برخی ماگماها در گوشته به پایان رسیده و پریدوتیت‌ها را تشکیل می‌دهند لذا این سنگ‌ها نیز به عنوان سنگ آذرین در نظر گرفته می‌شوند. این مسئله نشان‌دهنده اهمیت گوشته در ایجاد سنگ‌های آذرین و طبیعت دوگانه پریدوتیت‌ها (هم به عنوان بقایای جامد یک مذاب و هم به عنوان سنگی که از یک مذاب متبلور می‌شود) است.

۱-۳ اهمیت سنگ‌های آذرین

۱. فهم منشأ زمین
۲. فهم منشأ و سیر تحولی گوشته و پوسته
۳. فهم پدیده‌های مهم همانند آتش فشان، فعالیت‌های هیدروترمال و ... که هر روزه زندگی و محیط زیست ما را تحت تأثیر قرار می‌دهند.
۴. فهم فرایندهای ماگمایی و ارتباطات بین تشکیل و تمرکز کانه‌های معدنی.

۴-۱ ترکیب پوسته، گوشته و هسته

۱-۴-۱ منابع اطلاعات

همان‌گونه که می‌دانید کل زمین به‌صورت لایه‌لایه است و به‌طورکلی می‌تواند به پوسته، گوشته، هسته خارجی و هسته داخلی تقسیم شود. این ساختار لایه‌ای عمدتاً از طریق بررسی امواج لرزه‌ای و نتایج حاصل از عکس‌العمل لایه‌های مورد بحث در مقابل این امواج مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. اطلاعات بیشتر در زمینه ترکیب این لایه‌ها حاصل نمونه‌برداری از پوسته بالایی (حاصل از حفاری عمق دریا یا برون‌زدها)، بررسی‌های لرزه‌ای یا چگالی (برای بخش‌های عمیق‌تر پوسته)، آتش‌فشان‌ها، بیگانه‌سنگ‌های^۱ گوشته‌ای، متئوریت‌ها و مطالعات تجربی است.

۲-۴-۱ ساختار لایه‌ای پوسته اقیانوسی

پوسته اقیانوسی شامل سه لایه است: لایه ۱ که لایه‌ای نازک (کمتر از نیم کیلومتر) از رسوبات است که در زیر آن گدازه‌های بالشی (لایه ۲a) و دایک‌های ورقه‌ای^۲ که لایه ۲b است، قرار دارد. لایه ۳ شامل سنگ‌های گابروئی است. حجم قابل توجهی از این اطلاعات از مطالعه افیولیت‌ها^۳ که قطعات بزرگی از لیتوسفر اقیانوسی قرار گرفته در حواشی قاره‌ها هستند، کسب شده است.

۳-۴-۱ ساختار لایه‌ای پوسته قاره‌ای

پوسته قاره‌ای نیز ناهمگن است اما می‌توان آن را به‌طورکلی به دو بخش پوسته بالایی که شامل سنگ‌های رسوبی، دگرگونی و آذرین فلسیک و حد واسط با چگالی کلی $2/7 \text{ g/cm}^3$ است و پوسته پایینی شامل سنگ‌های آذرین و دگرگونی با چگالی کلی $2/9 \text{ g/cm}^3$ تقسیم نمود.

۴-۴-۱ ساختار لایه‌ای گوشته

گوشته شامل ۵ لایه مختلف است:

1. Xenoliths
2. Sheeted dykes
3. Ophiolites

a. بالاترین بخش یا بخش لیتوسفری گوشته است که تا عمق ۷۰ کیلومتری زمین قرار دارد. این بخش پی صفحات تکتونیکی را تشکیل می‌دهد و از نظر ترکیبی ناهمگن بوده و به‌صورت مداوم مواد را با لایه‌های زیرین عمیق‌تر گوشته و پوسته بالایی تبادل می‌کند. این لایه عمدتاً از سنگ‌های اولترامافیک حاوی کانی‌های اورتوپیروکسن و کلینوپیروکسن به‌علاوه یکی از کانی‌های پلاژیوکلاز، اسپینل یا گارنت است. مقادیر جزئی از آمفیبول و بیوتیت غنی از منیزیم (فلوگوپیت) نیز ممکن است در این سنگ‌ها وجود داشته باشد.

b. منطقه با سرعت کم^۱ (تقریباً معادل استنوسفر): زیر گوشته لیتوسفری منطقه با سرعت کم قرار گرفته است که از عمق ۷۰-۱۰۰ الی تا ۲۵۰-۲۰۰ کیلومتری قرار دارد. شاخصه این لایه داشتن کمی مذاب (۱-۱۰ درصد) حاصل ذوب بخشی است. حضور این مذاب موجب کاهش سرعت امواج لرزه‌ای به‌ویژه امواج ثانویه می‌شود.

c. منطقه گوشته بالایی: در عمق ۲۵۰ تا ۴۰۰ کیلومتری قرار داشته و شاخصه آن افزایش سرعت امواج لرزه‌ای در آن است.

d. منطقه انتقالی^۲: مرز بالایی این منطقه (عمق حدود ۴۰۰ کیلومتری) از طریق یک افزایش ناگهانی سرعت امواج لرزه‌ای مشخص می‌شود که حاصل افزایش فشار ناشی از شکست ساختار اولیوین به ساختار اسپینل است. کف این منطقه که در عمق ۶۷۰ کیلومتری قرار دارد و شاخصه آن تغییر ساختار اسپینل به نوع پرووسکیت^۳ چگال‌تر است که در آن سیلیسیم در شبکه اکتائوری قرار می‌گیرد.

e. گوشته زیرین که از کف منطقه انتقالی شروع شده و تا هسته بالایی ادامه دارد. اعتقاد بر این است که این بخش همگن بوده و حاوی مخلوطی از سیلیکات‌های آهن-منیزیم و اکسیدهاست.

باید یادآور شد که لایه‌های a تا d معمولاً به گوشته بالایی تعبیر می‌شوند و ماگماها عمدتاً از این بخش‌ها منشأ می‌گیرند. همچنین بر اساس خواص رئولوژیکی^۴ یا رفتارشناسی می‌توان گفت که گوشته به بخش‌های لیتوسفری، استنوسفری (که برخی معتقدند تا ناپیوستگی عمق ۶۷۰ ادامه دارد) و مزوسفری (گوشته زیرین) تقسیم

1. Low Velocity Zone
2. Transition Zone
3. Perovskite
4. Rheology

می‌شود. البته این طبقه‌بندی متنوع می‌تواند موجب گمراهی نیز شود. لایه‌های گوشته بالایی که جریان همرفتی را متحمل می‌شوند باید به‌دقت مورد بررسی قرار گیرند. بسیاری از محققین معتقدند که بر اساس ترکیب بیگانه سنگ‌های گوشته‌ای این لایه‌ها عمدتاً شامل پریدوتیت + مقادیر کمتر از اکلوژیت است. هرچند این بیگانه‌سنگ‌ها ممکن است مبین بقایای ذوب بخشی در گوشته بالایی باشند. لذا رینگوود و گرین (۱۹۶۶) پیشنهاد دادند که لایه‌های گوشته بالایی شامل سه بخش پریدوتیت و یک بخش بازالت است و نام پیرولیت^۱ را به آن نهادند.

۱-۴-۵ هسته

هسته شامل یک لایه خارجی مذاب و یک لایه داخلی جامد است. هردوی آن‌ها چگال‌تر از سایر لایه‌هاست (حدود 11 g/cm^3) درحالی‌که چگالی کل زمین 5.5 g/cm^3 است. این مسئله باعث شد که دانشمندان به این نتیجه برسند که هسته حاوی آهن + نیکل $\pm$ ده درصد وزنی یا بیشتر از یک عنصر سبک‌تر دیگر (به احتمال خیلی زیاد سولفور) است. فراوانی سولفاید در کندریت‌های CI (یک نوع کندریت) این نظریه را تقویت می‌کند.

۱-۵ تشکیل هسته، گوشته و پوسته

زمین که یکی از کرات منظومه شمسی می‌باشد از طریق تجمع و به هم پیوستن سیارک‌های و اجرام آسمانی در حرارتی حدود ۶۰۰۰ درجه سانتی‌گراد تشکیل شده است. حرارت بالا باعث می‌شود که مواد تشکیل‌دهنده اولیه زمین در مراحل اولیه تحول آن مذاب باشد. عناصر چگال مانند آهن و نیکل شروع به فرونشینی کرده و به سمت اعماق درونی زمین سقوط می‌کنند و هسته را به وجود می‌آورند. این هسته توسط گوشته‌ای که شامل موادی با چگالی کمتر است و غنی از آهن، منیزیم و سیلیسیم می‌باشد، احاطه شده است. سیلیکات‌های آهن و منیزیم گوشته که در ابتدا متبلور شده‌اند مذابی را از خود برجای می‌گذارند که از عناصر سبک و یا عناصری با اندازه بزرگ غنی است.

چگالی پایین تر این مذاب سیلیکاته باعث می شود که به سطوح کم عمق تر مهاجرت کند و نهایتاً در آنجا متبلور شده و پوسته (که دارای غلظت بالاتری از عناصر سبک تر است) را ایجاد کند. حرارت حاصل از واپاشی رادیواکتیوی برخی از مواد گوشته ای و یا پوسته زیرین را مجدداً ذوب نموده و باعث می شود که مذاب های حاصل به سمت سطح زمین صعود کرده و فوران های آتش فشانی حاصل پوسته اقیانوسی را به وجود می آورد. بنابراین، در خلال مراحل ابتدایی تحول، و احتمالاً تا پایان دوران پرکامبرین، زمین مشخصاً دارای حرارت بالاتر و شیب های زمین گرمایی بیشتر بوده است. این نظریه از طریق پیدایش محدود برخی از سنگ ها در سرزمین های پرکامبرین قابل اثبات است. فرایند تحول زمین و تبدیل آن به لایه های مختلف تحت عنوان تفریق یا تفریق ماگمایی شناخته شده است.

۱-۶ تعریف ماگما

کلمه ماگما از نظر ریشه شناسی از دو کلمه یونانی عصاره روغن (*mássein*) و پسوند ما (*ma*) به معنی نتیجه یا محصول سرچشمه گرفته است. از نظر زمین شناسی ماگما به مجموعه ای از سنگ مذاب، بلورها و مواد فرار (گازها) گفته می شود. به عبارت دقیق تر ماگما مخلوطی از یک مذاب (عمدتاً سیلیکاته) $\pm$ بلورها $\pm$ مواد فرار است که در اعماق زمین قرار داشته و دارای این قابلیت هستند که به سطوح کمتر زمین مهاجرت کنند. از ویژگی های مهم آن می توان به بازه ترکیبی بسیار گسترده، دمای بسیار بالا و مذاب بودن اشاره کرد.

در اینجا سؤالی پیش می آید که تفاوت ماگما و گدازه^۱ چیست؟ پاسخ این است که ماگما ماده ای داغ در زیرپوسته زمین بوده و معمولاً در حجره ماگمایی زیر آتش فشان تجمع می یابد و لذا می تواند به درون درز و شکاف های سنگ ها نفوذ کرده و یا از طریق فوران های آتش فشانی به سطح زمین برسد. دمای ماگما معمولاً بین ۷۰۰ تا ۱۳۰۰ درجه سانتی گراد است. وقتی به سطح زمین می رسد و از طریق آتش فشان فوران می یابد تبدیل به گدازه می شود. این گدازه می تواند در سطح زمین جریان یابد. لذا یک گدازه در واقع ماگمایی است که در اثر رسیدن به سطح زمین و برداشته شدن فشار از

1. Lava

روی آن گازهای خود را از دست داده است. بنابراین، تفاوت اصلی ماگما و گدازه در محل قرارگیری آنهاست. ماگما در حجرات ماگمایی عمیق زیر آتش‌فشان‌ها قرار دارد ولی گدازه ماده‌ای است که از آتش‌فشان خارج شده و به سطح زمین می‌رسد. ماگماها دارای چگالی کمتر از سنگ‌های اطراف خود می‌باشد و لذا به سمت بالا جابه‌جا می‌شود. اگر ماگما به سطح زمین برسد، فوران کرده و تبلور می‌یابد و در نتیجه یک سنگ آذرین ولکانیک (آتش‌فشانی) یا بیرونی را به وجود می‌آورد. از سوی دیگر، اگر این ماگما قبل از اینکه به سطح زمین برسد متبلور و منجمد شود در آن‌صورت در اعماق زمین سنگ آذرین پلوتونیک یا درونی را ایجاد خواهد کرد. به دلیل اینکه نرخ یا سرعت سردشدن ماگما متفاوت است لذا بلورهای متبلور یافته و ارتباطات بین آن‌ها دارای ویژگی‌های متفاوتی هستند.

۷-۱ خواص فیزیکی ماگما

۷-۱-۱ دمای ماگما

نظرات بسیار زیادی در مورد دماهای ماگمایی وجود دارد و حتی در مورد اینکه ماگماهای بازالتی دارای دمای بیشتری هستند یا ماگماهای ریولیتی نیز اختلاف‌نظر وجود دارد.

بسیاری از زمین‌شناسان اقتصادی و برخی از پترولوژیست‌ها هنوز معتقدند که ماگماهای ریولیتی دارای دماهای بالاتری نسبت به ماگماهای بازالتی هستند. تنها دلیل آن‌ها در این مورد این واقعیت است که سنگ‌های بازالتی در اثر حرارت‌دادن در دمای پایین‌تری نسبت به سنگ‌های ریولیتی ذوب می‌شوند. با این‌حال، مطالعه دقیق این مسئله که عمده‌تأ مطالعات پتروگرافی بوده است به‌طور قاطع نشان داده که عکس این مسئله صحیح است و اختلاف ظاهری، حاصل حضور آب و سایر کانی‌سازها در ماگمای ریولیتی و نبود آن‌ها در سنگ ریولیتی است که در یک بوتله آزمایشگاهی آب شده است. به‌عنوان مثال افسیدین با آب قابل ملاحظه‌ای که دارد، قبل از اینکه به حرارت‌های خیلی بالا برسد در ظرف شیشه‌ای مخصوص تبدیل به مذاب می‌شود اما با ادامه حرارت آب خود را از دست می‌دهد و لذا اگر بخواهد مایع ایجاد کند باید به حرارت‌های بسیار بالا برسد.

با دقت به تبلور یک ماگما در سردشدگی آرام که دارای ترکیبی حد واسط بین ریولیت و بازالت است ملاحظه می‌شود که سنگ حاصل یک بازالت پورفیری و یا یک گابروی پورفیری است که کم‌وبیش دارای کوارتز و اورتوکلاز است. مطالعه مقاطع نازک این سنگ‌ها نشان داده است که با کمی استثناء، بلورهای اولیه پلاژیوکلازهای کلسیک و کانی‌های تیره را تشکیل می‌دهند و با پیشرفت تبلور فلدسپارها سدیک‌تر می‌شوند. مایع باقیمانده از فلدسپار کلسیک و کانی‌های تیره فقیر و فقیرتر شده و از کوارتز و اورتوکلاز و فلدسپار سدیک غنی‌تر می‌شود. از این‌رو، این مایع از نظر ترکیبی به گرانودیوریت نزدیک شده و در برخی مراحل دقیقاً دارای ترکیب سنگ یاد شده می‌شود. با ادامه سردشدگی و تبلور، پلاژیوکلاز با ترکیب متوسط و برخی کانی‌های تیره متبلور می‌شوند و در نهایت مایعی با ترکیب یک گرانیث پگماتیته از خود بر جای می‌گذارند. لذا بدون تردید ماگمای اولیه با ترکیب بازالتی برای اینکه مایع باقی بماند نیازمند دمای بالاتر از ماده‌ای گرانودیوریتی و گرانیته است. مطالعه کل سری سنگ‌های بین ریولیت و بازالت ما را به این نتیجه رسانده است که ریولیت و گرانیث در بین سری یاد شده در پایین‌ترین دما متبلور شده و کوارتزلاتیت یا گرانودیوریت، آندزیت یا دیوریت و بازالت یا گابرو به ترتیب در دماهای بالاتری متبلور می‌شوند. با مطالعه سیستم‌های مشابه سنگ‌های آذرین نتایج مشابهی حاصل شده است.

ثوری تفریق ماگمایی از طریق تبلور که مورد حمایت باون (۱۹۱۵) نیز بوده است مستلزم این است که بازالت اولیه، ماگمایی با دمای بالا باشد و با سردشدگی بیشتر، تبلور پیشرفت نموده و با جدایش مایع و بلورها، بخش مایع به‌طور فزاینده سرد می‌شود. از این‌رو دماهای ماگماها به‌صورت فزاینده‌ای از بازالت به سمت ریولیت کاهش می‌یابد. باون (۱۹۱۵) معتقد است که ماگماهای سنگ‌های آکالن باید دماهای پایین‌تری داشته باشند.

شواهد حاصل از دگرگونی حرارتی قطعه سنگ‌ها یا سنگ دیواره بیانگر این است که گابروها دارای دماهای بیشتر از گرانیث‌ها می‌باشند (شوارتز، ۱۹۲۴). از سوی دیگر، لاکروا (۱۸۹۳) بر اساس مطالعات خود بر روی ادخال‌ها معتقد است که سنگ‌های تراکیتی که سنگ آکالن می‌باشد دارای دماهای بالاتر از سنگ‌های بازالتی هستند.

برخی اندازه‌گیری‌های مستقیم دماهای ماگماهای بازالتی، عمدتاً در دریاچه‌های گدازه‌ای آتش‌فشان‌های فعال صورت گرفته است ولی چنین محاسباتی در مورد گدازه‌های ریولیتی انجام نشده است به این دلیل که آتش‌فشان فعالی که بتواند چنین دریاچه گدازه‌ای را نگه دارد شناخته نشده است.

محاسبات قدیمی‌تر دماهای سطحی گدازه‌های نوع استرومبولی^۱ اتنا و وزوو دمایی برابر با ۱۰۰۰ تا ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و گدازه‌های معادل آن‌ها در کیلوا^۲ هاوایی دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد را نشان داده است. در مورد گدازه‌های وزوو، پرت (۱۹۲۴) دماهایی بین ۱۰۰۰ تا بیش از ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد را ثبت نموده است. نامبرده در سال ۱۹۱۱ پی برد که دمای دریاچه گدازه‌ای کیلوا در عمق ۳۰ تا ۵۰ سانتیمتری زیر سطح زمین حدود ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد است. چند سال بعد یاگار (۱۹۱۷) دمای گدازه در اعماق مختلف دریاچه را محاسبه کرد و دریافت که دمای سطحی گدازه حدود ۱۰۰۰ بوده و در عمق یک متری پایین‌تر از سطح زمین تا دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابد و سپس در کف دریاچه که در عمق ۱۳ متری از سطح زمین است، این دما به ۱۱۷۰ درجه سانتی‌گراد افزایش پیدا می‌کند. به اعتقاد وی دمای بالا در سطح زمین به دلیل واکنش‌های سطحی و در نزدیکی کف دریاچه به دلیل اکسیداسیون حاصل از بلوک‌های سنگی غرق شده در آن است. وی نتیجه‌گیری کرد که دمای گدازه در مجرای بالارونده پایین‌تر از بخش زیرین دریاچه گدازه‌ای است.

دمای ماگما در دریاچه گدازه‌ای کیلوا بسته به عمق، گازهای در تله افتاده و واکنش‌های سطحی تا بیش از ۴۰۰ درجه متغیر است و محاسبات در وزوو نیز تغییرات مشابهی را نشان می‌دهد. این مسئله ممکن است در مورد سایر آتش‌فشان‌ها نیز صدق کند و از این رو محاسبه دماهای سطحی به دلیل تأثیر عوامل سطحی داده‌های مناسبی را در اختیار قرار نمی‌دهد. در هر حال، مشاهدات یاگار نشان داد که ماگمای بازالتی ممکن است در دماهایی بین ۷۵۰ تا ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد نسبتاً سیال باشند.

فقط برخی از کانی‌های متداول سنگ‌ساز در بازه دماهای ماگمایی ذوب می‌شوند و لذا داده‌های حاصل از پدیده ذوب دقیق نخواهد بود. با اطمینان می‌توان گفت که وقتی یک بلور از یک محلول متبلور می‌شود در آن صورت دما باید به زیر نقطه ذوب

1. Stromboli
2. Kilauea

آن بلور رسیده باشد. بنابراین، به عنوان مثال اورتوکلاز که در دمای حدود ۱۱۷۰ درجه سانتی گراد ذوب می شود نمی تواند در بالای این دما تشکیل (متبلور) شود. احتمالاً تبلور بسیار پایین تر از این دما صورت خواهد گرفت. به همین صورت کانی های بیوتیت و اژیریت (اژیرین) نیز نمی توانند به ترتیب در دماهای بالای ۱۱۰۰ و ۹۵۰ درجه سانتی گراد متبلور شوند.

باید به خاطر داشت که اغلب کانی های سنگ حالت محلول جامد (و در نتیجه ترکیب متغیر) دارند و لذا پدیده ذوب در آن ها گاهی پیچیده بوده و دماهای ذوب بسته به ترکیب متغیر خواهد بود.

ذوب یک اذخال در یک کانی ماگما، در صورتی که هیچ واکنشی رخ ندهد و ترکیب بلور و مایع یکی باشد، مستلزم دمایی حداقل برابر با دمای ذوب بلور میزبان خواهد بود.

در فرایند سردشدگی، یک سنگ در بازه ای از دما که در مراحل تبلور کانی های باون معین شده است، متبلور می شود. به طور کلی، زمینه یا ماتریکس سنگ آخرین بخش از سنگ است که تبلور می یابد و ممکن است در دمایی بسیار پایین تر از دمای ذوب تمام کانی هایی که در آن وجود دارد متبلور شود. این مسئله می تواند برای یک ذوب خشک صدق کند ولی کانی سازها (مثل مواد فرار) در سنگ بدون تردید دمای تبلور را پایین تر خواهند آورد. بازالت در دماهایی بین ۹۸۴ تا ۱۲۶۰ و گرانیت در دماهایی بین ۱۲۱۵ تا ۱۲۶۰ درجه سانتی گراد ذوب می شوند.

به دلیل وجود کانی سازها در یک ماگما، بازه حرارتی که در آن تبلور صورت می گیرد پایین تر از مقداری خواهد بود که سنگ در بالای آن ذوب می شود، به عبارت دیگر در این حالت دمای ذوب و تبلور یکسان نخواهد بود.

ماگماهای عمیق در اثر منجمد شدن باتولیت های بزرگی را پدید آورده و در اثر فرسایش در معرض دید ما قرار می گیرند. در زمانی که این ماگماها به نقطه نهایی انجماد می رسند ممکن است دمایی مشابه با دمای ماگماهای هم ترکیب نزدیک به سطح زمین داشته باشند. فشار می تواند باعث افزایش دمای تبلور شود ولی مقادیر بالای مواد فرار این دما را کاهش خواهد داد. برخی از ماگماهای خیلی عمیق و به ویژه ماگمای

اولیه بازالتی دارای دمای بسیار بالاتری هستند. این در حالی است که حتی دمای بازالت‌های جلگه‌ای^۱ ممکن است بسیار بالاتر از بازالت‌های عادی نیز باشد. بنابراین به‌طور خلاصه می‌توان نتیجه گرفت که:

۱. ماگماهای ریولیتی دارای دماهای پایین‌تری نسبت به ماگماهای بازالتی هستند.
۲. داده‌های حاصل از محاسبات مستقیم دماها در آتش‌فشان‌ها دارای اعتبار کمی هستند. محاسبات ماگماهای بازالتی در کیلوا^۲ از ۷۵۰ تا بیش از ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد متغیر است و این دماها در آتش‌فشان وزوو نیز تقریباً به همین اندازه متفاوت است.
۳. دماهای ذوب کانی‌هایی که از یک ماگما متبلور می‌شوند فقط پیشینه دما را نشان می‌دهند.

در نهایت باید گفت که برخی ماگماهای بازالتی دارای دماهایی کمتر از ۸۷۰ درجه، بیشترشان زیر ۱۰۰۰ درجه و برخی نیز به‌ندرت دارای دمایی بیش از ۱۲۶۰ درجه سانتی‌گراد هستند. احتمالاً دمای بیشتر این ماگماها از ۸۰۰ تا ۹۰۰ درجه فراتر نمی‌رود.

همان‌گونه که اشاره شد ماگماهای ریولیتی دارای دماهای کمتری هستند. همه آن‌ها دارای دمایی بیش از ۵۷۳ درجه و کمتر از ۸۷۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشند. تقریباً همه آن‌ها زیر دمای تجزیه بیوتیت که در حدود ۸۵۰ درجه است، قرار دارند. احتمالاً بیشتر این ماگماها دارای دمایی نزدیک به ۶۰۰ تا ۷۰۰ درجه هستند.

۱-۷-۲ گرانروی (ویسکوزیته) ماگما

گرانروی به مقاومت یک ماده سیال در مقابل جریان‌یافتگی گفته می‌شود. سیالات بر اساس گرانروی‌شان به دو دسته تقسیم می‌شوند: الف) سیالات نیوتونی^۲: که در اثر هرگونه تنش بُرشی جریان می‌یابند و ب) سیالات بینگهام^۳: که دارای یک مقاومت تسلیم^۴ محدودی بوده و تا زمانی که تنش بُرشی بر این مقاومت غلبه نکند، سیال نمی‌یابد. ماگماها از نوع سیالات بینگهام هستند.

برای محاسبه گرانروی از معادله جفریس (۱۹۲۵) استفاده می‌شود:

1. Plateau basalts
2. Newtonian
3. Bingham
4. Yield strength

$$h = (r \times g \times \sin(q) \times d^2) / 3v$$

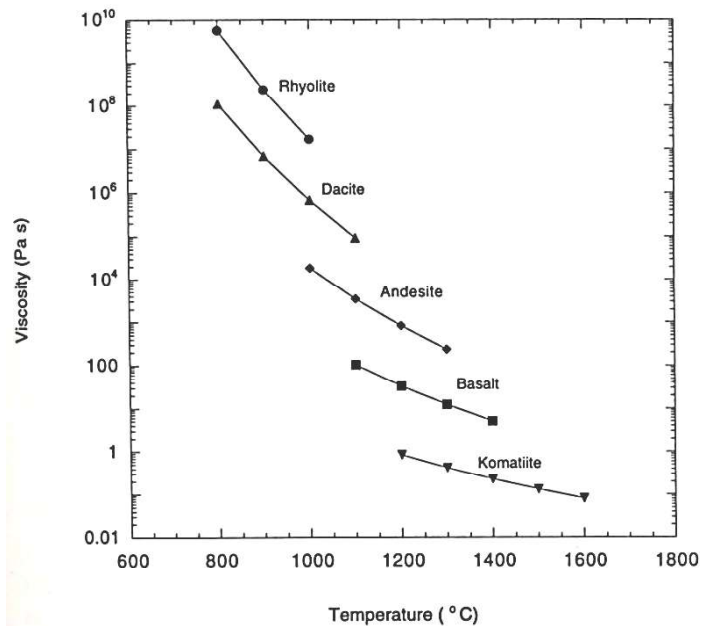
که در آن h گرانیروی، v سرعت، r چگالی، q زاویه شیب، g گرانش و d ضخامت جریان است.

عواملی که گرانیروی ماگما را تحت تأثیر قرار می‌دهند عبارت‌اند از:

۱. **دما:** با افزایش دما گرانیروی کاهش می‌یابد (شکل ۱-۱).
۲. **فشار:** تأثیر کمی بر گرانیروی دارد و با افزایش فشار، گرانیروی کاهش می‌یابد.
۳. **ترکیب:** ماگماهای اسیدی دارای گرانیروی بیشتری نسبت به ماگماهای بازی هستند. این مسئله تابعی از درصد پلیمریزاسیون سیلیس است. پلیمریزاسیون به‌طور کلی پدیده‌ای است که در آن از طریق افزایش مولکول‌های کوچک‌تر، اندازه مولکول‌ها افزایش پیدا می‌کند. در ماگماهای سیلیکاته با متصل‌شدن تترائدرها (SiO_4) به یکدیگر از طریق اکسیژن درجه پلیمریزاسیون افزایش می‌یابد. بنابراین افزایش محتوای سیلیس ماگماهای اسیدی باعث افزایش پلیمریزاسیون و در نتیجه افزایش گرانیروی می‌شود.
۴. **مقدار و نوع مواد فرّار:** این مواد نیز با تحت تأثیر قرار دادن شبکه‌های مولکولی باعث تغییر گرانیروی ماگما می‌شود. افزایش مقدار کمی آب به یک ماگما به‌شدت گرانیروی آن را کاهش می‌دهد به‌ویژه اگر ماگما اسیدی یا حد واسط باشد. از سویی دیگر افزایش آب به یک مذاب اولیوینی تأثیر کمی در گرانیروی آن به‌جا خواهد گذاشت. این مسئله به آن دلیل است که آب پیوندهای Si-Al-O را از هم می‌پاشد و اولیوین فاقد Al است.

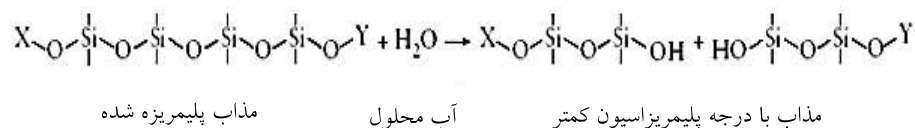
گرانیروی یک ماگما به‌شدت ساختارهای تشکیل شده در اثر تبلور را در کنترل دارد. به‌عنوان مثال، فوران‌های شکافی^۱ یا آتش‌فشان‌های سپری شکل^۲ از گدازه‌های بازالتی که دارای گرانیروی کمی هستند به وجود می‌آیند درحالی‌که گنبدی‌های کومولو^۳ و گنبدی‌های نوک تیز از گدازه‌های اسیدی با گرانیروی بالا تشکیل می‌شوند.

1. Fissure eruptions
2. Shield volcanoes
3. Cumulo-domes



شکل ۱-۱. گرانیروی ماگماها تابعی از دماست. فرض بر این است که ماگما فاقد مواد فرّار است (اسپرا، ۲۰۰۰).

شکل زیر نیز تأثیر H_2O بر کاهش پلیمریزاسیون و در نتیجه کاهش گرانیروی نشان می‌دهد. در زیر تأثیر ماده فرّار آب در کاهش پلیمریزاسیون مذاب سیلیکاته به نمایش گذاشته شده است (اقتباس از گیل، ۲۰۱۰).



۳-۷-۱ قابلیت هدایت گرمایی، گرمای ویژه و گرمای نهان ذوب ماگما

قابلیت هدایت گرمایی هم در ماگماها و هم در سنگ‌ها بسیار پایین است. این ویژگی معمولاً با افزایش حرارت افزایش می‌یابد. ماگماهای اسیدی دارای قابلیت هدایت گرمایی بالاتری نسبت به ماگماهای بازی هستند.

گرمای ویژه یا ظرفیت گرمایی ویژه (C_p) طبق تعریف حرارت مورد نیازی است که بتواند یک گرم از یک ماده را به اندازه یک درجه سانتی گراد گرم کند. این مقدار برای ماگماها بسیار پایین ($\sim 0.3 \text{ cal/gm}$) است. از سوی دیگر، گرمای نهان ذوب سنگ‌های آذرین (یا حرارت تبلور یک ماگما) به عنوان حرارتی در نظر گرفته می‌شود که در خلال تبلور یک گرم از یک مذاب آزاد می‌گردد. این مقدار در ماگماها نسبتاً بزرگ است ($100 - 65 \text{ cal/gm}$). این بدان معناست که در حین تبلور، ماگما مقادیر زیادی گرما آزاد می‌کند. به دلیل پایین بودن C_p در همان ماگما، گرمای آزاد شده در خلال تبلور افزایش معینی در دمای ماگمای در حال سردشدگی و تبلور، ایجاد خواهد کرد. لذا تأثیر کلی به این شکل خواهد بود که دمای ماگما در یک بازه طولانی بالا باقی می‌ماند (یعنی سردشدن در حین تبلور آهسته خواهد بود). با این حال، به محض این‌که ماگما متبلور شود سنگ آذرین حاصل بسیار سریع سرد خواهد شد.

۱-۷-۴ چگالی

چگالی یکی از مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده رفتار فیزیکی و شیمیایی یک ماگما است. چگالی در جابه‌جایی ماگماها در سطوح کم عمق نقش دارد. علاوه بر این، تفاوت چگالی بین یک مذاب سیلیکاته و هر کانی که از آن متبلور می‌شود در تفریق ماگمایی مؤثر است. چگالی‌های ماگمایی دارای بازه‌ای بین $2/2$ تا $3/1$ گرم بر سانتی‌متر مربع است. کانی‌های مافیک مانند پیروکسن‌ها، اولیوین‌ها و آمفیبول‌ها معمولاً چگال‌تر از ماگما هستند و تمایل دارند که به کف حجره ماگمایی سقوط کنند. این مسئله باعث می‌شود که ترکیب شیمیایی ماگمای باقیمانده مدام تغییر یابد. از سویی دیگر، فقط پلاژیوکلازهای کلسیک ممکن است دارای چگالی بیش از برخی از ماگماها باشند اما پلاژیوکلازهای سدیک و نفلین به دلیل چگالی کمتر معمولاً در بالای ماگماها غوطه‌ور هستند. سرعتی که در آن کانی به کف یک حجره ماگمایی سقوط می‌کند از طریق معادله استوک محاسبه می‌شود:

$$v = 2 g r^2 (\rho_1 - \rho_2) / 9 \eta \quad (1-1)$$

که در آن v سرعت تهنشست، r شعاع بلور تهنشست کننده (فرض بر این است که بلور کروی است)، p_1-p_2 تفاوت چگالی بین ماگما و بلور و η گرانروی ماگماست. به خاطر داشته باشید که نیروی گرانشی اعمال شده بر یک بلور در حال تهنشست باید بر نیروی مقاومت تسلیم ماگما غلبه کند.

عواملی که چگالی یک ماگما را تحت تأثیر قرار می‌دهند عبارت‌اند از:

۱. دما: هر چه دما بالاتر باشد چگالی کمتر خواهد بود.
۲. فشار: هر چه فشار بالاتر باشد چگالی بیشتر خواهد بود. بنابراین، چگالی یک ماگما با افزایش عمق بیشتر می‌شود تا اینکه چگالی آن از سنگ جامد بیشتر شود. این مسئله به خاطر آن است که سیالات قابلیت تراکم بیشتری نسبت به جامدات دارند.
۳. ترکیب: چگالی ماگما به‌طور قابل ملاحظه‌ای به محتوای آهن آن بستگی دارد. لذا ماگماهای بازیک چگال‌تر از ماگماهای اسیدی خواهند بود. این مسئله نقش عمده‌ای در تفریق ماگمایی بر عهده دارد.

۸-۱ ترکیب شیمیایی ماگماها

شواهد گوناگونی از قبیل ساختار لایه‌ای زمین نشان می‌دهد که گرچه ماگماها از طریق ذوب بخشی در گوشته بالایی و پوسته زیرین تشکیل می‌شوند ولی اعماقی که این پدیده در آن رخ می‌دهد متفاوت است. در نتیجه تمام ماگماها دارای یک ترکیب مشابه نیستند. وجود انواع سنگ‌های آذرین با ترکیبات مختلف در سطح زمین نیز مؤید این مسئله است. فوران‌های آتشفشانی نیز نشان داده‌اند که گدازه‌ها دارای گرانروی متفاوتی هستند که به‌نوبه خود بیان‌کننده ترکیبات و یا دماهای متفاوت آن‌هاست. مطالعه دقیق شیمی انواع مختلف سنگ‌های آذرین و پیوستگی‌های بین آن‌ها، پترولوژیست‌ها را قادر ساخته است که ماگماها را به چهار گروه اصلی طبقه‌بندی کنند:

۱. اسیدی^۱: غنی از SiO_2 ، Na_2O و K_2O . سنگ‌هایی که از این ماگماها تشکیل می‌شوند دارای درصد وزنی بین ۶۶ تا ۷۷/۵ درصد SiO_2 هستند. گرانیته نمونه مهمی از سنگ‌های اسیدی است و بسیاری از ماگماهای اسیدی به نام ماگماهای گرانیته شناخته می‌شوند.

۲. حد واسط^۱: غنی از SiO_2 ، Na_2O ، K_2O و همچنین CaO و Al_2O_3 . سنگ‌های حاصل از این ماگماها دارای مقادیر سیلیس بین ۵۲ تا ۶۶ درصد وزنی هستند. آندزیت مثال خوبی از این نوع سنگ‌هاست.

۳. بازیک^۲: غنی از CaO ، MgO و FeO . سنگ‌های تشکیل شده از تبلور این نوع ماگماها دارای مقادیر سیلیس بین ۴۵ تا ۵۲ درصد وزنی هستند. بازالت را می‌توان مشهورترین سنگ این گروه نامید و بسیاری از ماگماهای این گروه به ماگماهای بازالتی معروف‌اند.

۴. اولترابازیک^۳: ماگماهایی فقیر از سیلیسیم ($< 45\%$) ولی غنی از آهن و منیزیم هستند. سنگ‌های اولترابازیک ممکن است مقادیر سیلیسی کمتر از ۳۸ درصد وزنی نیز داشته باشند. از جمله این سنگ‌ها می‌توان به پریدوتیت اشاره کرد. قابل ذکر است که در این گروه برخلاف سنگ‌های درونی، گدازه‌های اولترابازیک تقریباً وجود خارجی ندارند و محدود به سرزمین‌های پرکامبرین هستند. آیا می‌توانید حدس بزنید چرا چنین است؟

جدول ۱-۱. ترکیبات شیمیایی برخی سنگ‌های متعلق به چهار گروه ماگمای یاد شده را نشان می‌دهد.

اکسیدها (%)	اسیدی (گرانیت)	حد واسط (آندزیت)	بازیک (بازالت)	اولترابازیک (پریدوتیت)
SiO_2	۷۱/۳	۵۷/۹۴	۴۹/۲	۴۲/۲۶
TiO_2	۰/۳۱	۰/۸۷	۱/۸۴	۰/۶۳
Al_2O_3	۱۴/۳۲	۱۷/۰۲	۱۵/۷۴	۴/۲۳
Fe_2O_3	۱/۲۱	۳/۲۷	۳/۷۹	۳/۶۱
FeO	۱/۶۴	۴/۰۴	۷/۱۳	۶/۵۸
MnO	۰/۰۵	۰/۱۴	۰/۲	۰/۴۱
MgO	۰/۷۱	۳/۳۳	۶/۷۳	۳۱/۲۴
CaO	۱/۸۴	۶/۷۹	۹/۴۷	۵/۰۵
Na_2O	۳/۶۸	۳/۴۸	۲/۹۱	۰/۴۹
K_2O	۴/۰۷	۱/۶۲	۱/۱	۰/۳۴
H_2O	۰/۷۷	۱/۱۷	۰/۹۵	۳/۹۱
CO_2	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۱۱	۰/۳۰
P_2O_5	۰/۱۲	۰/۲۱	۰/۳۵	۰/۱۰

1. Intermediate
2. Basic
3. Ultrabasic