

بررسی مورفولوژی بیرونی و درونی ژئودهای آتشفشانی (مطالعه موردی: استان خراسان جنوبی)

مکرمه شکری^{۱*}، عزیزرحیمی^۱، مصطفی رقیمی^۱، مجتبی قره محمودلو^۲، هادی عمرانی^۱

۱- گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه گلستان

۲- گروه مهندسی آب، دانشگاه گنبد کاووس

*Email: shokerimokarrameh@gmail.com

چکیده

ژئودهای آتشفشانی ساختارهای زمین‌شناسی منحصر به فردی هستند که در حفره‌های گدازه‌ها و سنگ‌های آتشفشانی ایجاد می‌شوند و با پوسته بیرونی سخت و فضای داخلی پر از بلورهای کوارتز، کلسدونی و آمیتیست شناخته می‌شوند. مطالعه مورفولوژی بیرونی و درونی این ژئودها، اطلاعات ارزشمندی از شرایط فیزیکیوشیمیایی سنگ میزبان، فرآیندهای زمین‌شیمیایی و تاریخچه سیالات در طول زمان ارائه می‌دهد. در این پژوهش، ژئودهای آتشفشانی خراسان جنوبی به عنوان مطالعه موردی انتخاب شدند و با بررسی عکس‌های میدانی، تحلیل مورفولوژیک بیرونی (شکل، بافت سطح، ضخامت پوسته و فرورفتگی‌ها/ برجستگی‌ها) و داخلی (لایه‌های متحدالمرکز، بلورهای ریز و درشت، رنگ و شفافیت) ارائه گردید. نتایج نشان داد که شکل و اندازه حفره اولیه، ترکیب و غلظت سیال، شرایط فیزیکیوشیمیایی، سرعت و جهت رشد بلورها، از عوامل اصلی کنترل‌کننده مورفولوژی ژئودها هستند. حضور کانی‌های همراه مانند ژئولیت‌ها به عنوان فاز جداگانه نیز در برخی ژئودها شناسایی شد. این پژوهش با استفاده از منابع علمی معتبر و مقالات داخلی، تصویری جامع از ژئودهای آتشفشانی منطقه ارائه می‌دهد و کاربردهای آن‌ها در زمین‌شناسی اقتصادی، شناسایی شرایط محیطی و حفاظت از میراث زمین‌شناسی را برجسته می‌کند.

کلیدواژه‌ها: ژئود، ژئودهای آتشفشانی، مورفولوژی بیرونی و درونی، خراسان جنوبی

External and Internal Morphology of Volcanic Geodes (Case Study: South Khorasan Province)

Mokarrameh Shokri^{*1}, Aziz Rahimi¹, Mostafa Raghimi¹, Mojtaba Ghara Mahmoudlou², Hadi Omrani¹

¹Department of Geology, Faculty of Science, Golestan University, Iran

² Department of Water Engineering, Gonbad Kavous University, Iran

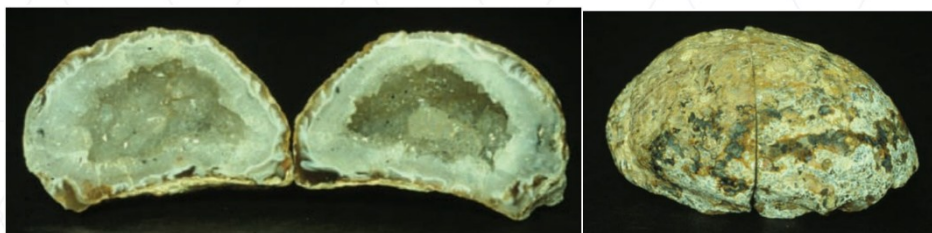
Abstract

Volcanic geodes are unique geological structures that form within cavities of lava flows and volcanic rocks, characterized by a hard outer shell and an interior filled with quartz, chalcedony, and amethyst crystals. Studying the external and internal morphology of these geodes provides valuable information about the physicochemical conditions of the host rock, geochemical processes, and the history of fluids over time. In this research, volcanic geodes from South Khorasan were selected as a case study. Field photographs were analyzed to investigate external morphology (shape, surface texture, shell thickness, and indentations/protrusions) and internal morphology (concentric layers, micro- and macro-crystals, color, and transparency). Results indicate that the primary cavity size and shape, fluid composition and concentration, physicochemical conditions, and growth rate and direction of crystals are the main factors controlling geode morphology. Associated minerals such as zeolites were identified as separate phases in some geodes. By integrating scientific sources (Arduin-Rode et al., 2024; Lu & Sunagawa, 1999; Witzke, 1989; Finkelman, 1972) and domestic studies, this research provides a comprehensive overview of volcanic geodes in the region, highlighting their applications in economic geology, environmental interpretation and geoconservation.

Keywords: geode, volcanic geodes, external and internal morphology, South Khorasan

۱- مقدمه

واژه «ژئود» ریشه در واژه یونانی «geoides» به معنای «شبه زمین» را دارد. ژئودها (شکل ۱) ساختار سنگی توخالی، کروی یا بیضی شکل هستند که با بلورهای رو به داخل یا رسوبات معدنی پوشیده شده‌اند (باسلر، ۱۹۰۸؛ راکووان، ۲۰۱۷). قطر آنها می‌تواند از چند سانتی‌متر تا بیش از یک متر متغیر باشد. ژئودها معمولاً در مناطقی با فعالیت آتشفشانی و در مناطق سنگ رسوبی یافت می‌شوند که در آنها آب باعث انحلال سنگ‌هایی مانند سنگ آهک و شیل شده است. آنها در محیط‌های زمین‌شناسی متنوعی تشکیل می‌شوند و فضای داخلی توخالی آنها اغلب با مواد معدنی مانند کوارتز، آمیتیست، کلسیت، عقیق و سایر کانی‌های سیلیکات یا کربنات پر می‌شود.



شکل ۱- سنگی توخالی، کروی یا بیضی شکل هستند که با بلورهای رو به داخل

لایه بیرونی آنها که غالباً از نوعی کلسدونی ساده و بی‌جلوه تشکیل شده، هیچ نشانه‌ای از بلورهای درونش آشکار نمی‌کند. اما اگر یکی از آنها را بشکافید، اغلب در خواهید یافت که آن ظاهر آرام و متعارف، مجموعه‌های چشم‌نوازی از کریستال‌های رنگارنگ، درخشان و رو به درون را پنهان کرده است (Van Wagner, 2003). تشکیل ژئودها در دو مرحله اصلی رخ می‌دهد: ایجاد حفره و رسوب مواد معدنی. ژئودها به عنوان حفره‌های توخالی در داخل سنگ‌ها شروع می‌شوند که می‌توانند از طریق چندین فرآیند تشکیل شوند: در محیط‌های آتشفشانی، گدازه مذاب می‌تواند حباب‌های گاز را هنگام سرد شدن به دام بیندازد. این حباب‌ها یا وزیکول‌ها، فضاهای خالی را در سنگ در حال جامد شدن تشکیل می‌دهند. با گذشت زمان، این حفره‌ها به عنوان فضای اولیه برای رسوب مواد معدنی عمل می‌کنند. در محیط‌های رسوبی، حفره‌ها می‌توانند به دلیل انحلال مواد معدنی (مانند سنگ آهک یا گچ) توسط آب تشکیل شوند. آب‌های زیرزمینی اسیدی می‌توانند بخش‌هایی از سنگ را حل کنند و حفره‌ها یا فرورفتگی‌هایی را به جا بگذارند که پایه تشکیل ژئود می‌شوند. پس از تشکیل حفره، مرحله دوم شامل رسوب مواد معدنی روی دیواره‌های داخلی حفره است. آب‌های زیرزمینی یا سیالات هیدروترمال، که اغلب غنی از مواد معدنی محلول هستند، به حفره نفوذ می‌کنند. با گذشت زمان، مواد معدنی از محلول رسوب کرده و در امتداد دیواره‌های داخلی حفره متبلور می‌شوند. با ادامه جریان آب مملو از مواد معدنی از حفره، کریستال‌ها به آرامی به سمت داخل رشد می‌کنند. بسته به ژئوشیمی محلی، مواد معدنی مختلفی می‌توانند تشکیل شوند و ژئودهای رنگارنگ و متنوعی ایجاد کنند. کوارتز رایج‌ترین ماده معدنی است، اما انواع دیگری مانند آمیتیست (شکل بنفش کوارتز)، کلسیت و عقیق نیز رایج هستند. ژئودها اغلب نواربندی یا لایه‌هایی از مواد معدنی مختلف را نشان می‌دهند، زیرا تغییرات در شیمی آب یا دما در طول زمان باعث رسوب متوالی مواد معدنی مختلف می‌شود. این می‌تواند منجر به الگوهای پیچیده‌ای از رنگ‌ها و بافت‌ها شود. ژئودهای کوارتز رایج‌ترین هستند و دارای بلورهای کوارتز شفاف یا سفید هستند که حفره را می‌پوشانند. برخی ممکن است حاوی آمیتیست (کوارتز بنفش) یا کوارتز دودی (کوارتز خاکستری-قهوه‌ای) نیز باشند. بلورهای کلسیت یکی دیگر از کانی‌های رایج موجود در ژئودها هستند که اغلب در مقایسه با کوارتز، بلورهای بزرگ‌تر و بلوکی‌تری تشکیل می‌دهند. برخی از ژئودها دارای آستری از عقیق نواری، نوعی کلسدونی، هستند که لایه‌های متحدالمرکزی از کوارتز ریزبلوری را در اطراف دیواره‌های داخلی تشکیل می‌دهد (Cartwright, et al., 2025).

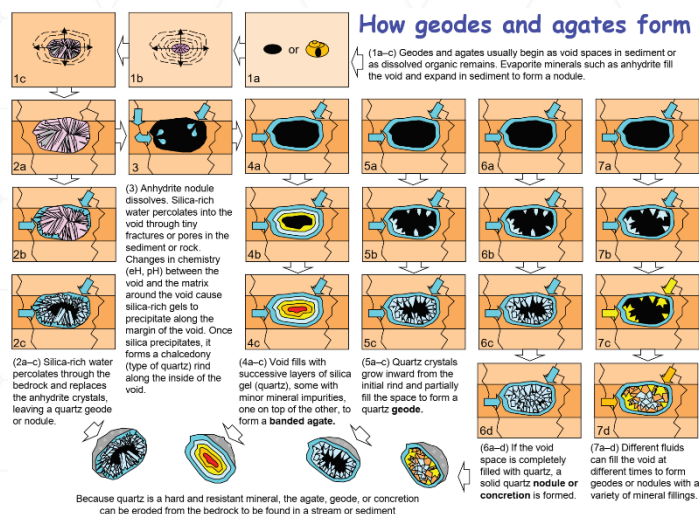
منطقه خراسان جنوبی، واقع در بخش شرقی بلوک لوت، دارای گسترش وسیعی از سنگ‌های آتشفشانی ائوسن با ترکیب بازالتی تا آندزیتی است که بستر مناسبی برای تشکیل ژئودهای آتشفشانی فراهم کرده‌اند (آقانباتی، ۱۳۸۳) (شکل-۲). با وجود گزارش‌های پراکنده از رخداد ژئودها در این منطقه، بررسی نظام‌مند مورفولوژی آن‌ها و ارتباط آن با شرایط زمین‌شناسی محلی تاکنون کمتر مورد توجه قرار گرفته است. هدف این پژوهش، بررسی مورفولوژی بیرونی و درونی ژئودهای آتشفشانی خراسان جنوبی و تحلیل عوامل کنترل‌کننده شکل، بافت و نوع تبلور آن‌ها است. نتایج این مطالعه می‌تواند در تفسیر فرآیندهای پس‌آتشفشانی و نیز در شناسایی نواحی مستعد رخداد ژئودهای با کیفیت اقتصادی مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۲- نمای از سنگ‌های آتشفشانی ائوسن با ترکیب بازالتی تا آندزیتی و رخنمون ژئودها بهار ۱۴۰۴

۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش، نمونه‌های ژئود نوع آتشفشانی از رخنمون‌های بازالتی مناطق مختلف خراسان جنوبی، از محدوده‌های فردوس و سه قلعه جمع‌آوری گردیدند. نمونه‌ها، از نظر مورفولوژی بیرونی شامل شکل ظاهری، ضخامت پوسته و ناهمواری سطح بر مبنای ناصافی و فرورفتگی بررسی شدند. برای مطالعه مورفولوژی درونی، برخی نمونه‌ها برش داده شده و ویژگی‌هایی نظیر نوع تبلور، اندازه بلورها، توالی لایه‌ها و کانی‌های همراه به صورت میکروسکوپی بر اساس روش مدل طبقه بندی کرب (Greb, 2012) مورد بررسی قرار گرفت (شکل-۲). نتایج حاصل با ژئودهای آتشفشانی سایر مناطق دنیا مقایسه گردید.



شکل ۳- مدل طبقه بندی تشکیل انواع ژئود (Greb, 2012).

۳- بحث

۳-۱. بررسی مورفولوژی بیرونی ژئودهای آتشفشانی

مورفولوژی بیرونی ژئودهای آتشفشانی اولین شاخص برای تفسیر شرایط فیزیکی و مکانیکی محیط تشکیل است. تصاویر میدانی ارائه شده در این پژوهش (شکل ۱) نشان می‌دهد که ژئودهای خراسان جنوبی عمدتاً کروی تا بیضوی هستند، اگرچه نمونه‌هایی با هندسه نامنظم و دارای برجستگی یا فرورفتگی نیز مشاهده می‌شوند (Witzke, 1989; Martinsson & Wanhainen, 2000).



شکل ۴- نمونه ای از مورفولوژی بیرونی ژئودهای آتشفشانی - منطقه خراسان جنوبی

۳-۲. مورفولوژی درونی

مورفولوژی درونی ژئود بازتاب دهنده تری از تاریخچه زمین‌شیمیایی و سینتیکی سیستم تشکیل دهنده آن است. تصاویر برش خورده ژئودها در این پژوهش (شکل ۵) نشان دهنده توالی چندمرحله‌ای پر شدن حفره‌هاست. لایه ریزبلورین و پیوسته کلسدونی در تماس مستقیم با سنگ میزبان، نخستین فاز کانی‌سازی درون حفره است. این پوسته نقش یک سد نیمه نفوذپذیر را ایفا کرده و کنترل کننده نفوذ سیال و آغاز لایه‌بندی‌های بعدی است (Sunagawa, 1999 & Lu). نوارهای رنگی و بافتی در لایه‌های عقیقی نتیجه تغییرات متناوب در غلظت سیلیس، pH و پتانسیل اکسیداسیون-کاهش سیال هستند (Sunagawa, 1999). این ویژگی‌ها منعکس کننده فازهای مختلف رشد بلورها در مراحل متعدد ژئود است. فضای مرکزی ژئود عمدتاً با بلورهای آزاد کوارتز، آمیتیست و کلسدونی ماکرو کریستالین پوشیده شده است که به صورت خود شکل و با جهت‌گیری مشخص به سمت مرکز حفره رشد کرده‌اند. اندازه و شفافیت بلورها بیانگر تغییرات سینتیکی فرآیند تبلور است: بلورهای ریز و براق ناشی از فوق اشباع‌شدگی سریع سیال و نرخ بالای جوانه‌زنی (Sunagawa, 1999 & Lu). بلورهای درشت و شفاف یا شیری: نتیجه رشد آهسته و پایدار در شرایط نزدیک به تعادل (Putnis, 1992). وجود کانی همراه نشان

دهنده محیط رشد آن می باشد به طور مثال وجود ژئولیت (شکل ۲) نشان دهنده محیط بازالتی و دگرسانی اولیه می باشد. ژئولیت به عنوان فاز مستقل و همراه حضور دارد و نه بخشی از پرشدگی اصلی سیلیسی و نه روی بلورهای اصلی رسوب کرده است. این کانی ها معمولاً در مراحل اولیه تشکیل ژئودها هستند (Shabati & Kiani, 2024; Arduin-Rode et al., 2021).

ظاهر داخلی ژئودها به شرایط محیطی مانند دما، pH و محل تشکیل آن ها و انواع عناصر موجود در آبی که از آن ها نفوذ کرده، بستگی دارد. رسوب مواد معدنی مانند کوارتز یا آمیتیست، درون ژئودها را به شکل های درخشان و حیرت آوری از کریستال ها تبدیل کرده است. ویژگی های بیرونی چنین ژئودهایی ممکن است توجه شما را جلب نکند، اما نمی توانید زیبایی درونی آن ها را نادیده بگیرید. همه ژئودها حاوی ساختارهای جذاب کریستالی نیستند. برای مثال، مواد معدنی بیرون زده از پوسته ژئودهای حاوی مقادیر زیاد کلسدونی می باشد که ممکن است ظاهری ناصاف و گل کلم مانند داشته باشند. ژئودهای کروی و بیضوی بازتاب مستقیم شکل گیری حباب های گازی (وزیکول ها) در گدازه های بازالتی هستند. کشش سطحی در حالت مذاب باعث می شود حباب های گاز برای رسیدن به حداقل انرژی سطحی، شکل کروی به خود گیرند (Walker, 1971; Finkelman, 1972). سرد شدن یکنواخت گدازه موجب حفظ هندسه اولیه حفره و ایجاد پایه ای برای لایه بندی بعدی ژئود می شود. برخی ژئودها دارای برجستگی های زگیل مانند یا گل کلمی بر سطح بیرونی هستند. این ویژگی ها می توانند ناشی از رشد نامتوازن پوسته سیلیسی در اطراف چند نقطه نفوذ سیال یا ادغام چند وزیکول در مراحل اولیه تشکیل باشند (Witzke, 1989). مشابه این اشکال در ژئودهای آیووا نیز گزارش شده است، جایی که رشد تدریجی لایه های کلسدونی در تماس با سنگ میزبان باعث ایجاد ناهمگنی های سطحی می شود (Martinsson & Wanhainen, 2000). فرورفتگی های موضعی در سطح ژئود نشان دهنده تأثیر تنش های مکانیکی پیش از سخت شدن کامل پوسته سیلیسی است. فشار ناشی از بارگذاری لایه های بالایی گدازه یا تداخل رشد دو ژئود مجاور (Mutual Interference) می تواند باعث تغییر شکل حفره اولیه شود (Finkelman, 1972). مورفولوژی مشاهده شده امروزی محصول برهم کنش بین شکل اولیه ژئود و فرسایش تفریقی بعدی است. ژئودهایی با پوسته ضخیم و یکنواخت سیلیسی معمولاً سطحی صاف دارند، در حالی که ژئودهای با پوسته متخلخل یا دارای ناخالصی های کربناته، در اثر هوازدگی شیمیایی، ظاهری زبر و ناهموار پیدا می کنند (Witzke, 1989; Finkelman, 1972).



شکل ۶- مورفولوژی داخلی برخی ژئودهای خراسان جنوبی با مدل تقسیم بندی

منطقه لس کاتالانز برای مطالعه دقیق انتخاب شد (Morteani, et al., 2010) زیرا آمیتیست آن منطقه با رنگ بنفش تیره برجسته و وجود بسیار غیرمعمول استالاکتیت‌ها در برخی از ژئودها مشخص می‌شود. استالاکتیت‌ها منحصراً از عقیق تشکیل شده‌اند (شکل) تولید استالاکتیت‌های عمودی و موازی از سیلیس آمورف با فرایندهای باروری، همانطور که توسط لندمسر (۱۹۹۸) پیشنهاد کرده است (Landmesser, 1998). در شکل ۸ وجود ژئود چشمی را در ماداگاسکار را در سمت راست را نشان می‌دهد (Moorer, 2006) که وجود چنین ژئود نیز در خراسان جنوبی قابل مشاهده است.



شکل ۷ - استالاکتیت‌های عقیق در یک ژئود، معدن کوکیرو. عرض شکل ۳۰ سانتی‌متر (سمت راست) (Morteani, et al., 2010) و این چنین استالاکتیت‌های در ژئود آتشفشانی خراسان جنوبی وجود دارد



شکل ۸- ژئود چشمی در ماداگاسکار (سمت راست) ژئود چشمی خراسان جنوبی (سمت چپ)

۴- نتیجه گیری

مطالعه مورفولوژی بیرونی و درونی ژئودهای آتشفشانی خراسان جنوبی نشان می‌دهد که این ساختارها نمونه‌ای برجسته از سیستم‌های زمین‌شیمیایی چندمرحله‌ای و پیچیده هستند. بررسی مورفولوژی بیرونی ژئودها، از جمله شکل کروی یا بیضوی، برجستگی‌ها، فرورفتگی‌ها و ضخامت پوسته، نمایانگر تأثیر شرایط فیزیکی اولیه سنگ میزبان، فشار مکانیکی، و فرایندهای هوازدگی و فرسایش تفریقی است (این یافته‌ها نشان می‌دهد که شکل نهایی ژئودها نه تنها حاصل فرایندهای درونی، بلکه بازتابی از تعامل میان سنگ میزبان و محیط سطحی پس از تشکیل است. درون ژئودها، لایه‌بندی‌های متحدالمرکز عقیق، حضور بلورهای ریز و درشت کوارتز و آمیتیست، و ترکیب رنگی متنوع لایه‌ها، حکایت از روند رشد چندمرحله‌ای بلورها تحت کنترل سینتیکی و زمین‌شیمیایی دارد (نتایج تحلیل نشان می‌دهد که نرخ جوانه‌زنی و نرخ رشد بلورها تعیین‌کننده اندازه، شفافیت و رنگ بلورها است. بلورهای ریز و براق نشان‌دهنده رشد سریع در شرایط فوق‌اشباع، و بلورهای درشت و شفاف یا شیری، محصول رشد آهسته و پایدار هستند که فرصت کافی برای تشکیل شبکه بلوری منظم فراهم شده است. در نهایت، این مطالعه تأکید می‌کند که ژئودها صرفاً اشیاء زیبا و کلکسیونی نیستند، بلکه پنجره‌ای مستقیم به فرایندهای زمین‌شیمیایی، سینتیکی و محیطی هستند. شناخت دقیق مورفولوژی و ترکیب کانی‌شناسی ژئودها، علاوه بر کاربردهای علمی، می‌تواند راهنمایی برای اکتشاف مواد معدنی، حفاظت از ذخایر زمین‌شناسی و توسعه زمین‌گردشگری علمی باشد.

مراجع

آقاباتی، س.ع. (۱۳۸۳). زمین‌شناسی ایران. تهران: سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

Arduin-Rode, F., Sosa, G., van den Kerkhof, A., Krüger, Y., Bajnai, D., Pack, A., Di Rocco, T., Oyhançabal, P., Wemmer, K., Herwartz, D., Klipsch, S., Wiegand, B., Siegesmund, S.,

Hueck, M. (2024). World-class amethyst-agate geodes from Los Catalanes, Northern Uruguay: genetic implications from fluid inclusions and stable isotopes. *Mineralogy Journal*, 45 (3), 112–135.

Bassler, R. S., (1908), The formation of geodes with remarks on the silicification of fossils, Vol. 35 (US Government Printing Office).

Cartwright, J., et al., (202۰), Self-Organized Pattern Formation in Geological Soft Matter. [physics.geo-ph] 25 Dec 2024.88p.

- Finkelman, R. B. (1972). Geodes Could Lead to Mineral Discoveries. *Rocks & Minerals*, 47 (2), 101–108
- Gilg, H. A., Heaney, P. J., & Ripley, E. M. (2003). Volcanic geodes and associated mineralogy. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 122, 25–44.
- Götze, J., et al. (2020). Fluid inclusions and paragenetic sequences in geodes. *Lithos*, 360–361, 105402
- Greb, S.F., 2012, Kentucky Geological Survey, University of Kentucky
- Hartmann, L. A., & Renner, L. C. (2021). Origin of the reduced, amethyst-mineralized lower tier of the Cordillera Flow, southern Paraná Volcanic Province. *Brazilian Journal of Geology*, 51 (2), 101–118.
- Hayes JB. Geodes and concretions from the Mississippian Warsaw formation, Keokuk region, Iowa, Illinois, Missouri. *J Sedimentary Petrol* 1964;34:123–133.
- Heaney, P. J. (2018). Geode formation: internal structures and mineralogy. *Mineralogical Society of America, Reviews in Mineralogy*, 83,* 123–178. Landmesser M (1998) “Mobility by metastability” in sedimentary and agate petrology: applications. *Chem Erde* 58:1–22.
- Lu, T., & Sunagawa, I. (1999). Texture formation of agate in geode. **Journal of Gemmology and Materials*, 32 (4), 215–228
- Moorer, W. (2006). Oogjes-agaat uit Madagascar, gea september 2006, numer 3
- Morteani , G., (2010).The genesis of the amethyst geodes at Artigas (Uruguay) and the paleohydrology of the Guaraní ´ aquifer: structural, geochemical, oxygen, carbon, strontium isotope and fluid inclusion study. *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)* (2010) 99:927–947.
- Putnis, A. (1992). Mineral replacement reactions. *Reviews in Mineralogy*, 28, 87–124
- Rakovan, J., (2017), “Word to the wise: Geode (and friends),” *Rocks & Minerals* 92 (1), 85–91. Rodríguez-Berriguete, M., et al. (2022). Sedimentary geodes as archives of diagenetic fluids. *Sedimentary Geology*, 415, 105960
- Van Wagner L. Crystals: more than meets the eye
Available at: www.yale.edu/ynhti/pubs/A5/vanwagner.html. Accessed Nov 11, 2003.
- Witzke, B. J. (1989). Geodes: A Look at Iowa’s State Rock. **Iowa Geological Survey Report*, 45, 12–28.