



## تحلیل حوادث بدنه سیارک مادر و روند شکل‌گیری کندریت‌های شهداد

مریم بوئینی<sup>۱</sup>، شهریار محمودی<sup>۲</sup>

۱- گروه ژئوشیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه خوارزمی، کرج، ایران. ۰۹۱۹۶۸۷۰۱۵۲.boeinimaryam2019@gmail.com

۲- گروه ژئوشیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه خوارزمی، کرج، ایران. ۰۹۱۲۶۵۴۷۳۳۶.shahryar.mahmoudi@gmail.com

### چکیده

۴ قطعه شهاب سنگ (KM97002, KM97003, KM97008, KM970010) که در مطالعات قبلی طبقه‌بندی شده و طبق آن، این شهاب سنگ‌ها جزء شهاب سنگ‌های معمولی، کندریت با نوع پترولوژی H<sub>4</sub> است و در این مطالعه سعی بر آن است که حوادث و اتفاقات رخ داده در بدنه سیارک مادر (اُروس) این قطعات که به صورت شواهدی در کانی‌ها (کانی اپک، کاماسیت، تائینیت)، فاز سولفیدی، ماتریکس، Ring, CAI, and Rim وجود دارد را به تفکیک بیان کنیم. در همین راستا ابتدا پس از مطالعه و تحقیقات میدانی و همچنین با استفاده از مطالعه میکروسکوپی پلاریزه و انعکاسی، به نحوه شکل‌گیری عناصر و فازهای فلزی پرداختیم. از این طریق می‌توان به شبیه‌سازی تکامل حرارتی سیارک اولیه اُروس دست یافت و می‌توان تاریخچه حرارتی را بازسازی کرد. با استفاده از این اطلاعات می‌توان تحلیل دقیق‌تری از فرایندهای موثر در شکل‌گیری این سیارک را شناسایی کرد و همچنین پاسخ به این سوال بسیار ساده‌تر خواهد بود که آیا این سیارک قبل از شکل‌گیری کندریت‌ها با پرتابه‌های معلق بین سیاره‌ای برخورد داشته است. در این مورد تا به امروز هیچ تحقیقی انجام نشده است.

**واژه‌های کلیدی:** بدنه سیارک مادر، کانی اپک، ماتریکس، CAI، تکامل حرارتی سیارک.



## ۱. مقدمه

منشأ اجسام والد کندریت‌های معمولی دیگر یک راز نیست [4]. کاملاً ثابت شده است که به نوعی این اجسام مادر در سیارک‌های نوع S پنهان هستند. در واقع، بیشتر سیارک‌های نوع S احتمالاً اجسام والد کندریت‌های معمولی هستند زیرا خواص طیفی و کانی‌شناسی مشابهی از خود نشان می‌دهند [5] و در این زمینه می‌توان کندریت‌های شه‌داد را نام برد که متعلق به سیارک ۱۶۰۳ می‌باشد [2]. سطوح تقریباً همه سیارک‌های نوع S (تا ۲۰۰ کیلومتر) ویژگی‌های ترکیبی مشابهی با شهاب‌سنگ‌های با دمای بالا (OC نوع ۴ تا ۶) دارند که فضای داخلی آن‌ها دگرگون شده و بیانگر این است که برخوردها ممکن است نقش مهمی در تکامل ساختاری این سیارک‌ها داشته است [3] [5]. جالب توجه است که طبق برخی از تحقیقات انجام شده متالوگرافی سرعت خنک‌سازی کندریت‌های H با این مشاهدات مطابقت دارد و نشان می‌دهد که چندین ضربه اولیه باعث حفر شدن بدنه مادر کندریت H در حالی که در حال خنک شدن بود، شده و باعث اختلال در تاریخچه حرارتی بسیاری از کندریت‌های H شد که در نهایت منجر به ایجاد سطوحی حاوی سنگ‌هایی شد که از دامنه وسیعی از مواد تشکیل دهنده اعماق سیارک سرچشمه گرفته است [8] [9] [6] [7].

## ۲. روش‌های مطالعه

در ابتدا جهت جمع‌آوری اطلاعات مرتبط در زمینه روابط کندرول‌ها و کانی‌ها، فرایندها و عوامل تاثیرگذار بر روی سیارک مادر، کتاب و مقالات مربوطه مطالعه شد. پس از انجام تحقیقات، شروع به شناسایی کانی‌ها و کندرول‌ها (شکل، نوع، ابعاد، فراوانی کندرول‌ها)، ارتباط آن‌ها با یکدیگر و همچنین بررسی خصوصیات نوری آن طی مطالعات میکروسکوپی نور پلاریزان و نور انعکاسی با استفاده از میکروسکوپ تحقیقاتی پلاریزان مدل زایس در آزمایشگاه دانشگاه خوارزمی تهران کردیم. برای این کار نمونه‌ها را در حمام اولتراسونیک به مدت ۲ ساعت قرار دادیم تا کلیه اثرات زمینی و اثرات بعد از مراحل برخورد زمینی و یا در اثر قرار گرفتن در محیط طبیعی زوده شود، سپس نمونه‌ها به جهت خشک شدن ۴۸ ساعت در آون با دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. در مرحله بعد عکس‌برداری و چگالی‌سنجی انجام شد. در مرحله بعدی از هر نمونه یک مقطع میکروسکوپی نازک تهیه گردید و مطالعات میکروسکوپی انجام شد. در مورد شناسایی Matrix material, CAI, Fe-Ni و یا بررسی کاماسیت، ترولیت، تائیت، عناصر مس، به مطالعه آن‌ها در نور انعکاسی پرداختیم و برای این کار مقاطع پولیشی تهیه گردید.

## ۳. بررسی میکروسکوپی کندریت‌های KM9700 در نور عادی

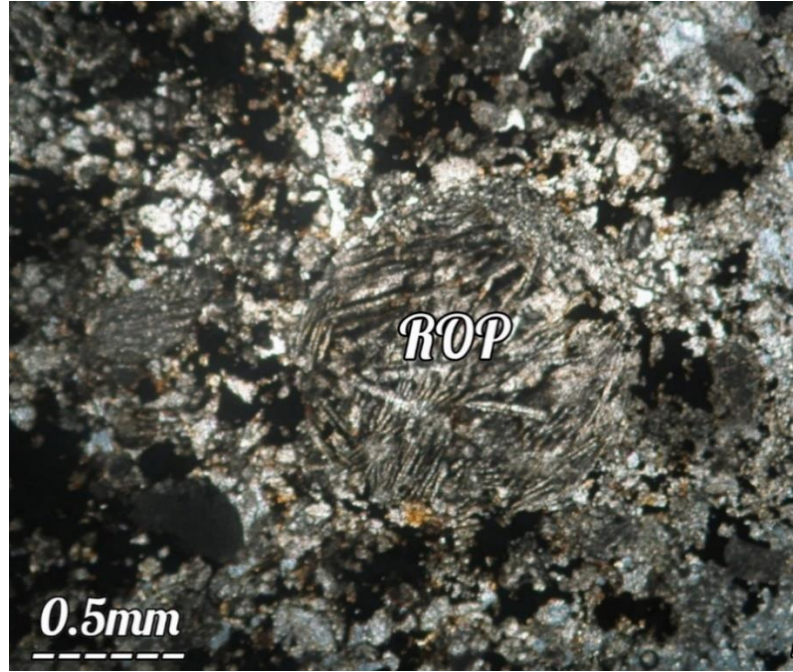
فازهای کانیایی تشخیص داده شده در KM9700 عبارت است از الیوین و پیروکسن. در این نمونه کانی‌های الیوین ۲۶٪ و پیروکسن ۳۲٪ حجم شهاب سنگ را شامل شده و جزء کانی‌های اصلی و اغلب خودشکل تا نیمه شکل‌دار هستند (شکل ۱ و ۲). نمونه KM97002 شامل اجسام کندرولی، بخش بلوری و ماتریکس است و این همراهی به صورت احاطه کردن پیروکسن توسط الیوین است که نشانگر بالا رفتن حرارت محیط بدنه سیارک مادر است (شکل ۳) [10]. در کندریت KM97003 الیوین‌های اطراف پیروکسن دارای بافت اسپینفکس همراه با ماتریکس کریستوکریستالین است و گاهی به صورت پورفیری بخشی از کندرول‌های شهاب سنگ را تشکیل می‌دهد (شکل ۳). برخی از این الیوین‌های تیغه‌ای در کنار دانه‌های کروی اپک است که آلیاژ آهن و نیکل در آن به شکل بافت دانه‌تسبیجی، دیده می‌شود و برخی دیگر با بافت غالب اسفرولیتی همراه هستند (شکل ۳). کندرول‌های این مقطع میکروسکوپی در هر یک سانتی‌متر مربع ۲ عدد است که از الیوین اسپینفکس و یا پیروکسن بلوری و یا تلفیقی از این دو کانی است (دارای مرز تدریجی، گاهی مشخص) و با ۱۴٪ ماتریکس فلزی همراه شده است. در برخی نقاط نمونه میکروسکوپی KM97008، الیوین محصور (BO) به صورت جان‌شینی کانی پیروکسن را اشغال کرده و بافت سودومورف را حاصل می‌کند، در حالی که خود دارای بافت اسپینفکس است (شکل ۴). برخی از الیوین‌ها دارای بافت اسپینفکس هستند و به دلیل اپک نبودن بلورهای اطراف این کانی، مخفی‌بلور بودن آن مشهود است و گاهی با بافت اسفرولیتی همراه می‌شوند (شکل ۵). در کندریت KM970010 حجم کندرول معمولی و کندرول مرکب در این نمونه ۸۰٪ است و کندرول این مقطع با مرزی کاملاً مشخص (۵ کندرول در یک سانتی‌متر مربع) که با هاله‌ای از



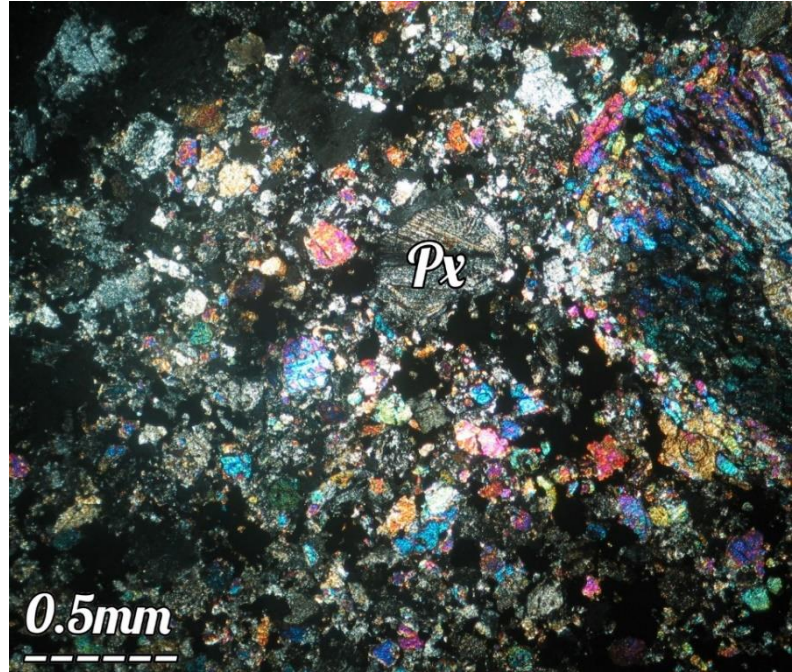
کریپتوکریستالین‌ها احاطه شده است (Rim) دارای اندازه ۰/۱ میلی‌متر، در زمینه ماتریکس قرار دارد که تماماً فلزی با فراوانی ۱۱٪ است (شکل ۶). کندرول مرکب با قطر ۰/۰۲ در این نمونه متشکل از الیوین در کندرولی با کانی پیروکسن محصور (BP) است. برخی از الیوین‌های دانه‌ای (GO) که در کندرول‌ها جای دارند دارای بافت اسپینفکس هستند و در این نوع الیوین‌ها جهت هر تیغه با دسته دیگر تیغه‌ها یکی نیست و هر کدام از تیغه‌ها جهت‌گیری خاص خود را دارند (شکل ۶). در نهایت به این نکته اشاره شده است که این قطعات کندریتی جزء گروه H کندریت معمولی است. ترکیب کانی‌های سیلیکاته و مرزهای کندرول‌ها که به خوبی مشخص است، نشان‌گر این است که KM97002 متعلق به پترولوژی نوع ۴ است [2][1].

### ۱.۳. بررسی میکروسکوپی کندرول‌های کندریت KM9700 در نور عادی

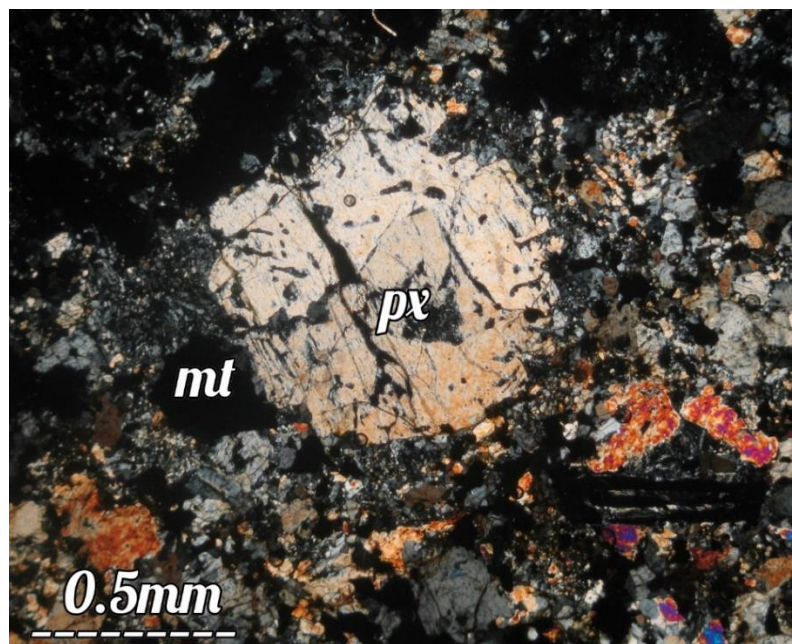
به ازای هر سانتی‌متر مربع از نمونه میکروسکوپی یک کندرول داریم که از دیدگاه پتروگرافی دو نوع است؛ در برخی کندرول‌ها کانی الیوین در مرکز کندرول قرار دارد و توسط کانی پیروکسن احاطه شده است و در برخی دیگر، کانی پیروکسن در مرکز و کانی الیوین (POP) آن را احاطه کرده است (در برخی مناطق نیز تلفیقی از بافت شعاعی الیوین و پیروکسن دیده می‌شود (ROP))؛ در حالی که بافت اصلی پیروکسن محصور (BP) اسپینفکس است (ذرات پرکننده فضای خالی کانی در این بافت کانی آپک است). در کنار بافت کندرول در کندرول یا کندرول مرکب جای گرفته است (شکل ۲ و ۳). کندرول‌های اصلی دارای قطر ۰/۵ میلی‌متر است. در کل مقطع سه کندرول به این شکل وجود دارد که دارای مرز مشخصی هستند و در کل ۶۰٪ سطح نمونه را پر می‌کنند. در برخی نقاط به راحتی کندرول الیوین و پیروکسن پورفیری (POP) با یکسری دانه‌هایی که به مرور محو می‌شود، دیده می‌شود (شکل ۳). قطر آن‌ها ۰/۳ میلی‌متر است و دارای حجم ۶۸٪ است برخی از آن‌ها بافت معمولی پورفیری با نام POP (کندرول پورفیری تشکیل شده از الیوین و پیروکسن) را نشان می‌دهند. کندرول‌های این مقطع میکروسکوپی در هر یک سانتی‌متر مربع ۲ عدد است که از الیوین اسپینفکس و یا پیروکسن بلوری و یا تلفیقی از این دو کانی است که دارای مرز تدریجی، گاهی مشخص است و با ۱۴٪ ماتریکس فلزی همراه شده است. در برخی دیگر قطر کانی‌ها که جزء کندرول‌های شهاب سنگ هستند، ۰/۳ میلی‌متر است. اکثر کندرول‌های این مقطع به صورت کندرول درون کندرول در زمینه ماتریکس فلزی با ۱۲٪ است (۴ کندرول در یک سانتی‌متر مربع) و ۶۵٪ سطح نمونه را پر کرده است. در این نمونه میکروسکوپی کندرول با مرز نیمه‌مشخص مشهود است. حجم کندرول معمولی و کندرول مرکب در این نمونه ۸۰٪ است و کندرول این مقطع با مرزی کاملاً مشخص (۵ کندرول در یک سانتی‌متر مربع) که با هاله‌ای از کریپتوکریستالین‌ها احاطه شده است (Rim) دارای اندازه ۰/۱ میلی‌متر، در زمینه ماتریکس قرار دارد که تماماً فلزی با فراوانی ۱۱٪ است (شکل ۶). کندرول مرکب با قطر ۰/۰۲ در نمونه دیگر که متشکل از الیوین است در کندرولی با کانی پیروکسن محصور (BP) است. برخی از الیوین‌های دانه‌ای (GO) که در کندرول‌ها جای دارند، دارای بافت اسپینفکس هستند و در این نوع الیوین‌ها جهت هر تیغه با دسته دیگر تیغه‌ها یکی نیست و هر کدام از تیغه‌ها جهت‌گیری خاص خود را دارند (شکل ۶). در برخی از کندرول‌ها شکستگی‌های موازی دیده می‌شود که دگرگونی S<sub>2</sub> را یادآور می‌شود (شکل ۶) [2][1].

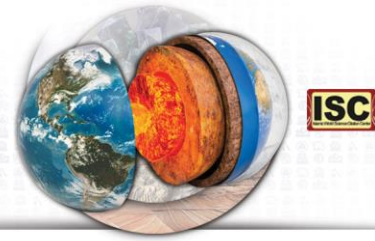


شکل ۱. نمونه KM97002 کندرول با مرز کاملاً مشخص و بسته که بافت شعاعی پیروکسن و الیوین (ROP) دارد و تجمع ذرات کریپتو کریستالین که RIM تشکیل داده‌اند.

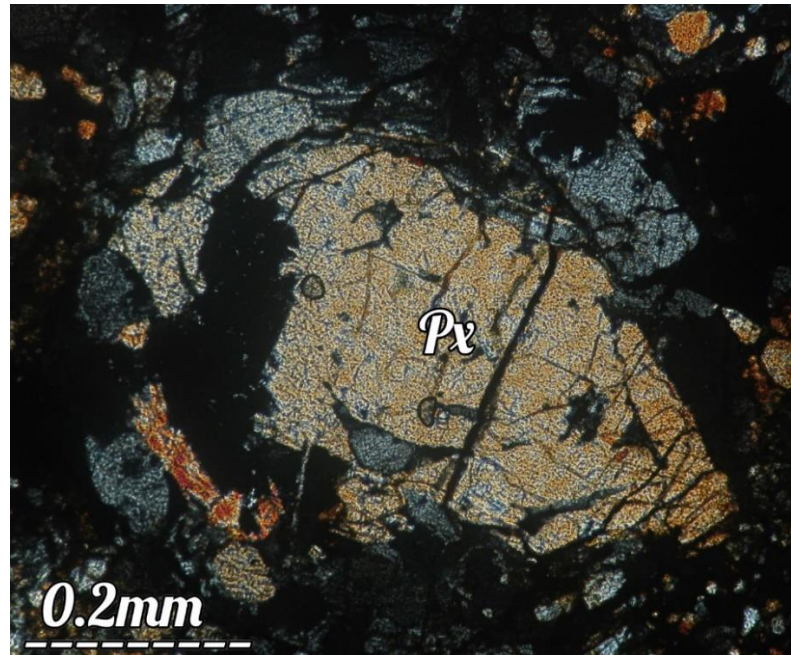


شکل ۲. نمونه KM97002 پیروکسن اسپینفکس محصور (BP) با کانی اپک به صورت تیغه‌ای، شکستگی‌های صفحه‌ای در کانی پیروکسن مشهود است.

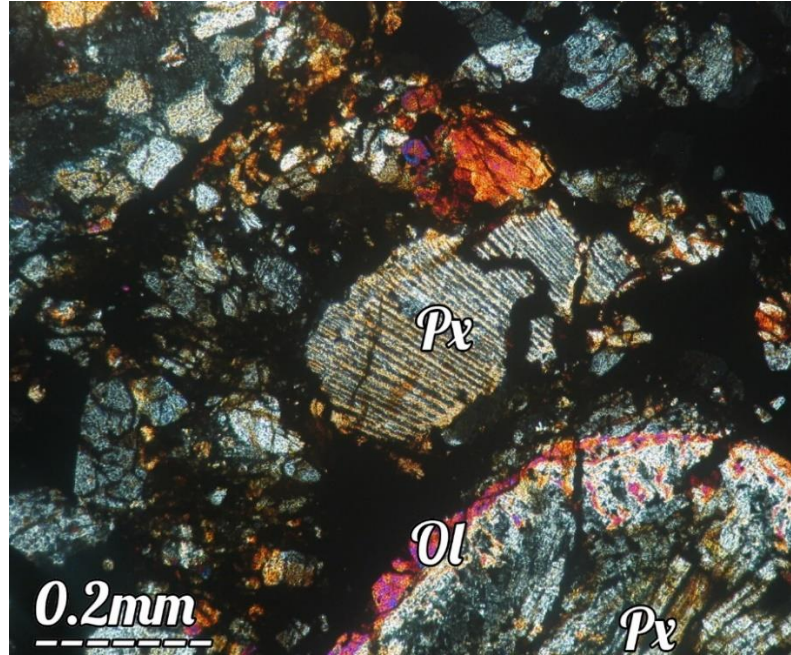




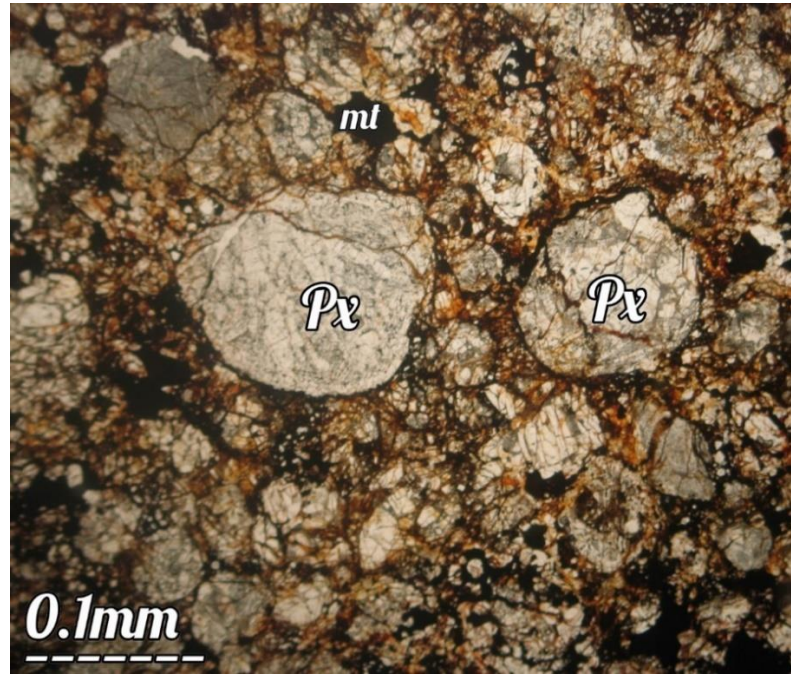
شکل ۳. نمونه KM97003 کانی پیروکسن در زمینه ماتریکس فلزی.



شکل ۴. نمونه KM97008 کاندروول که با کانی پیروکسن پر شده است.



شکل ۵. نمونه KM97008 کانی پیروکسن داخل کندرول و دارای بافت اسپینفکس است، در کنار کندرول با کانی پیروکسن که با الیوین محاصره شده است.



شکل ۶. نمونه KM970010 کندرول با کانی پیروکسن محصور (BP) در زمینه ماتریکس در نور عادی.

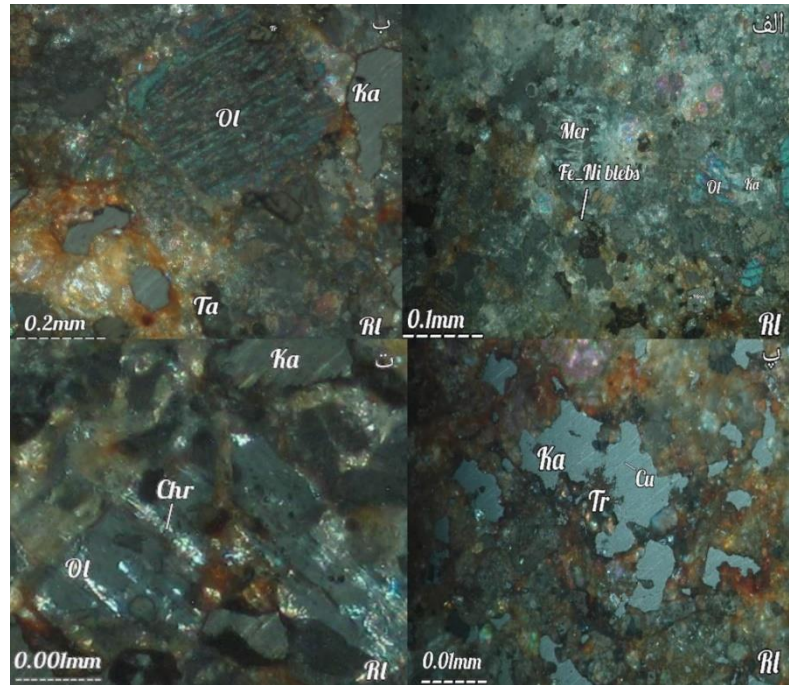
#### ۴. بررسی میکروسکوپی کندریت‌های KM9700 در نور انعکاسی

مطالعه کانی‌های ایک از این جهت مورد اهمیت قرار دارد که تاریخچه حرارتی شهاب سنگ‌ها را در خود ثبت کرده است. فازهای فلزی کروی شکل موجود در برخی از کانی‌های سیلیکاته شهاب سنگ‌های شهاد عاملی برای به وجود آمدن قطرات مایعی است که از یک ساختار متبلور شده اولیه با سرعت خنک‌شدگی یکسانی از ذوب‌شدگی Fe-Ni-S در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد به یادگار مانده است و شبیه بافت‌های موجود در شهاب سنگ تیشیتز (Tieschitz) است [11] [12]. چندین مجموعه در OC از فلز Fe-Ni همراه با ترولیت تشکیل شده است. در حالی که به نظر می‌رسد تعداد زیادی دانه‌های بزرگ فلز Fe-Ni که در بخش‌های صیقلی دیده می‌شوند فاقد سولفید هستند، ممکن است بسیاری (یا اکثر) این فلزات در واقع به ترولیت در بعد سوم در قسمت قاعده متصل شده باشند. از طرف دیگر، به نظر می‌رسد بسیاری از دانه‌های کرومیت مونومیرالیک هستند، در حالی که برخی دیگر با کاماسیت یا ترولیت در هم تنیده شده‌اند. تقریباً ۱٪ از کندرول‌ها بر روی سطوح خود فرورفتگی‌های مقعری شکل نشان می‌دهند که اغلب به عنوان دهانه شناخته می‌شوند. برخی از این فرورفتگی‌ها تا حدی با فازهای ایک پر شده‌اند، معمولاً فلز و ترولیت که به نظر می‌رسد در اثر نیروی گریز از مرکز در حالی که کندرول‌ها در حال چرخش و تا حدی مذاب بودند به بیرون پرتاب شدند و طی این رخداد، این فرورفتگی‌ها حاصل شد. ترولیت، کاماسیت و تائیت اجزای تشکیل‌دهنده شهاب سنگ معمولی هستند و معمولاً در سیلیکات‌های فرومیزین، در ماتریکس و در تجمعات فلزی و سولفیدی حضور دارند (شکل ۷). کانی‌های ایک ۲۰٪ از شهاب سنگ KM9700 را شامل شده است که عبارت است از ترولیت که از دانه‌های Fe, Ni تشکیل شده و فلزات کرومیت، مریلیت، پنتلندیت و مس که به مقدار کم است. کرومیت‌ها در اکثر نواحی مقاطع میکروسکوپی حضور دارد و یک طرح منحصر به فردی از آرایش نامنظم با اندازه ۵-۲ میکرومتر دارند و از دیگر فازهای ایک یا فلزات و ترولیت‌ها تجمع یافته‌اند. همچنین کرومیت در این شهاب سنگ‌ها به عنوان جزء کوچک <math>0.3</math> میکرومتر در کندرول و بلورهای الیوبن جای دارد (شکل ۸). سیلیکات‌های مافیک حاوی Fe, Ni (به صورت ادخال) و تکه‌های کوچک کاسه‌ای مانند از

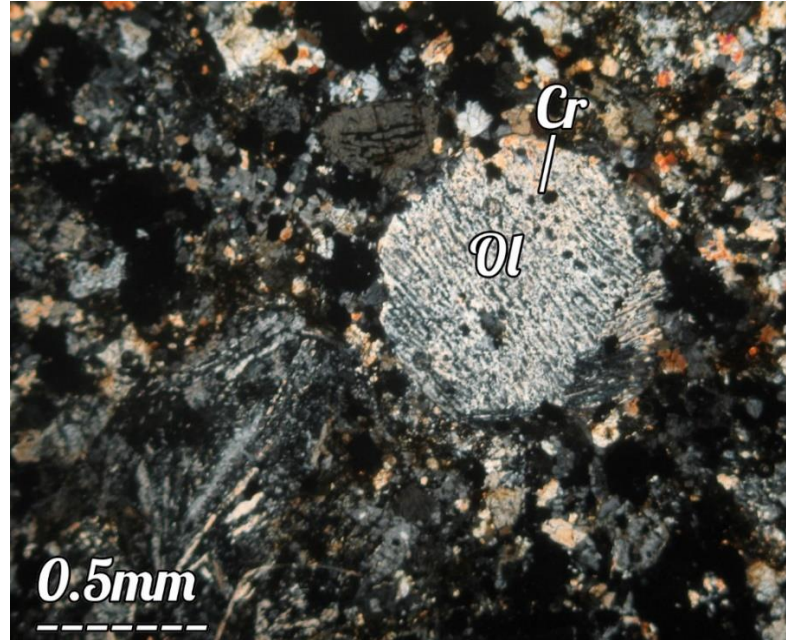




کرومیت‌ها هستند، همانند ادخال‌های کرومیت در شهاب سنگ‌های معمولی که پس از برخورد با زمین گزارش شده است. کاماسیت را می‌توان در کانی‌های دانه درشت (تا قطر ۱ میلی‌متر) و همچنین در دانه‌های بسیار ریز کانی (۱/۵-۰/۱ میکرومتر)، در کنار برخی کندرول‌ها و فقط در ماتریکس مشاهده کرد. کانی‌های بزرگ حاشیه بسیار نامنظمی دارند و برخی از آن‌ها مراحل رشد کندریت معمولی H را نشان می‌دهند و شاید حاوی ادخال الیوین و یا موارد دیگر مانند مس طبیعی باشند. تائینیت تمایل کم‌تری نسبت به کاماسیت در تشکیل دانه‌های کوچک‌تر برای تجمعات ترولیت، کاماسیت و تتراتائینیت دارد. مناطق غنی از Ni شناسایی شده به عنوان تائینیت شفاف (تتراتائینیت) که توسط تائینیت احاطه شده است با مقادیر بالای Ni ( $50 \pm \text{wt}\%$ ) که در لبه جمع شده است و کمی هم از آن در مرکز داریم ( $30 \pm \text{wt}\%$ ). تتراتائینیت به صورت دانه‌های ۵-۵۰ میکرومتر، در برخی مناطق دارای رینگ‌های ۱ تا ۲۰ میکرومتری بر روی دانه‌های تائینیت است و بعضی مواقع با دانه‌های ترولیت همراه است (شکل ۷). در این کندریت‌ها (شهاب سنگ‌های شهاد) کاماسیت و تائینیت هم به صورت درهم‌رشدی بوده و هم شکل‌گیری فاز پلسیت (Plessite) را برعهده دارند [10] [13]. ترولیت از دیگر فازهای فلزی کمی بزرگ‌تر است و می‌تواند با اندازه‌های ۲۰-۱ میکرومتر دیده شود. در مورد کرومیت هم این قضیه برقرار است. برخی مواقع مقاطع میکروسکوپی پلی‌سوماتیک، حاشیه‌های الیوین ریزدانه، پیروکسن و فازهای اپک در یک ماتریکس شیشه‌ای را به نمایش می‌گذارد. تائینیت زونه بسیار مورد توجه قرار می‌گیرد زیرا پروفیل‌های نیکل برای محاسبه متالوگرافی نرخ عامل خنک‌کننده کاربرد دارد [11]. تتراتائینیت (که با ترتیب دادن اتم‌های Fe و Ni در تائینیت تشکیل می‌شود) رینگ‌ها را در اطراف دانه‌های تائینیت کندریت‌ها در دمای زیر ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد ایجاد می‌کند و عامل خنک‌سازی آهسته است [11]. تائینیت در شهاب سنگ‌های شهاد بالاترین میزان نیکل را در لبه ( $50 \pm$  درصد وزنی) و کم‌ترین میزان آن را در مرکز (۳۰ درصد وزنی) نشان می‌دهد. فازهای آهن و نیکل در این شهاب سنگ‌ها یک روند عادی از خنک‌شدگی کندریت معمولی را نشان می‌دهند. تتراتائینیت در مرز کاماسیت و زونینگ تائینیت از آهن و نیکل حاصل می‌گردد. در کندریت‌های معمولی، مس فلزی در مقایسه با آلیاژ فلزی Fe-Ni فراوانی کم‌تری دارد، این قضیه در چندین مجموعه پتروگرافی موجود است [11] [14] [15] [16] [17]. در شهاب سنگ شهاد، مس فلزی به اندازه ۱/۶-۰/۱ میکرومتر، محصور در فلز Fe-Ni است و یا در مجاورت دانه‌های کوچک ترولیت داخل تائینیت است. این نوع مجموعه نامنظم به عنوان شایع‌ترین رخداد در کندریت‌های معمولی گزارش می‌شود و ممکن است در اثر شوک ذوب و یا شوک موضعی ذوب ایجاد شده باشد [14]. تأثیرات شوک دگرگونی بر یک مجموعه فلزی مانند ترولیت شهاب سنگ KM9700، بر اساس وجود شکستگی‌های مسطح در الیوین، شکستگی‌های نامنظم و وجود رگه‌های نازک و اپک مشکی رنگ در نمونه‌دستی به شوک مرحله دگرگونی S<sub>2</sub> مربوط می‌شود. ذرات نیز ممکن است با اثرات شوک همراه باشد و ترولیت پلی‌کریستالی، مس فلزی، کروم و ترکیبات Fe-Ni در الیوین از بقیه ویژگی‌های این شوک است [11] [14].



شکل ۷. بررسی کانی‌های اپک کاندزیت‌های شه‌داد  
 در نور انعکاسی. الف) کاندزیت KM97002؛  
 بلورهای بسیار ریز مرلیت در کانی الیوین؛  
 ادخال‌های کروی فلزات Fe-Ni در کانی‌های  
 الیوین و پیروکسن. ب) کانی فلزی کاماسیت در کنار کانی الیوین اسپینفکس در کاندزیت KM97001؛ در پایین تصویر کانی تائینیت با انعکاس  
 داخلی ضعیف. پ) کاندزیت KM97007 ادخال‌های کروی شکل مس در کاماسیت در کنار ترولیت. ت) کاندزیت KM970019 که دارای  
 ادخال‌های فلز کرومیت در کانی الیوین است.



شکل ۸. ذرات کرومیت که به صورت دانه تسبیحی در تصویر دیده می‌شود.

#### ۱.۴. بررسی میکروسکوپی بخش ماتریکسی کندریت KM9700

ماتریکس ریزدانه در OC عمدتاً از دانه‌های الیوین به اندازه ۰.۱ میکرومتر ( $91 \sim Fa$ ) و دانه‌های تا حدودی درشت‌تر از پیروکسن با کلسیم کم، پلاژیوکلاز آلبیتیک تشکیل شده است. فلز Fe-Ni (کاماسیت، تائینیت)، ترولیت، کرومیت، مرلیت است که نسبت آن از کندریتی به کندریت دیگر متفاوت است. قطعات کندرول، ذرات سیلیکات جدا شده و میکروکندرول‌های کمیاب نیز در ماتریکس وجود دارند. ماتریکس کریپتوکریستالین در کندریت شهداد ۳٪ از شهاب سنگ را شامل می‌شود و در زمینه اپک، ماتریکس فلزی با حجم ۱۴-۱۰٪ وجود دارد که به صورت پراکنده در سطح نمونه میکروسکوپی است. در این کندریت‌ها بخش ماتریکسی شامل تجمعات سنگ‌های ریزبلور که فضای بین کندرول و قطعات کریستالی را پر کرده است و بخش اصلی ماتریکس کریپتوکریستالین در اطراف کندرول‌ها به صورت حلقه‌ای (Fin grain Rim) تشکیل شده است [2] [1].

#### ۲.۴. دیگر بخش‌های فاز کانیاپی اپک

مذاب‌های فلز-سولفید و سیلیکات در بدنه سیارک مادر به طور کامل با هم مخلوط نمی‌شوند. هنگامی که کندریت‌های معمولی تحت ذوب ضربه‌ای قرار می‌گیرند، دانه‌های فلزی ریز تمایل به انعقاد و جدا شدن از مذاب سیلیکاته را دارند. این فرآیند می‌تواند منجر به نتایج مختلفی شود: فلز و سولفید می‌توانند به شکل ندول‌های گرد پراکنده به اندازه سانتی‌متر جامد شوند، همانطور که در سنگ مذاب ضربه‌ای کندریت L - PAT 91501 مشاهده شد (به عنوان مثال، [18]) و یا در موارد منحصربفردی سنگ مذاب کندریتی LL (LAR 06299) که به سرعت سرد



می‌شود [19]، قطرات فلز و سولفید به میدان گرانشی سیارک پاسخ داده و خود را با حباب‌های گاز (وزیکول‌ها) هم‌تراز می‌کنند (بر اساس چگالی، حباب‌ها در بالا، ترولیت در وسط و آهن فلزی در پایین ذوب می‌شود).

جدول ۱.

Gas bubble ( $\rho < 0.001 \text{ g cm}^{-3}$ )	↑ UP
troilite ( $\rho = \sim 4.7 \text{ g cm}^{-3}$ )	
metallic-Fe-Ni ( $\rho = \sim 8.0 \text{ g cm}^{-3}$ )	↓ DOWN

گروه‌های کانیایی موجود در کندریت‌های معمولی بدون تغییر عبارتند از Fe-Ni فلزی (شامل کاماسیت، تائیت، تترائائیت و اووارویت در برخی از کندریت‌های بسیار اکسید شده LL)، سولفید (عمدتاً ترولیت، اما در برخی موارد جزئی، پنتلانیدیت و ماکینویت) و اکسیدها (عمدتاً کرومیت با ایلمنیت و روتیل به صورت فرعی، در چند کندریت LL بسیار اکسید شده، مگنتیت). با افزایش حالت اکسیداسیون ( $H < L < LL$ )، فراوانی Fe-Ni فلزی کاهش می‌یابد، نسبت تائیت به کاماسیت افزایش می‌یابد، اندازه دانه کاماسیت متوسط کاهش می‌یابد، محتوای کاماسیت افزایش می‌یابد و نیکل موجود در کاماسیت کاهش می‌یابد. بسیاری از کندریت‌های معمولی شوکه شده حاوی دانه‌های کوچک مس فلزی هستند که اغلب در حد فاصل بین آهن و نیکل فلزی و دانه‌های کوچک و نامنظم ترولیت یافت می‌شوند. مس فلزی همچنین در موارد ندری بین آهن نیکل فلزی و ترولیت در رگه‌های شوکه شده و همچنین در سطح مشترک بین حباب‌های فلزی و ترولیت در اطراف مجموعه‌های سولفید فلزی که به سرعت سرد می‌شوند، وجود دارد. رگه‌های شوک فلزی Fe-Ni ترولیت در بسیاری از کندریت‌های معمولی شوکه شده با ضخامت‌های متفاوت از  $> 1$  تا  $< 100$  میکرومتر وجود دارد. این رگه‌ها اغلب حاوی حباب‌های کوچکی از فلز و ترولیت هستند. این پدیده که به عنوان (تاریک شدن شوک) یا (تیره شدن سیلیکات) شناخته می‌شود، می‌تواند تیرگی سیلیکات‌ها را به میزان قابل توجهی افزایش دهد و در نتیجه کندریت‌های سیاه را حاصل کند. بسیاری از کندریت‌های معمولی شوکه شده نیز حاوی رگه‌های باریک کرومیت هستند که در سه نوع دسته‌بندی می‌شوند: (۱) نوارهای کرومیت دراز نازک و پیوسته. (۲) دانه‌های کرومیت ریز گرد و مستطیلی ناپیوسته و (۳) دانه‌های کرومیت ریز گرد و مستطیلی ناپیوسته با پلاژیوکلازهای پراکنده یا شیشه ترکیبی پلاژیوکلاز. با بررسی نسبت‌های مودال این فاز که می‌تواند تا ۱:۵۰ برسد و بسیار بیشتر از نسبت اوتکتیک ۱:۷،۵ است، از طرفی بافت این مناطق نیز غنی از ترولیت است و بیانگر این است که فاز سولفیدی از سیالی با ویسکوزیته بسیار کم، احتمالاً بخار  $S_2$  طی تبخیر ترولیت ناشی از شوک تشکیل شده است [12].

## ۵. نتیجه‌گیری

در این مطالعه پس از تهیه مقاطع میکروسکوپی نازک و صیقلی و مطالعه آن‌ها در نور پلاریزه و انعکاسی، با بررسی‌های انجام شده پیشین [1] [2] قطعات این شهاب سنگ که از نوع کندریت معمولی  $H_4$  است، متعلق به بدنه سیارک مادر اِروس است که با توجه به شواهد کانیایی که ذکر شد، افزایش حرارت که عامل آن می‌تواند به این دو مورد (دو منبع گرمای اولیه) که احتمالاً منجر به دگرگونی و ذوب شهاب‌سنگ‌ها شده‌اند، برگردد: (۱) فروپاشی رادیونوکلیدهای کوتاه‌مدت مانند  $^{26}Al$  (با نیمه‌عمر تقریباً ۷۱۷۰۰۰ سال) و (۲) گرمایش حاصل از برخورد. می‌توان تصور کرد که هر دو مکانیسم نقش مهمی داشتند. به عنوان مثال، برخورد سیارک‌هایی را که قبلاً توسط واپاشی  $^{26}Al$  گرم شده بودند، گرم کرده است. سایر مکانیسم‌های پیشنهادی گرمایش سیارکی (مانند واکنش‌های شیمیایی گرم‌مازا، فشرده‌سازی آدیاباتیکی گاز سحابی، رویدادهای اتصال مجدد انفجاری در سحابی، القای الکترومغناطیسی در باد شدید خورشیدی اولیه) در حال حاضر حامیان کمی دارند. طی تکاملات حرارتی بدنه



مادر کاهش دما و خنک‌شدگی را نیز تجربه کرده است که در اثر آن با توجه به شواهد موجود که عبارت است از فاز سولفیدی که حاصل شوک دگرگونی است (طی برخورد)، ضربات مربوط به پرتابه‌های معلق بین سیاره‌ای است که به بدنه سیارک مادر (از جنس کندریت) با تخلخل بالا برخورد کرده و برخلاف اندازه کوچک خود به اندازه کافی مذاب حاصله از برخورد را تا عمق زیاد مدفون می‌کند و موجب خنک‌شدگی موضعی می‌گردد. از دیگر شواهد کاهش دما می‌توان به تتراتائیت اشاره کرد (Rings) که عاملی مهم جهت خنک‌سازی آهسته نیز شناخته شده است.

### منابع

- [1] محمودی، ش.، بوئینی، م.، (۱۳۹۹). طبقه‌بندی مورفولوژیکی و کانی‌شناسی شهاب‌سنگ‌های شهداد. کنگره بین‌المللی علوم زمین، تهران، ایران.
- [2] بوئینی، م.، محمودی، ش.، (۱۴۰۰). پترولوژی و ژئوشیمی سنگ کل شهاب‌سنگ‌های شهداد. مجله کانی‌شناسی و بلورشناسی ایران، ۱۷۸-۱۶۵.
- [3] بوئینی، م.، محمودی، ش.، (۱۴۰۱). مجموعه کانی‌های دما-فشار بالا در شهاب‌سنگ‌های شوکه شده شهداد. اولین همایش گوهرسنگ ایران، البرز، ایران.
- [4] Nakamura T., Noguchi T., Tanaka M., Zolensky, M. E., Kimura, M., 2011. Itokawa dust particles: A direct link between S-type asteroids and ordinary chondrites. *Science*, 333, 1113-1116.
- [5] Vernazza, P., Zanda, B., Nakamura, T., Scott, E., Russell, Sara., 2014. The Formation and Evolution of Ordinary Chondrite Parent Bodies.
- [6] Taylor, G. J., Maggiore, P., Scott, E. R. D., Rubin, A. E., Keil, K. 1987. Original structures, and fragmentation and reassembly histories of asteroids - Evidence from meteorites. *Icarus*, 69, 1-13.
- [7] Scott, E. R. D., Krot, T. V., Goldstein, J. I., Taylor, G. J. 2011. Thermal and impact history of H chondrites: was the onion-shell punctured by impacts during metamorphism? *Meteoritics and Planetary Science*, Abstr. 5516. 74th Annual Meteoritical Society Meeting.
- [8] Scott, E. R. D., Krot, T. V., Goldstein, J. I., Herzog, G. F. 2013. Impact and Thermal History of the H Chondrite Parent Body Inferred from Fe-Ni Metal and Ar/Ar Ages. *Meteoritics and Planetary Science*, Abstr. 5346. 76th Annual Meteoritical Society Meeting.
- [9] Scott, E.R.D., Krot, T.V., Goldstein, J.I., Wakita, S. 2014. Thermal and impact history of the H chondrite parent asteroid during metamorphism: Constraints from metallic Fe-Ni. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 136, 13-37.
- [10] Gattacceca, J., Valenzuela, M., Uehara, M., Jull, A. J. T., Giscard, M., Rochette, P., Braucher, R., Suavet, C., Gounelle, M., Morata, D., Munayco, P., Bourrot-Denis, N., Bourles, D., Demory, F., 2011. The densest meteorite collection area in hot deserts: The San Juan meteorite field (Atacama Desert, Chile) *Meteoritics and Planet. Sci.*, 46, 1276- 1287.
- [11] Matt, S., 2014. Absurd Creature of the Week: The Incredible Critter That's Tough Enough to Survive in the vacuum of Space. *Wired*. Retrieved 2014-03-21.
- [12] Rubin, A., Ma, C. 2021. *Meteorite mineralogy*. 435. ISBN 978-1-108-48452-7 Hardback



- [13] Zhong, H. H., Jiang, L. J., Yang, X. H. 1990. A preliminary study of the micro-elements in the Suizhou meteorite. In: A synthetical study of Suizhou meteorite. Publishing House of the China University of Geosciences, Wuhan, pp 74– 77 (in Chinese).
- [14] Rubin, A. E., Kallemeyn, G. W., 1994. Pecora Escarpment 91002: a member of the Rumuruti (R) chondrite group. *Meteoritics* 29, 255–264.
- [15] Rubin, A. E. 1983. Impact melt-rock clasts in the Hvittis enstatite chondrite breccia: Implications for a genetic relationship between EL chondrites and aubrites. *Proceedings of the Fourteenth Lunar and Planetary Science Conference*, B293–B300.
- [16] Rubin, A. E., Ulf-Møller, F., Wasson, J. T., and Carlson, W. D. 2001. The Portales Valley meteorite breccia: Evidence for impact-induced melting and metamorphism of an ordinary chondrite. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 65, 323–342.
- [17] Ruzicka, A., Killgore, M., Mittlefehldt, D. W., Fries, M. D. 2005 Portales Valley: Petrology of a metallic-melt meteorite breccia. *Meteoritics & Planetary Science* 40, 261–295.
- [18] Mittlefehldt, D. W., Lindstrom, M. M. 2001. Petrology and geochemistry of Patuxent Range 91501, a clast-poor impact melt from the L-chondrite parent body and Lewis Cliff 88663, an L7 chondrite. *Meteoritics & Planetary Science* 36, 439–457.
- [19] Rubin, A. E. 2011. Origin of the differences in refractory-lithophile-element abundances among chondrite groups. *Icarus* 213, 547–558.