

*Research Article***Petrography, Geochemistry and classification of chondritic meteorites found in Shahdad desert, Dashte-e Lut****Shahryar Mahmoudi\*<sup>1</sup> , Mohamad Roofchae<sup>1</sup>, Hojat Kamali<sup>2</sup>**

1-Department of Geochemistry, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University of Tehran, Iran

2-Iran meteorite museum, Tehran, Iran

Received: 10 Mar 2024 Accepted: 21 Jul 2024

**Extended Abstract****Introduction**

Meteorites are of interest to researchers as materials that have stored the history of the creation of the universe. However, the petrology of meteorites has received less attention in our country. In this research, two pieces of meteorites discovered in the Shahdad desert, located in the southwest of Lot Valley, have been subjected to petrographic and geochemical studies. The report of the discovery of this meteorite in 2018 was recorded in the World Bulletin. At present, there is a considerable diversity of topics within meteorite research. In addition, extensive petrographic and geochemical studies are being conducted in the field of classification and petrology of these rocks. In general, extensive and specialized research in this field is carried out in most of the world's leading universities, including European and American scientific centers (e.g., the Meteorite NASA Center and the G-Time Laboratory of the University of Brussels). The studied meteorite is also the largest chondritic meteorite discovered in Iran. This makes the subject of this study particularly important from the research point of view. The primary objective of this research is the petrographic and geochemical classification of the meteorite. Two pieces of the meteorite, which constitute a portion of a larger meteorite with an estimated mass of approximately 90 kg, were discovered in an area spanning 5 square kilometers in the western region of the Lut Desert and in the vicinity of Shahdad City in Kerman Province.

**Materials and Methods**

The hand sample of meteorites from the Lut Desert in Iran displays a surface that is completely dark in color, ranging from dark brown to black. It contains regmaglypts and tension fractures resulting from impact with the Earth's surface. A thin melted crust, measuring 0.1 millimeters in diameter, covers the sample's surface. This crust reveals a fresh stone surface with a light brown color and gray to light brown speckles. The chondrules, which are known to be speckles, have a diameter ranging from 0.2 to 0.5 millimeters, with a density of 60 to 75 percent of the hand sample's surface (Figure 3 a).

**Citation:** Mahmoudi, Sh., Roofchae, M. and Kamali, H., 2024. Petrography, Geochemistry and classification of chondritic meteorites, *Res. Earth. Sci.*: 15(3), (74-90) DOI: 10.48308/esrj.2024.104719

\* Corresponding author E-mail address: shahryar.mahmoudi@gmail.com





The thin 0.1 mm diameter melt shell covers almost the entire surface of the sample. The presence of pyroxene and olivine compounds in the studied meteorite indicates that this sample belongs to the group of ordinary chondrites (OC) and is classified in the group of L and LL chondrites. The internal texture of the chondrules suggests that this meteorite belongs to the POP and BO groups, which are associated with meteorites that experienced high temperatures and cooling rates of 1000 to 1500 degrees per hour. Three pieces of this rock were crushed and powdered by hand for the purposes of chemical analysis.

### Results and Discussion

The presence of pyroxene and olivine compounds in the studied meteorite indicates that this sample belongs to the group of ordinary chondrites (OC) and is classified in the group of L and LL chondrites. The internal texture of the chondrules indicates that it belongs to the POP and BO group, which is related to meteorites with high temperature and cooling rates of 1000 to 1500 degrees per hour. The diagram of Al/Mn vs. Zn/Mn ratio (Figure 6) illustrates the locations of different types of common chondrites and typical examples of chondrites (known chondrites from around the world) (Kallemeyn et al, 1991, 1994, 1996, 1978, 1989; Kallemeyn and Wasson, 1982). The blue circles in this figure represent the Shahdad meteorite. The composition of the silicates and the chondrule boundaries of the studied meteorite indicate a fourth type of petrology. Given the absence of visible oxidation of metal or sulfide in the sample and the presence of a lemon-colored spectrum, it can be inferred that the degree of weathering is W0. In the majority of the examined sections of olivine crystals, a series of planar and irregular fractures on the olivine surface and plate fractures in the pyroxene mineral can be observed, which is indicative of remelting.

### Conclusion

According to the comparison of column charts of trace elements related to Shahdad meteorites with typical Antonin chondrites (L4-5). The composition of the elements of these two groups of meteorites are similar with a slight difference, which is a confirmation of the common chondrite of the L5 type of Shahdad meteorites. The classification of Shahdad meteorites by geochemical diagrams based on the amount of silica and alkaline elements and the diagram of alkaline elements (Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O) versus silica indicates that Shahdad meteorites are alkaline. According to all the available evidence, the body of the mother asteroid of L5 Shahdad chondritic meteorites is a normal chondrite S asteroid type.

**Keywords:** Meteorite petrography, Asteroids, Classification of chondrites, Chondrite, Shahdad desert.



## پetroگرافی و ژئوشیمی و طبقه‌بندی شهاب‌سنگ کندریتی یافت شده در کویر شهداد، دشت لوت

شهریار محمودی\*<sup>۱</sup>، محمد روفچاهی<sup>۱</sup>، حجت کمالی<sup>۲</sup>

۱- گروه ژئوشیمی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

۲- موزه شهاب سنگ‌های ایران، تهران، ایران

(پژوهشی) دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۲۰ پذیرش نهایی مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۳۱

### چکیده گسترده

#### مقدمه

شهاب‌سنگ‌ها به‌عنوان موادی که تاریخ خلقت جهان را ذخیره کرده‌اند، مورد توجه محققان هستند. این در حالی است که سنگ‌شناسی شهاب‌سنگ‌ها در کشور ما کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق دو قطعه شهاب سنگ کشف شده در کویر شهداد واقع در جنوب غربی دره لوت مورد بررسی‌های پتروگرافی و ژئوشیمیایی قرار گرفته‌اند. گزارش کشف این شهاب سنگ در سال ۲۰۱۸ در بولتن جهانی ثبت شده است. در حال حاضر، تنوع قابل توجهی از موضوعات در تحقیقات شهاب سنگ وجود دارد. علاوه بر این، مطالعات گسترده پتروگرافی و ژئوشیمیایی در زمینه طبقه‌بندی و سنگ‌شناسی این سنگ‌ها در حال انجام است. به‌طور کلی، تحقیقات گسترده و تخصصی در این زمینه در اکثر دانشگاه‌های مطرح جهان، از جمله مراکز علمی اروپایی و آمریکایی (به‌عنوان مثال، مرکز شهاب سنگ ناسا و آزمایشگاه G-Time دانشگاه بروکسل) انجام می‌شود. شهاب‌سنگ مورد مطالعه همچنین بزرگترین شهاب سنگ کندریتی کشف شده در ایران است. این امر موضوع این پژوهش را از نظر علمی اهمیت ویژه‌ای می‌بخشد. هدف اصلی این تحقیق طبقه‌بندی پتروگرافی و ژئوشیمیایی این شهاب‌سنگ است. دو قطعه از این شهاب سنگ که بخشی از یک شهاب سنگ بزرگتر با جرم تخمینی ۹۰ کیلوگرم را تشکیل می‌دهد، در منطقه‌ای به وسعت ۵ کیلومتر مربع در بخش غربی کویر لوت و در مجاورت شهر شهداد در استان کرمان کشف شده است.

#### مواد و روش‌ها

نمونه دستی شهاب‌سنگ‌های کویر لوت در ایران، سطحی کاملاً تیره از قهوه‌ای تیره تا سیاه را نشان می‌دهد. این شامل رگماکلیپت‌ها و شکستگی‌های کشتی ناشی از برخورد با سطح زمین است. یک پوسته نازک ذوب شده، به قطر ۰/۱ میلی‌متر، سطح نمونه را می‌پوشاند. این پوسته یک سطح سنگی تازه را با رنگ قهوه‌ای روشن و لکه‌های خاکستری تا قهوه‌ای روشن نشان می‌دهد. کندرول‌ها که به لکه‌ها معروف هستند، قطری بین ۰/۲ تا ۰/۵ میلی‌متر دارند و چگالی آن بین ۶۰ تا ۷۵ درصد سطح نمونه دستی است (شکل ۱). پوسته مذاب نازک با قطر ۰/۱ میلی‌متر تقریباً تمام سطح نمونه را می‌پوشاند. وجود ترکیبات پیروکسن و الیون در شهاب سنگ مورد مطالعه نشان می‌دهد که این نمونه از گروه کندریت‌های معمولی OC بوده و در گروه کندریت‌های I و H طبقه‌بندی می‌شود.

استناد: محمودی، ش.، روفچاهی، م. و کمالی، ح.، ۱۴۰۳. پتروگرافی و ژئوشیمی و طبقه‌بندی شهاب‌سنگ کندریتی یافت شده در

کویر شهداد، پژوهشهای دانش زمین: ۱۵ (۳)، (۹۰-۷۴)، DOI:10.48308/esrj.2024.104719

E-mail: shahryar.mahmoudi@gmail.com

\* نویسنده مسئول





بافت داخلی کندرولها حاکی از آن است که این شهاب سنگ متعلق به گروه‌های POP و BO است که با شهاب سنگ‌هایی همراه است که دمای بالا و سرعت خنک کننده ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ درجه در ساعت را تجربه کرده‌اند. سه قطعه از این سنگ به منظور تجزیه و تحلیل شیمیایی با روش دستی خردایش و آزمایش شده است.

### نتایج و بحث

وجود کانی‌های پیروکسن و الیوین در شهاب سنگ مورد مطالعه نشان می‌دهد که این نمونه از گروه کندریت‌های معمولی OC بوده و در گروه کندریت‌های L و H طبقه‌بندی می‌شود. بافت داخلی کندرولها نشان می‌دهد که متعلق به گروه BO و POP است که مربوط به شهاب سنگ‌هایی با دمای بالا و سرعت سرمایش ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ درجه در ساعت است. نمودار نسبت Al/Mn در مقابل Zn/Mn (شکل ۶) مکان انواع مختلف کندریت‌های رایج و نمونه‌های معمولی کندریت‌ها (کندریت‌های شناخته شده از سراسر جهان) را نشان می‌دهد (Kallemeyn et al, 1991, 1994, 1996, 1978, 1989; Kallemeyn and Wasson, 1982). دایره‌های آبی رنگ در این شکل نمایانگر شهاب سنگ شهادت هستند. ترکیب سیلیکات‌ها و مرزهای غضروفی شهاب سنگ مورد مطالعه نشان‌دهنده نوع چهارم سنگ‌شناسی است. با توجه به عدم اکسیداسیون قابل مشاهده فلز یا سولفید در نمونه و وجود طیف لیمویی رنگ، می‌توان استنباط کرد که درجه هوازدگی W0 است. در اکثر مقاطع بررسی شده از کریستال‌های الیوین، یک سری شکستگی‌های مسطح و نامنظم در سطح الیوین و شکستگی‌های صفحه‌ای در کانی پیروکسن مشاهده می‌شود که نشان دهنده ذوب مجدد است.

### نتیجه‌گیری

با توجه به مقایسه نمودارهای ستونی عناصر کمیاب مربوط به شهاب سنگ‌های شهادت با کندریت‌های معمولی (L4-Antonin) (کازانه شده است. ترکیب عناصر این دو گروه شهاب سنگ‌ها با کمی اختلاف شبیه به هم هستند که این قضیه تأییدی بر کندریت معمولی از نوع L5 بودن شهاب سنگ‌های شهادت است. رده‌بندی شهاب سنگ‌های شهادت به وسیله نمودارهای ژئوشیمیایی که براساس مقدار سیلیس و عناصر آلکان است و نمودار عناصر آلکالی ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ) در مقابل سیلیس آلکالی بودن شهاب سنگ‌های شهادت مشخص است. با توجه به تمام شواهد موجود بدنه سیارک مادر شهاب سنگ‌های کندریتی L5 شهادت، از نوع سیارکی S کندریت معمولی است.

**واژگان کلیدی:** سنگ‌نگاری شهاب سنگ‌ها، سیارک‌ها، طبقه‌بندی کندریت‌ها، کندریت، کویر شهادت.

### مقدمه

از خود بر جای می‌گذارند. برای نمونه دهانه‌های برخوردی شهاب سنگ‌ها در اروپا به صورت رسمی از قرن هجدهم مورد مطالعه و بررسی علمی قرار گرفته‌اند (Norton and Chitwood, 2008). بعلاوه مطالعات پتروگرافی و ژئوشیمیایی وسیعی در زمینه طبقه‌بندی و پترولوژی این سنگ‌ها در جریان است. در مقایسه با معیارهای جهانی در کشور ما در حوزه‌های مختلف علوم زمین مطالعه قابل قبول و همگام با مراکز تحقیقاتی جهانی صورت می‌گیرد، ولی پژوهش‌ها در زمینه علوم شهاب سنگی بسیار محدود

شهاب سنگ‌ها با خود مجموعه‌ای از اطلاعات علمی به همراه دارند که پاسخ‌گوی سؤالاتی از جمله چگونگی توزیع عناصر در منظومه شمسی، منشأ حیات، چگونگی شکل‌گیری کرات و تاریخچه پیش زمین‌شناسی کره زمین هستند. در حال حاضر تنوع موضوعی زیادی در مورد تحقیقات درباره شهاب سنگ‌ها وجود دارد. اغلب شهاب سنگ‌ها که وارد جو زمین می‌شوند، در صورت دارا بودن اندازه مناسب از جو می‌گذرند و در سطح زمین دهانه‌ها و عوارض گوناگونی را

### بلوک لوت

بلوک یا قطعه لوت، همان مفهومی را در بردارد که آن را نام‌گذاری کرده‌اند و شامل آن قسمت از بخش مرکزی ایران می‌شود که در مغرب زون فلیش سیستان و شرق بلوک طبس (ایران مرکزی) واقع است. بلوک لوت توده‌ای کشیده و مستحکم است که طول آن در جهت شمال به جنوب در حدود ۹۰۰ کیلومتر می‌باشد. استحکام و پایداری آن را به تراکم و سخت‌شدگی سنگ‌های دگرگون شده زیر ساخت آن نسبت می‌دهند که در تریاس میانی، بر اثر کوهزایی سمیرین پیشین پدید آمده است. اثرات کوهزایی مذکور، گرچه در تمام ایران جز زاگرس دیده می‌شود ولی در ایران مرکزی و بلوک لوت به ویژه در کوه‌های شتری و شمال ایران شدیدتر بوده است. حرکات تکتونیکی تریاس میانی، علاوه بر چین‌خوردگی شدید، سبب دگرگونی زیاد در این قسمت از ایران شده است، به نحوی که آن را کوهزایی پالئوبلوج نام نهاده‌اند. از مشخصات چینه‌شناسی این بلوک، رسوبات ضخیم مزوزوئیک است که ضخامت آن به بیش از ۵۰۰۰ متر می‌رسد، به ویژه در بخش غربی چین‌های بسیار ملائم داشته و یا تقریباً افقی‌اند. هر قدر به سمت مغرب توجه کنیم، ضخامت سنگ‌های آتشفشانی ائوسن زیادتر می‌شود، به نحوی که ضخامت این سنگ‌ها که شامل ریولیت، داسیت، آندزیت و توف‌های وابسته هستند به حدود ۳۰۰۰ متر هم رسیده است. بلوک لوت شکل نامنظمی داشته و روند ساختمانی آن شمال - جنوبی است و همانطور که گفته شد قطعه‌ی مستحکمی است که توسط کوه‌های شرقی و مرکزی ایران احاطه شده است. در قسمت شمالی، گسل نایبند و ارتفاعات شتری این بلوک را به ۲ قسمت تقسیم می‌کند: بلوک لوت در شرق و بلوک طبس در غرب قرار دارد (Darvishzadeh, 1991). به‌طور کلی موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی این پهنه ساختاری ایران شرایط مناسبی جهت حفظ سنگ‌های آسمانی فراهم می‌کند.

### موقعیت مکانی دشت لوت و شهداد

دشت لوت محدوده جغرافیایی ۵۴/۳۰ تا ۵۷ درجه شرقی و ۳۳/۳۰ تا ۳۵/۳۰ درجه شمالی، بخش اعظمی از کویر مرکزی ایران را تشکیل می‌دهد که در شرق ایران قرار گرفته است. بزرگ‌ترین چاله فلات داخلی ایران دشت لوت است. دشت لوت یکی از خشک‌ترین و گرم‌ترین دشت‌های

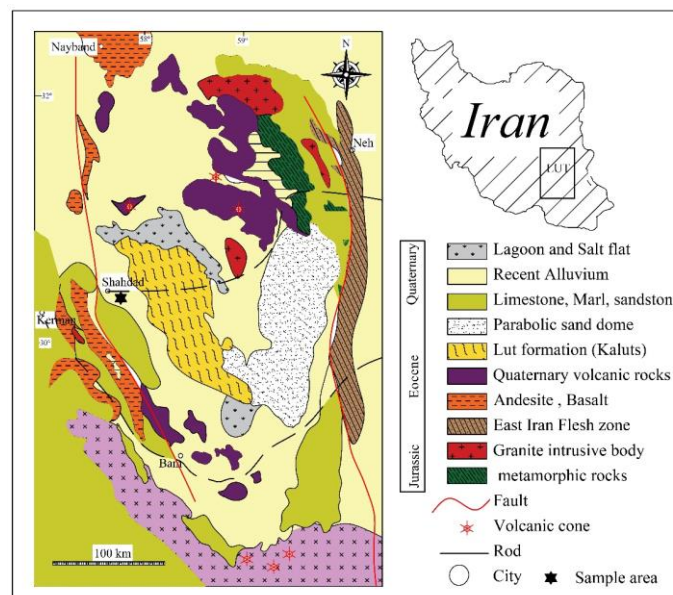
می‌باشند. در نگاه کلی در اکثر دانشگاه‌های تراز اول دنیا پژوهش‌های گسترده و تخصصی در این زمینه در حال اجرا است مانند مراکز علمی اروپا و آمریکا (Meteorite NASA center; G-Time Laboratory of the University of Brussels). بیشتر پژوهش‌های صورت گرفته در حوزه تحقیقاتی شهاب‌سنگ‌ها در ایران درباره نمونه شهاب‌سنگی کشف شده توسط افراد محلی و فاقد مطالعات معمول درباره محل اصابت است (Meteorite impact craters) و معمولاً از محل برخورد آن‌ها اطلاعاتی در دسترس پژوهشگران نیست. در این پژوهش شهاب‌سنگ مورد مطالعه دارای تمامی اطلاعات لازم از محل اکتشاف به همراه ثبت اطلاعات اولیه در بولتن جهانی است. شهاب‌سنگ مورد مطالعه همچنین بزرگترین شهاب‌سنگ کندریتی کشف شده در ایران می‌باشد و کلیه قطعات کشف شده در موزه شهاب‌سنگ ایران در مجموعه فرهنگی برج آزادی تهران نگهداری می‌شود. اگرچه شهاب‌سنگ‌های کندریتی بیش از ۹۵ درصد کل شهاب‌سنگ‌ها را شامل می‌شوند، فراوانی این گروه خاص مورد مطالعه از شهاب‌سنگ‌ها کمتر از ۵ درصد قطعات فروافتاده کندریتی است که از دیدگاه مطالعاتی اهمیت موضوع را دو چندان می‌کند. هدف اصلی در این پژوهش نام‌گذاری و طبقه‌بندی پتروگرافی و ژئوشیمیایی این شهاب‌سنگ می‌باشد.

### منطقه مورد مطالعه

دو قطعه شهاب‌سنگ که بخشی از یک شهاب‌سنگ بزرگ به جرم تقریبی ۹۰ کیلوگرم به صورت قطعات پراکنده در محوطه‌ای به وسعت ۵ کیلومتر مربع در بخش غربی کویر لوت و در اطراف شهرستان شهداد در استان کرمان یافت شده است. موقعیت جغرافیایی نمونه‌های مورد مطالعه  $30^{\circ}38'56''N$   $57^{\circ}49'07''E$ ، واقع در منطقه شهداد است. این شهاب‌سنگ در بولتن جهانی ثبت شهاب‌سنگ‌ها گزارش شده است. نمونه‌های مورد مطالعه از طرف موزه شهاب‌سنگ ایران در اختیار این پژوهش قرار گرفت. که با توجه به کاوش‌ها در کویر لوت (استان کرمان) در سال ۲۰۱۸ کشف گردیده و با نام کرمان ۲۵۲ در بولتن جهانی به ثبت رسیده است. این شهاب‌سنگ بزرگترین شهاب‌سنگ نوع کندریتی می‌باشد که در ایران کشف شده است.

از شرق با گسل نهبندان و حوضه‌ی فلیشی خاور ایران و از غرب با گسل نایبند و بلوک طیس محدود شده و مرز شمالی این بلوک به فروافتادگی جنوب کاشمر و مرز جنوبی آن با فرونشست جازموریان در غرب بلوچستان بسته شده است. به همین دلیل این منطقه جایگاه رخداد زمین‌لرزه‌های بزرگ و مهمی بوده است. دشت لوت از لحاظ جغرافیایی به سه قسمت اصلی تقسیم‌بندی شده است که شامل (۱) لوت شمالی، (۲) لوت مرکزی، (۳) لوت جنوبی است (Dresch, 1968).

جهان است و کمتر اثری از آب در آن دیده می‌شود. حداکثر بارندگی آن در سال حدود ۵۰ میلی‌متر است. ارتفاع متوسط دشت حدود ششصد متر و پست‌ترین نقطه آن ۱۸۰ متر پائین‌تر از سطح دریا می‌باشد (Aganabati, 2004). کویر لوت که در برخی از منابع علمی با ترجمه‌ی لغت کویر به زبان لاتین و سپس برگردان آن به فارسی، به آن چاله‌ی لوت گفته شده است، محدوده‌ی جغرافیایی وسیعی بین استان‌های خراسان جنوبی، یزد، سیستان و بلوچستان و کرمان به طول حدود ۹۰۰ کیلومتر و عرض حدود ۲۵۰ کیلومتر است. موقعیت زمین‌ساختی بلوک لوت



شکل ۱: منطقه دشت لوت مرکزی، بخشی از نقشه ایران که منطقه یزد، ناحیه ابرکوه را نشان می‌دهد. (Pourkhorsandi et al, 2019).



شکل ۲: تصویر ماهواره‌ای تهیه شده از گوگل ارث. محل نمونه یافته شده با مستطیل آبی رنگ نشان داده شده است.



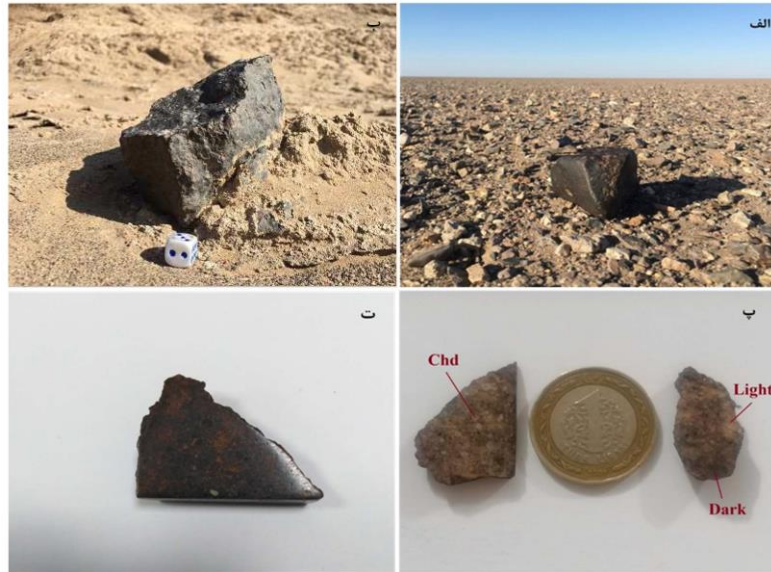
## مواد و روش‌ها

در این پژوهش، نخست نمونه‌ها در حمام فراصوتی (Ultrasonic bath) به مدت ۲ ساعت قرار گرفتند تا همه آثار زمینی و مربوط به پس از برخورد و یا ناشی از قرار گرفتن در محیط طبیعی زدوده شود. سپس نمونه‌ها برای ۴۸ ساعت در کوره با دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند. در مرحله بعد، عکس‌برداری و چگالی‌سنجی آن‌ها انجام شد. سپس از هر نمونه یک مقطع میکروسکوپی نازک صیقلی تهیه گردید بررسی‌های میکروسکوپی با میکروسکوپ تحقیقاتی پترولوژی زایس در آزمایشگاه دانشگاه خوارزمی تهران انجام شد. از نمونه‌ها به اندازه ۱۰ گرم پودر بدون استفاده از سنگ‌شکن و به صورت دستی در هاون عقیق تهیه شد. پودر نمونه‌ها برای تجزیه ذوب قلیایی و طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت شده القایی (MS-ICP) به شرکت زرآرما ارسال گردید. در آماده‌سازی نمونه‌ها با جهت تجزیه شیمیایی، ابتدا ۰/۱ گرم از پودر نمونه با دانه‌بندی حدود ۲۰۰ میکرون در ظرف‌های Digestion PFA (بمب) ریخته شد و مخلوطی از ۵ میلی‌لیتر HF، ۱ میلی‌لیتر HNO<sub>3</sub> و ۰/۵ میلی‌لیتر اسید HClO<sub>4</sub> به آن اضافه شد. نمونه‌ها به آرامی و در طول یک شب در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد در بمب دربسته گرم شده و سپس سرد شدند. این چرخه (گرم و سرد شدن) حداقل دوبار تکرار شده است. درپوش بمب‌ها برداشته شد و بخارهای HClO<sub>4</sub> خارج شدند. سپس ۲ میلی‌لیتر HNO<sub>3</sub> برای شستن دیواره‌های بمب اضافه شد. نمونه‌ها در بمب در باز تا دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد تا شروع خشک‌شدگی گرم شدند. ۲ میلی‌لیتر HNO<sub>3</sub> و ۵ میلی‌لیتر آب غیر یونیزه ۱۸ امگا اهم به آن اضافه شد و در ظرف دربسته دوباره تا دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت گرم شدند تا از انحلال کامل رسوبات باقی‌مانده اطمینان حاصل شود. پس از سرد نمودن نهایی، بمب‌ها مجدداً باز شده و محتویات بمب‌ها به یک فلاسک ۱۰۰ میلی‌لیتری منتقل شد و تا مرحله آب غیر یونیزه ۱۸ امگا اهمی رقیق شد. مقادیر مناسبی از این محلول برای رقیق‌سازی نهایی برداشته شد. نمونه‌ها، استانداردها و ظروف خالی با ایندیم به غلظت ۵۰ نانوگرم در میلی‌لیتر آلوده شدند تا از آن به عنوان یک استاندارد داخلی استفاده شود. هر دو نمونه یافته شده از بیابان‌های

کلوت شهداد پیدا شدند. تجزیه شیمیایی سنگ کل به روش ICP-MS در آزمایشگاه شرکت زرآرما در تهران قرار گرفت وضعیت نمونه‌ها و نام سنگ براساس مطالعات پتروگرافی آورده شده است. اندازه‌گیری عناصر کمیاب با غلظت کم‌تر از یک درصد وزنی مقداری از همان نمونه‌ها (بعد از مرحله خردایش و پودر کردن) به روش‌های انحلال اسیدی حل شده (همانگونه که در ابتدای این قسمت به آن اشاره شد) و نمونه‌های مایع تهیه گردیده است. عناصر کمیاب (از جمله عناصر کمیاب خاکی) با استفاده از طیف‌سنجی اتمی پلازما به روش القایی کوپل شده (ICP-MS) که نتایج در (جدول ۱) آورده شده است. نمودارهای شیمیایی با استفاده از نرم افزار GCDkit، نسخه ۴/۳ و نرم‌افزار Excel تولید شده‌اند است. نمودارهای حاصل با استفاده از نرم افزارهای تصحیح تصاویر مانند Premiere و Photoshop ترسیم و تجزیه و تحلیل شده است.

### سنگ‌نگاری شهاب‌سنگ‌های کوبر لوت

شهاب‌سنگ مورد مطالعه در قطعات مختلف از ۲۰۰ گرم تا ۱۲ کیلوگرم در محدوده ۲۲/۵ کیلوگرم مره پراکنده شده است. قطعات به دست آمده اغلب به اشکال مکعبی و دارای لبه‌های زاویه دار استکه بیانگر شکستگی نمونه‌ها بعد از زمان برخورد است و تعداد کمی از آنها دوکی شکل و دارای لبه‌های نرم و گرد شده است. در نمونه‌های دستی که در این پژوهش انتخاب شد و از طرف موزه شهاب سنگ ایران در اختیار این پژوهش قرار گرفت. نمونه‌ها دارای سطح کاملاً تیره و به رنگ قهوه‌ای تیره تا سیاه و در سطح حاوی ریگماگلیپ و شکستگی‌های تنش‌ناشی از برخورد با سطح زمین در سطح نمونه است (شکل ۳ الف). پوسته نازک ذوب شده به قطر ۰/۱ میلیمتر تقریباً تمامی سطح نمونه را پوشانده سطح تازه سنگ در شکستگی به رنگ قهوه‌ای روشن با مناطق روشن‌تر به صورت خال‌های خاکستری تا قهوه‌ای و کرم روشن دیده می‌شود (شکل ۳ ب). این خال‌های دارای مقاومت و بیشتر در مقابل هوازدگی و همچنین سختی بالاتری از زمینه هستند. کندرول‌ها اندازه بین ۰/۲ تا ۰/۵ میلیمتر دارند که در واقع قطر ظاهری ساختار کندرول‌ها است (شکل ۳ پ)، تراکم این دانه‌ها بین ۶۰ تا ۷۵ درصد از سطح نمونه دستی اندازه‌گیری شده است (شکل ۳ ت).



شکل ۳: الف: بزرگترین بخش شهاب‌سنگ کندریتی یافت شده در منطقه کویر لوت. ب: بخشی از پوسته گداخته شهاب RC-101 کاملاً مشهود است. پ: مناطق تاریک و روشن نمونه مرز مشخص کندرول‌ها در شهاب RC-101. ت: کندرول نمونه RC-101 در سطحی از مناطق تاریک و روشن شهاب‌سنگ.

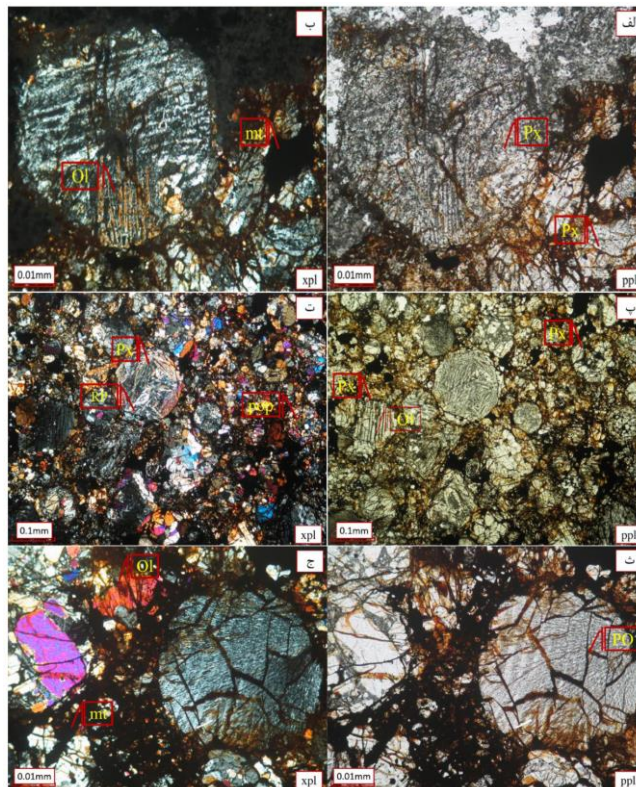
کانی‌هایی از جمله الیوین با حجم ۴۰٪ و پیروکسن با حجمی معادل ۵۰٪ کانی‌های اصلی را تشکیل می‌دهند که خودشکل تا بی‌شکل هستند. و ذرات پرکننده فضای خالی کانی‌ها در این بافت کانی ایک است. معمولاً تعداد ۴ کندرول در یک سانتی‌متر مربع و ۳۰٪ فضای نمونه را پر کرده است. در این نمونه میکروسکوپی کندرول با مرز نیمه مشخص مشهود است. برخی از الیوین‌های دانه‌ای (Olivine grain) با علامت اختصاری (GO) که در کندرول‌ها جای دارند دارای بافت شعاعی 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. در برخی نقاط نمونه میکروسکوپی، الیوین محصور (Barred-olivine) (BO) این ساختار عموماً حاصل تبلور در دمای بالای ۱۰۰۰ درجه و از مذاب اولیه فاقد بلور است (Bischoff et al, 2022). در برخی نمونه‌ها به صورت جانیشینی در دمای پایین‌تر کانی پیروکسن قالب اولیوین را اشغال کرده و بافت سودومورف را حاصل می‌کند، در حالی که خود دارای بافت شعاعی است (شکل ۴ پ). 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 آن را احاطه کرده است و در برخی مناطق نیز تلفیقی از بافت پورفیری توامان شعاعی الیوین و پیروکسن از بافت پورفیری با علامت اختصاری porphyritic olivine-pyroxene

در مقاطع میکروسکوپی RC-102 (شکل ۳ الف، ب) بلورهای الیوین با فراوانی حجمی ۲۶ درصد و پیروکسن با فراوانی ۵۴ درصد کانی‌های اصلی شهاب‌سنگ را تشکیل می‌دهند. این کانی‌ها اغلب نیمه‌شکل‌دار تا خودشکل هستند. فراوانی کانی‌های ایک در نمونه‌های مورد مطالعه حدود ۱۲ درصد حجمی است. کندرول‌ها در این شهاب‌سنگ دارای مرزی کاملاً مشخص هستند و با هاله‌ای مخفی بلور احاطه شده‌اند. کندرول‌ها در این نمونه به‌طور متوسط ۰/۰۹ میلی‌متر قطر دارند (شکل ۳ الف، ب). از دیدگاه بافت‌شناسی پترولوژی این سنگ‌ها گروه خاصی از پورفیری‌ها هستند که به بافت کندریتی مشهور می‌باشند. بافت‌های فرعی نیز در نمونه RC-102 مشاهده می‌شوند، مانند بافت غیر معمولی تلفیقی حاصل از رشد پیروکسن با شیشه، یا به عبارتی یک بافت انتقالی BO. الیوین در کندرول با بافت شعاعی و به حالت تیغه‌ای سوزنی متبلور شده است. گاهی این کانی با پیروکسن همراه می‌شود و به صورت بخشی یا کامل جانشین کانی پیروکسن می‌شود و یا به کانی پیروکسن می‌چسبد و به شکل بافت شعاعی، سودومورف ظاهر می‌گردد. وجود کندرول‌ها با شکستگی‌های موازی در شهاب‌سنگ‌های کندریتی بیانگر پدیده دگرگونی ضربه‌ای در هنگام برخورد با زمین است این پدیده میزان انرژی آزاد شده در زمان برخورد را نشان می‌دهد. در نمونه میکروسکوپی RC-103 (شکل ۳ پ، ت)



حجم سنگ توسط زمینه مخفی بلور پر شده است. حجم کندرول معمولی و کندرول مرکب در این نمونه ۶۵٪ است و کندرول این مقطع با مرزهای کاملاً مشخص مشاهده می‌شود. که با هاله‌ای از زمینه مخفی بلور احاطه شده است. قطر متوسط کندرول‌ها ۰/۰۳ تا ۰/۰۵ میلی‌متر است (شکل ۴ ث).

(POP) دیده می‌شود. قطر این کانی‌ها ۰/۵ میلی‌متر است. اکثر کندرول‌های این مقطع به صورت کندرول درون کندرول در زمینه مخفی بلور حدود ۱۰٪ حجم نمونه را اشغال می‌کند. در نمونه میکروسکوپی RC-104 (شکل ۴ ث، ج) کانی‌های الیوین، پیروکسن به ترتیب با درصد‌های ۳۵٪ و ۵۵٪، جزء کانی‌های اصلی و از بی‌شکل تا خودشکل هستند و کانی‌های اپک این شهاب‌سنگ ۵٪ است و بقیه



شکل ۴: نمونه RC-102 الف و ب: نشان‌دهنده یک کندرول با کانی پیروکسن و خطوطی از کانی الیوین با بافت شعاعی. نمونه RC-103، پ: الیوین محصور (BO) به صورت جانشینی کانی پیروکسن به صورت سودومورفیک. کندرول‌هایی هم مرز با کانی الیوین آزاد در زمینه و کانی پیروکسن که همگی با مرز شاخص از یکدیگر جدا شده‌اند. ت: مرزهای نسبتاً مشخصی از کندرول‌ها با ترکیب پیروکسن و الیوین پورفیری (POP) را نشان می‌دهد. کندرول با مرز کاملاً مشخص و بسته که بافت شعاعی پیروکسن و الیوین (RP) دارد و تجمع ذرات کریپتوکریستالین که RIM تشکیل داده‌اند. نمونه RC-104، ث: دو کندرول کنار هم. کانی پیروکسن و الیوین که با توجه به ترتیب تبلورشان دیده می‌شوند. ج: کندرول این نمونه شهاب‌سنگ در زمینه ماتریکس فلزی (Mt) در نور پلاریزه است.

در شهاب‌سنگ‌های کندریتی می‌باشد. شواهد ساختاری در کندریت‌های مقاطع RC-102، RC-103، RC-104 شامل شکستگی‌های نامنظم در سطح کانی الیوین و پیروکسن شکستگی‌های ظاهری سطح نمونه و زمینه، اثرات شوک دگرگونی در رده S<sub>4</sub> که به معنای اثرات دگرگونی خیلی ضعیف برخوردی را براساس تقسیم‌بندی رابین و همکاران (Rubin and Scott, 1997) نشان می‌دهد (جدول ۱).

کندرول‌ها با ترکیب متفاوت پیروکسن و الیوین و یا مجموعه‌ای از هر دو کانی مشاهده می‌شوند که با توجه به ترتیب تبلورشان در سیستم باون در تماس با یکدیگر دیده می‌شوند (شکل ۴ ج). کندرول این نمونه شهاب‌سنگ در زمینه فلزی (metallic texture) با علامت اختصاری (Mt) در نور پلاریزه است. بافت‌های پورفیری دارای بلورهای بزرگ (فنو کریست) می‌باشند که توسط مواد ریز دانه احاطه شده‌اند. این بافت کندرولی، پورفیری فراوان‌ترین نوع بافت

جدول ۱: تجزیه شیمیایی به روش ICP-MS از نمونه‌های کندریتی شهاداد بر حسب ppm

Element	RC-101	RC-102	RC-103	Element	RC-101	RC-102	RC-103
Al	1057	1064	1053	Sm	0.41	0.68	0.57
Fe	20365	20364	20369	Eu	0.1	0.2	0.2
Mg	12254	12254	12255	Gd	1.07	1.04	1.05
Na	913	918	910	Tb	0.1	0.3	0.3
Ni	7874	7889	7868	Dy	0.67	0.65	0.68
P	847	874	874	Er	0.29	0.29	0.29
K	1373	1336	1355	Tm	0.1	0.1	0.1
Ca	15665	15562	15553	Yb	0.05	0.06	0.04
Sc	7600	6900	7200	Lu	0.1	0.2	0.4
Ti	550	561	557	Hf	0.51	0.67	0.56
V	64	67	65	Ta	1.3	1.2	1.4
Cr	4106	4012	4108	Pb	1	3	2
Mn	231	248	229	Th	0.7	0.6	0.5
Co	373	364	369	U	0.1	0.1	0.1
Zn	92	95	94	Be	0.2	0.2	0.2
As	2.1	2.4	2.2	Bi	0.1	0.1	0.1
Rb	9	10	8	Cd	0.1	0.1	0.1
Sr	196	187	191	Li	14	17	15
Y	0.5	0.6	0.4	S	16886	16886	16886
Zr	14	16	15	Ag	0.4	0.5	0.3
Nb	2.2	2.7	2.5	Sb	0.5	0.4	0.6
Cs	0.5	0.6	0.4	Se	0.5	0.5	0.5
Ba	19	22	21	Sn	2	4	4
La	1	6	3	Te	0.3	0.5	0.4
Ce	9	12	11	Tl	0.1	0.1	0.1
Pr	1.76	1.87	1.79	W	0.1	0.1	0.1
Nd	4.7	3.54	4.1	Mo	0.5	0.6	0.4

## بحث و نتایج

روش سریع بوده و تعداد زیادی تجزیه‌ی دقیق در مدت زمان نسبتاً کوتاه آماده می‌کند. نتایج تجزیه شیمیایی عناصر اصلی در (جدول ۲) شرح داده شده است. با توجه به مقادیر LOI می‌توان گفت نمونه‌ها دارای هوازدگی ناچیزی می‌باشند.

## نتایج شیمی سنگ کل شهاب‌سنگ‌های شهاداد به روش

## ذوب قلیایی (Litume flam fusion)

روش ذوب قلیایی یکی از بهترین روش‌های برای اندازه‌گیری نسبت عناصر اصلی و فرعی در سنگ است. این

جدول ۲: جدول تجزیه شیمیایی به روش ذوب قلیایی از نمونه‌های شهاب‌سنگ شهاداد بر حسب درصد.

Element	RC-101	RC-102	RC-103
SiO <sub>2</sub>	36.48	36.75	36.01
TiO <sub>2</sub>	0.15	0.26	0.3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.07	2.08	3.09
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27.52	27.72	26.56
MgO	22.01	21.36	22.1
MnO	0.39	0.37	0.45
CaO	3.57	3.59	3.57
K <sub>2</sub> O	0.14	0.16	0.17
Na <sub>2</sub> O	1.28	1.29	1.25
BaO	0	0	0
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.18	0.19	0.21
SO <sub>3</sub>	3.31	3.33	3.34
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.78	0.68	0.89
Ni	0.89	0.9	0.91
LOI	1.17	1.18	1.02
Total	99.94	99.86	99.87

مجاری است. در این روش که نوع و فراوانی کانی‌ها براساس تجزیه شیمیایی و درصد اکسیدهای موجود در سنگ مانند  $K_2O$ ،  $SiO_2$  و محاسبه می‌شود. نورم این سنگ‌ها براساس روش CIPW محاسباتی است (Rollinson, 1993).

**محاسبه کانی‌های متبلور شده شهاب‌سنگ‌های شهاداد به روش نورماتیو**  
محاسبات نورم روشی است که تشخیص کانی را از طریق تجزیه شیمیایی میسر ساخته و در زمینه طبقه‌بندی سنگ‌ها، یک روش

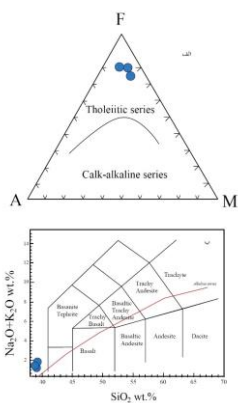
جدول ۳: جدول محاسبه نورماتیو بخش سنگی شهاب‌سنگ‌های مورد مطالعه شهاداد بر حسب درصدوزنی (wt.%).

Minerals	RC-101	RC-102	RC-103
Pl	9.87	9.81	14.95
Or	0.83	0.95	1.00
Hyp	26.86	29.14	22.05
Ol	19.31	16.59	22.84
Acm	9.29	9.36	4.10
Rut	0.15	0.26	0.30
Hem	5.05	5.08	6.55
Ap	0.42	0.44	0.49
Chr	0.76	0.75	0.76
Pyr	34.15	35.75	35.01

سنگ‌شناسی در شهاب‌سنگ‌ها ایفا می‌کند. عناصر الکالن در تعیین سطح اشباع شدگی از سیلیس شهاب‌سنگ‌ها به کار می‌روند دارند که این مطلب تأییدی بر اولیه بودن شهاب‌سنگ‌ها و منشاء فرازمینی از دیدگاه ژئوشیمیایی است. در نمودار AFM نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده سری‌های مذاب اولیه و مشابه با تولیت‌های مزنی حاصل از ذوب گوشته قرار می‌گیرند (شکل ۵ الف). از نظر تقسیم بندی عناصر از دیدگاه مقادیر الکالن در برابر سیلیس این سنگ‌ها در گروه‌های متعارف زمین قرار نمی‌گیرند و لی در بالای خط الکالن واقع می‌شوند (شکل ۵ ب).

#### رده‌بندی شیمیایی شهاب‌سنگ‌های شهاداد

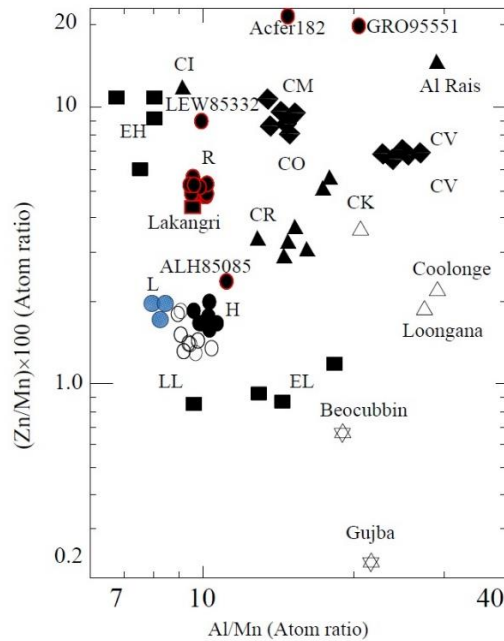
در این بخش رده‌بندی شهاب‌سنگ‌های شهاداد به وسیله نمودارهای رایج ژئوشیمیایی که براساس مقدار سیلیس و عناصر الکالن است، شرح داده می‌شود. برای رده‌بندی شیمیایی شهاب‌سنگ‌های کندریتی نمودارهای مختلفی ارائه شده است که متداول‌ترین آنها مربوط به درجات قلیایی شهاب‌سنگ‌ها می‌باشد.  $SiO_2$  به عنوان فراوان‌ترین اکسید تشکیل دهنده مواد سنگی در کرات و اجرام سنگی منظومه‌های خورشیدی از جمله شهاب‌سنگ‌ها و  $Na_2O$  و  $K_2O$  به عنوان اکسید مهم‌ترین عناصر فلزی سنگ‌ساز نقش مهمی در تقسیم‌بندی



شکل ۵: الف: طبقه‌بندی سه گانه  $FeO$ ،  $Al_2O_3$ ،  $MgO$ . ترکیب کندریت شهاداد در AFM، ترکیب قلیایی را نشان می‌دهد. ب: نمودار عناصر آلكالی ( $Na_2O, K_2O$ ) در مقابل سیلیس که مجدداً آلكالی بودن شهاب‌سنگ‌های شهاداد مشخص است (Irvine and Baragar, 1971).

(Kallemeyn et al, 1978, 1989, 1991, 1994, 1996) نمایش داده شده‌اند. دایره‌های آبی رنگ در این شکل مربوط به نمونه‌های شهاب‌سنگ شهاداد می‌باشند. این شهاب‌سنگ در قسمت کندریت معمولی L قرار می‌گیرد.

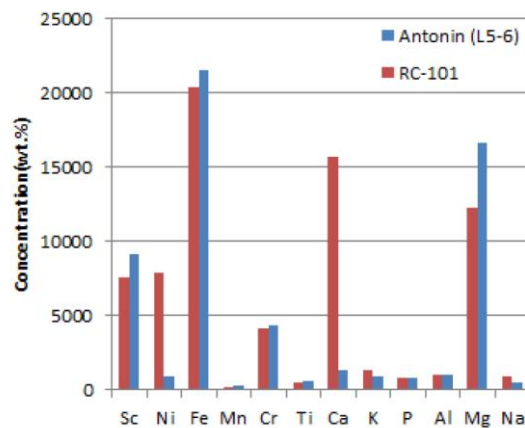
در نمودار نسبت  $Al/Mn$  در مقابل  $Zn/Mn$  (شکل ۶)، محل قرارگیری انواع مختلف کندریت‌های معمولی و نمونه‌های تیپیک کندریت‌ها (کندریت‌های شناخته شده از سراسر جهان) (Kallemeyn and Wasson, 1981, 1982; )



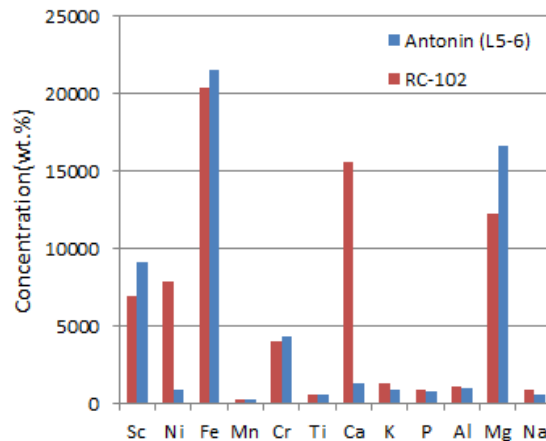
شکل ۶: تغییرات شیمیایی نسبت اتمی Al/Mn به Zn/Mn دایره‌های آبی رنگ گویای شهاب‌سنگ‌های شهاد می‌باشند (Kallemeyn and Wasson, 1981, 1982; Kallemeyn et al, 1978, 1989, 1991, 1994, 1996).

انجام شده نشان می‌دهد ترکیب عناصر شهاب سنگ شهاد دارای انطباق قابل قبول با نمونه استاندارد است. بر این اساس نمونه یافت شده در شهاد در گروه کندریت‌های معمولی از نوع L<sub>5</sub> و مشابه با نمونه آنتونین به عنوان شاخص گروه (L4-5) قرار گرفته است.

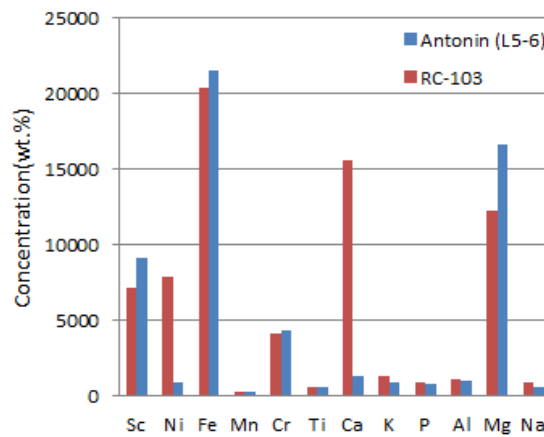
در نمودارهای ستونی نشان داده شده (شکل‌های ۷، ۸، ۹) عناصر مربوط به شهاب‌سنگ‌های شهاد با کندریت‌های معمولی با علامت اختصاری (n) که مربوط به نمونه استاندارد و شاخص از شهاب سنگ آنتونین (Antoni) که توسط بیشوف و همکاران ارائه شده، مقایسه شده است. همانطور که در شکل‌های یاد شده مشاهده می‌شود، مقایسه



شکل ۷: نمودار غلظت عناصر به دست آمده از طریق آنالیز ICP-MS شهاب‌سنگ کندریتی شهاد در مقایسه با مقایسه عناصر شهاب‌سنگ‌های کندریتی Antonin (L4-5) (Bischoff et al, 2022).



شکل ۸: نمودار غلظت عناصر به دست آمده از طریق آنالیز ICP-MS شهاب‌سنگ کندریتی شهداد و مقایسه عناصر شهاب‌سنگ‌های کندریتی (Antonin (L4-5) (Bischoff et al, 2022).



شکل ۹: نمودار غلظت عناصر به دست آمده از طریق آنالیز ICP-MS شهاب‌سنگ کندریتی شهداد در مقایسه با مقایسه عناصر شهاب‌سنگ‌های کندریتی (Antonin (L4-5) (Bischoff et al, 2022).

تغییرات عناصر اصلی و کمیاب شهاب‌سنگ‌های کندریتی شهداد

از شهاب سنگ مورد مطالعه ۳ نمونه جداگانه تهیه و مورد تجزیه شیمیایی به روش ICP-MS قرار گرفته است و نتایج به دست آمده در (جدول ۱) آمده است. طبق این داده‌ها برای شهاب‌سنگ‌های شهداد و همچنین با نرمالایز کردن فراوانی عناصر نسبت به کندریت CI تغییرات عناصر در نمونه‌های RC-101, RC-102, RC-103 را تحلیل شده است. مشاهدات نشان می‌دهد هماهنگی نسبتاً کاملی بین نتایج حاصل در این پژوهش و نمونه استاندارد شهاب‌سنگی کندریتی معمولی (Antonin (L4-5) وجود دارد (Nakamura and Noguchi, 2011). بیش‌ترین تهی‌شدگی در نمودار الگوی رفتاری عناصر کمیاب در نمونه شهداد مربوط به تیتانیوم (Ti) و کم‌ترین تهی‌شدگی در این نمودار مربوط به عنصر ایبریوم (Yb) است (Russell and Grady, 2002; Foley et al, 2006). عنصر تانتالیوم (Ta) نسبت به دیگر عناصر دارای غنی‌شدگی کمی می‌باشد. عنصر تریبوم (Tb) در تمام نمونه‌های شهاب‌سنگ شهداد دارای غنی‌شدگی زیادی است. در شهاب‌سنگ‌ها ترکیبات حاوی عناصر سولفور و فسفر دچار هوازدگی می‌شوند با این حال در روند تغییرات سه نمونه غنی‌شدگی و تهی‌شدگی ندارد که این نشان از عدم هوازدگی شدید نمونه‌های شهداد است. عناصر دیگری همچون Zr و Hf که دارای شعاع و بار الکتریکی تقریباً یکسانی هستند، غنی‌شدگی یکسانی دارند و طبق انتظار می‌رود عملکرد مشابه در برابر فرایندهای هوازدگی ثانویه از خود نشان می‌دهند (شکل ۱۰). با توجه نمودارهای عنکبوتی که از تغییرات عناصر کمیاب در برابر نمونه‌ای استاندارد ترسیم شده می‌توان گفت شهاب سنگ مورد مطالعه از نوع قطعات سنگی اولیه تشکیل شده در منظومه که ترکیب اولیه سیارات سنگی را به وجود آورده

تغییرات عناصر اصلی و کمیاب شهاب‌سنگ‌های کندریتی شهداد

از شهاب سنگ مورد مطالعه ۳ نمونه جداگانه تهیه و مورد تجزیه شیمیایی به روش ICP-MS قرار گرفته است و نتایج به دست آمده در (جدول ۱) آمده است. طبق این داده‌ها برای شهاب‌سنگ‌های شهداد و همچنین با نرمالایز کردن فراوانی عناصر نسبت به کندریت CI تغییرات عناصر در نمونه‌های RC-101, RC-102, RC-103 را تحلیل شده است. مشاهدات نشان می‌دهد هماهنگی نسبتاً کاملی بین نتایج حاصل در این پژوهش و نمونه استاندارد شهاب‌سنگی کندریتی معمولی (Antonin (L4-5) وجود دارد (Nakamura and Noguchi, 2011). بیش‌ترین تهی‌شدگی در نمودار الگوی رفتاری عناصر کمیاب در نمونه شهداد مربوط به تیتانیوم (Ti) و کم‌ترین تهی‌شدگی در این نمودار مربوط به عنصر ایبریوم (Yb) است (Russell and Grady, 2002; Foley et al, 2006). عنصر تانتالیوم (Ta) نسبت به دیگر عناصر دارای غنی‌شدگی کمی می‌باشد. عنصر تریبوم (Tb) در تمام نمونه‌های شهاب‌سنگ شهداد دارای غنی‌شدگی زیادی است. در شهاب‌سنگ‌ها ترکیبات حاوی عناصر سولفور و فسفر دچار هوازدگی می‌شوند با این حال در روند تغییرات سه نمونه غنی‌شدگی و تهی‌شدگی ندارد که این نشان از عدم هوازدگی شدید نمونه‌های شهداد است. عناصر دیگری همچون Zr و Hf که دارای شعاع و بار الکتریکی تقریباً یکسانی هستند، غنی‌شدگی یکسانی دارند و طبق انتظار می‌رود عملکرد مشابه در برابر فرایندهای هوازدگی ثانویه از خود نشان می‌دهند (شکل ۱۰). با توجه نمودارهای عنکبوتی که از تغییرات عناصر کمیاب در برابر نمونه‌ای استاندارد ترسیم شده می‌توان گفت شهاب سنگ مورد مطالعه از نوع قطعات سنگی اولیه تشکیل شده در منظومه که ترکیب اولیه سیارات سنگی را به وجود آورده

اولیه واحد است و پس از برخورد در این محدوده پخش شده‌اند (شکل ۱۰).

بوده است. با توجه به مقادیر تجزیه شیمیایی و میزان تغییرات ثانویه عناصر در نمونه شهاد می‌توان نتیجه گرفت که به صورت قطعی نمونه‌ها مربوط به یک شهاب سنگ



شکل ۱۰: نمودار عنکبوتی عناصر حاصل از تجزیه شیمیایی انجام شده برای کندریت‌های شهاد که با مقادیر کندریت CI نرمالیز شده‌اند.

نمونه‌های بیابانی دشت لوت علاوه بر REEها، در عناصر Sr و Ba نیز غلظت‌های متفاوتی را در مقایسه با OC نشان می‌دهند. بنظر می‌رسد در نمونه‌های صحرای آتاکاما که زمان بیشتری را برای هوازگی نسبت به نمونه‌های دشت لوت در اختیار داشته‌اند، محتوای REE بالاتر وجود دارد و به بیانی و ترکیب غنی شده با LREE یک گواه مهم از آلودگی نمونه‌های کندریتی توسط خاک زمینی و مدت ماندگاری این شهاب سنگ‌ها در زمین است به عبارتی مدت زیادتر باقی ماندن در سطح میزان REE های سبک را افزایش می‌دهد. از طرفی نباید از نظر دور داشت که سرعت هوازگی و به واسطه آن تحرک عناصر وابسته به خصوصیات آب و هوایی منطقه سقوط شهاب سنگ است و تغییرات ارتفاع محل س.ط. از سطح دریا و عرض جغرافیایی نباید از نظر دور داشته شود. بنابراین استفاده از LREE به عنوان استاندارد مقایسه‌ای در زمین‌شناسی علی‌رغم درجه هوازگی پایین آنها، هنگام کار بر روی ترکیب شیمیایی شهاب سنگ‌های آتاکاما به عنوان استاندارد برای کاربردهای شیمی‌کیهانی باید دقت ویژه‌ای به کار رود. در مقابل، کندریت‌های صحرای لوت، علی‌رغم محتوای Sr که به صورت کلی بیانگر میزان هوازگی شهاب سنگ و آغستگی نمونه با فرایندهای تفکیکی عناصر در پوسته زمین است هوازگی کمتری مشاهده می‌شود زیرا درجات پایین‌تری از تغییرات LREE را نشان می‌دهند. این امر با سرعت هوازگی نسبتاً کمتر شهاب‌سنگ‌ها در صحرای لوت نسبت

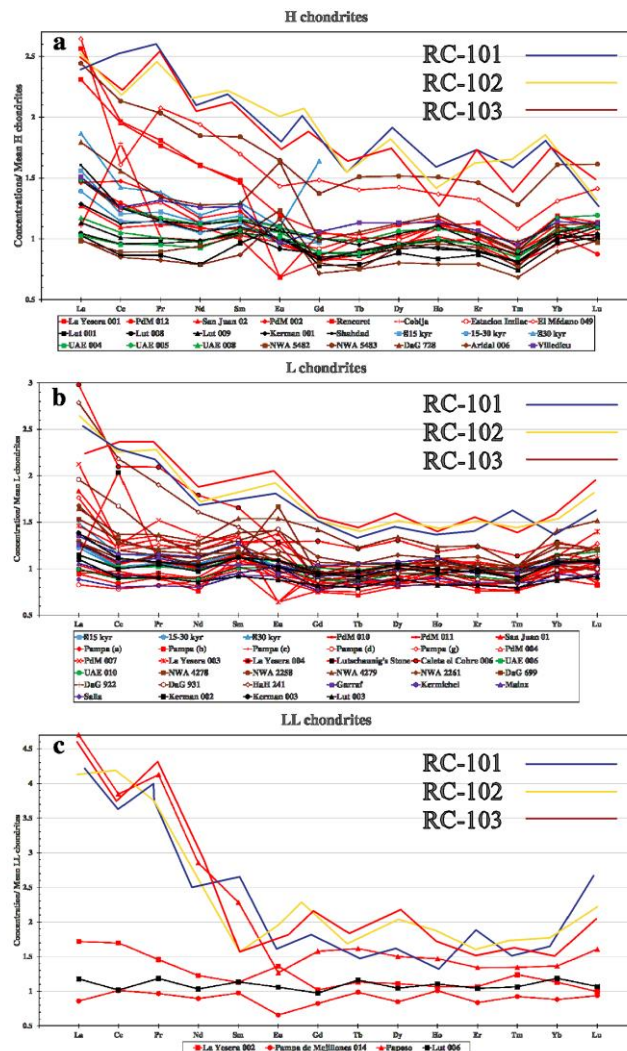
#### ژئوشیمی ترکیب عناصر اصلی و کمیاب

بررسی‌های انجام شده بر روی کندریت‌های دشت لوت و همچنین نمونه‌های جمع‌آوری شده از صحراهای شیلی نشان می‌دهد هوازگی تأثیر واضحی بر روی غلظت REEها در کندریت‌های معمولی یافت شده در سطح زمین دارد (Porkorshedi et al, 2017). این تأثیرات در رفتار عناصر کمیاب خاکی (REEs) در طول هوازگی بیابان‌های داغ برای شهاب‌سنگ‌ها توسط پورخورسندی (Porkorshedi et al, 2017) نشان می‌دهد که کندریت‌های معمولی Ordenerly condites با علامت اختصاری (OCs) از بیابان‌های آتاکاما (شیلی) و لوت (ایران) تغییرات متفاوتی در ترکیب REE در طول این فرآیندهای هوازگی نشان می‌دهند. داده‌های طیف‌سنجی جرمی پلاسما جفت القایی (ICP-MS) در نمونه‌های مورد مطالعه در این پژوهش نشان می‌دهد که OC های بیابانی دارای غلظت REE سبک بیشتری نسبت به OC بدون هوازگی دارند. کندریت‌های بیابان آتاکاما در شیلی به‌طور کلی تا حد زیادی از REE غنی‌تر هستند و این غنی‌شدگی لزوماً به درجه هوازگی آنها مرتبط نیست و ممکن است به صورت اولیه از سیارک مادر به آنها ارث رسیده باشد. ناهنجاری Ce مثبت کندریت‌های بدون هوازگی از بیابان آتاکاما و وجود یک ناهنجاری Ce منفی عمومی بین همه نمونه‌ها با غنی‌شدگی عناصر REE سه ظرفیتی مشابه با نمونه‌های یافت شده در قطب جنوب دارد که احتمالاً به صورت اولیه است.



ندارد بنابراین شهاب سنگ شهادت همانندی قابل توجهی با گروه شهاب سنگی نسبتا کمیاب در بین شهاب سنگ‌های کندریتی فقیر از آهن و فلزی (low-iron, low metal) با علامت اختصاری LL از خود نشان می‌دهد (شکل ۴ تا ۸). باید خاطر نشان کرد که نتایج حاصل از مطالعات میکروسکوپی شهاب سنگ شهادت نشان می‌دهد این نمونه در گروه بدون هوازدگی (Low Weathering) با علامت اختصاری (W<sub>0</sub>) قرار گرفته است پس می‌توان نتیجه گرفت که افزایش REE‌های سبک در نمونه مورد مطالعه مشابه با نمونه‌های مورد مطالعه دکتر پورخوردی و همکاران به دلیل هوازدگی شدید و سریع در بخش پوسته‌ای شهاب سنگ در این مناطق است (شکل ۱۱).

به شیلی و نمونه‌های جمع آوری شده از قطب جنوب نیز همخوانی دارد. محتوای بالای Sr در نمونه‌های دشت لوت احتمالاً به دلیل تشکیل پوسته غنی از اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن در زمان کوتاهی پس از سقوط که معمولا در مناطق خشک با سطح ایستایی بسیار بالا و باتلاقی نظیر مناطق امروزی جنوب شرقی دشت لوت قابل توجیح است. این خصوصیات نشان می‌دهد این قطعه شهاب سنگی دچار هوازدگی ضعیف ولی با سرعت زیاد در سطح زمین شده است. با توجه به توضیحات بالا مقادیر عناصر فرعی REE در نمونه مورد مطالعه در این پژوهش نشان می‌دهد نسبت LREEها نسبتا غنی‌شدگی نشان داده و این غنی‌شدگی ارتباط واضحی با میزان هوازدگی آنها



شکل ۱۱: نمودارهای غنکبوتی REE نرمال شده: الف: H، ب: L، و ج: کندریت‌های معمولی LL. برای مقایسه، داده‌های OC از عمان (مقادیر متوسط برای طبقات سنی مختلف) (Al-Kthiri et al, 2005)، امارات متحده عربی (Hezel et al, 2011)، صحرای صحرا (Saunier et al, 2007; Folco et al, 2010) و اروپا (Folco et al, 2007) در کنار داده‌های این پژوهش استفاده شده است. شکل مخفف Pampa de Mejillones است.

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش براساس مطالعات صحرایی برخورد شهاب‌سنگی در جنوب غربی دشت لوت محرض شده است. براساس نتایج پتروگرافی به دلیل ترکیبات پیروکسن و الیوین شهاب‌سنگ مورد مطالعه، این نمونه جز گروه کندریتی‌های معمولی (OC) می‌باشد و جزء گروه کندریتی L و LL طبقه‌بندی می‌شود. با توجه به بافت درونی کندرول‌ها در گروه POP و BO قرار می‌گیرد که مربوط به شهاب‌سنگ‌های دما بالا و نرخ سردشدگی ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ درجه در ساعت است. ترکیب سیلیکات‌ها و مرزهای کندرول شهاب‌سنگ مورد مطالعه بیانگر پترولوژی نوع چهارم می‌باشد. به علت اینکه هیچ اکسیداسیون قابل مشاهده‌ای از فلز یا سولفید در نمونه وجود نداشته است و فقط طیفی از رنگ لیمویی قابل مشاهده می‌باشد، بیان‌گر درجه W<sub>0</sub> از هوازدگی است. در اکثر مقاطع مورد مطالعه بلورهای الیوین مجموعه‌ای از شکستگی‌های مسطح و شکستگی‌های نامنظم در سطح الیوین و شکستگی‌های صفحه‌ای در کانی پیروکسن قابل مشاهده می‌باشد که اثرات شوک دگرگونی S<sub>4</sub> (دگرگونی خیلی ضعیف) را یادآور می‌شود. با توجه به تغییرات شیمیایی نسبت عنصری

Kallemeyn and ) در نمودار پژوهشی (Al/Mn به Zn/Mn در Wasson, 1981) نقاط نمونه شهاب‌سنگ‌های شهاد در قسمت کندریتی‌های معمولی L و LL پلات شده‌اند. با توجه به مقایسه نمودارهای ستونی عناصر کمیاب مربوط به شهاب‌سنگ‌های شهاد با کندریتی‌های معمولی (L4-5) Antonin ارائه شده است. ترکیب عناصر این دو گروه شهاب‌سنگ‌ها با کمی اختلاف شبیه به هم هستند که این قضیه تأییدی بر کندریت معمولی از نوع L<sub>5</sub> بودن شهاب‌سنگ‌های شهاد است. رده‌بندی شهاب‌سنگ‌های شهاد به وسیله نمودارهای ژئوشیمیایی که براساس مقدار سیلیس و عناصر آلکالن است و نمودار عناصر آلکالی (Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O) در مقابل سیلیس آلکالی بودن شهاب‌سنگ‌های شهاد مشخص است. با توجه به تمام شواهد موجود بدنه سیارک مادر شهاب‌سنگ‌های کندریتی L<sub>5</sub> شهاد، از نوع سیارکی S کندریت معمولی است.

## سپاسگزاری

نویسنده این مقاله از هیچ سازمان یا ارگانی کمک مالی دریافت نکرده است.

## References

- Aganbati, A., 2004. Geology of Iran, first edition, Geological Organization of the country, Tehran, p. 163-182, (In persian).
- Al-Kathiri, A., Hofmann, B.A., Jull, A.J.T. and Gnos, E., 2005. Weathering of meteorites from Oman: Correlation of chemical and mineralogical weathering proxies with 14C terrestrial ages and the influence of soil chemistry. *Meteoritics & Planetary Science*, v. 40, p. 1215-1239.
- Aunier, G., Poitrasson, F., Moine, B., Gregoire, M. and Seddiki, A., 2010. Effect of hot desert weathering on the bulk-rock iron isotope composition of L6 and H5 ordinary chondrites. *Meteoritics and Planetary Science*, v. 45, p. 195-209.
- Bischoff, A., Patzek, M., Peters, S., Barrat, J.R.D., Rocco, T., Pack, A., Ebert, S., Jansen, A. and Kmieciak, K., 2022. The chondrite breccia of Antonin (L4-5)-A new meteorite fall from Poland with a heterogeneous distribution of metal, *The Meteoritical Society*, v. 57(12), p. 2127-2142.
- Brearley, A.J. and Jones, R.H., 1998. Chondritic meteorites. In *Planetary Materials, Reviews in Mineralogy* (ed. J. J. Papike). Mineralogical Society of America, Washington, DC, p. 36(3), p. 390-398.
- Darvishzadeh, A., 1991. Geology of Iran, 1st edition, Danesh Amroz publishing house, Tehran, 221 p. (In persian).
- Dresch, J., 1968. Reconnaissance dans le Lut (Iran). *Bulletin de l'Association de geographes francais*, v. 45, p. 143-153.
- Foley, C.N., Nittler, L.R., McCoy, T.J., Limc, L.F., Brown, R.M., Starr, R.D. and Trombka, J.I., 2006. Minor element evidence that Asteroid 433 Eros is a space-weathered ordinary chondrite parent body, p. 338-343.
- Hezel, D.C., Schluter, J., Kallweit, H., Jull, A.J.T., Al Fakeer, O.Y., Al Shamsi, M. and Strekopytov, S., 2011. Meteorites from the United Arab Emirates: Description, weathering, and terrestrial ages. *Meteoritics & Planetary Science*, v. 40, p. 327-336.
- Irvine, T.N.J. and Baragar, W.R.A.F., 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks, *Canadian Journal of Earth Sciences*, p. 523-548.
- Kallemeyn, G.W., 1996. The classificational wanderings of the Ningqiang chondrite. In *Lunar*

- Planet. Sci. XXVII. The Lunar and Planetary Institute, Houston, p. 635-636.
- Kallemeyn, G.W., Boynton, W.V., Willis, J. and Wasson, J.T., 1978. Formation of the Bencubbin polymict meteoritic breccia. *Geochim. Cosmochim.*, v. 42, p. 507-515.
- Kallemeyn, G.W., Rubin, A.E., Wang, D. and Wasson, J.T., 1989. Ordinary chondrites: Bulk compositions, classification, lithophile-element fractionations, and composition-petrographic type relationships. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 53, p. 2747-2767.
- Kallemeyn, G.W., Rubin, A.E. and Wasson, J.T., 1991. The compositional classification of chondrites: V. The Karoonda (CK) group of carbonaceous chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 55, p. 881-892.
- Kallemeyn, G.W., Rubin, A.E. and Wasson, J.T., 1994. The compositional classification of chondrites: VI. The CR carbonaceous chondrite group. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 58, p. 2873-2888.
- Kallemeyn, G.W. and Wasson, J.T., 1981. The compositional classification of chondrites: I. The carbonaceous chondrite groups. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 45, p. 1217-1230.
- Kallemeyn, G.W. and Wasson, J.T., 1982. The compositional classification of chondrites: III. Ungrouped carbonaceous chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 46, p. 2217-2228.
- Nakamura, T. and Noguchi, T., 2011. Itokawa Dust Particles. A Direct Link Between S-Type Asteroids and Ordinary Chondrites. Science Institution Press, p. 1313-1315.
- Norton, O.R. and Chitwood, L.A., 2008. Field Guide to Meteors and Meteorites (Patrick Astronomy Series). Springer-Verlag London, 288, p.
- Ouazza, N.E., Perchiazzi, N., Kassaa, S., Ghanmi, M. and Folco, L., 2009. Meteorite finds from southern Tunisia. *Meteoritics and Planetary Science*, p. 955-960.
- Pourkhorsandi, H., Gattacceca, J., Rochette, P., Dorazio, M., Kamali, H., deAvillez, A., Roberto, D., Letichvsky, S., Djamali, M., Mirnejad, H., Debaille, V. and Jullt, A.J., 2019. Meteorites from the Lut Desert (Iran) *Meteoritics & Planetary Science journal*, v. 54, p. 1-27.
- Rollinson, H.R., 1993. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation, John Wiley and Sons, 325 p.
- Rubin, A.E. and Scott, E.R.D., 1997. Abee and related EH chondrite impact-melt breccias, *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 61, p. 425-435.
- Russell, S. and Grady, M., 2002. Meteorites, *Meteoritics and Planetary Science*, v. 37, p. 157-184.
- Van Schmus, W.R. and Wood, J.A., 1967. A chemicalpetrologic classification for the chondritic meteorites, *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 31, p. 747-765.
- Wlotzka, F., 1993. A weathering scale for the ordinary chondrites. *Meteoritics*, v. 28, p. 460-460.