

Potential geological formations and diamond-bearing assemblies in Iran and how diamonds are discovered within them

Morteza Razmara¹, Rahelah Hatefi²

¹Assistant Professor in Applied Geochemistry and Industrial Minerals, University of Ferdowsi, Mashhad

²Khorasan Razavi University of Scientific and Industrial Research, Mashhad University of Scientific and Industrial Research

Abstract:

So far, no documented geological evidence of diamond potential has been observed in the Iranian crust. However, geological formations and assemblages in Iran exist that allow for the possibility of diamonds. This study examines geological formations and assemblages with diamond potential for future geological explorations.

Among the geological formations and assemblages with potential diamond content, kimberlites and lamproites containing diamonds have not been reported in Iran. Nevertheless, geological assemblages in Iran with potential diamond potential include eclogites and ophiolites suites with diamond-bearing potential, ultra-high-pressure (UHP) metamorphic rocks, and meteorite impact sites.

Diamond-potential eclogites are characterized by high concentrations of magnesium-rich garnets (pyrope or magnetite-rich almandine) and amphibole, with the presence of coesite, orthopyroxene, clinopyroxene, Phlogopite, and sometimes spinel. Important locations for eclogite formation in Iran, such as the Shanderman eclogite (northwestern Iran) and the Sistan region eclogite (eastern Iran), with their mineralogical, petrological, and geochemical characteristics, can be further explored.

The diamond-bearing peridotites of Iran, with the presence of lower-crust and upper-mantle minerals and the unique chemical composition of the rocks in these areas, such as high concentrations of platinum group elements (PGEs), are valuable sets for exploring diamond-bearing peridotites. Among them, garnet-bearing (with chromium-rich spinels) deep-mantle peridotites containing high-magnesium olivine suites, orthopyroxenes along with clinopyroxenes containing high Mg (especially with the presence of metasomatic minerals such as Phlogopite, apatite, and amphibole), can be excellent evidence of diamond formation potential. The peridotite suites of Iran with specific geochemical characteristics, containing lower Al and Ca harzburgites but high Mg forsterite olivines, along with chromium-rich spinels and lower REE and Os concentrations than primary mantle, are also valuable sets to mention.

Keywords: Eclogite, ophiolites, Diamond-bearing Peridotite.



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).

<https://doi.org/10.22067/gemiran.2026.48064>

سازندها و مجموعه های زمین شناسی احتمالی الماس دار در ایران و چگونگی اکتشاف الماس در آنها

مرتضی رزم آرا^۱، راحله هاتفی^۲

^۱دانشیار گوه‌رشناسی کاربردی و کانیه‌های صنعتی دانشگاه فردوسی مشهد

^۲جهاد دانشگاهی خراسان رضوی، جهاد دانشگاهی مشهد

چکیده

تاکنون هیچگونه شواهد زمین شناسی مستند مبنی بر احتمال وجود الماس در پهنه ایران زمین، مشاهده نشده است. با این وجود سازندها و مجموعه های زمین شناسی در ایران وجود دارند که پتانسیل وجود الماس در آنها امکان پذیر می باشد. در این تحقیق، سازندها و مجموعه های زمین شناسی با پتانسیل وجود الماس جهت اکتشافات آینده زمین شناسان مورد بررسی قرار گرفته است.

در بین سازندها و مجموعه های زمین شناسی که احتمال الماس در آنها وجود دارند، کیمبرلیت ها و لامپروئیت های الماس دار در ایران گزارش نشده اند. با این وجود مجموعه های زمین شناسی در ایران که احتمال پتانسیل وجود الماس در آنها، امکان پذیر است شامل اکلوزیت ها و مجموعه های افیولیتی با احتمال میزبان الماس، سنگهای دگرگونی فشار فوق العاده بالا (UHP) و نیز مکانهای برخورد شهاب سنگ ها می باشند.

اکلوزیت های با پتانسیل الماس با مشخصاتی از قبیل وجود مقادیر بالای گارنت های منیزیم دار (پیروپ یا آلماندن غنی از Mg) و امفاسیت، با حضور کانی های کوئزیت (coesite)، ارتوپیروکسن، کلینوپیروکسن، فلوگوپیت و گاهی اسپینل مشخص می شوند. از مهم ترین مکان های پیدایش اکلوزیت در ایران، اکلوزیت شاندرمن (شمال غربی ایران) و اکلوزیت منطقه سیستان (شرق ایران) با توجه به خصوصیات کانی شاسی، پترولوژی و ژئوشیمیایی می توانند مورد اکتشاف تفضیلی قرار گیرند.

پریدوتیت های حاوی الماس افیولیتی ایران، با وجود کانی های حاوی گوشته میانی و فوقانی و نیز ترکیب شیمیایی سنگ ها با ژئوشیمی ویژه خاص آن مناطق همچون مقادیر بالای عناصر گروه پلاتین (PGE)، مجموعه های ارزشمندی جهت اکتشاف پریدوتیت های حاوی الماس محسوب می شوند. در این میان، لرزولیت های گارنت دار (همراه با اسپینل های غنی از کروم) عمیق گوشته زمین که حاوی مجموعه کانیه های الیوین با منیزیم بالا، ارتوپیروکسن ها به همراه کلینوپیروکسن های حاوی مقادیر بالای Mg (بوژه با حضور کانیه های متاسوماتیکی همچون فلوگوپیت، آپاتیت و آمفیبول)، شواهد بسیار خوبی بر احتمال پیدایش الماس می توانند باشند. مجموعه های پریدوتیتی ایران با ویژگی های ژئوشیمیایی خاص حاوی هارزبورگیت های با مقادیر پایین Al و Ca اما الیوین های (فورستریتی) با مقادیر بالای Mg همراه با اسپینل های غنی از کروم و نیز مقادیر REE و Os کمتر از گوشته اولیه از مجموعه های ارزشمند دیگر قابل ذکر می باشند.

کلمات کلیدی: اکلوزیت، افیولیت، پریدوتیت های حاوی الماس

مقدمه

برطبق تفاوتها در رخدادها و منشا، الماس های طبیعی در مجموعه های متفاوت زمین شناسی، در گروه های زیر، امکان پذیر می باشند: کیمبرلیت ها، لامپروئیت ها، افیولیت ها، سنگهای آکالان مافیک، سنگهای دگرگونی فشار بسیار بالا (UHP)، مکانهای برخورد شهاب سنگها و پلاسره های مرتبط با سنگ های الماس دار (Stachel, 2009; Shirey, 2013; Yang, 2014; Lian, 2019). الماس ها در افیولیت های کبک کانادا (Dresser, 1913)، کامنوشا (Kamenusha) در اورال روسیه و کوریاک شرق دور به گونه موفقیت آمیزی مورد اکتشاف قرار گرفته اند (Kaminskiy and Vaganov, 1977; Shilo et al., 1978). الماس های

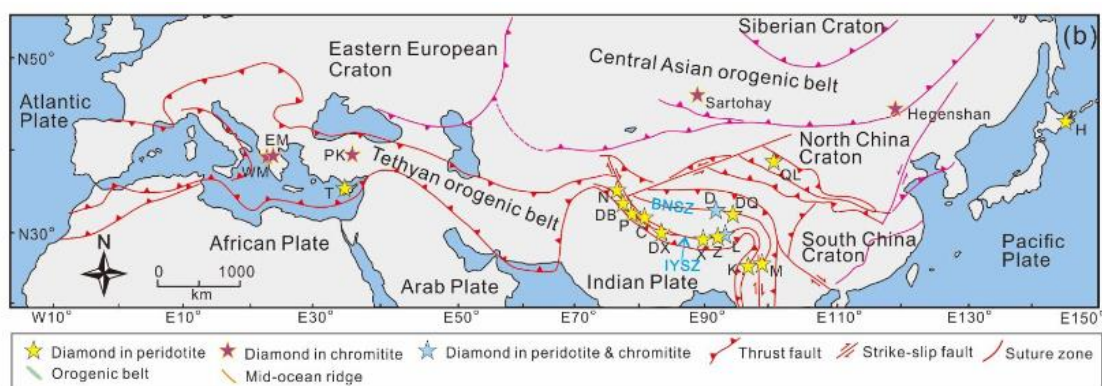
با میزبان افیولیت و دیگر کانیه‌های UHP در افیولیت‌هایی از کمرندهای کوهزایی مختلف نیز کشف شده‌اند که مبین این است که الماس‌ها در سنگهای گوشته زمین، گستره قابل توجهی دارند (Liu et al., 2020; Yang, et al., 2021). پریدوتیت‌های حاوی الماس و کرومیتیت‌ها در افیولیت‌ها، منابع ارزشمندی جهت اکتشاف کانیه‌های جدید اعماق زمین می‌باشند که مدارک و مستندات در مورد ترکیب شیمیایی و شرایط فیزیکی گوشته عمیق زمین فراهم می‌آورند (Liu et al., 2021).

کمپلکس‌های افیولیتی ایران بخشی از کمرند افیولیتی تئیس خاورمیانه می‌باشند که از شرق به افیولیت‌های دیگر مناطق آسیا همچون پاکستان و از غرب به افیولیت‌های مدیترانه (همچون ترکیه، ترودوس یونان) و شرق اروپا، متصل می‌شوند (Nicolas, 1989). بر مبنای سن جایگیری و فراوانی، افیولیت‌های ایران به دو دسته عمده تقسیم بندی شده‌اند. گروه افیولیت‌های با سن پالئوزوئیک (Weber-Diefenbach et al., 1986) و گروه افیولیت‌های با سن مزوزوئیک (Arvin M. and Robinson, 1994). افیولیت‌های مزوزوئیک ایران غالباً سن کرتاسه دارند و مرتبط با نئوتئیس و حوضه‌های پشت قوسی می‌باشند. اغلب افیولیت‌های مزوزوئیک ایران، خصوصیات ژئوشیمیایی مناطق فرورانشی (SSZ) را نشان می‌دهند که نشان می‌دهد جنوب غربی قاره آسیا در اواخر مزوزوئیک، مکان همگرایی صفحات و احتمالاً درگیر با گوشته زیرقاره‌ای بوده است (Shafaii Moghadam and Stern, 2015).

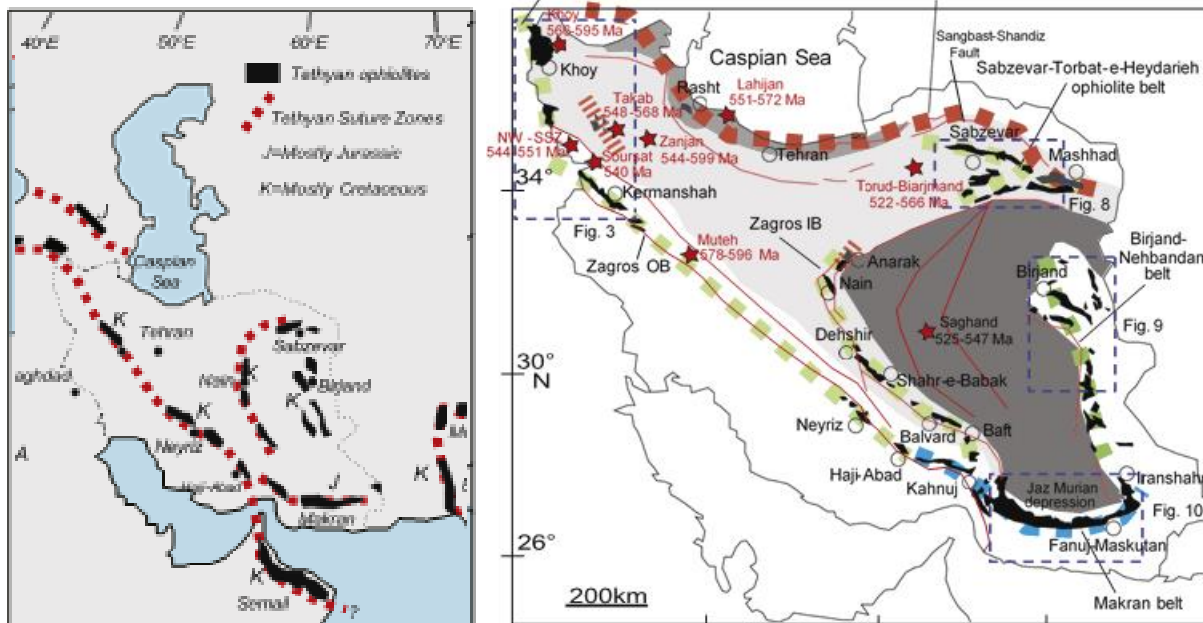
افیولیت‌ها (پریدوتیت‌ها و کرومیتیت‌های انبانه‌ای) میزبان الماس، به طور بارزی از کیمبرلایت‌های الماس‌دار و سنگ‌های دگرگونی فشار بسیار بالا (UHP) حاوی الماس، از نظر رخداد، کانیه‌های درونگیر و نیز ترکیب ایزوتوپی کربن و میتروژن‌های متفاوت می‌باشند (Liu et al., 2021).

الماس‌های کشف شده در پریدوتیت‌ها و کرومیتیت‌های افیولیتی، نوع جدیدی از میزبان الماس می‌باشند که در سال‌های اخیر به عنوان "الماس نوع افیولیتی" شناخته می‌شوند (Yang, 2014).

الماس‌های با منشأ اکلوزیتی بخش قابل توجهی از الماس‌های موجود در بازار جواهرات را به خود اختصاص داده است و خصوصیات بارز آنها نشان دهنده فرآیندهای پویایی خاص زمین می‌باشد (GIA, 2024). اکلوزیت، یک سنگ دگرگونی فشار بالا - درجه حرارت بالا (HPHT) است که دارای بیش از ۷۵٪ گارنت‌های منیزیم دار (پروپ یا آلماندن غنی از Mg) و امفاسیت (Na-Ca-Al-Mg)، می‌باشد. هم گارنت و هم امفاسیت هر دو باید در سنگ وجود داشته باشند و مقدار حجمی هر کدام نبایستی بیش از ۷۵٪ باشد. کانیه‌های روتایل، کیانیت و پلی مرف کوارتز (coesite)، نیز ممکن است وجود داشته باشند (2024,).



شکل ۱) پراکندگی جهانی افیولیت‌های حاوی الماس (تعدیل شده از Dilek, 2006; Seltnann, 2014; Liu, 2017).



شکل ۲) چپ) پراکندگی سنگ های افیولیتی تتیس در کمربند کوهزایی آلپ-همالیا (تعدیل شده از Dilek and Flower, 2003). راست) نقشه ساده زمین شناسی نشاندهنده کمربندهای اصلی افیولیتی ایران (Moghadam, and Stern, 2015).

عمده سازوکارهای تشکیل الماس

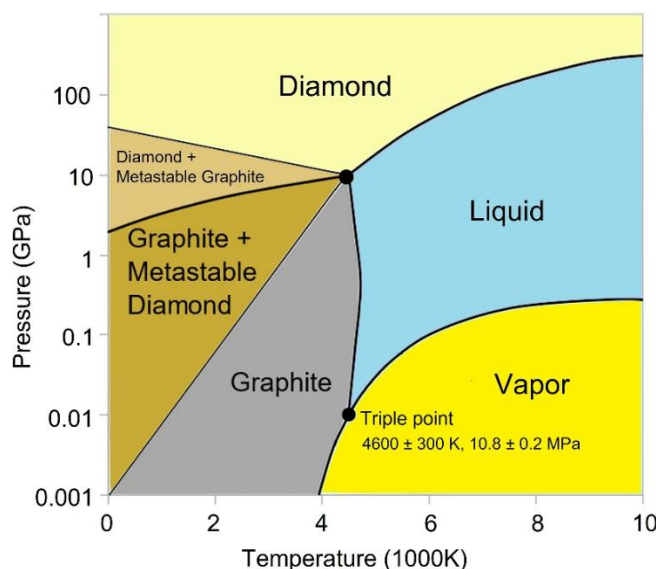
الماس، در اعماق گوشته زمین تحت شرایط فشار بسیار بالا و دمای زیاد موجود در اعماق گوشته زمین تشکیل می‌شوند. این فرآیند با تبلور اتم‌های کربن، در یک ساختار شبکه الماس پایدار، شروع می‌شود. سازوکار (مکانیسم) اساسی شامل تبلور اتم‌های کربن در یک ساختار شبکه چهاروجهی (تتراهدری) با پیوندهای بسیار محکم است. این فرآیند می‌تواند به چندین روش رخ دهد، از جمله: ۱) از طریق تبلور مجدد گرافیت در ساختار جدیدی با پیوندهای کاملاً کووالانسی، ۲) تبلور از یک ماده مذاب یا سیال اشباع از کربن، ۳) از طریق برهمکنش‌های اکسیداسیون-کاهش که کربنات‌ها یا متان در آن دخالت دارند. چگونگی تشکیل الماس طبیعی، شامل چهار مرحله بنیادی به قرار زیر است:

۱) شرایط فیزیکی ویژه تشکیل الماس

اهمیت الماس برای کربن در زمین به این دلیل است که الماس طبیعی تنها کانی کربنی است که در گوشته پایینی زمین متبلور می‌شود و در سطح زمین می‌تواند دیده شود. علاوه بر این، تشکیل الماس عمدتاً در اعماق ۱۵۰ تا ۲۰۰ کیلومتری زیر سطح زمین رخ می‌دهد. این مکان‌ها معمولاً یا در گوشته و یا زیر کراتون‌ها قرار دارند. موقعیت زمین پویایی منحصر به فرد کراتون‌ها، شرایط لازم برای پیدایش الماس را فراهم می‌کنند.

الماس برای تشکیل به فشار بسیار بالا (تقریباً ۵۰۰۰۰ برابر فشار سطح زمین) و نیز دمای بسیار بالا (حدود ۱۶۰۰ °C نیاز دارد. این شرایط معمولاً در گوشته زمین، بویژه در اعماق ۱۵۰ تا ۲۰۰ کیلومتری عمق زمین یافت می‌شوند. البته این شرایط ویژه در پی برخورد سیارک‌ها (asteroid) یا محل اصابت شهاب‌سنگ‌ها نیز می‌تواند ایجاد شوند که در این موارد، ممکن است الماس ایجاد شود. جهت امکان تبلور الماس، محیط باید شرایط ویژه ای داشته باشد: فشار: بین ۵۰۰۰ تا ۷۰۰۰۰ اتمسفر (۵ GPa تا ۷ GPa) که تقریباً ۴۵۰۰۰ تا ۶۰۰۰۰ برابر فشار اتمسفر در سطح دریا است. دما هم از ۹۰۰ °C تا ۱۳۰۰ °C متغیر است. در این شرایط شدید، اتم‌های کربن مجبور به تشکیل

یک شبکه بلوری مکعبی (کوبیک) بسیار متقارن می‌شوند که منجر به سختی استثنایی و پایداری ترمودینامیکی الماس می‌شود. ژئوبارومتری الماس‌ها بر اساس پایداری کانی‌های موجود در آنها، طیف وسیعی از اعماق را از ۱۱۰ تا ۱۵۰ کیلومتر، مربوط به مرز گرافیت-الماس در لیتوسفیر، تا بیش از ۶۶۰ کیلومتر، واقع در گوشته پایینی، بدست داده است (Shirey, et al. 2013; Beyer, & Frost, 2017; Nestola, et al., 2018).



شکل ۳) نمودار فازی عنصر کربن (C) به عنوان تابعی از فشار (GPa) و دما (Zazula, 1997).

کربنی که الماس را تشکیل می‌دهد معمولاً از دو منبع اصلی سرچشمه می‌گیرد: الف) پوسته اقیانوسی فرورانش‌شده (کربن هنگامی که صفحات اقیانوسی به زیر صفحات قاره‌ای فرو می‌روند، به گوشته وارد می‌شود و کانی‌های کربن دار را حمل می‌کند که می‌توانند تجزیه شوند و کربن آزاد کنند و یا کربن اولیه (احتمالاً مقداری کربن از زمان تشکیل زمین در گوشته زمین وجود داشته است که برای تشکیل الماس می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. البته کربن مورد نیاز برای تشکیل الماس می‌تواند از منابع مختلفی در گوشته زمین حاصل شود، از جمله کانی گرافیت، کربنات‌ها، متان و مواد مذاب یا سیالات اشباع‌شده با کربن.

فرآیندهای تشکیل الماس

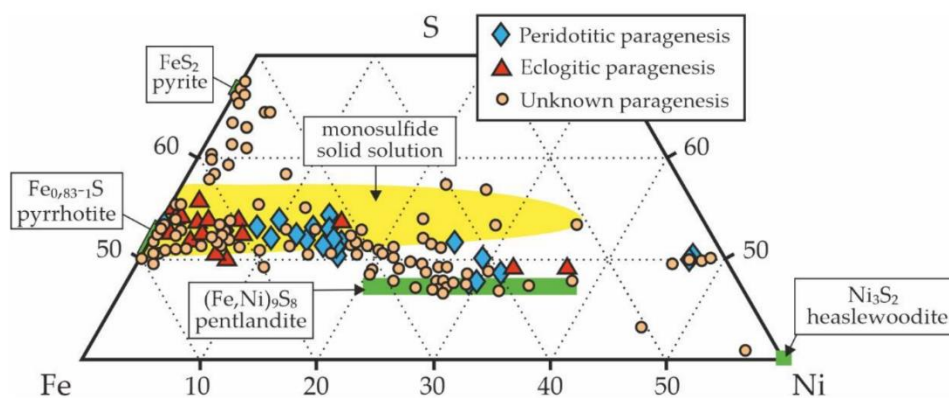
در محیط‌های با فشار و دمای بسیار بالا، اتم‌های کربن مجبور به تشکیل ساختار شبکه‌ای مکعبی (چگال و متقارن) می‌شوند که مشخصه الماس است. وجود کاتالیزست‌های فلزی (مانند نیکل) گاهی اوقات می‌تواند فشار مورد نیاز برای تشکیل الماس را کاهش دهند و در نتیجه به فرآیند تبلور کمک کنند. علاوه بر این، الماس‌ها ممکن است در طول رشد خود، کانی‌های دیگری را در خود جای دهند که به عنوان درونگیر (inclusion) عمل می‌کنند که به منحصربه‌فرد بودن هر الماس کمک می‌کنند. تحت گرما و فشار شدید، اتم‌های کربن، با چهار اتم کربن دیگر در یک آرایش چهاروجهی (تتراهدری) خاص پیوند برقرار می‌کنند. این آرایه، شبکه بلوری محکم و پایداری را تشکیل می‌دهد که به الماس‌ها خواص منحصر به فرد خود را می‌دهد. این فرآیند تبلور می‌تواند از طریق سازوکار (مکانیسم)‌های مختلفی رخ دهد: الف) تبلور مجدد گرافیت: گرافیت می‌تواند تحت فشارهای بسیار بالا و شدید مستقیماً به الماس تبدیل شود. ب) تبلور از ماده مذاب: اتم‌های کربن محلول در سیالات یا مواد مذاب می‌توانند از محلول خارج شده و بلورهای الماس را تشکیل دهند. ج) برهمکنش‌های اکسیداسیون-احیا: در برهمکنش‌های شیمیایی که کربنات‌ها یا متان در آن

دخالته دارند، اتم‌های کربن می‌توانند آزاد شوند و سپس به صورت الماس متبلور گردند. (د بازه زمانی: تبدیل کربن به الماس حتی در شرایط مناسب، یک فرآیند زمین‌شناسی کند است که معمولاً بین یک میلیارد تا ۳/۳ میلیارد سال طول می‌کشد.

الماس از گوهرسنگ‌هایی است که از گوشته زمین منشأ گرفته‌است. بیش از ۹۹٪ الماس‌ها در اصل در گوشته لیتوسفری، گوشته سرد و صلب (rigid) که زیر قاره‌ها قرار دارد و عموماً کمتر از ۳۰۰ کیلومتر عمق دارد، تشکیل شده‌اند. بیشتر الماس‌های با کیفیت گوهری از اعماق ۱۵۰ تا ۲۵۰ کیلومتری گوشته زمین سرچشمه می‌گیرند.

با وجود مطالعات متعدد نظری، ترمودینامیکی و تجربی که به بررسی پیدایش الماس اختصاص داده شده‌اند، سوالات کلیدی در مورد نیروهای محرک یا سازوکارهای تشکیل الماس همچنان مورد بحث و بررسی زیادی هستند. نظریه‌های موجود در مورد منشأ چندخاستگاهی الماس در طبیعت شامل فرآیندها، سازوکارها و نیروهای محرک مختلف جهت تبلور الماس در طبیعت است (Shirey et al., 2019; Smith et al., 2016).

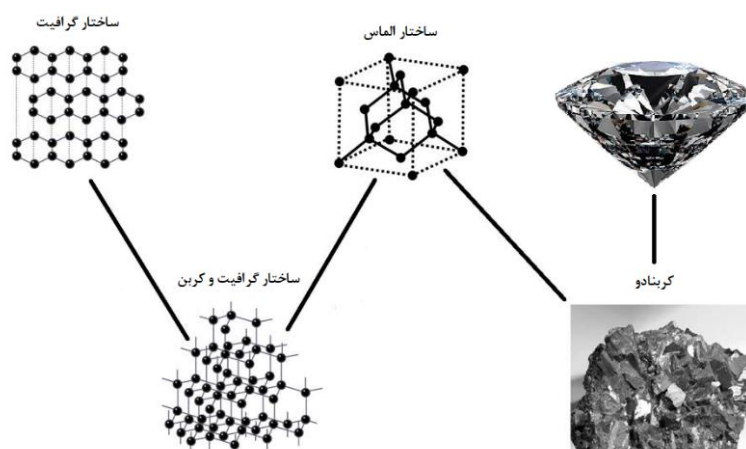
طبق مدل‌های کلاسیک، تشکیل الماس در گوشته لیتوسفر در اعماق ۱۲۰ تا ۲۱۰ کیلومتری و دمای 900°C تا 1500°C در نتیجه فرآیندهای متاسوماتیک رخ می‌دهد. نیروهای محرک تشکیل الماس در این مدل‌ها، برهمکنش‌های اکسایش-کاهش در نظر گرفته می‌شوند که هیدروکربن‌ها را اکسید یا CO_2 را به کربن عنصری کاهش می‌دهند (Shirey et al., 2013). مدل‌های دیگر، تشکیل الماس را از طریق سرد شدن سیال ایزوشیمیایی، ذوب جزئی در حضور سیال، فرآیندهای الکتروشیمیایی (تأثیر میدان الکتریکی بر مذاب‌های کربنات یا کربنات-سیلیکات) و اختلاط سیالات یا مذاب‌های مختلف پیشنهاد می‌کنند (Sverjensky and Huang, 2015). «مدل سولفیدی» (Bulanova, 1995) تشکیل الماس به دلیل وجود گسترده‌ی ناخالصی‌های سولفیدی در الماس‌ها نیز پیشنهاد شده است (شکل ۴).



شکل ۴) ترکیبات درونگیرهای سولفیدی در الماس‌های کراتون کاپوال (Stachel, 2008).

الماس در دماها و فشارهای بالای حاکم بر گوشته زمین، امکان تشکیل می‌یابد. بیشتر الماس‌هایی که کشف شده‌اند توسط فوران‌های آتشفشانی با منبع عمیق به سطح زمین رسیده‌اند. مواد مذاب این فوران‌ها، از گوشته نشات می‌گیرند و در مسیر به طرف بالا، تکه‌های دیرگداز از سنگ‌های گوشته را جدا و بدون ذوب شدن به سطح زمین می‌رسانند. این بلوک‌ها س جداشده از گوشته، به عنوان زینولیت شناخته می‌شوند. آنها حاوی الماس‌هایی هستند که در شرایط دما و فشار بالای گوشته تشکیل شده‌اند. تصور می‌شود که برخی از الماس‌ها نیز در شرایط دما/فشار

بالای مناطق فرورانش یا مکان‌های برخورد سیارک‌ها تشکیل می‌شوند. برخی از آنها همراه با شهاب سنگ‌ها به زمین می‌رسند. البته هیچ ذخیره تجاری الماس با این منشأ یافت نشده است (King, 2023).



شکل ۵) تغییرات ساختاری تبدیل گرافیت به الماس.

فرآیند تشکیل الماس، فرآیندی بسیار پیچیده و طولانی مدت است که در اعماق گوشته زمین رخ می‌دهد. تشکیل الماس به شرایط خاصی از فشار، دما و ترکیب شیمیایی نیاز دارد. این فرآیند با وجود ترکیبات غنی از کربن (مانند مواد آلی یا دی اکسید کربن)، که تحت فشار و دمای بالا در اعماق گوشته زمین قرار دارند، آغاز می‌شود. فشار بالا معمولاً توسط وزن سنگ‌های رویین ایجاد می‌شود و دمای بالا نیز ناشی از گرمای داخلی زمین است. در این شرایط، اتم‌های کربن درون مواد در یک ساختار بلوری متقارن به هم متصل می‌شوند و بلورهای الماس را تشکیل می‌دهند. تشکیل این بلورها می‌تواند میلیون‌ها یا حتی میلیاردها سال طول بکشد. پس از تشکیل، الماس‌ها، ممکن است از طریق فوران‌های آتشفشانی به سطح زمین منتقل شوند. الماس‌ها در ماگماهای آتشفشانی حمل می‌شوند که بعد از سرد شدن، سنگ‌های آذرین را تشکیل می‌دهد. این سنگ‌ها ممکن است کیمبرلیت‌ها یا لامپروئیت‌ها باشند. الماس طی دو فرآیند اصلی شامل فرآیند گوشته‌ای و فرآیند فرورانش تشکیل می‌شود. گرچه هر دوی این فرآیندها می‌توانند منجر به تشکیل الماس شوند، اما فرآیند گوشته‌ای بسیار رایج‌تر است و اکثریت قریب به اتفاق الماس‌های جهان به این روش ایجاد می‌شوند.

۱) فرآیند گوشته‌ای

فرآیند گوشته‌ای، رایج‌ترین فرآیند تشکیل الماس است. الماس‌ها در اعماق گوشته زمین، تقریباً ۱۴۰ تا ۱۹۰ کیلومتر زیر سطح زمین، تحت فشار و دمای بالا تشکیل می‌شوند. فشار بالا معمولاً توسط وزن سنگ‌های رویی ایجاد می‌شود و دمای بالا ناشی از گرمای داخلی زمین است. در این شرایط شدید، اتم‌های کربن در یک ساختار بلوری متقارن به هم متصل می‌شوند و بلورهای الماس را تشکیل می‌دهند. این بلورهای الماس سپس از طریق فوران‌های آتشفشانی به سطح زمین منتقل می‌شوند و در لوله‌های کیمبرلیت یا لامپروئیت‌ها یافت می‌شوند.

۲) فرآیند فرورانش

این فرآیند شامل فرورانش پوسته اقیانوسی به گوشته زمین است، جایی که یک صفحه تکتونیکی به زیر صفحه دیگر رانده می‌شود. در طول این فرآیند، مواد غنی از کربن صفحه فرورانش می‌توانند در گوشته وارد شوند. تحت فشار

و دمای بالا، این مواد می‌توانند بلورهای الماس را تشکیل دهد. الماس‌هایی که به این روش تشکیل می‌شوند، معمولاً به شکل بلورهای میکروسکوپی در سنگ‌هایی یافت می‌شوند که از طریق فوران‌های آتشفشانی به سطح زمین آورده می‌شوند.

طبقه‌بندی کانسارهای الماس

کانسارهای الماس در سه گروه عمده، می‌توانند طبقه‌بندی شوند (Dill, 2010).

۱) کانسارهای ماگمایی

- ۱-۱) کانسارهای الماس مرتبط با کیمبرلیت‌ها
- ۱-۲) کانسارهای الماس مرتبط با لامپروئیت‌ها (lamproites)
- ۱-۳) کانسارهای الماس در کوماتوئیت‌ها و سایر سنگ‌های اولترابازیک
- ۱-۴) کانسارهای الماس در پریدوتیت‌های توالی‌های افیولیتی

۲) کانسارهای دگرگونی

- ۲-۱) ریزالماس‌ها (Microdiamonds) در مکان‌های برخورد شهاب سنگ‌ها
- ۲-۲) ریزالماس‌ها در مناطق پرفشار
- ۲-۳) ریزالماس‌ها در گارنت گنیس
- ۲-۴) کانسارهای الماس در گرافیت شیست

۳) کانسارهای رسوبی

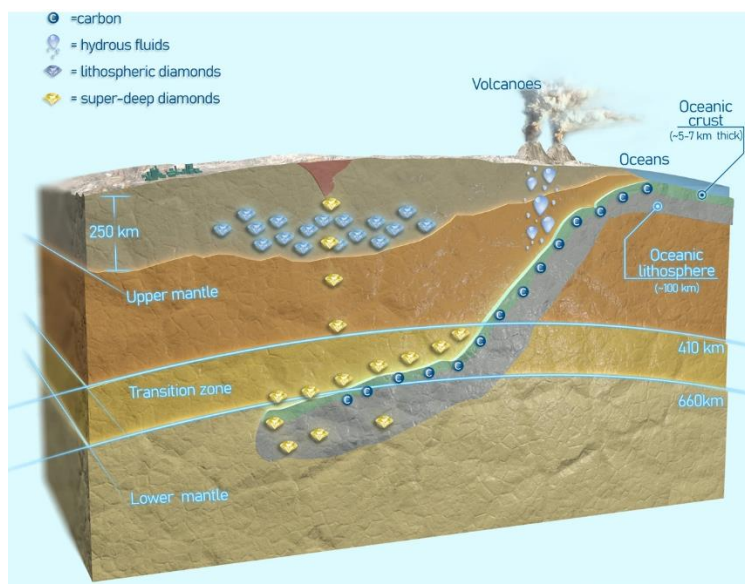
- ۳-۱) کانسارهای پلاسری
- ۳-۱-۱) کانسارهای پلاسری الماس آبرفتی-رودخانه‌ای مجاور سواحل دریایی
- ۳-۱-۲) کانسارهای الماس در پلاسرهای قدیمی (Palaeoplacer)
- ۳-۱-۳) پلاسرهای کربن‌دوی (carbonado) آبرفتی-رودخانه‌ای

محیط‌های مناسب زمین‌شناسی جهت تشکیل الماس

در زمین، الماس‌های طبیعی در چهار محیط زمین‌شناسی متفاوت تشکیل می‌شوند؛ ۱) گوشته لیتوسفری؛ ۲) گوشته زیر لیتوسفری (sub-lithospheric mantle)؛ ۳) مناطق دگرگونی فشار بسیار بالا (UHPM) (کمبرندهای کوهزایی) و ۴) در محل‌های برخورد شهاب‌سنگ‌ها (Day et al., 2023).

۱) الماس‌های با منشا گوشته لیتوسفری

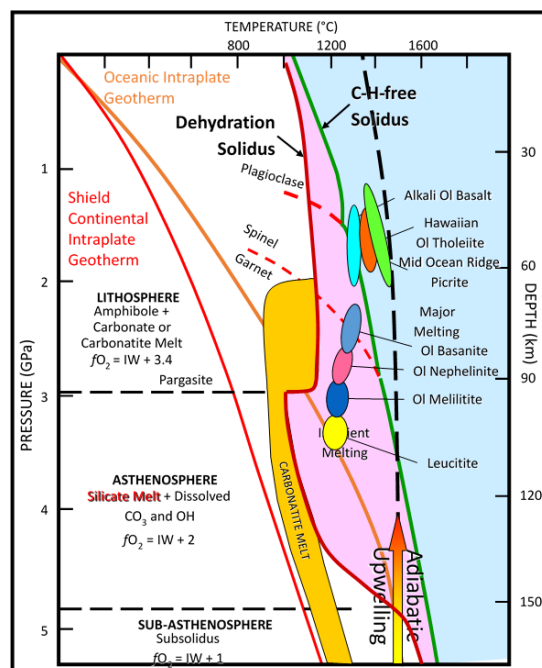
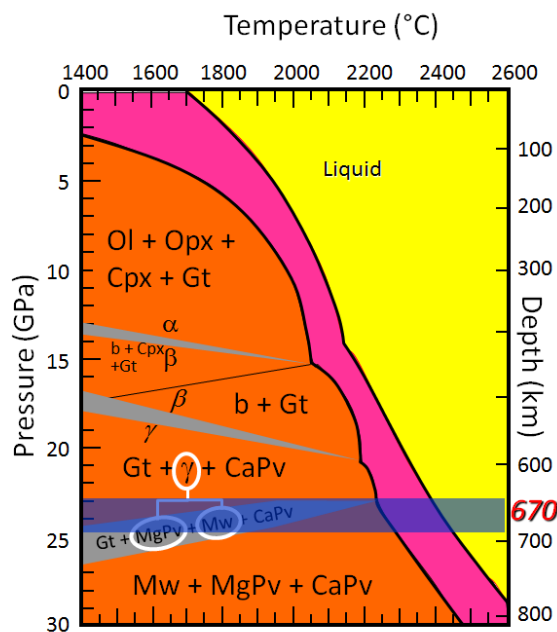
به طور کلی، الماس‌های سنگ کره (لیتوسفری) در محیط‌های گوشته‌ای (mantle keel environments) در اعماق ۱۲۰ تا ۲۰۰ کیلومتری (میانگین عمق 15 ± 175 کیلومتر) و در دمای متوسط 100 ± 1160 °C و فشار ۵ تا ۶ گیگاپاسکال تشکیل می‌شوند (Nimis et al., 2020; Stachel, 2019). بر اساس دماسنجی گارنت-الیون، نیز دمای متوسط 1140 °C و فشار ۵ گیگاپاسکال برای تشکیل الماس گزارش شده است (Stachel, and Luth, 2015). با استفاده از داده‌های ترموبارومتري برای درونگیرها (با استفاده از فشارسنج تک کلینوپیروکسن و دماسنج نیکل در گارنت)، عمق متوسط تشکیل ۱۹۰ کیلومتر در فشارهای حدود ۶ گیگاپاسکال و دمای حدود 1200 °C برای الماس‌های لیتوسفری، نشان داده شده است (Nimis et al., 2020).



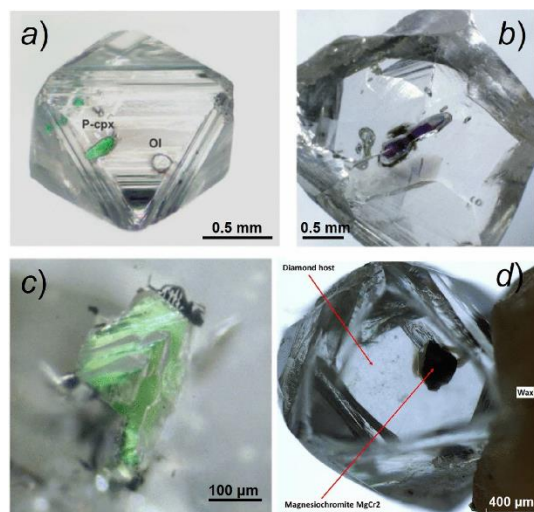
شکل ۶) شکل نمادین از مناطق امکان رشد الماس‌های سنگ کره ای (لیتوسفری) در اعماق حدود ۲۵۰ کیلومتری و الماس‌های فوق عمیق (اعماق ۴۱۰ تا ۷۰۰ کیلومتری). بخش خاکستری رنگ نشان‌دهنده یک صفحه فرورانش است که می‌تواند در اعماق بیش از ۶۶۰ کیلومتری به گوشته پایینی زمین نفوذ کند (Alvaro et al., 2022، شکل از Chirico).

بیشتر درونگیرهای کانیاپی در الماس‌های سنگ کره ای (لیتوسفری) به صورت cubo-octahedral می‌باشند. اندازه آنها از نانومتر تا صدها میکرون متغیر است و ممکن است به صورت تک بلورها و/یا تجمع‌های بلوری و/یا مواد پلی کریستالین از کانی یکسان یا کانی‌های متفاوت وجود داشته باشند. درونگیرها اغلب به عنوان مکان‌هایی برای تغییر شکل پلاستیک یا شکننده عمل می‌کنند که اغلب به صورت شکستگی‌های گرافیتی شده در اطراف درونگیرها مشاهده می‌شوند (Day et al., 2023).

درونگیرهای کانیاپی که توسط Stachel و همکاران (2008) و نیز پاماتو و همکاران (2021) در الماس‌های لیتوسفری مشخص شده‌اند، ۳۲٪ گارنت، ۱۶٪ الیوین، ۱۶٪ اسپینل کروم دار، ۱۵٪ سولفیدها (عمدتاً پیروتیت همراه با پنتلاندیت و کالکوپیریت)، ۱۳٪ کلینوپیروکسن، ۷٪ ارتوپیروکسن، حدود ۱٪ روتایل، و کوئزیت بوده‌اند. در حالی که درونگیرهای کانیاپی ذکر شده در بالا فراوان‌ترین درونگیرها در الماس‌های لیتوسفری هستند، بسیاری از درونگیرهای کانیاپی دیگر (کمتر از ۱٪) نیز مشاهده شده‌اند. به عنوان مثال، ایلمنیت، فلوگوپیت، زیرکن و کلسیت (Stachel and Aulbach, 2023). درونگیرهای کانیاپی رایج در الماس‌های پریدوتیتی در شکل ۷ نشان داده شده است.

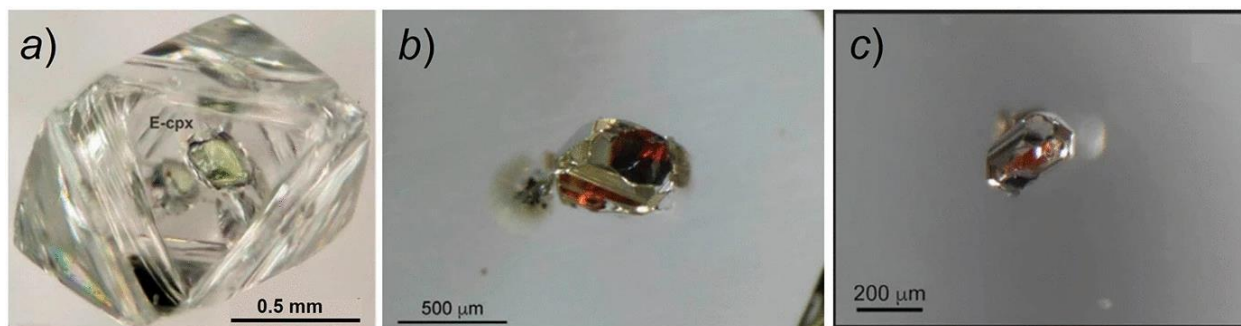


شکل ۷) چپ) نمودار فازی از مجموعه کانیهای گوشته در اعماق ۱۰۰ تا ۶۷۰ کیلومتری عمق زمین (Herzberg and Zhang, 1996). راست) مواد فرار همچون CO_2 و H_2O به عنوان تسهیل کننده ذوب پریدوتیت ها در درجات حرارت پایین تر می توانند عمل نمایند (Green,).



شکل ۸) درونگیرهای کانیایی در الماس های لیتوسفیری پریدوتیتی، (a) کلینوپیروکسن و اولیوین در یک الماس هشت وجهی (Kalugina and Zedgenizov, 2020)، (b) گارنت کروم-پیروپ (Stachel and Harris, 2008)، (c) کلینوپیروکسن (Stachel and Harris, 2008) و (d) منیزیکرومیت (Nestola et al. 2019).

الماس های اکلوزیتی با درونگیرهای گارنت و کلینوپیروکسن (شکل ۸) و همچنین ارتوپیروکسن برای الماس های وبستریتی مشخص می شوند (Stachel and Harris, 2008). به طور کلی، سنگ های پیکریتی-بازالتی پوسته اقیانوسی فروران شده، پروتولیت غالب زینولیت های اکلوزیت الماس را در نظر گرفته می شوند (Jacob, 2004).



شکل ۹) درونگیرهای کانیاپی در الماس‌های سنگ کره ای (لیتوسفری) اکلوزیتی، (a) کلینوپیروکسن در یک الماس اکتاهدردی (Kalugina and Zedgenizov, 2020)، (b) گارنت اکلوزیتی نارنجی رنگ (Harris et al. 2023) و (c) گارنت اکلوزیتی نارنجی و قرمز (Harris et al.).

۲) الماس‌های با منشأ گوشته زیر لیتوسفری (sub-lithospheric mantle)

بر اساس داده‌های ارائه شده توسط والتز و همکاران (2023)، درونگیرهای مشاهده شده عبارتند از ۴۲٪ فروپریکلاز، (یا منیزیم) وستیت، ۳۲٪ گارنت، ۸٪ برییت، ۸٪ انستاتیت، ۶٪ کلینوپیروکسن، ۴٪ الیوین و کمتر از ۱٪ کوئزیت، فاز ساختاری فریت کلسیم (CF)، فاز NAL و بسیاری از درونگیرهای دیگر با فراوانی کمتر از ۱٪ مانند پریکلاز، محلول جامد با وستیت (FeO) تشکیل می‌دهد که پرکاربردترین شاخص برای منشأ زیرلیتوسفری است.

اکلوزیت‌های الماس‌دار

اکلوزیت یک سنگ دگرگونی متراکم است که معمولاً از دگرگون شدن بازالت یا گابرو در فشارهای بسیار بالا و دمای متوسط تشکیل می‌شود. اکلوزیت با وجود دو کانی اصلی مشخص می‌شود: یک پیروکسن سبز غنی از سدیم به نام امفاسیت ($\text{Ca}_{0.6}\text{Na}_{0.3}\text{Mg}_{0.6}\text{Al}_{0.3}\text{Fe}^{2+}_{0.1}\text{Si}_2\text{O}_6$) و یک گارنت قرمز یا قهوه‌ای مایل به قرمز (اغلب پیروپ یا آلماندین). اکلوزیت تحت شرایط فشار بالا (بیش از ۱۲ کیلوبار) و دمای متوسط (حدود 600°C یا بالاتر)، اغلب در مناطق فرورانش تشکیل می‌شود. اکلوزیت در درک فرآیندهای عمیق زمین اهمیت دارد و اغلب به عنوان ادخال در کیمبرلیت‌ها و بازالت‌ها یا در کمپلکس‌های دگرگونی یافت می‌شود. اکلوزیت نقش مهمی در درک پویایی گوشته زمین، فرآیندهای فرورانش و تشکیل ماگماهای خاص ایفا می‌کند.

شواهد زمین‌شناسی احتمال وجود الماس در پهنه ایران زمین

تاکنون هیچگونه شواهد زمین‌شناسی مستند مبنی بر احتمال وجود الماس در پهنه ایران زمین، مشاهده نشده است. با این وجود سازندها و مجموعه‌های زمین‌شناسی در ایران وجود دارند که پتانسیل وجود الماس در آنها امکان پذیر می‌باشد و قابلیت اکتشاف دارند. تاکنون به صورت مستند، کیمبرلیت‌ها و لامپروئیت‌های الماس‌دار در ایران گزارش نشده اند. با این وجود مجموعه‌های زمین‌شناسی در ایران که احتمال پتانسیل وجود الماس در آنها، امکان پذیر است عبارتند از:

۱) اکلوزیت‌ها:

اکلوزیت‌های حاوی الماس با مشخصات ویژه ای از دیگر اکلوزیت‌ها متمایز می‌گردند. اکلوزیت‌های الماس‌دار حاوی مقادیر بالایی از گارنت‌های منیزیم دار (همچون پیروپ یا آلماندین‌های غنی از Mg) و نیز امفاسیت می‌باشند که با کانی‌هایی همچون کوئزیت (coesite)، ارتوپیروکسن، کلینوپیروکسن، فلوگوپیت و گاهی اسپینل همراهی می‌شوند. اکلوزیت در مکانهای متعددی از ایران گزارش شده است اما از مهم‌ترین مکان‌های پیدایش اکلوزیت در ایران، اکلوزیت شاندرمن (شمال غربی ایران) و اکلوزیت منطقه

سیستان (شرق ایران) با توجه به خصوصیات کانی شاسی، پترولوژی و ژئوشیمیایی می توانند قابلیت اکتشاف تفضیلی در این مورد را داشته باشند.

ویژگی های کلیدی اکلوزیت های حاوی الماس:

- کانی شناسی: عمدتاً از گارنت (اغلب با رنگ های نارنجی) و کلینوپیروکسن (معمولاً سبز، با درجات مختلفی از دگرسانی) تشکیل شده است.
- بافت: درشت دانه، با نسبت های متغیری از گارنت و کلینوپیروکسن.
- الماس: مقادیر ناچیزی الماس در داخل سنگ یافت می شود. گاهی اوقات شواهدی از جذب یا دگرسانی، نشان دهنده فرآیندهای پیچیده رشد و تخریب است.
- منشأ: به احتمال در فشارها و دماهای بالا (حدود 1200°C و عمق ۱۸۰-۲۰۰ کیلومتر) در گوشته لیتوسفر زیرقاره ای تشکیل شده است.
- دگرگونی: اکلوزیت یک سنگ دگرگونی است که از دگرگون شدن بازالت یا گابرو در شرایط فشار و دمای بالا تشکیل شده است.
- ویژگی های ژئوشیمیایی: اکلوزیت ها اغلب ویژگی های ژئوشیمیایی نشان دهنده پوسته اقیانوسی فرورانش شده یا پوسته اقیانوسی دگرسان شده را نشان می دهند.
- وجود ناخالصی ها در الماس ها: الماس های موجود در اکلوزیت ها می توانند حاوی درونگیرهایی از کانی هایی مانند گارنت و کلینوپیروکسن باشند که اطلاعات کلیدی در مورد محیط تشکیل الماس ارائه می دهند.
- رویدادهای متاسوماتیک متعدد: برخی از اکلوزیت ها شواهدی از رویدادهای متاسوماتیک متعدد (برهمکنش ها با سیالات یا مواد مذاب) را نشان می دهند. برخی از این رویدادها به رشد الماس کمک و برخی دیگر باعث تخریب الماس می شوند.
- رشد و تخریب الماس: الماس های موجود در اکلوزیت ها می توانند هم شواهدی از رشد (مثلاً بلورهای منطقه بندی شده) و هم جذب (مثلاً اشکال گرد شده، سطوح نامنظم) را نشان دهند که نشان دهنده فرآیندهای پیچیده رشد و تخریب در گوشته زمین است.

۲) سنگ های دگرگونی فشار فوق العاده بالا (UHP)

از مهمترین سنگ های دگرگونی تحت فشار فوق العاده بالا در ایران که به طور عمده در مناطق جغرافیایی حضور دارند به سنگ های دگرگونی منطقه گلپایگان می توان اشاره کرد که حاوی کانیهای گارنت، کوارتز، کلریت، استارولیت، آندالوزیت، کیانیت و سیلیمانیت هستند. در منطقه زنجان نیز سنگ های دگرگونی تحت فشار بسیار بالا عمدتاً شامل آمفیبولیت، گنایس، شیست و سنگ مرمر هستند.

۳) مجموعه های افیولیتی با احتمال میزبان الماس

پریدوتیت های حاوی الماس در مجموعه های افیولیتی ایران، با ژئوشیمی و ترکیب شیمیایی ویژه آن مناطق همچون مقادیر بالای عناصر گروه پلاتین (PGE)، مجموعه های ارزشمندی جهت اکتشاف پریدوتیت های حاوی الماس محسوب می شوند. در این میان، لرزولیت های گارنت دار (همراه با اسپینل های غنی از Cr) متعلق به مناطق عمیق گوشته زمین که حاوی مجموعه کانیهای الیوین با Mg بالا و نیز ارتوپیروکسن ها و کلینوپیروکسن های حاوی مقادیر بالای Mg (بوژه با حضور کانیهای **متاسوماتیکی** همچون فلوگوپیت، آپاتیت و آمفیبول)، شواهد بسیار خوبی بر احتمال پیدایش الماس می توانند باشند.

مجموعه های پریدوتیتی ایران با ویژگی های ژئوشیمیایی خاص حاوی سنگ های هارزبورگیتی با مقادیر پایین Al و Ca و الیوین های فورستیتی با مقادیر بالای Mg همراه با اسپینل های غنی از Cr و نیز مقادیر REE و Os کمتر از گوشته **اولیه** (primitive mantle) از مجموعه های ارزشمند دیگر قابل ذکر می باشند.

۴) مکانهای برخورد شهاب سنگ ها

هنگامی که شهاب سنگ ها با زمین برخورد می کنند، گرما و فشار شدیدی را در نقطه برخورد ایجاد می کنند. این برخورد شدید می تواند باعث شود مواد کربن دار از طریق فرآیندی که به عنوان شوک دگرگونی شناخته می شود، به الماس تبدیل شوند. اگرچه الماس های حاصل از برخورد، معمولاً کوچک هستند و به عنوان گوهر مناسب نیستند، اما به دلیل سختی شان در کاربردهای صنعتی می توانند ارزشمند باشند. برخی از الماس ها نیز فراتر از زمین تشکیل می شوند. الماس هایی که در شهاب سنگ ها یافت شده اند نشان می دهد که آنها در شرایط فرازمینی مانند موارد زیر می توانند تشکیل شوند:

الف) محیط بین ستاره ای: در مناطق تشکیل ستاره ها، هیدروکربن ها در معرض تشعشعات شدید قرار می گیرند که می تواند آنها را به اتم های کربن تجزیه کند که ممکن است با گذشت زمان به الماس متبلور می شوند.

ب) برخورد مستقیم شهاب سنگ: امواج شوک ناشی از برخوردها می توانند گرافیت را در مقیاس میکروسکوپی به الماس تبدیل کنند.

کوماتوئیت های حاوی الماس

کوماتوئیت (Komatiite)، یک سنگ آتشفشانی اولترامافیک است که گرچه می تواند حاوی الماس باشد، اگرچه این یک اتفاق رایج نیست. الماس های یافت شده در کوماتوئیت معمولاً به صورت بیگانه بلور (xenocryst) هستند (به این معنی که آنها از جای دیگری به ماگمای کوماتوئیتی اضافه شده اند)، نه اینکه در داخل آن تشکیل شده باشند. تصور می شود که این الماس ها از اعماق گوشته زمین (از مناطقی که الماس پایدار است)، سرچشمه می گیرند و سپس توسط ماگمای کوماتوئیتی به سطح زمین منتقل می شوند (Capdevila et al., 1999). کوماتیت ها با مقادیر بالای اکسید منیزیم مشخص می شوند و اغلب با کراتون های قدیمی (پوسته قاره ای پایدار) مرتبط هستند. تهی شدگی از عنصر آلومینیوم (Al) در کوماتیت ها مبین این است که گارنت یک فاز باقیمانده، در طول ذوب شدگی بوده است که نشان می دهد ماده اولیه از اعماق بیش از ۲۵۰ کیلومتر نشات گرفته است. این عمق کاملاً در محدوده ای است که الماس پایدار است. کوماتیت (Dachine (در گویان) به دلیل داشتن الماس های کربونادو (نوعی الماس پلی کریستالین با خواص منحصر به فرد)، شناخته شده است. تصور می شود، این کربونادوها از سیالات مرتبط با کوماتیت در دماهای بالا تشکیل شده اند.

نتیجه گیری

سازندها و مجموعه های زمین شناسی در ایران وجود دارند که پتانسیل وجود الماس در آنها امکان پذیر می باشند. مجموعه های زمین شناسی در ایران که احتمال پتانسیل وجود الماس در آنها، امکان پذیر است شامل اکلوژیت ها و مجموعه های افیولیتی با احتمال میزبان الماس، سنگ های دگرگونی فشار فوق العاده بالا (UHP) و نیز مکانهای برخورد شهاب سنگ ها می باشند. از مهم ترین مکان های پیدایش اکلوژیت در ایران، اکلوژیت شاندرمن (شمال غربی ایران) و اکلوژیت منطقه سیستان (شرق ایران) با توجه به خصوصیات کانی شاسی، پترولوژی و ژئوشیمیایی می توانند مورد اکتشاف تفصیلی قرار گیرند. مجموعه های پریدوتیتی ایران با ویژگی های ژئوشیمیایی خاص حاوی هارزبورگیت های با مقادیر پایین Al و Ca اما الیوین های (فورستریتی) با مقادیر بالای Mg همراه با اسپینل های غنی از کروم و نیز مقادیر REE و Os کمتر از گوشته اولیه (primitive mantle) از مجموعه های ارزشمندی می باشند که در پریدوتیت های منطقه فریمان نمودهایی از آنها قابل مشاهده می باشند.

References

- Arvin, M. and Robinson, P. T. (1994) The petrogenesis and tectonic setting of lavas from the Baft ophiolitic melange, southwest of Kerman, Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 31: 824-834.
- Dresser, J.A. *Preliminary Report on the Serpentine and Associated Rocks of Southern Quebec*; Memoir-Geological Survey of Canada: Ottawa, ON, Canada, 1913; Volume 1, pp. 1–103.
- Kaminskiy, F.V.; Vaganov, V.I. Petrological conditions for diamond occurrences in Alpine-type ultrabasic rocks. *Int. Geol. Rev.* 1977, 19, 1151–1162.
- Feng, G.; Yang, J.; Dilek, Y.; Liu, F.; Xiong, F. (2018) Petrological and Re-Os isotopic constraints on the origin and tectonic setting of the Cuobuzha peridotite, Yarlung Zangbo suture zone, southwest Tibet, China. *Lithosphere*, 10, 95–108.
- Green et al. (2010) *Nature*, 467, 448-452.
- Liu, F.; Yang, J.S.; Lian, D.Y.; Xiong, F.H.; Wu, W.W. (2020) Diamonds and other unusual minerals in global ophiolites. *Acta. Geol. Sin.*, 94, 2588–2605.
- Liu, F.; Lian, D.; Wu, W.; Yang, J. (2021) Diamond and Other Exotic Mineral-Bearing Ophiolites on the Globe: A Key to Understand the Discovery of New Minerals and Formation of Ophiolitic Podiform Chromitite. *Crystals*, 11, 1362.
- Lustrino, M. (2019) *Petrologia e Geodinamica*. Laurea Magistrale in Geologia di Esplorazione. Dipartimento di Scienze della Terra. Università degli Studi di Roma La Sapienza.
- Nicolas A. (1989) *Structure of Ophiolites and Dynamics of Oceanic Lithosphere*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands, 367 p. (1989).
- Razmara, M. (1990) The investigation of geological, petrological and mineral resources in ophiolite melange of Torbate Hydarieh. MSc thesis. University of Tehran.
- Shafaii Moghadam, H. and Stern, B. (2015) Ophiolites of Iran: Keys to understanding the tectonic evolution of SW Asia: (II) Mesozoic ophiolites. *Journal of Asian Earth Sciences*.
- Shafaii Moghadam, H.; Stern, R.J.; Griffin W.L.; Khedr, M.Z.; Kirchenbaur, M.; Ottley, C.J.; Whattam, S.; Kimura, J.-I.; Ghorbani, G.; Gain, S.; O'Reilly, S.Y. and Tamura, A. (2020) Subduction initiation and back-arc opening north of Neo-Tethys: Evidence from the Late Cretaceous Torbat-e-Heydarieh ophiolite of NE Iran. *GSA bulletin*, 132 (5-6), pp. 1083-1105.
- Shilo, A.N.; Kaminskiy, V.F.; Palandzhyan, A.S.; Tilman, M.S.; Tkachenko, A.L. First diamond finds in Alpine-type ultrabasic rocks in the Northeastern USSR. *Dokl. Akad. Nauk SSSR* 1978, 241, 179–182.
- Weber-Diefenbach, K.; Davoudzadeh, M.; Alavi-Tehrani, N. and Linsch, G. (1986) Paleozoic ophiolites in Iran, geology and geochemistry, and geodynamic implication. *Ophiolites*, 11: 305-338.
- Yang, J.; Wu, W.; Lian, D.; Rui, H. (2021) Peridotites, chromitites and diamonds in ophiolites. *Nat. Rev. Earth Environ.*, 2, 198–212.