

## نگین‌های زمین‌شناسی: رمزگشایی از زبان رنگ و داستان بلور در گارنت‌ها

عاطفه رضی<sup>۱\*</sup>، بنفشه اسدی چهاربرج<sup>۱</sup>، عاطفه چنارانی<sup>۱</sup>، مصطفی رضایی سیستانی<sup>۱</sup>

۱- گروه زمین‌شناسی دانشگاه فردوسی مشهد

\*(atirazi030708@gmail.com)

### چکیده

گروه کانی‌های گارنت به دلیل تنوع رنگی چشمگیر و توانایی تشکیل بلورهای درشت و باکیفیت، همواره مورد توجه گوهرشناسان و زمین‌شناسان بوده‌اند. رنگ در گارنت‌ها عمدتاً توسط یون‌های فلزی واسطه (رنگ‌زاها) مانند  $\text{Fe}^{2+}$ ،  $\text{Fe}^{3+}$ ،  $\text{Cr}^{3+}$ ،  $\text{V}^{3+}$  و  $\text{Mn}^{2+}$  که در ساختمان بلوری آنها جایگزین می‌شوند، کنترل می‌گردد. پدیده جذاب تغییر رنگ نیز ناشی از جذب نور در نواحی خاصی از طیف مرئی توسط این یون‌ها تحت منابع نوری متفاوت است. از سوی دیگر، تشکیل و اندازه بلورهای گارنت شدیداً متأثر از شرایط ژنتیکی (دما، فشار، ترکیب سیال)، محیط زمین‌شناختی (اسکارن، پگماتیت، سنگ‌های دگرگونی) و دینامیک تبلور است. این مقاله با بررسی نظام‌مند مطالعات پیشین و تحلیل پژوهش‌های جدید بر روی گارنت‌های آندرادیت و تغییررنگ آن‌ها، به تبیین مکانیسم‌های بنیادی رنگ‌زایی و بلورزایی در این کانی‌های ارزشمند می‌پردازد. نتایج نشان می‌دهد که درک این فرآیندها نه تنها در شناسایی و ارزیابی گوهرها، بلکه در اکتشاف ذخایر جدید و تفسیر شرایط زمین‌شناختی تشکیل آنها حائز اهمیت است.

**کلیدواژه‌ها:** گارنت، رنگ‌زایی، تغییر رنگ، بلورزایی، اندازه بلور.

## Geological Gems: Decoding the Language of Color and the Story of Crystal in Garnets

Atefeh Razi<sup>\*1</sup>, Banafsheh Asadi chaharborj<sup>1</sup>, Atefeh Chenarani<sup>1</sup>, Mostafa Rezaei Sistani<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Geology, Ferdowsi University of Mashhad

\*(atirazi030708@gmail.com)

### Abstract

The garnet group of minerals has always been of interest to gemologists and geologists due to its remarkable color diversity and ability to form large, high-quality crystals. The color in garnets is mainly controlled by intermediate metal ions (colorants) such as  $\text{Fe}^{2+}$ ،  $\text{Fe}^{3+}$ ،  $\text{Cr}^{3+}$ ،  $\text{V}^{3+}$ ، and  $\text{Mn}^{2+}$  that are substituted in their crystal structure. The fascinating phenomenon of color change is also caused by the absorption of light in certain regions of the visible spectrum by these ions under different light sources. On the other hand, the formation and size of garnet crystals are strongly influenced by genetic conditions (temperature, pressure, fluid composition), geological environment (skarn, pegmatite, metamorphic rocks), and crystallization dynamics. This article explains the fundamental mechanisms of color formation and crystallization in these valuable minerals by systematically reviewing previous studies and analyzing new research on andradite garnets and their color change. The results show that understanding these processes is important not only in identifying and evaluating gems, but also in exploring new deposits and interpreting the geological conditions of their formation.

**Keywords:** Garnet, coloration, chromophore, Rezaei Blue, crystal size.

## ۱- مقدمه

گارنت‌ها از مهم‌ترین گروه‌های کانی‌های سیلیکاتی با فرمول عمومی  $A_3B_2(SiO_4)_3$  هستند که در سیستم کوبیک متبلور می‌شوند. این کانی‌ها در طیف وسیعی از محیط‌های زمین‌شناختی از سنگ‌های دگرگونی دما و فشار بالا گرفته تا پگماتیت‌ها و ذخایر اسکارنی تشکیل می‌شوند (Deer et al., 1992). دو ویژگی برجسته گارنت‌ها که محور اصلی این مقاله است، تنوع رنگ خیره‌کننده و توانایی تشکیل بلورهای گوهرین درشت می‌باشد. رنگ‌های سبز زمردی دمانتوئید، قرمز یاقوتی پیروپ، نارنجی اسپسارتین و حتی پدیده نادر تغییر رنگ، همگی حاصل جایگزینی یون‌های فلزی خاص و تعامل نور با ساختار بلوری آنهاست. از طرفی، اندازه و کیفیت بلورهای گارنت مستقیماً با شرایط فیزیکوشیمیایی محیط تشکیل، مانند دما، فشار، غلظت عناصر، نرخ تبلور و مدت زمان رشد در ارتباط است. هدف این مقاله، ارائه یک مرور جامع بر دانش فعلی در مورد عوامل کنترل‌کننده رنگ و اندازه بلور در گارنت‌ها، با استناد به شواهد تحلیلی جدید و نمونه‌های بارز از ایران و جهان است.

## ۲- مواد و روش‌ها

روش کار این پژوهش مروری، بر اساس پروتکل‌های استاندارد «مرور نظام‌مند» و مطابق با دستورالعمل‌هایی چون PRISMA طراحی و اجرا شد. فرآیند با تعریف دقیق پرسش‌های پژوهشی و معیارهای ورود و خروج مطالعات آغاز گردید. سپس، جستجوی جامع و سیستماتیک در پایگاه‌های علمی معتبر با استفاده از کلیدواژه‌های هدفمند انجام شد. در مرحله بعد، غربالگری چندمرحله‌ای (بر اساس عنوان، چکیده و متن کامل) برای انتخاب نهایی مرتبط‌ترین و باکیفیت‌ترین مقالات به کار گرفته شد. داده‌های کلیدی از مطالعات منتخب استخراج و در قالب جداول دسته‌بندی گردیدند. در نهایت، با تلفیق انتقادی و تفسیر هم‌سو یافته‌های این مطالعات، چارچوب تحلیلی نوین برای پاسخ به پرسش‌های پژوهش ارائه و نتیجه‌گیری نهایی حاصل شد (شکل ۱).



شکل ۱- فرآیند تحلیل و پژوهش

## ۳- بحث

### ۳/۱. منشأ رنگ در گارنت‌ها: نقش رنگ‌زاها

رنگ در گارنت‌ها ناشی از جذب انتخابی طول‌موج‌های خاصی از نور سفید توسط یون‌های فلزی واسطه (کروموفورها) است که در دو جایگاه کریستالوگرافی A (دوظرفیتی) و B (سه‌ظرفیتی) قرار می‌گیرند (شکل ۲).

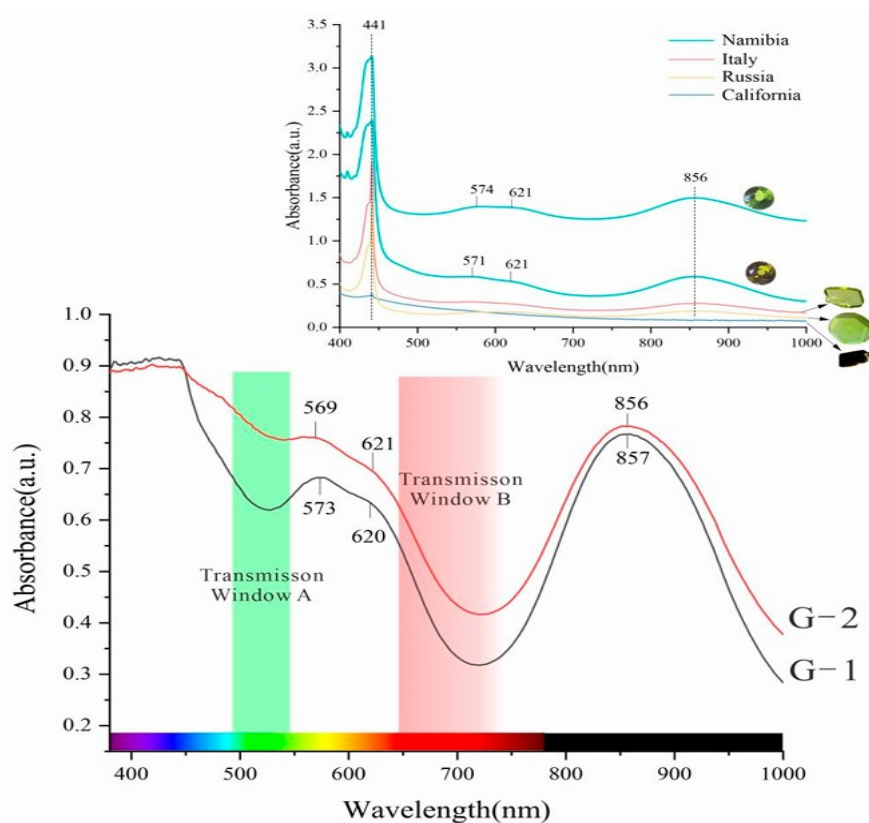
#### الف) عوامل رنگ‌زای اصلی:

❖ آهن: مهم‌ترین رنگ‌زا.  $Fe^{2+}$  (در جایگاه A) باعث ایجاد رنگ‌های زرد تا قهوه‌ای می‌شود.  $Fe^{3+}$  (در جایگاه B) مسئول رنگ زرد در آندرادیت است. در نمونه‌های تغییررنگ آندرادیت مطالعه شده، جذب قوی توسط  $Fe^{2+}$  در محدوده  $570 \sim$  نانومتر ( $E_g \rightarrow {}^3T_1g$  transition<sup>5</sup>) پنجره‌های عبور در سبز و قرمز ایجاد کرده و سبب تغییر رنگ از زرد-سبز به ارغوانی می‌شود (Xu et al., 2024).

- ❖ **کروم ( $\text{Cr}^{3+}$ ):** قوی‌ترین رنگ‌زای سبز. جایگزین  $\text{Al}^{3+}$  در جایگاه B می‌شود و رنگ سبز زمردی زیبای دمانتوئید را ایجاد می‌کند.
- ❖ **وانادیم ( $\text{V}^{3+}$ ):** می‌تواند رنگ‌های سبز-آبی تا سبز ایجاد کند و در اثر تغییر رنگ برخی گارنت‌ها نقش دارد.
- ❖ **منگنز ( $\text{Mn}^{2+}$ ):** عامل اصلی رنگ نارنجی تا قرمز در اسپسارترین است (Shen et al, 2018).

جدول ۱: عوامل رنگ‌زای اصلی و اثر آنها در گونه‌های مختلف گارنت

گونه گارنت	رنگ معمول	رنگ‌زای(های) اصلی	مکانیسم/توضیح
آلماندین	قرمز تا قهوه‌ای	$\text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}$	جذب در آبی-سبز.
پیروپ	قرمز ارغوانی	$\text{Fe}^{2+}, \text{Cr}^{3+}$ (ناخالصی)	غلظت پایین $\text{Fe}^{2+}$ .
اسپسارترین	نارنجی تا قرمز	$\text{Mn}^{2+}$	جذب قوی در آبی-بنفش.
آندرادیت	زرد، سبز، قهوه‌ای	$\text{Fe}^{3+}$ (زرد)، $\text{Cr}^{3+}$ (سبز)	دمانتوئید $\text{Cr}^{3+}$ : جایگزین $\text{Fe}^{3+}$ .
گروسولار	بی‌رنگ، سبز، نارنجی	$\text{V}^{3+}/\text{Cr}^{3+}$ (سبز)، $\text{Fe}^{3+}$ (نارنجی)	تساووریت: سبز به دلیل $\text{V}^{3+}/\text{Cr}^{3+}$ .



شکل ۲: نمودار طیف جذب UV-Vis-NIR یک گارنت آندرادیت تغییررنگ. پیک جذب گسترده در  $\sim 570$  نانومتر مربوط به  $\text{Fe}^{2+}$  و پنجره‌های عبور در نواحی سبز و قرمز مشخص شده‌اند (برگرفته از Xu et al., 2024).



### (ب) پدیده تغییر رنگ:

این پدیده زمانی رخ می‌دهد که سنگ در زیر دو منبع نور متفاوت (مانند نور روز D65 و نور التهایبی A) رنگ‌های متمایزی نشان دهد. مطالعات اخیر نشان می‌دهد که برخلاف تصور رایج،  $Fe^{2+}$  نیز می‌تواند مانند  $Cr^{3+}$  و  $V^{3+}$  عامل ایجاد این اثر باشد. در نمونه‌های آندرادیت مطالعه شده، غلظت Cr و V بسیار ناچیز ( $> 1 \text{ ppm}$ ) بود، در حالی که  $Fe^{2+}$  بالا (تا  $4.66 \text{ wt.}\%$ ) عامل اصلی تغییر رنگ شناسایی شد (Qiu & Guo, 2021).

G-1



A

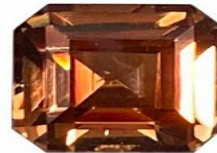


B

G-2



A



B

5mm

شکل ۳- عکس‌هایی از نمونه‌های تغییر رنگ گارنت‌ها. تصویر (الف) زیر نور استاندارد D65 گرفته شده است؛ تصویر (ب) زیر نور استاندارد A گرفته شده است (Qiu & Guo, 2021).

### ۳.۲. چگونگی پیدایش و رشد بلورهای گارنت: کنترل اندازه و کیفیت

اندازه و شفافیت بلورهای گارنت که تعیین‌کننده قابلیت گهرریزی آنهاست، به عوامل متعددی بستگی دارد.

#### (الف) محیط‌های ژنتیکی اصلی:

۱. ذخایر اسکارنی: مهم‌ترین محیط برای تشکیل گارنت‌های گهرین درشت، به ویژه آندرادیت و گروسولار. در این محیط، واکنش بین سیالات گرمابی داغ مشتق شده از توده‌های نفوذی و سنگ‌های کربناتی میزبان (مانند سنگ آهک) رخ می‌دهد. دمانتوئیدهای مرغوب ایران (مثل باغ برج کرمان) و جهان در این محیط تشکیل می‌شوند.
۲. سنگ‌های دگرگونی درجه بالا: مانند شیست‌ها و گنیس‌ها، که محل اصلی تشکیل آلماندین و پیروپ هستند. بلورها اغلب ریز تا متوسط بوده و به ندرت به اندازه گهرین می‌رسند.
۳. پگماتیت‌ها: در این محیط با سیالات غنی از مواد فرار، امکان تشکیل بلورهای درشت و گاه بسیار عظیم‌الجثه از گونه‌هایی مانند اسپسارتین فراهم می‌شود (Gübelin & Schmetzer, 1982).

### ب) عوامل کنترل کننده اندازه بلور:

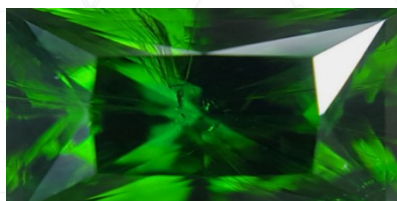
- ❖ درجه فوق اشباع ( $\Omega$ ) و نرخ رشد: هرچه محلول (سیال گرمایی) از حالت تعادل دورتر باشد ( $\Omega$  بالا)، نرخ هسته‌زایی نسبت به نرخ رشد افزایش یافته و بلورهای ریز و فراوان تشکیل می‌شوند. برای تشکیل بلورهای درشت، شرایط نزدیک به تعادل ( $\Omega$  پایین تا متوسط) با نرخ رشد آهسته و پایدار ایده‌آل است.
- ❖ مدت زمان رشد: دسترسی پایدار به منبع مواد (Ca, Fe, Si, etc) در یک بازه زمانی طولانی، شرط ضروری برای رشد بلورهای درشت است. سیستم‌های اسکارنی با دوره‌های طولانی فعالیت هیدروترمال این امکان را فراهم می‌کنند.
- ❖ فضای فیزیکی: وجود حفرات و شکاف‌ها در سنگ میزبان فضای لازم برای رشد بلورهای آزاد (euhedral) و درشت را مهیا می‌سازد.
- ❖ ترکیب شیمیایی سیال: حضور عناصر رنگ‌زا (Cr, V) و همچنین عناصری مانند Al که بر جایگزینی و پایداری گونه خاصی از گارنت تأثیر می‌گذارند، بسیار مهم است. نسبت  $Fe^{3+}/(Fe^{3+}+Al)$  در سیال، تعیین کننده تشکیل آندرادیت در مقابل گروسولار است (Qiu & Guo, 2021).

### جدول ۲: رابطه بین محیط ژنتیکی، گونه گارنت و اندازه معمول بلور.

کیفیت گوه‌ریزی	اندازه معمول بلور	گونه گارنت شاخص	محیط تشکیل
عالی تا خوب (بسته به شفافیت)	ریز تا بسیار درشت (گاه $> 5$ سانتی‌متر)	آندرادیت (دمانتوئید)، گروسولار	اسکارن
خوب (اغلب دارای ناخالصی)	متوسط تا عظیم‌الجثه (مشهور)	اسپسارتین، آلماندین	پگماتیت
ضعیف تا متوسط (اغلب کدر)	ریز تا متوسط (معمولاً $< 2$ سانتی‌متر)	آلماندین، پیروپ	شیست/گنیس
خوب (به عنوان سنگ همراه الماس)	ریز تا متوسط	پیروپ	کیمبرلایت

### ج) دمانتوئیدهای ایرانی

وجود اینکلوزن‌های سوزنی شکل کریزوتیل (آزبست) به شکل دم اسب (Horsetail) در دمانتوئیدهای ایرانی (مانند باغ برج کرمان - شکل ۴)، نه تنها نشانه‌ای از تشکیل در محیط‌های سرپانتینی-اسکارنی است، بلکه شهادتی بر رشد آرام و طولانی مدت بلور در حضور سیالات غنی از Mg و Si می‌باشد. این شرایط ویژه منجر به تشکیل گوه‌هایی با کیفیت بالا و مشخصه‌ای منحصر به فرد می‌گردد (Ahadnejad et al, 2022).



شکل ۴- اینکلوزن‌های دمانتوئید باغبرج کرمان

### ۴- نتیجه‌گیری

تغییر رنگ گارنت‌های آندرادیت، همچون رازآلودترین جواهرات طبیعت، پرده از شگردی خارق‌العاده در بازی نور و ماده برمی‌دارند. این پژوهش با کالبدشکافی دو نمونه استثنایی، نشان داد که در پشت صحنه این نمایش رنگین، آهن دوزرفیتی ( $Fe^{2+}$ ) نقش اصلی را ایفا می‌کند و نه عناصر کلاسیکی مانند کروم. این کشف، انگاره‌های پیشین را به چالش کشیده و بینش

جدیدی از پیچیدگی مکانیسم‌های رنگ‌زایی در دنیای کانی‌ها ارائه می‌دهد. گوهرهای ما با ایجاد دو "پنجره جادویی" عبور نور در نواحی سبز و قرمز طیف، و یک پرده جذب قدرتمند در مرز زرد-نارنجی، به نورهای مختلف پاسخ‌هایی دراماتیک می‌دهند. گویی هر بلور، یک فیلتر زنده و هوشمند است که ترکیب شیمیایی بی‌نظیرش، آن را قادر به گفتگویی پویا با نور می‌سازد. فراتر از زیبایی، این گوهرها نگین‌های شناسنامه‌دار زمین‌شناسی هستند. ردپای آب ساختمانی<sup>۳۲</sup> در قلب بلور و پروکسی‌های شیمیایی کم‌کروم، آنها را به محیط‌های اسکارنی مرتبط می‌سازد. این نه تنها کلیدی برای درک گذشته زمین و مسیرهای دگرگونی است، بلکه نقشه گنجی برای جواهریابان و زمین‌شناسان فراهم می‌آورد تا منابع جدیدی از این شگفتی‌های طبیعی را بیابند. بنابراین، این پژوهش تنها به توضیح یک پدیده زیبا بسنده نکرده، بلکه پنجره‌ای به سوی درک عمیق‌تر رابطه شیمی، ساختار بلور و محیط تشکیل گشوده است و تأکید می‌کند که حتی شناخته‌شده‌ترین گوهرها نیز همچنان رازهای ناگفته بسیاری برای آشکار کردن دارند.

#### ۵- منابع

- [1] Deer, W. A., Howie, R. A., & Zussman, J. (1992). *An Introduction to the Rock-Forming Minerals* (2nd ed.). Longman.
- [2] Xu, J.-H., Yu, X.-Y., Shen, M., Yan, Y., & Wang, G.-Y. (2024). Explaining Color Change in Gem-Quality Andradite Garnet. *Crystals*, 14(2), 180.
- [3] Geiger, C. A. (2018). Garnet: A Key Mineral in Geology from Mantle to Metamorphism. *Elements*, 14(6), 393-398.
- [4] Baxter, E. F., Caddick, M. J., & Dragovic, B. (2017). Garnet: A Rock-Forming Mineral Petrochronometer. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 83(1), 469-533
- [5] Qiu, Y.; Guo, Y. Explaining Colour Change in Pyrope-Spessartine Garnets. *Minerals* 2021, 11, 865.
- [6] Qiu, Y., & Guo, Y. (2021). Explaining colour change in pyrope-spessartine garnets. *\*Minerals*, 11\*(8), 865.
- [7] Shen, J.; Qin, L.; Fang, Z.; Zhang, Y.; Liu, J.; Liu, W.; Wang, F.; Xiao, Y.; Yu, H.; Wei, S. (2018). High-temperature inter-mineral Cr isotope fractionation: A comparison of ionic model predictions and experimental investigations of mantle xenoliths from the North China Craton. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2018, 499, 278–290.
- [8] Gübelin, E.; Schmetzer, K. (۱۹۸۲). Gemstones with alexandrite effect. *Gems Gemol.* 1982, 18, 197–203
- [9] Ahadnejad, V.; Krzemnicki, M.S.; Hirt, A.M. (2022). Demantoid from Kerman Province, South-east Iran: A Mineralogical and Gemmo logical Overview. *J. Gemmol.* 2022, 38, 329–347.