

## بررسی طیف‌های FTIR، XRD و فرابنفش-مرئی (UV-Vis) کانی‌های کونزایت و هیدنیت از

### نورستان، افغانستان و ارزیابی پتانسیل جواهری آن‌ها

فاطمه شفیق‌زاده برمی<sup>۱</sup>، رضا ظهیری<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد زمین‌شناسی، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران

<sup>۲</sup> استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: fafa.shafizadeh@gmail.com

#### چکیده

اسپودومن یکی از مهم‌ترین کانی‌های سیلیکاته‌ی غنی از لیتیوم است که گونه‌های رنگی آن، شامل کونزایت و هیدنیت، از نظر گوهرشناسی و اقتصادی اهمیت ویژه‌ای دارند. افغانستان، به‌ویژه منطقه نورستان، یکی از نواحی شناخته‌شده برای تشکیل اسپودومن‌های گوهری با کیفیت بالا محسوب می‌شود. در این پژوهش، نمونه‌های طبیعی کونزایت و هیدنیت از پگماتیت‌های غنی از لیتیوم نورستان به‌منظور بررسی ویژگی‌های ساختاری، طیفی و گوهرشناسی مورد مطالعه قرار گرفتند. برای این منظور، از روش‌های پراش پرتو ایکس (XRD)، طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR)، طیف‌سنجی فرابنفش-مرئی (UV-Vis) و آزمون‌های گوهرشناسی کلاسیک استفاده شد. نتایج XRD تطابق کامل نمونه‌ها با ساختار بلوری مونوکلینیک اسپودومن را نشان داد. طیف‌های FTIR باندهای جذبی شاخص مربوط به پیوندهای Si-O را آشکار کردند و نتایج UV-Vis نقش عناصر منگنز و کروم را در ایجاد رنگ کونزایت و هیدنیت تأیید نمود. آزمون‌های گوهرشناسی نیز نشان دادند که ویژگی‌های فیزیکی و نوری نمونه‌ها در بازه استاندارد گزارش‌شده برای اسپودومن قرار دارند. نتایج این پژوهش بیانگر پتانسیل مناسب اسپودومن‌های رنگی نورستان برای کاربردهای گوهرشناسی و جواهری است.

**کلیدواژه‌ها:** اسپودومن، کونزایت، هیدنیت، FTIR، XRD، UV-Vis، نورستان، افغانستان

## Investigation of FTIR, XRD, and UV-Visible (UV-Vis) Spectra of Kunzite and Hiddenite from Nuristan, Afghanistan, and Evaluation of Their Gemological Potential

#### Abstract

Spodumene is one of the most important lithium-bearing silicate minerals, and its colored varieties, namely kunzite and hiddenite, are of considerable gemological and economic significance. Afghanistan, particularly the Nuristan region, is recognized as an important source of high-quality gem-grade spodumene. In this study, natural kunzite and hiddenite samples from lithium-rich granitic pegmatites of Nuristan, Afghanistan, were investigated to characterize their structural, spectroscopic, and gemological properties. X-ray diffraction (XRD), Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), ultraviolet-visible spectroscopy (UV-Vis), and standard gemological tests were employed. XRD results confirmed that all samples correspond to monoclinic spodumene with no detectable secondary phases. FTIR spectra revealed characteristic absorption bands related to Si-O vibrations of the silicate framework, while UV-Vis spectra indicated that manganese and chromium are the primary chromophoric elements responsible for the pink to violet color of kunzite and the green color of hiddenite, respectively. Gemological examinations showed that the physical and optical properties of the samples fall within the standard ranges reported for spodumene. The results demonstrate that colored spodumene from Nuristan possesses favorable gemological characteristics and significant potential for gemstone applications.

## ۱. مقدمه

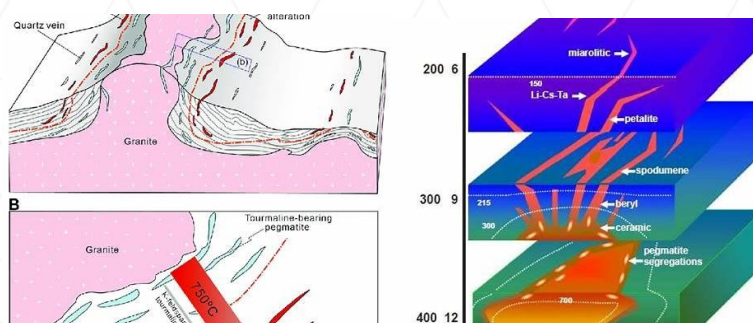
اسپودومن یکی از کانی‌های مهم گروه پیروکسن و از سیلیکات‌های غنی از لیتیوم با فرمول شیمیایی  $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$  است که عمدتاً در محیط‌های پگماتیتهای گرانیتی تشکیل می‌شود. این کانی به دلیل حضور لیتیوم در ساختار بلوری خود، علاوه بر اهمیت زمین‌شناسی اقتصادی، از دیدگاه گوهرشناسی نیز جایگاه ویژه‌ای دارد. اسپودومن معمولاً به صورت بی‌رنگ یا کم‌رنگ یافت می‌شود، اما گونه‌های رنگی آن شامل کونزایت با رنگ صورتی تا بنفش و هیدنیت با رنگ سبز، به عنوان گوهرهای ارزشمند شناخته می‌شوند (Deer et al., 2013; Nassau, 2001).

رنگ در اسپودومن‌های گوهری نقش تعیین‌کننده‌ای در ارزش‌گذاری آن‌ها ایفا می‌کند و منشأ آن به حضور عناصر جزئی در ساختار بلوری نسبت داده می‌شود. منگنز عامل اصلی ایجاد رنگ صورتی تا بنفش در کونزایت است، در حالی که کروم نقش غالبی در ایجاد رنگ سبز هیدنیت دارد. این عناصر با جایگزینی محدود در شبکه بلوری اسپودومن، موجب ایجاد جذب‌های نوری مشخص در ناحیه مرئی می‌شوند، بدون آنکه چارچوب بلوری کانی به طور اساسی تغییر کند (Nassau, 2001; Rossman, 2009). مطالعه منشأ رنگ و ویژگی‌های ساختاری اسپودومن‌های رنگی نیازمند استفاده از روش‌های آزمایشگاهی دقیق است. پراش پرتو ایکس (XRD) برای شناسایی فاز معدنی و بررسی ساختار بلوری، طیف‌سنجی FTIR برای مطالعه پیوندهای سیلیکاتی و ویژگی‌های ارتعاشی، و طیف‌سنجی UV-Vis برای بررسی جذب‌های نوری مرتبط با عناصر رنگ‌زا به کار می‌روند. ترکیب این روش‌ها با آزمون‌های گوهرشناسی کلاسیک، رویکردی جامع برای بررسی اسپودومن‌های رنگی فراهم می‌کند. افغانستان، به ویژه نورستان، یکی از مناطق مهم تشکیل پگماتیت‌های غنی از لیتیوم است که اسپودومن‌های گوهری با کیفیت بالا در آن یافت می‌شوند (Schmetzer & Bank, 1981; Yin et al., 2020).

## ۲. زمین‌شناسی و منشأ نمونه‌ها

نمونه‌های مورد مطالعه از پگماتیت‌های گرانیتی غنی از لیتیوم ولایت نورستان افغانستان برداشت شده‌اند. این پگماتیت‌ها عمدتاً از نوع LCT (غنی از لیتیوم، سزیم و تانتال) بوده و در مراحل پایانی تبلور ماگماهای گرانیتی تشکیل می‌شوند. غنی‌شدگی عناصر ناسازگار در این مرحله، شرایط مناسبی برای رشد بلورهای درشت و شفاف کانی‌های گوهری فراهم می‌کند (Černý & Ercit, 2005; London, 2018).

نورستان از نظر زمین‌شناسی بخشی از کمربندهای تکتونیکی فعال منطقه را در بر می‌گیرد که طی تاریخ زمین‌شناسی خود رویدادهای ماگمایی و دگرگونی متعددی را تجربه کرده است. نفوذ توده‌های گرانیتی و تبلور تدریجی آن‌ها، زمینه تشکیل پگماتیت‌های غنی از عناصر کمیاب را فراهم کرده است. این پگماتیت‌ها معمولاً دارای زون‌بندی مشخصی هستند که تمرکز کانی‌ها در بخش‌های مختلف آن‌ها مشاهده می‌شود. اسپودومن عمدتاً در زون‌های میانی تا مرکزی پگماتیت‌های غنی از لیتیوم تشکیل می‌شود؛ جایی که تمرکز لیتیوم و عناصر جزئی به بیشترین مقدار خود می‌رسد. حضور منگنز و کروم در محیط تشکیل، عامل اصلی ایجاد رنگ‌های متمایز کونزایت و هیدنیت در این منطقه محسوب می‌شود.

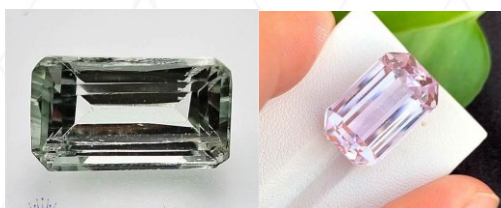


شکل ۱- دیاگرام شماتیک زون‌بندی پگماتیت‌های گرانیتی غنی از لیتیوم (LCT) و جایگاه تمرکز اسپودومن، کونزایت و هیدنیت

### ۳. مواد و روش‌ها

#### ۳-۱. نمونه‌های مورد مطالعه

در این پژوهش، نمونه‌های طبیعی کونزایت و هیدنیت از پگماتیت‌های گرانیته غنی از لیتیوم ولایت نورستان افغانستان انتخاب شدند. معیار انتخاب نمونه‌ها شامل شفافیت مناسب، یکنواختی رنگ، نبود شکستگی‌های گسترده و حداقل میزان درون‌بار قابل مشاهده بود تا تأثیر عوامل ساختاری ناخواسته بر نتایج آزمایشگاهی به حداقل برسد. پیش از انجام آزمایش‌ها، نمونه‌ها تمیز شده و برای هر روش آزمایشگاهی آماده‌سازی مناسب انجام گرفت؛ به‌طوری که بخشی از نمونه‌ها به‌صورت پودر ریزدانه برای آزمایش XRD و بخش دیگر به‌صورت سطح صیقلی برای آزمون‌های FTIR، UV-Vis و گوه‌رشناسی مورد استفاده قرار گرفتند.



شکل ۲- نمونه‌های گوه‌ری کونزایت و هیدنیت مورد مطالعه با منشأ نورستان، افغانستان

#### ۳-۲. پراش پرتو ایکس (XRD)

آزمایش پراش پرتو ایکس به‌منظور شناسایی فاز معدنی، بررسی خلوص فازی و تعیین ساختار بلوری نمونه‌ها انجام شد. الگوهای پراش ثبت‌شده در بازه زاویه‌ای مناسب مورد تحلیل قرار گرفتند و موقعیت و شدت پیک‌های اصلی با داده‌های مرجع اسپودومن مقایسه شد. این روش امکان تفکیک اسپودومن از سایر کانی‌های همراه پگماتیتی را فراهم کرده و به‌عنوان یکی از معتبرترین روش‌ها برای تأیید هویت معدنی نمونه‌ها شناخته می‌شود. بررسی الگوهای XRD همچنین برای اطمینان از نبود فازهای ثانویه یا ناخالصی‌های قابل توجه انجام گرفت (Deer et al., 2013; White & Nelen, 1973).

#### ۳-۳. طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR)

طیف‌سنجی FTIR به‌منظور بررسی ویژگی‌های ارتعاشی شبکه بلوری و شناسایی پیوندهای سیلیکاتی نمونه‌ها انجام شد. طیف‌ها در بازه عدد موجی مناسب ثبت شده و باندهای جذبی شاخص مربوط به ارتعاشات پیوندهای Si-O و Al-O مورد بررسی قرار گرفتند. این روش اطلاعات ارزشمندی درباره چارچوب سیلیکاتی اسپودومن و تأثیر عناصر جزئی بر رفتار ارتعاشی شبکه بلوری فراهم می‌کند. مقایسه طیف‌های کونزایت و هیدنیت امکان بررسی تفاوت‌های جزئی ناشی از ترکیب شیمیایی و عناصر رنگ‌زا را فراهم ساخت (Schmetzer & Bank, 1981; Yin et al., 2020).

#### ۳-۴. طیف‌سنجی فرابنفش-مرئی (UV-Vis)

طیف‌سنجی فرابنفش-مرئی به‌منظور بررسی جذب‌های نوری و تعیین منشأ رنگ در نمونه‌های مورد مطالعه انجام شد. طیف‌های ثبت‌شده امکان شناسایی باندهای جذبی مرتبط با انتقالات الکترونی عناصر رنگ‌زا را فراهم کردند. این روش به‌ویژه برای بررسی نقش منگنز در ایجاد رنگ صورتی تا بنفش کونزایت و نقش کروم در ایجاد رنگ سبز هیدنیت اهمیت دارد. تحلیل داده‌های UV-Vis به درک بهتر تفاوت‌های رنگی میان این دو گونه اسپودومن کمک می‌کند (Nassau, 2001; Rossman, 2009).

#### ۳-۵. آزمون‌های گوه‌رشناسی کلاسیک

به‌منظور تکمیل داده‌های آزمایشگاهی، آزمون‌های گوه‌رشناسی شامل اندازه‌گیری ضریب شکست، بررسی چندرنگی با استفاده از ابزارهای نوری، تعیین سختی نسبی بر اساس مقیاس موس و مشاهده رخ انجام شد. این آزمون‌ها علاوه بر تأیید نتایج

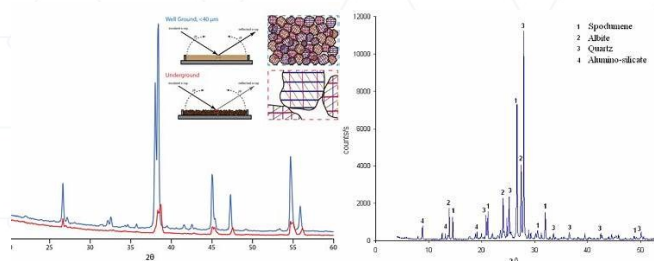


آزمایشگاهی، اطلاعات کاربردی مهمی درباره قابلیت تراش، دوام و ارزش جواهری نمونه‌ها ارائه می‌دهند. بررسی رخ کامل در دو جهت متقاطع به‌ویژه از نظر گوهرشناسی اهمیت بالایی دارد، زیرا می‌تواند بر نحوه برش و فرآوری گوهر تأثیر بگذارد.

#### ۴. نتایج

##### ۴-۱. نتایج پراش پرتو ایکس (XRD)

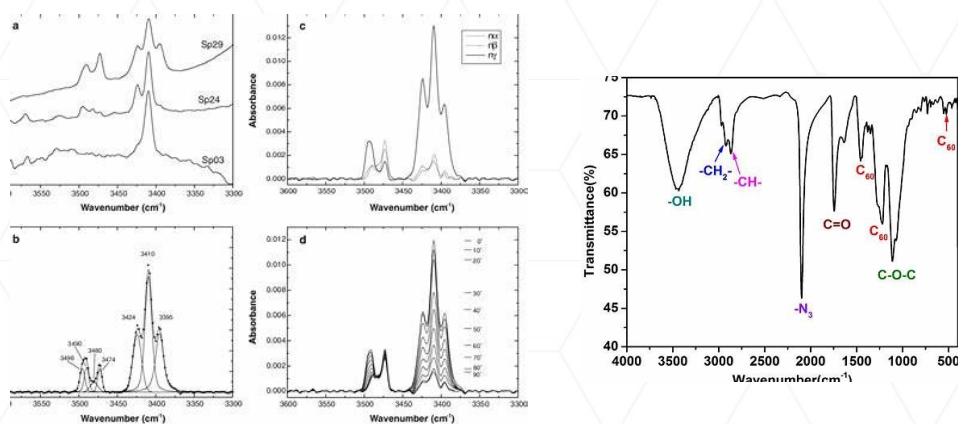
الگوهای پراش پرتو ایکس ثبت‌شده برای تمامی نمونه‌های مورد مطالعه نشان‌دهنده تطابق کامل با ساختار بلوری مونوکلینیک اسپودومن هستند. موقعیت و شدت پیک‌های اصلی با داده‌های مرجع گزارش‌شده برای اسپودومن همخوانی دارد و هیچ پیک اضافی مربوط به فازهای ثانویه یا ناخالصی‌های قابل توجه مشاهده نشد. این موضوع بیانگر خلوص فازی مناسب نمونه‌ها و طبیعی بودن آن‌هاست. شباهت الگوهای XRD کونزایت و هیدنیت نشان می‌دهد که تفاوت این دو گونه عمدتاً به ترکیب شیمیایی و حضور عناصر جزئی مربوط بوده و چارچوب بلوری آن‌ها یکسان است.



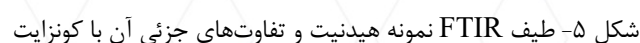
شکل ۳- الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) نمونه اسپودومن و تطابق پیک‌ها با ساختار بلوری مونوکلینیک

##### ۴-۲. نتایج طیف‌سنجی FTIR

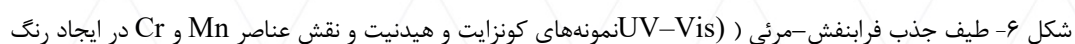
طیف‌های FTIR نمونه‌های کونزایت و هیدنیت باندهای جذبی مشخص و قوی در نواحی عدد موجی مربوط به ارتعاشات پیوندهای Si-O را نشان دادند که مشخصه اصلی چارچوب سیلیکاتی اسپودومن محسوب می‌شود. علاوه بر این، باندهای ضعیف‌تری مربوط به ارتعاشات پیوندهای Al-O نیز مشاهده شد. مقایسه طیف‌های کونزایت و هیدنیت تفاوت‌های جزئی در شدت و پهنای برخی باندها را نشان می‌دهد که می‌تواند به حضور و توزیع متفاوت عناصر جزئی در شبکه بلوری نسبت داده شود. با این حال، این تفاوت‌ها منجر به تغییر ساختار کلی کانی نشده‌اند.



شکل ۴- طیف FTIR نمونه کونزایت با نمایش باندهای جذبی شاخص پیوندهای Si-O



طیف‌های جذب فرابنفش-مرئی ثبت‌شده برای نمونه‌های کونزایت دارای باندهای جذبی مشخص در ناحیه مرئی هستند که به انتقالات الکترونی یون منگنز نسبت داده می‌شوند. این باندها عامل اصلی ایجاد رنگ صورتی تا بنفش در کونزایت محسوب می‌شوند. در مقابل، طیف‌های UV-Vis نمونه‌های هیدنیت جذب‌های مشخص مرتبط با یون کروم را نشان دادند که منشأ رنگ سبز این گونه اسپودومن است. تفاوت‌های آشکار در الگوهای جذب نوری میان کونزایت و هیدنیت بیانگر منشأ متفاوت رنگ در این دو گونه است.



نتایج آزمون‌های گوهرشناسی انجام‌شده بر روی نمونه‌های کونزایت و هیدنیت مورد مطالعه نشان داد که ویژگی‌های فیزیکی و نوری این نمونه‌ها به‌خوبی با مقادیر استاندارد گزارش‌شده برای کانی اسپودومن مطابقت دارند. اندازه‌گیری ضریب شکست نمونه‌ها مقادیری در بازه ۱.۶۶۰ تا ۱.۶۷۶ را نشان داد که با داده‌های مرجع اسپودومن‌های گوهری همخوانی دارد و بیانگر خلوص و طبیعی بودن نمونه‌هاست.

بررسی چندرنگی نمونه‌ها نشان داد که کونزایت چندرنگی قوی‌تری نسبت به هیدنیت از خود نشان می‌دهد. در کونزایت، تغییر رنگ از صورتی کم‌رنگ تا بنفش پررنگ در زوایای مختلف مشاهده شد که این ویژگی یکی از شاخص‌های مهم تشخیصی این گوهر محسوب می‌شود. در مقابل، هیدنیت چندرنگی ضعیف‌تری داشته و تغییرات رنگی آن عمدتاً در طیف سبز کم‌رنگ تا سبز تیره محدود می‌شود. این تفاوت در شدت چندرنگی را می‌توان به نوع و غلظت عناصر رنگ‌زا و نحوه جایگزینی آن‌ها در شبکه بلوری نسبت داد.

آزمون سختی بر اساس مقیاس موس نشان داد که هر دو گونه کونزایت و هیدنیت دارای سختی نسبی بین ۶.۵ تا ۷ هستند که این مقدار برای کاربردهای جواهری مناسب ارزیابی می‌شود. با این حال، وجود رخ کامل در دو جهت متقاطع که از ویژگی‌های

شاخص اسپودومن است، می‌تواند بر دوام مکانیکی نمونه‌ها تأثیرگذار باشد و در هنگام برش و تراش نیازمند دقت ویژه است. این ویژگی رخ، اگرچه از نظر گوهرشناسی یک شاخص تشخیصی مهم محسوب می‌شود، اما می‌تواند عامل محدودکننده‌ای در انتخاب نوع تراش و کاربرد نهایی گوهر باشد.

بررسی شفافیت نمونه‌ها نشان داد که بیشتر نمونه‌های مورد مطالعه دارای شفافیت مناسب، از شفاف تا نیمه‌شفاف، هستند که این ویژگی نقش مهمی در کیفیت نهایی گوهر و ارزش‌گذاری آن دارد. نبود شکستگی‌های گسترده و میزان کم درون‌بارهای قابل مشاهده، شرایط مطلوبی را برای تراش و استفاده جواهری فراهم می‌کند. این ویژگی‌ها به‌ویژه در نمونه‌های کونزایت نورستان، که اغلب به‌صورت بلورهای درشت و شفاف یافت می‌شوند، بارزتر است.

در مجموع، نتایج آزمون‌های گوهرشناسی نشان می‌دهد که نمونه‌های کونزایت و هیدنیت نورستان از نظر ویژگی‌های فیزیکی و نوری دارای کیفیت مناسب برای کاربردهای جواهری هستند. تفاوت‌های مشاهده‌شده میان این دو گونه، به‌ویژه در شدت چندرنگی و رفتار نوری، علاوه بر اهمیت تشخیصی، می‌تواند در تعیین نوع کاربرد جواهری و ارزش اقتصادی آن‌ها نیز نقش مهمی ایفا کند.

بر اساس مجموعه نتایج به‌دست‌آمده، ویژگی‌های گوهرشناسی نمونه‌های مورد مطالعه در بازه استاندارد اسپودومن‌های گوهری قرار داشته و با گزارش‌های پیشین مطابقت دارد (Fritsch et al., 1987; Palke et al., 2019).

## ۵. بحث

نتایج به‌دست‌آمده از روش‌های مختلف آزمایشگاهی نشان می‌دهد که اسپودومن‌های رنگی نورستان افغانستان از نظر ساختار بلوری، ویژگی‌های طیفی و خواص گوهرشناسی با نمونه‌های گزارش‌شده از سایر مناطق شناخته‌شده جهان قابل مقایسه هستند. تطابق کامل الگوهای XRD با ساختار بلوری مونوکلینیک اسپودومن و نبود فازهای ثانویه بیانگر شرایط زمین‌شناسی پایدار و مناسب در محیط تشکیل این نمونه‌هاست.

داده‌های FTIR نشان‌دهنده پایداری چارچوب سیلیکاتی اسپودومن بوده و تفاوت‌های جزئی مشاهده‌شده میان کونزایت و هیدنیت را می‌توان به حضور عناصر جزئی و تأثیر آن‌ها بر محیط پیوندی شبکه بلوری نسبت داد. این تغییرات محدود، بدون ایجاد اختلال در ساختار کلی کانی، بر رفتار طیفی و ویژگی‌های نوری نمونه‌ها تأثیر گذار هستند.

نتایج طیف‌سنجی UV-Vis نقش کلیدی عناصر رنگ‌زا را در ایجاد رنگ اسپودومن‌های مورد مطالعه تأیید می‌کند. منگنز عامل اصلی رنگ صورتی تا بنفش در کونزایت و کروم عامل ایجاد رنگ سبز در هیدنیت است. این یافته‌ها با مدل‌های پذیرفته‌شده منشأ رنگ در اسپودومن‌های رنگی همخوانی دارد و نشان می‌دهد که تفاوت رنگی این دو گونه عمدتاً ناشی از تفاوت در نوع عناصر جزئی و انتقالات الکترونی آن‌هاست، نه تغییر در ساختار بلوری.

نتایج آزمون‌های گوهرشناسی کلاسیک نیز نشان می‌دهد که نمونه‌های مورد مطالعه از نظر ویژگی‌های فیزیکی و نوری در محدوده استاندارد اسپودومن قرار دارند و از کیفیت مناسبی برای کاربردهای جواهری برخوردارند. چندرنگی مشخص، شفافیت مناسب و اندازه بلورهای این نمونه‌ها، به‌ویژه برای کونزایت، پتانسیل بالای آن‌ها را برای استفاده در صنعت جواهرسازی نشان می‌دهد.

در مجموع، ترکیب داده‌های ساختاری، طیفی و گوهرشناسی در این مطالعه چارچوبی جامع برای شناسایی و ارزیابی اسپودومن‌های رنگی فراهم کرده و اهمیت منطقه نورستان افغانستان را به‌عنوان یکی از منابع مهم این گوهرها تأیید می‌کند.

## ۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اسپودومن‌های رنگی شامل کونزایت و هیدنیت با منشأ پگماتیت‌های غنی از لیتیوم ولایت نورستان افغانستان به‌صورت جامع و با استفاده از مجموعه‌ای از روش‌های آزمایشگاهی و گوهرشناسی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج حاصل از



آزمایش پراش پرتو ایکس (XRD) نشان داد که تمامی نمونه‌ها دارای ساختار بلوری مونوکلینیک مشخص اسپودومن بوده و از نظر خلوص فازی با داده‌های مرجع تطابق کامل دارند. نبود فازهای ثانویه در الگوهای XRD بیانگر شرایط زمین‌شناسی پایدار در محیط تشکیل و طبیعی بودن نمونه‌هاست.

بررسی‌های طیف‌سنجی FTIR باندهای جذبی شاخص مربوط به پیوندهای Si-O و Al-O را آشکار کرد که ویژگی اصلی چارچوب سیلیکاتی اسپودومن محسوب می‌شود. تفاوت‌های جزئی مشاهده‌شده در شدت و موقعیت برخی باندها میان کونزایت و هیدنیت را می‌توان به حضور و توزیع عناصر جزئی در شبکه بلوری نسبت داد. این تغییرات هرچند منجر به تغییر ساختار کلی کانی نشده‌اند، اما نقش مهمی در رفتار طیفی و ویژگی‌های نوری نمونه‌ها ایفا می‌کنند.

نتایج طیف‌سنجی فرابنفش-مرئی (UV-Vis) به‌روشنی نشان داد که منشأ رنگ در اسپودومن‌های مورد مطالعه به عناصر رنگ‌زا مرتبط است. منگنز به‌عنوان عامل اصلی ایجاد رنگ صورتی تا بنفش در کونزایت و کروم به‌عنوان عامل ایجاد رنگ سبز در هیدنیت شناسایی شد. این یافته‌ها با مدل‌های پذیرفته‌شده منشأ رنگ در اسپودومن‌های رنگی همخوانی دارد و نشان می‌دهد که تفاوت رنگی این دو گونه عمدتاً ناشی از نوع و حالت اکسیداسیون عناصر جزئی است، نه تغییر در چارچوب بلوری.

آزمون‌های گوهرشناسی کلاسیک نتایج آزمایشگاهی را تکمیل کرده و نشان داد که ویژگی‌های فیزیکی و نوری نمونه‌ها در بازه استاندارد گزارش‌شده برای اسپودومن قرار دارند. چندرنگی قوی‌تر کونزایت نسبت به هیدنیت و وجود رخ کامل در دو جهت متقاطع، علاوه بر اهمیت تشخیصی، در ارزیابی کاربرد جواهری و فرآیند تراش این گوهرها نیز نقش تعیین‌کننده‌ای دارد.

در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که اسپودومن‌های رنگی نورستان افغانستان از نظر ویژگی‌های ساختاری، طیفی و گوهرشناسی با نمونه‌های شناخته‌شده جهانی قابل مقایسه هستند و از پتانسیل بالایی برای کاربردهای علمی، گوهرشناسی و جواهری برخوردارند. ترکیب روش‌های XRD، FTIR، UV-Vis و آزمون‌های گوهرشناسی ارائه‌شده در این مطالعه، چارچوبی قابل اعتماد برای شناسایی، تفکیک و ارزیابی اسپودومن‌های رنگی فراهم می‌کند و می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای مطالعات آینده و توسعه دانش گوهرشناسی مورد استفاده قرار گیرد.

#### ۷. منابع

- Černý, P., & Ercit, T. S. (2005). The classification of granitic pegmatites revisited. *The Canadian Mineralogist*, 43, 2005–2026.
- Deer, W. A., Howie, R. A., & Zussman, J. (2013). *An introduction to the rock-forming minerals* (3rd ed.). Mineralogical Society of Great Britain and Ireland.
- Fritsch, E., Rossman, G. R., & Shigley, J. E. (1987). Optical properties of spodumene. *Gems & Gemology*, 23, 141–152.
- Hughes, R. W. (2017). *Ruby & sapphire: A gemologist's guide*. RWH Publishing.
- London, D. (2018). *Pegmatites*. The Canadian Mineralogist, Special Publication 10.
- Nassau, K. (2001). *The physics and chemistry of color* (2nd ed.). Wiley-Interscience.
- Palke, A. C., Renfro, N. D., & Berg, R. B. (2019). Gemological characterization of spodumene-group minerals. *Gems & Gemology*, 55, 40–57.
- Rossman, G. R. (2009). The colors of minerals. *Elements*, 5, 159–164.
- Schmetzer, K., & Bank, H. (1981). Natural and synthetic spodumene: An investigation by spectroscopy. *Neues Jahrbuch für Mineralogie*, 140, 273–288.
- Tacker, R. C. (2010). Reconsidering the definition of hiddenite. *Gems & Gemology*, 46, 160–175.
- White, J. S., & Nelen, J. A. (1973). Crystal chemistry of spodumene. *American Mineralogist*, 58, 639–648.
- Yin, S., Wang, J., & Chen, Z. (2020). Spectroscopic study of spodumene minerals using FTIR and UV-Vis techniques. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 229, 117944.