

مقاله پژوهشی

## ارتباط بین آنومالی‌های ژئوشیمیایی ناحیه‌ای با تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ به کمک خوشه‌بندی طیفی چهارفرسخ، خراسان جنوبی

حمید گرانیان\*

استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران، h.geranian@birjandut.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۲۷ - پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۲۰

### چکیده

ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ چهارفرسخ در استان خراسان جنوبی به دلیل داشتن سنگ‌های ولکانیکی و پلوتونیک، وجود سنگ‌های دگرگونی حاوی کانی‌سازی و اندیس‌های فلزی پتانسیل بالایی برای اکتشاف ناحیه‌ای دارد. تعیین آنومالی‌های ژئوشیمیایی مرکب برای ۲۰ عنصر به روش خوشه‌بندی طیفی بر روی داده‌های رسوبات آبراهه‌ای این ورقه، ۶ محدوده برای کانی‌سازی را پیشنهاد می‌دهد. در مرحله دوم از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ منطقه مورد مطالعه به دلیل داشتن تعداد باندهای بیشتر و قدرت تفکیک مکانی ۱۰ و ۲۰ متری استفاده شده است. خوشه‌بندی ۱۰ باند تصاویر ماهواره سنتینل ۲A ورقه چهارفرسخ به ۵ خوشه (خوشه‌بندی بهینه بدست آمده با شاخص Silhouette) نشان می‌دهد که رفتار طیفی پیکسل‌های خوشه ۲ مشابه رفتار طیفی سنگ‌های آذرین و دگرگونی است. بنابراین دو محدوده آنومالی ژئوشیمیایی قرار گرفته در این خوشه با توجه به سایر داده‌های اکتشافی به عنوان اولویت اول کانی‌سازی پیشنهاد شده است. پیکسل‌های خوشه چهارم رفتار طیفی مشابه سنگ‌های رسوبی دارند و دو محدوده آنومالی ژئوشیمیایی قرار گرفته بر روی این خوشه برای اولویت دوم اکتشافی در نظر گرفته شده است. مقایسه موقعیت پیکسل‌های خوشه‌های اول، سوم و پنجم با نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه و بررسی رفتار طیفی آن‌ها نیز نشان می‌دهد که این خوشه‌ها با رسوبات آبرفتی و پادگانه کواترنره همپوشانی دارند که ارزش کانی‌سازی ندارند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که خوشه‌بندی داده‌های ماهواره‌ای می‌تواند برای اعتبارسنجی آنومالی‌های ژئوشیمیایی ناحیه‌ای و اولویت‌بندی آن‌ها استفاده شود.

### کلمات کلیدی

اکتشاف ناحیه‌ای، آنومالی ژئوشیمیایی مرکب، خوشه‌بندی طیفی، تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲، ورقه چهارفرسخ.

## ۱- مقدمه

مشخصه‌های پیکسل‌ها با ترکیب کردن باندهای تصویر) انجام می‌گیرد [۱۳ و ۳۱]. خوشه‌بندی جزو روش‌های دسته دوم محسوب می‌شود که در این مقاله از این فن برای تفکیک تصویر ماهواره‌ای (تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲) و ارتباط دادن واحدهای تفکیک شده با آنومالی‌های ژئوشیمیایی مرکب برای اعتبارسنجی آن‌ها استفاده می‌شود.

برای تعیین آنومالی‌های ژئوشیمیایی مرکب و خوشه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ از روش خوشه‌بندی طیفی استفاده شده است. روش خوشه‌بندی طیفی به دلیل استفاده از الگوریتم تجمیعی نسبت به روش‌های مرسوم خوشه‌بندی مانند k- میانگین، سلسله مراتبی و خوشه‌بندی‌های فازی برتری دارد [۱۱، ۱۷ و ۲۱]. همچنین مطالعات نشان داده است که خوشه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای به کمک خوشه‌بندی طیفی نتایج بهتری را به همراه داشته است [۱۳ و ۳۰]. بنابراین در این مقاله برای اولین بار از الگوریتم خوشه‌بندی طیفی به همراه مدل تعمیم یافته آن بر روی داده‌های اکتشافی استفاده می‌شود تا ارتباط و اولویت‌بندی آنومالی‌های ژئوشیمیایی مرکب در یک ناحیه اکتشافی انجام گیرد. برای این منظور از داده‌های زمین‌شناسی، ژئوشیمیایی و دورسنجی ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ چهارفرسخ در استان خراسان جنوبی استفاده شده است که در ادامه توضیحات آن آرایه می‌شود.

## ۲- روش خوشه‌بندی طیفی

خوشه‌بندی یک روش یادگیری ماشین نظارت نشده محسوب می‌شود که در آن نمونه‌ها بر اساس معیار شباهت به چند خوشه تفکیک می‌شوند؛ به طوری که نمونه‌های هر خوشه بیشترین شباهت را به هم داشته باشند و بین خوشه‌ها نیز کمترین شباهت وجود داشته باشد. معیار شباهت می‌تواند فاصله بین نمونه‌ها در فضای ابر داده‌ها و یا ضرایب تشابه/عدم تشابه باشد [۱۱ و ۳۴]. روش‌های خوشه‌بندی به پنج گروه روش‌های مبتنی بر گرانیگاه، بر پایه اتصال، بر پایه توزیع داده‌ها، مبتنی بر چگالی و مبتنی بر گراف تقسیم‌بندی می‌شوند [۱۱ و ۱۹].

روش خوشه‌بندی طیفی جزو روش‌های مبتنی بر گراف محسوب می‌شود که برای خوشه‌بندی داده‌هایی استفاده می‌شود که ابر داده‌های خوشه‌ها ساختارهای پیچیده دارند. در این حالت خوشه‌بندی داده‌ها در هیچ یک از زیرفضاها (فضای اصلی داده‌ها) به دلیل همپوشانی خوشه‌ها با یکدیگر امکان‌پذیر نیست. برای حل این مشکل در روش خوشه‌بندی طیفی، داده‌ها به فضای جدید منتقل می‌شوند تا ساختار خوشه‌های

مطالعات زمین‌شناسی، نمونه‌برداری ژئوشیمیایی از رسوبات آبراه‌های، مطالعات دورسنجی بر روی تصاویر ماهواره‌ای چندطیفی، بررسی‌های ژئوفیزیکی هوابرد و حفاری‌های سطحی مهم‌ترین ابزارهای اکتشاف ناحیه‌ای‌اند. استفاده از این ابزارها برای تعیین محدوده‌هایی است که پتانسیل کانی‌سازی بالاتری نسبت به سایر مناطق دارند و برای اکتشاف منطقه‌ای مناسب‌اند [۱۰ و ۱۸]. در اکتشاف ژئوشیمیایی ناحیه‌ای برداشت نمونه‌ها از رسوبات آبراه‌های نسبت به سایر محیط‌های نمونه‌برداری برتری دارد زیرا یک نمونه رسوبات آبراه‌های معرف فرسایش و هوازدگی کلیه سنگ‌های حوزه آبریز بالادست خود است که منطقه وسیعی را شامل می‌شود. تعیین آنومالی‌های مرکب به دلیل تجزیه شیمیایی این نمونه‌ها برای چندین عنصر نیز از مزیت‌های این روش نمونه‌برداری محسوب می‌شود [۱۶]. تصاویر ماهواره‌ای به دلیل دارا بودن وضوح مکانی، زمانی و طیفی در مقیاس‌های مختلف، در دسترس بودن، وجود نرم‌افزارهای متنوع برای پردازش تصاویر و رایگان بودن استفاده از آن‌ها به طور گسترده در تمامی پروژه‌های اکتشافی مرسوم شده است. در این میان، در سال‌های اخیر استفاده از تصاویر ماهواره‌های سری سنتینل به دلیل قدرت تفکیک مکانی بالاتر و داشتن تعداد باندهای بیشتر نسبت به تصاویر لندست و استر، کاربردهای بهتری در اکتشاف مواد معدنی پیدا کرده‌اند [۱۲].

مشخص کردن ویژگی‌های ژئوشیمیایی واحدهای سنگی و تعیین آنومالی ژئوشیمیایی تک عنصری و مرکب و سپس ارتباط دادن این آنومالی‌ها با شرایط زمین‌شناسی منطقه مهم‌ترین اهداف اکتشافات ژئوشیمیایی رسوبات آبراه‌های‌اند. در مقابل مشخص کردن خطواره‌های ساختاری، تعیین واحدهای سنگی، تفکیک کانی‌ها و شناسایی دگرسانی‌ها مهم‌ترین نتایج پردازش تصاویر ماهواره‌ای‌اند. ارتباط بین آنومالی‌های ژئوشیمیایی و دگرسانی‌های بدست آمده از تحلیل تصاویر ماهواره‌ای، موضوع شناخته شده‌ای است که در سال‌های گذشته در مقالات متعددی مورد توجه محققان قرار گرفته است [۱، ۴، ۱۴، ۱۷ و ۲۰]. در حالی که در این مقاله سعی شده است، ارتباط بین آنومالی‌های ژئوشیمیایی مرکب با تصاویر ماهواره‌ای تفکیک شده مورد بررسی قرار گیرد. تصاویر ماهواره‌ای تفکیک شده بیشتر برای شناسایی و تفکیک واحدهای سنگی کاربرد دارند که با دو دسته روش‌های تطبیق طیفی (روش اندازه‌گیری شباهت طیفی بین طیف مرجع و طیف تصویر) و روش‌های پیکسل- پایه (روش استخراج علائم و

$$F = \{f_1, f_2, \dots, f_k\} \in R^{n \times k} \quad (6)$$

که در آن:

$f_i$ : آمین بردار ویژه ماتریس لاپلاس

$k$ : تعداد خوشه‌های انتخابی

- نرمال‌سازی فضای داده‌های جدید از رابطه  $\gamma$  بدست می‌آید:

$$Y_{ij} = \frac{F_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n F_{ij}^2}} \quad (7)$$

- خوشه‌بندی داده‌های جدید (ماتریس  $Y \in R^{n \times k}$ ) با یکی از الگوریتم‌های خوشه‌بندی که در این مرحله بیشتر از الگوریتم  $k$ -means یا  $k$ -medoid استفاده می‌شود.

- انتساب خوشه‌ها به داده‌های اولیه با این شرط که نمونه  $\lambda_m$  (یعنی  $x_i$ ) در خوشه  $\lambda_m$  قرار می‌گیرد که اگر نمونه  $\lambda_m$  جدید (یعنی  $Y_i$ ) به خوشه  $\lambda_m$  تخصیص داده شده باشد.

روش خوشه‌بندی طیفی معرفی شده دارای محدودیت‌های به لحاظ زمان‌بر بودن و نیاز به حافظه بالا برای محاسبه ماتریس خویشی و برآورد بردارهای ویژه ماتریس لاپلاس برای داده‌هایی با تعداد نمونه‌های بالا است. برای حل این مشکل روش‌های مختلفی ارایه شده است که یکی از بهترین راه‌حل‌ها کاهش اندازه ماتریس شباهت است [۲۶ و ۳۳]. برای این منظور می‌توان در ابتدا از روش انتخاب تصادفی استفاده کرد تا تعداد نمونه‌ها کاهش یابد، سپس به کمک الگوریتم  $k$ -means داده‌های تصادفی را خوشه‌بندی اولیه کرد و مرکز خوشه‌ها را به عنوان نماینده داده‌های خام برای خوشه‌بندی طیفی انتخاب کرد. این استراتژی ترکیبی که توسط هوانگ و همکارانش در سال ۲۰۱۸ پیشنهاد شده است دارای یک رویکرد تعادلی بین کارایی انتخاب تصادفی و اثربخشی انتخاب مبتنی بر  $k$ -means است [۲۱]. در این مقاله برای خوشه‌بندی داده‌های ژئوشیمیایی از روش متداول خوشه‌بندی طیفی و برای داده‌های تصویر سنتینل ۲ از این رویکرد استفاده شده است.

### ۳- زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه شامل ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰۰ چهارفرسخ است که در استان خراسان جنوبی و در حدود ۱۶۵ کیلومتری جنوب شرقی شهر بیرجند واقع شده است. این منطقه در مختصات جغرافیایی  $30^{\circ} 59'$  تا  $60^{\circ} 00'$  طول شرقی و  $31^{\circ} 30'$  تا  $32^{\circ} 00'$  عرض شمالی و در بخش شرقی بلوک لوت قرار دارد. مطالعات نشان داده است که در حاشیه شرقی پهنه لوت، توده‌های گرانیتی و گرانیتوئیدی به همراه سنگ‌های آتشفشانی انوسن که مربوط به

نهان در داده‌ها آشکار و خوشه‌بندی میسر شود. بنابراین روش خوشه‌بندی طیفی ترکیبی از استخراج ویژگی<sup>۱</sup> و خوشه‌بندی است [۱۹، ۲۲ و ۳۸].

اگر یک مجموعه داده‌های چند بعدی به صورت رابطه ۱ تعریف شود:

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \quad (1)$$

که در آن:

$x_i \in R^d$  یک داده یا نمونه

$n$ : تعداد نمونه‌ها

$d$ : بعد یا تعداد متغیرها

الگوریتم خوشه‌بندی طیفی دارای مراحل اجرایی زیر است [۱۹، ۲۲، ۲۴ و ۳۸]:

- ساختن ماتریس شباهت بین نمونه‌ها (به عنوان مثال با محاسبه فاصله بین نمونه‌ها) و محاسبه ماتریس خویشی<sup>۲</sup> از رابطه ۲ به دست می‌آید:

$$W_{ij} = e^{-\frac{\|x_i - x_j\|}{2\sigma^2}} \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

که در آن:

$W$ : یک ماتریس  $n \times n$  بعدی

$\sigma^2$ : پارامتر کاهنده مقدار  $W_{ij}$  در مقابل فاصله بین نمونه  $\lambda_m$  از نمونه  $\lambda_m$

- محاسبه ماتریس مجاورتی<sup>۳</sup> که یک ماتریس قطری است و از جمع عناصر سطر  $\lambda_m$  ماتریس  $W$  بدست می‌آید (رابطه ۳):

$$D_{ii} = \sum_{j=1}^n W_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

- محاسبه ماتریس لاپلاس داده‌های نرمال نشده از رابطه ۴ و یا داده‌های نرمال شده از رابطه ۵ انجام می‌شود:

$$L = D - W \quad (4)$$

$$L = D^{-\frac{1}{2}} W D^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

- محاسبه  $k$  بردار ویژه اول ماتریس لاپلاس و تشکیل ماتریس فضای برداری داده‌های جدید از رابطه ۶ بدست می‌آید:

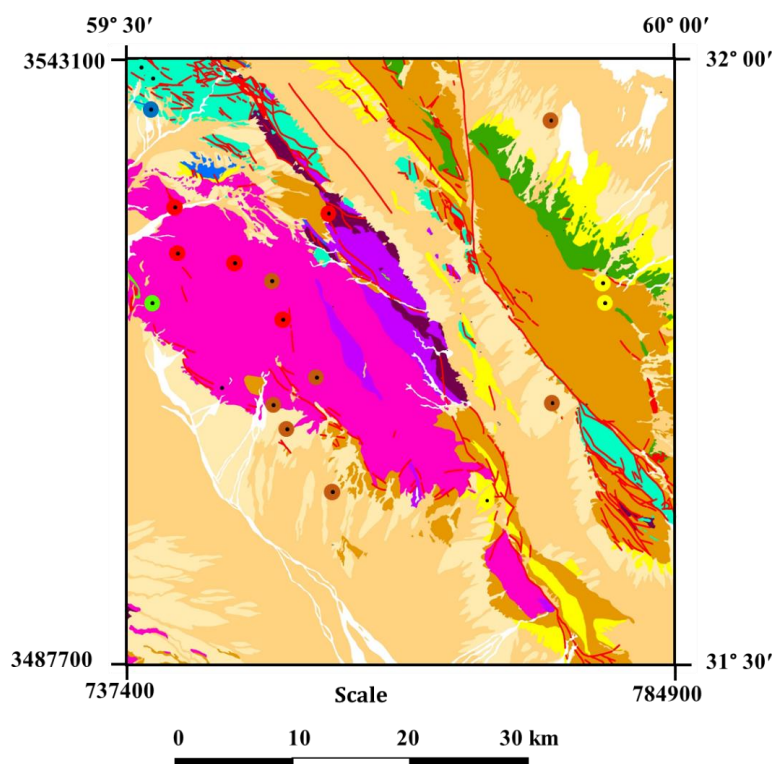
<sup>1</sup> Feature extraction

<sup>2</sup> Affinity matrix

<sup>3</sup> Adjacency matrix

مارن، ماسه‌سنگ، سنگ آهک و کنگلومرا و سن کرتاسه تا نئوژن است. سنگ‌های دیوریت، گابرو و لیسونیت‌ها به همراه واحدهای اولترابازیک کرتاسه بالایی تا ائوسن نشان‌دهنده فعالیت‌های ماگمایی دیگری است که به صورت لکه‌هایی در بخش شرق و شمال‌غربی ورقه چهارفرسرخ مشاهده می‌شود (شکل ۱). این واحدهای ولکانیکی باعث تشکیل دومین سری سنگ‌های دگرگونی از جنس آمفیبولیت، گنایس، آندالوزیت‌شایست و فیلیت در منطقه شده است. آخرین فعالیت ماگمایی قابل مشاهده متعلق به نئوژن است که بیشتر باعث تشکیل سنگ‌های بازالت همراه با دیوریت و آندالوزیت در بخش‌های جنوب‌شرقی و شمال‌غربی ورقه شده است. نیمی از ورقه چهارفرسرخ را نیز رسوبات پادگانه، آبرفت‌ها و پهنه‌های شنی و نمکی کوتاه‌تر پوشانده است.

ذوب سنگ‌های تحتانی پوسته‌اند، میزبان کانی‌سازی‌های متفاوتی است [۲ و ۷]. قدیمی‌ترین فعالیت ماگمایی شناخته شده در منطقه مربوط به اواخر ژوراسیک تا قبل از آلبین است که شامل توده‌های بزرگ نفوذی گرانیت، گرانودیوریت به همراه سنگ‌های پگماتیستی است که به صورت نواری از بخش مرکزی منطقه شروع شده و تا شمال‌غربی محدوده گسترش دارد (شکل ۱). نفوذ و مجاورت این توده‌های با سنگ‌های رسوبی شیل، ماسه‌سنگ، سنگ آهک و کنگلومرای ژوراسیک تحتانی باعث ایجاد تنوع گسترده‌ای از سنگ‌های دگرگونی در منطقه شده است [۳ و ۵]. بخش اول سنگ‌های دگرگونی شامل اسلیت، میکاشیست همراه با کانی پیریت است که به ژوراسیک بالایی تعلق دارد. بخش وسیعی از منطقه مطالعاتی را سنگ‌های رسوبی تشکیل می‌دهد که شامل شیل،



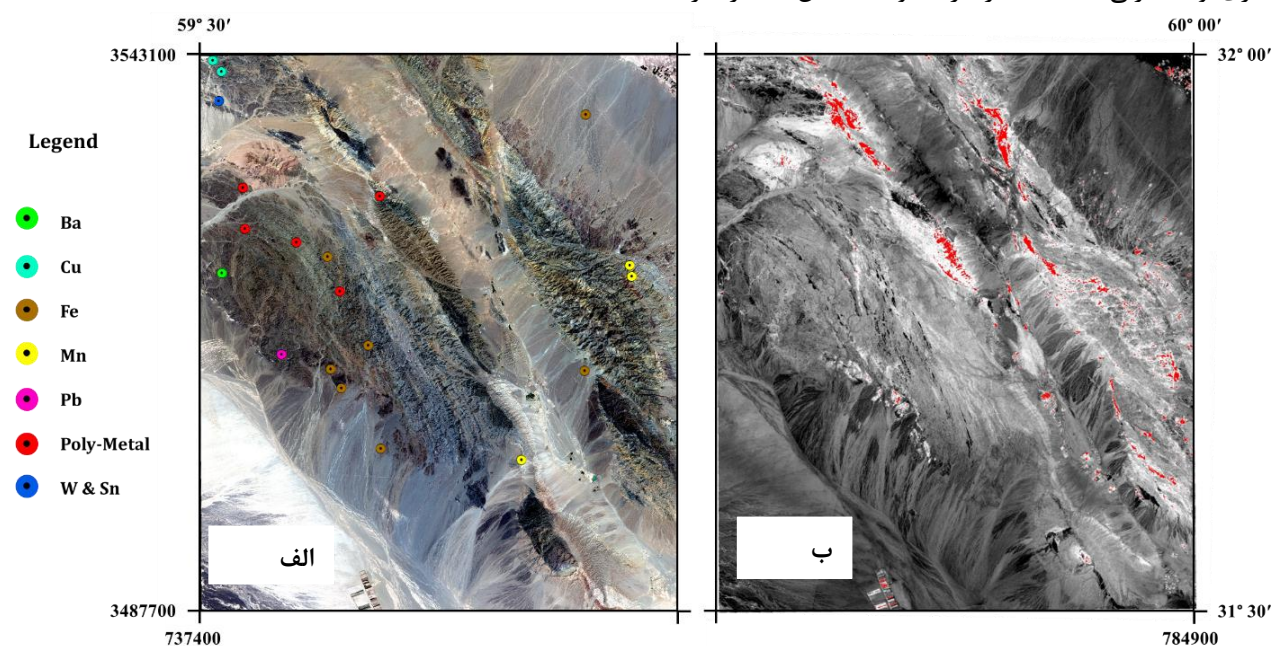
#### Legend

Recent alluvium	Metamorphic rocks
Young terraces	Sediment rocks with quartz veins
Old terraces	Dacite and andesite
Conglomerate	Basalt and ultrabasic
Shale, marl and sandstone	Granite and granodiorite
Volcanics and pyroclastic	Quartz
Limestone	Fault

شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی ساده شده (اقتباس از نقشه زمین‌شناسی منتشر شده توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور) به همراه موقعیت اندیس‌ها و معادن ورقه چهارفرسرخ (راهنمای اندیس‌ها و معادن در شکل ۲ آمده است)

قابل مشاهده است که موقعیت آن‌ها در شکل ۲-A نشان داده شده است. سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای منطقه به دلیل داشتن کانی‌های آندالوزیت، گارنت و سیلیمانیت از پتانسیل‌های اقتصادی دیگر ورقه چهارفرسخ محسوب می‌شود.

شکل ۲- ب نقشه آلتراسیون‌های ورقه چهار فرسخ را نشان می‌دهد که از روش نسبت بانندی ۱۱ به ۱۲ بدست آمده است. روش نسبت بانندی به کار رفته، یکی از بهترین روش‌های تحلیل تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ برای شناسایی آلتراسیون‌های مرتبط با کانسارهای پورفیری و هیدروترمال است [۳۷]. آلتراسیون‌های نشان داده شده در این شکل، بیشتر بر روی سنگ‌های بازیک، اولترابازیک، داسیت و آندزیت تشکیل شده است. بخشی از آلتراسیون‌ها نیز در مرز بین سنگ‌های رسوبی با واحدهای سنگی ولکانیکی واقع شده‌اند. مقایسه شکل‌های ۲- الف با ۲- ب نشان می‌دهد که تعداد کمی از اندیس‌های معدنی با موقعیت آلتراسیون‌ها همپوشانی دارند.



شکل ۲- الف- موقعیت اندیس‌ها و معادن در ورقه چهار فرسخ بر روی تصویر RGB سنتینل ۲ و ب- نقشه آلتراسیون‌های منطقه مورد مطالعه

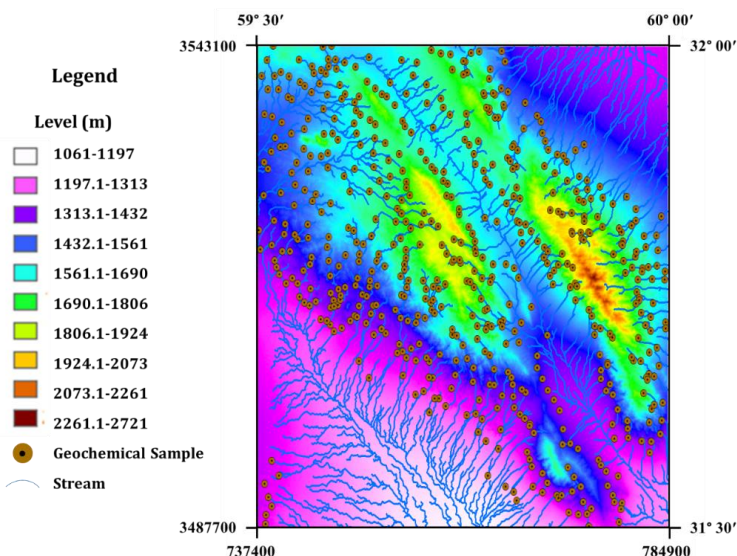
#### ۴- پردازش داده‌های اکتشافی

##### ۴-۱- داده‌های ژئوشیمیایی

سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور و تجزیه نمونه‌ها نیز در آزمایشگاه این سازمان برای ۴۴ عنصر انجام شده است. ارزیابی دقت نمونه‌برداری‌ها و آنالیزها با روش نمونه‌برداری تکراری و با محاسبه انحراف معیار نسبی (RSD) به روش تامسون- هاوارث انجام گرفته است که مقدار این پارامتر برای عناصر اصلی کمتر از ۵ درصد و برای سایر عناصر کمتر از ۱۰ درصد است.

فعالیت‌های زمین‌ساختی بلوک لوت در دوران دوم و سوم زمین‌شناسی باعث ایجاد فعالیت‌های ماگماتیسم و دگرگونی و در نتیجه کانی‌زایی‌های فلزی و غیرفلزی در منطقه مورد مطالعه شده است [۹]. کانسار قلع و تنگستن (به همراه مس- روی) چاه‌کلب مرتبط با توده‌های نفوذی گرانیتوئیدی با ژنز ماگمایی- اسکارنی مهم‌ترین معدن این محدوده است. کانه‌زایی اقتصادی در این کانسار به ضخامت چند سانتی‌متر تا ۶ متر در مرز پایینی سنگ آهک چرت‌دار دگرگون شده قرار دارد. بافت ماده معدنی در افق‌های کانه‌دار به صورت توده‌ای، دانه‌ای پراکنده، ریزلای، پرکننده فضاها، خالی و برشی بوده و کانی‌شناسی آن شامل شیلیت، کالکوپیریت، اسفالریت، پیریت، آرسنوپیریت، پیروتیت، کولیت، بورنیت، کالکوسیت، آزوریت، مالاکیت و اکسید- هیدروکسیدهای آهن است [۶]. در ورقه چهارفرسخ ۲ اندیس مس، ۱ اندیس سرب و ۶ اندیس چند فلزی با ژنز پورفیری- هیدروترمال، ۷ اندیس آهن از نوع پلاسری و اسکارنی، یک کانسار باریت و ۳ اندیس منگنز نیز

از ورقه چهار فرسخ ۵۸۶ نمونه از رسوبات آبراهه‌ای برداشت شده است که در شکل ۳ موقعیت و نحوی پراکندگی آن‌ها نشان داده شده است. بخش کوچکتر از ۸۰ مش نمونه‌ها (به دلیل مناسب بودن عیارها) برای آنالیز شیمیایی به روش ICP-OES انتخاب شده است. نمونه‌برداری توسط کارشناسان



شکل ۳- موقعیت نمونه‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراه‌های ورقه چهارفرسوخ بر روی نقشه ارتفاع رقومی منطقه

در این مقاله از نتایج تجزیه شیمیایی ۲۰ عنصر فلزی استفاده شده است. مرتبط بودن این عناصر با کانسارهای فلزی هیدروترمال و کانی‌سازی در منطقه مورد مطالعه و همچنین داشتن مقادیر سنسورد کمتر ملاک انتخاب این عناصر بوده است. جدول ۱ پارامترهای آمار توصیفی نتایج این تجزیه‌ها را بعد از جایگزینی مقادیر سنسورد به روش درست‌نمایی کوهن نشان می‌دهد. مقایسه میانگین داده‌ها با مقادیر فراوانی این عناصر در پوسته زمین (عدد کلارک) نشان‌دهنده غنی‌شدگی سنگ‌های منطقه برای عناصر Cu, Ba, As, Bi, Cr, Ni, Pb, Sb, W و تهی‌شدگی برای عناصر Fe, Hg, Mn, Mo, Sr, Ti, Zn است. مقادیر عناصر Au, Ag, Sn و Co نیز در حد عدد کلارک است. مقدار حداکثر هر متغیر از میانه بعلاوه دو برابر انحراف مطلق از میانه بیشتر است. همچنین پارامترهای چولگی و کشیدگی داده‌ها نیز نشان‌دهنده غیرنرمال بودن توزیع داده‌ها است (به استثنا عناصر Ti و Zn). بنابراین پارامترهای آماری و توزیع داده‌ها نشان‌دهنده مقادیر آنومالی در داده‌ها یا چند جامعه‌ای بودن توزیع آن‌ها است.

شکل ۱- پارامترهای آمار توصیفی داده‌های ژئوشیمیایی ورقه چهارفرسوخ

متغیر	میانگین	انحراف معیار	حداقل	میانه	حداکثر	چولگی	کشیدگی
Ag (ppm)	۰.۰۵۷	۰.۰۱۳	۰.۰۲۵	۰.۰۵۶	۰.۱۱۰	۰.۶۰	۰.۷
As (ppm)	۱۱.۷۵	۳.۵۸	۵.۱	۱۱.۰	۳۶.۰	۱.۷۵	۵.۵
Au (ppb)	۹.۸۸	۴.۲۶	۷.۰	۹.۰	۶۶.۰	۵.۲۸	۵۶.۹
Ba (ppm)	۲۹۸.۹	۴۰.۴	۵۵.۰	۳۰۴.۰	۴۰۹.۰	-۱.۰۳	۳.۲
Bi (ppm)	۰.۱۹۵	۰.۰۶۰	۰.۱۰۰	۰.۱۸۰	۰.۴۳۰	۰.۸۲	۰.۷
Co (ppm)	۱۸.۷	۷.۱	۱۰.۲	۱۷.۰	۷۴.۲	۳.۷۷	۱۹.۴
Cr (ppm)	۱۸۰.۳	۱۰۶.۷	۹۳.۲	۱۴۹.۷	۱۵۰۴.۸	۵.۴۹	۴۸.۲
Cu (ppm)	۲۶.۵	۴.۹	۱۶.۲	۲۵.۸	۹۶.۷	۵.۲۱	۶۸.۶
Fe (%)	۳.۱۸	۰.۴۰	۲.۱۷	۳.۱۲	۵.۱۰	۰.۹۸	۱.۸
Hg (ppm)	۰.۰۲۴	۰.۰۰۹	۰.۰۱۰	۰.۰۲۳	۰.۱۴۰	۶.۵۸	۷۷.۴
Mn (%)	۰.۰۶۸	۰.۰۱۱	۰.۰۳۰	۰.۰۶۶	۰.۱۸۴	۲.۹۶	۲۵.۸
Mo (ppm)	۰.۷۲۰	۰.۱۷۴	۰.۲۵۰	۰.۷۰۵	۱.۴۹۰	۰.۵۵	۰.۹
Ni (ppm)	۹۱.۳۶	۵۳.۷۴	۴۰.۱۰	۷۳.۸۰	۳۱۸.۹۰	۲.۴۸	۶.۴
Pb (ppm)	۲۲.۷۲	۳.۵۶	۱۱.۲۰	۲۲.۵۰	۳۴.۱۰	-۰.۱۰	۰.۴
Sb (ppm)	۰.۶۷	۰.۳۰	۰.۳۰	۰.۶۰	۴.۶۰	۵.۳۲	۵۷.۸
Sn (ppm)	۱.۷۲	۰.۵۳	۰.۸۰	۱.۶۰	۵.۵۰	۱.۵۲	۵.۳
Sr (ppm)	۲۷۳.۳	۵۸.۳	۱۲۸.۰	۲۶۸.۰	۱۳۱۳.۱	۱۰.۰۶	۱۷۲.۹
Ti (%)	۰.۳۴۴	۰.۰۴۵	۰.۱۷۵	۰.۳۴۲	۰.۵۲۹	۰.۰۲	۲.۱
W (ppm)	۱.۷۱	۴.۰۴	۰.۶۱	۱.۱۰	۵۹.۰۰	۱۰.۸۷	۱۳۱.۱
Zn (ppm)	۱۸.۴۲	۱۰.۲۹	۳۹.۰۰	۸۱.۰۰	۱۴۰.۰۰	۰.۴۳	۲.۳

نمودار تمام لگاریتمی ترسیم شود، نقاط شکست منحنی را می‌توان به عنوان آستانه تفکیک جوامع آماری در نظر گرفت. بنابراین تعداد نقاط شکست منحنی نشان‌دهنده تعداد جوامع آماری یا تعداد تنوع آنومالی‌های ژئوشیمیایی است [۱۵ و ۳۹]. شکل ۴ نمودار فرکتالی عیار-مساحت و جدول ۲ مقادیر آستانه آنومالی‌ها (نقاط شکست منحنی) را برای ۹ عنصر انتخابی نشان می‌دهد.

شکل ۵ موقعیت آنومالی‌های ژئوشیمیایی را برای این عناصر با توجه به آستانه‌های بدست آمده نشان می‌دهد. با توجه به نمودار فرکتالی عیار-مساحت، محدوده مورد مطالعه برای هر عنصر در این شکل به سه بخش زمینه (محدوده‌های دارای رنگ سفید با نقطه‌های آبی)، آنومالی ممکن (محدوده‌های دارای رنگ کرم) و آنومالی احتمالی (محدوده‌های قرمز رنگ) تفکیک شده است.

در مرحله بعد برای تعیین آنومالی‌های ژئوشیمیایی تک عنصری روش فرکتالی عیار-مساحت به کار رفته است. برای استفاده از این روش باید در ابتدا نقشه کنتوری عیار را ترسیم کرد. اگر  $A$  مساحت مقادیر عیار بزرگتر از کنتور  $\rho$  در این نقشه کنتوری باشد، این مساحت دارای یک تابع نمایی کاهشی نسبت به عیار و به صورت رابطه ۸ است:

$$A(\geq \rho) = C\rho_i^{-D} \quad (8)$$

که در آن:

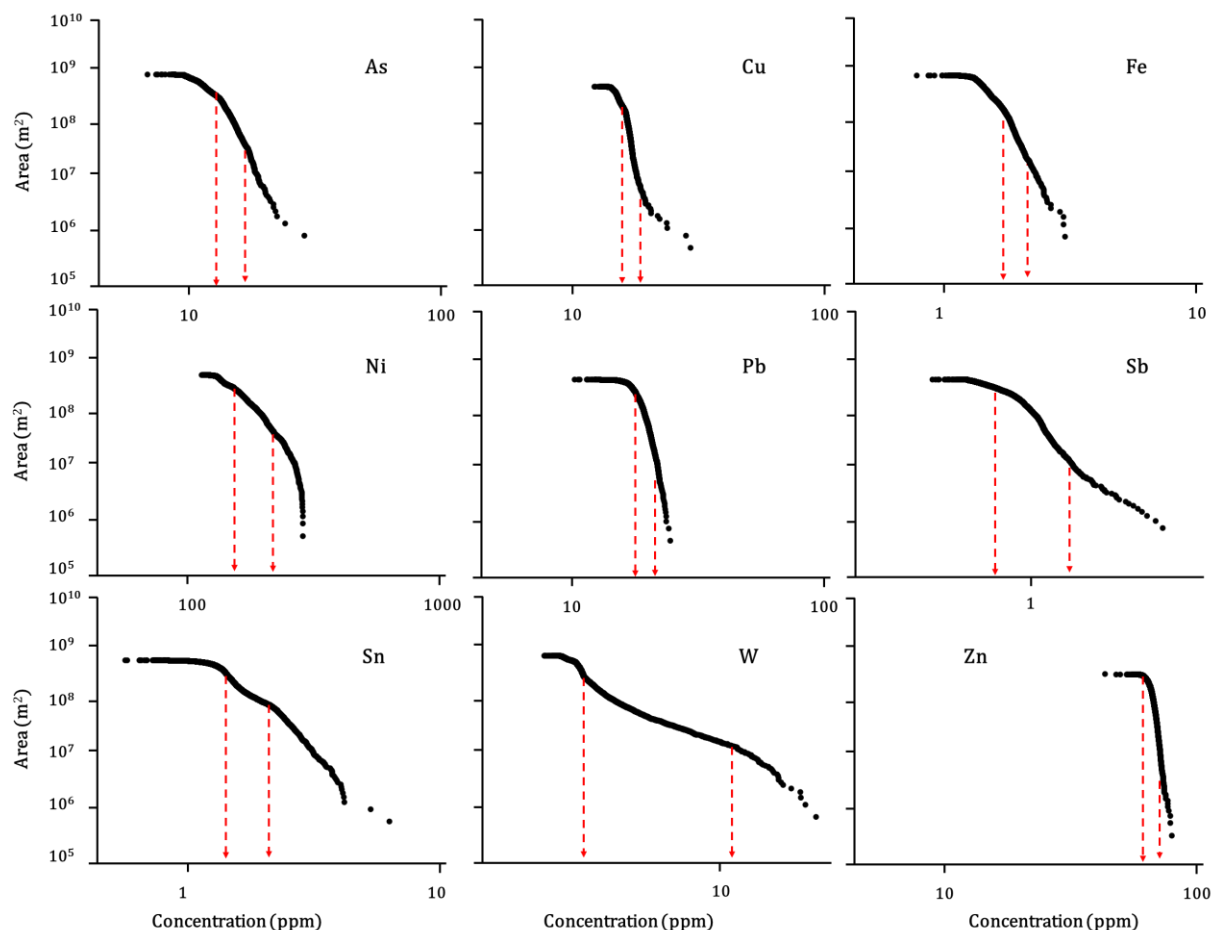
$A(\geq \rho)$ : مساحت

$\rho_i$ : عیار

$D$ : بعد فرکتال

$C$ : ضریب ثابت

در مرحله بعد اگر مقادیر مساحت بر حسب عیار در یک



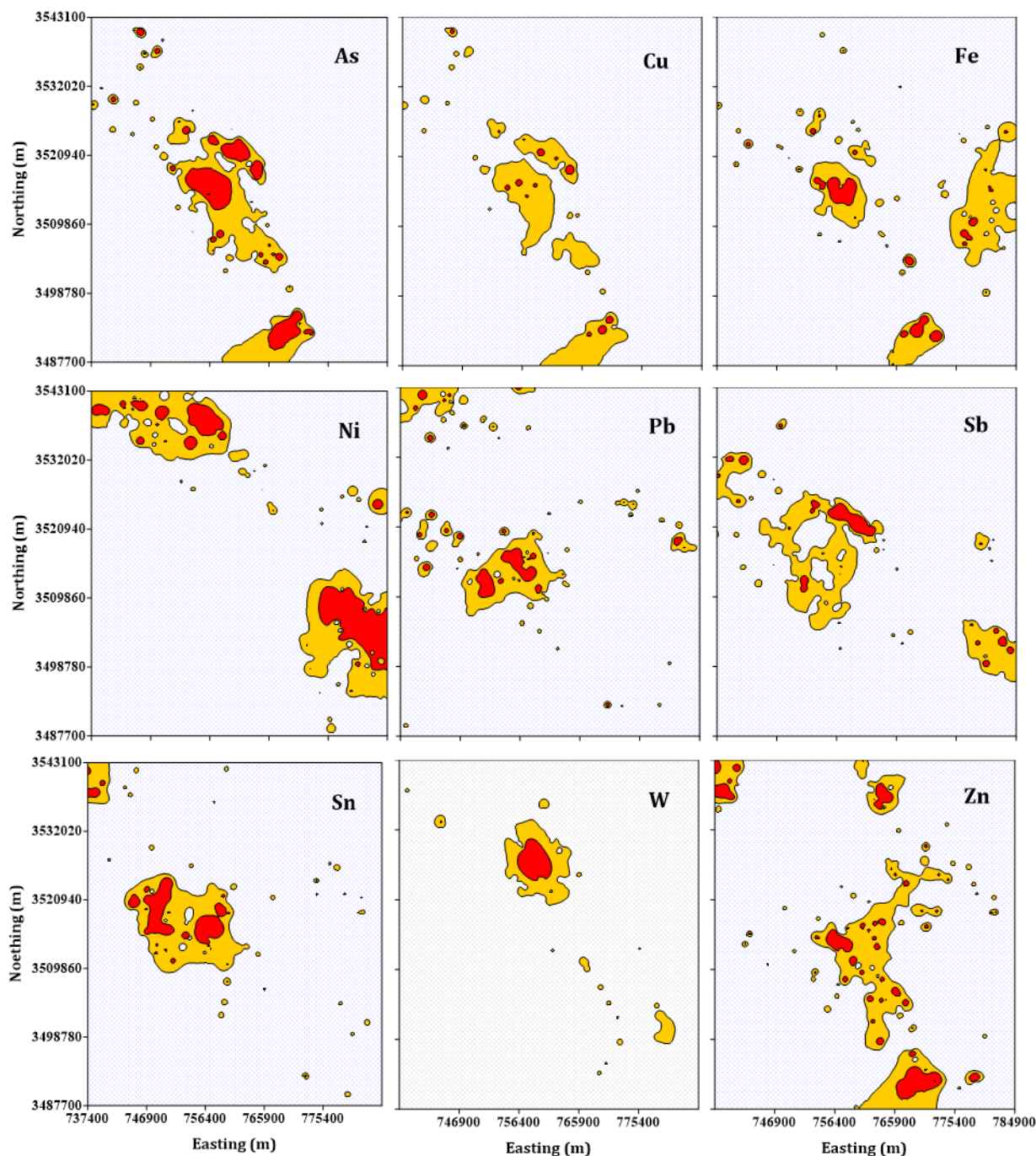
شکل ۴- نمودار فرکتالی عیار-مساحت عناصر شیمیایی در منطقه مورد مطالعه

شمال غربی آن گسترش دارد (شکل ۵). این آنومالی‌ها بیشتر بروی سنگ‌های رسوبی حاوی رگه‌های کوارتز واقع شده‌اند. هر چند بخشی از آنومالی‌های عناصر Pb و Sb با واحدهای

آنومالی ژئوشیمیایی عناصر As, Cu, Pb, Sb و Zn در سه بخش یا محدوده اصلی و در مرکز ورقه قابل مشاهده است که از منتهالیه بخش جنوب شرقی ورقه شروع شده و تا

می‌توان به انطباق بسیار خوب آنومالی‌های عنصر Ni و W به ترتیب با واحدهای سنگی بازیک و الترابازیک و واحدهای سنگی گرانیتی و پگماتیته منطقه مورد مطالعه اشاره کرد. همچنین آنومالی‌های عنصر Sn نیز بر روی واحدهای سنگی گرانیتی و دگرگونی واقع شده که تفسیر ژئوشیمیایی آن امکانپذیر است.

سنگی بازیک و اولترابازیک همپوشانی دارند. آنومالی‌های ژئوشیمیایی عنصر Fe در شکل ۵ بر روی واحدهای سنگی رسوبی حاوی رگه‌های کوارتز، واحد سنگی دگرگونی و سنگ‌های شیل، مارن، ماسه‌سنگ و کنگلومرا قرار دارد که بخش قابل ملاحظه‌ای از این آنومالی‌ها با آنومالی‌های ژئوشیمیایی عناصر گروه قبل همپوشانی دارند. از نکات قابل توجه آنومالی‌های ژئوشیمیایی نشان داده شده در شکل ۵،



شکل ۵- آنومالی ژئوشیمیایی عناصر در محدوده ورقه چهارفرسخ



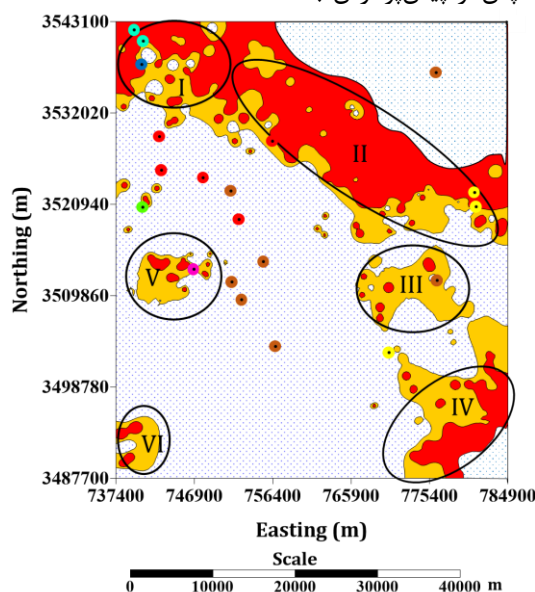
جدول ۲- آستانه آنومالی‌های ژئوشیمیایی به روش فرکتالی عیار- مساحت

متغیر	آنومالی ممکن	آنومالی احتمالی
As	۱۴٫۵	۱۶٫۵
Cu	۱۵	۲۰
Fe	۳٫۲	۳٫۸
Ni	۱۲۰	۱۶۵
Pb	۲۵٫۵	۲۷٫۵
Sb	۰٫۸۵	۱٫۱۰
Sn	۲٫۱	۲٫۵
W	۳٫۱	۱۰٫۳
Zn	۸۸	۹۳

الگوریتم خوشه‌بندی طیفی به سه خوشه تفکیک شده است. نقشه کنتوری نتیجه خوشه‌بندی در شکل ۶ آمده است.

در شکل ۶، محدوده خوشه اول (زمینه) همانند شکل‌های ۵، با رنگ سفید با نقاط آبی، محدوده خوشه دوم (آنومالی ممکن) با رنگ کرم و محدوده خوشه سوم (آنومالی احتمالی) با رنگ قرمز نشان داده شده است. این آنومالی‌ها توانسته است حدود نیمی از اندیس‌ها و معادن این ورقه را پوشش دهد. آنومالی‌های ژئوشیمیایی مرکب در ورقه چهارفرسخ را می‌توان به شش بخش تقسیم کرد (شکل ۶). مقایسه شکل ۶ با نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه (شکل ۱) نشان می‌دهد که محدوده‌های آنومالی‌های ژئوشیمیایی در بخش‌های I و IV با سنگ‌های بازیک و اولترابازیک و در بخش II با واحدهای سنگی آذرین و دگرگونی همپوشانی دارند. در حالی که آنومالی‌های ژئوشیمیایی بخش‌های III، V و VI بر روی واحدهای سنگی رسوبی واقع شده‌اند.

از آنجا که نمونه‌های ژئوشیمیایی اکثراً به صورت چند عنصری تجزیه می‌شوند، بنابراین استفاده از روش‌های چند عنصری تعیین آستانه می‌تواند به روش‌های تک عنصری ارجحیت داشته باشد. در این حالت آنومالی حاصل، یک آنومالی ژئوشیمیایی مرکب است که پتانسیل اکتشافی را برای چند عنصر به طور هم‌زمان نشان می‌دهد. مطالعات نشان داده است که استفاده از روش‌های خوشه‌بندی برای تعیین آنومالی‌های ژئوشیمیایی مرکب نسبت به روش‌های مرسوم (مانند تحلیل مولفه‌های اصلی، تحلیل فاکتوری و آنومالی‌های جمعی یا ضریبی) برتری دارد [۸، ۱۶ و ۴۱]. بهترین روش پیش‌پردازش برای خوشه‌بندی داده‌ها، با توجه قرار داشتن داده‌های ژئوشیمیایی در یک سیستم بسته، استفاده از روش انتقال- لگاریتمی میان مرکز (clr) برای باز کردن سیستم داده‌ها و سپس استانداردسازی آن‌ها با انتقال داده‌ها به بازه صفر تا یک برای حذف اثر واحد اندازه‌گیری است [۱۶ و ۴۱]. بنابراین ماتریس داده‌های ژئوشیمیایی ورقه چهارفرسخ که دارای ابعاد  $۵۸۶ \times ۲۰$  است، پس از پیش‌پردازش با



شکل ۶- آنومالی‌های ژئوشیمیایی مرکب به همراه موقعیت اندیس‌ها و معادن در ورقه چهار فرسخ

#### ۴-۲- داده‌های دورسنجی

در این مقاله از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ نیز استفاده شده است. ماهواره سنتینل ۲، دومین سری از ماهواره‌های سری سنتینل بود که توسط سازمان فضایی اروپا در سال ۲۰۱۵ ماهواره سنتینل ۲A و در سال ۲۰۱۷ سنتینل ۲B به فضا پرتاب شد. از مهم‌ترین مشخصات تصاویر این ماهواره می‌توان به دارا بودن ۱۳ باند طیفی در محدوده مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز طول موج کوتاه، توان تفکیک زمانی ۵ روز در استوا و ۳ روز در عرض‌های میانی، پوشش جهانی منظم از سطح زمین از مدار ۵۶ درجه جنوبی تا ۸۴ درجه شمالی، قدرت تفکیک مکانی ۱۰، ۲۰ و ۶۰ متر و میدان دید ۲۹۰ کیلومتر اشاره کرد [۲۹]. تصاویر به کار رفته در این مقاله متعلق به ماهواره سنتینل ۲A سطح ۱C بوده که به تاریخ ۵ آوریل ۲۰۲۲ از منطقه مورد مطالعه گرفته شده است. در جدول ۳ مشخصات باندهای تصاویر این ماهواره ارائه شده است.

برای آماده‌سازی ماتریس داده‌های تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ مراحل زیر بر روی آن‌ها انجام گرفته است:

- انجام تصحیحات اتمسفری و رادیومتری به کمک الگوریتم sen2cor
- نمونه‌گیری مجدد از کلیه باندها با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متری
- موزاییک کردن دو تصویر ماهواره‌ای پوشش‌دهنده ورقه چهارفرسوخ

- برش منطقه مورد مطالعه از تصویر موزاییکی شده
- حذف باندهای ۱، ۹ و ۱۰ به دلیل کاربرد آن‌ها برای مطالعات ابرها و بخار آب
- استخراج ارزش عددی هر پیکسل برای تصاویر ۱۰ باند باقیمانده

برای انجام مراحل فوق از نرم‌افزارهای SNAP و ArcGIS استفاده شده است. در نهایت ماتریس بدست آمده برای خوشه‌بندی دارای ابعاد  $10 \times 27633870$  است. با توجه به بالا بودن ابعاد ماتریس داده‌ها و روبه‌رو بودن با یک ماتریس کلان داده برای پردازش از یک سیستم پردازنده پر قدرت استفاده شده است. خوشه‌بندی ماتریس داده‌ها در سه حالت، تعداد خوشه‌ها برابر ۳ (تعداد جوامع آنومالی‌های ژئوشیمیایی مرکب نشان داده شده در شکل ۶)، تعداد خوشه‌ها برابر ۱۳ (تعداد جوامع سنگی نشان داده شده در شکل ۱) و تعداد خوشه‌ها برابر ۵ (تعداد بهینه خوشه‌ها بدست آمده از روش نمودار نیمرخ یا شاخص Silhouette نشان داده شده در شکل ۷) انجام گرفته است. برای تعیین تعداد بهینه خوشه، ابتدا شاخص نیمرخ برای هر نمونه از رابطه ۹ بدست آمده است [۳۵]:

$$S(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\text{Max}\{a(i), b(i)\}} \quad (9)$$

که در آن:

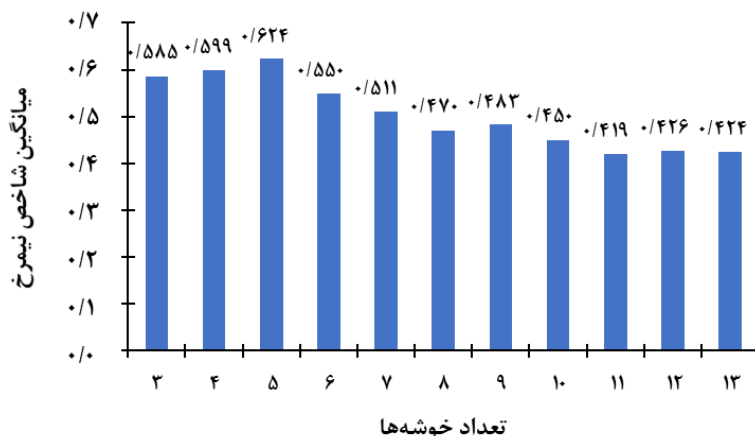
$S(i)$ : شاخص نیمرخ نمونه نام

$a(i)$ : متوسط فاصله نمونه نام با نمونه‌های هم خوشه خود

$b(i)$ : کمترین فاصله نمونه نام با سایر خوشه‌ها

جدول ۳- مشخصات باندهای تصاویر ماهواره سنتینل ۲A

نام باند	شماره باند	توان تفکیک مکانی (متر)	پهنای باند (نانومتر)	میانگین طول موج (میکرومتر)
Coastal Aerosol	۱	۶۰	۲۱	۰٫۴۳
Blue	۲	۱۰	۶۶	۰٫۴۹
Green	۳	۱۰	۳۶	۰٫۵۶
Red	۴	۱۰	۳۱	۰٫۶۵
Vegetation Red Edge	۵	۲۰	۱۵	۰٫۷۰
Vegetation Red Edge	۶	۲۰	۱۵	۰٫۷۴
Vegetation Red Edge	۷	۲۰	۲۰	۰٫۷۸
NIR	۸	۱۰	۱۰۶	۰٫۸۴
Narrow NIR	۸A	۲۰	۲۱	۰٫۸۶
Water Vapor	۹	۶۰	۲۰	۰٫۹۴
SWIR – Cirrus	۱۰	۶۰	۳۱	۱٫۳۷
SWIR	۱۱	۲۰	۹۱	۱٫۶۱
SWIR	۱۲	۲۰	۱۷۵	۲٫۱۹



شکل ۷- نمودار میانگین پهنای شاخص Silhouette در خوشه‌بندی‌های مختلف

و مقایسه آن را با نقشه زمین‌شناسی و آنومالی‌های ژئوشیمیایی مرکب منطقه مورد مطالعه امکان‌پذیر می‌کند. شکل F-۸ نتایج خوشه‌بندی پیکسل‌های تصویر منطقه مورد مطالعه را به ۱۳ خوشه نشان می‌دهد که که پیکسل‌های خوشه اول و دوم در شکل B-۸ را هر کدام به پنج خوشه و پیکسل‌های خوشه سوم در شکل B-۸ به سه خوشه تفکیک کرده است. اگر چه به دلیل برابر بودن تعداد خوشه‌ها با تعداد واحدهای سنگی منطقه مورد مطالعه، مقایسه نتایج این خوشه‌بندی با نقشه زمین‌شناسی ورقه چهارفرسخ (شکل ۱) راحت‌تر است ولی مقایسه آن با نقشه آنومالی‌های مرکب (شکل ۶) و مشخص کردن محدوده‌های دارای پتانسیل کانی‌سازی با چالش‌هایی همراه است.

#### ۵- تفسیر نتایج

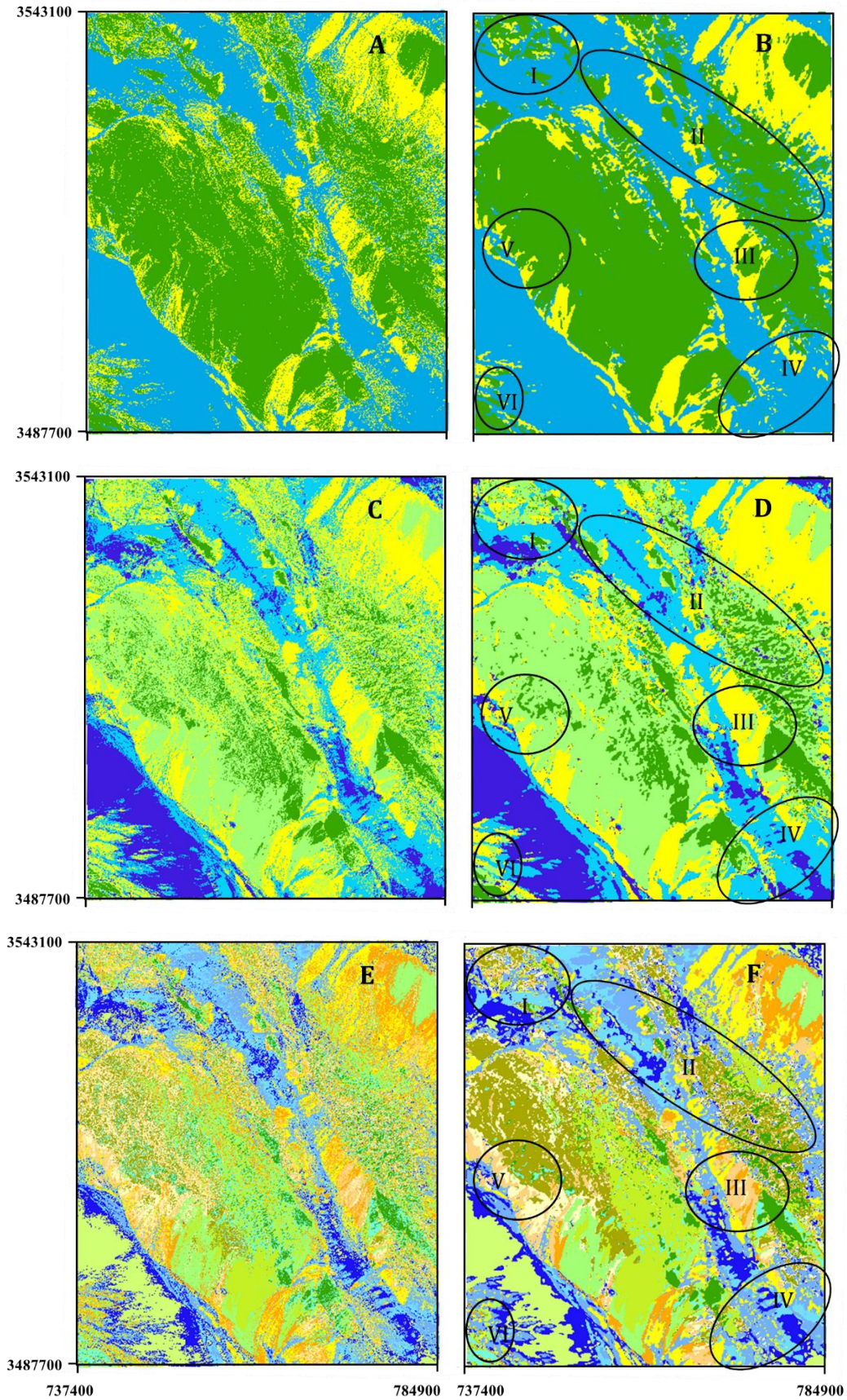
داده‌های ماهواره بازتابی از شرایط سطح زمین در منطقه‌اند. به طوری که جنس سنگ‌ها و سایر شرایط سطحی مهم‌ترین نقش را در شدت بازتاب امواج الکترومغناطیسی دارند که سنجنده در نهایت آن را به صورت عددی دیجیتالی ( $DN^1$ ) ثبت می‌کند. با توجه به مطالب گفته شده و تفسیر بهتر نتایج خوشه‌بندی ماتریس داده‌های سنتینل ۲ به پنج خوشه، در شکل ۸ نمودار این شدت بازتاب برای داده‌های ۵ خوشه‌ای در منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است. برای رسم این نمودار مختصات مرکز خوشه‌ها به عنوان رفتار طیفی هر خوشه در نظر گرفته شده است. این نمودار نشان می‌دهد که بین مراکز خوشه اختلاف معنی‌دار وجود دارد و در نتیجه خوشه‌بندی دقت بالایی دارد. هر چند نمودار طیفی خوشه‌های در باندهای اولیه به یکدیگر نزدیک‌اند ولی این نمودارها در باندهای با طول موج بالاتر از یکدیگر فاصله بیشتری می‌گیرند. همچنین شکل ۹ نشان می‌دهد که رفتار طیفی خوشه‌ها تقریباً مشابه هم است و تفاوت آن‌ها در مقدار عدد دیجیتالی است که علت آن می‌تواند در نظر گرفتن مختصات مراکز خوشه‌ها باشد.

سپس شاخص Silhouette که برابر میانگین وزن‌دار پهنای شاخص نیمرخ برای هر خوشه‌بندی است، محاسبه و نتایج برای تعداد خوشه‌های مختلف به صورت نمودار ترسیم شده است. در نهایت، تعداد بهینه خوشه‌ها برابر بیشترین مقدار شاخص Silhouette است [۳۵]. مطابق نمودار شکل ۷، بیشترین مقدار شاخص برابر ۰/۶۲۴ بوده که متعلق به خوشه‌بندی داده‌ها به ۵ خوشه است.

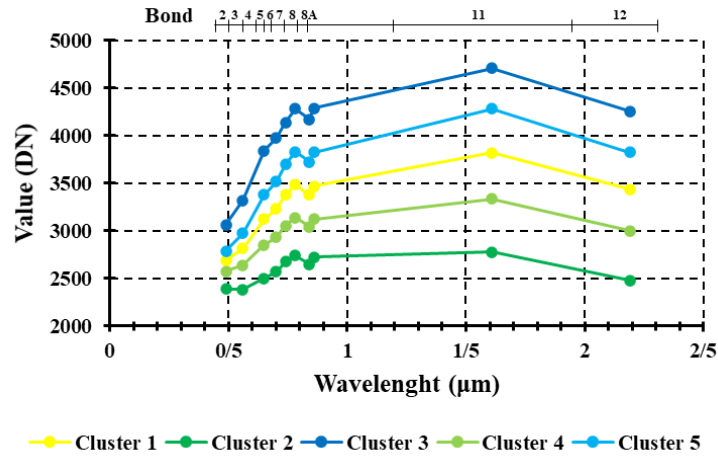
شکل ۸ نتایج خوشه‌بندی ماتریس داده‌های تصاویر ماهواره سنتینل ۲ ورقه چهار فرسخ را در سه حالت بیان شده، نشان می‌دهد (شکل‌های A، C و E-۸). به دلیل ابعاد کوچک پیکسل‌های تصاویر (۱۰×۱۰ متری)، تعداد پیکسل‌های نويز (پیکسل‌هایی که خوشه آن‌ها با پیکسل‌های مجاور همخوانی ندارد) در این شکل‌ها بالا است. برای رفع این مشکل و بهبود بخشیدن به کیفیت خوشه‌بندی تصاویر از روش آنالیز تصویر به کمک فیلتر استفاده شده است [۲۸ و ۳۱]. شکل‌های B، D و F-۸، تصاویر حذف نويز با به کار بردن فیلتر میانه در نرم‌افزار متلب را نشان می‌دهد که وضعیت و کیفیت خوشه‌بندی بهتری دارد.

شکل B-۸ نشان می‌دهد که بیشتر منطقه مورد مطالعه را پیکسل‌های خوشه دوم (محدوده‌های آبی رنگ) تشکیل می‌دهند که بر روی رسوبات کواترنر واقع شده‌اند. پیکسل‌های خوشه اول (محدوده‌های سبز رنگ) در جایگاه بعدی قرار دارند که بیشتر واحدهای سنگی ورقه چهار فرسخ با این خوشه همپوشانی دارند. پیکسل‌های خوشه سوم (محدوده‌های زرد رنگ) نیز مرز بین واحدهای سنگی با رسوبات کواترنر را پوشش می‌دهند. بارزترین تفاوت بین نتایج خوشه‌بندی طیفی ۵ خوشه با ۳ خوشه در این نکته است که پیکسل‌های خوشه دوم در شکل B-۸ به دو خوشه در شکل D-۸ (محدوده‌های آبی پررنگ؛ خوشه سوم و محدوده‌های آبی کم رنگ؛ خوشه پنجم) و پیکسل‌های خوشه اول در شکل B-۸ به دو خوشه دیگر در شکل D-۸ (محدوده‌های سبز پررنگ؛ خوشه دوم و محدوده‌های سبز کم رنگ؛ خوشه چهارم) تفکیک شده است. این نکته تفسیر شکل D-۸ را راحت‌تر و دقیق‌تر

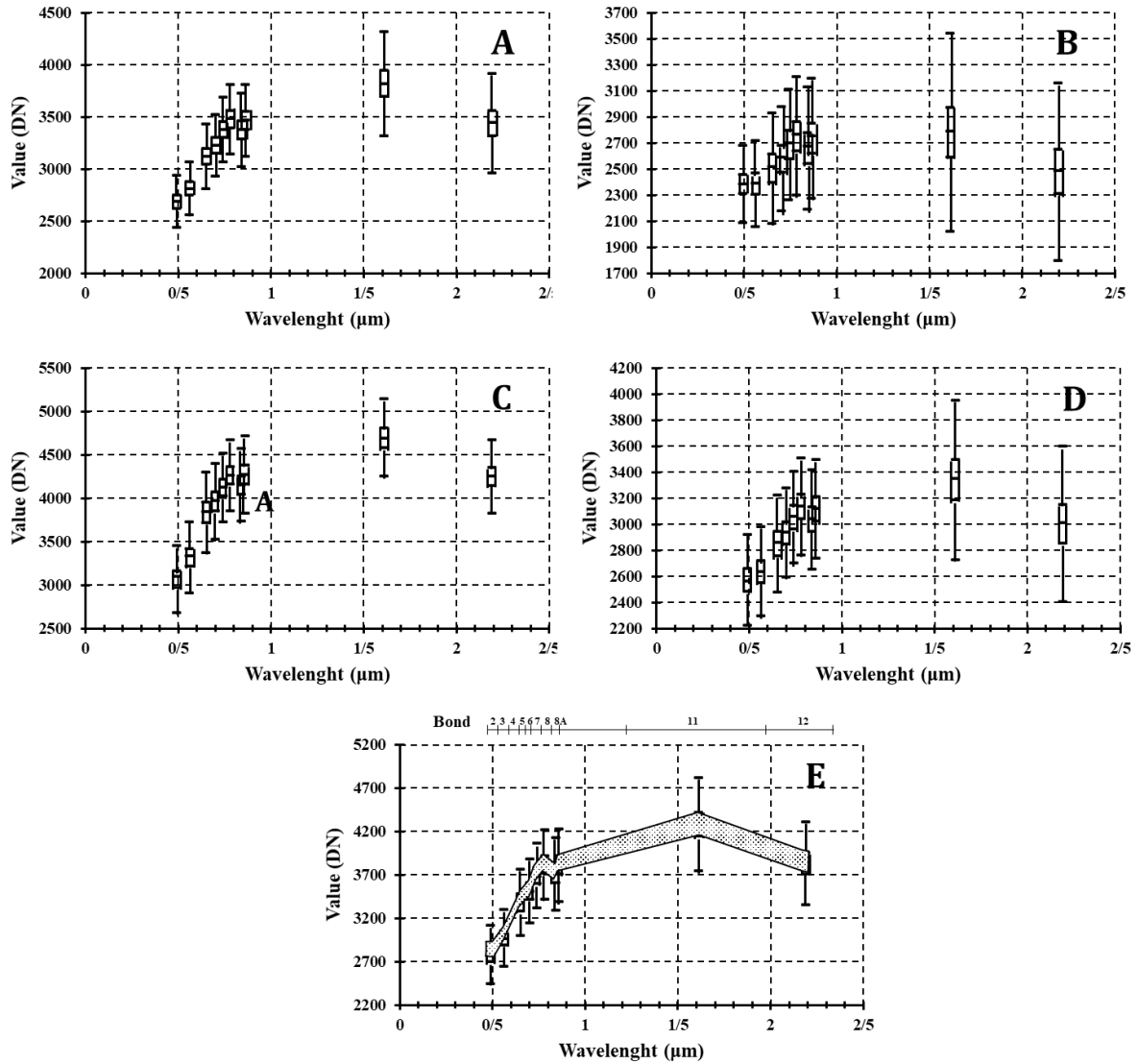
<sup>1</sup> Digital number



شکل ۸- نتایج خوشه‌بندی ماتریس داده‌های تصویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ ورقه چهارفرسوخ (A: تصویر اولیه‌ی ۳ خوشه‌ای، B: تصویر فیلترشده ۳ خوشه‌ای، C: تصویر اولیه ۵ خوشه‌ای، D: تصویر فیلترشده ۵ خوشه‌ای، E: تصویر اولیه ۱۳ خوشه‌ای و F: تصویر فیلترشده ۱۳ خوشه‌ای)



شکل ۹- نمودار طیفی خوشه‌های پنج‌گانه داده‌های سنتینل ۲ در ورقه چهارفرسخ



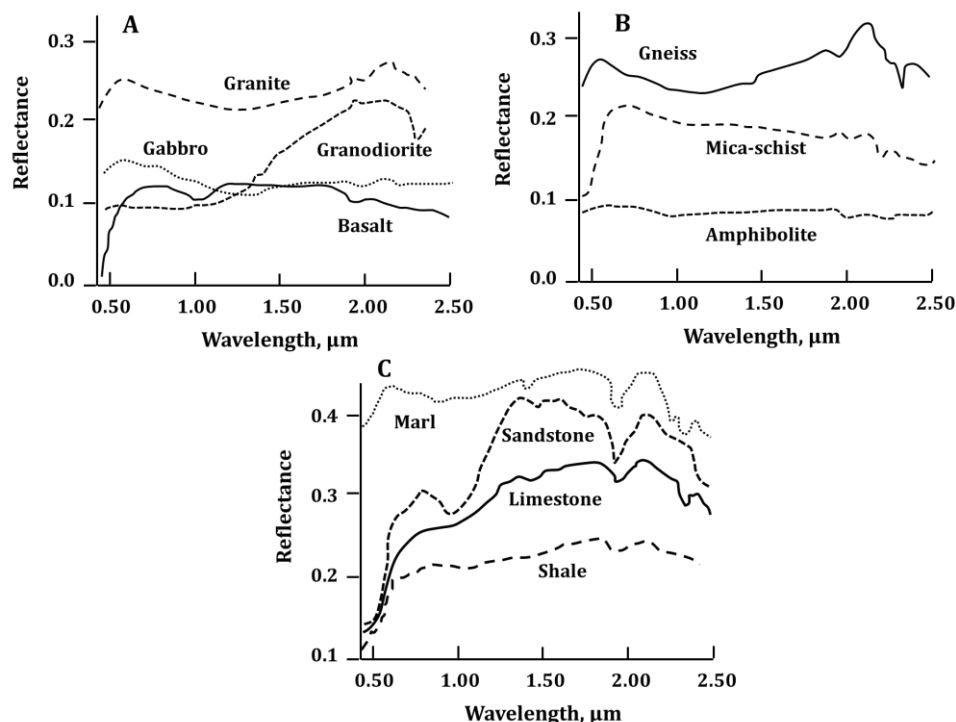
شکل ۱۰- نمودار جعبه‌ای رفتار طیفی داده‌های خوشه اول (A)، خوشه دوم (B)، خوشه سوم (C)، خوشه چهارم (D) و خوشه پنجم (E) رفتار طیفی داده‌های خوشه پنجم به عنوان نمونه به صورت یک نوار نقطه‌چین در باندهای مختلف نشان داده شده است

دیجیتالی ثبت شده برای خوشه چهارم بین ۲۲۰۰ تا ۳۹۰۰ (شکل D-۱۰) و برای خوشه دوم بین ۱۸۰۰ تا ۳۶۰۰ (شکل B-۱۰) است. مقایسه شکل‌های C و D-۸ با نقشه زمین‌شناسی منطقه (شکل ۱) نشان می‌دهد که موقعیت پیکسل‌های خوشه چهارم (محدوده‌های سبز کم رنگ در شکل‌های C و D-۸) بیشتر با واحدهای سنگی رسوبی و موقعیت پیکسل‌های خوشه دوم (محدوده‌های سبز پر رنگ در شکل‌های C و D-۸) بیشتر با واحدهای سنگی دگرگونی و آذرین همپوشانی دارد. اگر چه شدت بازتاب امواج و عدد دیجیتالی ثبت شده با یک ماهواره در مورد واحدهای سنگی مختلف به ترکیب کانی‌شناسی، ساخت و بافت آن، شدت هوازدگی، میزان رطوبت و سایر پارامترهای دیگر بستگی دارد ولی به طور کلی عدد دیجیتالی ثبت شده برای سنگ‌های آذرین و دگرگونی تیره کمتر از سنگ‌های رسوبی است [۲۵ و ۴۰]. شکل ۱۱ مقدار بازتاب امواج را برای واحدهای سنگی مختلف به عنوان نمونه نشان می‌دهد. مقایسه شکل ۱۰ با ۱۱ نشان می‌دهد که با افزایش طول موج، شدت بازتاب امواج و در نتیجه عدد دیجیتالی ثبت شده برای سنگ‌های رسوبی افزایشی است؛ به طوری که بیشترین شدت بازتاب در بین طول موج‌های ۱٫۵ تا ۲ میکرومتر قرار دارد (شکل C-۱۱). بنابراین رفتار طیفی داده‌های خوشه چهارم (شکل D-۹) بیشتر به سنگ‌های رسوبی شباهت دارد. در مقابل آهنگ تغییرات شدت بازتاب برای سنگ‌های آذرین و دگرگونی با افزایش طول موج، یکنواخت‌تر و با مقدار کمتری نسبت به سنگ‌های رسوبی است (شکل‌های A و B-۱۱). در نتیجه رفتار طیفی داده‌های خوشه دوم را می‌توان به این سنگ‌ها نسبت داد. این نکات تاییدکننده همپوشانی پیکسل‌های این خوشه‌ها با نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه است.

همچنین مقایسه شکل ۲ با شکل‌های C و D-۸ نشان می‌دهد که تمامی اندیس‌ها و معادن منطقه مورد مطالعه در محدوده خوشه‌های دوم و چهارم قرار دارند. همچنین آنومالی‌های ژئوشیمیایی مرکب (شکل ۶) نیز با پیکسل‌های این دو خوشه همخوانی خوبی نشان می‌دهند. در نتیجه می‌توان موقعیت این خوشه‌ها را به عنوان مناطق مستعد کانی‌سازی در منطقه شناسایی کرد. بنابراین با توجه به نتایج بدست آمده از تحلیل داده‌های اکتشافی ورقه چهارفرسرخ، محدوده‌های I و II به عنوان اولویت اول، محدوده‌های III و VI به عنوان اولویت دوم و محدوده‌های IV و V به عنوان اولویت سوم برای کانی‌سازی و اکتشاف تکمیلی معرفی می‌شوند.

برای نشان دادن بهتر رفتار طیفی هر خوشه می‌توان از نمودار جعبه‌ای عدد دیجیتالی داده‌های هر خوشه در هر باند استفاده کرد. شکل ۱۰، این رفتار طیفی برای هر خوشه را به طور مجزا نشان می‌دهد. نمودارهای جعبه‌ای نشان می‌دهند که داده‌های هر خوشه در هر باند از تابع توزیع نرمال تبعیت می‌کنند و دامنه آن‌ها تقریباً یکسان است. داده‌های خوشه سوم مطابق شکل C-۱۰ و شکل ۹ دارای بالاترین بازتاب در تصاویر ماهواره‌ای است. به طوری که عدد دیجیتالی آن‌ها در باندهای مختلف بین ۲۷۰۰ تا ۵۲۰۰ متغیر است. محدوده‌های این خوشه (محدوده‌های آبی پررنگ در شکل‌های C و D-۸) تماماً بر روی رسوبات آبرفتی و پادگانه قرار دارند که از نظر کانی‌سازی ارزشمند نیستند. شکل ۹ نشان می‌دهد که داده‌های خوشه پنجم در ردیف دوم بالاترین شدت بازتاب را دارند که مقدار عدد دیجیتالی آن‌ها در باندهای مختلف بین ۲۵۰۰ تا ۴۹۰۰ است (شکل E-۱۰). موقعیت فرارگیری داده‌های این خوشه (محدوده‌های آبی کم رنگ در شکل‌های C و D-۸) همانند خوشه قبلی بر روی رسوبات پادگانه قدیمی و جدید واقع شده‌اند. داده‌های خوشه اول که مطابق شکل A-۱۰ مقدار عدد دیجیتالی آن‌ها بین ۲۴۰۰ تا ۴۴۰۰ قرار دارد، از نظر شدت بازتاب در بین خوشه‌های مختلف در وسط قرار دارد. بخش اعظم داده‌های این خوشه (محدوده‌های زرد رنگ در شکل‌های C و D-۸) بر روی رسوبات پادگانه قرار دارند و بخش کوچکی از آن‌ها نیز بر روی سنگ‌های رسوبی هم‌مرز این پادگانه‌ها واقع شده‌اند. شناسایی واحد آبرفتی و پادگانه در تصاویر ماهواره‌ای معمولاً با آنالیز مولفه‌های اصلی و نسبت باندی انجام می‌گیرد. کانی‌های رسی موجود در این رسوبات بیشترین شدت بازتاب در باند ۵ تصویر لندست ۷ (معادل باند ۱۱ تصاویر سنتینل) و بیشترین جذب را در باند ۷ لندست ۷ (معادل باند ۱۲ تصاویر سنتینل) دارند [۲۷، ۳۶] که نمودارهای طیفی خوشه‌های اول، سوم و پنجم در شکل ۱۰ تاییدکننده این مطلب‌اند. از آنجا که محدوده این خوشه‌ها با آنومالی‌های ژئوشیمیایی مرکب (شکل ۶) همخوانی ندارد بنابراین از نظر کانی‌سازی و اکتشافی مناطق مناسبی نیستند (به جز آنومالی IV که می‌تواند به علت ماهیت نمونه‌های ژئوشیمیایی منطقه و انتقال آنومالی به رسوبات پایین دست باشد).

داده‌های خوشه چهارم و دوم در ردیف‌های بعدی شدت بازتاب امواج الکترومغناطیسی خورشیدی‌اند، به طوری که عدد



شکل ۱۱- بازتاب طیفی نمونه‌هایی از سنگ‌های آذرین (A)، دگرگونی (B) و رسوبی (C) (تعدیل شده از منابع [۲۳، ۲۵، ۳۲ و ۴۰])

## ۶- نتیجه‌گیری

تعیین محدوده‌های مستعد کانی‌سازی به کمک داده‌های مختلف مهم‌ترین هدف اکتشافات ناحیه‌ای است. ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ چهارفرسخ در استان خراسان جنوبی به دلیل داشتن سنگ‌های آذرین درونی و بیرونی به همراه سنگ‌های دگرگونی پتانسیل بالایی برای کانی‌سازی دارد. تحلیل داده‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای در این منطقه، نشان داد که ۶ محدوده برای کانی‌سازی قابل شناسایی است. تفکیک داده‌های تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ این ورقه (در ۱۰ باند با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متری) به کمک روش خوشه‌بندی طیفی به ۵ خوشه نشان داده که محدوده‌های I و II به دلیل قرارگیری بر روی واحدهای سنگی آذرین و دگرگونی و مقایسه رفتار طیفی داده‌های این خوشه با سنگ‌های نمونه می‌تواند به عنوان اولویت اول برای اکتشاف تکمیلی معرفی شود. همچنین رفتار طیفی پیکسل‌های محدوده‌های III و VI مشابه رفتار طیفی سنگ‌های رسوبی است که به عنوان اولویت دوم برای اکتشاف در نظر گرفته شد و در نهایت دو محدوده IV و V به عنوان اولویت سوم برای کانی‌سازی و اکتشاف تکمیلی معرفی شد. نتایج این تحقیق نشان داد که به کمک خوشه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای، به ویژه تصاویر ماهواره سنتینل ۲ به دلیل تعداد باندهای بالا و قدرت تفکیک مکانی مناسب، می‌توان

آنومالی‌های ژئوشیمیایی ناحیه‌ای را مورد اعتبارسنجی قرار داد و آنومالی‌های مختلف را اولویت‌بندی کرد.

## منابع

۱. ابراهیمی، امین؛ خیرخواه زرکش، میرمسعود؛ افضل، پیمان، ۱۳۹۶؛ «تعیین تابع عضویت فازی به کمک مدل‌سازی چند فرکتالی برای تهیه نقشه پتانسیل مس در منطقه ساردویه، کرمان»، نشریه مهندسی معدن، دوره ۱۲، شماره ۳۶، صفحه ۷۱-۸۰.
۲. بیابانگرد، حبیب؛ نجف‌زاده خواجوی، مجید؛ احمدی، علی، ۱۳۹۵؛ «کانی‌شناسی، ژئوشیمی و خاستگاه سنگ‌های نفوذی و خروجی چهارفرسخ، خاور پهنه لوت»، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، سال بیست و چهارم، شماره سوم، صفحه ۵۱۵ تا ۵۳۰.
۳. جوانمرد، مجتبی، ۱۳۹۰؛ «پتروگرافی و پترولوژی توده گرانیتوئیدی چهارفرسخ (شمال‌غربی نهبندان)»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بیرجند.
۴. حبیب‌نیا، امیر؛ رحیمی‌پور، غلامرضا؛ رنجبر، حجت‌اله، ۱۳۹۸؛ «مقایسه روش‌های تحلیل اکتشافی داده‌ها و انحراف مطلق میانه به منظور شناسایی آنومالی‌های ژئوشیمیایی و مناطق مستعد کانی‌زایی (مطالعه موردی: ناحیه معدنی هنزا،

14. Chatteraj, S.L., Prasad, G., Sharma, R.U., Champati ray, P.K., van der Meer, F.D., Guha, A., Beiranvand Pour, A., 2020; "Integration of remote sensing, gravity and geochemical data for exploration of Cu-mineralization in Alwar basin, Rajasthan, India". International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 91, 102162.
15. Farahmandfar, Z., Jafari, M., Afzal, P., Ashja-Ardalan, A., 2020; "Description of gold and copper anomalies using fractal and stepwise factor analysis according to stream sediments in Lahrud 1:100,000 sheet, NW Iran", Geopersia 10 (1), 135-148.
16. Geranian, H., Carranza, E.J.M., 2021; "Mapping of Regional-scale Multi-element Geochemical Anomalies Using Hierarchical Clustering Algorithms". Natural Resources Research, doi.org/10.1007/s11053-021-09879-5.
17. Geranian, H., Khajeh Miry, Z., 2020; "Application of Probabilistic Clustering Algorithms to Determine Mineralization Areas in Regional-Scale Exploration Studies". Journal of Mining and Environment 11(4), 1059-1078.
18. Haldar, S.K., 2018; "Mineral Exploration: Principles and Applications, 2nd Edition". Elsevier Press, 360 p.
19. Han, J., Kamber, M., Pei, J., 2011; "Data mining: concepts and techniques, 3rd Edition". Morgan Kaufmann, 744 pp.
20. Hooman, M., Ghodrattollah, R.P., Bakhtiar, F., Thomas, B., Beiranvand, P.A., Khalil, V.K., Aidy M, M., Shawkat, H.M., 2022; "Fusion of ASTER satellite imagery, geochemical and geology data for gold prospecting in the Astaneh granite intrusive, West Central Iran". International Journal of Image and Data Fusion 13, 71-94.
21. Huang, D., Wang, C.D., Wu, J.S., Lai, J.H., Kwok, C.K., 2019; "Ultra-Scalable Spectral Clustering and Ensemble Clustering". IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 32(6), 1212-1226.
22. Jia, H., Ding, S., Xu, X. et al., 2014; "The latest research progress on spectral clustering". Neural Computing and Applications 24, 1477-1486.
23. Kokaly, R.F., Clark, R.N., Swayze, G.A., Livo, K.E., Hoefen, T.M., Pearson, N.C., Wise, R.A., Benzel, W.M., Lowers, H.A., Driscoll, R.L., Klein, A.J., 2017; "USGS Spectral Library Version 7": U.S. Geological Survey Data Series 1035, 61 p.
24. Kumar Sharma, K., Seal, A., Herrera-Viedma, E., Krejcar, O., 2021; "An Enhanced Spectral Clustering Algorithm with S-Distance". Symmetry 2021, 13, 596.
25. Kumara Ganesh, U., Thamarai Kannan, S., 2017; جنوب کمربند فلززایی ارومیه-دختر»، نشریه روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، دوره ۹، شماره ۱۸، صفحه ۸۹ تا ۱۰۱.
۵. حمزه‌پور، ب.، ۱۳۶۹؛ «نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ورقه چهارفرسخ»، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
۶. شعله، علی؛ راستاد، ابراهیم؛ باباخانی، علیرضا، ۱۳۸۶؛ «کانه‌زایی برون‌دمی - آتشفشان‌زاد چینه‌سان تنگستن (مس-روی) در کانسار چاه-کلپ، (جنوب بیرجند) و افق‌های کانه‌دار آن»، نشریه علوم زمین، دوره ۱۷، شماره ۶۵، صفحه ۸۰ تا ۹۹.
۷. کریم‌پور، م.ح.؛ ملک‌زاده شفارودی، آ.؛ فارمر، ل.؛ چاک، ا.، ۱۳۹۱؛ «پتروژنز گرانیتوئید، سن‌سنجی زیرکن به روش U-Pb، ژئوشیمی ایزوتوپ‌های Sr-Nd و رخدادهای مهم کانی‌سازی ترشیاری در بلوک لوت، شرق ایران»، مجله زمین‌شناسی اقتصادی، شماره ۱، صفحه ۷۱ تا ۷۹.
۸. گرانیان، حمید، ۱۳۹۶؛ «کاربرد روش‌های خوشه‌بندی در شناسایی آنومالی‌های مرکب در اکتشافات ژئوشیمیایی ناحیه‌ای در کردگان خراسان جنوبی»، نشریه علمی-پژوهشی مهندسی معدن، دوره دوازدهم، شماره ۳۷، صفحه ۸۱ تا ۹۴.
۹. مختاری، فروغ؛ سرحدی جشاری، مرضیه؛ بیابانگرد، حبیب؛ باقری، ساسان، ۱۳۹۴؛ «مطالعه کانی‌شناسی و پتانسیل اقتصادی کمربند دگرگونی چهارفرسخ»، هفتمین همایش انجمن زمین‌شناسی اقتصادی ایران، دانشگاه دامغان.
۱۰. مدنی، حسن، ۱۳۹۰؛ «مبانی اکتشاف مواد معدنی»، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۲۰۷ صفحه.
11. Aggarwal, C.C., Reddy, C.K., 2014; "Data Clustering: Algorithms and Applications". CRC Press, 652 p.
12. Andreani, L., Herrmann, E., Lorenz, S., Zimmermann, R., Kirsch, M., Brazzo, N., and Gloaguen, R., 2021; "Sentinel-2 as a tool for mapping iron-bearing alteration minerals: a case study from the Iberian Pyrite Belt (Southern Spain)". EGU General Assembly, 10719.
13. Borra, S., Thanki, R., Dey, N., 2019; "Satellite Image Clustering. In: Satellite Image Analysis: Clustering and Classification". Springer Briefs in Applied Sciences and Technology. Springer, 31-52.



- Similarity Matrix Size*". Proceedings of the International Conference on Language Resources and Evaluation, Marrakech, Morocco, 201-204.
34. Shirخورshidi, A.S., Aghabozorgi, S., Wah, T.Y., 2015; "A comparison study on similarity and dissimilarity measures in clustering continuous data". PLoS ONE 10(12), 1-20.
  35. Shutaywi, M., Kachouie. N.N., 2021. "Silhouette Analysis for Performance Evaluation in Machine Learning with Applications to Clustering". Entropy 23(6), 759.
  36. Thannoun, R.G., Bety, A.K.S., Al-Sa'igh, L.K., 2016; "Identifying Alluvial fans features using multispectral image processing techniques in selected area, northern Iraq". Journal of Zankoy Sulaimani 18(4), 133-146.
  37. [37] Van der Werff, H., Van der Meer, F., 2015. "Sentinel-2 for Mapping Iron Absorption Feature Parameters". Remote Sensing 7, 12635-12653.
  38. Von Luxburg, U., 2007; "A tutorial on spectral clustering". Statistics and Computing, 17 (4), 395-416.
  39. Zadmehr, F., Shahrokhi, S.V., 2019; "Separation of geochemical anomalies by concentration-area and concentration number methods in the Saqez 1:100,000 sheet, Kurdistan", Iranian Journal of Earth Sciences 11(3), 196-204.
  40. Zhou, G., Wang, H., Sun, Y., Shao, Y., Yue, T., 2019; "Lithologic classification using multilevel spectral characteristics". Journal of Applied Remote Sensing 13(1), 016513.
  41. Zhou, S., Zhou, K., Wang, J., Yang, G., Wang, S., 2017; "Application of cluster analysis to geochemical compositional data for identifying ore-related geochemical anomalies". Frontiers of Earth Science, 12(3), 491-505.
  - "Creation of hyper spectral library and lithological discrimination of granite rocks using SVCHR -1024: lab-based approach". Journal of Hyperspectral Remote Sensing 7(3), 168-177.
  26. Li, H., Ye, X., Imakura, A., Sakurai, T., 2021; "LSEC: Large-scale spectral ensemble clustering". arXiv preprint arXiv:2106.09852.
  27. Millaresls, G.C., Argialas, D.P., 2000; "Extraction and Delineation of Alluvial Fans from Digital Elevation Models and Landsat Thematic Mapper Images". Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 66(9), 1093-1101.
  28. Nasar Mursal, A.S., Ibrahim, H., 2020; "Median Filtering Using First-Order and Second-Order Neighborhood Pixels to Reduce Fixed Value Impulse Noise from Grayscale Digital Images". Electronics 9(12), 2034.
  29. Phiri, D., Simwanda, M., Salekin, S., Nyirenda, V.R., Murayama, Y., Ranagalage, M., 2020; "Sentinel-2 Data for Land Cover/Use Mapping: A Review". Remote Sensing 12(14), 2291.
  30. Rivera, A.J., Pérez-Godoy, M.D., Elizondo, D., Deka, L., Jesus, M.J., 2022; "Analysis of clustering methods for crop type mapping using satellite imagery". Neurocomputing 492, 91-106.
  31. Saleh Al-amri, S., Kalyankar, N.V., Khamitkar, S.D., 2010; "A Comparative Study of Removal Noise from Remote Sensing Image". International Journal of Computer Science 7(1), 32-36.
  32. Shayeganpour, S., Tangestani, M.H., Homayouni, S., Vincent, R.K., 2021; "Evaluating pixel-based vs. object-based image analysis approaches for lithological discrimination using VNIR data of WorldView-3". Frontiers of Earth Science 15, 38-53.
  33. Shinnou, H., Sasaki, M., 2008; "Spectral Clustering for a Large Data Set by Reducing the