بهار ۹۲، سال بیست و دوم، شماره ۸۷، صفحه ۱۶۳ تا ۱۷۰

تحلیل‌های مکانی و آماری برای ارزیابی کیفیت کانسنگ در کانسار بوکسیت جاجرم

لیلا امینی [۱]، غلامحسین شمعانیان [*۲]، شعبان شتایی [۳] و مجید عظیم محسنی [۴]

[۱] کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران
[۲] استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران
[۳] دانشیار، گروه جنگل‌داری، دانشکده جنگل‌داری و فناوری چوب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
[۴] استادیار، گروه آمار، دانشکده علوم، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۱/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۶/۲۷

چکیده

کنترل عیار و تعیین کیفیت کانسنگ همواره یکی از وظایف چالش‌برانگیز زمین‌شناسان و مهندسین معدن است. کیفیت ماده معدنی به عوامل بسیاری مانند اندازه و شکل هندسی کانسار، آشفتگی‌های زمین‌شناسی، بافت و ترکیب کانی‌شناسی کانسنگ وابسته است. تعیین عوامل کنترل‌کننده عیار کانسنگ و پیش‌بینی مناطق امیدبخش از نقطه نظر اقتصادی و بهره‌وری عملیات معدنکاری اهمیت زیادی دارد. هدف از این مطالعه شرح تحلیل‌های مکانی و آماری در ارزیابی کیفیت کانسنگ و تشخیص عوامل مؤثر بر عیار در کانسار بوکسیت جاجرم است. با تلفیق داده‌های توپوگرافی، زمین‌شناسی و زمین‌شیمیایی، اثر گسل‌ها، ارتفاع و ژرفا روی عیار و مدول که نسبت درصد وزنی Al_2O_3 به درصد وزنی SiO_2 است، ارزیابی شد. نتایج نشان‌دهنده افزایش مقادیر Al_2O_3 و مدول با نزدیک شدن به گسل‌هاست. همچنین، این مطالعه نشان‌دهنده تأثیر نداشتن نوع و امتداد گسل‌ها بر عیار و مدول است. همبستگی منفی میان ارتفاع و ژرفا با مقادیر Al_2O_3 و مدول نشان از بهبود کیفیت ماده معدنی در مناطق پست و کم ژرفا دارد. به این ترتیب، تلفیق روش‌های سامانه اطلاعات جغرافیایی و تحلیل‌های آماری چند متغیره می‌تواند در ارزیابی‌های زمین- مکانی کارایی بالایی داشته باشد.

کلیدواژه‌ها: بوکسیت، کیفیت کانسنگ، عیار، مدول، تحلیل‌های مکانی، تحلیل‌های آماری، جاجرم.

***نویسنده مسئول:** غلامحسین شمعانیان
E-mail: Shamanian@yahoo.com

۱- مقدمه

کیفیت ماده معدنی به عنوان یکی از عوامل مؤثر بر آستانه اقتصادی شدن مواد معدنی از موضوعات مورد توجه زمین‌شناسان اقتصادی و مهندسین معدن است. اگرچه عوامل مؤثر بر کیفیت ماده معدنی در انواع کانسارها متفاوت است، اما عواملی همچون اندازه و شکل هندسی توده معدنی، ویژگی‌های بافتی، کانی‌شناسی و شیمیایی کانسنگ و آشفتگی‌های زمین‌شناسی مانند چین‌ها و گسل‌ها از عوامل کنترل‌کننده کیفیت ماده معدنی در بیشتر کانسارها است (Samanta & Bhattacherjee, 1999). در کانسارهای بوکسیتی، کیفیت ماده معدنی توسط نسبت مقدار Al_2O_3 به SiO_2 که مدول نامیده می‌شود، مورد بررسی قرار می‌گیرد (شهریاری، ۱۳۶۵). در کانسارهای مختلف، کمترین مقدار مدول اقتصادی (مدول حد) متفاوت است و بر پایه ویژگی‌های فنی کارخانه فرآوری تعیین می‌شود. به این ترتیب، با افزایش مقدار Al_2O_3 و یا کاهش SiO_2 در کانسنگ بوکسیتی، مقدار مدول افزایش و کیفیت ماده معدنی بهبود می‌یابد. بهبود کیفیت ماده معدنی به توسعه فرایندهای بوکسیتی شدن مانند ویژگی‌های اقلیمی، زمین‌ساختی، زمین‌ریخت‌شناسی، سنگ‌شیمیایی، سنگ‌فیزیکی، سطح آب زیرزمینی، پوشش گیاهی و برتری هوازدگی شیمیایی نسبت به فرسایش بستگی دارد (Bardossy, 1982; Bogatyrev et al., 2009). از دید اقلیمی، تشکیل بوکسیت‌ها نیازمند شرایط آب‌وهوای استوایی با دمای متوسط ۲۶ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارش سالیانه ۱۲۰۰ تا ۱۵۰۰ میلی‌متر است (Bardossy, 1982). در این شرایط، نیروهای زمین‌ساختی با ایجاد درزه‌ها و گسل‌ها و ویژگی‌های زمین‌ریخت‌شناسی با تأثیر روی ژرفای هوازدگی و افزایش نسبت هوازدگی شیمیایی به هوازدگی فیزیکی موجب بهبود کیفیت ماده معدنی می‌شوند. ویژگی‌های سنگ‌شیمیایی و سنگ‌فیزیکی به ترتیب به ترکیب شیمیایی و نفوذپذیری سنگ مادر بستگی دارند که سبب توزیع عناصر در بوکسیت‌های کارستی می‌شود و در بهبود کیفیت این کانسارها نقش بسزایی دارند.

کانسار بوکسیت جاجرم با ۲۲ میلیون تن ذخیره کشف‌شده در فاصله ۱۷۵ کیلومتری جنوب باختر شهرستان بجنورد قرار دارد (شرکت آلومینای ایران، ۱۳۸۸). ماده معدنی در این کانسار با مدول حد ۴/۷ به کارخانه فرآوری فرستاده می‌شود. یکی از موضوعات مورد توجه در این کانسار پیش‌بینی مناطق معدنی پرعیار و دارای بهترین کیفیت است تا بر پایه آن بتوان عملیات اکتشافی را بهینه و بهترین نقاط حفاری را تعیین کرد. بر پایه بررسی‌های صحرایی و تلفیق داده‌های کانی‌شناسی و زمین‌شیمیایی در این کانسار به نظر می‌رسد کیفیت ماده معدنی در بخش‌های به‌شدت گسل‌خورده، بهبود یافته و بر مقدار مدول افزوده شده است. در این پژوهش با هدف بررسی اثرات فاصله، تراکم، امتداد و سازوکار گسل‌های پس از تشکیل بوکسیت و نیز نقش ارتفاع و ژرفا بر کیفیت ماده معدنی در کانسار بوکسیت جاجرم به تحلیل‌های آماری چندمتغیره و ارزیابی ارتباط مکانی داده‌ها با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) پرداخته است و شیوه‌هایی را برای پیش‌بینی مناطق پرعیار از دید مقدار Al_2O_3 و مدول ارائه کرده که قابل تعمیم به دیگر کانسارهای بوکسیت است.

۲- روش بررسی

۲-۱. توصیف منطقه

کانسار بوکسیت جاجرم در حوضه ساختاری- رسوبی بینالود و در یال شمالی یک تاقدیس تک یال با روند خاوری- باختری قرار گرفته است. ماده معدنی در این کانسار شامل دو افق بوکسیتی A و B است. افق A یک واحد بوکسیت شیلی با ستبرای متوسط ۵ متر است که میان سنگ‌های کربناتی سازند مبارک و شیل‌ها و کربنات‌های سازند سرخ شیل قرار دارد و بدون ارزش اقتصادی است. افق B به شکل یک افق چینه‌سان در منطقه‌ای به طول ۱۶ کیلومتر و با ستبرای ۱ تا ۴۰ متر در میان دولومیت‌های تریاس و شیل و ماسه‌سنگ‌های ژوراسیک تشکیل شده است. مرز زیرین این افق به طور عمده موج‌سان بوده و حفرات دولومیت‌های فرودیواره از بوکسیت پر شده است، در حالی‌که مرز بالایی آن با شیل و ماسه‌سنگ‌های فرادیواره هم‌ساز است. این افق دارای منطقه‌بندی درونی است و بر مبنای ویژگی‌های بافتی و کانی‌شناسی از بالا به پایین به واحدهای کائولینیت بالایی، بوکسیت سخت، بوکسیت شیلی و کائولینیت پایینی قابل جدایش است

(Esmaeily et al., 2010). امینی و همکاران (۱۳۹۰) بر پایه مطالعات کانی‌شناسی و زمین‌شیمیایی تشکیل این افق بوکسیتی را به رویدادهای تریاس بالایی نسبت داده‌اند. به گمان آنان، رویدادهای کششی پس از رخداد زمین‌ساختی سیمرین پیشین از یک‌سو سبب تشکیل گدازه‌های بازالتی قلیایی شده است (Berberian & King, 1981) و از سوی دیگر با ایجاد محیط قاره‌ای، شرایط تشکیل افق‌های بوکسیتی را فراهم آورده است (درویش‌زاده، ۱۳۷۰).

افق بوکسیتی B تحت تأثیر نیروهای زمین‌ساختی فشارشی توسط گسل‌های بسیار با سازوکار امتدادی و راندگی قطع شده است (مهندسین مشاور خاک خوب، ۱۳۷۰). این گسل‌ها سبب قطعه‌قطعه شدن افق بوکسیتی و جدایش آن به چهار بخش اصلی به نام‌های سنگ‌تراش، تاگویی، زو و گلبینی شده است. هر یک از این بخش‌ها بر اثر عملکرد گسل‌های امتدادلغز به بلوک‌های کوچک‌تر تقسیم شده‌اند. شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی بخش‌های گلبینی و زو و بلوک‌های آنها را نشان می‌دهد.

۲-۲. داده‌های پژوهش

برای انجام این مطالعه، نقشه توپوگرافی رقومی با مقیاس ۱:۱۰۰۰ کانسار، موقعیت مکانی گسل‌های جوان‌تر از افق بوکسیتی و داده‌های مربوط به ۸۶۷ گمانه اکتشافی شامل موقعیت مکانی گمانه‌ها، ژرفای نمونه‌برداری و نتایج تجزیه شیمیایی از شرکت آلومینای جاجرم گردآوری شد.

۲-۳. طراحی الگوی مطالعه

در این مطالعه، عوامل مؤثر بر کیفیت ماده معدنی، چگونگی تأثیر گسل‌ها شامل تراکم، فاصله، امتداد و سازوکار گسل‌ها، ارتفاع منطقه و ژرفای نمونه‌برداری توسط تحلیل‌های مکانی و آماری مطابق روند ارائه شده در شکل ۲ بررسی شده است. این تحلیل‌ها روی بخش‌های گلبینی و زو که توسط گسل‌های امتدادلغز به ترتیب به ۸ (G_1، G_2، G_3، G_4، G_5، G_6، G_7 و G_8) و ۴ بلوک (Z_1، Z_2، Z_3 و Z_4) تقسیم شده‌اند، انجام شد. البته به دلیل نبود داده‌های کامل در بلوک‌های G_1، G_4 و G_5، این بلوک‌ها در طی تحلیل‌های مکانی و آماری حذف و تحلیل‌ها روی ۹ بلوک باقیمانده متمرکز شد.

در ابتدا، در هر یک از ۹ بلوک مورد مطالعه به ازای هر یک از عوامل مؤثر بر کیفیت ماده معدنی-گسل، ارتفاع و ژرفا- یک مقدار میانگین به عنوان متغیر مورد بررسی تعیین و رابطه هر یک از این متغیرها با مقادیر Al_2O_3 و مدول بررسی شد. با توجه به گستردگی منطقه مورد مطالعه و محدود بودن تعداد بلوک‌ها، هر یک از ۹ بلوک مورد مطالعه بر مبنای دو منطق مکانی و آماری به بلوک‌های کوچک‌تر تقسیم شد. در جدایش بلوک‌ها بر مبنای منطق مکانی، هر یک از بلوک‌ها بر پایه موقعیت مکانی گمانه‌ها در محیط GIS به ۵ منطقه کوچک‌تر جدا و به این ترتیب ۴۵ زیربلوک ایجاد شد. افزون بر این، گمانه‌های موجود در هر یک از ۹ بلوک بر مبنای مقدار Al_2O_3 و با استفاده از آزمون دانکن که به مقایسه میانگین داده‌ها در سطح اطمینان ۵ درصد می‌پردازد، به رده‌های با عیار بالا، متوسط و کم رده‌بندی و ۲۲ زیر بلوک ایجاد شد. در ادامه اثر هر یک از عوامل مؤثر بر کیفیت ماده معدنی در ۴۵ و ۲۲ زیر بلوک به طور مجزا بررسی و نتایج آن با یکدیگر مقایسه شد.

۲-۴. تحلیل‌های مکانی

برای انجام تحلیل‌های مکانی از قابلیت سامانه اطلاعات جغرافیایی بر پایه داده‌های موجود و تلفیق مکانی و توصیفی داده‌ها (Goodchild et al., 1992) استفاده شد. برای این منظور بیشترین مقدار Al_2O_3 و SiO_2 متناظر با آن در هر یک از گمانه‌ها انتخاب و پس از محاسبه مدول، با توجه به موقعیت مکانی گمانه‌ها، لایه رقومی گمانه‌ها در محیط GIS ایجاد، اطلاعات مربوط به هر گمانه در جدول اطلاعات توصیفی آنها وارد و بانک جدیدی از داده‌های خام ایجاد شد.

در ادامه برای بررسی نقش گسل‌ها، چهار ویژگی فاصله گمانه از گسل، سازوکار گسل، تراکم گسل‌ها در واحد سطح و امتداد گسل‌ها بررسی شد (شکل ۳).

به منظور بررسی اثر فاصله گسل بر مقدار Al_2O_3 و مدول از توابع نزدیک‌ترین فاصله (Near Distance) و مقدار فاصله (Distance Value) از گسل‌ها استفاده شد. با اجرای تابع اول، مقادیر نزدیک‌ترین فاصله هر گمانه نسبت به نزدیک‌ترین گسل محاسبه و در ستونی به همین نام در بانک اطلاعات گمانه‌ها ذخیره شد. برای تعیین تابع مقدار فاصله، لایه بُرداری گسل‌ها در نرم‌افزار ILWIS وارد و با اجرای تابع فاصله روی لایه مربوطه، لایه رستری میزان فاصله از گسل ایجاد و به محیط ArcGIS وارد شد. سپس مقدار فاصله هر گمانه تا گسل، از این لایه استخراج شد.

برای بررسی تأثیر سازوکار گسل بر کیفیت ماده معدنی، گسل‌های با سازوکار امتدادی و راندگی از یکدیگر جدا و اثر فاصله از گسل برای هر یک از انواع امتدادی و راندگی بررسی شد.

اثر تراکم گسل‌ها روی کیفیت ماده معدنی با استفاده از نسبت تراکم گسل‌ها در واحد سطح بررسی شد. برای این منظور نسبت طول گسل‌های موجود در هر زیربلوک به مساحت آن زیربلوک تعیین و اثر آن بر کیفیت ماده معدنی بررسی شد.

از آنجا که به نظر می‌رسد سوی گسل‌ها می‌تواند روی کیفیت ماده معدنی مؤثر باشد، چگونگی اثر امتداد گسل‌ها با استفاده از تابع میانگین خطی جهت (Linear Directional Mean) بررسی شد و میانگین انحراف معیار امتداد گسل‌های موجود در هر زیربلوک محاسبه و استخراج شد.

برای بررسی اثر ارتفاع موقعیت گمانه بر کیفیت ماده معدنی، مدل رقومی زمین (Digital Elevation Model) منطقه با استفاده از نقشه توپوگرافی ۱:۱۰۰۰ تهیه، میزان ارتفاع هر گمانه از مدل رقومی ارتفاعی منطقه استخراج و چگونگی تأثیر آن بر کیفیت ماده معدنی بررسی شد.

رابطه میان ژرفای نمونه‌برداری و کیفیت ماده معدنی و پیش‌بینی ژرفای مؤثر در عملیات حفاری یکی دیگر از موضوعاتی است که در این مطالعه مورد توجه قرار گرفت. برای این منظور بیشترین مقدار Al_2O_3 در گمانه‌های موجود در ۲۲ و ۴۵ زیربلوک استخراج و رابطه آن با ژرفا بررسی شد.

۲-۵. تحلیل‌های آماری

تحلیل‌های آماری با هدف ارزیابی هر چه دقیق‌تر عوامل مؤثر بر کیفیت ماده معدنی، بررسی پتانسیل اقتصادی کانسار و تعیین مناطق امیدبخش انجام شد. برای بررسی عوامل مؤثر بر کیفیت ماده معدنی، اثر گسل‌ها، ارتفاع و ژرفا از روش‌های آماری چندمتغیره در محیط نرم‌افزارهای SPSS 16 و Minitab 15 به طور جدا در ۹ بلوک اصلی و ۴۵ و ۲۲ زیربلوک ایجادشده، استفاده شد.

پتانسیل اقتصادی کانسار بر مبنای فاصله اطمینان ۹۵ درصد که تعیین‌کننده کران پایین و کران بالای متغیر مورد بررسی است، با استفاده از تابع آماره‌های تشریحی (Descriptive statistics) در نرم‌افزار SPSS 16 تعیین شد که این روش قابل تعمیم به دیگر کانسارهاست. به این ترتیب، مقادیر کران پایین و کران بالای Al_2O_3 و مدول در ۹ بلوک مورد مطالعه، محاسبه و پتانسیل اقتصادی بلوک‌ها با یکدیگر مقایسه شد.

برای شناسایی و معرفی امیدبخش‌ترین بلوک‌ها، پس از انجام آزمون دانکن و رده‌بندی گمانه‌ها به رده‌های با عیار بالا، متوسط و کم (زیربخش ۲-۳)، گمانه‌های رده عیار بالا به ۲۲۷ گمانه، تقسیم و آزمون دانکن با توجه به مقادیر Al_2O_3 و مدول روی آنها انجام شد. برای نمایش تغییرات مکانی مدول و شناسایی مناطق با بهترین کیفیت ماده معدنی، همه ۸۶۷ گمانه موجود در منطقه، صرف نظر از بلوک‌بندی‌های انجام‌شده، با استفاده از روش متوسط K (K-means) بر مبنای مقدار مدول، خوشه‌بندی شدند. از میان خوشه‌های ایجادشده، خوشه‌ای که بیشترین مقدار مدول را داشت و شامل ۳۰۶ گمانه بود، انتخاب و دوباره به روش متوسط K خوشه‌بندی شد. برای کنترل و تأیید تعداد خوشه‌های ایجادشده از آزمون دانکن استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱. نقش گسل، ارتفاع و ژرفا بر کیفیت ماده معدنی

در ابتدا، بررسی همبستگی میان ویژگی‌های مرتبط با گسل‌ها شامل فاصله، امتداد، تراکم و سازوکار گسل‌ها و نیز ارتفاع و ژرفا با مقادیر Al_2O_3 و مدول در ۹ بلوک انجام شد که نشان‌دهنده نبود رابطه معنی‌دار بین متغیرهای مورد بررسی بود. نبود رابطه معنی‌دار میان این متغیرها را می‌توان به گستردگی منطقه مورد مطالعه و محدود بودن تعداد بلوک‌ها نسبت داد. با توجه به نتایج به‌دست آمده در این مرحله، بررسی نقش گسل، ارتفاع و ژرفا روی کیفیت ماده معدنی بر پایه رابطه این عوامل با مقادیر Al_2O_3 و مدول روی ۴۵ و ۲۲ زیربلوک انجام شد.

همان گونه که در روش بررسی اشاره شد، برای بررسی ویژگی فاصله گسل روی کیفیت ماده معدنی از دو تابع مقدار فاصله و نزدیک‌ترین فاصله از گسل استفاده شد. بررسی همبستگی میان این دو تابع با مقادیر Al_2O_3 و مدول در ۴۵ زیربلوک، رابطه معنی‌داری میان متغیرهای مورد بررسی را نشان نمی‌دهد (جدول ۱). در حالی که همین بررسی روی ۲۲ زیربلوک بیانگر همبستگی منفی معنی‌دار میان مقدار فاصله و نزدیک‌ترین فاصله از گسل با مقادیر Al_2O_3 و مدول بر پایه جدول ۱ است که دلالت بر افزایش عیار و مدول با کاهش فاصله از گسل دارد. این نتایج از یک سو نشانگر نقش گسل‌ها به عنوان یکی از عوامل مؤثر بر کیفیت ماده معدنی و از سوی دیگر بیانگر برتری منطقه‌بندی بلوک‌ها بر مبنای منطق آماری است. گسل‌ها با افزایش نفوذپذیری ثانویه موجب گردش آزادانه آب‌های جوی و زیرزمینی و زهکشی عدسی‌های بوکسیتی شده و شستشوی عناصر متحرک و غنی‌شدگی آلومینیم را در پی داشته‌اند (Temur & Kansun 2006). پیش از این پژوهشگرانی مانند Valeton (1972)، Bardossy (1982) و Bogatyrev et al. (2009) با مطالعه و بررسی کانسارهای بوکسیتی بدون توجه به اثر فاصله گسل‌های جوان‌تر از بوکسیت بر کیفیت ماده معدنی، نقش گسل‌ها را به عنوان عاملی در گسترش فرایندهای بوکسیتی مورد اشاره قرار داده‌اند.

جدایش گسل‌های با سازوکار امتدادی و راندگی و بررسی اثر هر یک روی مقادیر Al_2O_3 و مدول، رابطه معنی‌داری را میان متغیرهای مورد بررسی نشان نداد. از سوی دیگر، بررسی رابطه میان انحراف معیار امتداد گسل‌ها با مقادیر Al_2O_3 و مدول، رابطه معنی‌داری میان متغیرهای مورد بررسی ندارد. به این ترتیب، به نظر می‌رسد از میان ویژگی‌های مرتبط با گسل‌ها، دو ویژگی امتداد و سازوکار گسل‌ها اثری بر کیفیت ماده معدنی نداشته است.

بررسی همبستگی میان تراکم گسل‌ها در واحد سطح با مقادیر Al_2O_3 و مدول، نشان از نبود همبستگی معنی‌دار میان آنها دارد (جدول ۱). با توجه به همبستگی منفی معنی‌دار میان تراکم گسل‌ها در واحد سطح و مقدار فاصله‌ای با ضریب همبستگی ۰/۶۲- به نظر می‌رسد که اگر چه تراکم گسل‌ها به‌طور مستقیم روی کیفیت ماده معدنی تأثیر ندارد ولی می‌تواند همراه با مقدار فاصله سبب بهبود کیفیت ماده معدنی شود.

بررسی همبستگی میان ارتفاع با مقادیر Al_2O_3 و مدول در ۴۵ و ۲۲ زیربلوک مورد مطالعه نشان‌دهنده نبود رابطه معنی‌دار میان این متغیر و مقادیر Al_2O_3 و همبستگی منفی معنی‌دار آن با مدول است (جدول ۱). این نتایج نشان‌دهنده گسترش فرایندهای بوکسیتی شدن در بخش‌های کم ارتفاع و پست در مقایسه با بخش‌های مرتفع است. اگرچه پیش از این پژوهشگرانی مانند Bardossy (1982) و Bogatyrev et al. (2009) به نقش ارتفاع بر کیفیت بوکسیت همزمان با تشکیل آن اشاره داشته‌اند، ولی توجه کمتری به نقش این عامل پس از تشکیل بوکسیت شده است. برای نمونه، یکی از نتایج قابل توجه این بررسی که در مطالعات پیشین کمتر مورد توجه قرار گرفته، اثر ارتفاع کنونی کانسار بر جدایش SiO_2 و Al_2O_3 از یکدیگر است که با افزایش مقدار مدول در بخش‌های کم‌ارتفاع مشخص شد.

با وجود توجه برخی از پژوهشگران به نقش گسل‌ها و ارتفاع در گسترش فرایندهای بوکسیتی شدن، به چگونگی اثر ژرفا در توسعه این فرایندها توجه کمتری شده است. بر پایه نتایج این مطالعه، همبستگی میان ژرفا با مقادیر Al_2O_3 و مدول در ۴۵ و ۲۲ زیربلوک بیانگر همبستگی منفی معنی‌داری میان این متغیرهاست (جدول ۱) که دلالت بر افزایش مقدار Al_2O_3 و مدول و بهبود کیفیت ماده معدنی با کاهش ژرفا دارد. از سوی دیگر، مقایسه نتایج حاصل از بررسی اثر ارتفاع و ژرفا روی مقادیر Al_2O_3 و مدول نشان‌دهنده اثر مشترک هر دو بر بهبود کیفیت ماده معدنی است. نقش مؤثر ژرفا بر بهبود کیفیت ماده معدنی را می‌توان به دو رویداد مختلف نسبت داد. یکی از این رویدادها ناشی از تأثیر بیشتر آب‌های جوی فرورو بر افق بوکسیتی و اهمیت زهکشی عمودی نسبت به زهکشی افقی است که سبب شستشوی هر چه بیشتر عناصر متحرک شده است. دومین رویداد به حضور بستر کربناتی مربوط است که با ایجاد شرایط قلیایی در بخش پایینی افق بوکسیتی سبب کند شدن فرایند شستشوی عناصر شده است. برای کنترل این نتایج، چگونگی تغییرات اکسیدهای Al_2O_3 و SiO_2 در دو گمانه از بلوک‌های G_2 و Z_2 که ژرفای ماده معدنی در آنها با یکدیگر متفاوت است مقایسه شدند (شکل ۴). بر پایه این مقایسه، فرایندهای بوکسیتی شدن و شستشوی عناصر در بخش‌های کم ژرفا نسبت به بخش‌های ژرف گسترش بیشتری دارد که این امر سبب گسترش واحد بوکسیت سخت شده است. این واحد در مقایسه با سه واحد کائولینیت بالایی، بوکسیت شیلی و کائولینیت پایینی به دلیل داشتن عیار بالاتر و مدول بیشتر بهترین کیفیت را دارد.

۳-۲. پتانسیل اقتصادی

یکی از موضوعاتی که همواره در برنامه‌های اکتشافی مورد توجه زمین‌شناسان و کارشناسان اکتشاف قرار دارد، بررسی عمومی پتانسیل اقتصادی منطقه مورد اکتشاف است که به شیوه‌های مختلف امکان‌پذیر است. مقایسه فاصله اطمینان محاسبه‌شده با مدول حد این کانسار که مقدار آن ۴/۷ در نظر گرفته شده است، نشان‌دهنده پتانسیل اقتصادی بلوک‌های مورد مطالعه از نقطه نظر استخراج و بهره‌برداری است. بر پایه این مقایسه، بلوک G_2 با مدول بیشینه و کمینه به ترتیب ۷/۲۲ و ۵/۳۷ بیشترین پتانسیل اقتصادی را دارد (جدول ۲). بلوک‌های Z_1، Z_2 و G_8 مدول پایین‌تری از مدول حد و کمترین پتانسیل اقتصادی را دارند. دیگر بلوک‌های مورد مطالعه پتانسیل اقتصادی متوسطی دارند. بررسی توزیع فراوانی مقادیر مدول در کانسار مورد مطالعه و داشتن میانگین ۵/۷۱ تأییدی بر اهمیت اقتصادی این کانسار است (شکل ۵).

۳-۳. پیش‌بینی مناطق امیدبخش

بررسی ۹ بلوک مورد مطالعه در بخش‌های گلبینی و زو بر مبنای روش‌های آماری که در روش بررسی شرح داده شده و نتایج آن در جدول ۳ آمده است، نشان می‌دهد که در میان بلوک‌های مورد مطالعه، بلوک Z_2 کمترین مقدار میانگین Al_2O_3 (۴۵/۴۱ درصد) و مدول (۳/۷۴) را دارد که با نتایج بررسی پتانسیل اقتصادی بلوک‌ها نیز همخوانی دارد. بر پایه این بررسی، بلوک‌های G_2، G_3، G_7 ، G_6 و Z_4 با میانگین عیار ۵۵/۳۲ درصد Al_2O_3 و میانگین مدول ۷/۱۹ تا ۱۰/۸۴ بیشترین مقدار آلومینیم و مدول را دارند و مطابق جدول ۳ از امیدبخش‌ترین مناطق در این کانسار به شمار می‌آیند. در این میان، بلوک G_2 با داشتن بالاترین مقدار میانگین Al_2O_3 (۵۷/۱۲ درصد) و میانگین مدول (۱۰/۸۴) از با اهمیت‌ترین بلوک‌های مورد مطالعه است که اهمیت آن توسط بررسی پتانسیل اقتصادی نیز نشان داده شد. دیگر بلوک‌های مورد مطالعه با داشتن میانگین عیار ۵۴/۴۴ درصد Al_2O_3 و میانگین مدول ۴/۸۱ ارزش اقتصادی متوسطی دارند.

نمایش تغییرات مکانی مدول در بخش‌های گلبینی و زو که بر مبنای خوشه‌بندی گمانه‌های با مدول بالا به چهار خوشه با میانگین مدول متفاوت انجام شد (جدول ۴)، نشان می‌دهد که گمانه‌های موجود در خوشه‌های ۳ و ۴ به ترتیب با داشتن میانگین مدول ۵/۸۹ و ۷/۷۷ معرف مناطق امیدبخش در ناحیه مورد مطالعه هستند (شکل ۶).

بررسی موقعیت این گمانه‌ها در بلوک‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که بلوک‌های G_2، G_3، G_6 و G_7 به ترتیب بیشترین اهمیت اقتصادی را دارند.

۴- نتیجه‌گیری

بر پایه نتایج این مطالعه، گسل، ارتفاع و ژرفا از عوامل مؤثر بر کیفیت بوکسیت هستند. در میان ویژگی‌های مرتبط با گسل دو ویژگی فاصله و تراکم گسل‌ها بیشترین اثر را بر گسترش فرایندهای بوکسیتی شدن دارند و با نزدیک شدن به گسل‌ها و افزایش تراکم آنها در واحد سطح بر مقدار Al_2O_3 و مدول افزوده شده است. بنابراین، گسل‌ها با ایجاد مجراهای عبور آب‌های جوی شرایط مناسبی را برای زهکشی افق بوکسیتی فراهم آورده‌اند که با نتایج مطالعات Blaskovic et al. (1995) همخوانی دارد. این رویداد بر پایه شواهد صحرایی، کانی‌شناسی و زمین‌شیمیایی در بلوک G_2 که در مقایسه با دیگر بلوک‌ها شدت گسلیدگی بیشتری دارد و سبب شستشوی شدید افق‌های بوکسیتی شده است، به خوبی قابل مشاهده است. مقایسه این بلوک با بلوک Z_2 که گسلیدگی کمتری در میان دیگر بلوک‌ها دارد، اثر مثبت گسل‌ها در بهبود کیفیت ماده معدنی مطابق نتایج ارائه‌شده در شکل ۶ را تأیید می‌کند. با وجود نقش فاصله و تراکم گسل‌ها روی کیفیت ماده معدنی، سازوکار گسل‌ها و چگونگی جهت‌یافتگی آنها تأثیری بر مقادیر Al_2O_3 و مدول نداشته است.

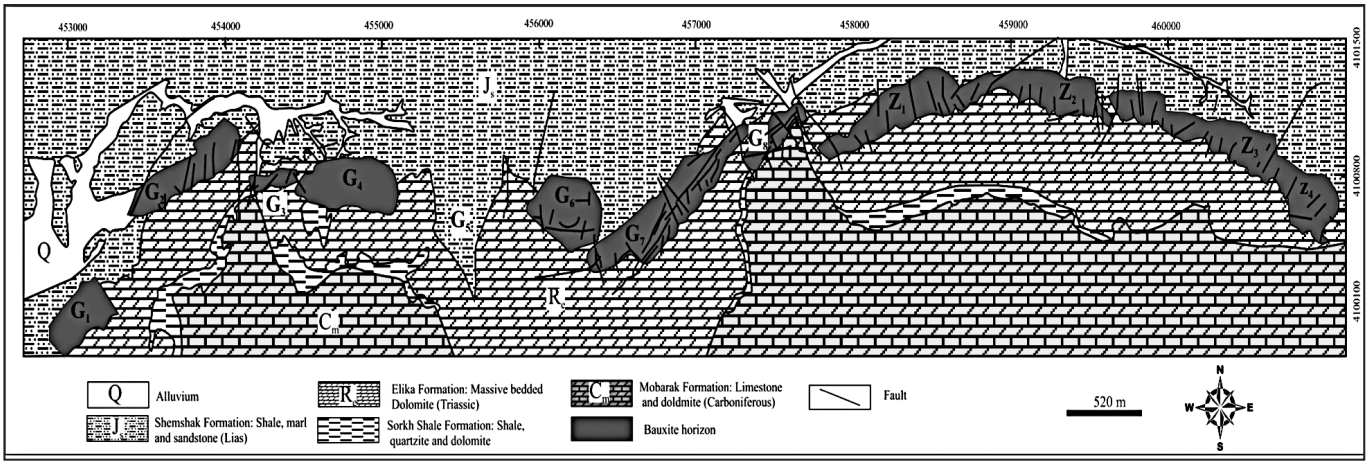
ارتفاع و ژرفا، از عوامل مؤثر بر بهبود کیفیت ماده معدنی در کانسار بوکسیت جاجرم است. بر پایه نتایج این مطالعه، افق بوکسیتی موجود در بخش‌های پست و کم ژرفا به دلیل نفوذ بیشتر آب‌های جوی و افزایش نرخ زهکشی در مقایسه با بخش‌های مرتفع و ژرف، مقادیر Al_2O_3 و مدول بیشتری دارد. همچنین این نتایج نشان‌دهنده اثر ارتفاع بر جدایش SiO_2 و Al_2O_3 از یکدیگر و افزایش مقدار مدول در بخش‌های کم ارتفاع است که در مطالعات پیشین کمتر به آن توجه شده است.

بر پایه نتایج حاصل از بررسی پتانسیل اقتصادی و پیش‌بینی مناطق امیدبخش، بلوک‌های G_2 و Z_2 به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار مدول را دارند. مطابق نتایج جدول ۳، در میان دیگر بلوک‌ها، بلوک‌های G_3، G_6 و G_7 پس از بلوک G_2 بیشترین مقدار مدول را دارند. مقایسه این نتایج با توزیع مکانی گسل‌ها نشان‌دهنده نقش مؤثر گسل‌ها در افزایش مقدار Al_2O_3 و مدول است و با نتایج حاصل از بررسی نقش گسل‌ها بر کیفیت ماده معدنی همخوانی دارد.

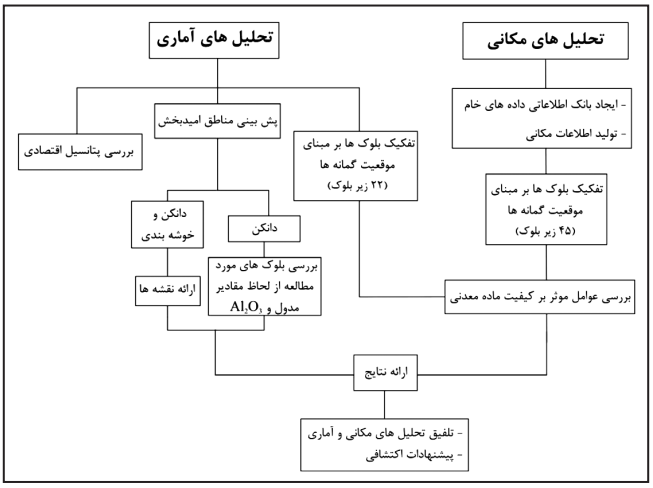
بررسی تغییرات مقدار آلومینیم و سیلیس در منطقه مورد مطالعه نشان‌دهنده همبستگی منفی معنی‌داری میان این دو متغیر است که در بیشتر کانسارهای بوکسیتی مانند کانسار اولمادو در ساردینیا (Maclean et al. 1997) گزارش شده است. نتایج بررسی اثر گسل، ارتفاع و ژرفا بر کیفیت ماده معدنی در کانسار جاجرم نشان می‌دهد که هر یک از این عوامل نه تنها روی مقدار Al_2O_3 کانسنگ مؤثر بوده‌اند بلکه روی جدایش و تفریق عناصر مختلف به‌ویژه Al_2O_3 و SiO_2 از یکدیگر نیز تأثیر داشته‌اند. بنابراین، ضرورت دارد تا در بررسی کیفیت کانسنگ در کانسارهای بوکسیتی، افزون‌بر توجه به مقدار Al_2O_3 توجه اصلی به مدول معطوف شود که اطلاعات دقیق‌تری از کیفیت ماده معدنی ارائه می‌کند.

مقایسه نتایج این مطالعه به صورت جدا در ۴۵ و ۲۲ زیربلوک ایجادشده با منطق مکانی و آماری نشان می‌دهد که بررسی رابطه آماری میان گسل، ارتفاع و ژرفا با مقادیر Al_2O_3 و مدول در ۲۲ زیربلوک ایجادشده به روش آماری نتایج مشخص و معنی‌دارتری دارد. افزون‌بر این، شناسایی مناطق امیدبخش در این مطالعه بر مبنای جداسازی آماری گمانه‌های پرعیار از گمانه‌های متوسط و کم‌عیار صورت گرفت که نتایج سازگاری با دیگر یافته‌های این مطالعه دارد. بنابراین، پیشنهاد می‌شود در دیگر تحلیل‌های مکانی در صورت نیاز به جدایش منطقه مورد مطالعه به بخش‌های کوچک‌تر، از ویژگی‌های مشترک متغیرهای مورد بررسی که بر مبنای شیوه‌های آماری آشکارسازی می‌شود، استفاده شود، زیرا ممکن است جدایش مناطق به بخش‌های کوچک‌تر تنها با تکیه بر موقعیت‌های مکانی نتواند رابطه درونی متغیرها را به خوبی به نمایش بگذارد.

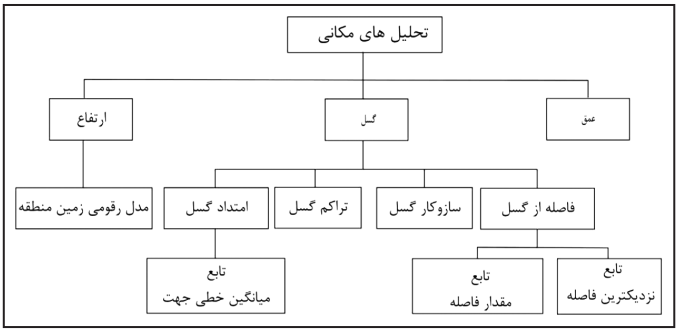
بر پایه یافته‌های این مطالعه، بیشترین مقدار Al_2O_3 و مدول را می‌توان در مناطق به شدت گسل‌خورده، پست و کم ژرفای کانسار بوکسیت جاجرم انتظار داشت که قابل تعمیم به دیگر کانسارهای مشابه است. بنابراین، پیشنهاد می‌شود با توجه به بهبود کیفیت ماده معدنی در این نوع مناطق، به منظور کسب موفقیت فنی و افزایش احتمال دست‌یابی به کانسنگ پرعیار، این نوع مناطق در اولویت شناسایی و اکتشاف قرارگیرند.



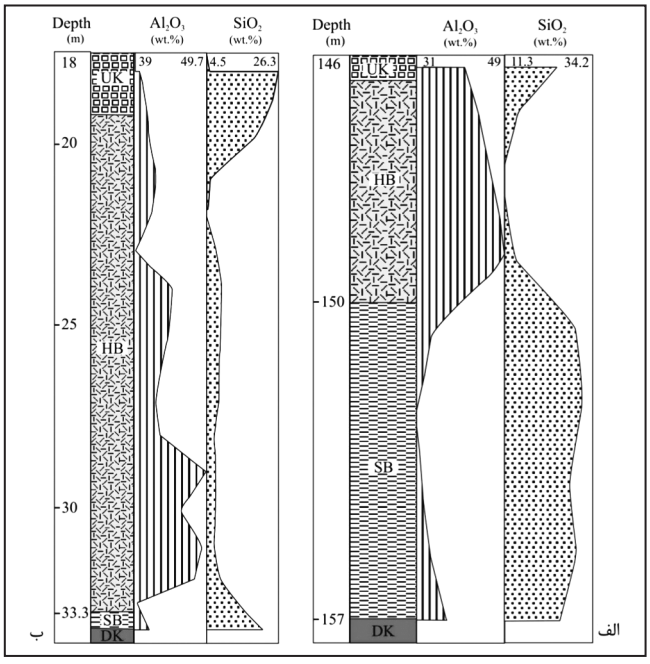
شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی بخش‌های گلبینی (G_1 تا G_8) و زو (z_1 تا z_4). افق بوکسیتی B بزرگنمایی شده است.



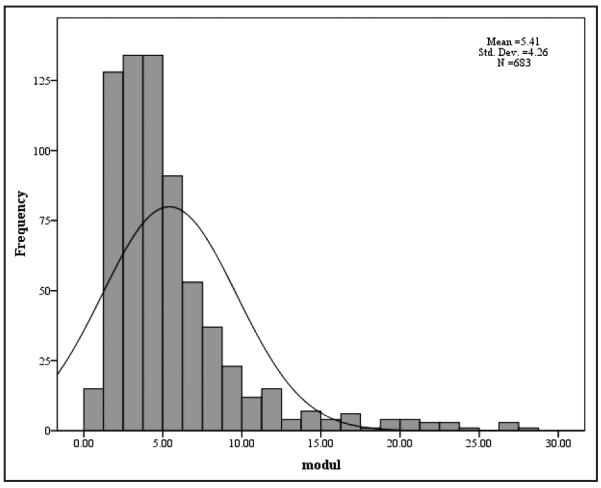
شکل ۲- روندنمای کلی تحلیل‌های مکانی و آماری در کانسار بوکسیت جاجرم.



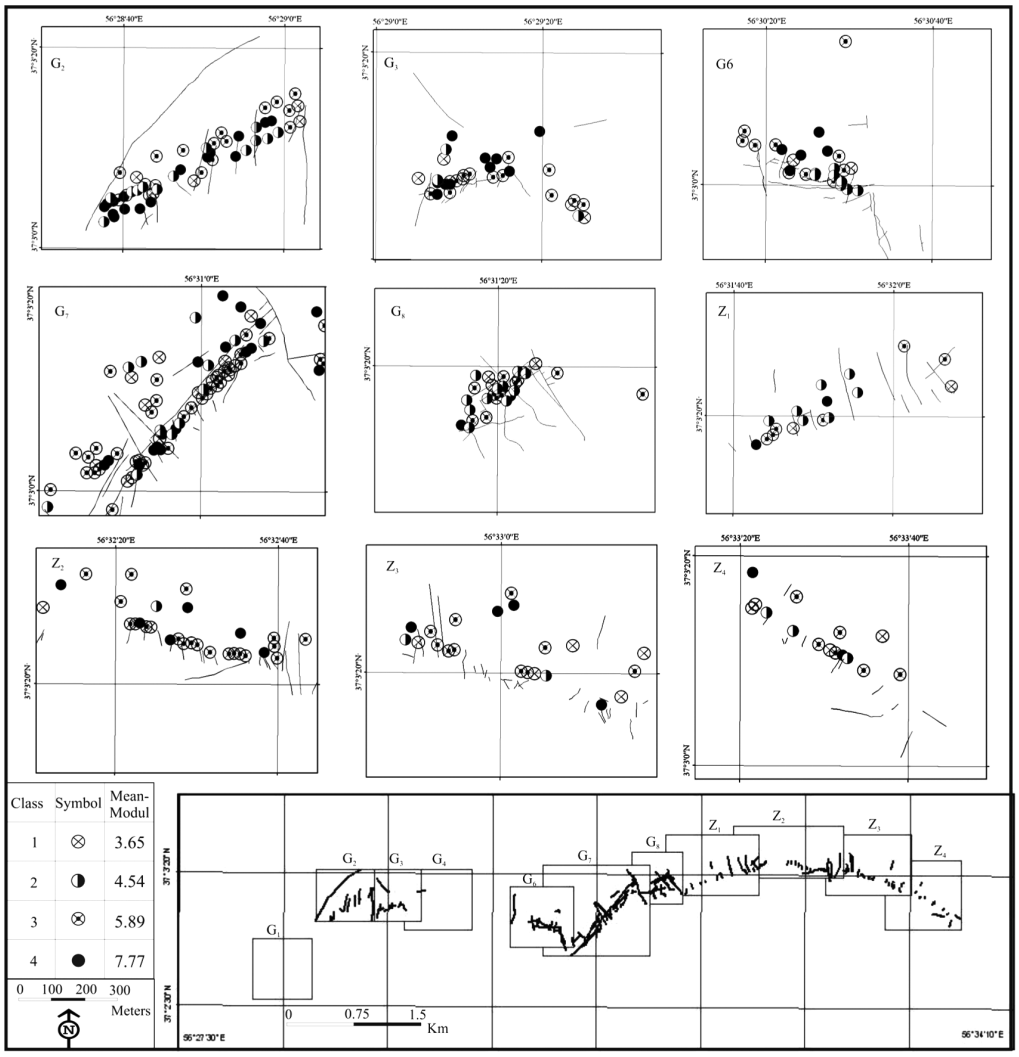
شکل ۳- روندنمای تفصیلی تحلیل‌های مکانی در این مطالعه.



شکل ۴- تغییرات Al_2O_3 و SiO_2 نسبت به ژرفا در ستون چینه‌شناسی واحدهای مختلف افق بوکسیتی. الف) گمانه شماره G_2-i64-3 در بلوک G_2، ب) گمانه شماره ۱۱۶ در بلوک Z_2. علائم اختصاری: UK= کائولینیت بالایی، HB = بوکسیت سخت، SB = بوکسیت شیلی و DK = کائولینیت پایینی.



شکل ۵- نمودار مقادیر مدول در کانسار بوکسیت جاجرم.



شکل ۶- توزیع مکانی گمانه‌های با مدول بالا در هر یک از بلوک‌ها.

جدول ۱- ماتریس همبستگی پیرسون در ۴۵ زیر بلوک (محدوده خاکستری) و ۲۲ زیر بلوک (محدوده سفید). علائم اختصاری: .P.C = ضریب همبستگی پیرسون، .P.V = مقدار معنی‌داری.

		Al_2O_3	مدول	SiO_2	مقدار فاصله	تراکم	امتداد	ژرفا	ارتفاع	نزدیک‌ترین فاصله
Al_2O_3	P.C.	۱	۰/۸۲	-۰/۹۳	-۰/۳۹	۰/۱۱	۰/۰۸	-۰/۵۱	-۰/۲۲	-۰/۴
	P.V.		۰	۰	۰/۰۶	۰/۶۵	۰/۷۳	۰/۰۱	۰/۳	۰/۰۶
مدول	P.C.	۰/۷۵	۱	-۰/۹۱	-۰/۳۶	۰/۲۸	۰/۰۱	-۰/۴۳	-۰/۴۹	-۰/۴۹
	P.V.	۰		۰	۰/۰۷	۰/۲۴	۰/۹۶	۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۰۲
SiO_2	P.C.	-۰/۷۸	-۰/۸۳	۱	۰/۴۱	-۰/۱۱	-۰/۰۳	۰/۵۴	۰/۴	۰/۴۲
	P.V.	۰	۰		۰/۰۵	۰/۶۱	۰/۸۹	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۰۴
مقدار فاصله	P.C.	-۰/۲۰۷	-۰/۲۳	۰/۲	۱	-۰/۶۲	۰/۱۲	۰/۱۸	۰/۵۱	۰/۹۶
	P.V.	۰/۱۰۷	۰/۱۲	۰/۱۷		۰	۰/۶۱	۰/۴۲	۰/۰۱	۰
تراکم	P.C.	۰/۰۷	۰/۱۵	-۰/۱۶	-۰/۵	۱	۰/۱۹	-۰/۰۶	-۰/۲۶	-۰/۷۲
	P.V.	۰/۶۳	۰/۳۱	۰/۲۷	۰		۰/۴۲	۰/۷۷	۰/۲۳	۰
امتداد	P.C.	-۰/۰۴	-۰/۱۳	-۰/۰۰۱	۰/۲۹	-۰/۲۵	۱	-۰/۴۱	-۰/۰۲	۰/۰۶
	P.V.	۰/۷۶	۰/۳۹	۰/۹۵	۰/۰۴	۰/۰۹		۰/۰۷	۰/۹۱	۰/۷۷
عمق	P.C.	-۰/۳۶	-۰/۲۶	۰/۳۴	۰/۵۴	-۰/۲	۰/۱۲	۱	۰/۲۷	۰/۱۶
	P.V.	۰/۰۱	۰/۰۸	۰/۰۲	۰	۰/۱۷	۰/۴		۰/۲	۰/۴۵
ارتفاع	P.C.	-۰/۰۱	-۰/۳۷	۰/۲۴	۰/۳۵	-۰/۵۸	۰/۱۶	۰/۱۷	۱	۰/۴۴
	P.V.	۰/۹۳	۰/۰۱	۰/۱	۰/۰۱	۰	۰/۲۶	۰/۲۶		۰/۰۳
نزدیک‌ترین فاصله	P.C.	-۰/۲۴	-۰/۲۳	۰/۲۴	۰/۹۳	-۰/۵۱	۰/۲۱	۰/۴۷	۰/۳۴	۱
	P.V.	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۱	۰	۰	۰/۱۶	۰	۰/۰۲	

جدول ۲- فاصله اطمینان ۹۵ درصد برای مقادیر Al_2O_3 و مدول در بلوک‌های مورد مطالعه.

بلوک	مدول		Al_2O_3	
	کران پایین	کران بالا	کران پایین	کران بالا
G_2	۵/۳۷	۷/۲۲	۴۷/۸۱	۵۰/۷۷
G_3	۴/۱۳	۵/۶۸	۴۶/۲۴	۵۰/۳۹
G_6	۴/۵۳	۶/۹۹	۴۶/۹۲	۵۰/۸
G_7	۴/۴۵	۵/۲۶	۴۷/۹۸	۴۹/۹۶
G_8	۳/۴۹	۴/۵۷	۴۶/۴۱	۴۹/۹۱
Z_1	۲/۹۵	۴/۱۷	۴۲/۴۸	۴۷/۴۹
Z_2	۳/۴۱	۴/۱۸	۴۴/۵۵	۴۶/۲۶
Z_3	۳/۹۴	۵/۲۲	۴۹/۰۲	۵۲/۷۳
Z_4	۳/۷۵	۵/۴۱	۴۶/۱۳	۵۰/۳۶

جدول ۳- گروه‌بندی مناطق امیدبخش در کانسار جاجرم با استفاده از آزمون دانکن. الف) گروه‌بندی بر پایه مقادیر مدول ، ب) گروه‌بندی بر پایه مقادیر Al_2O_3.

الف

بلوک	N (تعداد گمانه)	Subset for alpha= 0.05	
		۱	۲
Z_2	۵۳	۳/۷۴	
Z_1	۱۵	۴/۱۵	
Z_3	۲۵	۴/۷	
G_8	۱۹	۵/۶۸	
Z_4	۱۰	۷/۱۹	۷/۱۹
G_7	۳۴	۷/۸	۷/۸
G_6	۱۳		۱۰/۰۲
G_3	۳۴		۱۰/۵۸
G_2	۲۴		۱۰/۸۴
Sig		۰/۰۶	۰/۰۹۳

ب

بلوک	N (تعداد گمانه)	Subset for alpha= 0.05			
		۱	۲	۳	٤
Z_2	۵۳	۴۵/۴۱			
Z_1	۱۵		۴۹/۸۷		
G_8	۱۹		۵۰/۹۴	۵۰/۰۴	
G_3	۳۴		۵۳/۰۷۰۵	۵۳/۰۷۶۵	۵۳/۰۷۶۵
G_7	۳۴		۵۳/۰۷۰۵	۵۳/۰۷۶۸	۵۳/۰۷۶۸
Z_3	۲۵		۵۳/۵۳	۵۳/۵۳	۵۳/۵۳
G_6	۱۳			۵۵/۳۲	۵۵/۳۲
Z_4	۱۰				۵۶/۷۳
G_2	۲۴				۵۷/۱۲
Sig		۱	۰/۱۲۷	۰/۰۶۵	۰/۰۹۶

جدول ۴- خوشه‌بندی گمانه‌های با مدول بالا به روش متوسط K و تأیید آن با استفاده از آزمون دانکن.

شماره خوشه بر مبنای روش متوسط K	N	Subset fpr alpha= 0.05			
		۱	۲	۳	٤
۱	۴۱	۳/۶۵			
۲	۱۳۷		۴/۵۴		
۳	۶۳			۵/۸۹	
۴	۶۵				۷/۷۷

کتابنگاری

امینی، ل .، شمعانیان، غ. ح.، رقیمی، م. و جعفرزاده، ر.، ۱۳۹۰- بررسی‌های کانی‌شناسی، زمین‌شیمیایی و پیدایشی کانسار بوکسیت کارستی جاجرم، شمال شرق ایران، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، سال نوزدهم، شماره ۳، صفحه ۴۲۶-۴۱۳.

درویش‌زاده، ع.، ۱۳۷۰- زمین‌شناسی ایران، نشر دانش امروز، ۹۰۱ ص.

شرکت آلومینای ایران، ۱۳۸۸- معرفی مجتمع آلومینای جاجرم، مجله نظام مهندسی معدن، شماره پنجم، صفحه ۲۶-۳۶.

شهریاری، م.، ۱۳۶۵- ذخایر بوکسیت کارستی (با بستر کربناته)، جهاد دانشگاهی دانشکده فنی دانشگاه تهران ۲۲۶ ص.

گزارش اکتشافی وزارت معادن و فلزات، ۱۳۷۶- طرح تجهیز معدن و احداث کارخانه تولید آلومینا، منتشر نشده، ۴۳ ص.

مهندسین خاک خوب، ۱۳۷۰- گزارش زمین‌شناسی و تکتونیکی کانسار بوکسیت جاجرم، منتشر نشده، ۳۶ ص.

References

Bardossy, G., 1982- Karst Bauxites–Bauxite deposits on carbonate rocks, Developments in Economic Geology, Elsevier, Amsterdam, 14, 441 p.

Berberian, M. & King, G. C. P., 1981- Towards a palogeography and tectonic evolution of Iran, Earth Sci 18, 210-265.

Blaskovic, I., Dragicevic, I. & Tiswar, J., 1995- Morphological and geological indicator in the karst region of the possible bauxite deposits in the karst region of western Herzegovina, Rudarsko-geolosko-naftni zbornik 7, 17-27.

Bogatyrev, B. A., Zhukov, V. V. & Tsekhovsky, Yu. G., 2009- Formation conditions and regularities of the distribution of large and superlarge bauxite deposits, Lithology and Mineral Resources 44, 135-151.

Esmaeily, D., Rahimpour-Bonab, H., Esna-ashari, A. & Kananian, A., 2010- Petrography and Geochemistry of the Jajarm Karst Bauxite Ore Deposit, NE Iran: Implications for Source Rock Material and Ore Genesis, Turkish Journal of Earth Sciences 19, 267-284.

Goodchild, M. F., Haining, R. & Wise, S., 1992- Integrating GIS and spatial data analysis: problems and possibilities, International Journal of Geographic Information Systems 6, 407–423.

Maclean, W. H., Bonavia, F. F. & Sanna, G., 1997- Argillite debris converted to bauxite during karst weathering: evidence from immobile element geochemistry at the Olmedo Deposit, Sardinia, Mineralum deposita journal 32, 607-616.

Samanta, B. & Bhattacherjee, A., 1999- Statistical quality control: a multivariate approach, Mineral Resour 2, 227-38.

Temur, S. & Kansun, G., 2006- Geology and petrography of the Mastadagi diasporic bauxites, Alanya, Antalya, Turkey, Journal of Asian Earth Sciences 27, 512-522.

Valeton, I., 1972- Bauxite, Developments in Soil Science I, Elsevier publishing company Amsterdam London New York , 218p.