



کانی‌شناسی و ژئوشیمی زغال‌سنگ‌های ژوراسیک معدن قشلاق، البرز شرقی

غلامحسین شمعانیان* و فاطمه حسینی اشلقی

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۱۰/۳، پذیرش: ۱۳۹۳/۹/۲۴

چکیده

زون ساختاری البرز در شمال ایران، میزبان تعداد مهمی از کانسارهای زغال‌سنگ است. معدن زغال‌سنگ قشلاق یکی از این کانسارهاست که در ۳۵ کیلومتری آزادشهر قرار دارد. چینه‌های زغال‌دار در منطقه معدنی قشلاق در بخش میانی سازند شمشک تظاهر دارند که به‌طور عمده از شیل، سیلت‌سنگ و ماسه‌سنگ تشکیل شده است. زغال‌سنگ‌های قشلاق با مقادیر نسبتاً کم گوگرد مشخص می‌شوند که نشان‌دهنده نهشت در محیط‌های مردابی و دریاچه‌ای است. کوارتز، کائولینیت، مونتوریلونیت، آلپیت، مسکویت و ایلیت کانیهای اصلی در این زغال‌سنگها هستند. پیریت به‌صورت بلورهای وجه‌دار تا بدون وجه و گاه تجمعات فراموبییدی در زغال‌سنگ پراکنده است. تعیین میل ترکیبی عناصر به بخش آلی/غیرآلی زغال‌سنگ با استفاده از ضریب همبستگی بین عناصر و خاکستر انجام شد. در کانیها Si, Al, Ti, Fe, K, Na, Zn, Ga, Zr, Rb و Nb حضور دارند. Sr و Pb همراهی دوگانه‌ای با هر دو بخش دارند. غلظت اغلب عناصر جزئی در نمونه‌های زغال‌سنگ قشلاق در مقایسه با غلظتهای متداول جهانی بیشتر است که سرب و نیکل با بیشترین غنی‌شدگی مشخص می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: زغال‌سنگ، کانی‌شناسی، ژئوشیمی، عناصر جزئی، البرز شرقی، قشلاق

مقدمه

و غیرآلی تابع ژئومورفولوژی و ژئوشیمی محیط تشکیل، بیوشیمی و هیدروشمیمی مراحل زغالی شدن و تغییرات pH ناشی از فرآیندهای آلی است (Christanis et al., 1998; Liu et al., 2001).

کاربرد زغال‌سنگ و استفاده از آن به‌عنوان سوخت، با مشکلات زیست‌محیطی گسترده از قبیل تولید زهاب اسیدی معدن و انباشت فلزات سنگین در آب و خاک همراه است که می‌تواند خسارتهای جبران‌ناپذیری را به موجودات زنده وارد آورد. اگرچه بخشی از این مشکلات ناشی از بخش آلی زغال‌سنگ است، اما بسیاری از مشکلات زیست‌محیطی از بخش غیرآلی موجود در زغال‌سنگ ناشی می‌شود. بنابراین، بررسیهای کانی‌شناختی زغال‌سنگ و آگاهی از نوع، منشأ و توزیع کانیها و چگونگی الگوی توزیع عناصر جزئی در زغال‌سنگ از یک‌سو در تحلیل شرایط محیطی دیرینه (Widodo et al., 2010) و از سوی دیگر در بررسی و ارزیابی مشکلات زیست‌محیطی (Swaine, 1990) کاربرد دارد و باید مورد توجه قرار گیرد. معدن زغال‌سنگ قشلاق با مختصات جغرافیایی $36^{\circ} 23'$ عرض شمالی و $55^{\circ} 20'$ طول شرقی در ۳۵ کیلومتری

زغال‌سنگ، سنگ رسوبی اشتعال‌پذیر و ناهمگنی است که از دو بخش آلی یا ماسرال و غیرآلی یا ماده کانیایی تشکیل شده و از میزان ذخایر و ارزش حرارتی مناسبی برخوردار است. تمامی خواص مفید زغال‌سنگ ناشی از بخش آلی بوده و بخش غیرآلی آن ناخالصیهایی است که جایگزین بخش آلی شده و پس از سوختن زغال‌سنگ به شکل خاکستر بر جای می‌ماند. سولفیدها، کانیهای رسی، کربنات‌ها و کوارتز از مهمترین سازندگان غیرآلی زغال‌سنگها هستند (Asanlou, 1991) که از نظر فراوانی، رخداد و پیدایش با یکدیگر متفاوتند. کوارتز، کائولینیت و سایر کانیهای رسی به‌صورت ذرات آواری بوده و سولفیدها و کربنات‌ها اغلب دارای منشأ ثانویه‌اند که در مردابهای زغالی تشکیل می‌شوند (Merritt, 1990). پیریت، مارکاسیت و کالکوپیریت از متداول‌ترین کانیهای سولفیدی در زغال‌سنگ هستند (Pinetown et al., 2007). زغال‌سنگ تقریباً حاوی تمامی عناصر جدول تناوبی است (Swaine, 1990) که در بخشهای آلی و غیرآلی توزیع شده‌اند. الگوی توزیع عناصر جزئی در هر یک از بخشهای آلی

داده شد. غلظت اکسیدهای اصلی و برخی از عناصر جزئی از قبیل Rb، Nb، V، Ni، Pb، Sr و Ba در نمونه‌های زغال‌سنگ، باطله و خاکستر به روش فلورسانس اشعه ایکس (XRF) با استفاده از دستگاه فیلیپس مدل PW1480 توسط شرکت کانساران بینالود انجام شد. حد تشخیص دستگاه برای اکسیدهای P_2O_5 ، TiO_2 و MnO، ۰/۰۰۱ درصد، برای سایر اکسیدها ۰/۰۱ درصد و برای عناصر جزئی ۱ پی‌پی‌ام بوده است.

بحث و بررسی

زمین‌شناسی

معدن زغال‌سنگ قشلاق در حوضه زغال‌خیز البرز شرقی واقع شده است. بر اساس نقشه زمین‌شناسی خوش‌بیلاق (Jafarian, 2004) قدیمی‌ترین واحد سنگ‌چینه‌ای رخنمون یافته در این منطقه شامل طبقات نازک تا متوسط لایه سنگ آهکی با میان لایه‌های مارنی، دولومیتی، ماسه‌سنگی و شیلی سازند خوش‌بیلاق به سن دونین است که با ناپیوستگی هم‌شیب توسط سنگهای کربناته سازند مبارک به سن کربونیفر پوشیده شده است (شکل ۱). نهشته‌های پرمین که به‌طور عمده از ماسه‌سنگ، سنگ آهک، دولومیت و شیل تشکیل یافته به‌طور هم‌شیب بر روی سازند مبارک قرار گرفته و توسط واحدهای سنگ‌چینه‌ای سازند الیکا با سن تریاس پوشیده شده است. بخش پایینی سازند الیکا با سن تریاس زیرین شامل تناوبی از شیل، سنگ‌آهک نازک تا متوسط لایه و کنگلومرای درون سازندی و بخش بالایی آن شامل تناوبی از شیل، سنگ‌آهک دولومیتی و دولومیت است. این نهشته‌ها با ناپیوستگی هم‌شیب توسط رسوبات قاره‌ای سازند شمشک با سن ژوراسیک پوشیده شده‌اند که از بیشترین برون‌زد برخوردار بوده و به‌طور عمده از ماسه‌سنگ، شیل، سیلت‌سنگ و کنگلومرا و بین لایه‌های زغالی تشکیل شده است (Hassaninasab et al., 2006).

سازند شمشک بر مبنای تغییرات رخساره سنگی به سه واحد شامل واحد زیرین (JS_1) متشکل از ماسه‌سنگ، سیلت‌سنگ و شیل با ضخامت ۵۰۰ متر، واحد میانی (JS_2) با ضخامت ۱۲۰۰ متر شامل شیل، سیلت‌سنگ، ماسه‌سنگ و لایه‌های زغالی و واحد بالایی (JS_3) متشکل از ۷۰۰ متر کنگلومرا، ماسه‌سنگ و شیل قابل تفکیک است. در این بین، واحد میانی دارای چندین لایه زغالی است که از نظر اقتصادی اهمیت

جنوب شرق شهرستان آزادشهر قرار دارد (شکل ۱). فعالیت‌های معدن‌کاری در این معدن از سال ۱۳۷۸ شروع شده و با تولید متوسط ۲۰ هزار تن در سال در حال فعالیت است (Sabbaghi et al., 2003). زغال‌سنگ‌های این معدن به شکل لایه‌ها و عدسیه‌های زغالی در بخش میانی سازند شمشک تظاهر داشته و بیشتر از نوع کک شو و فاقد گاز است (Hassaninasab et al., 2006). مطالعات انجام شده در این منطقه به‌طور عمده شامل تهیه نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ (Jafarian, 2004)، مطالعات زمین‌شناسی و استخراجی (Hassaninasab et al., 2006)، بررسی کانیهای ثانویه زیست‌محیطی (Shamanian et al., 2008) و نیز بررسی ماهیت ماسرال‌ها (Rabbani and Taghipour, 2011) و شرایط دیرینه‌محیطی تشکیل زغال‌سنگها در ناحیه زغال‌دار قشلاق (Rabbani et al., 2012) می‌باشد. در این مقاله ویژگی‌های بافتی و کانی‌شناختی زغال‌سنگ‌های معدن قشلاق و نحوه رخداد عناصر جزئی مورد بررسی قرار گرفته و بر اساس نتایج به‌دست آمده درباره اثرات زیست‌محیطی این زغال‌سنگها اظهار نظر شده است.

روش مطالعه

بررسی‌های انجام شده در این تحقیق شامل دو بخش صحرایی و آزمایشگاهی است. در بررسی‌های صحرایی با انتخاب نیمرخهای عمود بر لایه تغییرات سنگ‌شناسی سنگ دیواره و تغییرات بافتی، کانی‌شناسی و ضخامت لایه‌های زغالی در تونل‌ها و برون‌زدهای سطحی بررسی شد و از بخشهای مختلف نمونه‌برداری به‌عمل آمد. بررسی‌های آزمایشگاهی شامل مطالعات پتروگرافی، کانی‌شناسی و تجزیه شیمیایی است. مطالعات بافتی و کانی‌شناسی به روشهای مرسوم میکروسکوپی بر روی مقاطع نازک و نازک-صیقلی انجام گرفت. شناسایی کانیهای مجهول در زغال‌سنگ و خاکستر حاصل از آن به‌روش پراش پرتو ایکس (XRD) و با استفاده از دیفرکتومتر فیلیپس مدل PW1800 توسط شرکت کانساران بینالود انجام شد. خاکستر زغال‌سنگ بر پایه روش امریکایی (Bullock et al., 2002) تهیه شد. در این روش، ابتدا ۵۰ گرم از نمونه همگن زغال‌سنگ با ذراتی به قطر بیش از ۱۸۰ مش تهیه شد و در طی سه مرحله پی در پی به مدت ۱/۵، ۲ و ۳۶ ساعت به ترتیب تا دمای ۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۲۵ درجه سانتی‌گراد با نسبت افزایش دمای ۲/۵ درجه سانتی‌گراد در دقیقه در کوره گرما

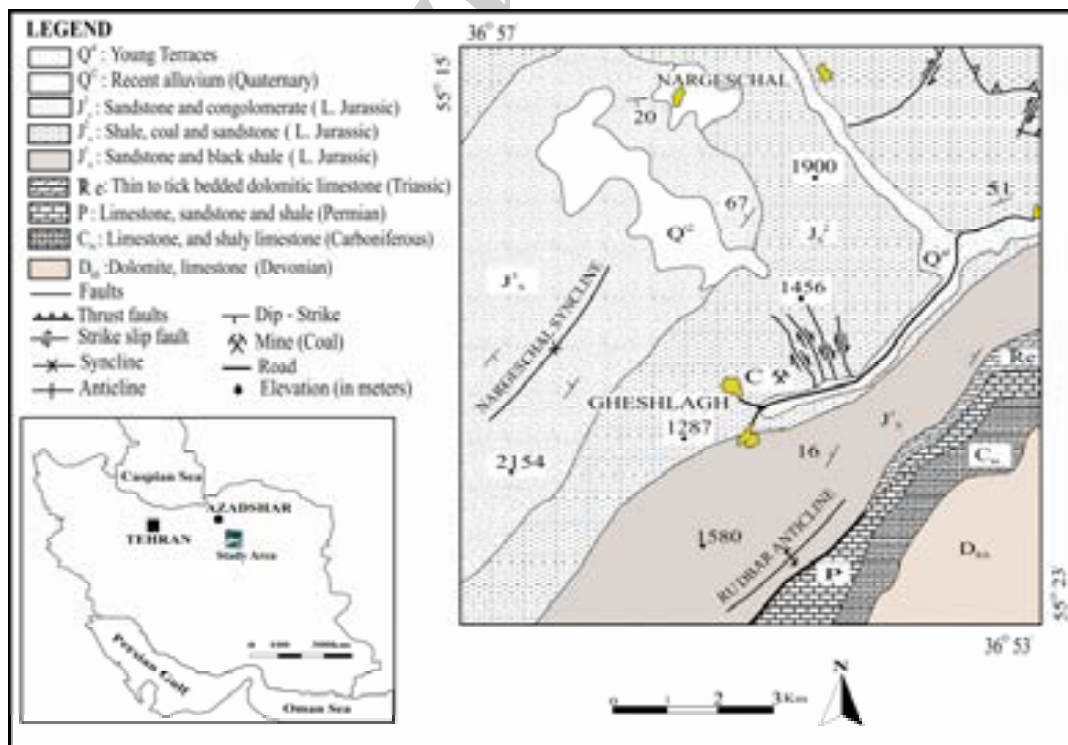
بلورهای سوزنی شکل ایلیت که گاه دارای فراوانی ۵۰ درصد می‌باشند، بر مبنای مطالعات میکروسکوپی (شکل ۲- C) و XRD شناسایی شد. سنگ بستر لایه‌های زغالی دارای لامینه‌های پراکنده و بسیار نازک زغالی است که فراوانی و گسترش بسیار محدودی دارند.

سنگ پوش لایه‌های زغالی شامل تناوبی از ماسه‌سنگ، ماسه‌سنگ شیلی و سیلت‌سنگ متشکل از کوارتز، فلدسپات پتاسیک، آلبیت، مسکویت، کائولینیت و ایلیت است که توسط زمینه سیلیسی احاطه شده‌اند. در برخی از نمونه‌ها، این سنگها دارای زمینه‌ای از کانیه‌های رسی و کربناته می‌باشند که در ماسه‌سنگهای شیلی حدود ۱۵ درصد حجمی سنگ را به خود اختصاص می‌دهند (شکل ۲- D). یکی از ویژگیهای بارز سنگ پوش وجود لامینه‌های جهت یافته زغالی است (شکل ۲- E) که نسبت به سنگ بستر فراوانی بیشتری دارند. از طرفی، کانیه‌های کلریت، مسکویت، بیوتیت، ایلیت و اکسیدهای آهن ثانویه نیز دارای فراوانی بیشتری (حدود ۱۰ درصد) در سنگ پوش می‌باشند. در برخی از نمونه‌ها، مسکویت‌ها خمیده‌اند (شکل ۲- F) که می‌تواند ناشی از عملکرد نیروهای زمین‌ساختی فشارشی در منطقه باشد.

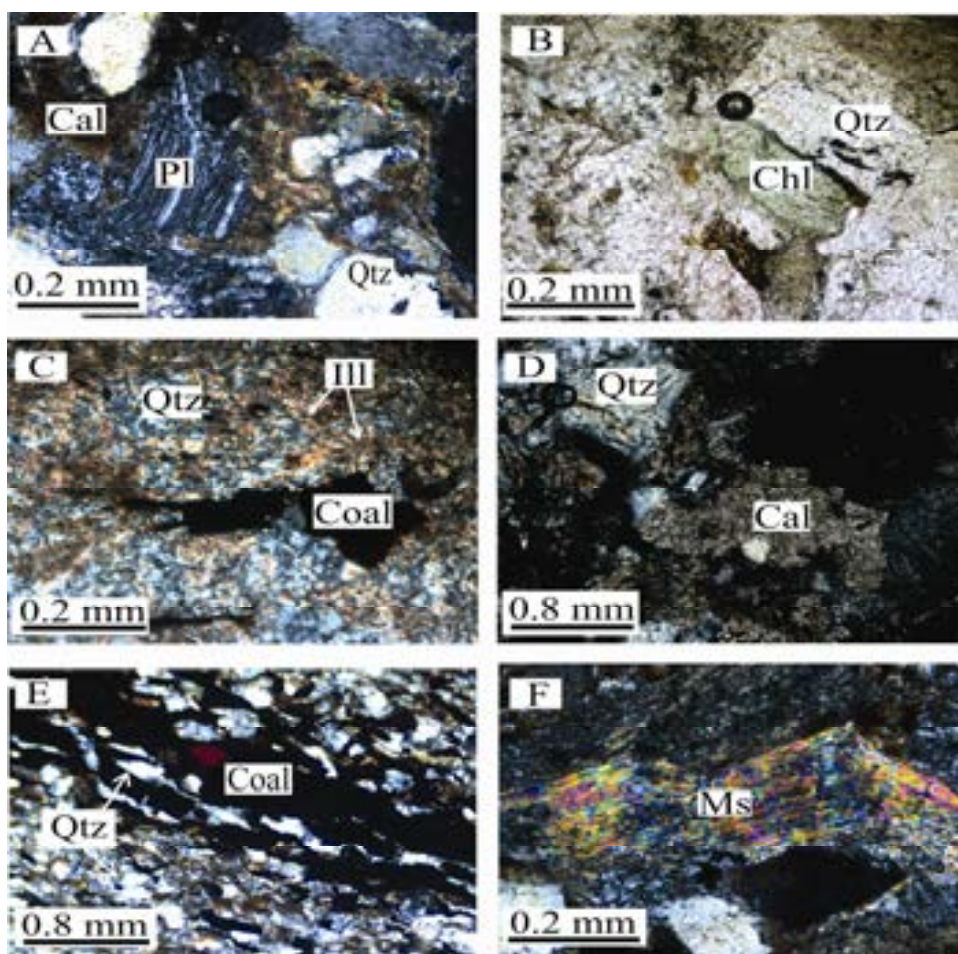
دارند. از بین لایه‌های زغالی موجود در این واحد تنها ۶ لایه دارای ضخامت بیشتر از ۴۰ سانتی‌متر است که مهمترین آنها به نامهای لایه میلیار I، لایه میلیار II و لایه حرارتی (Hassaninasab et al., 2006) نام‌گذاری شده‌اند. هم‌اکنون، بهره‌برداری از عمق ۶۰۰ متری از سطح زمین و از لایه میلیار II انجام می‌شود که زغال‌سنگهای آن خاصیت پلاستیومتری بیشتری دارند.

کانی‌شناسی سنگ میزبان زغال‌سنگ

بر اساس بررسیهای صحرایی، سنگ دیواره لایه‌های زغالی شامل تناوبی از شیل، سیلت‌سنگ و ماسه‌سنگ است. کوارتز، آلبیت، فلدسپات پتاسیک و پلاژیوکلاز از کانیه‌های اصلی و کلریت، مسکویت و ایلیت از کانیه‌های فرعی در این سنگهاست. ماسه‌سنگهای ریز تا متوسط دانه و آرژیلیت‌ها سنگ بستر لایه‌های زغالی را تشکیل می‌دهند. ماسه‌سنگها به‌طور عمده از کوارتزهای آواری زاویه‌دار، فلدسپات پتاسیک و پلاژیوکلاز (شکل ۲- A) و کانیه‌های فرعی مسکویت و کلریت با فراوانی کمتر از ۵ درصد (شکل ۲- B) تشکیل شده‌اند. آرژیلیت‌ها به‌طور عمده متشکل از کانیه‌های رسی به‌ویژه ایلیت می‌باشند.



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی معدن قشلاق و موقعیت آن در ایران. نقشه پایه از جعفریان (2004).
Fig. 1. Geologic map of the Gheslagh mine and location of it in Iran (after Jafarian, 2004).



شکل ۲. تصاویر میکروسکوپی از ماسه سنگ و پوش لایه‌های زغالی در معدن قشلاق. A: کوارتز، پلاژیوکلاز و کانیهای رسی و کربناتی در ماسه‌سنگهای کمرپایین، B: دانه‌های آواری کوارتز در ماسه‌سنگهای کمرپایین. C: تجمعات ایلیت در ماسه سنگ آرژیلیتی کمر پایین، D: زمینه ریزدانه کربناته در ماسه‌سنگهای شیلی کمربالا، E: لامینه‌های زغالی در ماسه‌سنگهای کمربالا، F: بلور خمیده مسکوویت (عکس B در نور عبوری عادی و سایر عکسها در نور عبوری پلاریزه گرفته شده‌اند). اختصارات: Cal = کلسیت، Chl = کلریت، Coal = زغال، Ill = ایلیت، Ms = مسکوویت، Pl = پلاژیوکلاز، Qtz = کوارتز.

Fig. 2. Photomicrographs of the sandstone and coal bearing strata in the Gheslagh mine. A: quartz, plagioclase, clay and carbonate minerals in the footwall sandstones, B: clastic grains of quartz in the footwall sandstones. C: illite aggregation in the footwall argillitic sandstones, D: fine grain carbonate groundmass in the hanging-wall shaly sandstones, E: coal lamellas in the hanging-wall sandstones, F: banded muscovite crystal (B in plan ploride light=PPL, others in cross ploride light=XPL). Abbreviations: Cal=Calcite, Chl=Chlorite, ILL=Illite, Ms=Muscovite, Pl=Plagioclase, Qtz=Quartz.

کانی‌شناسی زغال سنگ

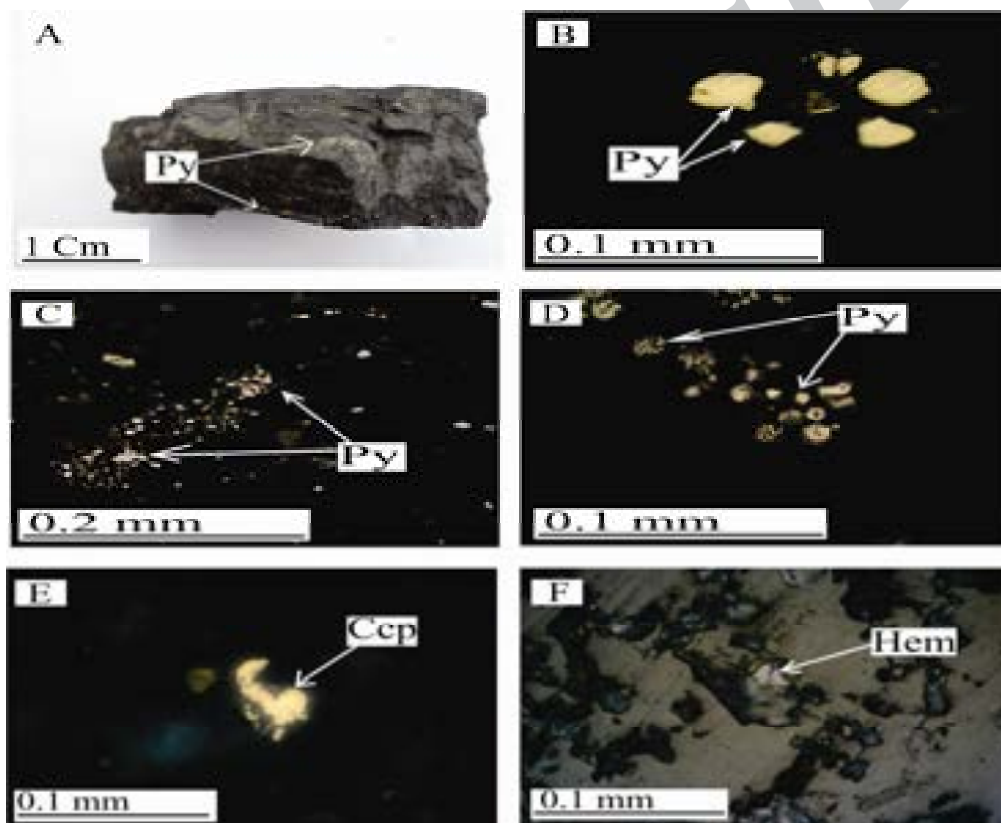
بر اساس بررسی‌های کانی‌شناسی، پیریت و کالکوپیریت از کانی‌های سولفیدی زغال‌سنگهای قشلاق است. پیریت با فراوانی کمتر از ۲ درصد به صورت بلورهای وجه‌دار تا بدون وجه دارای تظاهر افشان و رگه‌چه‌ای است (شکل ۳- A). پیریت‌های بدون وجه با ابعاد حدود ۵ میکرون (شکل ۳- B) و پیریت‌های نیمه وجه‌دار با ابعاد ۲ تا ۳ میکرون (شکل ۳- C)

(C) دیده می‌شوند. علاوه بر این، تجمعات فرامبوییدی پیریت یکی از ویژگیهای زغال‌سنگهای قشلاق است که به صورت تجمعات کروی با قطر ۵ تا ۷ میکرون قابل مشاهده‌اند (شکل ۳- D).

لوپز و وارد (Lopez and Ward, 2008) پیریت‌های موجود در زغال‌سنگها را بر مبنای ویژگیهای بافتی به دو دسته فرامبوییدی با خاستگاه هم‌زاد و شکافه پرکن با خاستگاه

(Weber et al., 2004). حضور این پیریت‌ها از نظر زیست‌محیطی دارای اهمیت بوده و باید در بررسیهای بافتی و کانی‌شناسی مورد توجه قرار گیرد. کالکوپیریت به صورت بلورهای بدون وجه و با فراوانی کمتر از پیریت دیده می‌شود (شکل ۳- E). این کانی دارای تظاهر افشان بوده و گاه از حاشیه در حال تبدیل به کوولیت است. اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن ثانویه (شکل ۳- F) از مهمترین محصولات دگرسانی برون‌زاد می‌باشند که در رخنمونهای سطحی هوازده و لایه‌های نزدیک به سطح به صورت رگه‌چهای، شکافه پرن و جانیشینی کانیهای سولفیدی تظاهر دارند.

دیرزاد تقسیم کرده‌اند. پیریت‌های فرامبوییدی و وجه‌دار در طی فرآیند توری شدن اولیه تشکیل شده و دارای تظاهر افشان در لایه‌های زغالی می‌باشند، اما پیریت‌های بدون وجه که شکل آنها تابع آثار و بقایای گیاهان پدید آورنده است دارای خاستگاه دیرزاد بوده و به دو صورت جانیشینی و شکافه پرن تشکیل می‌شوند (Widodo et al., 2010). به این ترتیب، می‌توان پیریت‌های فرامبوییدی زغال‌سنگهای قشلاق را از نوع هم‌زاد در نظر گرفت و تشکیل آنها را به رویدادهای اولیه زغالی شدن نسبت داد. پیریت‌های فرامبوییدی در مقایسه با انواع وجه‌دار تا نیمه وجه‌دار دارای سطح مؤثر وسیع‌تری بوده که نرخ واکنشگری و اکسایش آنها را افزایش می‌دهد



شکل ۳. تصاویر ماکروسکوپی و میکروسکوپی از پیریت‌های موجود در زغال‌سنگهای معدن قشلاق. A: تجمعات پولکی و رگه‌چهای پیریت، B: پیریت‌های بدون وجه، C: پیریت‌های نیمه وجه‌دار تا بدون وجه، D: تجمعات پیریت‌های فرامبوییدی، E: کالکوپیریت، F: هماتیت به عنوان محصول دگرسانی برون‌زاد پیریت (همه تصاویر در نور انعکاسی عادی گرفته شده‌اند). اختصارات: Py=پیریت، Ccp=کالکوپیریت، Hem=هماتیت.

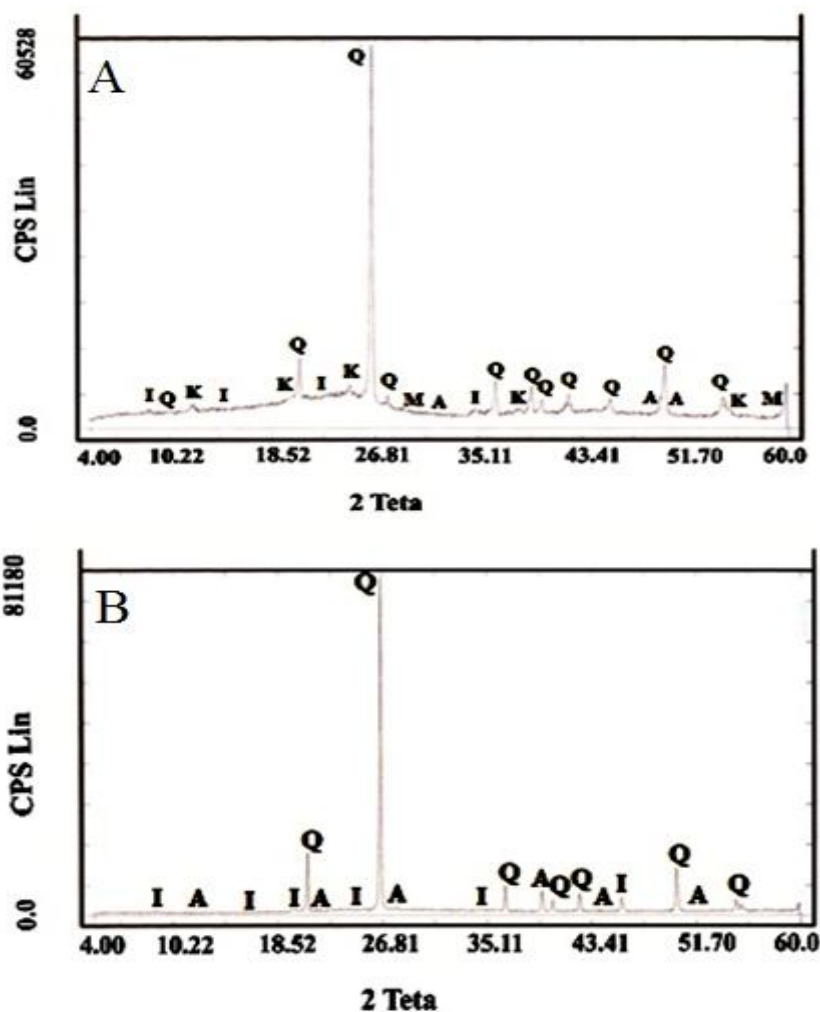
Fig. 3. Photo and photomicrographs of pyrite in the Gheshlagh mine coals. A.: fine-grained aggregates and veinlet of pyrite, B: anhedral pyrites, C: subhedral to anhedral pyrites, D.: framboidal pyrite, E: chalcopyrite, F: hematite as the supergene alteration of pyrite (all photomicrographs taken in reflected light). Abbreviation: Py=Pyrite, Ccp=Chalcopyrite, Hem=Hematite.

مونتوریلونیت، آلبیت، مسکویت و ایلیت در این زغال‌سنگها است (شکل ۴- A). همانند سایر زغال‌سنگهای دنیا، کوارتز

بررسیهای کانی‌شناسی به روش XRD بر روی نمونه‌های زغال‌سنگ قشلاق نشانگر حضور کوارتز، کائولینیت،

روی خاکستر زغال‌سنگهای قشلاق بیانگر حضور کوارتز، آلپیت، مسکویت، ایلیت و ناتروچاروسیت و نبود کائولینیت و مونتموریلونیت است (شکل ۴- B). حذف کائولینیت و مونتموریلونیت از خاکستر را می‌توان به ناپایداری این کانیها در دمای تشکیل خاکستر نسبت داد (Swaine, 1990; Lopez and Ward 2008).

فراوانترین کانی سیلیکاتی در نمونه‌های مورد مطالعه است که می‌تواند بر اثر شست‌وشوی سیلیکا از سنگ دیواره یا آزاد شدن سیلیکا از بافت‌های گیاهی تشکیل شود. حضور کانیهای آلومینوسیلیکاتی را می‌توان به شست‌وشوی آلومینا از سنگ دیواره در شرایط اسیدی و نهشت توام آن با سیلیکا نسبت داد (Lopez and Ward, 2008). مطالعات کانی‌شناسی بر



شکل ۴. نمونه‌ای از نمودارهای XRD برای شناسایی کانیهای مجهول در زغال‌سنگهای معدن قشلاق. A: کانیهای شناسایی شده در زغال‌سنگهای تونل مرکزی، B: کانیهای شناسایی شده در خاکستر همان زغال‌سنگها. اختصارات: Q=کوارتز، I=مسکویت-ایلیت، A=آلبیت، K=کائولینیت، M=مونتموریلونیت.

Fig. 4. A case of XRD diagrams for identification of unknown minerals in the Gheshlagh mine coals. A: identified minerals in the coals of central tunnel, B: identified minerals in the coal ashes. Abbreviations: Q=Quartz, I=Muscovite-Illite, A=Albite, K=Kaolinite, M=Montmorillonite.

می‌توان آن را به فراوانی کم این کانی در زغال‌سنگهای قشلاق و نیز تبدیل پیریت به ناتروچاروسیت در طی فرآیند تهیه خاکستر نسبت داد که باعث تجزیه پیریت و خروج آهن و

علی‌رغم وجود پیریت در زغال‌سنگهای قشلاق و شناسایی آن توسط روش‌های میکروسکپی، این کانی در نتایج مطالعات XRD نمونه‌های زغال‌سنگ و خاکستر مشاهده نشد که

Zr و Co از بیشترین غلظت و Y, Ga, Zn, Nb, Rb و Cl از کمترین غلظت برخوردارند.

برای بررسی میل ترکیبی عناصر به هر یک از بخشهای آلی و غیرآلی از نمودارهای دوتایی غلظت در مقابل درصد خاکستر و محاسبه ضریب همبستگی بین آنها استفاده شد. بر اساس این نمودارها، SiO₂ با ضریب همبستگی ۰/۹۸ دارای بیشترین همبستگی با خاکستر است (شکل ۵- A). از طرفی، K₂O، TiO₂ و MnO نیز دارای همبستگی مثبت با درصد خاکستر می‌باشند (شکل ۵- B و C) که دلالت بر تظاهر این اکسیدها در بخش غیرآلی زغال‌سنگ دارد. با توجه به کانی‌شناسی خاکسترهای مورد مطالعه، حضور این عناصر را می‌توان در ارتباط با کانیهای کوارتز، مسکویت، ایلیت و آلبیت در نظر گرفت. همبستگی مثبت بین جفت اکسیدهای MgO-Al₂O₃، MgO-K₂O، Al₂O₃-K₂O و SiO₂-K₂O (شکل ۶- A، B، C و D) پیشنهاد کننده حضور این عناصر در ایلیت است (Melegy et al., 2006).

علی‌رغم وجود همبستگی مثبت بین Al₂O₃ و TiO₂، بالا نبودن ضریب همبستگی بین این اکسیدها بیانگر میل ترکیبی آنها با سازنده‌های آلی زغال‌سنگ است که با نتایج مطالعات یزدی و اسماعیل‌نیا (Yazdi and Esmailnia, 2004) مبنی بر حضور بخشی از این عناصر در ماسرال‌های ویتربیتی سازگاری دارد. بررسی رابطه گوگرد با خاکستر نشان‌دهنده همبستگی منفی این دو با یکدیگر است که به‌طور عمده ناشی از خروج گوگرد در طی سوختن زغال‌سنگ است (شکل ۵- D). بخشی از گوگرد در کانیهای سولفیدی به‌ویژه پیریت وجود دارد که در طی مطالعات میکروسکوپی شناسایی شد. با این حال، عدم شناسایی پیریت در مطالعات XRD بر فراوانی بسیار کم این کانی دلالت دارد. در بین اکسیدهای مورد بررسی، CaO دارای همبستگی منفی (r = -۰/۶) با خاکستر است (شکل ۵- E) و همبستگی مثبت معنی‌داری را با SO₃ نشان می‌دهد که بیانگر تمرکز کلسیم به‌طور عمده در کانیهای سولفات از قبیل ژیپس است (Melegy et al., 2006). Na₂O دارای همبستگی منفی با خاکستر (شکل ۵- F) است.

گوگرد و ترکیب آنها با سدیم می‌شود (Lopez and Ward, 2008). علاوه بر حضور ناتروچاروسیت در خاکستر زغال‌سنگ، این کانی به همراه جاروسیت و ناتروآلونیت در محصولات ثانویه موجود در بخشهای هوازده زغال‌سنگهای قشلاق به روش XRD شناسایی شد.

ژئوشیمی زغال‌سنگ

بررسیهای ژئوشیمیایی بر روی زغال‌سنگهای ادوار مختلف زمین‌شناسی نشانگر حضور عناصر اصلی و جزئی مختلف در زغال‌سنگ است (Swaine and Pickering, 1985). به‌طور کلی، عناصر موجود در زغال‌سنگ می‌توانند در بخشهای آلی و غیرآلی تظاهر یابند (Zhuang et al., 2007). برای مثال، عناصر Si, Al, Fe, Mg و Ca از مهمترین عناصر اصلی در زغال‌سنگ می‌باشند که با کانیهای رسی، کربنات‌ها و سولفیدها همراهند (Christanis et al., 1998; Alexandra and Paul, 2004). بررسی توزیع و چگونگی رخداد عناصر در هر یک از بخشهای آلی و غیرآلی در تفسیر محیط تشکیل (Liu et al., 2001) و بررسیهای زیست‌محیطی دارای اهمیت است (Zhuang et al., 2007; Baioumy, 2009).

ژئوشیمی عناصر اصلی

بررسی نتایج تجزیه شیمیایی خاکستر زغال‌سنگهای قشلاق (جدول ۱) نشان می‌دهد که Al₂O₃ و SiO₂ به ترتیب با میانگین ۳۶/۷ و ۵۰/۱ درصد، قسمت عمده ترکیب شیمیایی زغال‌سنگ را به خود اختصاص می‌دهند و P₂O₅، MnO، CaO، MgO و Fe₂O₃ از غلظت کمتری برخوردارند. بررسی تغییرات غلظت عناصر اصلی در خاکستر همین زغال‌سنگها نیز نشانگر بالا بودن غلظت SiO₂ و Al₂O₃ به ترتیب با میانگین ۴۸/۹ و ۲۳/۳ درصد و پایین بودن غلظت P₂O₅، MnO و TiO₂ به ترتیب با میانگین ۰/۴، ۰/۵ و ۱/۴ درصد در خاکستر است. پایین بودن مقادیر SO₃، MgO و CaO در زغال‌سنگهای قشلاق با فراوانی ناچیز کانیهای کربناتی، سولفیدی و سولفاتی در این زغال‌سنگها هم‌خوانی دارد. در بین عناصر جزئی اندازه‌گیری شده Cr, V, Ba, Ni،

جدول ۱. نتایج تجزیه شیمیایی اکسیدهای اصلی (درصد) و عناصر جزئی (ppm) در زغال‌سنگها و باطله‌های زغالی معدن قشلاق.

Table 1. Concentrations of major elements (%) and trace elements (ppm) in coals and coal gangues of the Gheshlagh mine.

	M-2	M-7	Z-1	O-2	F-1	W-3	WC-3	G-3	GC-3
Latitude	36° 54' 44"	36° 54' 44"	36° 54' 52"	36° 54' 47"	36° 54' 58"	36° 54' 36"	36° 54' 36"	36° 54' 41"	36° 54' 41"
Longitude	E: 55° 20' 06"	E: 55° 20' 06"	E: 55° 20' 43"	E: 55° 20' 50"	E: 55° 20' 48"	E: 55° 19' 09"	E: 55° 19' 09"	E: 55° 20' 13"	E: 55° 20' 13"
SiO ₂	67.97	75.83	47.44	36.37	42.55	54.79	50.08	58.66	59.68
TiO ₂	1.16	0.854	1.234	0.742	1.781	2.901	1.933	1.031	1.022
Al ₂ O ₃	23.72	16.87	30.12	20.63	27.47	30.71	36.69	19.87	18.77
Fe ₂ O ₃	1.97	1.41	3.76	2.24	1.74	0.92	0.90	6.57	6.64
MnO	1.026	0.16	0.026	0.086	0.051	0.068	0.027	0.281	0.163
MgO	0.99	0.32	2.06	1.34	0.76	0.32	0.41	1.82	1.66
CaO	0.46	0.27	1.29	12.63	3.61	1.02	0.89	2.42	2.36
Na ₂ O	0.27	0.16	0.28	3.86	0.57	0.23	0.33	0.53	0.58
K ₂ O	2.06	0.86	1.58	0.18	0.10	0.83	0.86	2.20	2.07
P ₂ O ₅	0.020	0.012	0.653	0.043	0.033	0.043	0.047	0.112	0.109
SO ₃	0.655	0.285	4.068	12.59	6.566	1.147	1.080	3.225	2.935
Cl	57	57	59	201	105	64	67	97	95
Ba	289	155	833	257	469	409	438	285	275
Sr	86	63	386	191	166	132	176	198	216
Cu	101	107	247	119	193	174	199	89	92
Zn	70	47	209	146	87	39	49	123	137
Pb	53	54	97	53	73	75	90	431	772
Ni	222	176	1377	348	755	632	753	187	206
Cr	116	107	239	40	179	279	322	192	148
V	183	130	387	93	224	385	422	203	202
Ce	198	63	349	70	187	170	197	120	132
La	89	32	181	35	93	89	96	68	71
Ga	23	22	27	16	15	44	50	22	23
Nb	11	40	20	7	16	37	13	6	38
Zr	217	211	235	185	202	227	240	246	261
Y	50	44	108	39	41	56	66	60	64
Rb	33	26	29	2	9	17	10	79	82
Co	17	10	88	128	181	217	232	14	15

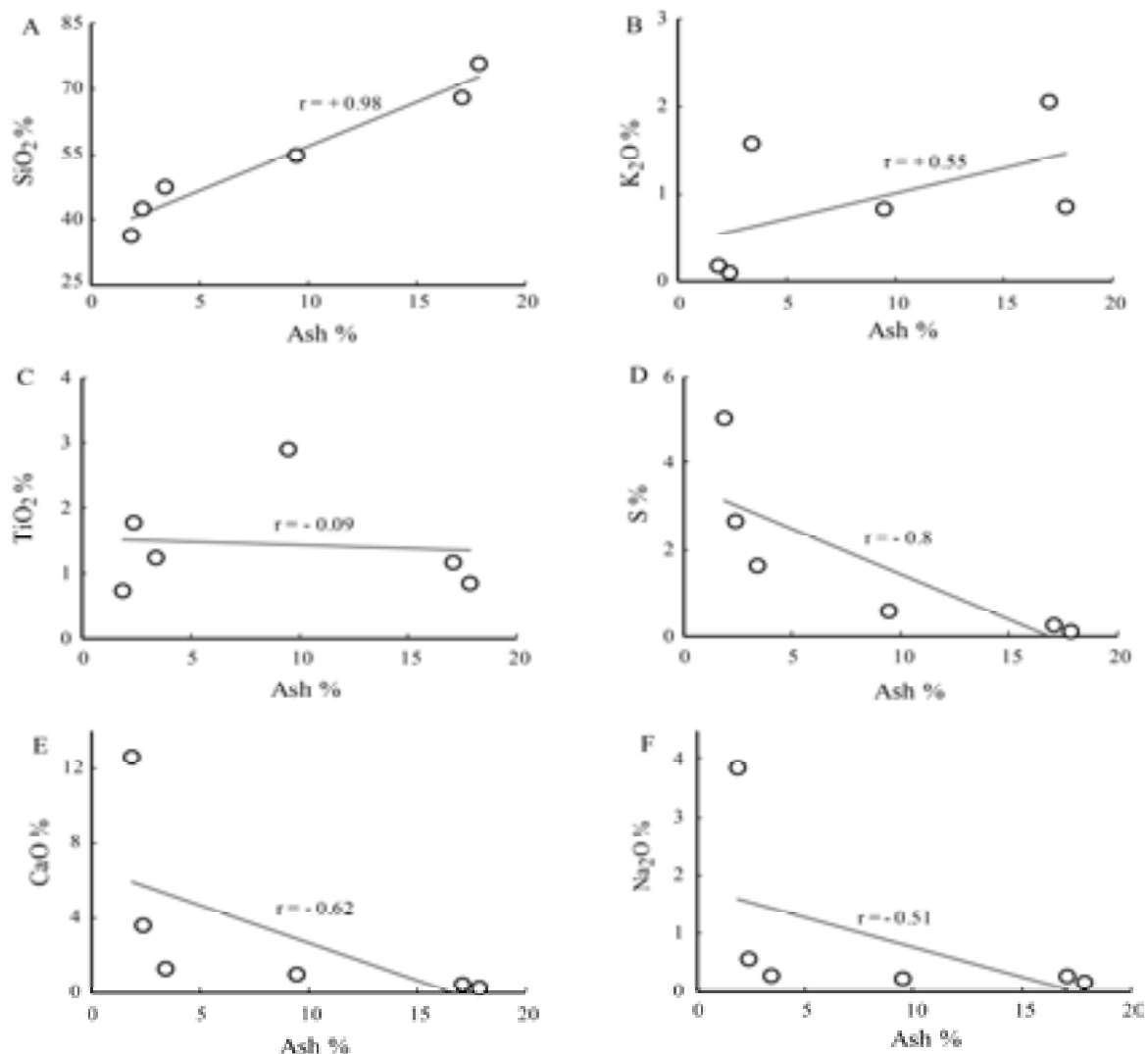
نمونه GC.3، WC.3 و G.3 به ترتیب از باطله‌های زغالی، زغال‌سنگ و خاکستر باطله و سایر نمونه‌ها مربوط به خاکستر زغال‌سنگ است.

فسفر است. فسفر ماده غذایی اصلی گیاهان است و به صورت ارتوفسفات جذب می‌شود (Halivan et al., 1999). بررسی همبستگی Al_2O_3 با TiO_2 نشانگر همبستگی مثبت این

میانگین غلظت P_2O_5 در خاکستر زغال‌سنگهای قشلاق ۰/۴ درصد است. پایین بودن مقدار این اکسید و همبستگی منفی آن با خاکستر زغال‌سنگ ($r = ۰/۴$) نشان دهنده منشأ آلی

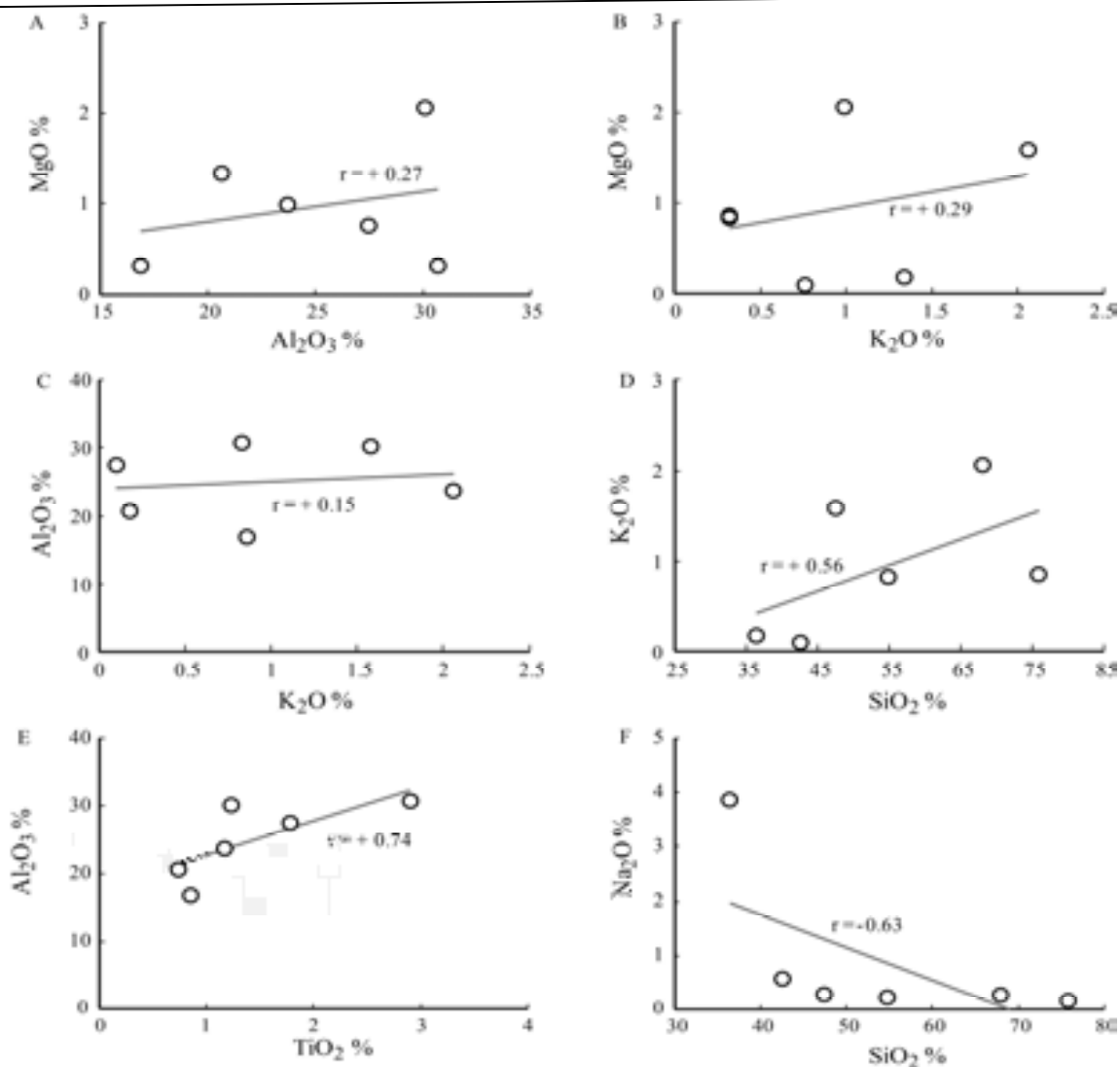
(Yazdi and Esmailnia, 2004) هم‌خوانی دارد. مقایسه میانگین غلظت TiO_2 در زغال‌سنگهای قشلاق (۱/۳۷ درصد) با میانگین غلظت این اکسید در زغال‌سنگ‌های جهان (۰/۰۵ درصد) و نیز پایین بودن نسبت TiO_2 / Al_2O_3 در خاکستر زغال‌سنگهای قشلاق (۰/۰۴ تا ۰/۰۹ درصد) بیانگر خاستگاه آواری TiO_2 است (Zhuang et al., 2007). Na_2O دارای همبستگی منفی با SiO_2 (شکل ۶-F) است.

اکسیدها با یکدیگر (شکل ۶-E) و پیشنهاد کننده حضور تیتان در کانیه‌های آلومینوسیلیکاتی از قبیل اسفن است. با این حال، بالا بودن مقدار TiO_2 در زغال‌سنگهای قشلاق نشان می‌دهد که کانیه‌های آلومینوسیلیکاته نمی‌توانند به تنهایی پذیرای این مقدار TiO_2 باشند. بالا بودن مقدار TiO_2 در زغال‌سنگهای قشلاق مبین قرارگیری این زغالها در گروه غنی از تیتان است که با نتایج مطالعات قبلی بر روی زغال‌سنگهای لوشان و باطله‌های معدن قشلاق (Sabbaghi et al., 2003;



شکل ۵. نمودارهای همبستگی اکسیدهای اصلی و درصد خاکستر در زغال‌سنگهای معدن قشلاق. A: نمودار دوتایی SiO_2 و خاکستر، B: نمودار دوتایی K_2O و خاکستر، C: نمودار دوتایی TiO_2 و خاکستر، D: نمودار دوتایی S و خاکستر، E: نمودار دوتایی CaO و خاکستر، F: نمودار دوتایی Na_2O و خاکستر.

Fig. 5. Correlation diagrams of major elements and percent of ashes in the Gheshlagh mine coals. A: bivariate diagram of SiO_2 and ash, B: bivariate diagram of K_2O and ash, C: bivariate diagram of TiO_2 and ash, D: bivariate diagram of S and ash, E: bivariate diagram of CaO and ash, F: bivariate diagram of Na_2O and ash.



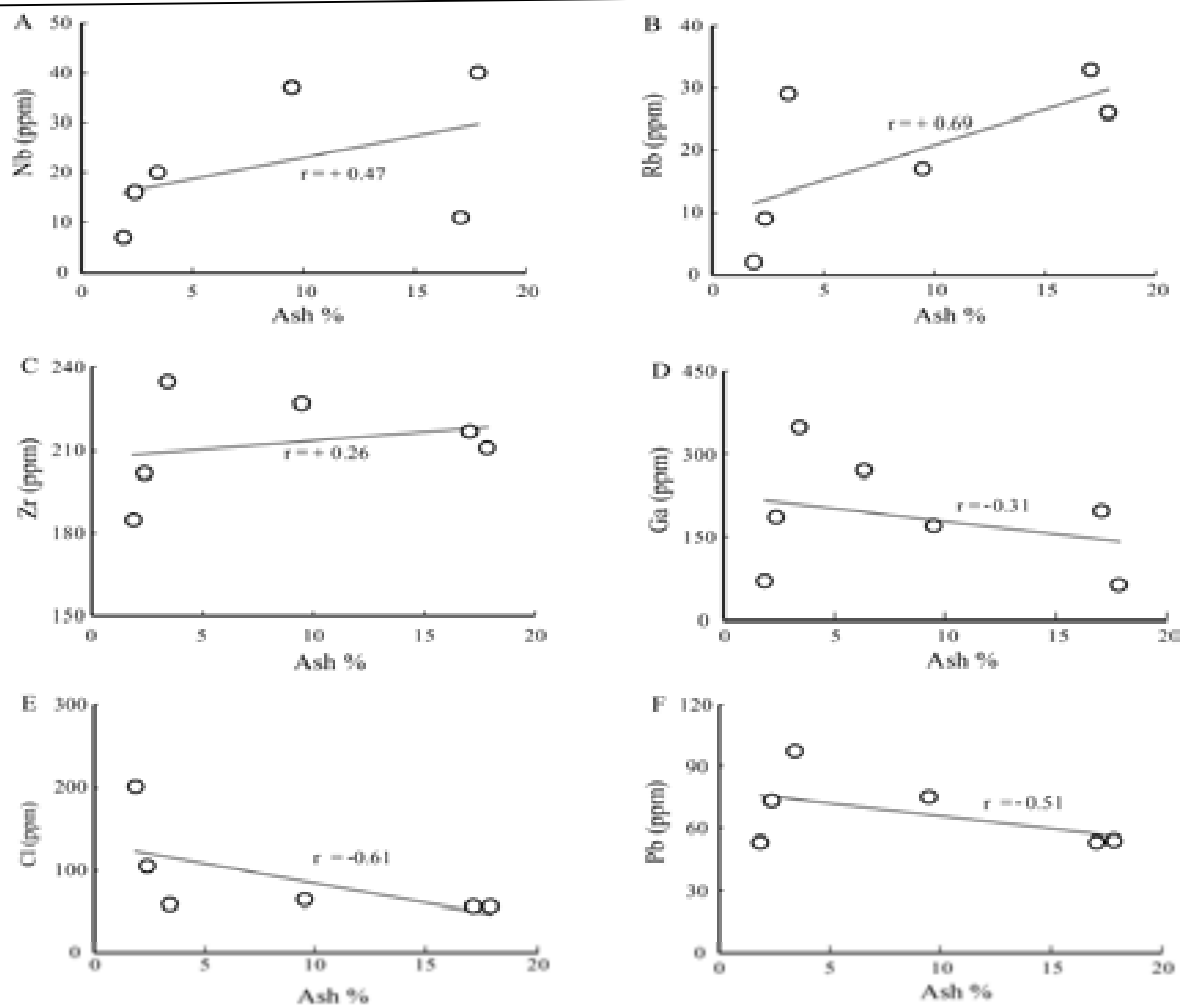
شکل ۶. نمودارهای همبستگی اکسیدهای اصلی در خاکستر زغال‌سنگهای معدن قشلاق. A: نمودار دوتایی MgO و Al_2O_3 ، B: نمودار دوتایی Al_2O_3 و MgO، نمودار دوتایی K_2O و MgO، نمودار دوتایی Al_2O_3 و K_2O ، نمودار دوتایی K_2O و SiO_2 ، نمودار دوتایی Al_2O_3 و TiO_2 ، نمودار دوتایی Na_2O و SiO_2 .

Fig. 6. Correlation diagrams of major elements in the percent of ashes of the Gheslgh mine. A: bivariate diagram of MgO and Al_2O_3 , B: bivariate diagram of MgO and K_2O , C: bivariate diagram of Al_2O_3 and K_2O , D: bivariate diagram of K_2O and SiO_2 , E: bivariate diagram of Al_2O_3 and TiO_2 , F: bivariate diagram of Na_2O and SiO_2 .

آنها در بخش غیرآلی از قبیل کائولینیت (Zhuang et al., 2007) است. در نمونه‌های مورد مطالعه، Cl با خاکستر (شکل ۷- E) و Si (شکل ۸- A) دارای همبستگی منفی و با سدیم (شکل ۸- B) و گوگرد (شکل ۸- C) دارای همبستگی مثبت است که از یک سو بیانگر منشأ گرفتن سدیم از آبهای منفذی و از سوی دیگر مبین حضور کلر در بخش آلی است. سرب دارای همبستگی منفی با خاکستر است (شکل ۷- F).

ژئوشیمی عناصر جزئی

بررسی نتایج تجزیه شیمیایی عناصر جزئی نشان می‌دهد که Ni ، Sr ، Ba ، Pb و V دارای بیشترین غلظت و عناصر Rb ، Nb ، Ga ، Y و Pb دارای کمترین غلظت در خاکستر زغال سنگ می‌باشند. بررسی نمودارهای دوتایی این عناصر با درصد خاکستر نشان‌دهنده همبستگی مثبت عناصر Nb ، Rb ، Zr و Ga با خاکستر (شکل ۷- A، B، C و D) و رخداد



شکل ۷. نمودارهای همبستگی عناصر جزئی و درصد خاکستر در زغال‌سنگهای معدن قشلاق. A: نمودار دوتایی Nb و خاکستر، B: نمودار دوتایی Rb و خاکستر، C: نمودار دوتایی Zr و خاکستر، D: نمودار دوتایی Ga و خاکستر، E: نمودار دوتایی Cl و خاکستر، F: نمودار دوتایی Pb و خاکستر.

Fig. 7. Correlation diagrams of trace elements and percent of ashes in the Gheslagh mine coals. A: bivariate diagram of Nb and ash, B: bivariate diagram of Rb and ash, C: bivariate diagram of Zr and ash, D: bivariate diagram of Ga and ash, E: bivariate diagram of Cl and ash, F: bivariate diagram of Pb and ash.

می‌تواند هم در سازنده‌های آلی و هم در سازنده‌های غیرآلی معدنی از قبیل سولفیدها و کانیهای رسی تظاهر یابد (Liu et al., 2001).

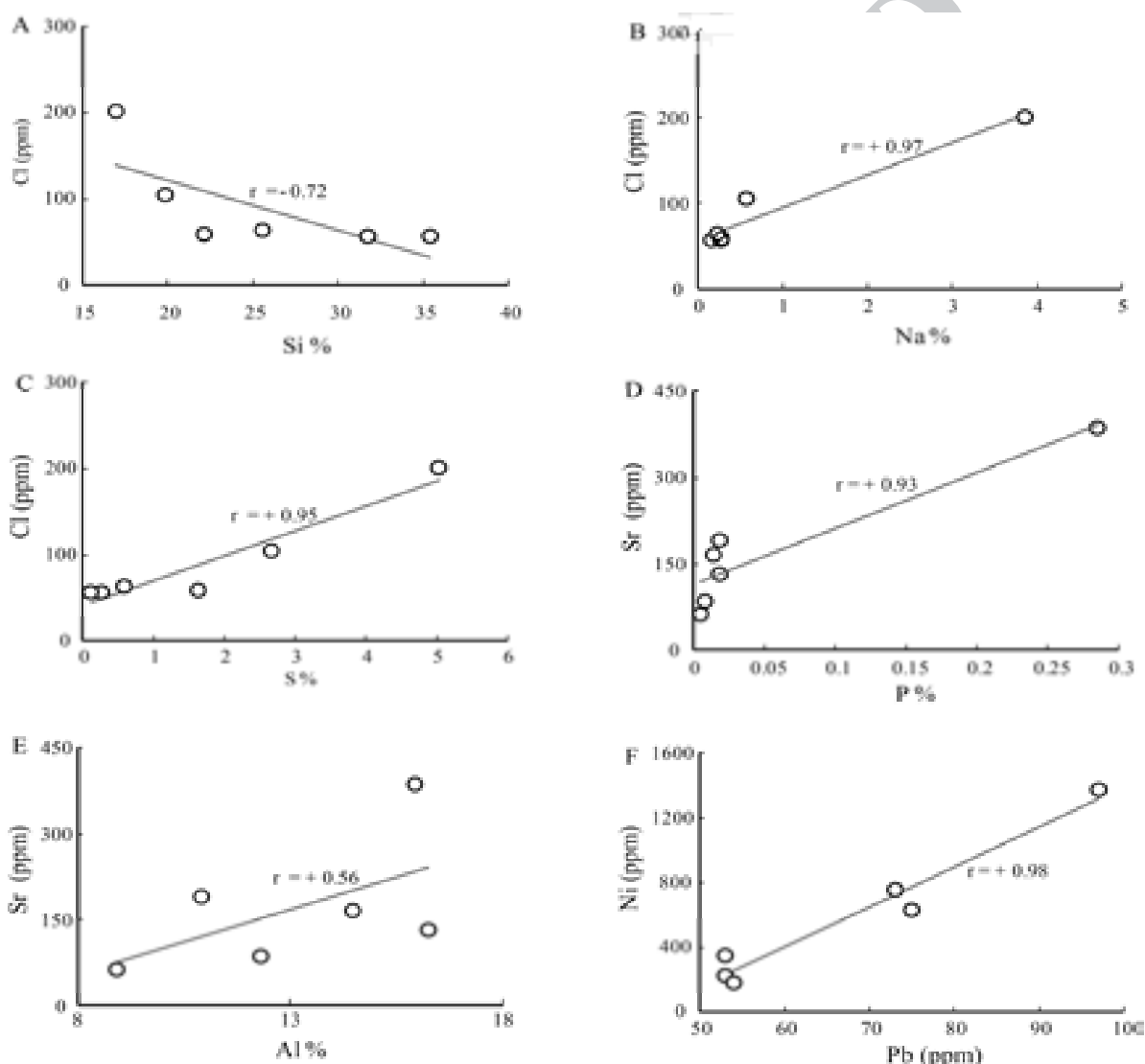
محیط تشکیل

زغال‌سنگهای معدن قشلاق به‌طور میانگین دارای ۸/۳۴ درصد خاکستر می‌باشند که بر پایه رده‌بندی زغال‌سنگها (Eastern Alborz Coal company, 1990) در رده کم خاکستر قرار می‌گیرند و از این نظر با زغال‌سنگهای البرز مرکزی (Gholipour et al., 2010; Goodarzi et al., 2006;

برخی از عناصر جزئی موجود در زغال‌سنگهای قشلاق دارای رفتار ژئوشیمیایی دوگانه‌اند. برای مثال، Sr که از مقدار قابل ملاحظه‌ای در زغالهای کم خاکستر برخوردار است (Zhuang et al., 2007)، از یک‌سو دارای همبستگی مثبت با فسفر (شکل ۸-D) بوده و بیانگر حضور آن در بخش آلی می‌باشد و از سوی دیگر دارای همبستگی مثبت با Al (شکل ۸-E) است که دلالت بر حضور آن در کانیهای آلومینیم‌دار دارد. سرب نیز از یک‌سو همبستگی منفی با خاکستر دارد (شکل ۷-F) و از سوی دیگر دارای همبستگی مثبت با عناصری مانند Ba، V، Cr، Cu، Ni و S است (شکل ۸-F). این عنصر

می‌توان زغال‌سنگهای قشلاق را از نوع کم گوگرد (Liu et al., 2001) در نظر گرفت که بخش عمده گوگرد آن در بخش آلی حضور دارد. این نتایج با مقادیر کم پیریت در بررسیهای میکروسکوپی و عدم شناسایی آن در مطالعات پراش پرتو مجهول هم‌خوانی دارد. پایین بودن مقدار گوگرد بیانگر تشکیل زغال‌سنگهای قشلاق در محیطهای مردابی و دریاچه‌ای و تأییدی بر منشأ غیردریایی آنهاست (Katupotha, 1989; Wang, 1994).

(Yazdi et al., 2010) شباهت دارند. نسبت متوسط Na/K در زغال‌سنگهای قشلاق حدود ۰/۹ است که بر رسوبگذاری سریع حوضه دلالت دارد (Liu et al., 2001). گوگرد از مهمترین عناصر مزاحم در زغال‌سنگهاست که بیشتر به‌صورت ترکیبات آلی و نیز ترکیبات غیرآلی (کانیهای سولفیدی و سولفات) تظاهر می‌یابد. با توجه به پایین بودن مقدار گوگرد در زغال‌سنگهای قشلاق (کمتر از ۱ درصد) و همبستگی منفی گوگرد و خاکستر بر روی نمودارهای دوتایی



شکل ۸. نمودارهای همبستگی عناصر جزئی در خاکستر زغال‌سنگهای معدن قشلاق. A: نمودار دوتایی Cl و Si، B: نمودار دوتایی Cl و Na، C: نمودار دوتایی Cl و S، D: نمودار دوتایی Sr و P، E: نمودار دوتایی Sr و Al، F: نمودار دوتایی Ni و Pb.

Fig. 8. Correlation diagrams of trace elements in the coal ashes of the Gheshlagh mine. A: bivariate diagram of Cl and Si, B: bivariate diagram of Cl and Na, C: bivariate diagram of Cl and S, D: bivariate diagram of Sr and P, E: bivariate diagram of Sr and Al, F: bivariate diagram of Ni and Pb.

غنی‌شدگی و تهی‌شدگی عناصر جزئی

مقایسه غلظت عناصر جزئی در زغال‌سنگهای قشلاق با زغال‌سنگهای لوشان و شاهرود (Yazdi and Esmaeilnia, 2003) که به ترتیب در البرز شرقی و البرز مرکزی واقع شده‌اند، نشانگر غنی‌شدگی Ni، V، Sr، Ba و Ce در زغال‌سنگهای قشلاق نسبت به زغال‌سنگهای شاهرود و لوشان است (جدول ۲). مقایسه غلظت عناصر جزئی زغال‌سنگهای قشلاق با غلظت معمول جهانی این عناصر در زغال‌سنگهای جهان (Swaine, 1990). نشان‌دهنده غنی‌شدگی ۱۶ برابری Ni و ۲ تا ۴ برابری سایر عناصر در زغال‌سنگهای قشلاق است. با این حال، مقایسه غلظت عناصر جزئی در زغال‌سنگهای قشلاق با ۶ برابر کلارک که به عنوان شاخصی در ارزیابیهای

زیست‌محیطی استفاده می‌شود (Gluskoter et al., 1977) نشان می‌دهد که غلظت اغلب عناصر مورد بررسی به غیر از Ni و Pb که به ترتیب دارای غنی‌شدگی ۸ و ۶ برابری می‌باشند، از شش برابر کلارک کمتر است. غنی‌شدگی یا تهی‌شدگی عناصر موجود در زغال‌سنگ تابع عوامل درونی مانند نوع کانیها و منشأ مواد و عوامل بیرونی از قبیل محیط نهشت، سن زغال‌سنگ و هیدروژئولوژی منطقه است (Yazdi et al., 2010). عناصر نیکل و سرب در اغلب نمونه‌های زغال‌سنگ دارای غنی‌شدگی می‌باشند و غنی‌شدگی آشکاری نسبت به متوسط جهانی و ۶ برابر کلارک نشان می‌دهند که می‌توان آن را به فراوانی کانیهای رسی به‌عنوان جذب‌کننده‌های مناسب این عناصر نسبت داد.

جدول ۲. مقایسه میانگین و دامنه غلظت عناصر جزئی در زغال‌سنگهای معدن قشلاق با متوسط جهانی و کلارک. غلظت این عناصر در زغال‌سنگهای شاهرود و لوشان برای مقایسه آورده شده است (داده‌ها از Yazdi and Esmaeilnia, 2004; Swaine, 1990; Gluskoter et al., 1977).

Table 2. Average and range concentration of trace elements in the Gheslagh mine coals in comparison of the global average and Clark concentration. The concentrations of these elements in the Shahrud and Lushan coals are given for comparison (Data from Gluskoter et al., 1977; Swaine, 1990; Yazdi and Esmaeilnia, 2004).

Elements (ppm)	Gheslagh (Mean)	Gheslagh (Range)	Lushan (Yazdi and Esmaeilnia, 2004)	Shahrud (Gluskoter et al., 1977)	The Global Average (Swaine, 1990)	Clark (Swaine, 1990)
Cl	101	57-201	115	150	-	-
Ba	484.14	155-977	251	1700	20-1000	452
Sr	534.71	63-2719	440	2500	15-500	375
Cu	163.57	101-247	737	489	0.5-50	55
Zn	115.28	53-209	320	1600	5-300	70
Pb	79.28	53-431	430	526	2-80	13
Ni	617	176-1377	2300	456	0.5-50	75
Cr	153.86	40-279	411	749	0.5-60	100
V	219.71	93-387	1300	1100	2-100	135
Ce	186.86	63-349	127	304	2-70	60
Nb	21.86	6-40	53	134	1-20	20
Zr	239.14	185-397	954	898	5-200	165
Y	62	39-108	237	237	2-50	33
Rb	16.71	1-79	98	228	2-50	90
Co	111.14	10-181	425	350	0.5-30	25

نتیجه‌گیری

حضور فراوان کانیهای آواری، مقادیر اندک پیریت و پایین بودن مقدار گوگرد نشان می‌دهد که زغال‌سنگهای قشلاق در باتلاقهای توری محیطهای قاره‌ای (Widodo et al., 2010)

و در شرایط آب شیرین تشکیل شده‌اند (Katupotha, 1989; Wang, 1994). کوارتز، کائولینیت، مونتوریلونیت آلپیت، مسکویت، ایلپیت، پیریت و کالکوپیریت از کانیهای شناسایی شده در زغال‌سنگهای قشلاق است. بخشی از پیریت‌های

با نتایج کانی‌شناسی نشان می‌دهد که عناصر آلومینیم، تیتان، سیلیسیم، پتاسیم و منیزیم اساساً در بخش غیرآلی و در کانیهای سیلیکاتی حضور دارند. بخشی از عناصر جزئی از قبیل Nb، Rb، Zr و Ga دارای همبستگی مثبت آشکار با خاکستر بوده و در بخش غیرآلی حضور دارند. با این حال، به نظر می‌رسد عناصری مانند سرب و نیکل که از غنی‌شدگی بیشتری نسبت به متوسط جهانی و کلارک برخوردارند به طور عمده با بخش آلی در ارتباط می‌باشند.

به‌طور کلی، تلفیق نتایج کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که معدن زغال‌سنگ قشلاق به‌دلیل مقادیر اندک کانیهای سولفیدی و به‌ویژه پیریت و حضور کانیهای کربناتی در سنگ دیواره از استعداد اندکی در تشکیل زهاب اسیدی برخوردار است.

شناسایی شده در این زغال‌سنگها از نوع پیریت‌های فرامیویدی است. این پیریت‌ها به‌دلیل دارا بودن سطح مؤثر زیاد به آسانی تحت تأثیر واکنشهای اکسایشی قرار گرفته و باعث تسریع تولید زهاب اسیدی می‌شوند. با این حال، پایین بودن مقدار پیریت در زغال‌سنگهای قشلاق و حضور کانیهای کربناته در سنگ دیواره آنها مانع از توسعه زهاب اسیدی شده است.

غلظت عناصر جزئی زغال‌سنگهای قشلاق از متوسط جهانی این عناصر در زغال‌سنگهای جهان بیشتر است و بیشترین مقدار آن متعلق به نیکل با ۱۶ برابر غنی‌شدگی است. با این حال، مقایسه میانگین غلظت عناصر جزئی زغال‌سنگهای قشلاق با ۶ برابر کلارک تنها نشانگر غنی‌شدگی عناصر نیکل و سرب و تهی‌شدگی سایر عناصر است. بررسی ضریب همبستگی عناصر با خاکستر زغال‌سنگهای قشلاق و تلفیق آن

References

- Alexandra, N.G. and Paul, F.C., 2004. Changes in geochemistry and mineralogy of thermally altered coal, Upper Hunter Vally, Australia. *International Journal of Coal Geology*, 51(3): 197-210.
- Asanlou, M., 1991. Coal engineering. Naghous Press, Tehran, 77 pp. (in Persian)
- Baioumy, H.M., 2009. Mineralogical and geochemical characterization of the Jurassic coal from Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 54(3-4): 75-84.
- Bullock, J.H., Cathcard, J.D. and Betteron, W.J., 2002. Analytical methods utilized by the United States Geological Survey for the analysis of coal and coal-combustion products. United States Geological Survey, Denver, Report 389, 15 pp.
- Christanis, K., Georgako Poulos, A., Freandez Turiel, J.L. and Bouzinos, A., 1998. Geological factors influencing the concentration of trace element in the Philippi peatland, Eastern Macedonia, Greece. *International Journal of Coal Geology*, 36(3-4): 295-313.
- Eastern Alborz Coal company., 1990. Preliminary exploration of coal-bearing district in Olang and Malacharam region. Eastern Alborz Coal company, Shahroud, Report 1, 85 pp. (in Persian)
- Gholipour, M., Mazaheri, A., Raghimi, M. and Shamanian, Gh.H., 2010. Study of geochemistry and mineralogy in Karmozd coal Basin Central Alborz, Mazandaran Province. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 17(4): 655-670. (in Persian with English abstract)
- Gluskoter, H.J., Ruch, R.R., Miller, W.C., Cahill, R.A., Dreher, G.B. and Kuhn, J.K., 1977. Trace elements in coal: occurrence and distribution. Illinois State Geological Survey, Illinois, Report 499, 115 pp.
- Goodarzi, F., Sanei, H., Stasiuk, L.D., Bagheri-Sadeghi, H. and Reyes, J., 2006. A preliminary study of mineralogy and geochemistry of four coal samples from northern Iran. *International Journal of Coal Geology*, 65(1-2): 35-50.
- Halivan, J.L., Bestor, J.D., Tisdale, S.L. and Nelson, W.L., 1999. Soil Fertility and fertilizers: An Introduction to Nutrient Management. Prentice Hall, New Jersey, 498 pp.
- Hassaninasab, R., Farzanegan, R., Rahmati, M. and Ziadlou, R., 2006. Problems and implementing solutions to improve mining in Gheshlagh coal mine. Fifth Iranian student conference of mining engineering, Tehran University, Tehran, Iran. (in Persian)
- Jafarian, M.B., 2004. Geological map of Khosheylagh, scale 1:100000. Geological Survey of Iran.

- Katupotha, J., 1989. Pyrite Concentration and Paleoenvironmental Change of the Hiroshima Delta (Japan). *Korean Journal of Quaternary Research*, 3(1): 47-54.
- Liu, D., Yang, Q., Tang, D., Kang, X. and Huang, W., 2001. Geochemistry of sulfur and elements in coals from the Antaibao surface mine, Pingshuo, Shanxi Province, China. *International Journal of Coal Geology*, 46(1): 51- 64.
- Lopez, I.C. and Ward, C.R., 2008. Composition and mode of occurrence of mineral matter in some Colombian coals. *International Journal of Coal Geology*, 73(1): 3-18.
- Melegy, A.A., EL-Rahmaney, M.M. and Salman, S.A., 2006. Trace-element geochemistry of coal and suspended particulate matter at El Maghara Mine. *Proceedings of the 3rd International Conference on Environmental and Geological Science and Engineering*, Vouliagmeni Beach, Athens, Greece.
- Merritt, R.D., 1990. Thermal alteration and rank variation of coals in the Matanuska field, south-central Alaska. *International Journal of Coal Geology*, 14(4): 255-276.
- Pinetown, K.L., Colin, R. Ward, W.A., 2007. Quantitative evaluation of minerals in coal deposits in the Witbank and Highveld coalfields, and the potential impact on acid mine drainage. *International Journal of Coal Geology*, 70(1-3): 166-183.
- Rabbani, T. and Taghipour, N., 2011. Nature and distribution of coal macerals in the Gheslugh coal-bearing region. 3th Symposium of Iranian Society of Economic Geology, Shahid Chamran University, Ahwas, Iran. (in Persian with English abstract)
- Rabbani, T., Taghipour, N., and Aharipour R., 2012. Study of paleoenvironmental condition of coal deposition in the Gheslugh coal-bearing region. 31th Geosciences Congress, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran. (in Persian with English abstract)
- Sabbaghi, A., Khazaei, A., Pakrah, k. and Hassaninasab, R., 2003. Economic evaluation of coal ash and wastes in coal mines of Golestan Province. *Management and planning organization of Golestan Province*, Gorgan, Report 126, 238 pp. (in Persian)
- Shamanian, Gh.H., Raghimi, M. and Farzaneghan, R., 2008. Environmental mineralogical studies in Gheslugh watershed coal mine, Golestan Province, Iran. *Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources*, Gorgan, Report 140, 34 pp. (in Persian with English abstract)
- Swaine, D. J., 1990. *Trace Elements in Coal*, Butterworths, London, 278 pp.
- Swaine, D.J. and Pickering, W.F., 1985. Modern methods in bituminous coal analysis: trace elements. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 15(3): 315-346.
- Wang, Y.Q., 1994. Study on occurrence and distributions of minor and trace element in coal and its combustion products, Ph.D. Thesis, China University of Mining and Technology, China, 88 pp.
- Weber, P.A., Stewart, W.A., Skinner, W.M., Weisener, C.G., Thomas, J.E. and Smart, R.S.C., 2004. Geochemical effects of oxidation products and framboidal pyrite oxidation in acid mine prediction techniques. *Applied Geochemistry*, 19(12): 1953-1974.
- Widodo, S., Oschmann, W., Bechtel, A., Sachsenhofer, R.F., Anggayana, K. and Puettmann, W., 2010. Distribution of sulfur and pyrite in coal seams from Kutai Basin (East Kalimantan, Indonesia): Implications for Paleoenvironmental conditions. *International Journal of Coal Geology*, 81(3): 151-162.
- Yazdi, M. and Esmaeilnia, S.A., 2003. Dual-energy gamma- ray technique for quantitative measurement of coal ash in the Shahrud mine, Iran. *International Journal of Coal Geology*, 55(2-4): 151-156.
- Yazdi, M. and Esmaeilnia, A.S., 2004. Geochemical properties of Coal in the Lushan Coalfield of Iran. *International Journal of Coal Geology*, 60(1): 73-79.
- Yazdi, M., Navi, P., Esmaeilpour, R. and Khakzad, A., 2010. Composition and quality of Lavij coals, central Alborz, Iran. *Scientific Quarterly Journal Geosciences*, 20(78): 111-116. (in Persian with English abstract)
- Zhuang, X., Querol, X., Alastuey, A., Plana, F., Moreno, N., Andres, J.M. and Wang, J., 2007. Mineralogy and geochemistry of the coals from the Chongqing and Southeast Hubei coal mining district, South China. *International Journal of Coal Geology*, 71(2-3): 263-275.



Mineralogy and geochemistry of the Jurassic coals from the Gheslagh mine, Eastern Alborz

Gholam Hossein Shamanian* and Fatemeh Hosseini Ashlaghi

Geology Department, Faculty of Sciences, Golestan University, Gorgan, Iran

Submitted: Dec. 24, 2013

Accepted: Dec. 15, 2014

Keywords: Coal, Mineralogy, Geochemistry, Trace elements, Eastern Alborz, Gheslagh

Introduction

The Alborz structural zone in northern Iran is the host of a number of important coal deposits. The Gheslagh coal mine is one of them, which is located 35 km southeast of Azadshahr. Coal bearing strata in the Gheslagh mining district occur in the middle part of the Lower Jurassic Shemshak Formation which consists mainly of shales, siltstones and sandstones. The Geshlagh coals have a low sulfur content and a low ash yield. The ash content of coal and its geochemical character depends on the environment of deposition and subsequent geological history (Yazdi and Esmaeilnia, 2004). The purpose of this study was to investigate the textural and mineralogical characteristics of the Ghashlagh coals and to identify the geochemistry of the major and trace elements and their relationship to specific mineralogical components. These results are necessary to improve the understanding of coal characterization and to relate the mineralogy of different materials to their potential for producing acidic or alkaline mine waters associated with mining and preparation processes.

Materials and methods

About 20 samples were collected from the main coal seams. These samples were taken from fresh faces of the mine to avoid weathered surfaces and get fresh samples. The petrography of the samples was carried out by the conventional microscopic methods at the Golestan University. Mineralogical analyses were done by a X-ray diffractometer equipped with a CuK α tube and monochromator (XRD Philips PW 1800) at the Kansaran Binaloud Company. The coal samples were initially crushed to less than 200 μ m and homogenized. Then, 50 g from each sample was heated to 525 °C according

to the United States Geological Survey procedure (Bullock et al., 2002). The concentration of the major and trace elements in the resulting ash samples was determined using a wavelength X-ray fluorescence spectrometer (XRF Philips PW 1480) at the Kansaran Binaloud Company.

Results

The Coal-bearing formation in the Ghashlagh mine belongs to the clastic unit of the Shemshak Formation, consisting mainly of about 2400 m sandstone, siltstone, shale. The middle part of this formation includes the economic coal beds. Petrographic and mineralogical investigations indicate that the dominant mineral phases of the Gheslagh coals are quartz, kaolinite, montmorillonite, albite, muscovite, illite and pyrite. Pyrite occurs as euhedral to anhedral crystals and locally as framboids which are disseminated in the coal. Oxidation products consist mainly of iron hydrosulfate resulting from the oxidation of pyrite.

The organic/inorganic affinity of elements in coal was determined using the correlation coefficient between the elements and ash yield. Si, Al, Ti, Fe, K, Na, Ga, Zr, Rb and Nb are mainly associated with minerals. Sr, Pb and Ni have a dual association. The concentrations of most trace elements in the Gheslagh coal samples are high when compared with the usual reported range in the world. The contents of Pb and Ni show the highest concentrations.

Discussion

The Gheslagh coals are characterized by relatively low amount of sulfur indicating deposition in lacustrine and swamp environments (Goodarzi et al., 2006). The concentration of Ni, V, Sr, Ba and Ce in the Gheslagh coals are

*Corresponding authors Email: gh.shamanian@gu.ac.ir

relatively higher than the Shahroud and Lushan coals (Yazdi and Esmailnia, 2004). The comparison of the concentration of trace elements in the Gheshlagh coals and worldwide concentrations (Swaine, 1990) indicates the enrichment of Ni and Pb in the Gheshlagh coals. Gluskoter et al. (1977) used a value of six times the Clarke value to determine if an element is enriched in the whole coal. By these criteria, the concentration of Ni and Pb are enriched in the Gheshlagh coals when compared with the Clarke values.

Generally, the distribution and abundance of reacting mineral species in the coal mines can be used to predict the extent of acidification and neutralization in particular area. In the Gheshlagh coal mine, the frequency of pyrite is moderately low. In addition, the availability of carbonates in the host rocks provides buffering capacity for acid produced by oxidation in this area. This investigation has led to a better understanding of coals and their roof and floor lithologies in the Gheshlagh coal mine.

Acknowledgment

The authors wish to thank the Iran Minerals Production and Supply Company (Project No. 30716) and the Department of Geology, Faculty

of Sciences at the Golestan University for financial assistance and all necessary resources needed to carry out this research.

References

- Bullock J.H., Cathcard J.D., and Betteron W.J., 2002. Analytical methods utilized by the United States Geological Survey for the analysis of coal and coal-combustion products, United States Geological Survey, Denver, Report 389, 15 pp.
- Gluskoter H.J., Ruch R.R., Miller W.C., Cahill R.A., Dreher G.B., and Kuhn J.K., 1977. Trace elements in coal: occurrence and distribution, Illinois State Geological Survey, Illinois, Report 499, 115 pp.
- Goodarzi F., Sanei H., Stasiuk L.D., Bagheri-Sadeghi H., and Reyes J., 2006. A preliminary study of mineralogy and geochemistry of four coal samples from northern Iran. *International Journal of Coal Geology*, 65 (1-2) 35-50.
- Swaine D. J., 1990. Trace Elements in Coal, Butterworths, London, 278 pp.
- Yazdi M., and Esmailnia A.S., 2004. Geochemical properties of Coal in the Lushan Coalfield of Iran, *International Journal of Coal Geology*, 60 (1) 73-79.