

# ژئوشیمی و ارزیابی فرآوری عناصر سمی در زغال سنگ پروده، طبس

محمدعلی رجبزاده<sup>۱</sup>، زهره قربانی<sup>۲</sup>، مرتضی جلالی فرد<sup>۳</sup> و مهدی محمدزاده<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشیار، بخش علوم زمین، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، بخش علوم زمین، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

<sup>۳</sup> کارشناسی ارشد، معدن زغالسنگ طبس، طبس، ایران

<sup>۴</sup> کارشناسی ارشد، بخش علوم زمین، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۶/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۲/۰۲

## چکیده

ناحیه زغال‌دار پروده با گستره ۱۲۰۰ کیلومتر از جمله حوضه‌های مهم زغال‌دار خاور ایران مرکزی است که در ۷۵ کیلومتری جنوب خاوری شهرستان طبس و میان طول‌های جغرافیایی ۱۵' ۵۶" تا ۴۵' ۵۶" و عرض‌های جغرافیایی ۵۰' ۳۲" تا ۰۵' ۳۳" قرار گرفته است. ذخایر زغال این ناحیه با سن تریاس بالایی از نوع بیتومینی با مواد فرار کم، خاکستر بالا و گوگرد متوسط تا بالا هستند که در بخش قدیر سازند نایبند جای گرفته‌اند. گوگرد پیریتی مهم‌ترین گونه شیمیایی گوگرد در لایه‌های زغالی است. کانی‌های کوارتز، ایلیت-کانولینیت، پیریت و کلسیت به ترتیب فراوان‌ترین کانی‌های سیلیکاتی، رسی، سولفیدی و کربناتی در لایه‌های زغالی منطقه هستند. نسبت به پوسته بالایی، عناصر اصلی غنی‌شدگی و عناصر فرعی تهی‌شدگی نشان می‌دهند. به جز عناصر کادمیم، لیتیم، آرسنیک و روی، لایه‌های زغال‌دار پروده با زغال‌سنگ‌های جهان و آمریکا همانند هستند. بر پایه شاخص غنی‌شدگی، عناصر آرسنیک، کبالت و کادمیم در رأس آلاینده‌های منطقه پروده قرار دارند. همبستگی بالای میان میزان خاکستر و عناصر سیلیسیم، پتاسیم و آلومینیم نشانگر ترکیب آلومینوسیلیکاتی خاکستر است. همچنین همبستگی بالای میان مقدار کادمیم، کبالت و آرسنیک با آهن و گوگرد پیریتی، تجمع این عناصر را در فاز سولفیدی نشان می‌دهد که در تحلیل آماری عاملی و خوشه‌ای نیز تأیید می‌شود. شاخص جداسازی نشانگر افزودگی لیتیم، مولیبدن، مس و سرب در بخش کنسانتره است و نشان می‌دهد که این عناصر دارای پیوند آلی با بخش ماسرالی زغال هستند. بقیه عناصر فرعی به دلیل حضور در بخش کانیایی زغال‌سنگ در خاکستر غنی شده‌اند.

**کلیدواژه‌ها:** ژئوشیمی عناصر سمی، زغال‌سنگ، قابلیت فرآوری، پروده، طبس.

\*نویسنده مسئول: محمدعلی رجبزاده

E-mail: rajabzad@susc.ac.ir

## ۱- پیش‌نوشتار

انواع زغال‌سنگ از دفن منابع مختلف گیاهی در حوضه‌های رسوبی در بازه‌های زمانی گوناگون تاریخ زمین مشتق شده و در معرض رویدادهای مختلف زمین‌شناسی قرار گرفته‌اند. این گوناگونی در منشأ، زمان و مکان تشکیل زغال‌سنگ، چالشی در برابر ایجاد یک تصویر منسجم از ژئوشیمی زغال‌سنگ و فرایندهایی است که ترکیب شیمیایی زغال‌سنگ را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Orem & Finkelman, 2004). در بیشتر تقسیم‌بندی‌ها، زغال‌سنگ به عنوان یک سامانه دو جزئی که شامل مواد آلی یا بخش ماسرالی و مواد غیرآلی یا بخش کانیایی است در نظر گرفته می‌شود (Gürdal, 2011; Liu et al., 2005; Vassileva & Vassileva, 1996). بخش ماسرالی پایه شناخت ماهیت زغال‌سنگ (نوع و رتبه) و تعیین ارزش آن برای کاربردهای مختلف است. بخش کانیایی نیز نوع ناخالصی از زغال‌سنگ را نشان می‌دهد که از راه‌های گوناگون جایگزین بخش آلی می‌شوند و پس از سوختن زغال‌سنگ به شکل خاکستر باقی می‌مانند. اگر چه بخشی از مشکلات مرتبط با کاربرد زغال‌سنگ، از ماسرالی این سوخت فسیلی مشتق می‌شود ولی بیشتر این مشکلات مربوط به بخش کانیایی آن است (Dai et al., 2008 b). میزان و چگونگی حضور عناصر بالقوه سمناک موجود در زغال‌سنگ و چگونگی آزادسازی آنها در همه فعالیت‌های معدنکاری شامل استخراج، فرآوری و نیز مصرف زغال‌سنگ مستلزم شناسایی کامل بخش کانیایی آن است. شناخت بهتر ماده کانیایی زغال و حالت حضور عناصر می‌تواند تصویر آشکاری از رفتار عناصر کمیاب را طی احتراق به ما بدهد (Vassilev et al., 1995; Ward, 2002). رفتار عناصر بالقوه سمناک زیست محیطی شامل Sb, As, Ba, Be, B, Cd, Cl, Cr, Co, Cu, F, Pb, Hg, Mn, Ni, Mo, P, Se, Ag, Tl, Th, Sn, V, U, Zn در زغال طی فرآوری و فرایند احتراق آن به‌وسیله غلظت و حالت حضور آنها کنترل می‌شود (Swaine, 2000). معمولاً عناصر کمیاب سولفیددوست با پیریت و فازهای سولفیدی دیگر و عناصر

سنگ‌دوست با کربنات‌ها و کانی‌های رسی همراه هستند (Finkelman, 1995); (Swaine, 1990; Huggins, 2002). همبستگی عناصر با میزان خاکستر زغال‌سنگ نیز اطلاعات مفیدی از نوع پیوند آلی و معدنی و حالت حضور عناصر در زغال به‌دست می‌دهد (Zheng et al., 2008). ژئوشیمی و کانی‌شناسی ذخایر زغال‌سنگ ایران به وسیله پژوهشگران زیادی از جمله زاده‌کیب (۱۳۷۰)، رضوی ارمغانی و معین‌السادات (۱۳۷۲)، یزدی (۱۳۸۲)، (Goodarzi et al., 2006)، (Moore & Esmaeili (2012) و Yazdi (2012) بررسی شده است ولی اطلاعات کمی درباره ژئوشیمی و اثرات زیست‌محیطی زغال‌سنگ به‌ویژه در ناحیه پروده طبس وجود دارد. در این پژوهش افزون بر ارائه داده‌های کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی روی این ذخایر، با استفاده از روش‌های آماری مانند ضریب همبستگی (Correlation Coefficient)، رسم نمودار خوشه‌ای (Clustering Analysis) و تحلیل عاملی (Factor Analysis) و همچنین اندازه‌گیری شاخص غنی‌شدگی (Enrichment Factor) و قابلیت جداسازی (Removability Index) به تعیین حالت حضور عناصر و اثرات زیست محیطی ناشی از فرآوری زغال پرداخته شده است.

## ۲- منطقه مورد مطالعه

### ۲-۱. زمین‌شناسی

در سال ۱۳۵۶ برای اولین بار در گزارشی با عنوان حوضه زغال‌دار طبس، بر طبق اصول علمی، وجود زغال‌سنگ در رسوبات مزوزویک ایران مرکزی به اثبات رسید. بر پایه این مطالعات، محدوده رسوبات زغال‌دار ایران (تریاس- ژوراسیک) در حوضه زغال‌دار طبس مشخص شد و بدین ترتیب وجود ذخایر زغال‌سنگ کک‌شو در نواحی خاور حوضه (پروده و نایبند) مورد توجه قرار گرفت. منطقه پروده با گسترش ۱۲۰۰ کیلومتر میان طول‌های جغرافیایی ۱۵' ۵۶" تا ۴۵' ۵۶" و

غنی از زغال سینه کارهای فعال درون تونل‌ها و به دور از حاشیه سنگ‌های مجاور با رعایت معیارهای نمونه‌برداری کلاسیک کانالی صورت گرفت. برای جلوگیری از برداشت نمونه‌های در معرض هوا (زغال به علت جذب اکسیژن به سرعت اکسید شده و تجزیه می‌شود)، از نمونه برداری از سطح لایه‌های زغالی اجتناب شد. همچنین نمونه‌برداری با رعایت فاصله ۴۰ تا ۵۰ متری از گسل‌ها برای جلوگیری از تغییر کیفیت زغال بر اثر آب‌های زیرزمینی صورت گرفته است. هر نمونه به صورت مخلوطی از نمونه‌های بخش‌های بالایی، مرکزی و زیرین لایه در امتداد مقاطع عمود بر لایه تهیه شد. ۳ نمونه نیز از محصول کنسانتره کارخانه، باطله درشت و باطله نرم زغال سنگ برداشت شد و در کیسه‌های پلاستیکی مخصوص و سبتر قرار داده شدند. نمونه‌ها برای همگن‌سازی در کمتر از مدت ۲۴ ساعت به آزمایشگاه انتقال یافته و در دمای متعارف آزمایشگاه خشک شدند. سپس از الک ۱۰ مش ( $<2\text{mm}$ ) عبور داده شده و توسط هاون آگاتی تا حد ۲۰۰ مش ( $<63\mu\text{m}$ ) پودر شدند (Galan et al., 2008). برای تعیین دقت تجزیه‌های شیمیایی انجام شده ۳ نمونه تکراری از هر لایه و ۲ نمونه تکراری از کنسانتره و باطله نیز تجزیه شدند. تجزیه شیمیایی با استفاده از روش استاندارد ASTM D 4698-13 توسط دستگاه ICP-OES در مرکز تحقیقات فرآوری کرج صورت گرفته است. در این روش با به کارگیری نمونه‌های استاندارد با غلظت معین دستگاه کالیبره می‌شود (جدول ۱).

برای تعیین درجه زغال‌شدگی و کیفیت زغال از تجزیه تقریبی زغال سنگ استفاده شد که شامل اندازه‌گیری درصد رطوبت، خاکستر و مواد فرار می‌شود. برای این اندازه‌گیری‌ها، نمونه‌ها بی‌درنگ پس از نمونه‌برداری با استفاده از روش‌های استاندارد ASTM D 3173-03، ASTM D 3174-02 در آزمایشگاه زغال سنگ طبس مورد ارزیابی قرار گرفتند. در این پژوهش از نتایج مقدار سولفور کل و فرم‌های مختلف گوگرد (پیریتی، سولفاتی و آلی) هر لایه که در گزارشات پژوهشگاه زغال سنگ موجود می‌باشد، استفاده شده است. میزان گوگرد پیریتی هر نمونه برای مطالعات ژئوشیمی طبق استاندارد ASTM D 2492-02 در آزمایشگاه پروده محاسبه شده است. نتایج مربوط به مقادیر کربن، هیدروژن و اکسیژن نیز با استفاده از روش‌های استاندارد ASTM D-3178، D-3179، D-3177 به دست آمده‌اند که مطابق با گزارشات موجود در دفتر فنی معدن هستند (جدول ۲).

مطالعات سنگ‌نگاری و کانی‌شناسی (تعیین نوع ماسرال و کانی‌های موجود) با استفاده از روش میکروسکوپ بازتابی روی مقاطع صیقلی انجام شد. مطالعات کانی‌شناسی با استفاده از روش XRD روی ۵ نمونه در بخش فیزیک دانشگاه شیراز تکمیل شد.

در این مطالعه از روش‌های آماری دو و چندمتغیره مانند ضریب همبستگی، تحلیل خوشه‌ای و تحلیل مؤلفه اصلی استفاده شد که کاربرد زیادی در مطالعه داده‌های چندمتغیره (به‌ویژه در تقسیم‌بندی عناصر) و عوامل مؤثر در پاراژنز آنها دارد. در تحلیل‌های آماری انجام شده از بسته نرم‌افزاری SPSS.19 استفاده شده است.

#### ۴- بحث و بررسی

##### ۴-۱. کانی‌شناسی و سنگ‌نگاری

پیریت کانی اصلی فلزی در زغال‌سنگ‌های مورد مطالعه است. این کانی معمول‌ترین کانی سولفیدی در نمونه‌های زغال سنگ جهان است (Ward, 2002; Kolker, 2012). شرایط کاهشی تورب‌گاه‌ها و فراوانی سولفور آزاد شده در اثر فساد گیاهی، شرایط مطلوبی برای نهشت کانی‌های سولفیدی ایجاد می‌کند که فراوان‌ترین آنها پیریت است. پیریت اولیه، به‌طور معمول در فرم فراموبیدال همراه با مقدار کمی عناصر سولفید دوست ظاهر می‌شود (Orem & Finkelman, 2004). پیریت در زغال‌سنگ‌های پروده به دو صورت حضور دارد. شکل اولیه آن بیشتر به‌صورت فراموبیدال (شکل ۳- الف) و صفحه‌ای (شکل ۳- ب) است که نشان

عرض‌های جغرافیایی ۳۲° ۵۰' تا ۳۳° ۰۵' در ۷۵ کیلومتری جنوب خاور شهر طبس در خراسان جنوبی به عنوان یکی از مهم‌ترین ذخایر زغال‌دار ایران شناخته می‌شود (یزدی، ۱۳۸۲). منطقه مورد مطالعه دارای اقلیم کویری با آب و هوای خشک قاره‌ای است. بیشترین و کمترین دمای به ثبت رسیده در ایستگاه هواشناسی، ۴۶/۵ و ۶/۵ است. مقدار رطوبت هوا و بارش ناچیز و بدون جریان دائمی رودخانه‌ای است. این ناحیه از دید زمین‌شناسی ساختاری یک تاقدیس نامتقارن و کشیده با محور خاوری-باختری است (شکل ۱) که از شمال به دشت رسی کهن کاملاً هموار کویری، از جنوب به ارتفاعات نه‌چندان مرتفع ژوراسیک (آب حاجی)، از خاور به رشته کوه شتری و از باختر به ارتفاعات ناحیه کلمرد (کمر مهدی) محدود می‌شود. ۵ لایه زغال‌دار B1، B2، C1، C2 و D در منطقه شناسایی شده‌اند که در میان آنها لایه‌های B1، B2 و C1 لایه‌های قابل استخراج تا ۹۸ درصد قابلیت بهره‌برداری هستند. مهم‌ترین سنگ‌های رسوبی منطقه مورد مطالعه در محدوده سازند نایبند با سن تریاس پسین قرار می‌گیرند که خود دارای ۵ بخش است که به ترتیب از پایین به بالا عبارتند از: بخش گلکان (TRn1) با ستبرای ۹۵۰ متر شامل شیل‌های سبز خاکستری با تناوبی از ماسه‌سنگ‌های آرکوزی، بخش بیدستان (TRn2) با ستبرای ۱۲۰ متر متشکل از شیل و ماسه‌سنگ ریزدانه کوارتزی و لایه‌های پراکنده آهکی، بخش حوض شیخ (TRn3) با ۲۴۰ متر ستبرای شامل تناوب لایه‌های شیل و ماسه‌سنگ‌های کوارتزی-فلدسپاری همراه با مارن و گرهک‌های آهن، بخش حوض خان (TRn4) با ۲۳۰ متر ستبرای شامل تناوب لایه‌های شیل، مارن، سنگ آهک‌های آلیتی با لایه‌های زغالی قابل استخراج و در پایان، بخش قدیر (TRn5) شامل ماسه‌سنگ، شیل‌های فسیل‌دار با میان‌لایه‌هایی از سنگ آهک و لایه‌های زغالی و ستبرای ۱۰۱۷ متر (رضوی ارمغانی و معین‌السادات، ۱۳۷۲).

##### ۲-۲. کارخانه زغال‌شویی پروده طبس

کارخانه زغال‌شویی پروده طبس اولین کارخانه زغال‌شویی تمام مکانیزه ایران است که با هدف کاهش ناخالصی‌های همراه زغال سنگ و با ظرفیت تولید سالانه ۷۵۰۰۰۰ تن کنسانتره زغال سنگ در سال ۱۳۸۶ در فاصله یک کیلومتری از معدن زغال سنگ نصب و راه‌اندازی شد. زغال سنگ معادن مختلف مانند مرکزی (لایه C1)، شماره ۱ (لایه C1)، نگین ۲ (لایه B1-C1-B2)، نگین ۳ (لایه B2)، معدن جو (لایه B2) و معادن کوچک مجاور، خوراک کارخانه را تشکیل می‌دهد ولی دارای محدودیت‌هایی از دید میزان خاکستر و پلاستومتری است؛ به‌طوری که خوراک ورودی باید در محدوده ۲۵ تا ۴۰ درصد خاکستر و پلاستومتری بالای ۱۵ میلی‌متر باشد. کنسانتره تولیدی نیز به‌طور میانگین دارای ۹/۵ درصد خاکستر، پلاستومتری ۱۵ میلی‌متر، مواد فرار ۳۰ تا ۳۲ درصد، نمره کک ۵ تا ۶، رطوبت حقیقی ۱/۷۲ و رطوبت ظاهری ۱۱ درصد است (رضایی، ۱۳۸۰). باطله حاصل از کارخانه به دو شکل دانه‌درشت (Waste) و ریزدانه (Tailing) به ترتیب در سد باطله (Waste dump) و سد رسوبگیر (Tailing dam) انباشته می‌شوند. باطله‌های درشت به محلی در ۲ کیلومتری کارخانه زغال‌شویی منتقل و انبار و باطله‌های ریز در فضای پشت کارخانه زغال‌شویی رها می‌شوند (شکل ۲).

##### ۳- روش مطالعه

در نمونه‌برداری برای انجام هرگونه مطالعه کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی زغال سنگ از دو موضوع می‌باید اطمینان حاصل کرد:

- ۱) نمونه‌های برداشت شده باید شاخص کل لایه زغال سنگ باشند.
- ۲) هیچ‌گونه تغییر شیمیایی و فیزیکی در هنگام نمونه‌برداری، نگهداری و پیش از تجزیه شیمیایی در نمونه رخ نداده باشد.

برای این منظور در مجموع تعداد ۱۲ نمونه شامل ۹ نمونه از لایه‌های زغال سنگ B1، B2 و C1 مجموعه معادن پروده برداشت شد. نمونه‌برداری از لایه‌های سبتر و

پیریتی سین‌ژنتیک بیشترین مقدار را در میان انواع دیگر گوگرد داراست (جدول ۲). نمودار ون کرون یک ابزار مفید در بیان روند تکامل و بلوغ مواد آلی زغال‌سنگ است که در سال ۱۹۵۷ توسط Van Krevelen با استفاده از نسبت H/C در برابر O/C به دست آمد (Weidendorfer et al., 2010). موقعیت داده‌های مربوط به نمونه‌های زغال‌سنگ پروده روی نمودار Van-Krevelen، نشان می‌دهد که نمونه‌های مورد مطالعه در مرز زغال‌های بی‌تیمینوس قرار دارند که متناسب با ماهیت و منشأ تعیین شده زغال‌سنگ‌های پروده در مطالعات پیشین است (شکل ۴).

غلظت عناصر در نمونه‌های زغال منطقه پروده با میانگین غلظت عناصر در زغال‌سنگ‌های جهان، آمریکا و پوسته بالایی مقایسه شده‌اند (جدول ۱). نتایج نشان می‌دهند که به‌جز عناصر V و Ni (در لایه B2) و Cd و Li (در همه نمونه‌ها) که نسبت به زغال‌سنگ‌های جهان افزودگی نشان می‌دهند و عناصر Zn و As که نسبت به زغال‌سنگ‌های آمریکا کاهیدگی دارند، همه عناصر در محدوده غلظت عناصر زغال‌سنگ‌های جهان و آمریکا هستند. نتایج حاصل از مقایسه غلظت عناصر در پوسته بالایی و زغال‌سنگ‌های پروده نشانگر تهي شدگی شدید زغال‌سنگ‌های پروده از عناصر اصلی بوده که به رقیق شدن آنها در مواد آلی و محدود شدن کانی‌های ایجاد شده در هنگام زغال‌سنگ‌شدگی مربوط است. در برابر آن، غنی‌شدگی قابل توجهی در عناصر دیگر نشان می‌دهند که می‌توان آن را به جذب سطحی عناصر توسط مواد آلی و کانی‌های رسی نسبت داد. این موضوع در مورد عناصری مانند آرسنیک، کبالت و کادمیم کاملاً شاخص است. تغییرات عناصر K و Si در نمونه‌های لایه‌های مختلف زغال‌سنگ کم است. لایه C1 نسبت به دیگر لایه‌ها در عناصر Ca و Mg افزودگی نشان می‌دهد. همچنین لایه B1 در مقدار Fe نسبت به لایه‌های دیگر برتری دارد. عناصر اصلی در باطله بیشینه و در کسانتره، کمینه مقدار خود را دارند. مقدار گوگرد پیریتی در لایه B1 از دیگر لایه‌ها بیشتر است که سبب افزودگی عناصر سولفید دوست As، Cd و Co در این لایه شده است. عملکرد بالای کارخانه زغال‌شویی سبب حذف گوگرد پیریتی زغال‌های خوراک کارخانه از بیشینه ۴/۰۶ به ۰/۰۹ و به دنبال آن کاهش قابل توجه عناصر بالقوه سمناک As، Cd و Co در کسانتره و غنی‌شدگی آنها در باطله می‌شود. مقدار خاکستر در کسانتره ۹/۲ و در باطله به ۶۱ درصد می‌رسد. بیشترین مقدار آن مربوط به لایه B2 است. مقدار عناصر Li، Mo، Pb و Cu در زغال فرآوری شده و مقدار همه عناصر فرعی در باطله نسبت به زغال خوراک کارخانه بالاتر است (جدول ۱).

#### ۴-۳. ضریب غنی‌شدگی

بر پایه ضریب غنی‌شدگی می‌توان مقدار یک عنصر را نسبت به غلظت طبیعی در پوسته زمین سنجید. همچنین برای ارزیابی غنی‌شدگی نسبت به محیطی دیگر استفاده می‌شود (Loska et al., 1995). این ضریب از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$EF = \frac{(X/Re)_{\text{sample}}}{(X/Re)_{\text{background}}}$$

در این رابطه EF ضریب غنی‌شدگی، RE عنصر مرجع و X عنصر مورد نظر است؛ جدیدترین تقسیم‌بندی این شاخص توسط (Chen et al., 2007) ارائه شده است (جدول ۴). با در نظر گرفتن میزان تیتانیم به دلیل غلظت بالا و تغییرات ناچیز آن در تغییرات ناشی از هوازگی پوسته زمین، در این مطالعه از تیتانیم به عنوان عنصر زمینه مرجع استفاده شد. بر پایه این روش دیده می‌شود که عناصر آرسنیک، کادمیم و کبالت با غنی‌شدگی بالایی ۵۰ در رأس آلاینده‌های نمونه‌های زغال قرار می‌گیرند. همان‌گونه که در جدول ۵ نیز نشان داده شده است، کادمیم بالاترین غنی‌شدگی را دارد (بالاتر از ۵۰) و بیشتر در بخش باطله تجمع پیدا می‌کند. عناصر مولیبدن و لیتیم با غنی‌شدگی شدید (میان ۱۰ تا ۲۵) در درجه بعدی هستند با این تفاوت که بیشترین مقدار غنی‌شدگی این عناصر در کسانتره است و عناصر منگنز، کروم، مس، وانادیم، روی، نیکل و سرب افزودگی متوسط تا ناچیزی را نشان می‌دهند.

می‌دهد همراه با ماسرال در طی زغال‌شدگی ایجاد شده است. شکل ثانویه این کانی که دارای فراوانی کمتری است به‌صورت رشته‌ای و با پرکردن شکستگی‌ها (شکل ۳-پ) در زغال دیده می‌شود. پیریت در نمونه‌های باطله درشت و نرم به‌صورت فاز اصلی کانیایی و در کسانتره نیز به مقدار کم حضور دارد. با توجه به اندازه ذرات زغالی (حدود ۵۰۰ میکرون) که به‌صورت کیک زغالی فرآوری می‌شوند و محدوده دانه‌بندی پیریت‌های منطقه (از کمتر از ۲۰ تا ۷۵۰ میکرون) میزان زیادی از پیریت‌های اولیه با اندازه‌های کمتر از ۵۰ میکرون و درگیر در ماسرال زغال‌سنگ به کسانتره منتقل می‌شود و کارخانه زغال‌شویی طی فرآوری زغال‌سنگ توانایی جداسازی این پیریت‌های اولیه را ندارد. کانی‌های ثانویه پیریت که بیشتر در سطوح میان ذرات زغالی دیده می‌شوند احتمالاً به‌طور کامل در فرایند زغال‌شویی از کسانتره حذف می‌شوند.

کوارتز از کانی‌های اصلی دیگر نمونه‌های زغال‌سنگ پروده طبس است که بیشتر با منشأ آواری حضور دارد و به‌شکل دانه‌های گرد شده بسیار ریز با مواد آلی تجمع پیدا کرده است. کوارتز با منشأ آلی که حاصل دگرسانی سین‌ژنتیک کانی‌های آلومینوسیلیکاتی است (Ward, 2002) نیز در نمونه‌ها به میزان کمتر دیده می‌شود. از آنجا که این کانی در نمونه کسانتره نیز وجود دارد، نشان می‌دهد که فناوری زغال‌شویی در پروده توانایی حذف کامل آن را ندارد. مسکویت کانی اصلی دیگری است که فقط در نتایج XRD در نمونه‌های زغال سنگ قابل تشخیص می‌باشد.

کلسیت فراوان‌ترین کانی کربناتی زغال‌سنگ پروده است که به‌صورت پرشدگی و اپی‌ژنتیک در نمونه‌ها دیده می‌شود. این کانی کمتر به‌صورت دانه‌های آواری حضور دارد. علت آن تجزیه آسان در محیط اسیدی تورب‌گاه‌ها عنوان شده است (Dai et al., 2008b). کلسیت در نمونه زغال کسانتره یافت نشد چرا که روش‌های آماده‌سازی به‌طور کامل آن را حذف می‌کنند. آنکریت-دولومیت و سروزیت از دیگر کانی‌های کربناتی هستند که به ترتیب در نمونه زغال و کسانتره با استفاده از داده‌های XRD شناسایی شده‌اند. داده‌های بدست آمده همانند نتایج بسیاری از مناطق دیگر دنیا هستند (Dai et al., 2008a; Dai & Chou, 2007; Ward, 2002). اندازه ریزبلورها در مقاطع میکروسکوپی صیقلی از یک سو و ناهمگنی و تشخیص دشوار بسیاری از کانی‌ها از سوی دیگر، اندازه‌گیری میزان کلی کانی‌ها را به‌طور مستقیم در زیر میکروسکوپ دشوار می‌سازد.

در مطالعات کانی‌شناسی به روش XRD افزون بر تأیید کانی‌های دیده شده در مقاطع میکروسکوپی، کانی‌های رسی نیز شناسایی شدند که در نمونه‌های زغال‌سنگ بسیار معمول هستند (Ward, 2002). ایلیت و کائولینیت فراوان‌ترین کانی‌های رسی هستند که احتمالاً از هوازگی مواد آلی مانند کانی‌های فلدسپار و میکا مشتق شده‌اند. مونت‌موریلونیت نیز از دیگر کانی‌های رسی منطقه است که در نمونه‌های باطله یافت شد. کانی‌های هماتیت، گوتیت و هالیت نیز به‌صورت جزئی در نمونه‌های مورد مطالعه دیده شدند. میزان حضور کانی‌ها با استفاده از محاسبات نیمه کمی به روش XRD در نمونه‌های مورد مطالعه در جدول ۳ آورده شده است.

مهم‌ترین ماسرال مشاهده شده در مطالعه پتروگرافی نمونه‌های زغال‌سنگ از نوع ویتربینیت است که ترکیب اصلی زغال‌سنگ‌های هوموسی است و جزء روشن زغال‌سنگ را تشکیل می‌دهد. به میزان کمتری نیز ماسرال فوزینیت یافت شد که نشانگر قرارگیری هوموس و بافت گیاهی پس از مرحله زغال‌شدگی است (شکل ۳-ت).

#### ۴-۲. ژئوشیمی

لایه‌های زغال‌سنگ پروده دارای میانگین رطوبت ۰/۷ تا ۱/۶ درصد هستند. مقدار خاکستر، مواد فرار و گوگرد کل این لایه‌ها نیز به ترتیب ۱۹/۲ تا ۴۲/۵، ۲۱/۲ تا ۲۹/۸ و ۱/۷۸ تا ۲/۰۸ درصد است. بنابراین زغال‌سنگ این منطقه در گروه زغال‌سنگ‌های نوع خاکستر بالا، مواد فرار کم و گوگرد متوسط تا بالا رده‌بندی می‌شود. گوگرد

#### ۴-۴. تحلیل آماری در تعیین حالت حضور عناصر

- **ضریب همبستگی:** ارتباط غلظت عناصر در زغال سنگ با میزان خاکستر آن، می تواند اطلاعات مهمی از مقدار تمایل پیوندی (آفینیتی) آلی یا معدنی عناصر موجود در زغال سنگ فراهم کند (Foscolos et al., 1989; Goodarzi, 1988; Kortsenski & Sotirov, 2002). به طور معمول چنانچه غلظت یک عنصر تقریباً در یک سطح همانند حفظ و یا میزان آن با افزایش مقدار خاکستر کاهش یابد پیوند آن با ماده آلی در نظر گرفته می شود و در برابر آن چنانچه مقدار غلظت آن در زغال سنگ با افزایش میزان خاکستر افزایش یابد، عنصر دارای آفینیتی معدنی است و تمرکز آن در زغال سنگ مرتبط با بخش کانیایی زغال خواهد بود (Kortsenski & Sotirov, 2002).

در نمونه های زغال سنگ پروده طبس، همبستگی بالای عناصر سیلیسیم، آلومینیم و پتاسیم با خاکستر نشان دهنده ترکیب آلومینوسیلیکاتی خاکستر است و افزون بر آن فراوانی کانی های کوارتز، ایلیت و کائولینیت را در لایه های زغال دار منطقه تأیید می کند. همبستگی عناصر کادمیم، آرسنیک و کبالت با گوگرد پیریتی و آهن بیانگر تجمع این عناصر در فاز سولفیدی به ویژه همراه با پیریت است. عدم همبستگی عناصر سرب، مس، مولیبدن و لیتیم با میزان خاکستر و دیگر فازهای کانیایی نشان دهنده پیوند آلی این عناصر با بخش ماسرال زغال سنگ است (جدول ۶).

- **خوشه های کردن:** این روش یک فرایند رده بندی غیر کنترلی است که مواد مورد بررسی را برحسب میزان همانندی یا تفاوت، خوشه بندی می کند. با توجه به نمودار خوشه های حاصل، عناصر در سه شاخه اصلی قرار می گیرند: شاخه اول عناصری هستند که میل ترکیبی زیادی با خاکستر دارند و معرف کانی های رسی و سیلیکاتی هستند (آفینیتی معدنی) و شامل آلومینیم، سیلیسیم، نیکل، وانادیم، کروم و روی می شوند. شاخه دوم عناصر سولفید دوستی هستند که در شبکه کانی های سولفیدی شرکت و با گوگرد پیریتی همبستگی دارند و شامل کبالت، کادمیم، آرسنیک، گوگرد و آهن می شوند و در پایان شاخه سوم عناصری را دربر می گیرد که آفینیتی آلی دارند و با پیوند در ماسرال دارای کمترین ارتباط با خاکستر هستند. این شاخه شامل لیتیم، مولیبدن، سرب و مس می شود (شکل ۵).

- **آزمون تحلیل عاملی:** تحلیل عاملی یا تجزیه فاکتوری روشی برای بررسی و مطالعه همزمان تغییرات متغیرها در یک نقطه و بازتابی از چگونگی تغییرات آنهاست (Davis, 1986). فرض بنیادین در این روش، وجود ارتباط میان متغیرهای کنترل کننده است که در قالب یک فاکتور در یک مدل فرضی ظاهر می شوند (یوسفی و کاکایی، ۱۳۸۵). طبق این آزمون سه مؤلفه شناسایی شدند که عناصر در ارتباط با آنها قرار دارند (شکل ۶ و جدول ۷). مؤلفه ۱ شامل عناصری می شود که با زغال سنگ پیوند معدنی و با خاکستر همبستگی بالایی دارند و در آن تغلیظ می شوند (V- Ni- Cr- Zn- Si- Al- K). مؤلفه ۲ شامل عناصری است که در کانی های سولفیدی به ویژه پیریت تجمع پیدا می کنند و با گوگرد پیریتی همبستگی بالا دارند (Co- As- Cd). مؤلفه ۳ عناصر در پیوند آلی با ماسرال زغال سنگ را دربر می گیرد و در فرایند احتراق و خاکسترسازی از زغال سنگ جدا نمی شوند (Pb- Mo- Cu- Li).

#### ۴-۵. قابلیت جداسازی

برای تعیین اثرات زیست محیطی کارخانه زغال شویی پروده از شاخصی به نام قابلیت جداسازی استفاده شده است. این شاخص میزان کاهش عناصر را طی فرایند شستشوی زغال سنگ با استفاده از رابطه زیر تعیین می کند:

$$RI = \frac{\text{غلظت عنصر در زغال سنگ خام}}{\text{غلظت عنصر در باطله یا محصول}}$$

اگر شاخص R یک عنصر منفی باشد نشان دهنده غنی شدگی و اگر مثبت باشد نشانگر تهی شدگی آن عنصر در باطله یا محصول کارخانه است (Wang et al., 2006). شاخص R برای میانگین نمونه های زغال سنگ، با محصول و باطله کارخانه مقایسه شدند. نتایج نشان می دهد که بیشتر عناصر در میانگین لایه های استخراج شده در منطقه پروده نسبت به محصول کارخانه مثبت و نسبت به باطله کارخانه منفی هستند. این امر به روشنی نشان دهنده تهی شدگی عناصر در محصول و غنی شدگی آنها در باطله است (شکل ۷). چنانچه عنصری در محصول غنی شده باشد، در آن صورت آن عنصر، پیوندی قوی با ماسرال های زغال سنگ دارد و با روش های متداول شستشوی زغال سنگ نمی توان آن را از زغال سنگ جدا کرد. به جز عناصر مس، لیتیم، مولیبدن و سرب بقیه عناصر در فاز کانیایی غنی شده اند که این عملکرد به نسبت خوب کارخانه در جداسازی بیشتر آلاینده ها را نشان می دهد و مانع از آلودگی در مصارف بعدی کسانتره می شود (جدول ۸).

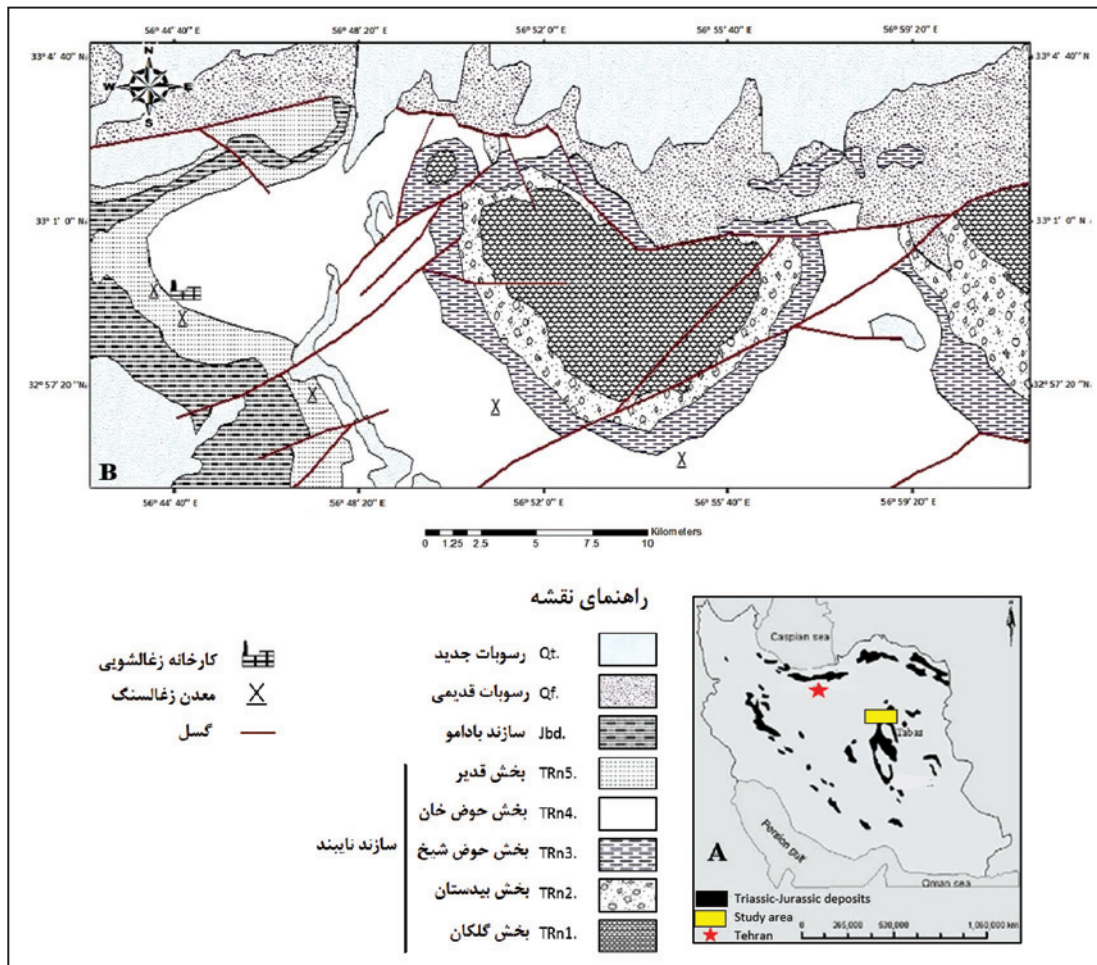
#### ۵-۵. نتیجه گیری

ناحیه زغالی پروده از جمله مهم ترین ذخایر زغالی ایران، در ناحیه طبس و در خاور ایران مرکزی است. ذخایر زغال سنگ پروده دارای میانگین رطوبت پایین، خاکستر بالا، مواد فرار کم و گوگرد متوسط تا بالا هستند. ایلیت و کائولینیت، پیریت سین ژنتیک، کلسیت و کوارتز فراوان ترین کانی های بخش کانیایی زغال سنگ هستند. گوگرد سولفیدی در نمونه های زغال سنگ بالا و در لایه B1 از همه بیشتر است. میانگین غلظت عناصر فرعی به جز در مورد Cd، Ni، As و Zn در لایه های زغالی پروده با زغال سنگ های جهان و آمریکا همانند است. کاهش غلظت عناصر اصلی نسبت به پوسته بالایی به رقیق شدن توسط مواد آلی و محدود شدن کانی های ایجاد شده در هنگام زغال سنگ شدگی مربوط می شود و غنی شدگی در عناصر فرعی به علت جذب سطحی آنها توسط مواد آلی و کانی های رسی است. عناصری مانند آرسنیک، کبالت و کادمیم با غنی شدگی بیشتر از ۵۰ در رأس آلاینده های منطقه پروده قرار دارند. بیشتر عناصر (به جز مس، لیتیم، سرب و مولیبدن) با خاکستر رابطه خوبی نشان می دهند که این نتایج توسط ضرایب همبستگی نیز تأیید می شود. این امر نشان می دهد که بیشتر عناصر در ماده کانیایی زغال سنگ حضور دارند. نتایج تجزیه خوشه های و تحلیل عاملی، عناصر را در سه گروه قرار می دهد. عناصر گروه اول (Si- Al- K- V- Ni- Cr- Zn) همبستگی بالایی با خاکستر و پیوند معدنی دارند. عناصر گروه دوم (As- Co- Cd) در کانی های سولفیدی تجمع پیدا کرده اند و با توجه به سین ژنتیک بودن بیشتر پیریت ها، دارای آفینیتی آلی - معدنی هستند. فلزات گروه سوم (Pb- Mo- Li- Cu) نیز در پیوند با مواد آلی و ماسرال ها هستند و ضمن زغال شویی از زغال سنگ جدا نمی شوند. طبق شاخص R، عناصر مولیبدن، لیتیم و مس پیوند آلی با ماسرال زغال سنگ دارند و در بخش کسانتره تغلیظ می شوند و بقیه عناصر طی فرایند زغال شویی از محصول پایانی حذف می شوند و در باطله کارخانه تجمع می یابند.

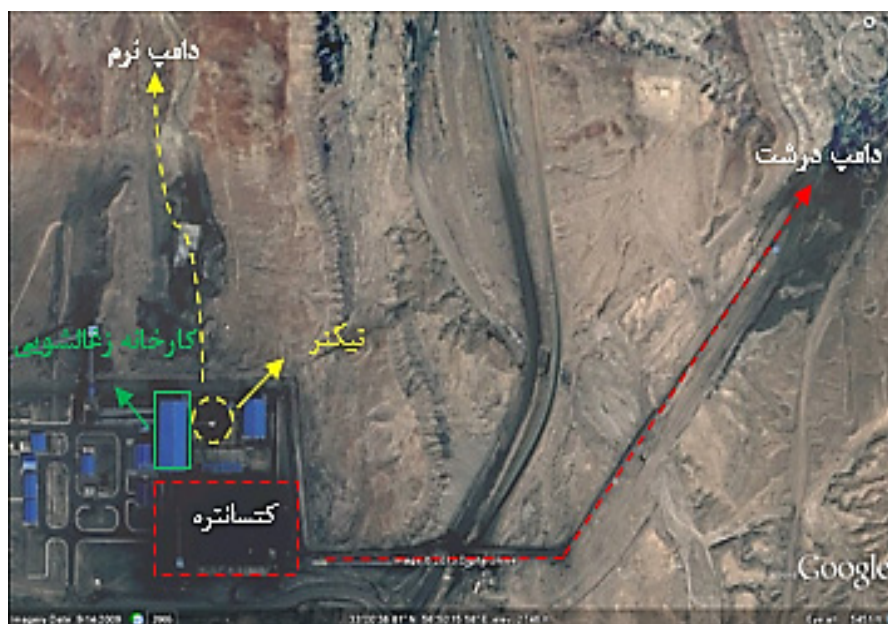
#### سپاسگزاری

نگارندگان این پژوهش از مسئولین پژوهشکده زغال سنگ طبس، مرکز پژوهشی محیط زیست و کارخانه زغال شویی پروده طبس به خاطر همکاری های ارزنده شان در طی مطالعات میدانی و همچنین از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه شیراز و سازمان توسعه و نوسازی معادن (ایمیدرو) برای حمایت های مالی سپاسگزاری می کنند.

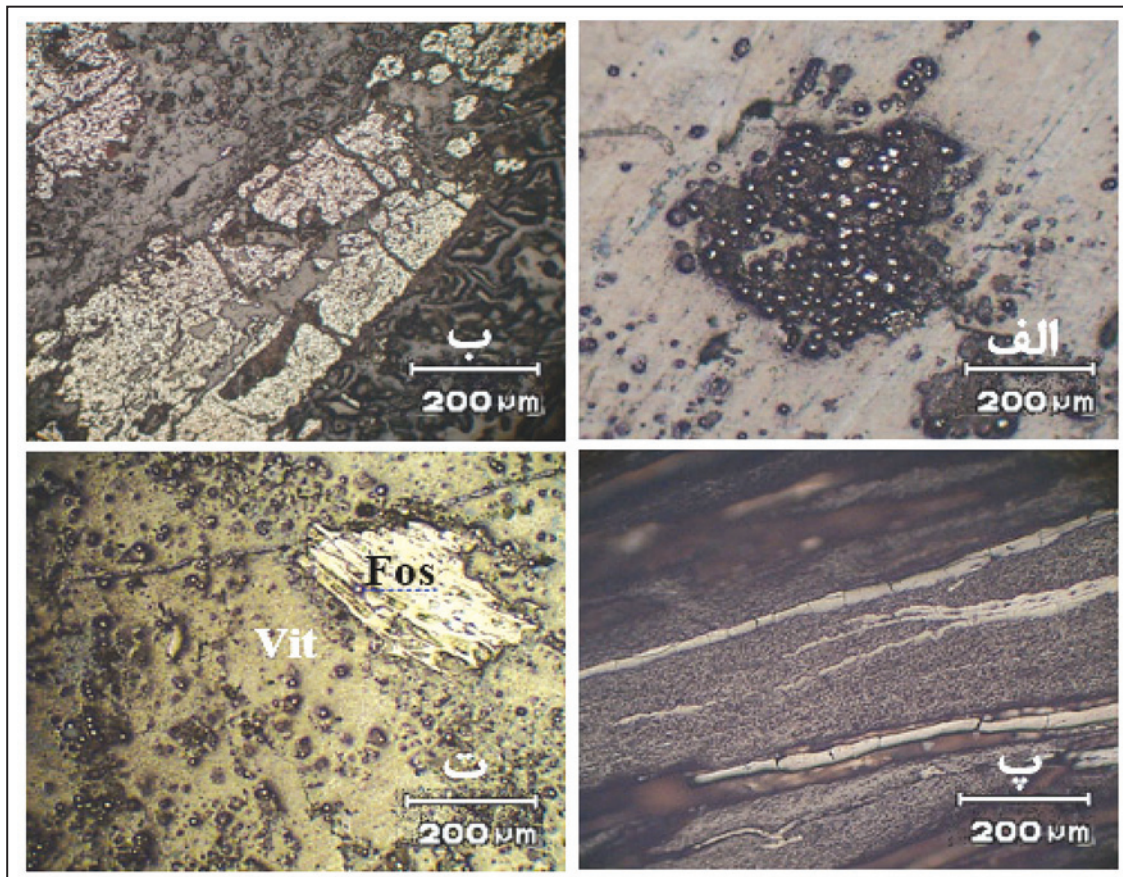




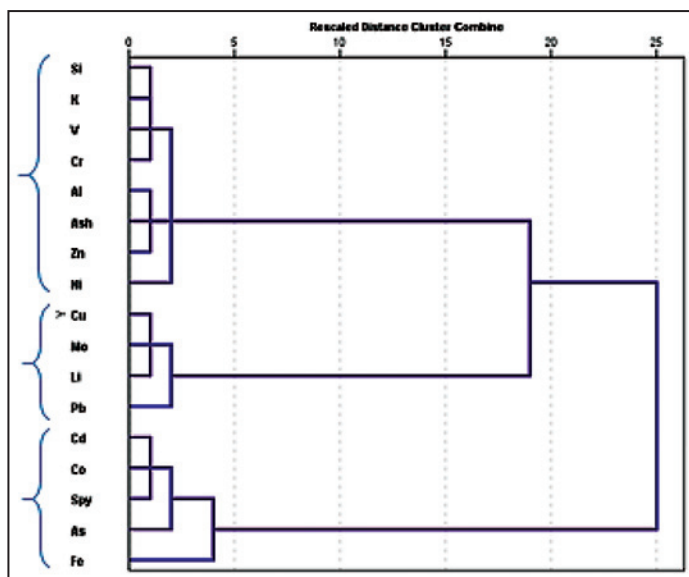
شکل ۱- (A) بخش‌های زغال‌دار ایران و معادن زغال‌سنگ پروده طبس در ایران مرکزی (Shariatnia, 1994)؛ (B) نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه.



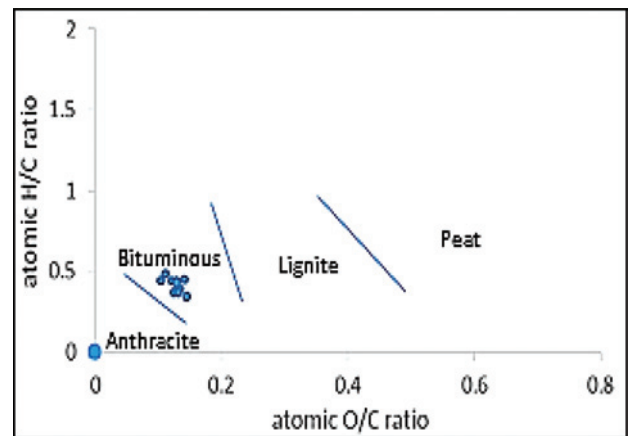
شکل ۲- تصویر هوایی از موقعیت کارخانه زغالشویی پروده و محل دامپ دانه‌درشت و دانه‌ریز.



شکل ۳- انواع ماسرال و گونه‌های پیریت در زغال سنگ پروده طبس (در نور بازتابی RL). الف) پیریت فراموبیدال؛ ب) پیریت صفحه‌ای؛ پ) پیریت رشته‌ای؛ ت) ماسرال ویترینیت (Vit) و فوزینیت (Fos).

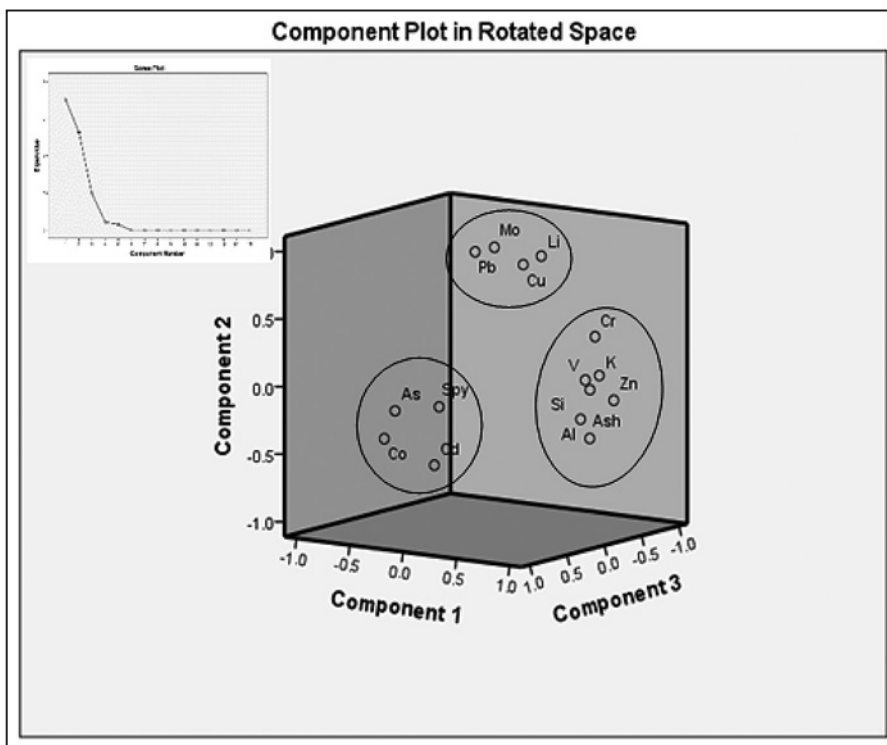


شکل ۵- تجزیه خوشه‌ای و تعیین ارتباط میان عناصر مختلف در نمونه‌های زغال سنگ.

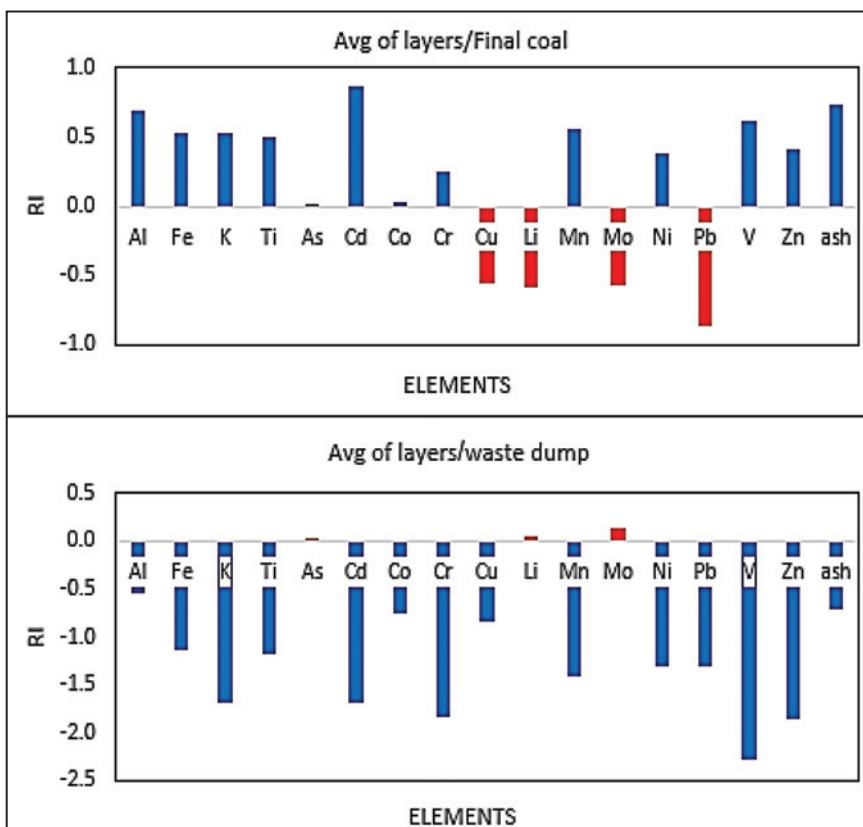


شکل ۴- موقعیت نمونه‌های زغال سنگ پروده روی نمودار Van-Krevelen (برگرفته از Weidendorfer et al., 2010).





شکل ۶- نمودار سه بعدی تحلیل مؤلفه اصلی برای عناصر مورد مطالعه در زغال سنگ پروده.



شکل ۷- نمودار تھی شدگی و غنی شدگی عناصر در کنسانتره و باطله طبق شاخص R.

جدول ۱- نتایج تجزیه شیمیایی نمونه‌های مورد مطالعه از منطقه معدنی پروده طبس (\*: نمونه تکراری). WWC (کلارک زغال سنگ‌های جهان برگرفته از US coals + Swaine (1990) (میانگین غلظت عناصر در زغال سنگ‌های آمریکا برگرفته از Finkelman, 1993); UCC (میانگین غلظت عناصر در پوسته بالای قاره‌ای برگرفته از Taylor & McLennan (1985)

عناصر	لایه C1					لایه B1				
	۱	۲	۳	۳*	۳*	۱	۲	۳	۳*	۳*
Si %	۱۱/۲	۷/۹	۱۰/۱	۹/۸	۹/۹۵±۰/۱۵	۸/۸	۹/۵	۸/۲	۸/۹	۸/۵۵±۰/۳۵
Al %	۴/۴	۲/۹	۴/۱	۴/۵	۸/۶±۰/۲	۰/۶	۱/۸	۱/۲	۱/۵	۲/۷±۰/۱۵
Fe %	۲/۵	۳/۴	۳/۱	۳/۳	۳/۲±۰/۱	۲/۲	۱/۵	۳/۱	۲/۸	۵/۹±۰/۱۵
K %	۱/۲	۰/۸	۰/۵	۰/۶	۵/۵±۰/۵	۰/۷	۰/۵	۰/۶	۰/۶	۰/۶±۰
Ca %	۱/۴	۱/۸	۰/۷	۱/۱	۰/۹±۰/۲	۰/۲	۰/۳	۰/۶	۰/۴	۰/۵±۰/۱
Mg %	۱/۸	۱/۹	۱/۵	۱/۴	۱/۴۵±۰/۰۵	۰/۹	۱/۲	۱/۱	۱/۰	۱/۰۵±۰/۰۵
Ti %	۰/۱۱	۰/۱۵	۰/۱۶	۰/۱۷	۰/۱۶۵±۰/۰۰۵	۰/۱۲	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۱	۰/۱۹±۰/۰۰۵
As(ppm)	۱۴	۱۲	۱۰	۱۲	۱۱±۱	۲۷	۲۹	۱۸	۱۷	۱۶±۱
Cd(ppm)	۱۹	۱۰	۱۸	۱۶	۱۷±۱	۵۴	۱۵	۸۷	۹۰	۸۸/۵±۱/۵
Co(ppm)	۱۶	۲۰	۱۵	۱۶	۱۵/۵±۰/۵	۳۹	۱۸	۳۰	۲۹	۲۹/۵±۰/۵
Cr(ppm)	۴۴	۳۱	۳۵	۳۳	۳۲±۰/۵	۱۸	۱۵	۲۲	۲۰	۲۱±۱
Cu(ppm)	۳۵	۲۵	۲۸	۳۱	۲۹/۵±۱/۵	۲۰	۱۲	۲۳	۲۰	۲۱/۵±۱/۵
Li(ppm)	۱۶۰	۱۲۰	۲۱۵	۲۱۱	۲۱۳±۲	۱۲۵	۱۰۴	۲۲	۲۶	۲۹±۳
Mn(ppm)	۲۹۲	۱۳۰	۱۸۴	۱۶۸	۱۷۶±۸	۶۴	۹۰	۱۰۸	۸۸	۹۸±۱۰
Mo(ppm)	۸	۶	۸	۸	۸±۰	۱	۴	۵	۵	۵±۰
Ni(ppm)	۴۵	۴۴	۵۰	۵۱	۵۰/۵±۰/۵	۲۴	۲۶	۵۰	۴۸	۴۹±۱
Pb(ppm)	۱۶	۱۲	۱۳	۱۲	۲۱/۵±۰/۵	۱۸	۹	۱۰	۱۱	۱۰/۵±۰/۵
V(ppm)	۹۲	۶۵	۸۴	۸۰	۸۲±۲	۳۴	۲۱	۵۷	۵۵	۵۶±۱
Zn(ppm)	۵۴	۴۰	۳۱	۳۳	۳۲±۱	۱۲	۳۲	۲۹	۲۲	۲۵/۵±۳/۵
S(py)%	۱/۱	۲/۳	۱/۱	.	.	۳/۱	۴/۶	۳/۳	.	.
Ash%	۳۸/۴	۳۴/۷	۳۱/۳	.	.	۲۴/۶	۲۸/۶	۱۹/۲	.	.

عناصر	لایه B2					کنسانتره	کنسانتره*	باطله ریز	باطله ریز*		
	۱	۲	۳	۳*	۳*						
Si %	۹/۲	۱۱/۱	۱۰/۶	۱۰/۹	۱۰/۷۵±۰/۱۵	۲/۳	۱/۹	۲/۱±۰/۲	۱۶/۸	۱۵/۵	۱۶/۱۵±۰/۶۵
Al %	۴/۷	۵/۲	۵/۱	۵/۷	۵/۴±۰/۳	۰/۹	۰/۸	۰/۸۵±۰/۰۵	۸/۶	۷/۹	۸/۲۵±۰/۳۵
Fe %	۲/۱	۱/۹	۰/۸	۰/۵	۰/۶۵±۰/۱۵	۴	۳/۵	۳/۵۵±۰/۰۵	۳/۸	۳/۵	۳/۶۵±۰/۱۵
K %	۱/۲	۱/۴	۰/۶	۰/۶	۰/۶±۰	۰/۵	۰/۵	۰/۰۵±۰	۱/۷	۱/۵	۱/۶±۰/۱
Ca %	۰/۸	۰/۴	۰/۷	۰/۵	۰/۶±۰/۱	۰/۱	۰/۰۸	۰/۰۹±۰/۰/۱	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۴۵±۰/۰۰۵
Mg %	۱/۳	۰/۸	۱/۴	۱/۵	۱/۴۵±۰/۰۵	۰/۵	۰/۴	۰/۴۵±۰/۰۵	۰/۴	۰/۳	۰/۳۵±۰/۰۰۵
Ti %	۰/۱۵	۰/۱۷	۰/۱۴	۰/۱۵	۰/۱۴۵±۰/۰۰۵	۰/۰/۱	۰/۰/۵	۰/۰/۳±۰/۰/۲	۰/۱۹	۰/۲	۰/۱۹۵±۰/۰۰۵
As(ppm)	۲۰	۲۷	۱۴	۱۲	۱۳±۱	۲۴	۲۵	۲۴/۵±۰/۵	۴۲	۴۰	۴۱±۱
Cd(ppm)	۳۱	۳۵	۱۵	۱۲	۱۳/۵±۱/۵	۵	۴	۴/۵±۰/۵	۱۰۸	۹۴	۱۰۱±۷
Co(ppm)	۲۲	۲۱	۶	۵	۵/۵±۰/۵	۲۱	۲۰	۲۱/۵±۰/۵	۴۵	۴۵	۴۵±۰
Cr(ppm)	۴۳	۵۲	۲۴	۲۵	۲۴/۵±۰/۵	۲۸/۵	۲۵	۲۶/۷۵±۱/۷۵	۱۲۴	۱۱۸	۱۲۱±۳
Cu(ppm)	۱۹	۱۲	۱۱	۱۱	۱۱±۰	۴/۵	۳۹	۳۹/۷۵±۰/۷۵	۸۴	۸۵	۸۴/۵±۰/۵
Li(ppm)	۷۱	۲۳	۵۰	۴۵	۴۷/۵±۱/۵	۲۵۰	۲۲۰	۲۳۵±۱۵	۲۳۴	۲۳۰	۲۳۲±۲
Mn(ppm)	۱۰۱	۹۴	۸۱	۷۵	۷۸±۳	۶۵	۶۰	۶۲/۵±۲/۵	۱۰۱	۹۹	۱۰۰±۱
Mo(ppm)	۷	۳	۵	۴	۴/۵±۰/۵	۱۱	۱۱	۱۱±۰	۸	۷	۷/۵±۰/۵
Ni(ppm)	۵۸	۸۰	۱۸	۱۸	۱۸±۰	۳۴	۳۰	۳۲±۲	۴۳	۴۱	۴۲±۱
Pb(ppm)	۲۷	۲۲	۱۵	۱۵	۱۵±۰	۳۲/۵	۲۷	۲۹/۷۵±۲/۷۵	۲۰/۸	۱۸	۱۹/۴±۱/۴
V(ppm)	۱۲۹	۱۲۵	۵۰	۴۹	۴۹/۵±۰/۵	۳۷	۳۶	۳۶/۵±۰/۵	۳۳۱	۳۴۷	۳۳۹±۸
Zn(ppm)	۴۴	۴۶	۱۹	۱۴	۱۶/۵±۲/۵	۲۵	۲۲	۲۳/۵±۱/۵	۱۵۴	۱۵۵	۱۵۴/۵±۰/۵
S(py)%	۲/۱	۲/۱	۲/۱	.	.	۰/۹	.	.	.	.	.
Ash%	۳۷/۷	۴۱/۵	۳۸/۱	.	.	۹/۴	.	.	.	.	.

عناصر	باطله درشت	WWC	US coals	UCC
Si %	۲۱/۷	.	.	.
Al %	۶/۱	.	.	.
Fe %	۵/۳	.	.	.
K %	۲/۹	.	.	.
Ca %	۱/۹	.	.	.
Mg %	۵/۱	.	.	.
Ti %	۰/۳	۰/۰۱-۰/۲	۰/۰۸-۰/۷۴	۵۷
As(ppm)	۲۴	۰/۵-۸۰	۲۴-۲۲۰	۱/۵
Cd(ppm)	۹۸	۰/۱-۳	۰/۴۷-۱۷۰	۰/۰۹۸
Co(ppm)	۳۸/۵	۱-۳۰	۶/۱-۵۰۰	۱۰
Cr(ppm)	۱۰۹	۱-۶۰	۱۵-۲۵۰	۸۵
Cu(ppm)	۴۸	۱-۵۰	۱۶-۲۸۰	۲۵
Li(ppm)	۱۵۰	۱-۸۰	۱۶-۳۷۰	.
Mn(ppm)	۳۵۰	۵-۳۰۰	۴۳-۲۵۰۰	۷۷۵
Mo(ppm)	۶	۰/۱-۱۰	۳/۳-۲۸۰	۱/۵
Ni(ppm)	۱۲۸	۰/۵-۵۰	۱۴-۳۴۰	۵۰
Pb(ppm)	۴۰	۲-۸۰	۱۱-۱۹۰۰	۲۰
V(ppm)	۳۱۶	۲-۱۰۰	۲۲-۳۷۰	۱۱۰
Zn(ppm)	۱۲۲	۵-۳۰۰	۵۳-۱۹۰۰۰	۷۱
S(py)%	۵	.	.	.
Ash%	۶۱	.	.	.



جدول ۲- نتایج حاصل از تجزیه تقریبی نمونه های زغال سنگ.

متغیرهای کیفی زغال	رطوبت	مواد فرار	خاکستر	H	O	C	H/C	O/C	S <sub>total</sub>	S <sub>py</sub>	S <sub>o</sub>	S <sub>s</sub>
C1-1	۱/۶	۲۲/۳	۳۸/۴	۴/۶	۶/۹	۸۸/۴	۰/۵۲	۰/۰۷		۱/۴۹		
C1-2	۱/۵	۲۹/۳	۳۴/۷	۴/۷	۷/۱	۸۹	۰/۵۲	۰/۰۷	۱/۹۱	۲/۰۳	۰/۴۸	۰
C1-3	۱/۰	۲۲	۳۱/۳	۴/۵	۷/۱	۸۸	۰/۵۱	۰/۰۸		۱/۵۱		
B1-1	۰/۸	۲۳/۳	۲۴/۶	۴/۷	۸/۹	۸۶	۰/۵۴	۰/۱۰		۳/۹۱		
B1-2	۰/۷	۲۳/۷	۲۸/۶	۴/۶	۸/۹	۸۶/۵	۰/۵۳	۰/۱۰	۷۱/۴	۴/۰۶	۰/۷۵	۰/۰۴
B1-3	۰/۹	۲۱/۲	۱۹/۲	۴/۵	۸/۵	۸۳	۰/۵۴	۰/۱۰		۲/۳۰		
B2-1	۱/۱	۲۵/۷	۳۷/۷	۴/۱	۹/۱	۸۶/۱۴	۰/۴۷	۰/۱۰		۲/۸۵		
B2-2	۱/۱	۲۷/۴	۴۱/۵	۴/۲	۹/۲	۸۵	۰/۴۹	۰/۱۰	۳/۰۹	۲/۶۵	۰/۸۲	۰/۰۱
B3-3	۰/۵	۲۹/۸	۳۸/۱	۴/۴	۹/۰۵	۸۱	۰/۵۳	۰/۱۱		۲/۵۳		

جدول ۳- نتایج تجزیه XRD همراه با محاسبات نیمه کمی میزان فراوانی هر کانی (اعداد به صورت درصد هستند).

نمونه	کوارتز	مسکوویت	ایلیت	کائولینیت	مونتموریلونیت	کلسیت	دولومیت
B1 لایه	۲۵/۱۲	۱۲/۵۴	۸/۸۴	۷/۰۲	-	-	-
B2 لایه	۴۶/۹۹	۱۱/۶	۱۲/۰۲	۱۲/۵۵	-	۳/۰۱	۴/۷۵
C1 لایه	۵۱/۹	۵/۷۳	۹/۵۳	۵/۴	-	۸/۰۳	۵/۸۱
کنسانتره	۴۳/۷۰	۲۱/۵۲	-	-	-	-	-
دامپ درشت	۴۷/۹۰	۱۰/۴۳	۷/۱۱	۵/۳۹	۴/۳۰	-	۵/۷۱
نمونه	آنکریت	سروزیت	پیریت	هماتیت	گوئیت	ژپس	هالیت
B1 لایه	-	-	۳۹/۱۲	۵/۳۵	-	-	-
B2 لایه	-	-	۸/۵۸	-	-	-	-
C1 لایه	۴/۱۵	-	۵/۹	-	-	-	۳/۱۲
کنسانتره	-	۹/۷۲	۲۰/۴۲	-	-	-	-
دامپ درشت	-	-	۷/۱۹	۳/۱۲	۵/۰۶	۳/۷۶	-

جدول ۴- شاخص غنی شدگی بر پایه (Chen et al. (2007).

ضریب غنی شدگی	
بدون غنی شدگی	$EF < 1$
غنی شدگی کم	$3 < EF < 1$
غنی شدگی متوسط	$5 < EF < 3$
غنی شدگی متوسط - شدید	$5 < EF < 10$
غنی شدگی شدید	$25 < EF < 10$
غنی شدگی بسیار شدید	$50 < EF < 25$
غنی شدگی بسیار بسیار شدید	$50 < EF$

جدول ۵- ضریب غنی شدگی عناصر در زغال سنگ پروده.

ضریب غنی شدگی	میانگین لایه ها	کنسانتره	باطله درشت	باطله ریز
As	۵۰/۶۴	۸۹/۱۴	۲۰/۱۳	۴۰/۴۴
Cd	۱۲۰/۳۱	۲۸/۴۳	۱۲۵/۸۱	۲۶۵/۳۱
Co	۶۷/۱۰	۱۱۷/۰۱	۴۸/۴۴	۶۵/۰۰
Cr	۱/۲۴	۱/۸۷	۱/۶۱	۲/۱۱
Cu	۲/۸۹	۹/۰۳	۲/۴۲	۴/۸۵
Li	۲۰/۴۸	۶۹/۶۴	۹/۴۴	۱۶/۹۰
Mn	۰/۹۸	۰/۶۰	۰/۷۳	۰/۲۴
Mo	۱۳/۱۰	۴۰/۸۶	۵/۰۳	۷/۷۰
Ni	۳/۱۷	۳/۷۹	۳/۲۱	۱/۲۴
Pb	۲/۹۸	۱۱/۳۲	۳/۱۵	۲/۵۳
V	۲/۳۸	۱/۸۷	۳/۶۱	۴/۳۵
Zn	۱/۶۹	۱/۹۶	۲/۱۶	۳/۱۰



جدول ۸- شاخص جداسازی عناصر در نمونه های کنسانتره و باطله.

ضریب جداسازی	میانگین لایه‌ها نسبت به کنسانتره	میانگین لایه‌ها نسبت به باطله
Al	۰/۷	-۰/۵
Fe	۰/۵	-۱/۱
K	۰/۵	-۱/۷
Ca	۰/۸	-۰/۵
Mg	-۰/۲	۰/۶
Ti	۰/۵	-۱/۲
As	۰/۰	۰/۰
Cd	۰/۹	-۱/۷
Co	۰/۰	-۰/۸
Cr	۰/۳	-۱/۸
Cu	-۰/۶	-۰/۸
Li	-۰/۶	۰/۰
Mn	۰/۶	-۱/۴
Mo	-۰/۶	۰/۱
Ni	۰/۴	-۱/۳
Pb	-۰/۹	-۱/۳
V	۰/۶	-۲/۳
Zn	۰/۴	-۱/۹
ash	۰/۷	-۰/۷

جدول ۷- نتایج ماتریس مؤلفه چرخشی برای عناصر مورد مطالعه در زغال‌سنگ پروده.

ماتریکس مؤلفه چرخشی			
(Components) مؤلفه‌ها			
element	1	2	3
Si	۰/۹۹۶	۰/۰۳۳	۰/۰۲۸
Al	۰/۹۶۵	-۰/۱۷۶	۰/۱۱۰
K	۰/۹۸۵	۰/۱۱۸	-۰/۱۱۲
As	-۰/۲۹۱	-۰/۱۴۱	۰/۸۰۴
Cd	۰/۰۵۶	-۰/۵۱۳	۰/۷۷۱
Cr	۰/۸۹۹	۰/۳۸۷	-۰/۱۷۸
Co	-۰/۳۴۴	-۰/۳۴۳	۰/۸۷۰
Li	۰/۲۷۳	۰/۸۹۵	-۰/۳۵۱
Mo	-۰/۰۹۵	۰/۹۳۷	-۰/۲۴۹
V	۰/۹۷۱	۰/۱۰۶	۰/۰۵۵
Zn	۰/۸۷۸	-۰/۱۲۷	-۰/۴۵۹
Spy	۰/۲۳۷	-۰/۰۳۴	۰/۹۶۶
Pb	-۰/۰۷۸	۰/۹۴۷	۰/۰۳۴
Ash	۰/۹۱۲	-۰/۳۵۲	-۰/۰۸۸
Cu	-۰/۰۵۵	۰/۷۶۶	-۰/۵۷۸

## کتابنگاری

- رضایی، ب.، ۱۳۸۰- تکنولوژی زغال‌شویی، انتشارات مرکز نشر، ۴۱۶ص.
- زاده کبیر، آ.، ۱۳۷۰- پروژه مطالعات تأمین زغال‌سنگ در طرح توسعه فولاد، شرکت ملی فولاد ایران، گزارش داخلی، ۷۴۵ص.
- رضوی ارمغانی، م.ب. و معین‌السادات، س.ح.، ۱۳۷۲- زمین‌شناسی ایران-زغال‌سنگ، انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور، ۲۸۶ص.
- یوسفی، م. و کاکایی، ر.، ۱۳۸۵- کاربرد کامپیوتر در معدن، انتشارات جهاد دانشگاهی صنعتی امیرکبیر، ۲۸۲ص.
- یزدی، م.، ۱۳۸۲- زغال‌سنگ (از منشأ تا اثرات زیست محیطی)، انتشارات جهاد دانشگاهی صنعتی امیرکبیر، ۲۶۳ص.

## References

- Chen, C. W., Kao, C. M., Chen, C. F. & Dong, C. D., 2007- Distribution and accumulation of heavy metals in the sediments of Kaohsiung Harbor, Taiwan. *Chemosphere* 66, 1431-1440.
- Dai, S. & Chou, C. L., 2007- Occurrence and origin of minerals in a chamosite-bearing coal of Late Permian age, Zhao tong, Yunnan, China. *American Mineralogist* 92, 1253-1261.
- Dai, S., Li, D., Chou, C. L., Zhao, L., Zhang, Y., Ren, Y., Ma, Y. & Sun, Y., 2008a- Mineralogy and geochemistry of boehmite-rich coals: new insights from the Haerwusu Surface Mine, Jungar Coalfield, Inner Mongolia, China. *International Journal of Coal Geology* 74, 185-202.
- Dai, S., Ren, D., Zhou, Y., Chou, C. L., Wang, X., Zhao, L. & Zhu, X., 2008b- Mineralogy and geochemistry of a super high-organic-sulfur coal, Yanshan Coalfield, Yunnan, China: evidence for a volcanic ash component and influence by submarine exhalation. *Chemical Geology* 255, 182-19.
- Davis, J. C., 1986- Statistics and data analysis in Geology, Wiley International, New York, 646p.
- Finkelman, R. B., 1993- Trace and minor elements in coal. In: Engel, M.H., Macko, S.A. (Eds.), *Organic Geochemistry*. Plenum, New York, 593 - 607
- Finkelman, R. B., 1995- Modes of occurrence of environmentally sensitive trace elements in coal. In: Swaine, D.J., Goodarzi, F. (Eds.), *Environmental Aspects of Trace Elements in Coal*. Kluwer Academic Publishing, Dordrecht, 24-50.
- Foscolos, A. E., Goodarzi, F., Koukouzas, C. N. & Hatziyannis, G., 1989- Reconnaissance study of mineral matter and traceelements in Greek lignites. *Chemical Geology* 76, 107- 130.

- Galan, E., Fernandez-Caliani, J. C., Gonzalez, I., Aparicio, P. & Romero, A., 2008- Influence of geological setting on geochemical baselines of trace elements in soils. Application to soil of South-West Spain, *Journal of Geochemical Exploration*, 98, 89-106.
- Goodarzi, F., 1988- Elemental distribution in coal seams at the Fording coal mine, British Columbia, Canada. *Chem. Geol.* 68, 129–154.
- Goodarzi, F., Sanei, H., Stasiuk, L. D., Bagheri Sadeghi, H. & Reyes, J., 2006- A preliminary study of mineralogy and geochemistry of four coal samples from northern Iran. *An International Journal of Coal Geology* 65, 35– 50.
- Gürdal, G., 2011- Abundances and modes of occurrence of trace elements in the Çan coals (Miocene), Çanakkale-Turkey. *International Journal of Coal Geology* 87, 157–173.
- Huggins, F. E., 2002- Overview of analytical methods for inorganic constituents in coal Frank E. *International Journal of Coal Geology* 50, 169– 214.
- Kolker, A., 2012- Minor element distribution in iron disulfides in coal: a geochemical review. *International Journal of Coal Geology*. doi:10.1016/j.coal.2011.10.011.
- Krotenski, J. & Sotirov, A., 2002- Trace and major element content and distribution in Neogene lignite from the Sofia Basin, Bulgaria. *International Journal of Coal Geology* 52, 63–82.
- Liu, G. J., Stanislav, V. V., GAO, L. F., Zheng, L. G. & Peng, Z. C., 2005- Mineral and chemical composition and some trace element contents in coals and coal ashes from Huaibei Coalfield, China. *Energy Conversion and Management* 46, 2001–2009.
- Loska, K., Chebual, J., Pleczar, J., Wiechla, D. & Kwapulinski, J., 1995- Use of environment and contamination factors to gheder with geoaccumulation indexes to elevate the content of Cd, Cu and Ni in the Rybink water reservoir in Poland” *Water, Air and Soil pollution*, 93, 347-365.
- Moore, F. & Esmaeili, A., 2012- Mineralogy and geochemistry of the coals from the Karmozd and Kiasar coal mines, Mazandaran province, Iran. *International of coal geology*.
- Orem, W. H. & Finkelman, R. B., 2004- *Coal Formation and Geochemistry*, US Geological Survey, Reston, VA, USA, *Treatise on Geochemistry* Vol. 7, pp 191-222.
- Shariatnia, H., 1994- Geological characteristics of Parvedeh Region of Tabs coal-bearing basin, central Iran. In: Embry, A.F., Beauchamp, B., Glass, D.J. (Eds.), *Pangea, Global Environments and Resources*, Memoir, vol. 17. Canadian Society of Petroleum.
- Swaine, D. J., 1990- *Trace Elements in Coal*. Butterworth, London, 278 pp.
- Swaine, D. J., 2000- Why trace elements are important. *Fuel Processing Technology*, 6566, 21-33.
- Taylor, S. R. & McLennan, S. M., 1985- *The continental crust: its composition and evolution*.
- Vassilev, S. V. & Vassileva, G. C., 1996- Occurrence, abundance and origin of minerals in coal and coal ashes. *Fuel Processing Technology* 48, 85–106.
- Vassilev, S. V., Kitano, K., Takeda, S. & Tsurue, T., 1995- Influence of mineral and chemical composition of coal ashes on their fusibility. *Fuel Process. Technol.* 45, 27–51
- Wang, W., Qin, Y., Wei, C., Li, Z., Guo, Y. & Zhu, Y., 2006- Partitioning of elements and macerals during preparation of Antaibao coal. *International Journal of Coal Geology* 68, 223–232.
- Ward, C. R. & Christie, P. J., 1994- Clays and other minerals in coal seams of the MouraBaralaba area, Bowen Basin, Australia. *Int. J. Coal Geol.* 25, 287–309.
- Ward, C. R., 2002- Analysis and significance of mineral matter in coal seams *International Journal of Coal Geology* 50, 135– 168.
- Weidendorfer, D., Amrein, J. M., Ruppen, D., Erni, M., Zographos, G., Lehmann, S. & Jeske, T., 2010- *Conversion of organic matter to petroleum, coal and gas (Group II)*. Topics in Geochemistry, Published by ETH.
- Yazdi, M., 2012- Geological and Geochemical Features of Alborz Basin Coal Deposits, Iran. *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran* 23(2), 163-169
- Zheng, L., Liu, G., Qi, C., Zhang, Y. & Wong, M., 2008- The use of sequential extraction to determine the distribution and modes of occurrence of mercury in Permian Huaibeicoal, Anhui Province, China. *International Journal of Coal Geology* 73, 139–155.



## Geochemistry and Assessment of Toxic Elements Recovery in Parvadeh Coal Mine, Tabas

M. A. Rajabzadeh <sup>1\*</sup>, Z. Ghorbani <sup>2</sup>, M. Jalalifard <sup>3</sup> & M. Mohammadzadeh <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Associate Professor, Department of Earth Science, Shiraz University, Shiraz, Iran

<sup>2</sup> M.Sc. Student, Department of Earth Science, Shiraz University, Shiraz, Iran

<sup>3</sup> M.Sc., Coal Research Bureau, Tabas, Iran

<sup>4</sup> M.Sc., Department of Earth Science, Shiraz University, Shiraz, Iran

Received: 2014 September 20

Accepted: 2015 February 21

### Abstract

Parvadeh coalfield with an area of 1200 km<sup>2</sup> is one of the largest coalfields in East-Central Iran. The coal-bearing clastic rocks of the coalfield belong to Ghadir Member of the Upper Triassic Naiband Formation and could be classified as bituminous coal, containing low volatile, high ash and medium to high sulfur. Pyritic sulfur is the main form of sulfur in the Parvadeh coals. Quartz, illite, kaolinite, pyrite, and calcite/dolomite are the principal mineral phases. Enrichment in major elements and depletion in minor elements were observed in studied samples when compared with those of the earth crust. The element contents of coal-bearing layers are similar to those of the US and world coals except for Cd, Li, As and Zn. Based on the calculated enrichment factor, the elements As, Co and Cd are the most pollutants in Parvadeh area. Strong correlations among ash contents and Si, K and Al values indicate that the coal ash is mainly composed of aluminosilicates. Meanwhile, Cd, Co, As, Fe, and S show that Cd, Co, As participated in pyrite lattice. These results were confirmed by factor and cluster analyses. The calculated recovery index shows that Li, Mo, Pb and Cu are bounded to maceral and organic matter thus are enriched in the cleaned coals. The other minor metals, however, are present in mineral part of the coal and enriched in ash.

**Key words:** Geochemistry of Toxic Elements, Coal, Recovery index, Parvadeh, Tabas.

For Persian Version see pages 177 to 188

\*Corresponding author: M. A. Rajabzadeh; E-mail:rajabzad@susc.ac.ir