

غلظت عناصر کمیاب در معدن زغال سنگ تخت، مینودشت، استان گلستان

فاطمه اسفندیاری فر^۱، بهنام شفیعی بافتی^{۱*}، مصطفی رقیمی^۱

۱. دانشگاه گلستان، دانشکده علوم، گروه زمین شناسی

۲. دانشگاه شهید باهنر کرمان، دانشکده علوم، گروه زمین شناسی

پذیرش ۱۴۰۰/۰۶/۲۰

دریافت ۱۳۹۸/۱۰/۲۵

چکیده

معدن زغال سنگ تخت در نزدیکی روستای تخت در جنوب شرقی شهرستان مینودشت در استان گلستان قرار دارد. از نظر زمین شناسی ناحیه‌ای، این معدن در ناودیس بزرگ زغال دار قشلاق در دامنه شمالی سلسله جبال البرز در شرق استان گلستان واقع است. این معدن برای ارزیابی غلظت عناصر کمیابی مانند گالیوم (Ga)، ژرمانیوم (Ge)، وانادیوم (V)، اسکاندیوم (Sc)، اورانیوم (U)، لانتانیم (La) و سریوم (Ce) مورد پژوهش قرار گرفته است. نمونه‌های زغال سنگ بررسی شده در این پژوهش بر پایه تجزیه شیمی عناصر اصلی سازنده زغال سنگ (CHNS wt%) در رده‌های بیتومینه، نیمه بیتومین-لیگنیت، لیگنیت و تورب گروه بندی شدند. تجزیه ICP-MS نمونه‌های زغال سنگ نشان داد که عمده عناصر کمیاب در زغال سنگ‌های معدن تخت، غلظت بسیار کم مانند زغال سنگ‌های سخت و قهوه‌ای از دیگر مناطق جهان دارند لیکن از V (۸۸ ppm)، Zr (۹۶ ppm) و Sc (۱۶ ppm) اندکی غنی‌شدگی نسبت به میانگین جهانی غلظت این عناصر در زغال سنگ‌ها نشان دادند. فقیر بودن زغال سنگ‌های معدن تخت از عناصر کمیاب را می‌توان به فقر ذاتی حوضه رسوب گذاری رسوبات گروه شمشک از عناصر مذکور نسبت داد که ناشی از نبود منابع سنگی عناصر کمیاب (مانند گرانیت-ها، کربناتیت‌ها، پگماتیت‌ها، پریدوتیت‌ها) بعنوان سنگ منشأ رسوبات گروه شمشک در منطقه بررسی شده بوده است. بنابراین، به نظر می‌رسد تشکیل و تکامل گروه شمشک در یک حوضه رسوبی با غلظت معمولی از عناصر کمیاب رخ داده باشد که نتیجه آن شکل گیری زغال سنگ‌های فقیر از عناصر کمیاب بوده است.

واژه‌های کلیدی: زغال سنگ، عناصر کمیاب، معدن تخت، استان گلستان.

Trace Elements Concentration in Takht Coal Mine, MinooDasht, Golestan Province, NE of Iran

Fatemeh Esfandiari¹, Behnam Shafiei Bafti^{1,2*}, Mostafa Raghimi¹

1. Department of Geology, Faculty of Science, Golestan University, Gorgan, Iran
2. Department of Geology, Faculty of Science, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

Abstract

Takht coal mine located in the Gheshlagh coal-bearing large synclinorium in northern flank of the Alborz Mountains in East of Golestan province has been investigated for evaluation of concentration of trace elements such as gallium (Ga), germanium (Ge), vanadium (V), scandium (Sc), uranium (U), lanthanum (La) and cerium (Ce). Coal samples studied in this research were categorized into bituminous, sub-bituminous-lignite, lignite and peat types according to chemical analysis of major element (CHNS wt%) constructing the coals. ICP-MS analysis of coal samples show that most of trace elements in Takht coal mine have very low concentrations to those of hard and brown coals around the world, however they displayed slightly enrichment in V (up to 88 ppm), Zr (up to 96 ppm) and Sc (up to 16) compared to global average concentration in coals. Low concentration of trace

behnam.shafiei@gmail.com

*نویسنده مسئول

elements in the Takht coal mine could be attributed to inherent poverty of the Shemshak sedimentary basin of such elements. It could be related to the absence of trace elements-bearing source rocks (e.g., granitoids, carbonatites, pegmatites and periodotites) as source rocks of Shemshak Group sediments in the study area. Therefore, it seems that formation and evolution of the Shemshak Group is occurred in a sedimentary basin with normal concentrations of the trace elements that led to formation of a trace element-poor coals.

Keywords: Coal, Trace elements, Takht mine, Golestan province

مقدمه

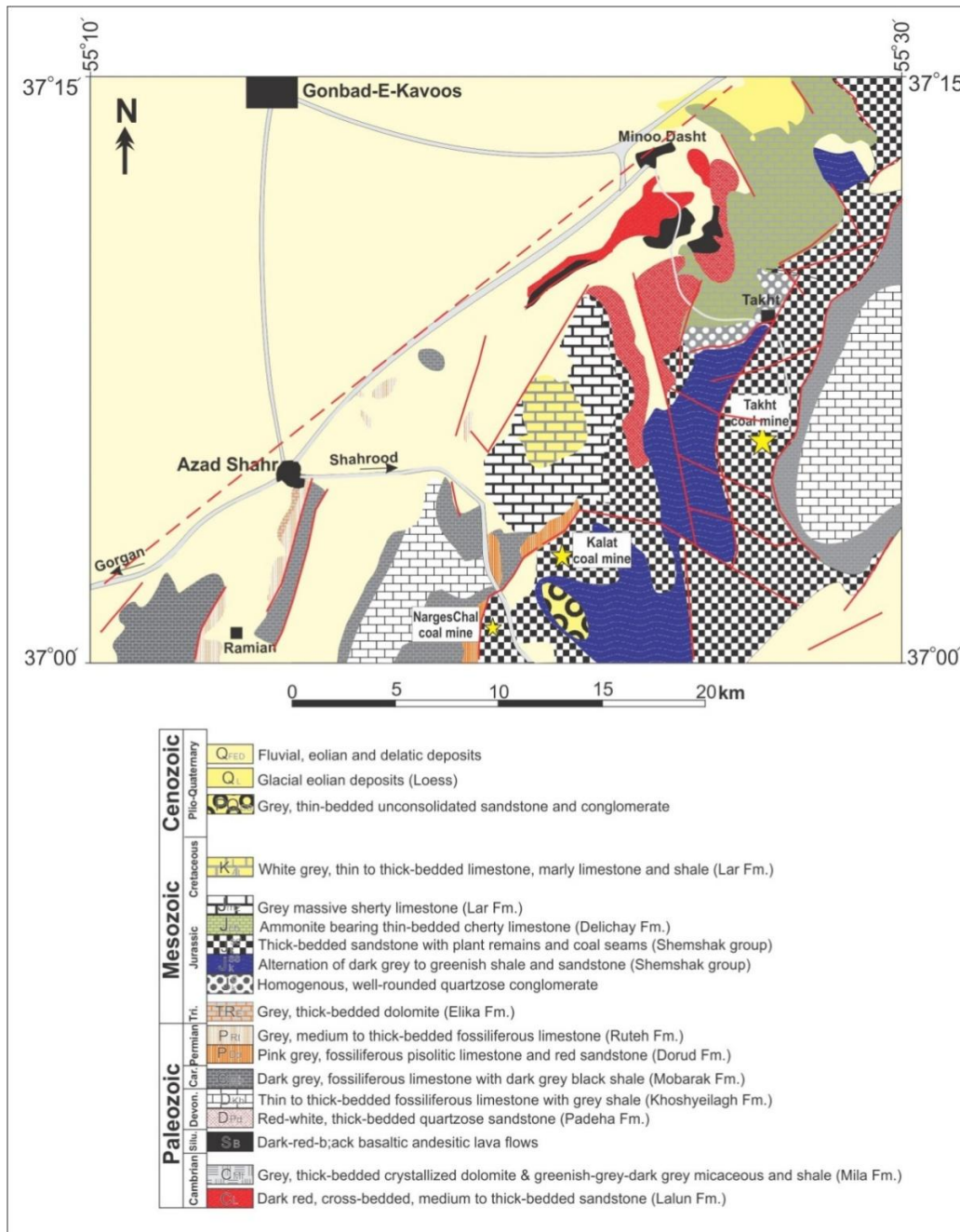
غلظت برخی از عناصر فرعی و کمیاب از جمله Ge, Ga, U, V, Se, عناصر نادر خاکی (REEs), Sc, Y, Nb, Ag, Au و عناصر گروه پلاتین (PGEs) در تعدادی از معادن زغال سنگ جهان تا عیار حد بهره‌برداری اقتصادی عناصر مذکور از آنها بالا است (از صدها تا هزاران ppm) که چنین زغال سنگ‌هایی را به‌عنوان زغال سنگ‌های فلزدار یا کانسارهای عناصر کمیاب با میزبان زغالی معرفی کرده‌اند که در آنها غلظت عناصر کمیاب حداقل ۱۰ برابر بیش‌تر از میانگین غلظت این عناصر در زغال سنگ‌های معمولی جهان است (Dai & Finkelman, 2018; Seredin & Finkelman, 2008). زغال سنگ‌های فلزدار طی صد سال گذشته به‌عنوان مواد اولیه برای استخراج برخی از فلزات با ارزش استفاده شده‌اند که از نمونه‌های آن می‌توان به زغال سنگ‌های ایالت‌های وایومینگ و یوتا در آمریکا برای بازیافت طلا و نقره در اواخر قرن ۱۹ و اوایل قرن ۲۰ اشاره کرد (Jenney, 1903; Stone, 1912). پس از جنگ جهانی دوم، زغال سنگ فلزدار یکی از منابع اصلی تولید اورانیوم در روسیه و کشورهای مشترک المنافع و ایالات متحده بوده است. در اوایل دهه ۱۹۶۰ زغال سنگ‌های فلزدار برای بازیافت ژرمانیوم (Ge) در روسیه و کشورهای مشترک المنافع و در مقادیر کم‌تری در چک و اسلواکی (Jandova & Vu, 2001) و هم‌چنین در انگلستان و ژاپن (Swaine, 1990) استفاده شده است. زغال سنگ‌های فلزدار در حال حاضر به‌عنوان منابع Ge در روسیه، ازبکستان و چین استفاده می‌شوند و امروزه زغال-سنگ می‌تواند به‌عنوان منبع اصلی Ge برای صنعت جهانی به‌حساب بیاید (Holl et al., 2007). انتشارات و ثبت اختراعات متعددی برای استفاده از زغال سنگ به‌عنوان منابع دستیابی به عناصر کمیاب متعددی وجود دارد (Finkelman & Swaine, 1990; Brown, 1991; Burnet, 1986). نسبتاً گران قیمت و استراتژیک از زغال سنگ ارزش افزوده و بازدهی صنعت زغال سنگ را به‌دنبال داشته است (Dai & Finkleman, 2018; Seredin & Finkelman, 2008). اقتصادهای جهانی عمدتاً به عناصر کمیاب وابسته هستند که باعث برخی از بزرگ‌ترین پیشرفت‌ها در فناوری و بهره‌وری انرژی در جهان امروز شده است (Massari & Ruberti, 2016; Hower et al., 2013). با این حال، این عناصر بحرانی در حال تبدیل شدن به منابع کمیاب و گران قیمت هستند. ذخایر اینها در کانسارهای متداول آنها رو به پایان است و تقاضا برای این عناصر به سرعت و با توجه به کاربرد گسترده آنها افزایش یافته است. علاوه بر این، عرضه این فلزات با منابع محدود آنها کنترل می‌شود. این باعث شده که اکتشاف منابع جدید از این عناصر در دستور کار کشورها قرار گیرد. یک منبع امیدوارکننده برای بسیاری از این عناصر محصولات زغال سنگ و/یا محصولات احتراق آن (برای مثال خاکستر معلق و خاکستر برجا) است. بازیابی احتمالی عناصر کمیاب از زغال سنگ و محصولات جانبی احتراق آن یک پژوهش هیجان‌انگیز و کاربردی است که معرفی کننده یک تغییر بنیادی در کاربرد و به‌کارگیری متداول از زغال سنگ‌ها است؛ اگر چه البته این موضوع جدیدی برای عناصر Ge, U, V و Se که سال‌ها است از زغال سنگ استخراج شده و به‌صورت صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند نیست، اما این می‌تواند یک موضوع کاملاً جدید برای REE, Y, Sc, Ag, Au, PGEs, Zr, Nb, Re و هم‌چنین فلزات Al و Mg در زغال سنگ‌ها باشد. کشور ایران با حدود ۳۷۰۰ میلیون تن ذخیره زغال سنگ و تولید سالیانه ۲ میلیون تن انواع

زغال خام و حدود ۱۰۰۰۰۰۰ تن کنسانتره زغال سنگ در زمره کشورهای با ذخیره عمده زغال سنگ در جهان است (زاده کبیر ۱۳۹۰). با توجه به این که صنایع فولادی و کک سازی در ایران مصرف کننده عمده زغال سنگ تولیدی هستند و صنایع مذکور در ایران رو به توسعه هستند در نتیجه این بازار مصرف رو به گسترش نیاز بیش تری به زغال سنگ خام پیدا می کند. بر این اساس، چشم انداز آینده معدنکاری و صنعت زغال سنگ در ایران دست یابی به ذخایر جدیدتر و در نتیجه تولید بیش تر زغال سنگ است. با توجه به زیاد بودن هزینه های تولید زغال سنگ در ایران (با توجه به زیرزمینی بودن معدنکاری در عمده ذخایر، تکتونیزه بودن آنها، خاکستر بالا و غیره)، استحصال عناصر کمیاب و فلزات گران بها از محصولات تولیدی کارخانه های تولید کننده زغال سنگ خام و هم چنین از پسماندهای حاصل از صنایع مصرف کننده زغال سنگ (مانند صنایع فولاد و کک سازی) می تواند افزایش ارزش افزوده زغال سنگ و کنسانتره تولیدی و یا افزایش بازدهی و سودآوری صنایع بالادستی را به دنبال داشته باشد (معمار ۱۳۹۵). از طرف دیگر، با توجه به برنامه ریزی های صورت گرفته در راستای توسعه پرشتاب تر صنایع پیشرفته در کشور (در حوزه پزشکی، الکترونیک، هوافضا، نانو...) نیاز به استفاده از عناصر کمیاب و استراتژیک در آینده بیش از پیش احساس می شود، در نتیجه بازار مصرف آن رو به گسترش است. یکی از چالش های بزرگ در مسیر توسعه صنایع پیشرفته در کشور، کمبود یا نبود ذخایر معدنی خاص فلزات استراتژیک در ایران (مانند کربناتیت ها، پگماتیت ها و غیره) است که با توجه به تحریم های موجود و با قیمت بسیار زیاد خرید این فلزات از بازار واسطه (چین و آمریکا) به نظر می رسد توسعه مذکور با صرف هزینه های هنگفت در حال انجام است که ممکن است در آینده روند توسعه صنایع پیشرفته نیز متوقف یا بسیار کند شود. علیرغم فقیر بودن ذاتی ایران از وجود منابع و ذخایر معدنی متداول خاص فلزات استراتژیک، ایران منابع و ذخایر معدنی چشم گیری از زغال سنگ دارد که می تواند برای تولید فلزات استراتژیک از نظر علمی و فنی ارزیابی شود. غلظت عناصر کمیاب و استراتژیک در ذخایر زغال سنگ ایران (در زغال سنگ خام، کنسانتره زغال سنگ، خاکستر و زهکش معادن) از دو منظر زمین شناسی اقتصادی و زیست محیطی تا کنون در چندین اثر پژوهشی انجام شده است (Yazdi & Esmaeilnia, 2004; Goodarzi et al., 2006; Yazdi, 2012; Moore & Esmaeili, 2012; Aftabi et al., 2015; همکاران، ۱۳۸۸؛ آقایی و همکاران، ۱۳۹۰، ۱۳۹۱؛ طاهری و همکاران، ۱۳۹۳؛ شهرآز و همکاران، ۱۳۹۳؛ شمعانیان و حسینی، ۱۳۹۴؛ سلیمانی مارشک و تقی پور، ۱۳۹۵؛ معمار، ۱۳۹۵). در عمده این پژوهش ها، غلظت عناصر کمیاب و استراتژیک عمدتاً بیش تر از کلارک و عیار آستانه این عناصر و قابل مقایسه با غلظت میانگین زغال سنگ های جهان بوده است اما بسیار کم تر از عیار حد تعیین شده برای استحصال عناصر مذکور از خاکستر زغال سنگ بوده است. در ادامه پژوهش روی غلظت عناصر کمیاب و استراتژیک در زغال سنگ های ایران، به پژوهش در رابطه با این موضوع در معدن زغال سنگ تخت در حوضه زغالی البرز شرقی در استان گلستان می پردازیم تا پتانسیل زغال سنگ های این معدن از عناصر کمیاب و استراتژیک را مشخص شود.

زمین شناسی معدن تخت

معدن زغال سنگ تخت در طول ۵۵/۲۲ تا ۵۵/۲۸ شرقی و عرض ۳۷/۰۲ تا ۳۷/۱۲ شمالی در نزدیکی روستای تخت در جنوب شرقی شهرستان مینودشت در استان گلستان واقع شده که فاصله این معدن تا شهرستان مینودشت ۱۲ کیلومتر است (شرکت معادن زغال البرز شرقی، ۱۳۸۸). دسترسی به معدن از طریق دو جاده چهل چای و جنگل ده امکان پذیر است و راه دیگر دسترسی به معدن تخت از طریق روستای سوسرا بوده است که در جنوب غربی آن واقع شده است. منطقه تخت جزئی از مناطق زغال خیز البرز شرقی است که در دامنه شمالی آن و در سنکلینوریوم بزرگ زغال دار قشلاق واقع شده است (رضوی ارمغانی و معین السادات ۱۳۷۲). سنکلینوریوم زغال دار قشلاق شامل نودیس های وامنان، اولنگ، قشلاق و تاقدیس تخت است که محور طولی آن ۴۰ کیلومتر و عرض آن حدود ۱۰

کیلومتر است و با روند شمال شرق-جنوب غرب در ارتفاعات مشرف به مینودشت تا منطقه‌ای بنام اولنگ در جنوب رامیان گسترش دارد (رضوی ارمغانی و معین السادات ۱۳۷۲). ارتفاع نسبی رشته کوه‌های این حوضه زغال‌دار حدود ۱۵۰۰ تا ۱۷۰۰ متر است. در بخش شرقی حوضه که در زون اقلیمی کرانه دریا قرار گرفته دامنه کوه‌ها به‌وسیله جنگل‌های کم و بیش مترکم پوشیده شده است. بخش جنوبی حوضه در اقلیم کوهستانی-کوبری واقع شده است. جاده ارتباطی شاهرود به آزادشهر ناودیس زغال‌دار قشلاق را در شرق معدنی به همین نام قطع می‌کند. بیرونزدگی لایه‌های زغال‌سنگی در سمت شرق جاده دیده می‌شود. افزای رسوب‌های زغالی زیاد است. سازندهای زغالی در محدوده ناودیس بزرگ قشلاق در مناطق وطن، کلات، تخت، آپرون، اولنگ و ابر قرار دارند. مجموع ذخایر تخمینی زغال‌سنگ در ناودیس قشلاق حدود ۴۵۰ میلیون تن برآورد شده که دربرگیرنده ۲۳۱ میلیون تن ذخیره احتمالی است (رضوی ارمغانی و معین السادات ۱۳۷۲؛ سلیمانی مارشک و همکاران ۱۳۹۲). معدن زغال‌سنگ تخت در یال شمال تاقدیس تخت و در بین دو ناودیس وامنان در جنوب و ناودیس تخت مینودشت در شمال قرار دارد. یال جنوبی این تاقدیس در غرب دهکده قلعه قافه مشاهده می‌شود و یال شمالی آن همان یال جنوبی ناودیس تخت مینودشت است (شرکت معادن زغال البرز شرقی، ۱۳۸۸). واحدهای سنگ‌شناسی تشکیل‌دهنده این تاقدیس روند شمال شرقی- جنوب غربی دارد که از دره گسل چهل چای در جنوب شهرستان مینودشت شروع و به گسل دره سوسرا ختم می‌شود و رسوبات زغال‌دار تخت در یال شمالی این تاقدیس واقع شده‌اند. واحدهای سنگ‌شناسی حاضر در منطقه تخت سازندهای پالئوزوئیک (شامل لالون، میلا، پادها، خوش‌یلاق، مبارک، درود و روته) و مزوزوئیک (الیکا، شمشک، دلیچای و لار) است که سازندهای کربناته دونین- کربونیفر عمدتاً محور تاقدیس تخت را تشکیل داده‌اند (شکل ۱). لازم به ذکر است یک افق بازالتی متعلق به سیلورین (احتمالاً معادل بازالت‌های سلطان میدان) نیز در شمال منطقه تخت و بین واحدهای سازند میلا و پادها حضور دارد. مطالعه و بررسی عملیات اکتشافی در منطقه تخت نشان داده است که اکثر زغال‌سنگ‌های منطقه تخت مربوط به تریاس فوقانی تا ژوراسیک پایین (بخش کلاریز گروه شمشک) است (شرکت معادن زغال البرز شرقی، ۱۳۸۸). ضخامت زون زغال‌دار منطقه حدود ۶۰۰ متر و تعداد کل لایه‌های زغالی در آن حدود ۲۶ لایه است (شرکت معادن زغال البرز شرقی، ۱۳۸۸). مجموع کل ضخامت لایه‌های زغالی این منطقه به‌طور متوسط ۱۲/۷۷ متر و ضریب زغال‌خیزی آن ۲/۱ درصد است (شرکت معادن زغال البرز شرقی، ۱۳۸۸). تعداد لایه‌های زغالی قابل معدن‌کاری در منطقه ۶ لایه زغالی است که عملیات زمین‌شناسی روی این لایه‌ها متمرکز شده است (لایه‌های K8-K10-K11-K17-K19-K20؛ شرکت معادن زغال البرز شرقی، ۱۳۸۸). یکی از مزایای معدن‌کاری زغال در این منطقه نزدیک بودن لایه‌های قابل استخراج به یک‌دیگر است. ضخامت زون زغال‌سنگی قابل استخراج حدود ۱۵۰ متر است و همه لایه‌های قابل استخراج در این بخش قرار گرفته است. مجموع ضخامت لایه‌های زغالی قابل بهره‌برداری در این بخش ۱۰/۸۷ متر است. بررسی کیفیت زغال‌سنگ‌های منطقه تخت نشان داده است که رطوبت لایه‌های زغالی بین ۱/۸-۱/۲ درصد، درصد خاکستر بین ۴۴/۷-۱۱/۲ درصد و مواد فرار بین ۳۴/۲-۳۷/۵ درصد و ارزش حرارتی زغال سنگ‌ها بین ۷۹۸۵-۸۱۳۲ کیلوکالری بر کیلوگرم متغیر بوده است (شرکت معادن زغال البرز شرقی، ۱۳۸۸). بررسی ترکیب عنصری این زغال‌سنگ‌ها (در تعداد ۵ نمونه زغال) تغییرات کربن را بین ۸۴/۲۴ تا ۷۹/۹۹ درصد، هیدروژن بین ۴/۶۷-۵/۷۷ درصد و نیتروژن + اکسیژن را بین ۱۵/۳۴ تا ۱۰/۷۲ درصد نشان داده است. میزان فسفر (P-O₅) در ۶ نمونه زغال بین ۰/۱۲۵۳-۰/۰۳۸۵ درصد و درصد گوگرد در لایه‌های زغالی (بر اساس تجزیه تعداد ۶۳۱ نمونه به‌وسیله گروه پی‌جویی شرکت زغال البرز شرقی) بین ۱/۳۲-۰/۵۶ درصد بوده است (شرکت معادن زغال البرز شرقی، ۱۳۸۸). پتروگرافی آلی ۶۸ نمونه زغال‌سنگ معدن تخت مقدار بازتاب و پترینیت در لایه‌های زغالی را بین ۸۵ تا ۸۳ درصد تعیین کرده است که با برتری ماسرال و پترینیت با درصد حجمی ۷۰ تا ۹۰ درصد مشخص شده است و



شکل ۱. نقشه زمین شناسی محدوده معدن زغال سنگ تخت و پیرامون (بخش جنوب شرقی نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ گنبد کاووس؛ انتشارات سازمان زمین شناسی کشور ۱۹۹۳)

Figure 1. Geological map of Takht coal mine and surrounding area (southeastern part of map 1: 250,000 Gonbad Kavous; Geological Survey Publications 1993)

شاخص زغالی شدن در مرحله II-III (زغال سنگ های درجه متوسط تا بالا از نوع ساب بیتومینه و بیتومینه) است که میزان عناصر مزاحم فسفر و گوگرد آنها نیز کم است (شرکت معادن زغال البرز شرقی، ۱۳۸۸). ویژگی های کیفی لایه ها نزدیک به هم بوده است و بر طبق طبقه بندی زغال سنگ های صنعتی ایران، زغال سنگ های معدن تخت از نوع گازی چرب هستند که به تنهایی قابلیت کک دهی فوق العاده ضعیفی دارند (شرکت معادن زغال البرز شرقی، ۱۳۸۸). با توجه به کاهش ذخائر زغال کک شو در منطقه طزره و هم چنین مشکلات فنی و اجرائی عدیده در ارتباط با بهره برداری از

افق‌های غیره و نبود امکان اجرای طرح‌های بهره‌برداری در مقیاس وسیع در محدوده‌های معادن اولنگ و قشلاق و با توجه به‌نوع کاربری زغال‌سنگ‌های تخت و اجبار در مخلوط کردن این زغال‌سنگ‌ها با زغال‌سنگ‌های کک‌شو منطقه طزره و به‌منظور جلوگیری از رکود یا احتمالاً توقف فعالیت‌های معدنی شرکت و با عنایت به طرح توازن تهیه شده به‌وسیله شرکت ملی فولاد ایران برای افزایش تولید در سال‌های آینده، جای‌گزینی محدوده زغال‌دار تخت با توجه به پتانسیل بسیار خوب آن (ذخیره قطعی حدود ۶ میلیون تن و ذخیره احتمالی تا ۲۵ میلیون تن) ضروری است (شرکت معادن زغال البرز شرقی، ۱۳۸۸).

روش پژوهش

برای دستیابی به اهداف پژوهش و طی بازدید از معدن تخت در اردیبهشت ۹۸ نمونه‌برداری از لایه‌های زغال-سنگی در حال معدن‌کاری در ۳ تونل شماره ۳، ۴ و ۵ (لایه‌های K8، K10 و K19) و لایه‌های دارای زغال‌سنگ نارس (۳ لایه) در جاده‌های ورودی به معدن انجام شد (شکل ۲). بخشی از نمونه‌ها بعد از خردایش و نمایش در هاون چینی به‌عنوان نمونه معرف برای تجزیه شیمیایی آماده شدند و از بخشی دیگر مقطع صیقلی برای پتروگرافی زغال‌سنگ و تعیین نوع ماسرال در ۲ نمونه K19T5 و K8T3 تهیه شد (جدول ۱). تجزیه شیمیایی برای عناصر آلی شامل کربن آلی، هیدروژن، گوگرد و نیتروژن (CHNS)، اکسیدهای عناصر اصلی (SiO₂, Al₂O₃, Na₂O, K₂O, Fe₂O₃, CaO)، و عناصر کمیاب (شامل ۴۸ عنصر واسطه، شبه فلزات، غیرفلزات، La و Ce از عناصر نادر خاکی و U و Th از عناصر رادیواکتیو) در ۳ نمونه زغال‌سنگ از لایه‌های در حال معدن‌کاری معدن تخت (لایه‌های زغالی K8، K10 و K19) و ۳ نمونه از ۳ لایه زغالی نارس به‌ترتیب در بخش ژئوشیمی پژوهشگاه صنعت نفت ایران (برای عناصر آلی و اکسیدهای عناصر اصلی با استفاده از XRF؛ جدول ۲) و آزمایشگاه MSALABS در ایالت بریتیش کلمبیای کانادا (تجزیه عناصر کمیاب با استفاده از ICP-MS) انجام شد. حدتشخیص دستگاه آنالیز برای هر عنصر و داده‌های حاصل از تجزیه عنصری نمونه‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. پردازش آماری داده‌ها با استفاده از برنامه Excel و SPSS انجام شد. در این مقاله به تبیین غلظت برخی عناصر کمیاب و شاخص در زغال‌سنگ‌ها مانند V، Ge، Ga، U، Sc، La، Ce، Y و Zr در نمونه‌های زغال‌سنگ تخت و همچنین غنی‌شدگی - تهی‌شدگی نمونه‌ها از عناصر مورد نظر نسبت به کلارک این عناصر، میانگین جهانی غلظت عناصر مذکور در زغال‌سنگ‌های سخت و قهوه‌ای جهان و عیار حد اقتصادی این عناصر در خاکستر زغال‌سنگ (جدول ۴) پرداخته شده و نتایج حاصل مورد ارزیابی و بحث قرار گرفته است.

جدول ۱. نتایج پتروگرافی و تعیین نوع ماسرال در نمونه‌های زغال‌سنگ معدن تخت، مینودشت، استان گلستان
Table 1. Petrographic results and maceral identification in coal samples of Takht mine, Minoodasht, Golestan province

نمونه	تعداد نقاط آنالیز شده	درصد بازتاب و تریپتیت			میانگین درصد بازتاب و تریپتیت	نوع ماسرال		
		دامنه ۰/۵۰-۰/۶۶	دامنه ۰/۶۶-۰/۸۲	دامنه ۰/۸۲-۰/۹۸		درصد حجمی لپتیت	درصد حجمی اینتر تریپتیت	درصد حجمی ویترو تریپتیت
نمونه K8T3	۷۰	۷۱/۴۳ درصد حجمی	۲۴/۳۹ درصد حجمی	۴/۲۹ درصد حجمی	۱/۵۳	۲۰	۳	۴
نمونه K19T5	۱۰۶	۱ درصد حجمی	۸/۵۰ درصد حجمی	۹۰/۵۰ درصد حجمی	۱/۷۰	۷۶	۲۲	۲



شکل ۲. تصاویری از تونل‌های استخراجی (آ)، لایه‌های زغال سنگی، ب-پ) و نمونه‌های زغال سنگ، ت) نمونه K19T5، ث) نمونه K8T3، ج) نمونه لایه ۱ از معدن تخت، مینودشت، استان گلستان
Figure 2. Images of mining tunnels a) coal seams, b-c) and coal samples (T-sample K19T5, d) sample (K8T3, e) sample from layer f) from Takht mine, Minoodasht, Golestan Province

جدول ۲. نتایج تجزیه عناصر آلی و اصلی در نمونه‌های زغال سنگ درجه بالا و نارس از معدن تخت، مینودشت، استان گلستان
Table 2. Organic and major elements analytical results in immature and high-grade coal samples from Takht Mine, Minoodasht, Golestan province

H/C (Atomic ratio)	O/C (Atomic ratio)	Total (wt.%)	CaO (wt.%)	Na ₂ O (wt.%)	K ₂ O (wt.%)	MgO (wt.%)	Fe ₂ O ₃ (wt.%)	Al ₂ O ₃ (wt.%)	SiO ₂ (wt.%)	TOC (wt.%)	O (wt.%)	N (wt.%)	H (wt.%)	S (wt.%)	C (wt.%)	نمونه‌ها	کلاس نمونه
۰/۷۸	۰/۱۰	۹۸/۰۴	۰/۴۷	۰/۱۱	۰/۱۸	۰/۰۷	۱/۱۳	۱/۹۰	۳/۵۱	۸۱/۷۶	۱۰/۶۱	۱/۵۱	۴/۳۰	۰/۴۹	۷۳/۸۲	نمونه K19T5	کلاس نمونه
۰/۷۳	۰/۱۶	۹۹/۵۸	۲/۵۸	۱/۱۳	۱/۰۸	۰/۲۹	۱/۰۶	۲/۱۴	۸/۹۳	۶۸/۳۷	۱۳/۴۲	۱/۲۱	۴/۶۱	۰/۷۴	۶۲/۵۱	نمونه K10T4	
۰/۹۳	۰/۱۸	۹۸/۲۲	۲/۳۸	۱/۰۲	۱/۲۷	۰/۳۱	۱/۱۱	۲/۸۰	۹/۸۰	۶۲/۵۲	۱۴/۱۱	<۰/۵۲	۴/۶۷	۰/۸۳	۵۹/۵۰	نمونه K8T3	کلاس نمونه
۱/۷۰	۰/۷۴	۹۸/۰۹	۱۳/۹۹	۲/۹۵	۴/۲۹	۰/۸۴	۳/۴۱	۱۱/۷۲	۱۹/۸۷	۲۰/۷۱	۱۸/۸۱	<۰/۵	۲/۷۱	۰/۰۴	۱۹	لایه ۱	
۱/۵۹	۰/۵۰	۹۸/۰۵	۱۱/۷۸	۲/۶۸	۴/۱۲	۰/۸۱	۴/۱۰	۸/۶۱	۱۷/۶۵	۲۳/۸۵	۱۷/۸۸	<۰/۵	۳/۵۱	۰/۰۳	۲۶/۴۰	لایه ۲	
۰/۷۳	۰/۲۱	۹۸/۶۵	۲/۱۵	۱/۰۹	۱/۲۷	۰/۱۷	۱/۷۲	۴/۳۰	۸/۰۹	۵۰/۴۲	۱۶/۹۳	<۰/۵	۳/۶۲	۰/۰۵	۵۸/۸۱	لایه ۳	کلاس نمونه

جدول ۳. نتایج تجزیه شیمیایی نمونه‌های زغال سنگ خام و خاکستر از معدن زغال تخت، مینودشت، استان گلستان
Table 3. Chemical analysis results of raw coal and ash samples from Takht coal mine, Minoodasht, Golestan province

Ag	Al	As	Ba	Be	Bi	Ca	Cd	Ce	Co	Cr	Cs	Cu	Fe	Ga	Ge	واحد غلظت
۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۴	۲۰	۰/۱	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۲	۲	۰/۱	۰/۴	۰/۰۲	۰/۱	۰/۱	حد تشخیص دستگاه
۰/۱۱	۴/۹۷	۸/۳	۴۳۹	۲/۱	۰/۳۳	۰/۴	۰/۱۸	۵/۳۳	۹/۵	۶۳	۵/۱	۵/۱	۰/۹۵	۱۳/۷	۱	K8T3
۰/۰۳	۰/۶۷	۰/۴	۱۹۲	۱/۳	۰/۰۳	۰/۸۲	۰/۰۵	۳/۲۸	۵/۹	۵	۰/۱	۹/۳	۰/۳۲	۲/۳	۰/۳	K10T4
۰/۰۶	۰/۲۹	۲/۶	۱۴۷	۳/۷	۰/۰۳	۰/۶۲	۰/۰۴	۸/۹۷	۱۵/۱	۱۷	۰/۱	۵/۷۴	۰/۸۳	۴	۰/۳	K19T5
۰/۰۷	۳/۲۳	۷/۹	۳۳۴	۲/۳	۰/۴۵	۰/۲۸	۰/۱۲	۳۳/۴۱	۱۱/۴۵	۴۵	۳/۸	۴۵/۷	۰/۸۷	۱/۱۵	۱/۲	لایه ۱
۰/۰۸	۴/۵۳	۶/۸	۴۵۰	۱/۹	۰/۴۱	۰/۶۷	۰/۱۵	۲۲/۶۷	۳۲/۱۳	۳۳	۳/۱	۵۶/۶	۰/۶۱	۱/۰۵	۱/۵	لایه ۲
۰/۰۶	۳/۵۷	۶/۱	۴۱۲	۲/۵	۰/۳۲	۰/۲۵	۰/۱۱	۳۵/۰۳	۳۱/۱۲	۳۴	۴/۲	۵۰/۳	۰/۶۹	۹/۱	۰/۸	لایه ۳
Hf	In	K	La	Li	Mg	Mn	Mo	Na	Nb	Ni	P	Pb	Rb	Re	S	واحد غلظت
ppm	%	%	ppm	%	ppm	ppm	%	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%	%	
۰/۲	۰/۱۱	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۲	۱۰	۰/۱	۰/۱	۰/۰۲	۰/۲	۰/۴	۲۰	۱	۰/۲	۰/۰۴	۰/۰۲	حد تشخیص دستگاه
۲/۵	۰/۰۷	۰/۹۲	۲۲	۰/۳۱	۷/۱	۲/۵	۰/۱۵	۹	۳۳/۲	۱۴۶۶	۲۲	۶/۸	۰/۰۴	۰/۸۲	۰/۸۲	K8T3
۰/۳	۰/۰۳	۰/۰۲	۱	۰/۲۸	۶/۸	۱/۸	۰/۰۴	۰/۶	۱۴/۶	۳/۱۵	۵	۰/۹	۰/۰۴	۰/۶۱	۰/۶۱	K10T4
۱/۷	۰/۰۳	۰/۰۲	۴	۰/۲	۱۷۷	۱/۴	۰/۰۴	۲/۳	۲۵/۴	۳/۱۳	۹	۱/۲	۰/۰۴	۰/۵۲	۰/۵۲	K19T5
۰/۸	۰/۰۸	۰/۶۷	۱۲	۰/۲۵	۶۱	۳/۵	۰/۰۹	۶/۱	۳/۱	۱۲/۵	۱۰	۴/۱۳	۰/۰۴	۰/۹۳	۰/۹۳	لایه ۱
۱/۵	۰/۰۶	۰/۵۸	۱۰	۰/۱۹	۶۵	۲/۸	۰/۱۲	۴۹/۸	۱۱۰/۹	۱۷	۲۴/۷	۰/۰۴	۰/۸۷	۰/۸۷	۰/۸۷	لایه ۲
۲/۱	۰/۰۶	۰/۷۸	۸	۰/۳۸	۵۹	۱/۹	۰/۱۷	۴/۹	۲۶/۱	۹/۸۰	۸	۱/۹/۹	۰/۰۴	۰/۷۵	۰/۷۵	لایه ۳
Sb	Sc	Se	Sn	Ta	Te	Th	Ti	Tl	U	V	W	X	Y	Zn	Zr	واحد غلظت
۱	۰/۲	۲	۰/۴	۰/۴	۰/۱	۰/۱	۰/۲	۰/۰۴	۰/۲	۰/۲	۲	۰/۲	۰/۲	۴	۱	حد تشخیص دستگاه
<۱	۱۰/۳	<۲	۲/۱	۲۷۸/۱	۰/۸	۰/۳	۹/۶	۰/۲۵	۱/۰۱	۲/۷	۹۹	۱	۱۷	۳۷	۸۴	K8T3
<۱	۲/۱	<۲	۰/۸	۶۵/۵	<۰/۱	۰/۱	۰/۶	<۰/۰۲	۰/۰۸	۰/۷	۱۶	۰/۵	۴/۳	۳۴	۱۰	K10T4
۲	۱۶/۴	<۲	۲/۸	۶۸/۳	۰/۱	۰/۱	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۸	۵۶	۰/۴	۱۶/۳	۲۱	۹۶	K19T5
۱	۱۲/۱	<۲	۰/۸	۴۹۶/۵	۰/۶	۰/۱	۶/۵	۰/۱۳	۱/۳۲	۲/۱	۸۷	۰/۹	۱۲/۱	۲۸	۷۷	لایه ۱
۱	۱۰/۳	<۲	۰/۹	۵۱۲/۱	۰/۷	۰/۴	۵/۹	۰/۲۷	۲/۱۳	۲/۵	۷۹	۱/۲	۱۴/۵	۲۶	۸۱	لایه ۲
<۱	۱۵/۸	<۲	۱/۱	۵۳۴/۶	۰/۳	۰/۲	۴/۱	۰/۳۱	۲/۰/۸	۳	۸۸	۰/۸	۱۳/۳	۲۵	۸۹	لایه ۳

جدول ۴. میانگین جهانی غلظت عناصر فرعی و کمیاب در زغال سنگ‌های درجه بالا (سخت) و درجه پایین (قهوه‌ای)، عیار حد اقتصادی این عناصر در خاکستر زغال سنگ (بر پایه داده‌ها از Seredin & Finkelman, 2008; Aftabi et al., 2015; Dai & Finkelman, 2018)، کلارک عناصر (از Levinson 1980) و میانگین غلظت عناصر مذکور در زغال سنگ‌های البرز (بر پایه تلفیق داده‌ها از Yazdi & Esmaeilnia 2004; Goodarzi et al., 2006; Yazdi, 2012; Moore & Esmaeili, 2012؛ قلی‌پور و همکاران، ۱۳۸۸؛ آقایی و همکاران، ۱۳۹۰، ۱۳۹۱؛ طاهری و همکاران، ۱۳۹۳؛ شهرزاد و همکاران، ۱۳۹۳؛ شمعانیان و حسینی، ۱۳۹۴؛ سلیمانی مارشک و تقی‌پور، ۱۳۹۴؛ معمار، ۱۳۹۵)

Table 4. Global average of trace elements concentration in high-grade (hard) and low-grade (brown) coals, the economic cut-off-grade of these elements in coal ash (based on data from Seredin & Finkelman, 2008; Aftabi et al., 2015; Dai & Finkelman, 2018), Clarke of elements (from Levinson 1980) and average concentration of the elements in coal samples from other areas in the Alborz region (Based on a combination of data from Yazdi & Esmaeilnia 2004; Goodarzi et al., 2006; Yazdi, 2012; Moore & Esmaeili, 2012; Gholipour et al., 2009; Aghaei et al. 2010, 2011; Taheri et al., 2013; Shahraz et al., 2010; Shamanian & Hosseini, 2014; Soleimani Marshak & Taghipour, 2014; Memar, 2015)

Ag	As	Ba	Be	Cd	Ce	Co	Cr	Cs	Cu	Ga	Ge	Hf	La	Li	Mo	Nb	
۰/۰۹	۷/۶	۱۵۰	۱/۲	۰/۲۴	۲۲	۴/۲	۱۵	۰/۹۸	۱۵	۵/۵	۲	۱/۲	۱۰	۱۰	۲/۲	۳/۳	میانگین جهانی ذغال سنگ‌های درجه پایین (زغال قهوه‌ای)
۰/۱	۹	۱۵۰	۲	۰/۲	۲۳	۶	۱۷	۱/۱	۱۶	۶	۲/۴	۱/۲	۱۱	۱۴	۲/۱	۴	میانگین جهانی زغال سنگ‌های درجه بالا (زغال سخت)
۱۰	-	-	۳۰۰	-	-	-	-	-	۱۵۰	-	۷۵	۳۰۰	-	-	-	-	عیار حد اقتصادی عناصر در خاکستر ذغال سنگ
۱	۳	۵۳۹	۳/۷۵	۱	۶۰	۳۴	۵۶	۶	۵۳	۳	۰/۴	۱	۲۱	۱۲	۴	۴۰	میانگین ذغال سنگ‌های البرز
۰/۰۵	۲	۵۵۰	۳	۰/۱	۶۴	۱۰	۳۵	۳/۷	۲۵	۱۷	۱/۶	۵/۸	۳۰	۲۰	۲	۲۵	کلارک عناصر
Ni	Pb	Rb	Sb	Sc	Se	Sn	Sr	Ta	Th	Tl	U	V	W	Y	Zn	Zr	
۹	۶/۶	۱۰	۱	۴/۱	۱	۰/۷۹	۱۲۰	۰/۲۶	۳/۳	۰/۶۸	۲/۹	۲۲	۱/۲	۸/۶	۱۸	۳۵	میانگین جهانی ذغال سنگ‌های درجه پایین (زغال قهوه‌ای)
۱۷	۹	۱۸	۱	۳/۷	۱/۶	۱/۴	۱۰۰	۰/۳	۳/۲	۰/۵۸	۱/۹	۲۸	۰/۹۹	۸/۲	۲۸	۳۶	میانگین جهانی زغال سنگ‌های درجه بالا (زغال سخت)
۱۰۰۰	۳۰۰	-	-	-	۱۰۰۰	۱۰۰	۵۰۰	-	-	-	-	-	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۳۰۰	عیار حد اقتصادی عناصر در خاکستر زغال سنگ
۶۳	۴۲	۷۸	۲	۱۴	۲	۱/۵	۴۶۲	۱	۱۲	۰/۲۳	۴	۷۷	۱۰	۳۶	۶۳	۱۸۷	میانگین زغال سنگ‌های البرز
۲۰	۲۰	۱۱۲	۰/۲	۱۱	۱۱	۵/۵	۳۵۰	۲/۲	۱۰/۷	۰/۸	۲	۶۰	۲	۲۲	۷۱	۱۹۰	کلارک عناصر

نتایج

زمین‌شیمی عناصر آلی

بر پایه تجزیه عناصر آلی تشکیل‌دهنده نمونه‌های زغال سنگ استفاده شده در این پژوهش (جدول ۲)، زغال سنگ‌ها به ۳ رده زغالی بیتومینه (نمونه K19T5)، نیمه بیتومین-لیگنیت (K8T3, K10T4)، لیگنیت (لایه زغالی شماره ۳) و تورب (نمونه‌های مربوط به لایه‌های زغالی شماره ۱ و ۲) قابل گروه‌بندی هستند (شکل ۳ آ). نمونه زغال سنگ نوع بیتومینه ۷۳/۸ درصد کربن کل، ۸۱/۷۶ درصد کربن آلی کل، نسبت اتمی O-C حدود ۰/۱۰ و H-C حدود ۰/۷۰ نشان داده است. در مقایسه، زغال سنگ نیمه بیتومین-لیگنیت مقدار کربن کل بین ۵۹/۵ تا ۶۲/۵ درصد با کربن آلی

کُل از ۶۲/۵ تا ۶۸/۳۷ درصد و نسبت اتمی O-C از ۰/۱۶ تا ۰/۱۸ و H-C از ۰/۷۳ تا ۰/۸۸ را به دست داده است (جدول ۲). زغال سنگ نوع لیگنیت با ۵۸/۵ درصد کربن کل، ۵۰ درصد کربن آلی کُل و نسبت اتمی O-C حدود ۰/۲۱ و H-C حدود ۰/۷۳ نشان داده است (جدول ۲). لایه‌های زغالی نارس با رده زغالی تورب ۱۹ تا ۲۶/۴ درصد کربن کل نشان داده‌اند. میزان کربن آلی کل نمونه‌های تورب از ۲۳ تا حدود ۲۴ درصد تعیین شده است و نسبت اتمی O-C از ۰/۵۰ تا ۰/۷۴ و H-C از ۱/۵۹ تا ۱/۷۰ به دست آمده است (جدول ۲). میزان گوگرد (S₂) در نمونه‌های بررسی شده بسیار کم و از ۰/۰۳ (در تورب) تا ۰/۸۳ (در زغال سنگ نیمه بیتومینه-لیگنیت) درصد، مقدار هیدروژن (H₂) در نمونه‌ها از ۲/۷ تا ۴/۶ درصد و مقدار نیتروژن (N₂) از ۰/۵ تا ۱/۵ درصد متغیر بود. اکسیژن (O₂) در نمونه‌های تورب دارای بیشترین مقدار (۱۷/۸۸ تا ۱۸/۸۱ درصد) و در نمونه زغال بیتومینه کمترین مقدار (۱۰/۶ درصد) تعیین شده است. بر پایه شبیه‌سازی دما- ژرفا صورت گرفته بر روی نمونه‌های زغال سنگ با استفاده از دستگاه پیرولیز مواد آلی Rock-Eval، زغال سنگ‌های بررسی شده دمای زمین‌شناسی از ۷۰ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد را طی فرایند زغالی شدن متحمل شده‌اند که منطبق بر ژرفای ۲ تا ۲/۵ کیلومتری برای دیاژنز در حوضه زغالی بررسی شده می‌تواند باشد.

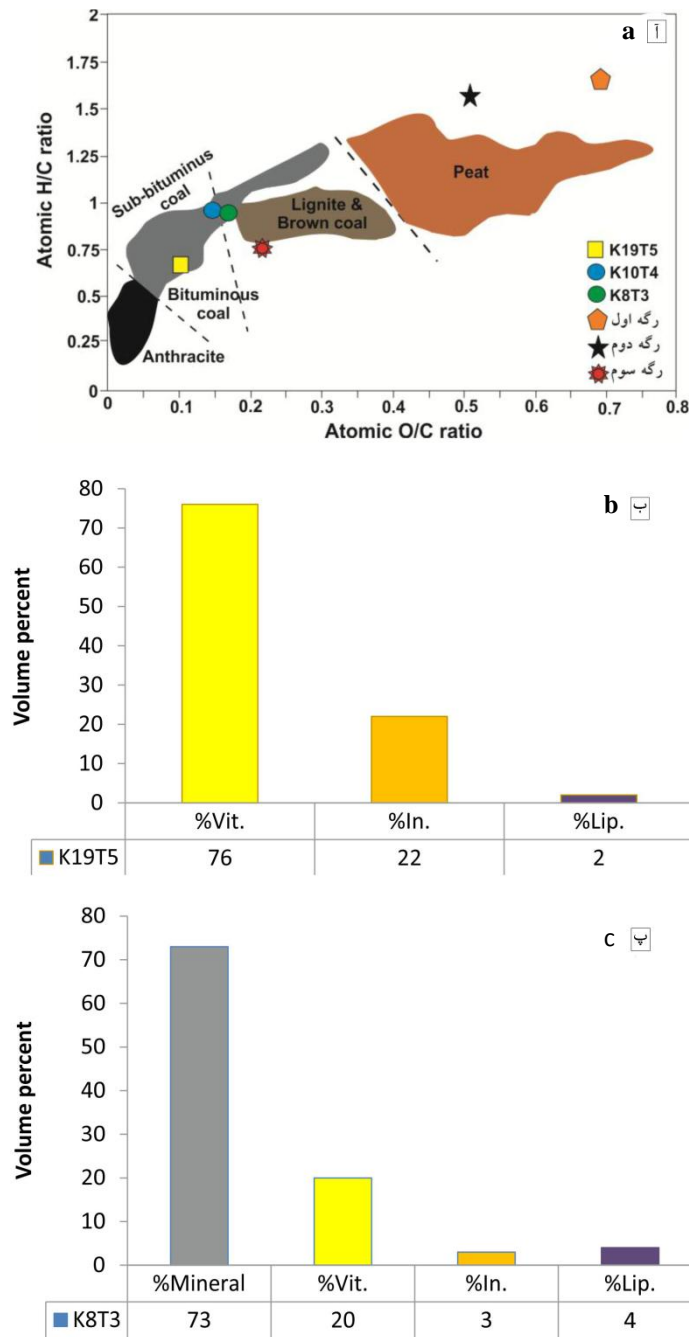
نتایج پتروگرافی دو نمونه زغال سنگ درجه بالا (K19T5) و درجه پایین (K8T3) معدن تخت در این مطالعه (جدول ۱) که در پژوهشگاه صنعت نفت انجام شد سازگار با ترکیب ماسرال‌های شناخته شده برای زغال سنگ‌های بیتومینه و لیگنیت است به طوری که نمونه K19T5 با درجه زغالی نوع بیتومینه عمدتاً از ماسرال‌های نوع ویتترینیت (۷۶ درصد حجمی) و به میزان کم‌تر از ماسرال‌های نوع اینرتینیت (۲۲ درصد حجمی) و لیپتینیت (۲ درصد حجمی) تشکیل یافته است (شکل ۳ ب). در مقایسه، نمونه K8T3 به عنوان زغال سنگ درجه پایین نوع لیگنیت عمدتاً از کانی‌ها (۷۳ درصد حجمی) تشکیل شده و فقط ۲۷ درصد حجمی آن ماسرال است (شکل ۳ پ). در این نوع زغال سنگ، ماسرال غالب ویتترینیت بوده است (۲۰ درصد حجمی) و ماسرال‌های اینرتینیت (۳ درصد حجمی) و لیپتینیت (۴ درصد حجمی) سهم ناچیزی از بخش ماسرالی زغال سنگ لیگنیت معدن تخت را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۳ پ). تصاویر میکروسکوپی نور بازتابی از نمونه‌های زغال سنگ درجه بالا (K19T5) و درجه پایین (K8T3) که میزان بازتاب ماسرال‌ها در آنها مشخص شده در شکل ۴ ارائه شده است.

زمین‌شیمی عناصر کمیاب

غلظت عناصر کمیاب در دو نوع نمونه شامل زغال سنگ خام (شکل ۵، شکل ۶ و شکل ۷) بدین شرح قابل تبیین است:

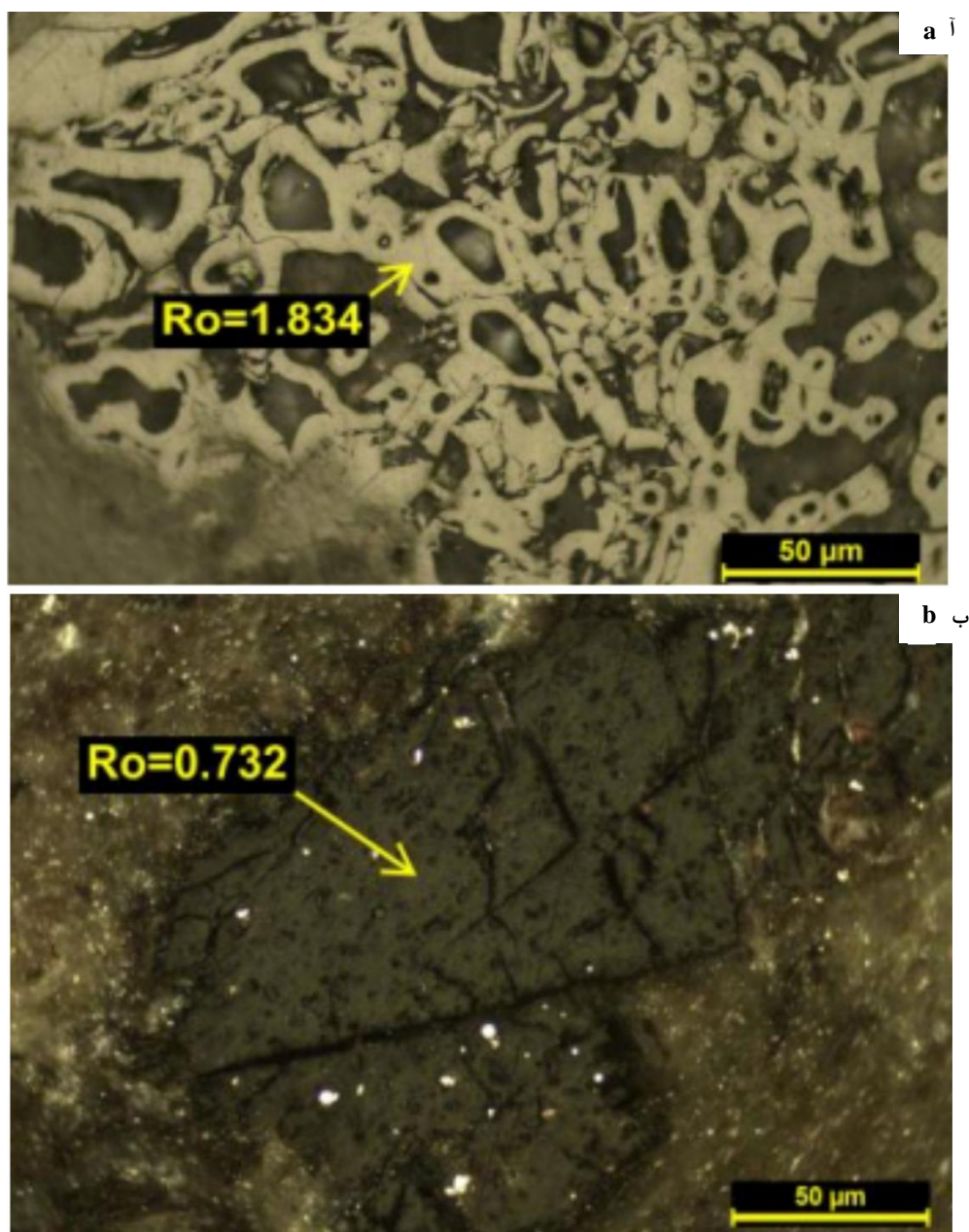
نمونه‌های زغال سنگ خام

گالیوم (Ga): غلظت گالیوم در نمونه‌های زغال سنگ درجه بالا تا نارس و تورب در معدن تخت (۱۱ ppm-۴ ppm) بسیار کم‌تر از کلارک گالیوم (۱۷ ppm) اما بیش‌تر از میانگین جهانی غلظت گالیوم در زغال سنگ‌های سخت و قهوه‌ای جهان (بین ۶ ppm و ۵/۵ ppm) به دست آمده است. غنی‌شدگی گالیوم بیش‌تر در نمونه‌های تورب و زغال سنگ نارس (لیگنیت) اتفاق افتاده است (بین ۱۱ ppm و ۹ ppm) و کم‌ترین غلظت مربوط به زغال سنگ درجه بالای معدن تخت (۴ ppm) است (شکل ۵).



شکل ۳. آ) تعیین درجه زغالی شدن نمونه‌های استفاده شده در پژوهش حاضر روی نمودار van Krevelen (نمودار پایه از Orem & Finkelman 2005)، ب) درصد حجمی انواع ماسرال (ویترینیت، اینرتینیت، In. و لیپتینیت، Lip) در زغال-سنگ درجه بالا از معدن تخت، پ) درصد حجمی انواع ماسرال (ویترینیت، اینرتینیت، In. و لیپتینیت، Lip) و کانی‌ها در نمونه زغال سنگ درجه پایین از معدن تخت

Figure 3. a) Determining the degree of coalification in the samples used in the present study on the van Krevelen diagram (baseline diagram from Orem and Finkelman 2005), b) Volumetric percentage of various macerals (Vitrinite Vit.; Inertinite In. and Liptinite Lip.) in high-grade coal samples from Takht mine, c) Volumetric percentage of various macerals (Vitrinite Vit.; Inertinite In. And Liptinite Lip.) and minerals in low-grade coal sample from Takht mine



شکل ۴. تصاویر میکروسکوپی نور بازتابی از ماسرال‌های با درصد بازتاب متفاوت ویتترینیت در (آ) نمونه زغال سنگ درجه بالا (نمونه K19T5) و (ب) نمونه زغال سنگ درجه پایین (K8T3) از معدن تخت
Figure 4. Reflected light microscopic images of macerals with different vitrinite reflectance percentages in (a) high-grade coal sample (K19T5 sample) and (b) low-grade coal sample (K8T3) from the Takht mine.

ژرمانیوم (Ge): ژرمانیوم در نمونه‌های زغال سنگ و تورب معدن تخت غلظت‌هایی پایین‌تر از کلارک و میانگین غلظت ژرمانیوم زغال سنگ‌های سخت و قهوه‌ای جهان به نمایش گذاشته است. ظاهراً نمونه‌های تورب بیش‌ترین غلظت ژرمانیوم و نزدیک به کلارک را داشته است (شکل ۵).

اسکاندیوم (Sc): نمونه‌های زغال سنگ معدن تخت دامنه محدودی از غلظت اسکاندیوم (۶ ppm-۱۶ ppm) بیش‌تر از میانگین اسکاندیوم در زغال سنگ‌های سخت و قهوه‌ای جهان (حدود ۴ ppm) را به نمایش گذاشته است. میانگین

غلظت اسکاندیوم در نمونه‌های زغال سنگ درجه بالا و درجه پایین معدن تخت (حدود ۱۲ppm) نزدیک به کلارک اسکاندیوم (۱۱ppm) است (شکل ۵).

اورانیوم (U): اورانیوم دامنه نسبتاً گسترده‌ای از غلظت اورانیوم با کم‌ترین غلظت در زغال سنگ درجه بالا (۰/۸ppm) تا بیش‌ترین غلظت در لیگنیت (۳ppm) و تورب (۲/۸ppm) را به نمایش گذاشته است که اندکی بیش‌تر از کلارک اورانیوم (۲ppm) است. زغال سنگ درجه بالا معدن تخت به‌میزان زیادی نسبت به زغال سنگ‌های سخت و قهوه‌ای جهان از اورانیوم تهی‌شدگی نشان می‌دهد لیکن غلظت اورانیوم در زغال سنگ‌های نارس (لیگنیت) نزدیک به غلظت اورانیوم زغال سنگ‌های قهوه‌ای جهان (حدود ۳ppm) است (شکل ۵).

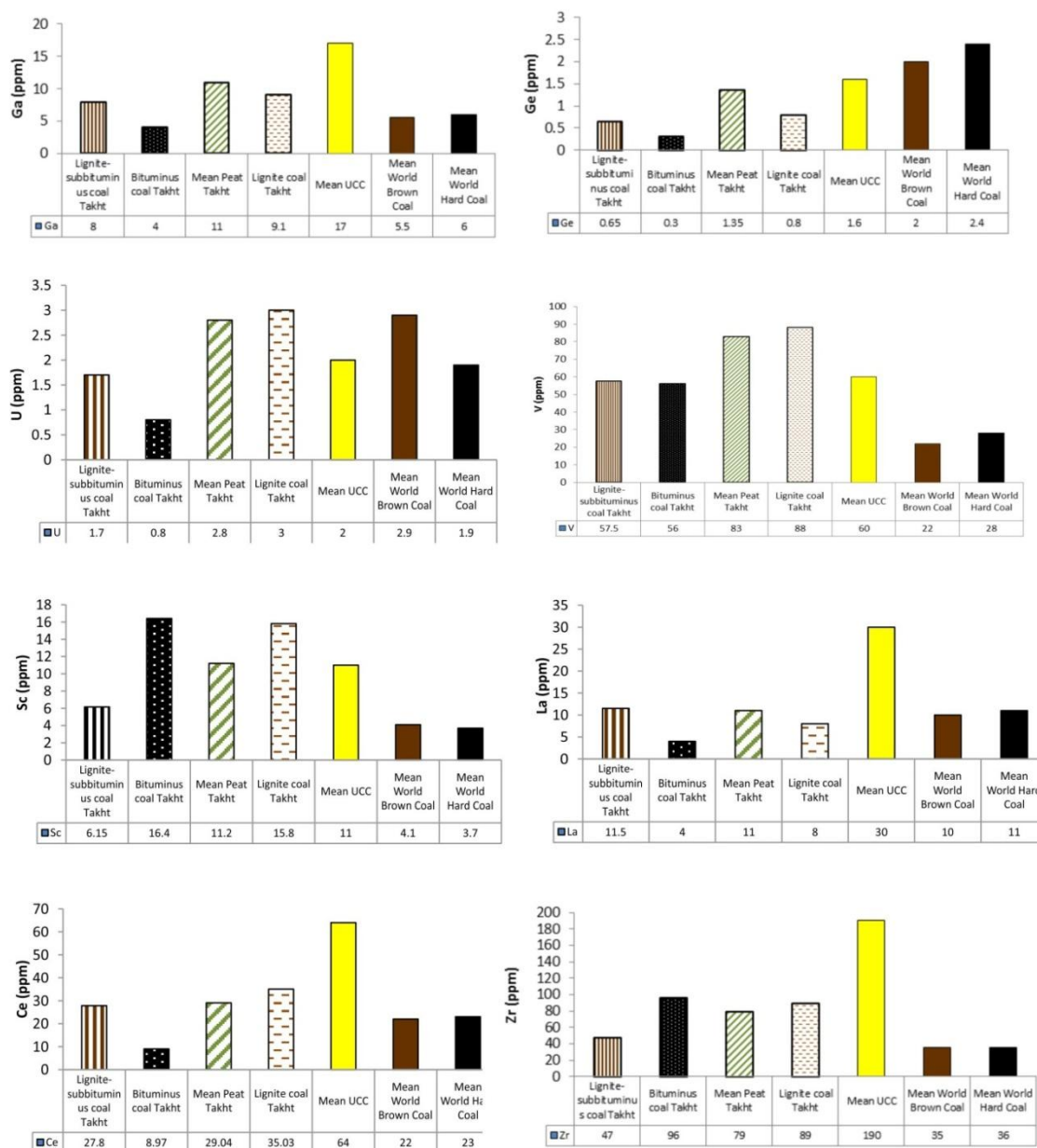
لانتانیوم (La): دامنه غلظت لانتانیوم در نمونه‌های زغال سنگ درجه بالا تا نارس و تورب در معدن تخت محدود (۱۱/۵ppm-۴ppm) و بسیار کم‌تر از کلارک لانتانیوم (۳۰ppm) است. زغال سنگ درجه بالای تخت با کم‌ترین غلظت لانتانیوم به‌میزان بیش از ۲ برابر از لانتانیوم نسبت به زغال سنگ‌های سخت و قهوه‌ای جهان و زغال سنگ لیگنیت-ساب بیتومینه معدن تخت تهی‌شدگی نشان می‌دهد (شکل ۵).

سریوم (Ce): غلظت سریوم در نمونه‌های زغال سنگ درجه بالا تا نارس و تورب در معدن تخت گسترده (۳۵ppm-۹ppm) اما بسیار پایین‌تر از کلارک سریوم (۶۴ppm) است که نزدیک به میانگین جهانی سریوم در زغال سنگ‌های سخت و قهوه‌ای جهان (بین ۲۳ppm و ۲۲ppm) است (شکل ۵).

وانادیوم (V): وانادیوم با بالاترین غلظت در نمونه‌های زغال سنگ نارس (حدود ۸۸ppm) و تورب (۸۳ppm) غنی‌شدگی نسبی در وانادیوم نسبت به زغال سنگ درجه بالا (۵۶ppm) و درجه پایین معدن (۵۷ppm) و هم‌چنین زغال سنگ‌های سخت و قهوه‌ای جهان (۲۲ppm-۲۸ppm) نشان داده لیکن و غنی‌شدگی نسبت به کلارک وانادیوم (۶۰ppm) زیاد نیست (شکل ۵).

زیرکانیوم (Zr): نمونه‌های زغال سنگ معدن تخت دامنه نسبتاً محدودی از غلظت زیرکانیوم با بیش‌ترین غلظت در زغال سنگ درجه بالا (۹۶ppm) تا کم‌ترین غلظت در زغال سنگ درجه پایین (حدود ۴۷ppm) را به نمایش گذاشته‌اند که بسیار کم‌تر از کلارک زیرکانیوم (۱۹۰ppm) اما بیش‌تر از غلظت میانگین زیرکانیوم در زغال سنگ‌های سخت و قهوه‌ای جهان (۳۶ppm-۳۵ppm) هستند (شکل ۵).

مقایسه غنی‌شدگی-تهی‌شدگی عناصر فلزی واسطه (Sc, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Y, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, Hf, W)، نادر خاکی (Ce و La) و رادیواکتیو (U و Th) بین انواع زغال سنگ‌های درجه بالا (بیتومینه؛ نمونه K19T5)، درجه پایین (لیگنیت-ساب بیتومینه؛ نمونه K10T4 و K8T3)، زغال سنگ نارس (لیگنیت؛ نمونه 3 Coal seam) و نمونه‌های تورب (Peat samples) در معدن زغال سنگ تخت (شکل ۶) نشان داد که زغال سنگ درجه بالا نسبت به زغال سنگ درجه پایین و تورب از عناصر Sc, Co, Ni, Cu, Y, Zr و Hf غنی‌شده و در بقیه عناصر فلزی واسطه، نادر خاکی (Ce و La) و رادیواکتیو (U و Th) تهی‌شده است. زغال سنگ درجه بالا نسبت به زغال سنگ درجه پایین و تورب بیش‌ترین تهی‌شدگی را در عناصر نادر خاکی (Ce و La) و رادیواکتیو (U و Th)، W, Mo, Cd, Zn و Cr نشان داده است. زغال سنگ درجه پایین (لیگنیت-ساب بیتومینه؛ نمونه K10T4 و K8T3) نسبت به تورب در عمده عناصر به‌جز Zn و Hf تهی‌شدگی چشم‌گیری و تهی‌شدگی از عناصر Sc, V, Co, Cu, Hf, Zr و U در زغال سنگ درجه پایین (لیگنیت-ساب بیتومینه؛ نمونه K10T4 و K8T3) نسبت به زغال سنگ نارس (لیگنیت؛ نمونه 3 Coal seam) چشم‌گیرتر است لیکن در عناصر La, Th, Mo و Ag اندکی غنی‌شدگی نشان می‌دهد. به‌نظر می‌رسد نمونه‌های تورب



شکل ۵. مقایسه غلظت میانگین برخی عناصر کمیاب بین زغال سنگ‌های معدن تخت و زغال سنگ‌های سخت و قهوه‌ای جهان و کلارک این عناصر (Mean UCC)

Figure 5. Comparison of the average concentrations of some trace elements in coal samples of the Takht mines and those of the world, Clarke of the elements (Mean Upper continental crust)

در عمده عناصر (به‌ویژه عناصر Th, U, Ce, Cd, Mo, Nb) غنی‌تر از زغال سنگ درجه پایین و زغال سنگ درجه بالا هستند (شکل ۶). مقایسه غنی‌شدگی - تهی‌شدگی شبه فلزات و نافلزات (Ga, In, Tl, Sn, Pb, Bi, Ge, Ta, As, Te) بین انواع زغال سنگ‌های درجه بالا (بیتومینه؛ نمونه K19T5)، درجه پایین (لیگنیت-ساب بیتومینه؛ نمونه K10T4 و K8T3)، زغال سنگ نارس (لیگنیت؛ نمونه 3 Coal seam) و نمونه‌های تورب (Peat samples) در معدن زغال سنگ تخت (شکل ۶) نشان داد که زغال سنگ درجه بالا نسبت به زغال سنگ درجه پایین و تورب از عمده شبه فلزات و نافلزات (به استثناء Sn) تهی‌شده است. تهی‌شدگی از عناصر مذکور نسبت به تورب چشم‌گیرتر از زغال سنگ درجه پایین است. تورب در عمده شبه فلزات و نافلزات به استثناء Sn, Ta, As و Te نسبت به زغال سنگ درجه پایین

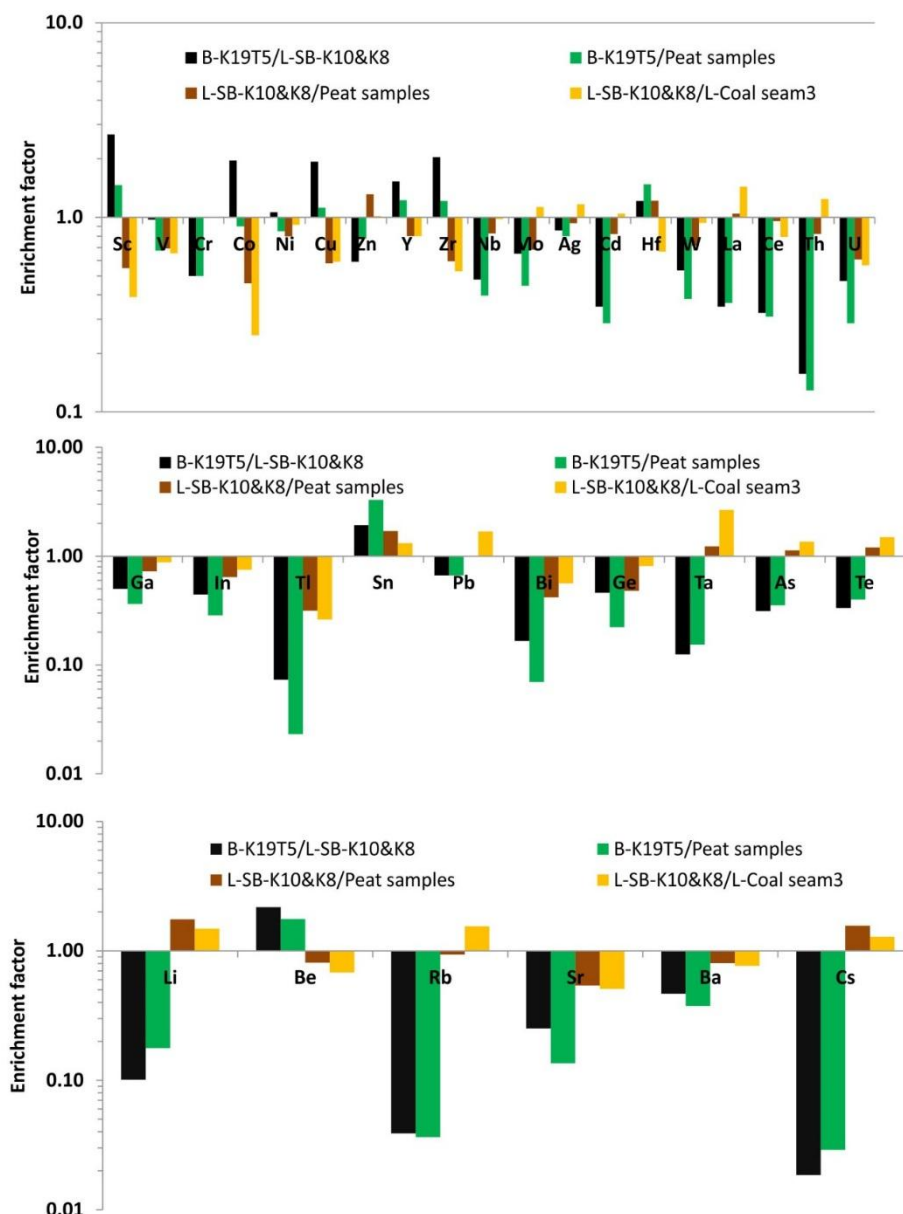
غنی‌شدگی چشم‌گیر در حالی که زغال سنگ درجه پایین فقط در Sn, Ta, As و Te غنی‌شدگی جزئی نسبت به تورب و زغال سنگ نارس نشان داده است (شکل ۷). مقایسه غنی‌شدگی-تهی‌شدگی عناصر گرانونفیل و لیتوفیل (Li, Be, Rb, Sr, Ba, Cs) بین انواع زغال‌سنگ‌های درجه بالا (بیتومینه؛ نمونه K19T5)، درجه پایین (لیگنیت-ساب بیتومینه؛ نمونه K10T4 و K8T3)، زغال سنگ نارس (لیگنیت؛ نمونه 3 Coal seam) و نمونه‌های تورب (Peat samples) در معدن زغال سنگ تخت (شکل ۶) نشان‌دهنده تهی‌شدگی چشم‌گیر زغال سنگ درجه بالا نسبت به زغال سنگ درجه پایین و تورب در عمده عناصر گرانونفیل و لیتوفیل (به استثناء Be) است. زغال سنگ درجه پایین نسبت به تورب در Li و Cs غنی‌شدگی و در بقیه عناصر گرانونفیل و لیتوفیل تهی‌شدگی نشان داده است. تورب در Rb, Sr, Ba و Li غنی‌شدگی چشم‌گیری نسبت به زغال سنگ درجه بالا اما از Be تهی‌شدگی نشان داده است. در مقایسه با زغال سنگ درجه پایین، تورب از Ba, Sr و Be غنی‌شدگی اما در Li و Cs تهی شده است (شکل ۶).

مقایسه میانگین غلظت عناصر فلزی واسطه، عناصر نادر خاکی (La و Ce) و عناصر رادیواکتیو (Th و U) در زغال سنگ تخت (میانگین زغال‌سنگ‌های بیتومینه و بیتومینه-لیگنیت در حال معدن کاری معدن تخت از لایه‌های K19T5, K10T4 و K8T3) با میانگین غلظت این عناصر در زغال‌سنگ‌های البرز، زغال‌سنگ‌های قهوه‌ای و سخت جهان نشان داد که زغال‌سنگ‌های معدن تخت در عمده عناصر میانگین غلظت کم‌تری از این عناصر نسبت به زغال‌سنگ‌های بقیه مناطق البرز دارند (شکل ۷). در مقایسه با میانگین زغال‌سنگ‌های قهوه‌ای و سخت جهان، زغال‌سنگ‌های معدن تخت دارای غلظت میانگین بیش‌تری برای Sc, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Y و Zr هستند و غلظت میانگین مشابهی با زغال‌سنگ‌های قهوه‌ای جهان برای Nb, Mo, Hf, Mo, W, La, Ce, Th و U دارند. زغال‌سنگ‌های معدن تخت در مقایسه با کلارک عناصر، دارای میانگین غلظت مشابهی برای Co, U و Mo است و به استثناء Cu دارای غلظت میانگین کم‌تری برای عمده عناصر نسبت به کلارک عناصر است (شکل ۷). مقایسه میانگین غلظت شبه فلزات و نافلزات بین زغال‌سنگ‌های معدن تخت (میانگین زغال‌سنگ‌های بیتومینه و بیتومینه-لیگنیت در حال معدنکاری معدن تخت از لایه‌های K19T5, K10T4 و K8T3) با زغال‌سنگ‌های قهوه‌ای و سخت جهان و زغال‌سنگ‌های بقیه مناطق البرز و کلارک عناصر نشان داده شده است که زغال‌سنگ‌های معدن تخت غلظت میانگین بیش‌تری برای Ga, As و Sb نسبت به زغال‌سنگ‌های بقیه مناطق البرز دارند لیکن در میانگین غلظت In, Ge, Bi, Se و Ta مشابه یا نزدیک به هم هستند اما غلظت میانگین بسیار کم‌تری برای Pb دارند. میانگین غلظت عناصر گرانونفیل و لیتوفیل در زغال تخت (میانگین زغال‌سنگ‌های بیتومینه و بیتومینه-لیگنیت در حال معدن کاری معدن تخت از لایه‌های K19T5, K10T4 و K8T3) کم‌تر از میانگین غلظت این عناصر در زغال‌سنگ‌های قهوه‌ای و سخت جهان، زغال‌سنگ‌های بقیه مناطق البرز و کمتر از کلارک عناصر مذکور است. غلظت میانگین Li در زغال سنگ تخت نزدیک به میانگین غلظت این عنصر در زغال‌سنگ‌های البرز است (شکل ۷).

با توجه به توزیع آماری نرمال داده‌های غلظتی عناصر فرعی و کمیاب در نمونه‌های زغال سنگ بررسی شده در این پژوهش که ناشی از غلظت‌های عمدتاً در حد کلارک عناصر بوده است از محاسبه ضریب هم‌بستگی خطی به‌روش پیرسون برای دستیابی به روابط بین جفت عناصر استفاده شده است. ماتریس هم‌بستگی به‌روش پیرسون نشان داد که حدود ۷۰ درصد ضرایب هم‌بستگی خطی بین عناصر مثبت است که حدود ۲۵ درصد در زمره ضریب هم‌بستگی قوی ($r \geq 0.8$)، ۲۲ درصد داده‌ها ضریب هم‌بستگی متوسط ($0.5 \leq r < 0.8$) و ۲۳ درصد داده‌ها ضریب هم‌بستگی ضعیف ($r < 0.5$) قرار گرفته‌اند (جدول ۵). Ga, Cd, Th و بیش‌ترین آمار ضرایب هم‌بستگی قوی ($r \geq 0.8$) را با عناصر نشان داده‌اند (با ۲۵ عنصر) و As, Ba, Ce, Cs, Nb و V در رتبه بعدی بیش‌ترین تعداد ضریب هم‌بستگی قوی قرار دارند

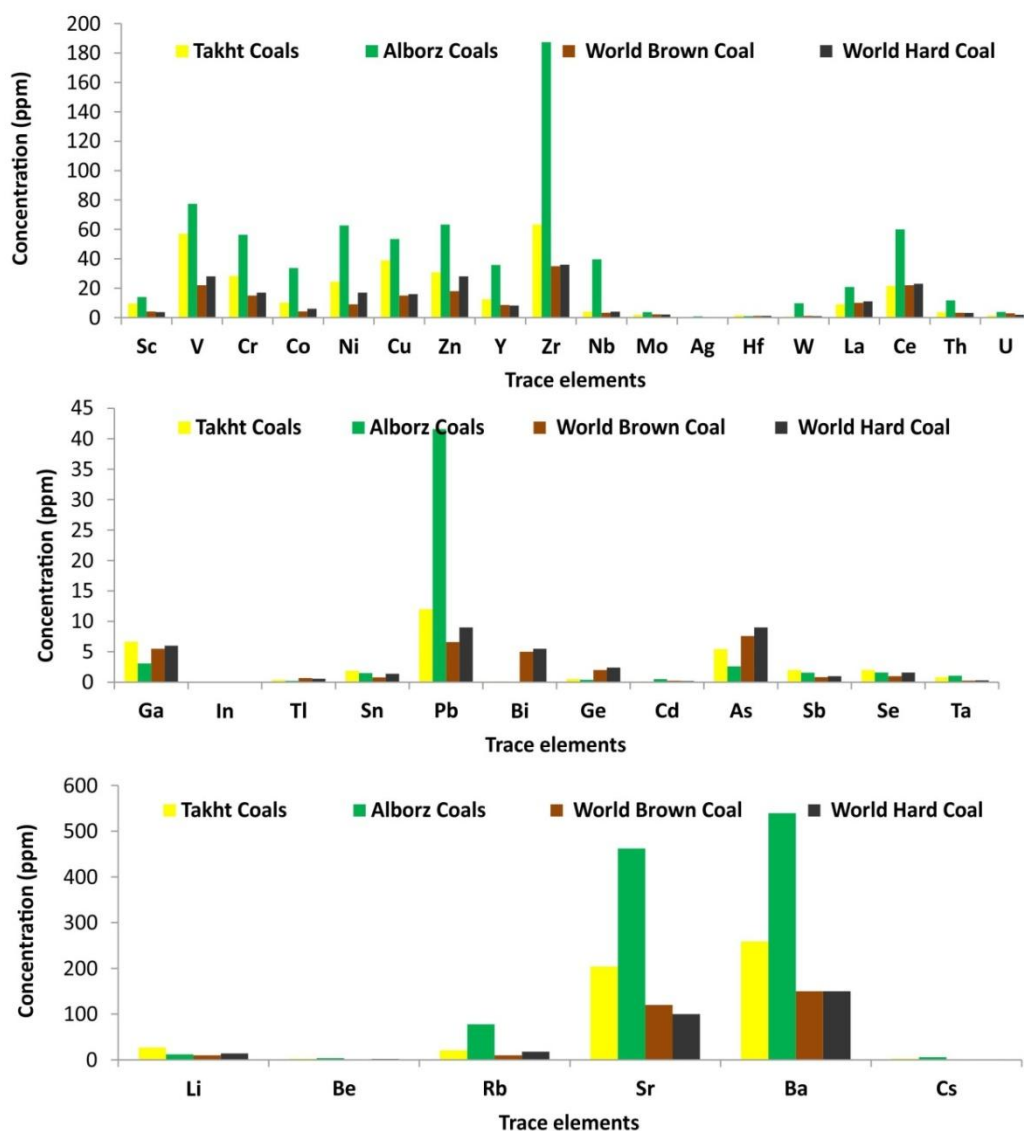
(با ۲۳ عنصر). رابطه بین عناصر اصلی سازنده کانی‌های سیلیکاتی و غیرسیلیکاتی در نمونه‌های زغال‌سنگ بررسی شده (شامل Al, K, Na, Ca, Mg, Fe, P و S) با عناصر کمیاب نشان داد که عناصر K, Al, P و S بیش‌ترین آمار ضرایب هم‌بستگی قوی ($r \geq 0.8$) را با عناصر کمیاب داشته‌اند و Ca و Mg ضریب هم‌بستگی منفی را با عناصر کمیاب به نمایش گذاشته‌اند (جدول ۳). رابطه بین غلظت عناصر کمیاب با میزان کربن آلی در نمونه‌های زغال‌سنگ بررسی شده نشان داد که به استثناء Sn ($r = +0.70$) و Be ($r = +0.35$) هم‌بستگی منفی متوسط تا قابل ملاحظه بین غلظت عمده عناصر کمیاب و میزان کربن آلی برقرار است (جدول ۶).

(UCC)



شکل ۶. مقایسه غنی‌شدگی-تهی‌شدگی عناصر کمیاب بین انواع زغال‌سنگ‌های درجه بالا (بیتومینه؛ نمونه K19T5)، درجه پایین (لیگنیت-ساب بیتومینه؛ نمونه K10T4 و K8T3)، زغال‌سنگ نارس (لیگنیت؛ نمونه ۳ Coal seam) و نمونه‌های تورب (Peat samples) در معدن زغال‌سنگ تخت

Figure 6. Comparison of trace elements enrichment-depletion among high-grade coals (bituminous; sample K19T5), low grade coals (lignite-sub-bituminous; samples K10T4 and K8T3), peat (lignite; coal seam 3) and peat samples in the Takht coal mine



شکل ۷. مقایسه غلظت میانگین عناصر کمیاب در زغال سنگ تخت (میانگین زغال سنگ های بیتومینه و بیتومینه-لیگنیت در حال معدن کاری از لایه های K19T5, K10T4 و K8T3) با میانگین غلظت این عناصر در زغال سنگ های البرز، زغال سنگ های قهوه ای و سخت جهان

Figure 7. Comparison of the average concentration of trace elements in coal samples from Takht mine (average of bituminous and bituminous-lignite coal samples; K19T5, K10T4 and K8T3) with those of other areas from the Alborz region, brown and hard coals of the world

جدول ۵.

	Ag	Al	As	Ba	Be	Bi	Ca	Cd	Ce	Co	Cr	Cs	Cu	Fe	Ga	Ge	Hf	In	K	La	Li	Mg	Mn
Ag	۱/۰۰																						
Al	۰/۸۰	۱/۰۰																					
As	۰/۸۴*	۰/۹۰*	۱/۰۰																				
Ba	۰/۷۰	۰/۸۸**	۰/۸۴*	۱/۰۰																			
Be	۰/۱۱	۰/۳۰	۰/۰۱	۰/۳۳	۱/۰۰																		
Bi	۰/۶۲	۰/۸۷*	۰/۹۲**	۰/۸۶*	۰/۲۱	۱/۰۰																	
Ca	۰/۶۶	۰/۵۹	۰/۸۳*	۰/۵۳	۰/۳۰	۰/۳۰	۱/۰۰																
Cd	۰/۸۶*	۰/۷۷**	۰/۹۱*	۰/۹۲**	۰/۳۱	۰/۸۶*	۰/۸۹*	۱/۰۰															
Ce	۰/۸۵*	۰/۸۷*	۰/۹۱*	۰/۸۲*	۰/۰۶	۰/۷۶	۰/۸۵*	۰/۸۹*															
Co	۰/۰۵	۰/۳۳	۰/۲۹	۰/۴۶	۰/۲۹	۰/۳۵	۰/۲۲	۰/۱۴	۱/۰۰														
Cr	۰/۸۵*	۰/۷۶	۰/۸۷*	۰/۶۶	۰/۰۵	۰/۶۸	۰/۹۰*	۰/۸۲*	۰/۹۶**	۰/۰۰	۱/۰۰												
Cs	۰/۷۸	۰/۸۳**	۰/۹۳**	۰/۹۰*	۰/۱۶	۰/۸۴*	۰/۹۲**	۰/۹۷**	۰/۳۱	۰/۰۰													
Cu	۰/۶۶	۰/۶۶	۰/۶۴	۰/۴۳	۰/۶۷	۰/۴۷	۰/۵۶	۰/۴۲	۰/۴۷	۱/۰۰													
Fe	۰/۷۷	۰/۴۲	۰/۷۱	۰/۳۰	۰/۶۰	۰/۴۴	۰/۸۵*	۰/۴۹	۰/۶۹	۰/۰۶	۰/۸۱	۰/۵۸	۰/۷۶	۱/۰۰									
Ga	۰/۸۷*	۰/۸۳**	۰/۹۸**	۰/۸۷*	۰/۱۰	۰/۹۰*	۰/۹۶**	۰/۹۴**	۰/۹۴**	۰/۲۰	۰/۰۰	۰/۹۵**	۰/۵۵	۰/۶۷	۱/۰۰								
Ge	۰/۶۳	۰/۸۶*	۰/۸۴*	۰/۸۴*	۰/۳۶	۰/۹۴**	۰/۴۳	۰/۸۵*	۰/۶۱	۰/۲۹	۰/۵۲	۰/۷۲	۰/۴۸	۰/۳۲	۰/۸۳*	۱/۰۰							
Hf	۰/۷۴	۰/۵۵	۰/۵۵	۰/۵۳	۰/۴۳	۰/۲۷	۰/۵۶	۰/۵۰	۰/۶۸	۰/۴۷	۰/۶۲	۰/۶۱	۰/۷۲	۰/۶۵	۰/۵۵	۰/۲۱	۱/۰۰						
In	۰/۶۹	۰/۸۷*	۰/۹۵**	۰/۸۳*	۰/۱۸	۰/۶۶**	۰/۸۱	۰/۸۸*	۰/۸۶*	۰/۳۳	۰/۸۲*	۰/۹۲**	۰/۴۲	۰/۵۶	۰/۹۴**	۰/۸۴*	۱/۰۰						
K	۰/۷۶	۰/۹۳**	۰/۸۶*	۰/۹۱**	۰/۰۶	۰/۸۶*	۰/۸۱	۰/۹۱*	۰/۶۶**	۰/۲۶	۰/۸۷*	۰/۹۹**	۰/۴۶	۰/۵۵	۰/۹۴**	۰/۷۳	۰/۶۰	۰/۹۲**	۱/۰۰				
La	۰/۹۲**	۰/۸۳*	۰/۸۶*	۰/۷۳	۰/۰۸	۰/۶۷	۰/۷۴	۰/۹۰*	۰/۹۳**	۰/۰۶	۰/۸۵**	۰/۸۷*	۰/۴۵	۰/۷۲	۰/۹۲**	۰/۶۱	۰/۶۴	۰/۷۸	۰/۸۴*	۱/۰۰			
Li	۰/۸۱	۰/۷۱	۰/۷۲	۰/۶۱	۰/۱۵	۰/۵۱	۰/۷۴	۰/۷۸	۰/۹۱*	۰/۱۶	۰/۸۳**	۰/۸۳*	۰/۲۲	۰/۶۴	۰/۸۰	۰/۳۸	۰/۵۹	۰/۶۹	۰/۸۰	۰/۹۴**	۱/۰۰		
Mg	۰/۰۰	۰/۶۶	۰/۱۵	۰/۳۲	۰/۲۲	۰/۱۱	۰/۴۱	۰/۱۸	۰/۴۶	۰/۲۹	۰/۲۶	۰/۴۸	۰/۲۲	۰/۰۰	۰/۱۹	۰/۱۵	۰/۳۲	۰/۲۵	۰/۲۸	۰/۲۱	۰/۴۶	۱/۰۰	
Mn	۰/۱۲	۰/۶۴	۰/۴۳	۰/۶۹	۰/۸۲*	۰/۶۴	۰/۲۱	۰/۶۰	۰/۴۶	۰/۱۱	۰/۲۲	۰/۶۰	۰/۳۱	۰/۲۵	۰/۵۰	۰/۵۷	۰/۱۴	۰/۶۳	۰/۶۱	۰/۲۴	۰/۲۸	۱/۰۰	
Mo	۰/۴۶	۰/۸۷*	۰/۷۴	۰/۵۷	۰/۲۵	۰/۸۶*	۰/۴۹	۰/۷۱	۰/۵۳	۰/۱۱	۰/۵۵	۰/۶۰	۰/۱۸	۰/۳۳	۰/۷۲	۰/۸۴**	۰/۸۴*	۰/۶۰	۰/۶۰	۰/۵۵	۰/۴۱	۰/۶۰	
Na	۰/۶۲	۰/۸۷*	۰/۷۷	۰/۹۱*	۰/۱۳	۰/۷۱	۰/۶۴	۰/۷۸	۰/۸۵*	۰/۶۱	۰/۶۸	۰/۹۰*	۰/۴۵	۰/۳۷	۰/۷۸	۰/۶۰	۰/۷۱	۰/۷۴	۰/۸۳**	۰/۶۷	۰/۶۴	۰/۶۱	
Nb	۰/۹۲**	۰/۹۰*	۰/۹۵**	۰/۸۲*	۰/۰۳	۰/۸۰	۰/۸۰	۰/۹۴**	۰/۶۶**	۰/۱۳	۰/۸۴**	۰/۹۴**	۰/۵۶	۰/۷۴	۰/۹۰**	۰/۷۳	۰/۶۵	۰/۸۷*	۰/۸۳**	۰/۸۷*	۰/۲۲	۰/۳۹	
Ni	۰/۹۲**	۰/۷۸	۰/۹۳**	۰/۶۹	۰/۲۹	۰/۷۶	۰/۷۶	۰/۸۱	۰/۸۲*	۰/۲۵	۰/۸۳*	۰/۷۹	۰/۸۲*	۰/۸۵*	۰/۹۰*	۰/۷۳	۰/۶۸	۰/۷۹	۰/۷۸	۰/۸۵*	۰/۶۶	۰/۰۹	
P	۰/۸۳*	۰/۸۵**	۰/۹۶**	۰/۸۹*	۰/۲۲	۰/۹۰*	۰/۷۶	۰/۹۷**	۰/۹۴**	۰/۱۷	۰/۸۹*	۰/۹۶**	۰/۴۵	۰/۵۹	۰/۹۹**	۰/۸۳**	۰/۵۰	۰/۹۵**	۰/۹۵**	۰/۹۱*	۰/۸۱*	۰/۵۹	
Pb	۰/۹۵**	۰/۷۸	۰/۷۱	۰/۶۹	۰/۰۸	۰/۵۳	۰/۴۰	۰/۸۴*	۰/۷۲	۰/۰۴	۰/۲۰	۰/۶۷	۰/۵۲	۰/۵۶	۰/۷۸	۰/۶۳	۰/۶۵	۰/۵۵	۰/۶۴	۰/۸۷*	۰/۱۲	۰/۱۷	
Rb	۰/۸۷*	۰/۸۳*	۰/۸۸*	۰/۷۳	۰/۱۹	۰/۷۵	۰/۷۸	۰/۹۱*	۰/۹۳**	۰/۱۱	۰/۸۵**	۰/۸۹*	۰/۳۵	۰/۶۷	۰/۹۴**	۰/۶۶	۰/۴۸	۰/۸۶*	۰/۸۷*	۰/۹۷**	۰/۱۹	۰/۴۷	
S	۰/۵۷	۰/۸۴*	۰/۸۶*	۰/۸۱*	۰/۳۹	۰/۹۷**	۰/۵۸	۰/۸۶*	۰/۷۱	۰/۱۵	۰/۶۵	۰/۸۰	۰/۲۸	۰/۳۴	۰/۸۶*	۰/۹۲**	۰/۱۰	۰/۹۴**	۰/۸۱	۰/۶۷	۰/۵۳	۰/۱۳	
Y	۰/۸۰	۰/۴۷	۰/۶۴	۰/۴۱	۰/۶۵	۰/۳۷	۰/۶۸	۰/۴۸	۰/۵۸	۰/۲۶	۰/۵۹	۰/۴۹	۰/۹۴**	۰/۸۴*	۰/۵۹	۰/۳۸	۰/۸۴*	۰/۴۰	۰/۴۹	۰/۶۲	۰/۴۴	۰/۱۴	
Zn	۰/۱۵	۰/۴۲	۰/۱۸	۰/۴۴	۰/۶۲	۰/۱۷	۰/۲۳	۰/۲۰	۰/۵۰	۰/۰۶	۰/۴۱	۰/۵۲	۰/۴۳	۰/۴۳	۰/۳۰	۰/۰۲	۰/۱۹	۰/۳۰	۰/۵۰	۰/۳۹	۰/۶۴	۰/۱۴	
Zr	۰/۶۴	۰/۴۲	۰/۶۴	۰/۳۹	۰/۷۴	۰/۴۴	۰/۶۷	۰/۳۸	۰/۵۲	۰/۵۶	۰/۵۲	۰/۴۸	۰/۹۷**	۰/۸۱*	۰/۵۵	۰/۳۹	۰/۳۹	۰/۷۶	۰/۴۴	۰/۴۷	۰/۴۹	۰/۱۳	

ادامه جدول ۵

جدول ۵. ماتریس همبستگی پیرسون بین عناصر در زغال سنگ های استفاده شده در پژوهش حاضر. همبستگی های مثبت قابل ملاحظه بین جفت عناصر با علامت (**) و همبستگی متوسط (*) نشان داده شده است

Table 5. Pearson correlation matrix in coal samples used in the current study. Strong and moderate positive correlations are , respectively (**) marked by (*) and

Sc	0.733	0.113	0.190	0.114	0.106	0.124	0.159	0.130	0.167	0.107	0.133	0.127	0.150	0.169	0.177	0.112	0.162	0.144	0.149	0.116	0.136	0.113	0.144
Sr	0.733	-0.725	-0.119	-0.734	0.176	-0.744	-0.113	-0.112	-0.113	-0.113	-0.113	-0.113	-0.113	-0.113	-0.113	-0.113	-0.113	-0.113	-0.113	-0.113	-0.113	-0.113	-0.113
Sr	0.164	0.92000	0.92000	-0.118	0.93000	-0.170	0.870	0.830	0.870	0.830	0.870	0.830	0.870	0.830	0.870	0.830	0.870	0.830	0.870	0.830	0.870	0.830	0.870
Ta	0.1870	0.92000	0.92000	-0.125	0.850	-0.158	0.820	0.810	0.820	0.810	0.820	0.810	0.820	0.810	0.820	0.810	0.820	0.810	0.820	0.810	0.820	0.810	0.820
Te	0.169	0.81	0.92000	0.810	0.810	0.810	0.810	0.810	0.810	0.810	0.810	0.810	0.810	0.810	0.810	0.810	0.810	0.810	0.810	0.810	0.810	0.810	0.810
Th	0.1910	0.92000	0.92000	-0.121	0.820	-0.172	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820
Ti	0.161	0.92000	0.92000	-0.116	0.820	-0.152	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820
Tl	0.140	0.820	0.92000	-0.118	0.820	-0.143	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820
U	0.161	0.870	0.92000	-0.112	0.820	-0.181	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820
V	0.1840	0.820	0.92000	-0.119	0.820	-0.188	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820
W	0.170	0.92000	0.92000	-0.128	0.820	-0.161	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820
Y	0.180	0.820	0.92000	-0.121	0.820	-0.177	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820
Zn	0.185	0.820	0.92000	-0.124	0.820	-0.173	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820
Zr	0.164	0.820	0.92000	-0.119	0.820	-0.167	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820

جدول ۶. ضریب همبستگی بین غلظت عناصر کمیاب و میزان کل کربن آلی (TOC) در نمونه‌های زغال سنگ استفاده شده در این پژوهش

Table 6. Correlation coefficient between trace elements concentration and total organic carbon content (TOC) in coal samples used in this study

TOC %	Ag	As	Ba	Be	Bi	Cd	Ce	Co	Cr	Cs	U	V
	-۰/۲۴	-۰/۶۴	-۰/۶۳	۰/۳۵	-۰/۸۸	-۰/۵۹	-۰/۳۶	-۰/۲۶	-۰/۲۶	-۰/۵۱	-۰/۷۳	-۰/۴۸
TOC %	Cu	Ga	Ge	Hf	In	La	Li	Mo	Nb	Ni	W	Y
	-۰/۲۲	-۰/۶۰	-۰/۸۸	-۰/۱۷	-۰/۷۶	-۰/۳۸	-۰/۰۹	-۰/۸۸	-۰/۴۴	-۰/۴۵	-۰/۷۷	۰/۰۰
TOC %	Pb	Rb	S	Sc	Sn	Sr	Ta	Te	Th	Tl	Zn	Zr
	-۰/۲۰	-۰/۴۲	۰/۰۰	۰/۰۰	+۰/۷۰	-۰/۷۵	-۰/۶۲	-۰/۴۲	-۰/۵۱	-۰/۷۶	+۰/۰۴	-۰/۱۴

بحث

فقیر یا غنی بودن زغال سنگ‌ها از عناصر کمیاب بستگی به میزان ورود عناصر به حوضه زغالی دارد که در هنگام تدفین رسوبات می‌توانند در زغال سنگ طی مراحل مختلف از مرحله اولیه تجمع تورب تا آخرین مرحله یعنی تشکیل آنتراسیت تجمع یابند (Seredin & Finkelman, 2008). عناصر کمیاب ممکن است به صورت ذرات جامد یا به صورت گونه‌های محلول وارد زغال سنگ شوند (Seredin & Finkelman, 2008). ورود ذرات جامد همیشه در طی مرحله تجمع تورب رخ می‌دهد. جریان باد نقش اصلی را برای انتقال ذرات به حوضه‌های رسوبی طی فوران‌های آتشفشانی و رویدادهای کیهانی (برخورد شهاب سنگ) ایفا می‌کند. فوران ماگمای بازالتی ممکن است منجر به غنی‌شدگی تورب در عناصر سیدروفیل و کالکوفیل شود در حالی که آتشفشانی‌های اسیدی و قلیایی می‌تواند منجر به غنی‌شدگی تورب از عناصر REEs, Nb, Zr و عناصر لیتوفیل شود (Seredin & Finkelman, 2008). ورود عناصر کمیاب به وسیله آب به حوضه زغالی یکی از فرایندهای اصلی برای تولید زغال سنگ‌های غنی از فلز است. انواع مختلف آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌توانند فلزات را حمل کنند. آب رودخانه می‌تواند عناصر کمیاب را به شکل ذرات جامد و محلول حمل کنند. ورود ذرات تخریبی منبع اصلی کانی‌ها و عناصر کمیاب برای بیش‌تر زغال سنگ‌ها دارای غلظت زمینه از عناصر کمیاب است (Finkelman, 1993). با این حال غلظت‌های خیلی زیاد از فلزات در زغال سنگ‌ها به ندرت می‌تواند به این طریق ایجاد شود. چنین زغال سنگ‌های فلزداری تنها در نزدیکی کانسارهای واجد کانی‌های مقاوم در برابر هوازدگی شناخته شده‌اند. آب‌های سطحی دارای غلظت‌های بالا از عناصر کمیاب به شکل محلول ممکن است حاصل از فرسایشی کانسارهای حاوی عناصر کمیاب به صورت سولفیدها یا دیگر کانی‌های محلول در آب باشند و یا در مناطق با آتشفشانی فعال، غلظت‌های غیرعادی و زیاد از گونه‌های حل شده می‌تواند با فعالیت گرمایی یا از فرسایشی توف‌های سالم که واجد عناصر کمیاب فراوانی هستند (از جمله گوگرد و هالوژن‌ها) به محیط وارد شوند. ورود آب‌های زیرزمینی فلزدار با خاستگاه مختلف به حوضه زغالی در حال رسوب‌گذاری یکی دیگر از عوامل انتقال فلز به این حوضه‌ها و تشکیل زغال-سنگ‌های غنی از فلز است. برخی از انواع آب‌های زیرزمینی فلزدار با ویژگی‌های ژئوشیمیایی متمایز مشخص می‌شوند مانند: آب‌های غنی از اکسیژن در مناطق خشک غنی از U-Se-Mo-Re-V، آب قلیایی داغ حاصل از گرانیتهای غنی از Ge-Ga-W-Mo. محلول‌های گرمایی مناطق آتشفشانی غنی از As-Sb-Hg و شوراب‌های فلزدار ژرف غنی از Cu-Pb-Zn آنچه مسلم است این است که زغال سنگ‌های غنی از فلز در حوضه‌های رسوبی و دیاژنتیکی غنی از فلز تشکیل و تکامل یافته‌اند؛ به عبارت دیگر تثبیت عناصر کمیاب در این گونه زغال سنگ‌ها در طی رسوب‌گذاری و دیاژنتز در یک

حوضه زغالی غنی از فلز و یا بعد از دیاژنز به واسطه فرایندهای دیرزاد مانند نفوذ یا تراوش محلول‌های فلزدار با خاستگاه ماگمایی، رسوبی یا دگرگونی بداخل زغال سنگ‌ها یا حوضه زغالی بوده است (Seredin & Finkelman, 2008).

بررسی وضعیت زمین‌شناسی منطقه زغالی تخت در دامنه شمالی کوهزاد البرز به‌عنوان بخشی از حوضه زغالی قشلاق نشان می‌دهد که واحدهای سنگی قدیمی‌تر از واحدهای گروه شمشک عمدتاً سنگ‌های رسوبی معمولی ماسه-سنگ، شیل و کربنات‌ها سازندهای لالون (کامبرین) تا الیکا (تریاس میانی) و به مقدار اندکی بازالت (عمدتاً اردویسین پایانی-سیلورین بنام بازالت‌های سلطان میدان) بوده‌اند که از فرسایش آنها نهایتاً واحدهای سنگی گروه شمشک به‌عنوان رسوبات کوهزادی در حوضه پیش‌خشکی شکل گرفته‌اند (Fursich et al., 2009). مشابه این وضعیت زمین‌شناسی در مناطق مرکزی و غربی دامنه شمالی البرز نیز وجود دارد و غلظت عناصر کمیاب در زغال سنگ‌های ناحیه البرز مرکزی و سنگ‌رود در البرز غربی نیز در حد کلارک یا اندکی بیش از آن گزارش شده است (Moore & Goodarzi et al., 2006; Aftabi et al., 2015; Smaeili, 2012). با توجه به نبود منابع سنگی عناصر کمیاب (مانند گرانیته‌ها، کربناتیت‌ها، پگماتیت‌ها، پریدوتیت‌ها) در منطقه بررسی شده به‌عنوان سنگ منشأ رسوبات گروه شمشک و هم‌چنین نبود رخداد فرایندهای ماگمایی و گرمایی وابسته به آن (فعالیت‌های آتشفشانی و جایگیری توده‌های نفوذی) بعد از زمان نهشت رسوبات زغالدار شمشک، بنابراین به‌نظر می‌رسد تشکیل و تکامل سازند شمشک در یک حوضه رسوبی با غلظت معمولی عناصر کمیاب (در حد کلارک عناصر مذکور) رخ داده باشد. در نتیجه علت فقیر بودن زغال سنگ‌های معدن تخت و دیگر مناطق البرز را می‌توان به فقر ذاتی حوضه رسوب‌گذاری رسوبات گروه شمشک نسبت داد که غلظت عناصر کمیاب بررسی شده در زغال سنگ‌های معدن تخت همگی در اندازه کلارک این عناصر رخ داده‌اند. غلظت اندکی بالا به‌دست آمده برای Sc (۶-۱۶ppm) و V (۵۷-۸۸ppm) در زغال سنگ‌های معدن تخت نسبت به میانگین جهانی زغال سنگ‌ها (۴ppm برای Sc و ۲۲-۲۸ppm برای V) به احتمال زیاد می‌تواند مربوط به دخالت سنگ‌های بازالتی اردویسین-سیلورین موجود در شمال منطقه تخت به‌عنوان بخشی از سنگ منشأ گروه شمشک باشد که این سنگ‌ها ذاتاً می‌توانسته‌اند همانند دیگر سنگ‌های بازالتی جهان از کلارک بالایی از Sc (۳۸ppm) و V (۲۵۰ppm؛ Levinson, 1980) برخوردار باشند.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که:

۱. زغال سنگ‌های معدن تخت مینودشت با توجه به ژرفای تدفین کم تا متوسط رسوبات زغالدار (بین ۲ تا ۲/۵ کیلومتر با دمای ۷۰ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد) در بهترین درجه زغالی شدن از نوع ساب بیتومینه تا بیتومینه فراتر نمی‌روند و از زغال سنگ‌های کم گوگرد هستند.
۲. پتروگرافی ماسرال‌ها نشان داد که زغال سنگ نوع بیتومینه (لایه ۱۹ در حال استخراج) عمدتاً از ماسرال‌های نوع ویترنیت و به میزان کم‌تر از ماسرال‌های نوع اینرتینیت و لیپتینیت تشکیل یافته است. در مقابل، زغال سنگ درجه پایین نوع لیگنیت (لایه ۸ در حال استخراج) عمدتاً از کانی تشکیل شده و فقط ۲۷ درصد حجمی آن ماسرال از نوع ویترنیت و به میزان خیلی کم‌تر از نوع اینرتینیت و لیپتینیت بوده است.

۳. مقایسه غلظت عناصر کمیاب در زغال سنگ‌های معدن تخت در مقایسه با میانگین جهانی عناصر مذکور در زغال سنگ‌های قهوه‌ای و سخت جهان نشان داد که زغال سنگ‌های معدن تخت مینودشت همانند زغال سنگ‌های دیگر مناطق البرز از عناصر کمیاب فقیر هستند و ارزش سرمایه‌گذاری برای استحصال عناصر مذکور ندارند.
۴. نبود منابع سنگی عناصر کمیاب (مانند گرانیته‌ها، کربناتیت‌ها، پگماتیت‌ها، پریدوتیت‌ها) به‌عنوان سنگ منشأ رسوبات گروه شمشک و در نتیجه فقر ذاتی حوضه رسوب‌گذاری رسوبات گروه شمشک در البرز علت اصلی فقیر بودن زغال سنگ‌های معدن تخت و دیگر مناطق البرز معرفی می‌شود.

سپاسگزاری

از مدیر عامل محترم شرکت زغال سنگ البرز شرقی و مسئولان محترم معدن زغال سنگ تخت برای همکاری در نمونه‌برداری از معدن صمیمانه سپاسگزاری می‌کنیم.

منابع

- آقایی کریق، مسلم، رقیمی، مصطفی، شمعانیان، غلامحسین، قلی‌پور، محسن، "نقش ذهاب اسیدی در تشکیل کانی های زیست محیطی (کانی های ثانویه) در معدن زغال سنگ گلندرود و باطله‌های کارخانه زغالشویی وطنی"، استان مازندران، مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران، جلد ۱۹ (۲) (۱۳۹۰) ۳۳۸-۳۲۵.
- آقایی کریق، مسلم، رقیمی، مصطفی، شمعانیان، غلامحسین، قلی‌پور، محسن، "کانی‌شناسی و ژئوشیمی حوضه زغالی گلندرود، البرز مرکزی"، استان مازندران، مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران، جلد ۲۰ (۳) (۱۳۹۱) ۴۶۸-۴۵۵.
- معین السادات، سید حسین، رضوی ارمغانی، میر بهزاد، "زمین‌شناسی ایران، زغالسنگ"، انتشارات سازمان زمین‌شناسی ایران، (۱۳۷۲) ۲۸۰.
- زاده کبیر، اسداله، "مجموعه کتاب چهار جلدی زغال سنگ"، انتشارات سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران (۱۳۹۰).
- سلیمانی مارشک، زهرا، تقی‌پور، نادر، "کانی‌شناسی و ژئوشیمی عناصر فرعی دارای پتانسیل محیطی خطرناک نهشته‌های زغالسنگی منطقه اولنگ"، البرز خاوری، فصلنامه علوم زمین، جلد ۲۴ (۹۵) (۱۳۹۵) ۲۱۸-۲۰۷.
- شرکت معادن زغال البرز شرقی، "گزارش پایان اکتشاف منطقه زغالدار تخت"، (۱۳۸۸) ۸۴.
- شمعانیان، غلامحسین، حسینی اشلقی سیده فاطمه، "کانی‌شناسی و ژئوشیمی زغال سنگ‌های ژوراسیک معدن قشلاق، البرز شرقی"، مجله زمین‌شناسی اقتصادی، جلد ۷ (۲) (۱۳۹۴) ۳۸۳-۳۶۹.
- شهرآز، سامان، کوهساری، امیرحسین، "بررسی عناصر کمیاب و نادر خاکی در حوزه‌های زغالی ایران (بررسی در معدن زیرزمینی زغالسنگ کارمزد)"، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، جلد ۲۲ (۴) (۱۳۹۳) ۶۹۶-۶۸۵.
- قلی‌پور، محسن، مظاهری، سید احمد، رقیمی، مصطفی، شمعانیان، غلامحسین، "نقش ذهاب اسیدی معدن در تشکیل کانی‌های زیست محیطی در معادن زغالسنگ کارمزد، البرز مرکزی"، استان مازندران، مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران، جلد ۱۸ (۳) (۱۳۸۹) ۴۶۰-۴۴۵.
- طاهری، بهروز، شهریور قوزوللو، جعفر، کازرونی، حنیف، قرباغی، مهدی، "بررسی ذخایر فلزات استراتژیک و عناصر نادر

- خاکی همراه در خاکستر زغال"، خلاصه مقالات دومین کنگره ملی زغال ایران، کرمان (۱۳۹۳).
۱۱. معمار، حمیدرضا، "بررسی عناصر کمیاب در نمونه‌های معدنی و کنسانتره برخی از معادن زغال ایران"، پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن-اکتشاف. دانشگاه شهید باهنر کرمان، (۱۳۹۵) ۱۱۲.
12. Aftabi A., Shojaei S. V., KazeraniNezhad R., "Geochemical and environmental baseline of major and trace elements in Zarand coals, southeastern Iran", *Environmental Earth Sciences*, 73 (2015) 7457-7476.
13. Burnet G., "Newer technologies for resource recovery from coal combustion solid wastes", *Energy* 11 (1986) 1363-1375.
14. Dai S., Finkelman R. B., "Coal as a promising source of critical elements: Progress and future Prospects", *International Journal of Coal Geology*, 186 (2018) 155-164.
15. Finkelman R. B., "Trace and minor elements in coal", In: Engel M.H., Masko S.A. (Eds.), "Organic Geochemistry", Plenum Press, New York, (1993) 593-607.
16. Finkelman R.B., Brown Jr. R.D., "Coal as host and as an indicator of mineral resources", In: Peters D.C. (Ed.), "Geology in Coal Resource Utilization", Fairfax, Techbooks, Virginia, (1991) 471-481.
17. Fursich F. T., Wilmsen M., Seyed-Emami K., and Majidifard M.R., "Lithostratigraphy of the Upper Triassic-Middle Jurassic Shemshak Group of Northern Iran", In: Brunet M. F., Wilmsen M. and Granth J. W. (eds) "South Caspian to Central Iran Basins. Geological Society", London, Special Publication, 312 (2009) 129-160.
18. Goodarzi F., Sanei H., Stasiuk L., Bagheri-Sadeghi Reyes H. J., "A preliminary study of mineralogy and geochemistry of four coal samples from Northern Iran", *International Journal of Coal Geology*, 65 (2006) 35-50.
19. Höll R., Kling M., Schroll E., "Metallogenesis of germanium-a review", *Ore Geology Reviews* 30 (2007) 145-180.
20. Hower J. C., Granite E. J., Mayfield D. B., Lewis A. S., Finkelman R. B., "Notes on contributions to the science of rare earth element enrichment in coal and coal combustion by-products", *Minerals* 6, 32 (2016) 1-9.
21. Hower J. C., Ruppert L. F., Eble C. F., "Lanthanide, yttrium, and zirconium anomalies in the fire clay coal bed, Eastern Kentucky", *International Journal of Coal Geology*, 39 (1999) 141-153.

22. Jandova J., Vu, H., "Processing of germanium-bearing fly ash", Metallurgy, Refractory and environment, (2001) 107-112.
23. Jenney W. P., "The chemistry of ore deposition", American Institute of Mineral Engineering Transactions, 33 (1903) 445-498.
24. Levinson A. A., "Introduction to exploration geochemistry", Applied Publishing Ltd., Calgary, Canada (1980).
25. Massari S., Ruberti M., "Rare earth elements as critical raw materials: focus on international markets and future strategies", Resource Policy, 38 (2013) 36-43.
26. Moore F, Esmaili A., "Mineralogy and geochemistry of the coals from the Karmozd and Kiasar coal mines, Mazandaran province, Iran", International Journal of Coal Geology, 96 (2012) 9-21.
27. Seredin V. V., Finkelman R. B., "Metalliferous coals: A review of the main genetic and geochemical types", International Journal of Coal Geology 76 (2008) 253-289.
28. Stone R. W., "Coal near the Black Hills Wyoming-South Dakota", United State Geological Survey Bulletin, 499 (1912) 1-66.
29. Swaine D. J., "Trace Elements in Coal", Butterworths, London, (1990) 278.
30. Yazdi M., "Geological and geochemical features of Alborz basin coal deposits, Iran", Journal of Sciences Islamic Republic of Iran 23 (2012) 163-169.
31. Yazdi M., Esmailnia S. A., "Geochemical properties of coals in the Lushan coalfield of Iran", International journal of Coal Geology 60 (2004) 73-79.

Trace Elements Concentration in Takht Coal Mine, Minoodasht, Golestan Province, NE of Iran

Fatemeh Esfandiarifard¹, Behnam Shafiei Bafti^{*1,2}, Mostafa Raghimi¹

1. Department of Geology, Faculty of Science, Golestan University, Gorgan, Iran

2. Department of Geology, Faculty of Science, Shahid Bahonar University of Kerman,
Kerman, Iran

Extended Abstract

(Paper pages 1-24)

Introduction

Concentrations of some trace elements such as Ge, Ga, U, V, Se, rare earth elements (REEs), Y, Sc, Nb, Au, Ag and PGEs in a number of coal mines in the world to the extent of economic exploitation of these elements. It is high (from hundreds to thousands of ppm). Such coals have been introduced as metalliferous coals in which the concentration of trace elements is at least 10 times higher than the average concentration of these elements in the world's ordinary coal (Dai and Finkelman, 2018; Seredin and Finkelman, 2008). Metalliferous coals have been used as raw materials for the extraction of some precious metals for the past hundred years, such as the coal mines of Wyoming and Utah in the United States for gold and silver in the late 19th and early 20th centuries (Jenney, 1903; Stone, 1912). Since World War II, metalliferous coal has been a major source of uranium production in Russia and the Commonwealth of Independent countries and the United States. In the early 1960s, coal was used to recycle germanium (Ge) in Russia and the Commonwealth of Independent countries, and to a lesser extent in the Czech Republic and Slovakia (Jandova and Vu, 2001), as well as in the United Kingdom and Japan (Swaine, 1990). Metalliferous coal is currently used as a source of Ge in Russia, Uzbekistan and China, and today coal can be considered as the main source of Ge for the global industry (Holl et al., 2007). Iran containing about 3700 million tons of coal reserves and annual production of 2 million tons of crude coal and about 1,000,000 tons of coal concentrate is among the countries with major coal reserves in the world (Zadeh Kabir, 2011). Due to the high cost of coal production in Iran, the extraction of trace and precious metals from the products of raw coal as well as from waste from coal consuming industries (such as steel and coke) can increase. Concentration of trace and strategic elements in Iranian coal reserves from both economic geology and environmental perspectives has been done in several research works (Yazdi and Esmaeilnia, 2004; Goodarzi et al., 2006; Yazdi, 2012; Moore and Esmaeili, 2012; Aftabi et al., 2015). In most of these studies, the concentration of trace and strategic elements is mainly higher than Clarke and the threshold grade of these elements and comparable to the average concentration of coal in the world, but much lower than the cut-off-grade for the extraction of these elements from coal ash. The present study evaluates the concentration of trace and strategic elements in the coal of Takht mine to determine the coal potential of this mine for trace and strategic elements.

Geologic setting

Takht coal mine near Takht village in the southeast of Minoodasht town in Golestan province and in terms of regional geology, this mine is located in the large coal syncline is

called Gheshlagh synclinorium on the northern slope of the Alborz mountain range. The total coal reserves in Gheshlagh synclinorium are estimated at 450 million tons, which includes 231 million tons of potential reserves (Razavi Armaghani and Moin Sadat, 1993). The lithological units present in the Takht area are Paleozoic (including Lalon, Mila, Padha, Khoshilaiq, Mubarak, Doroud and Ruteh) and Mesozoic Formations (Elika, Shemshak, Delichai and Lar). A basaltic horizon belonging to Silurian (probably equivalent to Sultan Maidan basalts) is also present in the north of Takht region between the units of Mila and Padha Formations. Most of the coals in the Takht area belong to the Upper Triassic and the Lower Jurassic (Shemshak group; East Alborz Coal Mining Company, 2009). The thickness of the coal zone of the area is about 600 meters and the total number of coal layers in it is about 26 layers (East Alborz Coal Mining Company, 2009). The number of layers of coal that can be mined in the region is 6 layers of coal on which geological operations are focused (layers K20 - K19 - K17 - K11 - K10 - K8; East Alborz Coal Mines Company, 2009). One of the advantages of coal mining in this region is the proximity of the mineable layers to each other. The thickness of the mineable coal zone is about 150 meters and all the mineable layers are located in this section. The total thickness of the coal layers that can be mined in this section is 10.87 meters. The study of the quality of coal in the Takht area has shown that the moisture content of coal seams is between 1.8 - 1.2%, ash content between 44.7 - 11.2% and volatiles between 37.5 - 34.2 (East Alborz Coal Mining Company, 2009). According to the classification of industrial coals in Iran, Takht coal mines are a oily gas type that alone has an extremely weak coking ability (East Alborz Coal Mining Company, 2009).

Material and methods

To achieve the objectives of the research, sampling of coal seams being mined in 3 tunnels No. 3, 4 and 5 (layers K8, K10 and K19) and layers of peat (3 Layer) was done on the entrance roads to the mine. After crushing and pulverizing in porcelain mortar, some of the samples were prepared as representative samples for chemical analysis, and some of the polished sections were prepared for coal petrography and maceral type identification in 2 samples (i.e., K19T5 and K8T3). Chemical analysis for organic elements (i.e., organic carbon, hydrogen, sulfur and nitrogen), major elements (SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O , K_2O , Fe_2O_3 , CaO , MgO , MnO , P_2O_5) and trace elements (including 48 transition elements, metalloids, non-metallic elements, La and Ce of rare earth elements and U and Th of radioactive elements) in 3 samples from Takht mining layers (K8, K10 and K19 coal layers) and 3 samples of 3 immature coal seams carried out in the Research Institute of Petroleum Industry of Iran (for organic elements and major elements analysis using XRF) and MSALABS in British Columbia, Canada (for trace element analysis using ICP-MS). Statistical data processing was performed using Excel and SPSS programs.

Results and discussion

Based on the analysis of organic elements in the coal samples used in this study, the coals are divided into 3 categories including bituminous coal (sample K19T5), semi-bituminous-lignite (samples K10T4 and K8T3), lignite (coal seam No. 3) and peat (samples related to coal seams No. 1 and 2). The amount of sulfur in the studied samples is very low ranging from 0.03 wt% (in peat) to 0.83 wt% (in semi-bituminous-lignite coal) percent. Hydrogen (H_2) in the samples is from 7.2 wt% to 4.6 wt% and the amount of nitrogen (N_2) ranged from 0.5 wt% to 1.5 wt%. Oxygen (O_2) has the highest value (17.88 to 18.81%) in peat samples and the lowest

value (10.6%) in bituminous coal samples. Based on temperature-depth simulations performed on coal samples using Rock-Eval pyrolysis analysis, the studied coals had a geological temperature formation from 70 to 80 °C during the coalification process. They can be matched to a depth of 2 to 2.5 km for diagenesis in the studied coal basin. Petrographic results of two samples of high grade coal (K19T5) and low grade (K8T3) of Takht mine are consistent with the combination of known macerals for bituminous coal (mainly vitrinite and less inertinite and leptinite) and lignite (mainly composed of minerals and less has maceral vitrinite-type). Comparison of average concentrations of metalloid and non-metallic elements between coals of Takht mine (average bituminous and bituminous-lignite coals) and brown as well as hard coals of the world and also coals of other areas from the Alborz region and Clarke of the elements It has been shown that the studied coals have concentrations mainly in the Clarke range of the elements. However, they have higher mean concentrations for Ga, As and Sb than the coals of other areas of the Alborz region, but they have the mean concentrations of Bi, Ge, In, Tl, Se and Ta similar or close to each other and much lower mean concentrations for Pb. The average concentration of granophile and lithophile elements (Li, Be, Rb, Sr, Ba, Cs) in the studied coal samples (bituminous and bituminous-lignite) is less than the average concentration of these elements in brown coal and hard coals of the world, the coal of other areas of the Alborz region and Clarke of these elements. The average concentration of Li in coal samples of Takht mine is close to the average concentration of this element in coal samples of other areas of the Alborz region. Comparison of enrichment-depletion of transitional, rare earth and radioactive elements between high-grade, low-grade, and peat samples in Takht mine showed that high grade coal compared to low grade coal and peat samples enriched in Sc, Co, Ni, Cu, Y, Zr and Hf elements and in other transitional elements, rare earth (La and Ce) and radioactive (Th and U) depleted. High-grade coal samples compared to low-grade ones and peat samples has shown the highest depletion in rare earth elements (La and Ce) and radioactive elements (Th and U), W, Mo, Cd, Zn and Cr. Low-grade coal samples compared to peat in trace elements except Zn and Hf show significant depletion, and depletion in Sc, V, Co, Cu, Hf, Zr and U in low- grade coal samples compared to peat is more noticeable but these shows a slight enrichment in La, Th, Mo and Ag. Peat appears to be richer than low-grade coal and high-grade coal in trace elements (especially for Th, U, Ce, Cd, Mo, Nb). The relationship between the concentration of trace elements and the amount of organic carbon (TOC) in the studied coal samples showed that with the exception of Sn (Sn - TOC: $r = +0.70$) and Be (Be - TOC: $r = +0.35$) there is a moderate to significant negative correlation.

Conclusion

The most important results of this study showed that: 1-The coals of Takht mine, due to the low to medium burial depth of coal deposits (between 2 to 2.5 km with a temperature of 70 to 80 °C) in the best degree of coal from sub-bituminous to bituminous type do not exceed. 2- Petrography of macerals showed that bituminous-type coal is mainly composed of vitrinite- type maceral and to a lesser extent of inertinite- and liptinite-type macerals. In contrast, low-grade lignite-type coal is mainly composed of minerals and only 27% of its volume is maceral of vitrinite-type and to a much lesser extent of inertinite and leptinite. 3- Comparing the trace elements concentration in coals of Takht mine and the average concentration of trace elements in the world brown and hard coals showed that the coal of Takht mine like to those of other areas of the Alborz region are poor of trace elements. 4- The lack of suitable source rocks for

trace elements (such as granites, carbonates, pegmatites and peridotites) as the protolith of Shemshak group sediments can be introduced as one of the main reasons for the inherent poverty of the coals of Takht mine and other areas of the Alborz region from trace elements.

Keywords: Coal, Trace elements, Takht mine, Golestan province

*Corresponding Author: behnam.shafiei@gmail.com