



مطالعه کانی‌شناسی زغال سنگ معدن غزنوی، البرز شرقی

مرضیه یوسفی، هادی عمرانی^{*}، غلامحسین شمعانیان، بهنام شفیعی بافتی

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

(دریافت مقاله: ۹۶/۸/۱۰، نسخه نهایی: ۹۶/۱۱/۲۴)

چکیده: معدن زغال سنگ غزنوی در ۴۵ کیلومتری جنوب شهرستان آزادشهر واقع شده و یکی از معادن فعال استان گلستان است. استخراج زغال از لایه‌های زغال‌دار اول و سوم معدن غزنوی صورت می‌پذیرد. بررسی‌های کانی‌شناسی به وسیله روش پراش پرتو X (XRD) و میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به طیف پراش انرژی پرتو X (SEM/EDS) بیانگر حضور کوارتز و کانی‌های رسی به عنوان کانی‌های اصلی و کانی‌های پیریت (\pm پیریت آرسنیک‌دار)، ژیپس، ژاروسیت (ناتروژاروسیت)، گوتیت، هماتیت، پلاژیوکلاز، فلدسپات قلیایی، \pm روتیل، \pm کروندوم و \pm برلینیت کانی‌های فرعی در زغال سنگ غزنوی هستند. پس از تشکیل زغال سنگ، بر اثر هوازدگی کانی‌های آهن‌دار اولیه مانند پیریت، کانی‌های ژاروسیت، ناتروژاروسیت، هماتیت و گوتیت با خاستگاه ثانویه تشکیل شده‌اند. کانی‌های برلینیت، روتیل، کروندوم، پلاژیوکلاز و میکروکلین در زغال سنگ معدن غزنوی خاستگاه اولیه (درونزاد) نداشته و طی رسوبگذاری مواد آلی به صورت ثانویه (برونزاد) از بیرون وارد حوضه رسوبی شده‌اند. وجود کانی‌های کوارتز، پلاژیوکلاز، فلدسپات قلیایی، روتیل و کروندوم نشان می‌دهد که این کانی‌ها برآمده از فرسایش واحدهای آذرین قدیمیتر مثل بازالت سلطان میدان و گرانیتهای قلیایی منطقه خوش‌خیلاق هستند که به محیط‌های باتلاقی حمل شده‌اند. در زغال سنگ‌های مورد بررسی دو نسل پیریت وجود دارد. پیریت‌های درونزاد نسل اول، خودشکل بوده و در زمینه زغال سنگ پراکنده هستند. پیریت‌های درونزاد نسل دوم، دانه ریز و بی‌شکل هستند و پس از تشکیل زغال سنگ‌ها به صورت پرکننده درز و شکافها دیده می‌شوند. بررسی یک نمونه زغال سنگ معدن غزنوی با روش طیف‌سنجی تبدیل فوریه فروسرخ (FT-IR) نشان می‌دهد که در آن علاوه بر کانی‌های سیلیکاته و رسی، گروه‌های عاملی و همچنین ارتعاشات کششی C=C آروماتیک در رابطه با بخش آلی و گروه عاملی OH مربوط به حضور کانی‌های آبدار در این زغال سنگ‌ها وجود دارند.

واژه‌های کلیدی: کانی‌شناسی؛ معدن غزنوی؛ زغال سنگ؛ البرز شرقی.

مقدمه

متفاوتی هستند [۳]. ماسرال‌ها، اجزای آلی زغال سنگ‌ها بوده که دارای خواص شیمیایی و فیزیکی متغیر هستند ولی بر خلاف کانی‌ها، ماهیت بلورین در آنها دیده نمی‌شود [۳]. اصطلاح مواد معدنی به کانی‌های موجود در زغال سنگ و همچنین تمام عناصر شیمیایی (C, H, O, N و S) [۴] که معمولاً به صورت غیر آلی هستند، اشاره می‌کند [۵]. بیشتر مواد معدنی در زغال سنگ‌ها به صورت کانی‌های سیلیکاتی، سولفیدی و کربناتی دیده می‌شوند [۵]. شناسایی کانی‌ها

زغال سنگ یکی از پیچیده‌ترین و چالش‌برانگیزترین مواد طبیعی به شمار می‌رود که شامل مخلوطی از مواد آلی و معدنی با خاستگاه متفاوت بوده که در محیط‌های رسوبی مختلف تشکیل شده است [۱]. زغال سنگ، یک سنگ کربن‌دار جامد، شکننده و قابل احتراق است که به وسیله تجزیه گیاهان در اثر تراکم، دما و فشار تشکیل می‌شود [۲]. کانی‌های موجود در زغال سنگ، دارای ماهیت بلورین و خواص شیمیایی و فیزیکی

می‌تواند در شناخت نوع و مقدار عناصر موجود در زغال‌سنگ‌ها [۶، ۷]، خطرات زیست‌محیطی در رابطه با آلودگی ناشی از عناصر سمی طی فرآیند احتراق و استفاده از زغال‌سنگ [۸، ۱] و همچنین شناخت نوع، خاستگاه و چگونگی توزیع کانی‌ها و چگونگی تحلیل شرایط محیطی دیرینه [۹] کمک شایانی نمایند. شواهد زمین‌شناسی و زمین‌ساختی ایران در اواخر تریاس تا ژوراسیک نشان می‌دهند که با رخداد فازهای کوهزایی آلپی پیشین، سیمین پیشین و سیمین پسین و پیدایش شرایط مختلف زمین‌شناسی، کانسارهای متنوع زغال‌دار ایران در دو بخش البرز و ایران مرکزی تشکیل شده‌اند [۱۰]. حوضه زغال‌سنگ البرز در شمال ایران شامل سه میدان زغال‌سنگ البرز شرقی (مانند معادن زغال‌سنگ طَـزَـره، زمستان یورت و تخت)، البرز مرکزی (مثل معدن زغال‌سنگ زیرآب) و البرز غربی (مثل معدن زغال‌سنگ لوشان) است [۱۱]. سازند شمشک و سازندهای معادل آن در ایران مرکزی تقریباً همه زغال‌سنگ‌های ایران را در خود جای داده‌اند و از این رو از اهمیت اقتصادی زیادی برخوردارند [۱۲]. بررسی‌های کانی‌شناسی زغال‌سنگ‌های حوضه البرز نشان می‌دهد که کانی‌های پیریت سین‌ژنتیک، مارکاسیت، کوارتز آواری، سیدریت، کلسیت، ایلیت و کائولینیت فراوان‌ترین ماده معدنی آنها هستند که در برخی از آنها بقایای گیاهی مانند سرخس کلادوفلیس، ماراتیا و *Pachypteris* دیده می‌شود [۱۱]. در این مقاله به بررسی کانی‌شناسی زغال‌سنگ‌های معدن غزنوی با استفاده از آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به طیف سنج پراش انرژی پرتو x (SEM/EDS) و پراش سنج پرتوی ایکس (XRD) و تعیین گروه‌های عاملی در ساختار زغال‌سنگ با استفاده از تکنیک طیف سنجی تبدیل فوریه فرسوخ FT-IR پرداخته می‌شود و بر اساس نتایج به دست‌آمده چگونگی رخداد و شرایط تشکیل مواد معدنی در زغال‌سنگ‌های معدن غزنوی بررسی می‌شوند.

جایگاه زمین‌شناسی

رویدادهای تشکیل زغال‌سنگ در حوضه البرز

میدان اصلی زغال‌سنگ ایران در طبس، کرمان (ایران مرکزی) و البرز (شمال ایران) واقع‌اند [۱]. بررسی‌های زمین‌شناسی رسوبات زغال‌دار و معادن زغال‌سنگ ایران نشان می‌دهند که سازند شمشک در البرز و سازندهای نایبند و آق‌دربند در ایران مرکزی با سن تریاس پسین و ژوراسیک میانی دربرگیرنده

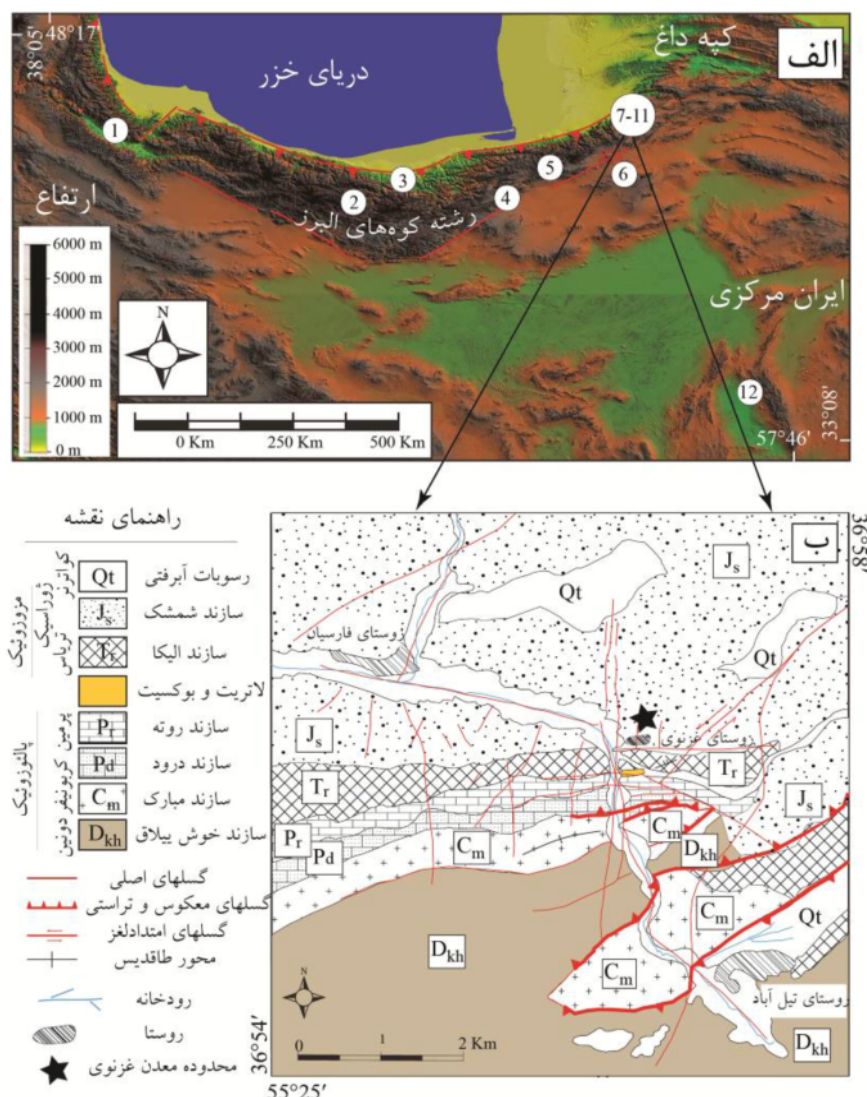
توالی‌های اصلی زغال‌دار در این دو حوضه هستند [۱۰]. در اواخر تریاس پسین رخداد فاز کوهزایی سیمین پیشین منجر به خارج شدن بخش‌هایی از فلات ایران از زیر آب شده و اقلیم گرم و مرطوب مشابه با اقلیم استوایی در برخی نواحی ایران و افغانستان حاکم شده است [۱۲]. این امر باعث رشد و گسترش انواع گونه‌های گیاهی (بیشتر خزها) و جنگل‌های عظیم در سرزمین‌های نام برده شده و با گذشت زمان گسترش رسوبات دوره ژوراسیک این آثار گیاهی را پوشش داده است [۱۲]. سازند شمشک با سنگ‌شناسی ماسه‌سنگ، سیلت، شیل و سنگ رس در تناوب با رگه‌های زغال‌سنگ (معمولاً در بخش آواری و کربن‌دار سازند شمشک) از توالی‌های اصلی زغال‌دار در حوضه البرز بوده که طی دوران تریاس-ژوراسیک در این حوضه تشکیل شده است [۱۱]. بزرگ سنگواره‌های گیاهی گرمادوست جنس‌های دیکتوفیلوم، *Otozamites*، پتروفیلوم، زامتیس و گونه‌های آنها، شرایط اقلیمی نیمه استوایی و مرطوب را در زمان تهنشینی سازند شمشک پیش‌بینی می‌کنند [۱۳]. بررسی‌های انجام شده بر بزرگ سنگواره‌های گیاهی سازند شمشک [۱۴] و همخوانی مجموعه فسیل‌های گیاهی چینه‌های رتین سازند کلاریز از گروه شمشک با مجموعه‌های گیاهی نرگس چال، اشتر، نوده، معدن تخت مینودشت، جاجرم (البرز)، معادن منطقه پروده (طبس) و داربیدخون (حوضه کرمان) بیانگر شرایط اقلیمی گرم و مرطوب این مناطق و یکنواختی آن در زمان رتین (تریاس پسین) است. رخداد فازهای کوهزایی سیمین میانی و پسین در اواخر ژوراسیک/اوایل کرتاسه و رخداد فازهای لارامید و پیرنه در دیرینه‌زا سبب رخداد چین‌خوردگی در البرز و ایران مرکزی و پیدایش شرایط مناسب برای تشکیل زغال‌سنگ‌های ایران شده‌اند [۱۰]. زغال‌سنگ‌های حوضه البرز بیشتر در گروه بیتومن‌ها (قیری) جای دارند و ویژگی‌های آنها عبارتند از: ۱- ماسرال‌های از نوع ویتترینیت و مقادیر کمی از نوع اکسینیت و فوزینیت، ۲- مقدار خاکستر کم تا متوسط (۳-۲۶٪)، ۳- مقدار متغیر گوگرد (۰/۵-۴٪)، ۴- ارزش گرمادهی متوسط تا بالا (۲۷-۲۹ MJ/Kg) و ۵- متوسط رطوبت حدود ۲٪ (۰/۲-۳/۵٪) [۱۱، ۱۵]. نتایج بررسی‌های کانی‌شناسی و سنگ‌نگاری زغال‌سنگ‌های شاهرود، زیرآب و لوشان نشان می‌دهند که زغال‌سنگ‌های حوضه البرز در محیط‌های مردابی، باتلاق‌های توربی، دشت سیلابی رودخانه‌ای تا سیستم‌های نهشتی دریاچه‌ای تشکیل شده‌اند که بیانگر

شرایط گرمسیری تا نیمه گرمسیری آنها در زمان نهشته شدن است [۱۱].

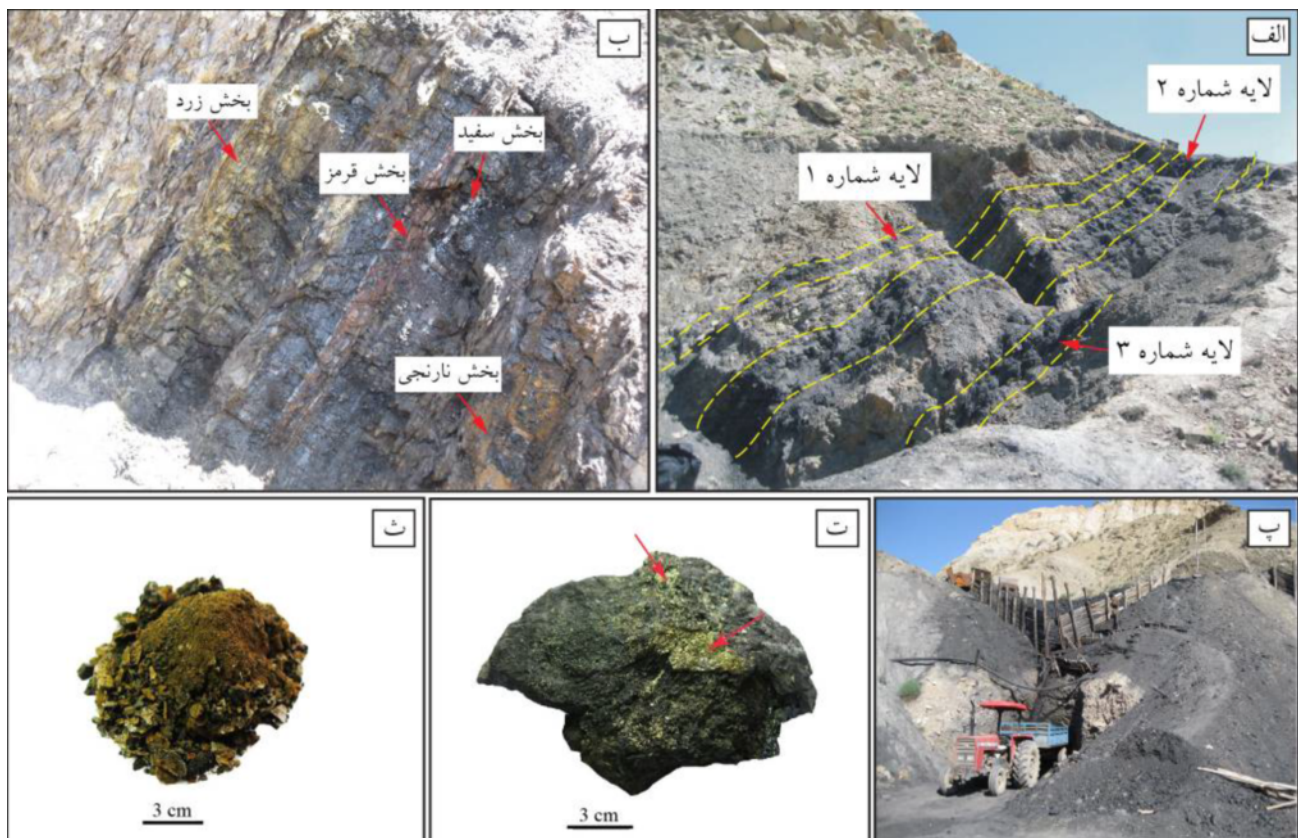
زمین‌شناسی منطقه مورد بررسی

معدن زغال‌سنگ غزنوی (بین روستای فارسیان و روستای غزنوی) در ۴۵ کیلومتری جنوب شهرستان آزادشهر به مختصات $36^{\circ} 56'$ عرض شمالی و $55^{\circ} 27'$ طول شرقی، در پهنه البرز شرقی واقع است [۱۶] (شکل ۱ الف). سازندهای جیروود، خوش‌ییلاق، مبارک، درود، روته، الیکا و شمشک به ترتیب از قدیم به جدید واحدهای چینه‌شناسی این بخش از البرز را تشکیل می‌دهند. مجموعه بازالتی سلطان میدان در گستره شمال غرب تا شمال شرق شاهرود شامل گدازه‌های

بازالتی با میان لایه‌های نازک رسوبی طی مراحل کافت‌زایی پالئوتتیس تشکیل شده است [۱۷]. واحدهای ریزگرانیته که در جنوب روستای خوش‌ییلاق برونزد دارند بر اساس بررسی‌های سن‌سنجی U-Pb بر زیرکن، سنی حدود ۴۲۷ تا ۴۳۹ میلیون سال را نشان می‌دهند [۱۸]. برپایه نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه خوش‌ییلاق [۱۹]، لایه‌های زغال‌دار منطقه مورد بررسی جزئی از سازند شمشک هستند (شکل ۱ ب). بر اساس پژوهش عباسی و همکارش [۲۰] گروه شمشک بیشتر از لایه‌هایی با ضخامت‌های متفاوت (۳۰۰-۱۰۰۰ متر) شامل ماسه‌سنگ، سیلت، شیل و رس‌سنگ و لایه‌های زغال‌دار به سن تریاس پسین تا ژوراسیک میانی تشکیل شده است.



شکل ۱ الف- موقعیت معادن زغال‌سنگ البرز و طیس. ۱- سنگرود (گیلان) ۲- فیل زمین (تهران) ۳- گلیران (مازندران) ۴- گانو (سمنان) ۵- طزره (سمنان) ۶- قشلاق (گلستان)، ۷ تا ۱۱- معادن رضی، جوزچال، زمستان یورت، تخت و غزنوی (گلستان) و ۱۲- پروده (طیس)، ب- نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد بررسی (بر اساس نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ خوش‌ییلاق [۱۹]).



شکل ۲ الف- نمای کلی از لایه‌های زغال‌دار، ب- بخش‌های رنگی از لایه دوم، پ- نمای کلی از معدن غزنوی، ت و ث- تصاویر برخی از نمونه‌های دستی از زغال‌سنگ معدن غزنوی (پیکان روی نمونه زغال‌سنگ شکل ت کانی‌های پیریت را نشان می‌دهد).

ابتدا ۱ گرم از پودر زغال‌سنگ (مش ۶۰) در یک بوته سرامیکی ریخته و به مدت ۱ ساعت در دمای ۱۰۷ درجه سانتیگراد در کوره گرمادهی شد. پس از خنک شدن بوته و وزن کردن نمونه، درصد رطوبت با استفاده از رابطه (۱) درصد رطوبت محاسبه شد. برای دو نمونه زغال‌سنگ برداشت شده از لایه اول ۰/۱۸ و ۰/۱۵ و برای یک نمونه زغال‌سنگ برداشت شده از لایه سوم ۰/۲۸ است.

$$\text{درصد رطوبت} = \left(\frac{A - B}{A} \right) \times 100 \quad (۱)$$

در این رابطه، A وزن نمونه پیش از گرمادهی و B وزن آن پس از گرمادهی است.

درصد خاکستر

سوختن زغال‌سنگ می‌تواند طیف وسیعی از بقایا شامل خاکستر بادی و خاکستر زیرین تولید کند [۲۴]. زغال‌سنگ شامل مقدار زیادی از عناصر سمی قابل شستشو است که می‌تواند خاک، آب‌های زیرزمینی و سطحی را آلوده

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از یک نمونه از لایه اول (I)، چهار نمونه از لایه دوم (II)، یک نمونه از لایه سوم (III) و یک نمونه از باطله زغال‌سنگ با استفاده از دستگاه JEOL JSM-G510 در دانشگاه پاتسدام تهیه شد. در این روش ابتدا نمونه‌ها خرد شده و بخشی از آن در دستگاه خلأ قرار گرفته و سطح آن با کربن پوشیده شده است. یک آشکارساز الکترونی پس پراکنشی تنوع ترکیبی از عناصر سبک و سنگین در سراسر منطقه عکسبرداری را نمایش می‌دهد. طیف‌سنج پرتوی ایکس انرژی پاشنده (EDS) همراه میکروسکوپ بررسی کمی عناصر از نقاط منفرد، روبش‌های خطی، روبش‌های منطقه و همچنین نقشه‌های توزیع عناصر را امکان‌پذیر می‌کند.

نتایج

درصد رطوبت

نمونه‌ها برای تعیین درصد رطوبت بر اساس استاندارد تعیین درصد رطوبت آمریکا (کد ۱۲-M-۲۳۳۰-۲/D۳۳۰۲) [۲۳]،

نیز صدق می‌کند، در حالی که این روند برای دو نمونه اول در مقایسه با دو نمونه دوم اندکی متفاوت است (شکل ۳ ب). این امر می‌تواند در ارتباط با تکرار لایه‌های رسوبی باشد. بررسی‌های کانی‌شناسی بر اساس نتایج XRD لایه سوم (III) نشان دهنده وجود کانی‌های متعدد ولی با فراوانی متفاوت در نمونه‌های برداشت شده از لایه سوم (III) است. (شکل ۳ پ). کوارتز و کانی‌های رسی (کائولینیت، ایلیت و مونتموریلونیت) فازهای اصلی تشکیل دهنده باطله زغال‌سنگ، هستند (شکل ۳ ت). بررسی‌های انجام شده بر زغال‌سنگ‌های میدان زغالی ییمین در مغولستان [۲۷] نشان می‌دهد که مقدار بالای کائولینیت با مقادیر نسبتاً کم کوارتز در رسوبات سفید رنگ موجود در شکستگی‌ها به علت کائولینیتی شدن روزادی است که همراه با کانی‌سازی پیریت‌های روزاد رخ می‌دهد. از این رو هنگامی که باطله زغال‌سنگ مدت زیادی در معرض هوازدگی و دیگر عوامل محیطی قرار گیرد، پیریت‌های موجود در آن دچار اکسایش می‌شوند؛ به طوری که این کانی در نمونه‌های سطحی مخزن باطله‌ها حذف خواهد شد [۲۸]. همچنین کانی‌های پلاژیوکلاز و فلدسپات قلیایی در زغال‌سنگ‌های غزنوی پتانسیل تشکیل کانی‌های رسی بر اثر هوازدگی را دارند.

طیف‌سنجی FT-IR

از طیف‌سنجی تبدیل فوریه فروسرخ (FT-IR) به عنوان یک روش تحلیلی گسترده برای تعیین گروه‌های عاملی کربوهیدرات‌ها (حلقوی و زنجیری) و عوامل ناجور (بیشتر اکسیژن) و همچنین تشخیص کلی کانی‌های موجود در زغال‌سنگ استفاده می‌شود [۲۹]. ترکیبات حلقوی به دسته وسیعی از ترکیبات شامل بنزن‌ها و ترکیباتی که از نظر رفتار شیمیایی مشابه با بنزن‌ها هستند، گفته می‌شود. بنزن‌ها و سایر ترکیبات حلقوی برخلاف آلکین‌ها و آلکن‌ها تمایلی برای انجام واکنش‌های افزایشی از خود نشان نمی‌دهند، اما در واکنش‌های جانشینی شرکت می‌کنند. بخش آلی زغال‌سنگ شامل گوگرد، اکسیژن و نیتروژن در گروه‌های عاملی مختلف است که این ساختارهای آلی با افزایش ویژگی حلقوی از زغال‌سنگ‌های رتبه کم (نارس) به بالا (بر اساس درجه بلوغ زغال‌سنگ) همراه هستند. نتایج طیف‌سنجی FT-IR یک نمونه زغال‌سنگ معدن غزنوی، ۶ قله برجسته را نشان می‌دهد (شکل ۴). قله کانی‌های رسی و سیلیکاته در گستره $400-600\text{ cm}^{-1}$ [۳۰] و 667 cm^{-1} [۳۱] قرار می‌گیرند. از این رو می‌توان گفت که قله

کند و تهدیدی برای محیط‌زیست به‌شمار رود [۲۴]. بر اساس استاندارد تعیین درصد خاکستر آمریکا (کد ۰۴-۳۶۸۳D) [۲۵]، مقدار ۶ گرم از نمونه پودر شده زغال‌سنگ با اندازه ذرات $250\text{ }\mu\text{m}$ (مش ۶۰) در یک بوته ۵۰ ml روباز از جنس کوارتز ریخته شد. بوته را در یک کوره با دمای محیط قرار داده و دمای آن را به تدریج افزایش می‌دهیم به طوری که دمای آن در مدت ۱ ساعت به ۳۰۰ درجه سانتیگراد برسد. سپس افزایش دما ادامه می‌یابد تا دما در پایان ساعت دوم به ۵۰۰ درجه سانتیگراد برسد. فرآیند تولید خاکستر در دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد برای مدت ۲ ساعت دیگر ادامه می‌یابد. گفتنی است که نمونه در پایان هر بخش مخلوط شد تا هیچ ماده آلی باقی نماند. پس از سرد شدن و وزن کردن نمونه، اگر دانه‌های ریز دیده شد، نمونه را در داخل هاون ریخته و کاملاً پودر می‌نماییم و به مدت ۱ ساعت دیگر در دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد در کوره قرار می‌دهیم. سرانجام پس از سرد شدن بوته، نمونه وزن شده و درصد خاکستر برپایه رابطه (۲) محاسبه می‌شود. درصد خاکستر برای سه نمونه محاسبه شد که دو نمونه از لایه اول دارای ۲۳/۶۶٪ و ۲۵/۱۶٪ خاکستر بوده و یک نمونه دیگر با مقدار خاکستر ۲۶/۵٪ از لایه سوم برداشت شده است.

درصد خاکستر $100(B/A) =$

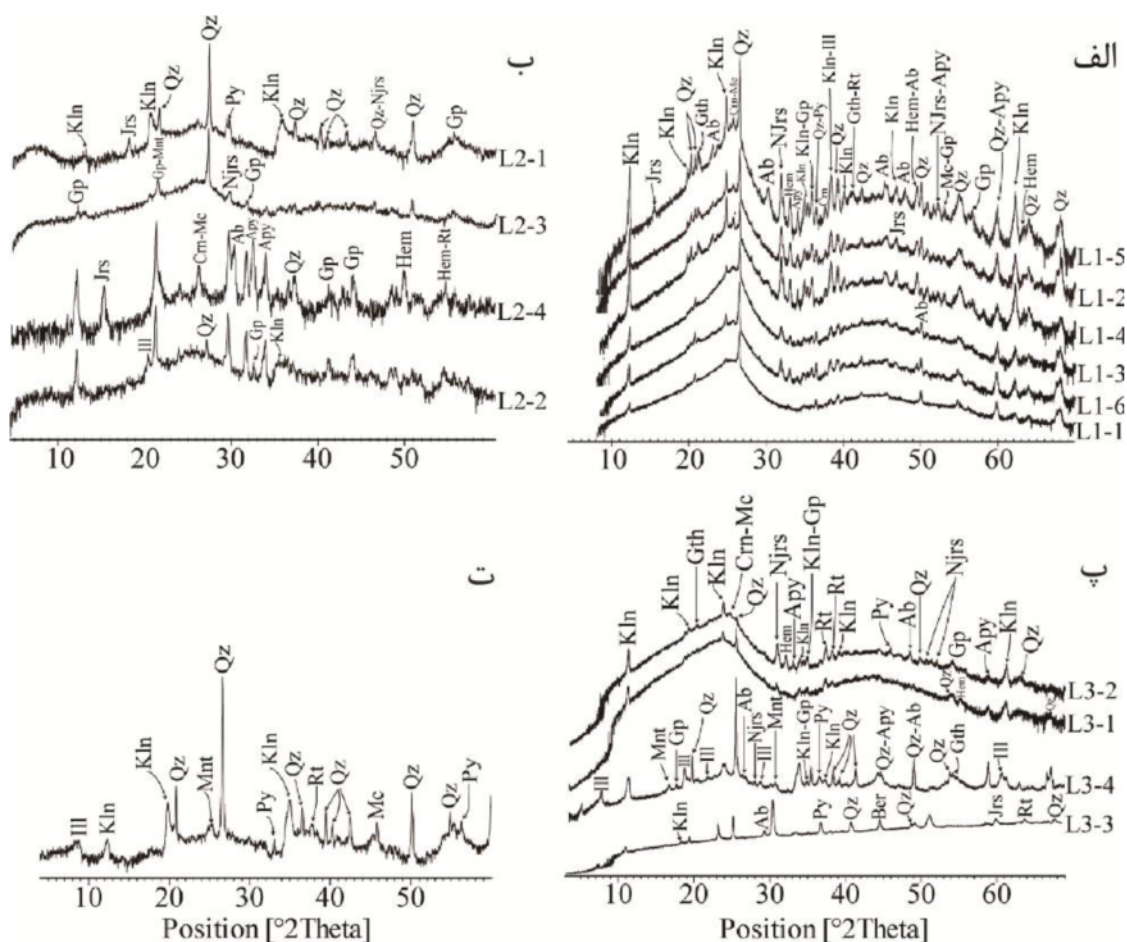
در این رابطه A و B به ترتیب وزن نمونه پیش و پس از گرمادهی است.

نتایج XRD

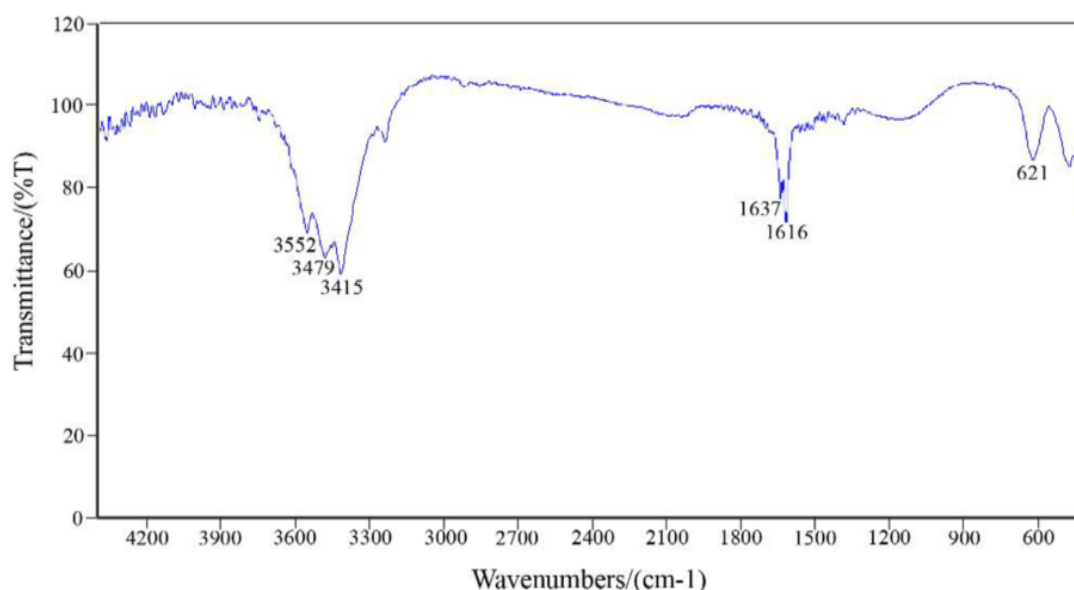
پژوهش پیرامون مواد معدنی به درک بهتر فرآیند تشکیل زغال‌سنگ کمک می‌کند. شناسایی کانی‌های مجهول نمونه‌های زغال‌سنگ معدن غزنوی به روش XRD بیانگر حضور کانی‌های کوارتز و کائولینیت به عنوان کانی‌های اصلی و مقادیر کمتری از سنگ‌گچ، ژاروسیت (ناتروژاروسیت)، گوتیت، میکروکلین، پیریت، برلینیت، آرسنوپیریت، آلبیت، همتیت، ایلیت، \pm مونتموریلونیت، \pm روتیل و \pm کروندوم به عنوان کانی‌های فرعی در زغال‌سنگ‌های معدن غزنوی است. مقایسه نتایج XRD برای نمونه‌های زغال‌سنگ لایه اول (I) نشان می‌دهد که آنها از نظر کانی‌شناسی و همخوانی قله‌ها و فراوانی آنها شباهت دارند [۲۶] (شکل ۳ الف). بررسی‌های کانی‌شناسی به روش XRD برای نمونه‌های زغال‌سنگ لایه دوم (II) نشان می‌دهد که همخوانی و فراوانی قله‌ها برای نمونه‌های L۲-۱ و L۲-۳ روند مشابهی نشان می‌دهند و این امر برای دو نمونه L۲-۲ و L۲-۴

H₂O یا فنل نسبت داده شده‌اند [۳۰]. در طیف زغال‌سنگ توربی، یک جذب قوی در 3285 cm^{-1} گزارش شده است که به ارتعاشات گروه هیدروکسیل اختصاص دارد در حالی که عدم وجود جذب در بالاتر از 3600 cm^{-1} در طیف زغال‌سنگ توربی بیانگر حذف گروه‌های هیدروکسیلی آزاد با افزایش درجه زغالی‌شدن است [۳۲]. از این رو می‌توان گفت که قله‌ها در نمونه مورد بررسی در 3415 cm^{-1} ، 3479 cm^{-1} و 3552 cm^{-1} با شدت جذب متوسط بیانگر حضور گروه‌های هیدروکسیل در ساختار زغال‌سنگ است. قله‌هایی با شدت جذب بسیار ضعیف در گستره $3600-3800\text{ cm}^{-1}$ معرف حضور کانی‌های رسی و سیلیکاته در ساختار زغال‌سنگ‌ها هستند [۳۰].

نمونه مورد بررسی در 621 cm^{-1} بیانگر حضور کانی‌های رسی و سیلیکاته در زغال‌سنگ است. همچنین گروه‌های عاملی اکسین‌دار در گستره $1000-1800\text{ cm}^{-1}$ دیده می‌شود [۳۰] به طوری که قله‌های در گستره 1618 cm^{-1} و 1622 cm^{-1} به حلقه‌های کششی حلقوی C=O یا C=C مربوط هستند. قله‌های در گستره $1600-1635\text{ cm}^{-1}$ یک جذب شدید از خود به نمایش می‌گذارند که این بیانگر افزایش مقدار کربن است [۲۹]. بنابراین می‌توان گفت که قله‌های نمونه مورد بررسی در گستره 1616 cm^{-1} و 1637 cm^{-1} معرف ارتعاشات کششی نوار C=C در رابطه با بخش آلی زغال‌سنگ‌ها هستند. در گستره $3400-3600\text{ cm}^{-1}$ گروه‌های هیدروکسیل جای دارند. شدت نوارها در $3402-3416\text{ cm}^{-1}$ به کشش -OH از گروه‌های



شکل ۳ الگوی پراش پرتوی ایکس نمونه‌های زغال‌سنگ. الف) لایه اول (I)، ب) لایه دوم (II)، پ) لایه سوم (III) و ت) باطله زغال‌سنگ. علائم اختصاری کانی‌ها [۲۶] (کائولینیت=kln، کوآرتز=Qz، ژاروسیت=Jrs، ناتروزاروسیت=Njrs، گوتیت=Gth، آلبیت=Ab، کروندم=Crm، هماتیت=Hem، میکروکلین=Mc، پیریت=Py، سنگ‌گچ=Gp، آرسنوپیریت=Apy، ایلیت=Ill و روتیل=Rt؛ برلینیت=Ber؛ مونتموریلونیت=Mnt).



شکل ۴ طیف FT-IR از یک نمونه زغال سنگ معدن غزنوی.

نتایج SEM/EDS

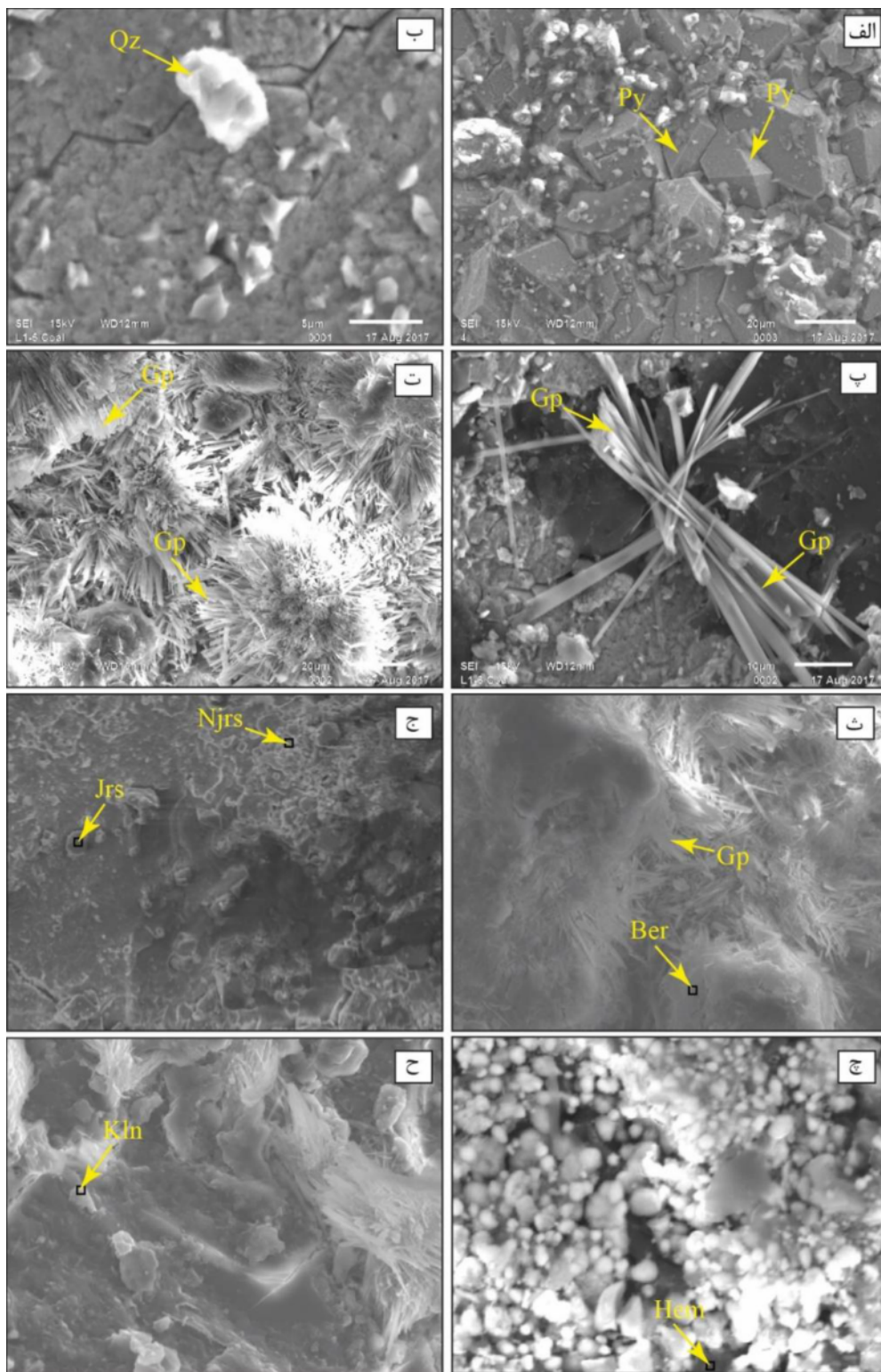
بر اساس نتایج به دست آمده از بررسی نمونه‌های زغال سنگ معدن غزنوی به روش SEM/EDS و مقایسه آنها با شیمی کانی‌های استاندارد می‌توان به حضور یا عدم حضور آن کانی در نمونه‌ها پی برد. بررسی‌های کانی‌شناسی ۷ نمونه از زغال سنگ لایه‌های مختلف معدن غزنوی با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و آشکارساز EDS، حضور پیریت، کانی‌های رسی، سنگ گچ، ژاروسیت و ناتروژاروسیت، برلینیت را به خوبی نشان می‌دهند (شکل ۵). پیریت به صورت کانی شکل‌دار ($20\mu\text{m}$) تا بی‌شکل در کنار کانی‌های رسی قابل تشخیص است (شکل ۵ الف). کوارتز به صورت بلور بی‌شکل در زمینه‌ای از پیریت و کانی‌های رسی دیده می‌شود (شکل ۵ ب). سنگ گچ به صورت بلورهای سوزنی و نوارهای رشته‌ای در میان سایر اجزای زغال سنگ دیده شده است (شکل‌های ۵ پ و ت). یکی دیگر از کانی‌های دیده شده در تصاویر پراکنشی، برلینیت است که به نظر می‌رسد که در لبه یک توده دایره‌ای شکل قرار گرفته و بلورهای سنگ گچ به صورت نوارهای باریک لبه این توده را احاطه نموده‌اند (شکل ۵ ث). همچنین ژاروسیت و ناتروژاروسیت در تصاویر پس پراکنشی در کنار پیریت و کانی‌های رسی (کائولینیت، ایلیت و مونتموریلونیت) دیده می‌شوند (شکل ۵ ج). هماتیت به صورت بلورهای تیره و بی‌شکل در میان انبوهی از دیگر اجزای زغال سنگ به چشم می‌خورد (شکل ۵ چ). بلورهای روشن کائولینیت در زمینه

زغال سنگ خودنمایی می‌کند هر چند که کانی‌های رسی به صورت بی‌شکل، در اندازه‌های کوچک و به مقدار فراوان شناسایی شده‌اند اما تشخیص نوع این کانی‌ها از یکدیگر (کائولینیت، ایلیت یا مونتموریلونیت) در تصاویر پس پراکنشی بسیار دشوار است (شکل ۵ ح).

بحث و بررسی

محاسبه درصد رطوبت زغال‌سنگ‌های البرز نشان می‌دهد که مقدار رطوبت در زغال‌سنگ‌های این حوضه پایین است [۱۱]، [۱۵]. مقدار رطوبت زغال‌سنگ‌های معدن غزنوی با میانگین ۰٫۲٪، معدن کارمزد- البرز مرکزی ۱٫۵۸٪ [۳۳] و زغال‌سنگ‌های منطقه شاهرود- البرز شرقی ۰٫۸٪ [۱۱] است. بررسی زغال سنگ حوضه زغالی پروده- طبس نشان می‌دهد که مقدار رطوبت در زغال‌سنگ‌های این ناحیه نیز پایین (۰٫۹٪-۰٫۷٪) است [۱].

مقدار میانگین درصد خاکستر برای نمونه‌های زغال سنگ معدن غزنوی ۲۵٫۱٪ تعیین شده است که مقایسه آن با درصد خاکستر زغال‌سنگ‌های معدن اولنگ- ۲۰ کیلومتری جنوب رامیان- البرز شرقی (از کمتر از ۱۰٪ تا ۳۱٪ در لایه‌های مختلف) [۳۴]، زغال‌سنگ‌های معدن لوشان- البرز غربی (۳-۲۲٪) [۱۱] و زغال‌سنگ‌های معدن کارمزد- البرز مرکزی (۱٫۳-۸٫۳٪) [۳۵] نشان می‌دهد که زغال‌سنگ‌های البرز از نظر درصد خاکستر در گروه کم تا متوسط [۱۱، ۱۵] رده‌بندی می‌شوند.



شکل ۵ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM/EDS) الف- کانی‌های خودشکل پیریت در زمینه‌ای از کانی‌های رسی و دیگر اجزای زغال‌سنگ، ب- کوارتز به صورت بلور بی‌شکل سفید رنگ در زمینه‌ای از پیریت و کانی‌های رسی، پ و ت- سنگ گچ به صورت انباشتی از بلورهای سوزنی‌شکل و نوارهای رشته‌ای (دسته علفی)، ث- برلینیت در کنار توده‌های دایره‌ای‌شکل و سنگ گچ به صورت نوارهای باریک در لبه‌های توده‌های آن، ج- ژاروسیت و ناتروژاروسیت در میان زمینه‌ای از اجزای زغال‌سنگ، چ- کانی هماتیت، ح- کائولینیت در ابعاد مختلف در کنار کانی‌های دیگر از جمله سنگ گچ و کوارتز.

پیریت، به عنوان یک کانی سولفیدی به فراوانی در بسیاری از زغال‌سنگ‌ها در شکل‌های مختلف و در نسل‌های متفاوت تشکیل می‌شود [۳۶]. سولفات آب دریا درون تورب نفوذ کرده و پس از آن توسط باکتری‌ها به هیدروژن سولفید- پلی سولفیدها و گوگرد عنصری احیاء می‌شود [۳۶]. آهن پس از حمل‌شدن به محیط باتلاق توربی و قبل از پیشروی آب دریا به صورت اکسید و هیدروکسیدهای آهن سه ظرفیتی به وسیله رس‌های رودخانه‌ای جذب می‌شود [۳۶]. آهن سه ظرفیتی طی درون‌زایی اولیه در یک محیط احیایی به آهن دو ظرفیتی احیاء می‌شود و احتمالاً توسط باکتری‌های احیاکننده سولفات با هیدروژن سولفید به شکل مونوسولفید آهن واکنش نشان می‌دهد و سرانجام بلورهای خود شکل پیریت تشکیل می‌شوند [۳۶]. پیریت‌های خود شکل به صورت بلورهای مکعبی و هشت‌وجهی [۳۷] در اندازه‌های کوچک قابل تشخیص بوده و بیشتر همزاد هستند و طی نهشته شدن تورب [۳۸] و یا طی گیاهخاکی شدن تشکیل می‌شوند و در سراسر زغال‌سنگ پراکنده هستند [۳۹]. پیریت‌های بی‌شکل دسته‌ای از بلورهای پیریت هستند که شکل آنها به شکل بقایای گیاهی که در آن نهشته می‌شوند بستگی دارد و به دو نوع تقسیم می‌شوند:

- ۱- پیریت‌های بی‌شکل جانشینی با خاستگاه همزاد و
- ۲- پیریت‌های بی‌شکل انباشتی (پر شدگی) با خاستگاه روزاد [۳۹].

نوع دیگر پیریت‌های روزاد در درزه‌ها و شکستگی‌ها وجود دارد که شامل پیریت‌های نهشته شده در درزه‌های مسیر عبور محلول‌های نفوذی به رگه زغالی هستند و به دو نوع تقسیم می‌شوند: ۱- پیریت روزاد انباشتی شامل انواع پرکننده درزه‌ها و پرکننده شکستگی‌ها و ۲- پیریت روزاد جانشین‌شونده [۳۹]. پیریت‌های روزاد در درزه‌ها، ترک‌ها و شکستگی‌ها پس از نهشته شدن زغال‌سنگ (به صورت پسانهشتی) شکل می‌گیرند و فراهم شدن گوگرد احیایی، کاتیون‌های حل شده (آهن دو ظرفیتی) و مکان مناسب برای تشکیل از شرایط لازم برای تشکیل این نوع پیریت‌ها در ساختار زغال‌سنگ هستند [۳۸]. بر اساس پژوهش رجب زاده و همکاران [۱] پیریت‌های خودشکل به صورت بلورهای شکل‌دار پیریت با خاستگاه روزاد در معدن پروده قابل تشخیص هستند

و در رگه‌ها و یا به صورت پرکننده حفره‌های مواد آلی تشکیل شده‌اند و با طیف گسترده اندازه ذرات (گستره ۲ تا ۲۰۰ میکرومتر) در سراسر زغال‌سنگ پراکنده هستند. بر اساس بررسی‌های SEM/EDS کانی‌های سولفیدی در زغال سنگ‌های معدن غزنوی بیشتر به صورت پیریت و کمتر به شکل آرسنو پیریت حضور دارند. پیریت‌های مشاهده شده در نمونه‌های مورد بررسی به صورت خود شکل تا بی‌شکل هستند و بر اساس بررسی‌های مشابه [۱۵، ۴۰] و همچنین با توجه به محیط نهشته شدن سازند شمشک (دلتایی- مردابی) خاستگاه این نوع کانی‌های سولفیدی از نوع درون‌زاد است. کانی‌های سولفات آهن مانند ژاروسیت و ناتروژاروسیت در زغال‌سنگ‌ها به عنوان کانی‌های ثانویه و فراورده هوازدگی پیریت به شمار می‌روند [۳۵]. به نظر می‌رسد که ژاروسیت (ناتروژاروسیت) در نمونه‌های مورد بررسی در اثر هوازدگی پیریت تشکیل شده است.

پژوهش‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که کوارتز به عنوان فراوان‌ترین کانی سیلیکاته موجود در زغال‌سنگ‌های جهان می‌تواند دارای خاستگاه آواری، فراورده دگرسانی همزاد آلومینیوسیلیکات‌ها و یا به صورت گوه و پرکننده شکستگی‌ها با خاستگاه روزاد باشد [۱]. حضور بلورهای بی‌شکل کوارتز در ابعاد مختلف در زمینه‌ای از کانی‌های رسی و سایر اجزای زغال‌سنگ‌های معدن غزنوی نشان می‌دهند که آنها دارای خاستگاه تخریبی هستند.

رایج‌ترین انواع کانی‌های رسی در زغال‌سنگ‌ها، کائولینیت و ایلیت هستند که ایلیت در درجات دگرگونی بالاتر به کلریت تبدیل می‌شود [۴۱]. کائولینیت در زغال‌سنگ ممکن است دارای خاستگاه برج‌زاد و یا آواری باشد و تشکیل آن در منافذ و حفره‌های سلولی ماسرال‌های زغال‌سنگ نشان دهنده خاستگاه برج‌زاد آن است [۱]. بر اساس پژوهش زونبرگن و همکاران [۴۲] برخی کانی‌های رسی در اثر هوازدگی زغال‌سنگ‌ها تشکیل می‌شوند و می‌توانند عناصر خطرناک موجود در محیط را کنترل کنند. فراوانی کانی‌های رسی در باطله زغال‌سنگ (بر پایه نتایج XRD) و حضور آنها در زمینه زغال‌سنگ در تصاویر پس پراکنشی، نشان می‌دهد که کانی‌های

رسی در نمونه‌های مورد بررسی همزمان با تدفین مواد گیاهی وارد حوضه رسوبگذاری شده‌اند.

حضور هماتیت و گوتیت در برخی از نمونه‌های زغال‌سنگ منجر به ایجاد رنگ قرمز تا قهوه‌ای و زرد تا قهوه‌ای در این نمونه‌ها شده است. بر اساس پژوهش یوسیفوا و همکاران [۴۳]، حضور اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن در زغال‌سنگ‌های منطقه ولج در بلغارستان نتیجه اکسایش پیریت‌های نسل اول (برجازاد) است. از این رو حضور هماتیت و گوتیت در نمونه‌های مورد بررسی احتمالاً بیانگر اکسیده شدن کانی‌های پیریت در شرایط اکسایش است.

حضور سنگ‌گچ در زغال‌سنگ‌ها می‌تواند بیانگر خاستگاه ثانویه آن (میزان تبخیر بالا در منطقه) یا به عنوان فراورده هوازدگی زغال‌سنگ‌ها باشد [۱]. از آنجا که محیط تشکیل زغال‌سنگ‌های مورد بررسی از نوع دلتایی-مردابی بوده است، بنابراین می‌توان گفت که حضور سنگ‌گچ به صورت بلورهای سوزنی‌شکل در زمینه‌ای از سایر اجزای زغال‌سنگ از نوع همزاد بوده و بر اثر هوازدگی کانی‌های کربناته و سولفیدی تشکیل شده است.

خاستگاه پلاژیوکلاز و میکروکلین‌ها در زغال‌سنگ‌های معدن غزنوی احتمالاً مربوط به بازالت‌های سلطان میدان و گرانیتهای قلیایی خوش ییلاق است که در جنوب منطقه مورد بررسی برونزد دارند و این کانی‌ها به شکل آواری به حوضه رسوبی سازند شمشک وارد شده‌اند.

کانی برلینیت جزو گروه آلومینیوم فسفات و از کانی‌های معرفی شده در زغال‌سنگ‌ها است [۴۴] که از نظر ویژگی‌های شاخص و وابستگی دمایی کاملاً مشابه با کوارتز است [۴۵]. ساختار کانی برلینیت (AlPO_4) به وسیله جایگزینی اتم‌های Si توسط اتم‌های Al و P به طور متناوب در ساختار کوارتز مشتق شده است که منجر به دو برابر شدن طول ثابت شبکه C می‌شود. آلومینیوم فسفات‌ها و سولفات‌ها از ابر گروه آلونیت (کانی‌های APS) در گستره وسیعی از محیط‌های تشکیل پوشاننده قلمروهای دگرگونی، آذرین و رسوبی یافت می‌شوند [۴۶]. کانی‌های APS در محیط‌های رسوبگذاری متفاوت: مانند سنگ‌های رسوبی آهکی، فسفریت‌دار، رسی-کربناتی، ماسه‌ای،

محیط‌های زغال‌دار، در خاک‌ها و خاک‌های دیرینه، در ساپرولیت (بوکسیت‌ها، لاتریت‌ها) و در توالی‌های آهکی-رسی میزبان ذخایر SHDG نوع کارلین تشکیل می‌شوند [۴۵]. در کل، بررسی‌های کافی پیرامون دلایل حضور برلینیت در زغال‌سنگ‌ها صورت نگرفته است.

از طیف‌سنجی FT-IR برای هر دو بخش آلی و غیر آلی زغال‌سنگ استفاده می‌شود [۴۷]. بررسی طیف‌های FT-IR بدست آمده، حضور کانی‌های رسی و سیلیکاته در نمونه‌ها را تأیید می‌کند. وجود نوارهای C=C در ساختار زغال‌سنگ با بخش آلی نمونه مورد بررسی ارتباط دارد. گروه‌های هیدروکسیلی معرف حضور آب به واسطه حضور کانی‌های آبدار مانند کانی‌های رسی، سنگ‌گچ و ... در نمونه هستند.

برداشت

زغال‌سنگ‌های مورد بررسی بر اساس شکنندگی و جلای براق بر پایه شواهد ماکروسکوپی، درصد رطوبت پایین و درصد خاکستر کم تا متوسط از نوع آنتراسیت تشخیص داده شده‌اند. بررسی‌های کانی‌شناسی زغال‌سنگ معدن غزنوی به روش XRD و SEM/EDS نشان می‌دهند که کانی‌هایی مثل کوارتز و کائولینیت به عنوانی کانی‌های اصلی و سنگ‌گچ، ژاروسیت (ناتروژاروسیت)، گوتیت، \pm کروندوم، میکروکلین، پیریت، آرسنوپیریت، آل‌بیت، هماتیت، ایلیت، مونتموریلونیت و \pm روتیل به عنوان کانی‌های فرعی در این زغال‌سنگ‌ها حضور دارند. بر اساس بررسی‌های صورت گرفته بر زغال‌سنگ‌های نقاط مختلف جهان، پیریت در زغال‌سنگ‌های معدن غزنوی به احتمال زیاد بر اثر انتقال آهن از بیرون به درون حوضه رسوبی-مردابی و ترکیب با گوگرد آزاد شده از احیاء مواد آلی به وسیله ریزاندامگان زنده تشکیل شده است. هوازدگی پیریت منجر به تشکیل کانی‌های سولفات آهن شامل ژاروسیت و ناتروژاروسیت در نمونه‌های مورد بررسی شده است. اکسیده شدن کانی‌های آهن‌دار اولیه به واسطه قرار گرفتن زغال‌سنگ تشکیل شده در شرایط اکسایش سبب رخداد کانی‌های هماتیت و گوتیت با خاستگاه همزاد و ایجاد رنگ قرمز تا زرد در برخی از نمونه‌های مورد بررسی شده است. به نظر می‌رسد که برلینیت به عنوان یک کانی آلومینیوم فسفات در ساختار زغال‌سنگ غزنوی دارای

- [8] Aghaie Karigh M., Shamanian Gh.H., Gholipour M., "The effects of acid drainage in formation of environmental minerals (secondary minerals) in Galand-rud coal mines and waste materials of Vatani coal washing, Mazandaran province ", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 19(2) (2011) 325-338.
- [9] Shamanian Gh.H., Houssinie Ashlaghie F., "Mineralogy and geochemistry of the Jurassic coals from the Gheshlagh mine, Eastern Alborz ", Iranian Journal of Economic Geology 7(2) (2015-2016) 369-383.
- [10] Heydarie H., "Iranian coal tectonic", First National coal congress, Faculty of Mining Engineering, Petroleum, Geophysics (2012) 1-9.
- [11] Yazdi M., "Geological and Geochemical Features of Alborz Basin Coal Deposits, Iran", Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran 23 (2) (2012) 163-169.
- [12] Darvishzadeh A., "Geology of Iran", DaneshAmoz publisher, Amirkabir publishing house, 1 (1992) 65-67.
- [13] Najafie Hajipour D., "Encountered plant macrofossils of Shemshak Formation in Ghosnavi – Fasian area, along Shahrud - Azadshahr road (Eastern Alborz), Northern Iran: Regional stratigraphic implications and Palaeoclimatic condition ", Sedimentary facies 2(1) (2009) 106-114.
- [14] Vaezjavadi F., "Plant fossil remains from the Kalariz formation in the East Yurt mine, Azadshahr and its correlation with other florizones in Iran and the world ", Geosciences 25 (2016) 95-110.
- [15] Yazdi M., Esmaeilnia A.S., "Geochemical properties of coal in the Lushan coalfield of Iran", Coal Geology 60 (2004) 73-79.
- [16] Stocklin, J. "Structural History and Tectonic of Iran: A Review", American Association of Petroleum Geologists Bulletin 52 (1968) 1229-1258.
- [17] Derakhshie M., Ghasemi H.A., Koksai F.T., "Mineral chemistry and thermobarometry of Soltan Maidan basalts, north of Shahrood", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 23(2) (2015) 257-268.
- [18] Ghavidel-Syooki M., Hassanzadeh J., Vecoli M., "Palynology and isotope geochronology of the

خاستگاه همزاد بوده و از یک حوضه خارج از محیط تشکیل زغال سنگ وارد آن شده است. با استفاده از طیفسنجی FT-IR، گروه‌های عاملی مانند $C=C$ در بخش آلی زغال سنگ و OH (حذف تدریجی گروه‌های هیدروکسیل در زغال سنگ نوع آنتراسیتی) و همچنین کانی‌های رسی و کوارتز در نمونه‌های مورد بررسی شناسایی شدند.

قدردانی

این مقاله بخشی از پایان‌نامه کارشناسی ارشد نگارنده اول مقاله است که با کمک مالی معاونت پژوهشی و معاونت اداری و مالی دانشگاه گلستان انجام شده است. بررسی‌های SEM/EDS و بخشی از آنالیزهای XRD در دانشگاه پتسدام آلمان صورت گرفته است که نویسندگان از زحمات خانم دکتر کریستینا گونتر تشکر می‌کنند. از سردبیر محترم مجله و داوران گرامی نیز که با پیشنهادات سازنده خود به بهبود مقاله کمک نمودند، قدردانی می‌شود.

مراجع

- [1] Rajabzadeh M.A., Ghorbani Z., Keshavarzi B., "Chemistry, mineralogy and distribution of selected trace-elements in the Parvadeh coals, Tabas, Iran", Journal of Fuel 174 (2016) 216-224.
- [2] Speight J.G., "Hand book of coal analysis", John Wiley & Sons, (2005) p. 238.
- [3] Merritt R.D., "Coal Exploration; Mine Planning, and Development", Noyes Publications (1986) P. 464.
- [4] Glikson M., Mastalerz M., "Organic Matter and Mineralisation", Kluwer Academic Publishers (2000) 314-326.
- [5] Gluskoter H.J., "Mineral Matter and Trace Elements in Coal", Trace Elements in Fuel 141(1975) 1-22.
- [6] Yazdi M., "Coal (from origin to environmental effects)", Jahad Daneshghahi publisher of Technology Branch of Amirkabir University (2004) p. 278.
- [7] Shahraz S., kohsari A.H., "Study of Trace and Rare Earth Elements in Coal Basins of Iran (Study in Karmozd underground coal mine) ", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 4 (2015) 685-696.

- American Journal of Analytical Chemistry 5 (2014) 367-372.
- [30] Georgakopoulos A., Iordanidis A., Kapina V., "Study of Low Rank Greek Coals Using FTIR Spectroscopy", Energy Sources 25 (2013) 995-1005.
- [31] Uzarowicz L., Skiba S., Skiba M., Segevic B., "Clay Mineral Formation of Soils Developed in the Weathering Zone of Pyrite-Bearing Schists: A Case Study from the Abandoned Pyrite mine in Wiesciszowice, Lower Silesia, SW Poland", Clays and Clay Minerals 59 (2011) 581-594.
- [32] Xie K.C., "Structure and Reactivity of Coal", Springer (2015) p. 46.
- [33] Moore F., Ismaili A., "Mineralogy and geochemistry of the coals from the Karmozd and Kiasar coal mines, Mazandaran province, Iran", International Journal of Coal Geology 96-97 (2012) 9-21.
- [34] Suleimani Marshk Z., Taghipour N., Aharipour R., "Organic petrography of coal deposits of the Olang area, Eastern Alborz", Geosciences 90 (2012) 21-32.
- [35] Gholipour M., Mazaheri A., Raghimi M., Shamanian Gh.H., "Study of geochemistry and mineralogy in Karmozd coal Basin Central Alborz, Mazandran Province", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 17 (2010) 655-670.
- [36] Lin Chou C., "Sulfur in coals: A review of geochemistry and origins", International Journal of Coal Geology 10 (2012) 1-13.
- [37] Xie P., Song H., Wei J., Li Q., "Mineralogical Characteristics of Late Permian Coals from the Yueliangtian Coal Mine, Guizhou, Southwestern China", Minerals (2016) 1-21.
- [38] Demchuk T.D., "Epigenetic pyrite in a low-sulphur, subbituminous coal from the central Alberta Plains", International Journal of Coal Geology 21 (1992) 187-196.
- [39] Win C.T., Surjono S.S., Amijaya D.H., Husein S., Aihara A., Watanabe K., "Distribution of Pyrite and Mineral Matter in Coal Seams from Samarinda Area, Lower Kutai Basin, Indonesia", Clean Coal Technology (2013) 17-24.
- [40] Alexandra N.G., Paul F.C., "Changes in geochemistry and mineralogy of thermally altered Upper Ordovician–Silurian successions (Ghelli and Soltan Maidan Formations) in the Khoshyeilagh area, eastern Alborz Range, northern Iran; stratigraphic and palaeogeographic implications", Review of Palaeobotany and Palynology 164 (2011) 251–271.
- [19] Jafariyan M.B., Jalali A., Eshghi Poor M., Saidi A., Ahangaran A., Ghassemi M.R., "1:100000 geologic map of the Khosh Yeilagh quadrangle", Geological Survey and Mineral Exploration of Iran (2004) Sheet NO: 7063.
- [20] Abbassi N., Madanipour S., "Dinosaur tracks from the Jurassic Shemshak Group in the Central Alborz Mountains (Northern Iran)", Geologica Carpathica 65 (2014) 99-115.
- [21] Aghanabati A., "Geology of Iran", Geological survey of Iran (2005) p. 586.
- [22] Basham A., Ramezani Omali R., Taherie A., "Geometry and motion analysis of the geological structures in the Till-Abad area- Ghosnavi (Eastern Alborz)", M.Sc. Thesis, Shahrood Industrial University, 2015.
- [23] Zhu, Q., "Coal sampling and analysis standards", IEA Clean Coal Centre, United Kingdom, p. 123.
- [24] Kim Y., kim k., Jeong G.Y., "Study of detailed geochemistry of hazardous elements in weathered coal ashes", Fuel 193 (2017) 343–350.
- [25] ASTM (American Society for Testing and Materials) D-3683-04. Standard Test Method for Trace Elements in Coal and Coke Ash by Atomic Absorption (2004) (<https://www.astm.org/>).
- [26] Whitney D.L., Evans B.W., "Abbreviations for names of rock-forming minerals", American Mineralogist 95 (2010) 185-187.
- [27] Li J., Zhuang X., Querol X., Font O., Izquierdo M., Wang Z., "New data on mineralogy and geochemistry of high-Ge coals in the Yimin coalfield, Inner Mongolia, China", International Journal of Coal Geology 125 (2014) 10–21.
- [28] Gholipour M., Mazaheri A., Raghimi M., Shamanian Gh.H., "Investigation of environmental impacts of acid mine drainage (AMD) on coal tailing in Zirab coal cleaning factory, Mazandran Province", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 17(2) (2009) 173-186.
- [29] Balachandran M., "Role of Infrared Spectroscopy in Coal Analysis-An Investigation",

- [44] Jinsheng G., "Coal, Oil Shale, Natural Bitumen, Heavy Oil, and Peat", Eolss (2009) P 466.
- [45] Muraoka Y., Kihara K., "The temperature dependence of the crystal structure of berlinite, a quartz-type form of $AlPO_4$ ", Physics and Chemistry of Minerals 24 (1997) 243–253.
- [46] Dill H.G., "The geology of aluminium phosphates and sulphates of the alunite group minerals: a review", Earth-Science Reviews 53 (2001) 35–93.
- [47] Cooke N.E., Fuller O.M., Gaikwad P., "FT-IR spectroscopic analysis of coals and coal extracts", Fuel 65 (1986) 1254-1260.
- coal, Upper Hunter Vally, Australia", Coal Geology 51 (2004) 197-210.
- [41] Hussain S.A., "Identification of clay minerals in coal and wastes from main coal washery, Zonguldak, Turkey", Applied Clay Science 7 (1993) 471-482.
- [42] Zevenbergen C., Bradley J.P., Van Reeuwijk L.P., Shyam A.K., Hjelmar O., Comans R.N.J., "Clay formation and metal fixation during weathering of coal fly ash", Environmental Science & Technology 33 (1999) 3405–9.
- [43] Yossifova M., Lerouge C., Deschamps Y., "Mineral Matter and Trace Elements in the Vulche Pole Coal, Bulgaria", Geolines 22 (2009) 87-93.