

الزامات توسعه فناوری برای ارتقای کیفیت و توان رقابت پذیری زغال سنگ کک شوی ایران

معاونت پژوهش‌های زیربنایی و امور تولیدی
دفتر: مطالعات انرژی، صنعت و معدن

کد موضوعی: ۳۱۰
شماره مسلسل: ۱۶۵۵۷
مردادماه ۱۳۹۸

به نام خدا

فهرست مطالب

۱	چکیده
۳	مقدمه
۶	۱. زغال سنگ کک شو
۱۱	۲. مخلوط کردن زغال سنگ
۱۶	۳. وضعیت زنجیره ارزش زغال سنگ در کشور
۲۰	۴. ارزیابی کیفیت زغال سنگ ناحیه پروده
۲۳	۵. فراوری زغال سنگ
۲۸	۶. روش های نوین زغال شویی
۳۱	جمع بندی و نتیجه گیری
۳۹	توصیه های سیاستی
۴۰	منابع و مأخذ



الزامات توسعه فناوری برای ارتقای کیفیت و توان رقابت پذیری زغال سنگ کک شوی ایران

چکیده

ایران دارای ذخایر عظیم زغال سنگ های کک شو و حرارتی به خصوص در دو حوزه طبس و البرز است؛ ناحیه پروده طبس دارای بزرگ ترین ذخیره زغال سنگ کک شوی کشور با ذخیره قطعی ۸۳۵ میلیون تن است. توسعه معادن زغال سنگ کشور هم زمان با راه اندازی شرکت ذوب آهن اصفهان در دهه ۴۰ شمسی آغاز شد، چراکه روش تولید فولاد در کوره بلند ذوب آهن اصفهان با استفاده از کک صورت می گیرد. به طور کلی، حدود ۵۴۰ کیلوگرم کک و ۹۰۰ کیلوگرم کنسانتره زغال سنگ کک شو برای تولید هر تن چدن مصرف می شود. کیفیت کنسانتره زغال سنگ تعیین کننده کیفیت کک تولیدی، بازدهی کوره بلند و در نتیجه هزینه تمام شده فولادسازی است. برخی عوامل تأثیرگذار بر کیفیت زغال سنگ نظیر درجه بلوغ قابل تغییر نیست، اما امکان کنترل عواملی مانند درصد گوگرد و خاکستر طی فرایندهای فراوری وجود دارد. علی رغم برخورداری از درجه بلوغ مناسب، خاکستر و گوگرد زغال سنگ معادن ناحیه پروده بسیار بالاست و لذا امکان صادرات آن به بازارهای جهانی بسیار محدود است.

درصد بالای گوگرد، خاکستر و اکسیدهای قلیایی سه مشکل اصلی ذخایر زغال سنگ پروده برای ورود به بازارهای خارجی است؛ البته، گوگرد با اختلاف زیاد اصلی ترین مشکل این ذخایر است. گوگرد در کنسانتره زغال سنگ تولیدی از معادن پروده معمولاً بیش از ۱/۷ درصد است. پیش بینی می شود که در صورت کاهش میزان گوگرد به زیر ۱/۳ درصد با استفاده از فرایندهای نوین فراوری زغال سنگ، ارزش قیمتی کنسانتره زغال سنگ تولیدی در ناحیه پروده طبس تا ۵۰ درصد افزایش یابد. شایان ذکر است که ارتقای کیفیت کنسانتره زغال سنگ با استفاده از روش های نوین فراوری موجب متضرر شدن مصرف کننده داخلی نخواهد شد، چراکه واحدهای کک سازی نیز به تبع افزایش کیفیت زغال سنگ داخلی، نیاز کمتری به واردات زغال سنگ گران قیمت خارجی خواهند داشت. از طرفی، افزایش بازدهی کوره بلند به دلیل ارتقای CSR کک تولیدی موجب کاهش مصرف کک می شود که افزایش قیمت زغال سنگ را تا حد زیادی جبران می کند.

فرایندهای سنتی فراوری زغال سنگ مبتنی بر اختلاف زغال سنگ و خاکستر در برخی خواص فیزیکی نظیر چگالی و کشش سطحی است. با توجه به مشخصات ذخایر زغال سنگ طبس و البته

محدودیت‌های روش‌های سنتی فراوری زغال‌سنگ خام، در حال حاضر، امکان حذف گوگرد و خاکستر با کیفیتی که قابل رقابت با زغال‌سنگ‌های وارداتی باشد، وجود ندارد.

عدم رغبت فولادسازان بزرگ دنیا به مصرف زغال‌سنگ‌های پُرگوگرد و فراهم نبودن امکان صادرات زغال‌سنگ کک‌شوی ایران، موجب شده است که اساساً نظام قیمتگذاری مشخصی برای زغال‌سنگ ایران وجود نداشته باشد. وضع جرائم بر کیفیت یک محصول نیز صرفاً دارای ابعاد فنی و مالی کوتاه‌مدت نیست، بلکه پایه و اساس تدوین نقشه راه، طرح‌های توسعه‌ای و ارتقای کیفیت محصول در بلندمدت است. شاخص‌های کیفی مورد توافق در نظام قیمتگذاری کنونی تا حدودی در تضاد با موازین علمی حوزه زغال‌سنگ است. نظام قیمتگذاری کنونی زغال‌سنگ در ایران به طور غیرمستقیم به مقوله کیفیت کک می‌پردازد و لذا دقت و کارآمدی پایین‌تری دارد. عدم پیش‌بینی جرائم برای متغیرهای مهمی نظیر اکسیدهای قلیایی از ریسک‌های این نظام قیمتگذاری است. اگرچه نظام کنونی قیمتگذاری به قیمتی منصفانه برای زغال‌سنگ‌های ایران منتج می‌شود، اما مسیر سرمایه‌گذاری‌های آتی بر روی طرح‌های تحقیق و توسعه در بخش فراوری زغال‌سنگ را تا حدود زیادی از مسیر صحیح خارج می‌کند. با این حال، تحقق این نظام قیمتگذاری علی‌رغم وجود برخی ایرادات، گامی مثبت در مسیر توسعه معادن و کارخانه‌های فراوری زغال‌سنگ است.

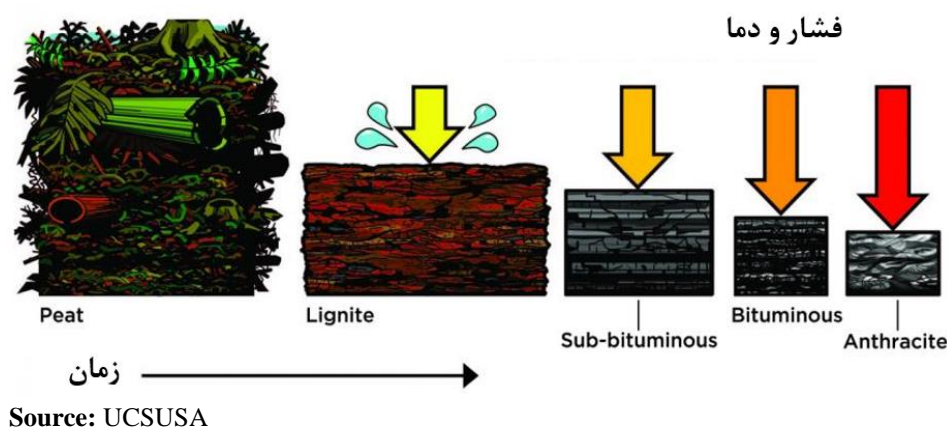
سرمایه‌گذاری‌های آتی در زنجیره ارزش زغال‌سنگ باید در دو بخش متمرکز شود تجهیز معادن ناحیه پروده و افزایش تولید زغال‌سنگ خام در کشور و توسعه فناوری‌های نوین زغال‌شویی جهت کاهش گوگرد کنسانتره به کمتر از ۱/۳ درصد.

در این گزارش تلاش شده است تا ضمن بررسی جوانب فنی و اقتصادی مقوله کیفیت برای زغال‌سنگ معادن ناحیه پروده، اهمیت توسعه فناوری‌های نوین فراوری زغال‌سنگ برای سیاستگذاران بخش معدن کشور و ذی‌نفعان (تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان زغال‌سنگ) تبیین شود. در این راستا، سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی (ایمیدرو) باید توسعه فناوری‌های نوین فراوری زغال‌سنگ نظیر روش‌های بیولوژیک و شیمیایی را به صورت یک طرح اولویت‌دار در دستور کار قرار دهد. در دو دهه گذشته، طرح‌های تحقیقاتی متعددی با هدف گوگردزدایی و خاکستردایی از زغال‌سنگ‌های کشور صورت گرفته است؛ به منظور استفاده حداکثری از ظرفیت‌های داخلی، ایمیدرو باید با برگزاری یک همایش تخصصی در زمینه فراوری زغال‌سنگ، از متخصصان این حوزه جهت عرضه دستاوردهای خود در مقیاس دانشگاهی و پایلوت دعوت به‌عمل آورد. پس از آمایش دقیق وضعیت توسعه فناوری در کشور، ایمیدرو باید با هدف ارتقای بهره‌وری دولت و جلوگیری از موازی‌کاری با بخش خصوصی، با استناد به تبصره «۳» ماده (۳) قانون اجرای سیاست‌های کلی اصل چهارم قانون اساسی، به سرمایه‌گذاری مشترک با بخش خصوصی اقدام کند.



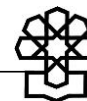
زغال سنگ ماده قابل اشتعالی است که از تجزیه گیاهان طی فرایندهای بیوشیمیایی و شیمیایی تحت فشار و دمای بالا تشکیل می‌شود. بقایای گیاهان^۱ طی فرایندهای بیولوژیک توسط باکتری‌ها و قارچ‌ها تجزیه و پیت^۲ تشکیل و به مرور زمان به زغال نارس^۳ تبدیل می‌شود. زغال سنگ نارس تحت دمای بالا (غالباً در اعماق زیاد) طی تحولات فیزیکی و شیمیایی به تدریج بالغ شده و به ترتیب به زغال سنگ پیش بیتومینی، بیتومینی و آنتراسیت^۴ تبدیل می‌شود. با افزایش بلوغ^۵، محتوای انرژی زغال سنگ افزایش می‌یابد. مراحل تشکیل زغال سنگ^۶ در شکل ۱ به طور شماتیک مشاهده می‌شود.

شکل ۱. شماتیک مراحل مختلف تشکیل زغال سنگ^۷



میزان رطوبت و مواد فرار زغال سنگ طی بالغ شدن به مرور زمان کاهش می‌یابد که این امر غالباً همراه با افزایش درصد کربن و در نتیجه محتوای انرژی زغال سنگ است. میزان بلوغ زغال سنگ با شاخص «درجه»^۸ مشخص می‌شود. درجه زغال سنگ به روش‌های مختلفی قابل اندازه‌گیری است؛ تعیین درجه زغال سنگ در استانداردهای بین‌المللی^۹ با سه شاخص انرژی ویژه، درصد مواد فرار و درصد کربن انجام می‌شود. بخش اعظم مصرف زغال سنگ در ایران به زغال سنگ‌های کک‌شو^{۱۰} مربوط است که برای تولید کک مورد نیاز در کوره بلند شرکت ذوب آهن اصفهان مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ زغال سنگ‌های کک‌شو

1. Plant Debris
2. Peat
3. Lignite
4. Sub-bituminous, Bituminous and Anthracite
5. Maturity
6. Coalification
7. <https://www.ucsusa.org/clean-energy/all-about-coal/how-coal-works>
8. Rank
9. ASTM D388-18a
10. Coking Coal



مواد غیرآلی به صورت ناخالصی در زغال سنگ وجود دارند که موجب کاهش انرژی ویژه آن می‌شوند. این ناخالصی‌ها به سه صورت در ترکیب شیمیایی زغال سنگ حضور دارند:

۱. نمک‌های محلول در حفرات آبی زغال سنگ،
 ۲. عناصر دارای پیوند شیمیایی با گروه‌های عاملی فعال زغال سنگ نظیر کربوکسیل‌ها، فنول‌ها و هیدروکسیل‌ها،
 ۳. ذرات معدنی مجزا مانند سیلیکات‌ها، کربنات‌ها، فسفات‌ها، سولفات‌ها و سولفیدها.
- امکان کاهش میزان ذرات معدنی موجود در زغال سنگ طی عملیات شستشو با روش‌های رایج نظیر فلوتاسیون^۱ وجود دارد، اما میزان سایر ناخالصی‌ها ثابت می‌ماند. میزان نوع اول و نوع دوم ناخالصی‌ها با افزایش بلوغ زغال سنگ کاهش می‌یابد، اما میزان ذرات معدنی بی‌ارتباط با بلوغ زغال سنگ است. هر سه نوع ناخالصی در تولید خاکستر طی سوختن زغال سنگ سهم دارند.
- میزان و ترکیب شیمیایی ماسرال‌های مختلف زغال سنگ متفاوت است؛ لذا، توزیع عناصر در فازهای مختلف، متفاوت است. نوع و میزان ذرات معدنی و سایر مواد غیرآلی موجود در زغال سنگ با روش‌های شناسایی نظیر پراش اشعه ایکس^۲ قابل ارزیابی است. میزان مواد غیرآلی با اندازه‌گیری ترکیب شیمیایی خاکستر حاصل از احتراق زغال سنگ و با استفاده از روش‌های مختلف آنالیز مواد^۳ قابل تعیین است. توزیع عناصر موجود در زغال سنگ نیز با استفاده از روش‌های نوین شناسایی نظیر میکروسکوپ الکترونی روبشی^۴ و اسپکتروسکوپی اشعه ایکس^۵ قابل تحقیق است. به‌عنوان مثال، گوگرد به‌صورت غیرآلی (پیریت و سولفات) و آلی (حاضر در ساختار شیمیایی مولکول‌ها) در زغال سنگ وجود دارد. به‌طور کلی، با افزایش بلوغ زغال سنگ، میزان ماسرال و پترینیت و نیز درصد گوگرد آلی موجود در آن افزایش می‌یابد.^۶ برخلاف نوع غیرآلی، امکان کاهش میزان گوگرد آلی با فرایندهای رایج شستشو وجود ندارد؛ لذا، تعیین نوع و میزان گوگرد زغال سنگ از منظر قابلیت/هزینه شستشو حائز اهمیت است. به‌طور کلی، گوگرد عنصری نامطلوب در زغال سنگ است؛ افزایش درصد گوگرد در زغال سنگ‌های کک‌شو، مصرف کک و در نتیجه قیمت تمام شده تولید فولاد را در کوره بلند افزایش می‌دهد. از طرفی، حضور گوگرد در زغال سنگ‌های حرارتی موجب آلودگی زیست‌محیطی می‌شود؛ لذا، میزان مجاز گوگرد (آلی + غیرآلی) در زغال سنگ‌های حرارتی به ۰/۸ درصد محدود شده است. بزرگ‌ترین ذخایر قطعی زغال سنگ کشور در ناحیه طبس وجود دارد. گوگرد به نسبت زیاد این ذخایر، ضعف عمده زغال سنگ‌های تولیدی از معادن ناحیه طبس است.

1. Flotation

2. X-Ray Diffraction (XRD)

3. AAS, XRF, ICP-OES & OES

4. Scanning Electron Microscopy (SEM)

5. X-Ray Spectroscopy (XPS)

6. Elsevier, Applied Coal Petrology (2008), Chapter Two: Colin R. Ward & Isabel Suarez-Ruiz, "Basic Factors Controlling Coal Quality and Technological Behaviour"

جدول ۲، آنالیز نمونه‌های زغال سنگ دو معدن مختلف در ایالات متحده آمریکا (قبل از شستشو) را نشان می‌دهد. با اندازه‌گیری درصد ماسرال‌های حاضر در نمونه‌ها مشخص شده است که زغال سنگ معدن «هاوسویل»^۱ با توجه به داشتن میزان زیادی از ماسرال ویتترینیت، دارای بلوغ بیشتری است. گفتنی است که انرژی ویژه زغال سنگ معدن مذکور به دلیل میزان زیاد خاکستر همراه، به نسبت پایین است، اما این ویژگی، تعیین‌کننده درجه بلوغ ذخیره این معدن نیست. نکته حائز اهمیت آنکه علی‌رغم درصد بالای «گوگرد کل»^۲ در ذخایر معدن مذکور، بیش از ۸۰ درصد گوگرد حاضر در این زغال سنگ از نوع غیرآلی است که امکان حذف آن در فرایندهای رایج شستشو وجود دارد. در نتیجه، آنالیز دقیق زغال سنگ امری حیاتی در بهره‌برداری و قابل اعتمادترین روش برای تعیین درجه بلوغ زغال سنگ از یک ذخیره معدنی است.

جدول ۲. آنالیز شیمیایی زغال سنگ دو معدن ایالات متحده آمریکا^۳ (همه مقادیر به درصد وزنی)

ارزش حرارتی (MJ/kg; mmmf)				کربن ثابت	مواد فرآر	خاکستر	رطوبت	
۳۹/۲۷				۲۰/۵۵	۷۲/۸۰	۵/۷۵	۰/۹۰	بریکنریج
۳۰/۹۸				۳۳/۸۷	۳۵/۶۰	۲۳/۳۸	۷/۱۵	هاوسویل
O	N	H	C	گوگرد آلی	گوگرد سولفاتی	گوگرد پیریت	گوگرد کل	
۵/۸۱	۱/۸۸	۸/۷۱	۷۵/۵۹	۱/۱۳	۰/۰۳	۱/۱۰	۲/۲۶	بریکنریج
۱۱/۶۴	۱/۱۵	۴/۴۷	۵۵/۲۵	۰/۸۱	۰/۰۸	۳/۲۲	۴/۱۱	هاوسویل
-	-	-	لماگینیت	تلاگینیت	لیپتینیت	اینرتینیت	ویتترینیت	
-	-	-	۸۵/۹	۴/۹	۹۰/۸	۰/۶	۸/۶	بریکنریج
-	-	-	-	-	۱۰/۴	۱۱/۱	۷۸/۶	هاوسویل

Source: Ward & Suarez-Ruiz (2008)

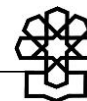
۱. زغال سنگ کک شو

برای تولید هر تن چدن در کوره بلند حدود ۵۴۰ کیلوگرم کک مصرف می‌شود. در حال حاضر، تنها مصرف‌کننده کک در کشور، شرکت ذوب آهن اصفهان است که مطابق برنامه تولید سه میلیون تن چدن در سال ۱۳۹۸، نیاز به ۱/۶۲ میلیون تن کک خواهد داشت. در سال‌های پیش رو، با افزایش احتمالی میزان تولید شرکت ذوب آهن اصفهان به حدود چهار میلیون تن و نیز بهره‌برداری از واحدهای جدید کوره بلند بخش خصوصی، مصرف کک در کشور به حدود سه میلیون افزایش خواهد یافت.

1. Hawesville

2. Total Sulfure

3. Elsevier, Applied Coal Petology (2008), Chapter Two: Colin R. Ward & Isabel Suarez-Ruiz, "Basic Factors Controlling Coal Quality and Technological Behaviour".



کیفیت کک، نقش تعیین کننده‌ای در کیفیت و کمیت تولید فولاد در کوره بلند دارد. کیفیت کک از دو منظر خواص فیزیکی و شیمیایی قابل ارزیابی است. جدول ۳، ترکیب شیمیایی بهینه کک مورد استفاده را در کوره بلند نشان می‌دهد. حضور عناصر گوگرد و فسفر در فولاد نامطلوب است و موجب کاهش کیفیت فولاد می‌شود. بخش قابل توجهی از گوگرد موجود در چدن از کک مصرفی نشئت می‌گیرد. در صورت بالا بودن غلظت گوگرد در کک، مصرف کک در کوره بلند افزایش می‌یابد و حذف گوگرد موجب کاهش هزینه‌های تولید می‌شود. خاکستر کک غالباً وارد فاز سرباره در کوره بلند می‌شود؛ با افزایش میزان خاکستر در کک، حجم سرباره و در نتیجه مصرف انرژی افزایش می‌یابد. به علاوه، رطوبت زیاد کک می‌تواند تعادل کوره بلند را به هم بریزد؛ کلر نیز موجب خوردگی در کوره بلند می‌شود.

جدول ۳. ترکیب شیمیایی ایدئال برای کک مصرفی در کوره بلند^۱

درصد وزنی	نوع ماده
<۹	خاکستر
<۰/۷۵	مواد فرآر
<۰/۷۰	گوگرد
<۰/۲۰	مواد قلیایی ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)
<۰/۰۵	کلر
<۰/۰۳	فسفر
<۰/۰۰۳	روی

Source: Eun (2012)

نقطه ذوب بالا و ساختار متخلخل کک موجب حفظ نفوذپذیری مخلوط (سنگ آهن، کک و فلاکس) در دمای بالای کوره بلند می‌شود و شرایط را برای حرکت جریان گاز اکسیژن (پایین به بالا) فراهم می‌کند. ترک‌ها و حفرات متعددی طی فرایند کک‌سازی در دانه‌های کک ایجاد می‌شود؛ شدت (تعداد و اندازه) این عیوب طی واکنش با گاز اکسیژن در کوره بلند تشدید شده و موجب کاهش استحکام دانه‌های کک می‌شود. هرچه شدت واکنش مابین کک و اکسیژن (واکنش‌پذیری کک) بیشتر باشد، نرخ کاهش استحکام شدیدتر است. دو کمیت CSR^2 و CRI^3 که بر اساس استانداردهای بین‌المللی^۴ اندازه‌گیری می‌شوند، تعیین کننده کیفیت کک از منظر خواص مکانیکی هستند. به طور کلی، واکنش‌پذیری کک نباید زیاد باشد تا بتواند در قسمت‌های پایینی کوره بلند استحکام خود را حفظ کند؛ لذا، کک مناسب

1. Kyung Eun, The university of South Wales (2012), Master thesis: "The Effect of Coal Properties On Carburization Behaviour And Strength of Coal Blends"

2. Coke Strength after Reaction (CSR)

3. Coke Reaction Index (CRI)

4. ASTM D5341

برای استفاده در کوره بلند دارای CRI پایین و CSR بالاست. شایان ذکر است که دو کمیت CRI و CSR وابسته به یکدیگر هستند. شکل ۲ نشان می‌دهد که با افزایش واکنش پذیری کک، استحکام به طور خطی کاهش می‌یابد. استحکام کک در دمای اتاق نیز بر اساس استاندارد^۱ قابل اندازه‌گیری است؛ به طور کلی، هرچه I₄₀ بزرگ‌تر و I₁₀ کوچک‌تر باشد، استحکام بیشتر است. با این حال، استحکام سرد کک معیار قابل اتکایی برای پیش‌بینی عملکرد کوره بلند نیست. دانه‌بندی مطلوب برای کک قطر ۴ تا ۸ سانتیمتر است.

جدول ۴. خواص فیزیکی و مکانیکی ایدئال برای کک مصرفی در کوره بلند

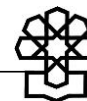
محدوده	مشخصه
< ۶۵٪	CSR (% < 10 mm)
بیشترین ۲۳٪	CRI
< ۵۵٪	I ₄₀ > 40 mm
> ۱۵٪	I ₁₀ < 10 mm
	اندازه دانه
بیشترین ۱۰٪	> 80 mm
بیشترین ۱۸٪	< 40 mm
بیشترین ۳٪	< 20 mm

Source: Ibid.

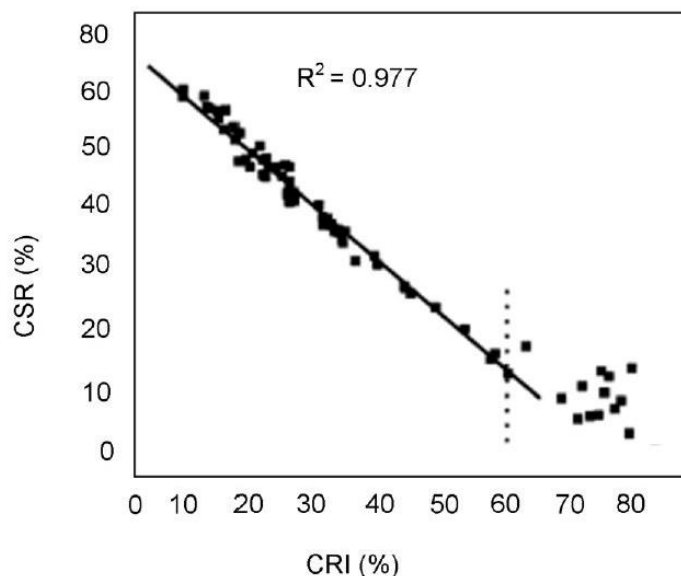
زغال سنگ با افزایش دما دچار زنجیره تحولات فیزیکی - شیمیایی می‌شود: ۱. در دمای کمتر از ۲۳۰°C تغییرات بسیار جزئی است. ۲. زغال سنگ در بازه ۳۵۰°C تا ۴۰۰°C شروع به نرم شدن می‌کند؛ مکانیسم دقیق این پدیده مشخص نیست، اما در باور غالب، شکست زنجیره‌های آلیفاتیک اتصال‌دهنده زنجیره‌های آروماتیک موجب ایجاد واحد کوچک (تشکیل شده از چند حلقه آروماتیک) و در نتیجه سیالیت زغال سنگ می‌شود. ۳. واحدهای کوچک آروماتیک در بازه دمایی ۵۰۰°C تا ۶۰۰°C مجدداً شروع به پلیمریزاسیون می‌کنند که همراه با کاهش مجدد سیالیت است؛ لذا، سیالیت زغال سنگ طی گرم شدن به یک مقدار بیشینه^۲ می‌رسد. ۴. در بازه دمایی ۷۵۰°C تا ۱۰۰۰°C پیوندهای کووالانسی درون زنجیره‌های آروماتیک شروع به شکست می‌کنند و موجب متصاد شدن گازهای مونواکسیدکربن، هیدروژن و هیدروکربن‌های کوچک نظیر متان و اتیلن می‌شود. این گاز یک منبع تأمین انرژی در شرکت ذوب آهن اصفهان است. اتم‌های کربن نیز شروع به پلیمریزاسیون می‌کنند و کک تشکیل می‌شود.

1. ISO 556

2. Maximum Fluidity (MF)



شکل ۲. رابطه بین واکنش پذیری کک و استحکام باقی مانده (CSR)



Source: Kumar (2008)

تولید کک در کوره‌های مدولار (تکرارشونده) و تحت اتمسفر کنترل شده انجام می‌شود. کیفیت کک وابسته به کیفیت زغال سنگ اولیه و نیز فرایند تولید است. نظر به سابقه طولانی اختلاف نظر مابین تولیدکنندگان زغال سنگ و شرکت ذوب آهن اصفهان (به‌عنوان تنها خریدار زغال سنگ کک‌شو در کشور) در موضوع «کیفیت زغال سنگ‌های داخلی و ضرورت تأمین بخشی از زغال سنگ مورد نیاز از طریق واردات»، در ادامه به بررسی مشخصات زغال سنگ و تأثیر آن بر کیفیت کک پرداخته شده است.

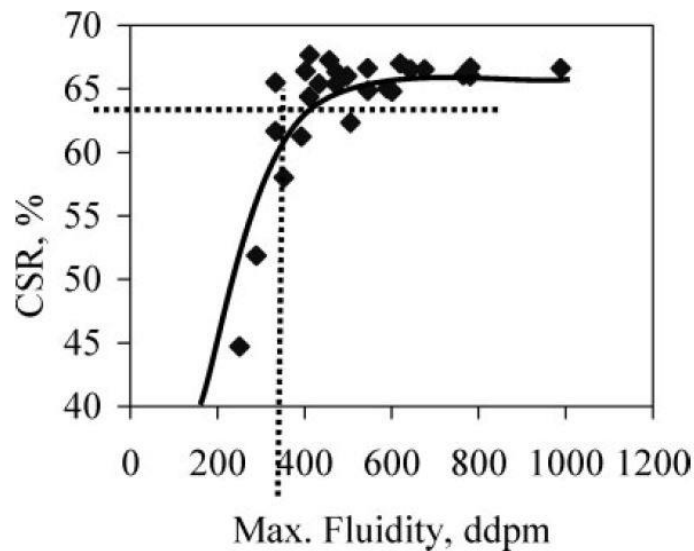
واکنش پذیری و استحکام باقی مانده زغال سنگ وابسته به ریزساختار کک است. کک دارای ساختاری متخلخل می‌باشد که متشکل از حفرات و ترک‌هایی با ابعاد نانو، میکرو و ماکرو است. دیواره این حفرات از نانوکریستال‌های کربنی (ساختار کریستالی مشابه گرافیت) با جهت‌گیری اتفاقی تشکیل شده است. در فضای بین نانوکریستال‌ها، اتم‌های کربن به صورت آمورف وجود دارند. به طور کلی، هرچه انیزوتروپی نانوکریستال‌ها کاهش یابد، واکنش‌پذیری کک زیاد می‌شود. اگر سیالیت زغال سنگ طی گرم شدن به میزان کافی افزایش نیابد، اندازه نانوکریستال‌های کربنی افزایش خواهد یافت و موجب کاهش انیزوتروپی می‌شود. لذا، ضرورت برخورداری زغال سنگ از سیالیت کافی، برای کنترل ساختار و بافت کریستالی کک تولیدی است. در نتیجه، تأثیر مشخصات زغال سنگ نظیر درجه بلوغ، میزان و نوع ماسرال‌های سازنده و میزان و نوع ذرات معدنی، از منظر کنترل سیالیت بررسی می‌شود. حداکثر سیالیت زغال سنگ بر اساس استاندارد^۱ و با واحد ddpm^2 اندازه‌گیری می‌شود. کک تولیدی از زغال سنگ‌های با بیشینه سیالیت

1. ASTM D2639

2. Dial Division Per Minute

۲۰۰ تا ۱۰۰۰ ddpm دارای بالاترین کیفیت است. خواص پلاستیک زغال سنگ در ایران غالباً با دو کمیت Y^1 و X^2 و بر اساس استاندارد چینی^۳ تعیین می‌شود.

شکل ۳. رابطه بین سیالیت بیشینه و استحکام باقی مانده^۴



Source: Ibid.

درجه بلوغ، مهم‌ترین عامل تعیین‌کننده خواص پلاستیک زغال سنگ است. ماسرال ویتروئیت طی افزایش دما به سهولت شکسته و موجب سیالیت زغال سنگ می‌شود. به طور کلی، زغال سنگ با درصد بازتاب ویتروئیت (R_{ov}) در بازه ۰/۹ تا ۱/۴ کیفیت کک مناسبی ایجاد می‌کند. ماسرال اینترتینیت^۵ نیز بر سیالیت و در نتیجه استحکام کک تأثیرگذار است؛ در درجه بلوغ معین، زغال سنگ با ۲۰ تا ۳۰ درصد اینترتینیت بهترین خواص پلاستیک منتج می‌شود. شکل ۴، تأثیر نوع و میزان ماسرال‌های مختلف زغال سنگ را بر کیفیت کک نشان می‌دهد. افزایش میزان ذرات معدنی در زغال سنگ (در بازه زیر ۱۶ درصد) موجب کاهش سیالیت می‌شود. ذرات معدنی بازی موجب افزایش واکنش‌پذیری و در نتیجه کاهش استحکام کک در کوره بلند می‌شود. مواد معدنی بازی زغال سنگ نظیر Na_2O ، K_2O و CaO ، و مواد معدنی اسیدی نظیر TiO_2 ، SiO_2 و Al_2O_3 هستند. به طور کلی، با افزایش خاصیت بازی

-
1. Plastic Layer Thickness [mm]
 2. Contraction (%)
 3. GB T479
 4. P.P. Kumar et al., Ironmaking and steelmaking (2008), Vol. 35, No. 6
 5. Intertinite

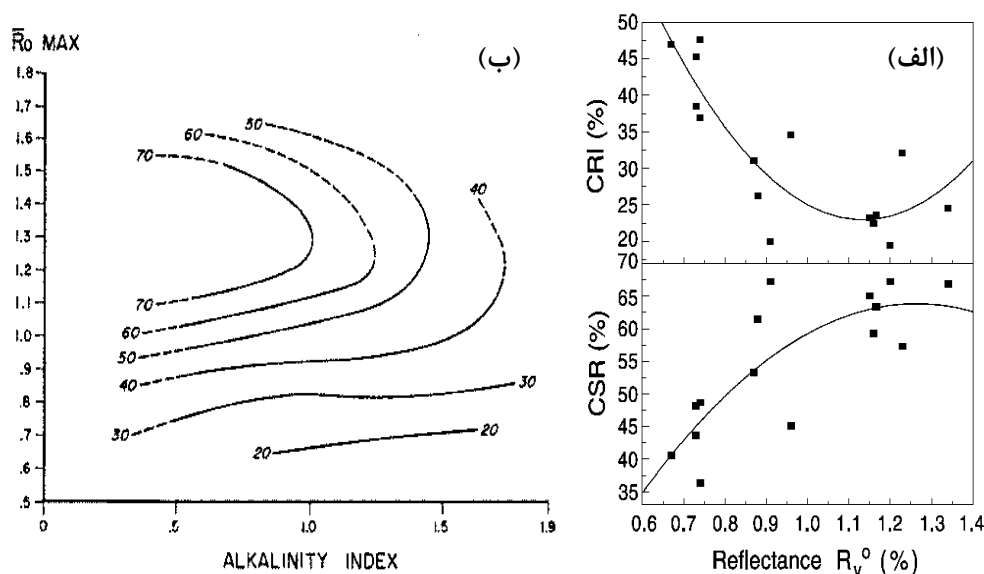


مواد معدنی، خواص مکانیکی زغال سنگ افت می‌کند. خاصیت بازی زغال سنگ با شاخص ویژه‌ای^۱ به شرح ذیل کمی می‌شود:

$$A. I = \text{Ash content} \times \frac{\text{Wt\% of basic components of ash}}{\text{Wt\% of acidic components of ash}}$$

شکل ۴. (الف) وابستگی کیفیت کک به درجه زغال سنگ؛^۲ (ب) تأثیر

ترکیب شیمیایی خاکستر زغال سنگ بر کیفیت کک^۳



Source: Zhang (2008) & Pearson

بر اساس نمودارهای فوق، زغال سنگ با درجه بازتابندگی حدود ۱/۲ (مواد فرآر ۲۴ تا ۲۶ درصد) بالاترین خاصیت کک‌شوندگی را دارد و حضور مینرال‌های بازی نظیر Na_2O و K_2O در ترکیب شیمیایی زغال سنگ موجب کاهش کیفیت کک می‌شود.

۲. مخلوط کردن زغال سنگ^۴

واحدهای کک‌سازی برای تولید کک با کیفیت مناسب غالباً از مخلوط چند نوع زغال سنگ استفاده می‌کنند. لذا، علاوه بر مقادیر میانگین، بررسی توزیع مشخصات زغال سنگ‌های مورد استفاده در مخلوط نیز ضروری است. شکل ۵، توزیع درجه بلوغ پنج نمونه زغال سنگ را با درجه بازتابندگی میانگین نشان

1. Alkalinity Index (A.I.)

2. Q. Zhang et al., Fuel Processing Technology 86 (2008) 1-11

3. D.E. Pearson, Pearson Coal Technology, "Influence of Geology on CRS"

4. Coal Blending

می‌دهد. مشاهده می‌شود که علی‌رغم یکسان بودن مقادیر میانگین، پراکندگی بیشتر درجه بلوغ نمونه سوم موجب کاهش ضریب تورم^۱ و در نتیجه افت قابلیت کک‌شوندگی نسبت به نمونه اول شده است. این مهم در تهیه یا خریداری زغال‌سنگ بسیار حائز اهمیت است: در بسیاری از موارد درصد مواد فرّار معیاری برای بلوغ و قیمتگذاری زغال‌سنگ است؛ مشاهده می‌شود که اگرچه زغال‌سنگ اول و چهارم دارای درصد مواد فرّار تقریباً یکسانی هستند، پراکندگی بلوغ زغال‌سنگ چهارم که مخلوطی از سه نوع زغال‌سنگ مختلف است، موجب کاهش ضریب تورم به زیر پنج شده است.^۲

روش‌های سنتی آنالیز زغال‌سنگ برای ارزیابی کیفیت مخلوط زغال‌سنگ‌ها چندان قابل اطمینان نیست؛ ارزیابی دقیق کیفیت زغال‌سنگ به سه طریق قابل انجام است:

- بررسی نوع، میزان و توزیع ماسرال‌های موجود در مخلوط (refractogram)

- اندازه‌گیری سیالیت و/یا ضریب تورم مخلوط

- اندازه‌گیری CSR کک تولیدی

استحکام باقی‌مانده یا CSR کک، مطمئن‌ترین شاخص برای ارزیابی کیفیت زغال‌سنگ است، چراکه این کمیت مهم‌ترین شاخص عملکرد کک در کوره بلند است. گریدهای باکیفیت از زغال‌سنگ‌های کک‌شو^۳ CSR بالای ۶۵ درصد دارند. به طور کلی، مشکل اصلی ذخایر زغال‌سنگ کشور سیالیت به نسبت پایین است که موجب کاهش CSR کک و در نتیجه افت عملکرد کوره بلند می‌شود.

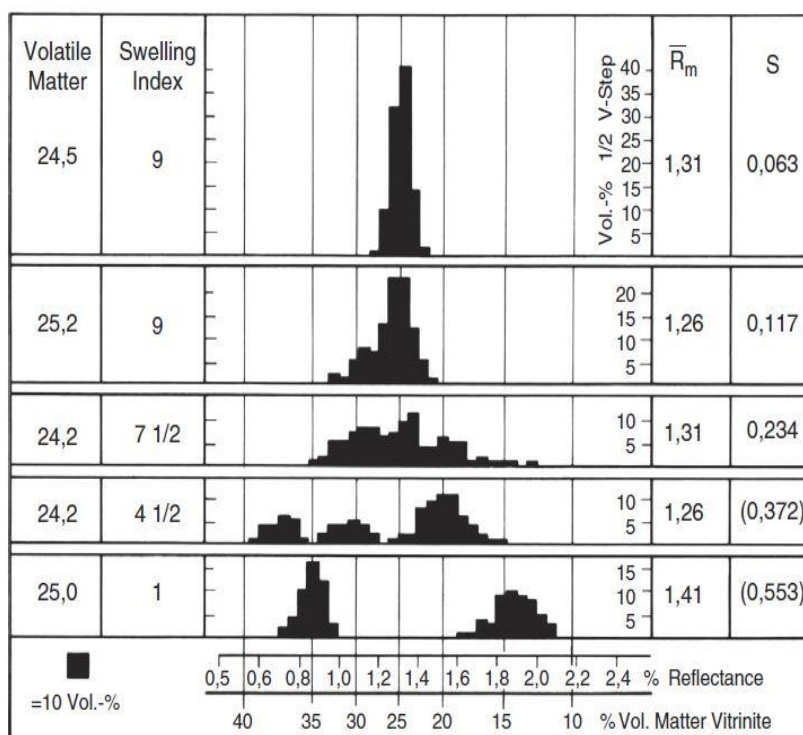
1. Free Swelling Index (FSI)

۲. یکی از معیارهای قبول کیفیت زغال‌سنگ در شرکت ذوب آهن اصفهان، ضریب تورم بالای پنج است.

3. Hard Coking Coal



شکل ۵. تأثیر اختلاط بر قابلیت کک‌شوندگی زغال‌سنگ؛^۱ آنالیز ساده (اندازه‌گیری کربن ثابت، مواد فرار و ...) مخلوط زغال‌سنگ قادر به پیش‌بینی کیفیت زغال‌سنگ نیست.



Source: Ward & Suarez-Ruiz (2008)

جداول ۵ و ۶ مشخصات ذخایر زغال‌سنگ‌های ایران و برخی زغال‌سنگ‌های خارجی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود زغال‌سنگ‌های کک‌شو استرالیا دارای مواد فرار/ بلوغ متوسط، خاکستر کم با ترکیب شیمیایی مناسب و سیالیت مطلوبند که تضمین‌کننده CSR بالای این ذخایر است. این در حالی است که زغال‌سنگ‌های داخلی غالباً دارای خاکستر زیاد با ترکیب شیمیایی نامطلوب هستند. به علاوه، غیر از ذخایر کک‌شو حوزه طبس، سایر ذخایر کشور دارای بلوغ پایین هستند که موجب افت سیالیت می‌شود.

1. Elsevier, Applied Coal Petrology (2008), Chapter Two: Colin R. Ward & Isabel Suarez-Ruiz, "Basic Factors Controlling Coal Quality and Technological Behaviour".

جدول ۵. آنالیز برخی زغال‌سنگ‌های باکیفیت خارجی^۱

Specification	اندونزی	روسیه	استرالیا							
			Tahmoor	BHP	Windsor	GLENCORE	Peak Downs North	Goonyella	Illawarra	Moranbah North
TM :	8.41	9.50	8.16	7.60	9.60	7.87	9.32	9.43	11.40	9.90
ASH :	7.59	6.60	9.15	8.80	8.00	9.36	9.56	9.48	9.55	10.10
VM :	30.47	35.35	28.06	25.60	22.93	25.13	22.59	23.28	22.90	25.01
TS :	0.83	0.61	0.39	0.61	0.53	0.68	0.53	0.55	0.42	0.51
PH :	0.02	0.03	0.07	0.08	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04	
Max Fluidity	203		6657	415		1290	623	810	1346	1169
Y :	18.80	17.55	19.50	14.20	15.00	15.33	17.28	17.78	17.00	18.00
X :	15.29	27.20	20.75		0.00	21.98	17.61	18.35	16.50	25.00
FSI :	7.93	7.85	7.55	7.60	8.00	8.37	8.83	8.62	8.95	8.40
K2O+Na2O :	2.95	2.86	1.53	1.49	1.16	1.16	1.48	1.31	1.18	
CSR :	50.80		55.20		0.00		70.33	69.97	64.50	67.60

مأخذ: آنالیز ارائه شده از طرف شرکت ذوب آهن اصفهان.

جدول ۶. آنالیز زغال‌سنگ‌های داخلی^۱، زغال‌سنگ‌های ناحیه طبس دارای بلوغ و/ یا سیالیتی مشابه زغال‌سنگ‌های باکیفیت خارجی است، اما از خاکستر و گوگرد بالا رنج می‌برد.

Specification	طبس دولتی	طبس خصوصی	شاهرود	زرنند کرمان	کارمزد	شرایط فنی بر اساس قرارداد
TM :	11.10	10.70	11.80	10.60	10.50	≤10
ASH :	11.40	10.67	13.50	11.65	10.50	≤10.5
VM :	23.50	26.52	27.80	30.35	34.70	کارمزد 24-28 28-34
TS :	1.53	1.83	1.10	1.16	0.91	≤1
PH :						
Max Fluidity						
Y :	20.20	20.40	13.00	13.20	14.20	طبس ≥15 ≥16
X :	5.00	12.70	25.50	27.40	25.10	
FSI :	9.00	9.00	3.70	4.90	5.20	
K2O+Na2O :	4.63	4.43	3.48	4.33	3.23	
CSR :	52.50	51.00	41.60	31.60	50.20	

مأخذ: همان.

در حال حاضر، شرکت ذوب آهن اصفهان مصرف‌کننده عمده زغال‌سنگ‌های کک‌شو در کشور است. این شرکت با هدف دستیابی به سیالیت مناسب در خوراک واحد کک‌سازی از اواسط دهه ۷۰ میلادی اقدام به اختلاط زغال سنگ معادن داخلی با ۲۰-۳۰ درصد زغال‌سنگ باکیفیت خارجی کرده است و بدین ترتیب توانسته CSR کک تولیدی خود را به حدود ۶۵ درصد برساند. در حال حاضر، بزرگ‌ترین تأمین‌کننده داخلی زغال‌سنگ این شرکت معادن حوزه طبس است. در سال‌های گذشته به دلیل تأمین

۱. شرکت ذوب آهن اصفهان.



نشدن سنگ آهن مورد نیاز ذوب آهن، این شرکت تنها با بخشی از ظرفیت اسمی به تولید پرداخته است؛ با افزایش احتمالی سطح تولید این شرکت در سال‌های پیش رو و نیز با بهره‌برداری از واحد کوره بلند بخش خصوصی، تولید زغال‌سنگ خام از معادن کشور باید با افزایش حدود ۲۰۰ درصدی، به حدود ۷ میلیون تن برسد. تحقق افزایش ۴/۴ میلیون تنی استخراج زغال‌سنگ از معادن کشور در سال‌های باقی‌مانده تا پایان برنامه توسعه ۲۰ ساله چندان محتمل به نظر نمی‌رسد. حتی در صورت تحقق اهداف کمی طرح جامع زغال‌سنگ، سبد تولید زغال‌سنگ خام در کشور دستخوش تغییرات جدی خواهد شد؛ بر اساس طرح جامع، معادن حوزه طبس بار اصلی تولید زغال‌سنگ را بر عهده دارند. افزایش سهم زغال‌سنگ معادن پروده در خوراک واحدهای کک‌سازی موجب افزایش درصد گوگرد کک می‌شود که تأثیر نامطلوبی بر میزان مصرف کک و قیمت تمام شده محصول خواهد داشت.

جدول ۷. اهداف کمی تولید کنسانتره زغال‌سنگ در کشور^۱

ظرفیت تولید (هزار تن)			موقعیت معادن
میزان تغییر (درصد)	سال ۱۳۹۹	سال ۱۳۹۵	
۳۴۷	۳,۳۰۰	۹۵۰	ناحیه طبس
۲۲۲	۱,۰۰۰	۴۵۰	ناحیه البرز
۲۳۶	۱,۳۰۰	۵۵۰	ناحیه کرمان

مأخذ: طرح جامع زغال‌سنگ کشور (ایمیدرو).

شایان ذکر است که بیش از ۷۶ درصد ذخایر زغال‌سنگ کشور در حوزه طبس وجود دارد. همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، زغال‌سنگ معادن این حوزه دارای بلوغ مناسب و سیالیتی مشابه با سیالیت زغال‌سنگ‌های باکیفیت استرالیایی است. با این حال، CSR زغال‌سنگ معادن طبس بسیار کمتر از زغال‌سنگ‌های باکیفیت خارجی است؛ این مهم می‌تواند به دلیل حضور مقادیر بالای خاکستر در ذخایر طبس باشد که موجب افزایش واکنش‌پذیری کک تولیدی می‌شود. خاکستر تأثیر دوگانه بر واکنش‌پذیری کک دارد: ۱. خاکستر با کاهش سیالیت زغال‌سنگ موجب افزایش واکنش‌پذیری کک می‌شود. ۲. برخی مینرال‌های معدنی نظیر Fe_2O_3 ، Na_2O و K_2O دارای خاصیت کاتالستی برای واکنش کک با گاز اکسیژن در کوره بلند هستند و موجب افزایش واکنش‌پذیری کک می‌شوند. به عبارت دیگر، اگرچه میزان و ترکیب شیمیایی خاکستر زغال‌سنگ پارامتری مستقل از سیالیت است اما بر واکنش‌پذیری و CSR کک مؤثر است.

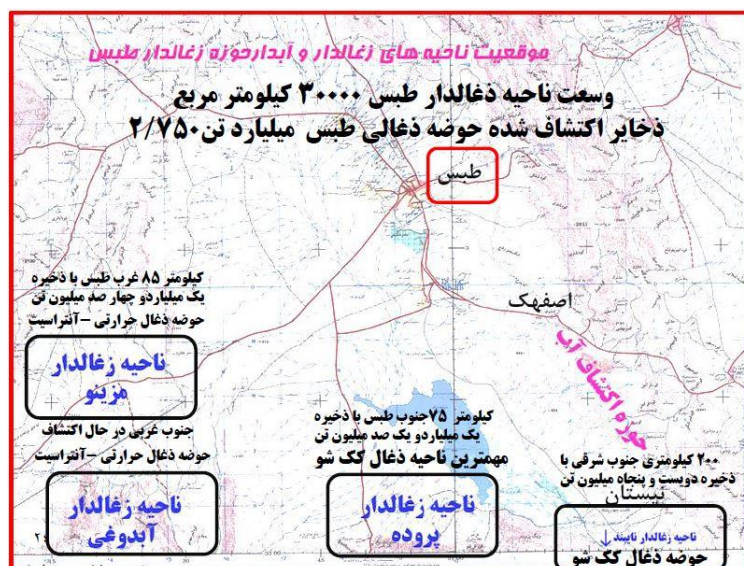
۱. ایمیدرو، طرح توسعه ذخایر زغال‌سنگ طبس.

در دهه‌های اخیر، مطالعات زیادی با هدف حذف گوگرد و خاکستر حاضر در زغال سنگ صورت گرفته است. روش‌های رایج فراوری زغال سنگ دارای برخی محدودیت‌ها هستند. کاهش زیاد خاکستر از کنسانتره زغال سنگ موجب افت سطح تولید می‌شود؛ لذا، کارخانه زغال شویی به نحوی طراحی می‌شود که سطح تولید (ضریب تبدیل زغال سنگ خام به کنسانتره) اقتصادی امکان‌پذیر باشد. از طرفی، فناوری‌های فراوری زغال سنگ غالباً مبتنی بر برخی خواص فیزیکی نظیر چگالی و کشش سطحی است. لذا، امکان حذف انتخابی مواد معدنی یا حذف گوگرد آلی وجود ندارد. در فناوری‌های جدید فراوری زغال سنگ تلاش می‌شود با بکارگیری روش‌های شیمیایی یا بیولوژیک نسبت به حذف خاکستر و به خصوص گوگرد اقدام شود. این موضوع مهم در بخش ۶ این گزارش مورد بررسی بیشتر قرار خواهد گرفت.

۳. وضعیت زنجیره ارزش زغال سنگ در کشور

ذخایر زمین‌شناسی زغال سنگ در کشور ۱۱ تا ۱۴ میلیارد تن و ذخایر قطعی آن حدود ۱/۱ میلیارد تن است که بیش از ۷۶ درصد آن در استان خراسان جنوبی (شهرستان طبس) متمرکز است. جدول ۸، توزیع ذخایر زغال سنگ را در استان‌های کشور نشان می‌دهد. ایران دارای ذخایر زغال سنگ از هر دو نوع حرارتی و کک‌شو است. شکل ۶، موقعیت ذخایر زغال سنگ را در حوزه طبس نشان می‌دهد.

شکل ۶. موقعیت ذخایر اصلی زغال سنگ در ناحیه طبس^۱



مأخذ: طرح جامع زغال سنگ کشور (ایمیدرو).

۱. ایمیدرو، طرح توسعه ذخایر زغال سنگ طبس.



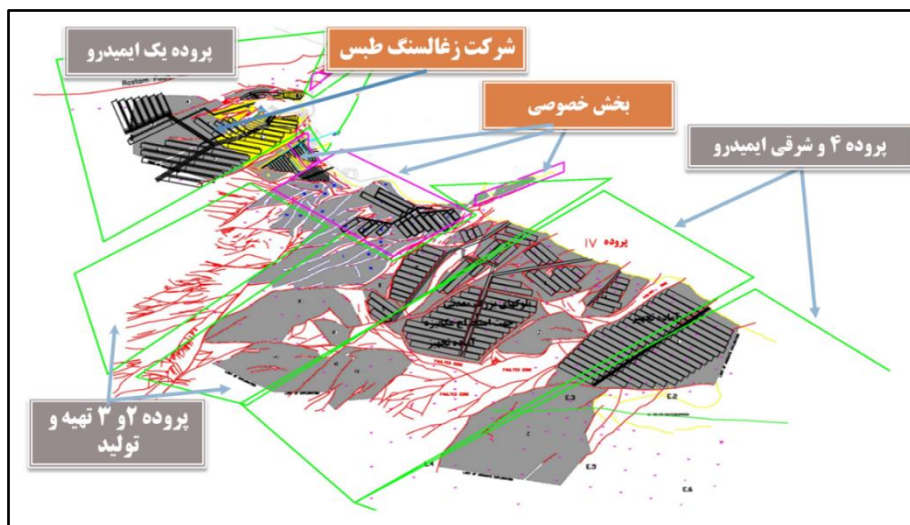
بر خلاف زغال سنگ کک شو که در صنعت فولاد برای تولید کک جهت شارژ در کوره بلند استفاده می‌شود، زغال سنگ حرارتی مصارف گسترده‌ای به عنوان سوخت در نیروگاه‌های برق، تولید سیمان و صنایع فرآلیازی دارد. به طور کلی، زغال سنگ‌های با درجه بلوغ بیتومینی و مواد فرآر متوسط دارای قابلیت کک‌شوندگی و مصرف در صنعت فولاد هستند؛ زغال سنگ‌های با درجه بلوغ پایین‌تر به عنوان سوخت مصرف می‌شوند. حوزه طبس دارای ذخایر عظیمی از زغال سنگ‌های حرارتی و کک‌شو است؛ ذخایر پروده و نایبند از نوع کک‌شو و ذخایر مزینو و آبدوگی از نوع حرارتی هستند.

جدول ۸. توزیع معادن زغال سنگ در استان‌های مختلف کشور

تعداد معادن غیرفعال	تعداد معادن فعال	ذخیره (تن)	پروانه بهره‌برداری		تعداد معدن	استان
			دولتی	خصوصی		
۸	۶	۱,۳۵۰,۰۰۰	۰	۱۴	۱۴	آذربایجان شرقی
۲	۰	۲۰۰,۰۰۰	۰	۲	۲	آذربایجان غربی
۲	۰	۴۲,۰۰۰	۰	۲	۲	تهران
۰	۲۶	۸۳۴,۶۴۱,۰۰۰	۶	۲۰	۲۶	خراسان جنوبی
۰	۴	۵۵۴,۸۰۰	۰	۴	۴	خراسان رضوی
۲	۰	۱۲,۰۰۰	۰	۲	۲	زنجان
۱۲	۳۵	۱۴,۴۶۸,۰۰۰	۴	۴۳	۴۷	سمنان
۴	۱۸	۸۰,۹۱۰,۰۰۰	۱	۲۱	۲۲	کرمان
۶	۱۰	۱۷,۷۰۰,۰۰۰	۰	۱۶	۱۶	گلستان
۱	۰	۴,۰۰۰,۰۰۰	۰	۱	۱	گیلان
۲۴	۲۶	۱۵۶,۶۱۳,۰۰۰	۱	۴۹	۵۰	مازندران
۰	۳	۲۱۰,۰۰۰	۰	۳	۳	یزد
۱	۰	۶۰,۰۰۰	۰	۱	۱	خراسان شمالی
۲	۰	۷,۰۰۰	۰	۲	۲	قزوین
۶۴	۱۲۸	۱,۱۱۰,۷۶۷,۸۰۰	۱۲	۱۸۰	۱۹۲	جمع کل

مأخذ: آمار ارائه شده از سوی دفتر بهره‌برداری معادن وزارت صنعت، معدن و تجارت.

شکل ۷. موقعیت ذخایر معادن زغال سنگ کک‌شو در ناحیه پروده طبس



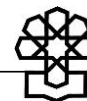
مأخذ: طرح جامع زغال سنگ کشور (ایمیدرو).

زنجیره ارزش زغال سنگ کک‌شو در کشور تکمیل شده است، اما موازنه آن فاصله زیادی با اهداف کمی طرح جامع زغال سنگ دارد؛ طرح‌های توسعه معادن زغال سنگ و کارخانجات زغال‌شویی کشور بر اساس هدفگذاری تولید ۵/۲۵ میلیون تن چدن در کوره بلند در چشم‌انداز ۱۴۰۴ تهیه شده‌اند؛ احیای سنگ آهن در کوره بلند با استفاده از کک زغال سنگ صورت می‌گیرد. زغال سنگ استخراج شده از معدن، پس از فراوری به واحدهای کک‌سازی انتقال می‌یابد. ضرایب تبدیل محصولات در زنجیره ارزش زغال سنگ به شرح جدول ۹ است.

جدول ۹. ضرایب تبدیل محصولات در زنجیره ارزش زغال سنگ کک‌شو

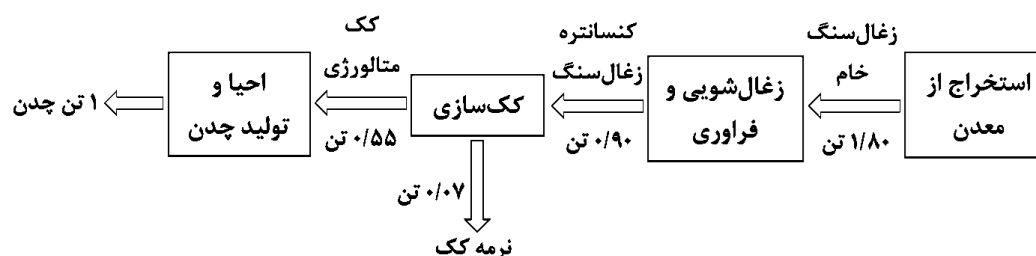
ردیف	شرح	مقدار	واحد
۱	میزان مصرف کک برای تولید هر تن چدن (کوره بلند)	۰/۵۵	تن
۲	میزان مصرف کنسانتره زغال سنگ برای تولید هر تن کک	۱/۴۵	تن
۳	میزان زغال سنگ خام مورد نیاز برای تولید هر تن کنسانتره	۲	تن
۴	سهم کنسانتره زغال سنگ وارداتی در خوراک واحدهای کک‌سازی	۲۵	درصد
۵	درصد نرمه تولید شده در فرایند کک‌سازی	۱۲	درصد
۶	متوسط میزان مصرف نرمه کک (پودر زغال) به ازای تولید هر تن فولاد در کوره قوس الکتریکی (فرایند احیای مستقیم)	۱۸	کیلوگرم

مأخذ: طرح جامع زغال سنگ کشور (ایمیدرو).



تولید ۵/۱ میلیون تن فولاد خام در ذوب آهن اصفهان و بخش خصوصی در چشم‌انداز ۱۴۰۴ همراه با تولید ۵/۲۵ میلیون تن چدن خواهد بود. بر اساس جدول ۹ و شکل ۸، حدود ۳/۲۵ میلیون تن کک و ۴/۷۳ میلیون تن کنسانتره زغال‌سنگ برای تولید این میزان چدن مورد نیاز است که حتی در صورت ادامه تأمین ۲۵ درصد نیاز کشور از محل واردات،^(۱) حدود ۳/۵ میلیون تن کنسانتره باید از محل واحدهای زغال‌شویی داخلی تأمین شود. بدین منظور، ظرفیت تولید معادن زغال‌سنگ کشور در سال ۱۴۰۴ باید به حدود ۷ میلیون تن برسد. ظرفیت‌های ایجاد شده در زنجیره ارزش زغال‌سنگ در کشور به شرح جدول ۱۰ است.

شکل ۸. شماتیک زنجیره ارزش زغال‌سنگ کک‌شو



مأخذ: طرح جامع زغال‌سنگ کشور (ایمیدرو).

جدول ۱۰. عملکرد زنجیره ارزش زغال‌سنگ کک‌شو (میلیون تن)

شرح/زنجیره ارزش	زغال سنگ خام	کنسانتره زغال سنگ	کک	چدن
تولید محقق شده ۱۳۹۶	۲/۶	۱/۳	N	۲/۲
ظرفیت کنونی (۱۳۹۸)	۳	۲/۷	۳/۵	۳/۷۵
ظرفیت قابل تحقق ۱۴۰۴ ^(۱)	۶/۸	۵/۵	۳/۹۵	۵/۹
نیاز زنجیره در ۱۴۰۴ ^(۲)	۷	۳/۵	۳/۲۵	۵/۲۵
موازنه زنجیره در ۱۴۰۴ ^(۳)	-۰/۲	+۲	+۰/۸	-

مأخذ: طرح جامع زغال‌سنگ کشور (ایمیدرو).

(۱) بر اساس طرح‌های مصوب وزارت صنعت، معدن و تجارت.

(۲) فرض شده است که ۲۵ درصد از کنسانتره زغال‌سنگ مورد نیاز کشور از سایر کشورها به دلایل فنی وارد خواهد شد.

(۳) طرح‌های کوره بلند فولاد زاگرس و میند با مجموع ظرفیت ۷۰۰ هزار تن دارای پیشرفت فیزیکی نبوده است؛ لذا، پیش‌بینی می‌شود که تولید چدن در چشم‌انداز ۱۴۰۴ تنها در کوره بلند ذوب آهن و میدکو محقق شود.

۱. ذخایر زغال‌سنگ حوزه طبس دارای بلوغ مناسب هستند، اما خاکستر و گوگرد بالایی دارند؛ این امر موجب CSR متوسط زغال‌سنگ این معادن شده است. لذا، استفاده از زغال‌سنگ‌های باکیفیت نسبتاً پایین حوزه کرمان و شاهرود در واحدهای کک‌سازی منوط به مصرف زغال‌سنگ‌های باکیفیت خارجی است.

۲. در حال حاضر، به طور میانگین ۲۵ تا ۳۰ درصد خوراک واحدهای کک‌سازی از محل واردات (زغال‌سنگ‌های باکیفیت) تأمین می‌شود.

با احتساب ۱۲ درصد نرمه، میزان کک مورد نیاز برای تولید ۵/۱ میلیون تُن چدن حدود ۳/۲۵ میلیون تُن است. در حال حاضر، مجموع ظرفیت واحدهای کک‌سازی کشور ۳/۵ میلیون تُن است که با تکمیل طرح‌های در دست اجرا تا سال ۱۴۰۰، ظرفیت تولید کک کشور به ۳/۹ میلیون تُن خواهد رسید. به عبارت دیگر، زنجیره ارزش زغال‌سنگ در این بخش تکمیل شده است. همچنین، ظرفیت کنونی واحدهای زغال‌شویی کشور تنها ۸۰۰ هزار تُن با نیاز کشور در چشم‌انداز ۱۴۰۴ فاصله دارد که به نظر می‌رسد با بهره‌برداری از واحدهای زغال‌شویی بخش خصوصی در طبس، زنجیره ارزش زغال‌سنگ در این بخش نیز تکمیل شود. به نظر می‌رسد که راه‌اندازی واحدهای زغال‌شویی جدید با هدف فراوری زغال‌سنگ حرارتی نظیر ذخایر ناحیه مزینو و آبدوغی ضروری باشد.^۱

مجموع ظرفیت اسمی معادن زغال‌سنگ کشور حدود ۶/۸ میلیون تُن زغال‌سنگ خام است که در حال حاضر با ۴۵ درصد ظرفیت اسمی فعال هستند. با توجه به تأمین بخشی از کنسانتره زغال‌سنگ مورد نیاز کشور از محل واردات، تولید ۵/۱ میلیون تُن چدن نیاز به ۷ میلیون تُن زغال‌سنگ خام دارد. شایان ذکر است که واحدهای زغال‌شویی غالباً به ضریب ۰/۵۵ اقدام به موازنه زغال‌سنگ خام و کنسانتره زغال‌سنگ می‌کنند. لذا، به نظر می‌رسد اهداف کمی تعیین شده در بخش معادن زغال‌سنگ متناسب با نیاز زنجیره ارزش فولاد باشد. با این حال، عملکرد کنونی معادن زغال‌سنگ فاصله زیادی تا اهداف کمی پیش‌بینی شده دارد، به نحوی که نیاز به افزایش ۱۳۰ درصدی ظرفیت تولید است.

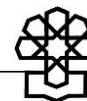
۴. ارزیابی کیفیت زغال‌سنگ ناحیه پروده

در سال ۲۰۰۳ میلادی، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور طی همکاری با اتحادیه بین‌المللی زمین‌شناسان دنیا در پروژه ارزیابی کیفیت زغال‌سنگ‌های دنیا، مطالعه جامعی را بر روی ذخایر زغال‌سنگ کشور آغاز کرد که نتایج آن در سال ۱۳۹۳ به صورت یک کتاب منتشر شد.^۲ مشخصات ذخایر زغال‌سنگ حوزه طبس پس از جمع‌آوری تعداد ۲۲ نمونه از معادن مختلف این حوزه بر اساس استاندارد ASTM تعیین شد. اهم نتایج به دست آمده از مطالعه مذکور به شرح ذیل است:

۱. نمونه‌برداری از معدن زغال‌سنگ پروده جنوبی در عرض و طول جغرافیایی به ترتیب "۵۸' ۴۷" و "۳۲° و ۵۲' ۵۲.۶"، از رگه‌های B_۲ (ضخامت ۹۰ سانتیمتر) و C_۱ (ضخامت تقریباً ۹۰ سانتیمتر) با یک لایه خاکستر واسط با ضخامت ۵ سانتیمتر) صورت گرفت. رگه زغالی C_۱ در این معدن دارای ضریب

۱. طراحی و تجهیز کارخانه‌های زغال‌شویی متناسب با مشخصات ذخایر زغال‌سنگ هدف انجام می‌شود. به عنوان مثال، زغال‌شویی شرکت زغال‌سنگ طبس که به منظور فراوری زغال‌سنگ رگه C_۱ ناحیه پروده طراحی شده است، ممکن است قادر به فراوری زغال‌سنگ معادن مزینو نباشد.

۲. مصطفی شهرابی و علی اسماعیلی، ارزیابی زغال‌سنگ‌های ایران با نگاهی به زغال‌سنگ‌های دنیا، انتشارات جوان امروز، ۱۳۹۳.



تورم ۹ است^۱ که حاکی از قابلیت کک‌شوندگی عالی آن است. رگه B₂ این معدن دارای ضریب تورم‌پذیری ۴/۵ است که بیانگر قابلیت کک‌شوندگی متوسط^۲ این رگه است. نکته حائز اهمیت آنکه درصد مواد فرّار آلی^۳ در رگه‌ها ۲۵ تا ۲۹ درصد است که حاکی از درجه بلوغ مشابه^۴ است. به نظر می‌رسد که تفاوت در قابلیت کک‌شوندگی دو رگه زغالی ریشه در میزان خاکستر دارد؛ میزان خاکستر زغال‌سنگ رگه B₂ بیش از ۳۱ درصد است در صورتی که خاکستر رگه C₁ در بازه ۹ تا ۱۶ درصد قرار دارد.^۵ در بخش‌های قبل تشریح شد که حضور خاکستر در زغال‌سنگ موجب کاهش سیالیت، خاصیت کاتالیستی و در نتیجه کاهش CSR و قابلیت کک‌شوندگی آن می‌شود.

۲. نمونه‌برداری از معدن پروده شرقی در مختصات "32° 58' 56.2" و "56° 55' 54.5" از امتداد رگه‌های زغالی C₁ و B₂ معدن جنوبی انجام شد. ضخامت رگه‌ها در محل نمونه‌برداری به ترتیب ۱۱۰ و ۱۱۷ سانتیمتر بود. ضریب تورم زغال‌سنگ در دو لایه به ترتیب ۷/۵ و ۲ اندازه‌گیری شد. مشابه معدن جنوبی، رگه‌های معدن شرقی نیز درجه بلوغ یکسانی دارند و تفاوت در قابلیت کک‌شوندگی احتمالاً به دلیل تفاوت در میزان خاکستر رگه‌های زغالی B₂ و C₁ است. شایان ذکر است که رگه‌های B₂ و C₁ در پروده شرقی دارای خاکستر بیشتر و در نتیجه قابلیت کک‌شوندگی پایین‌تر نسبت به رگه متناظر در معدن جنوبی هستند؛ به عنوان مثال، ضریب تورم زغال‌سنگ رگه C₁ در معدن جنوبی و شرقی به ترتیب دارای ۹ و ۷/۵ اندازه‌گیری شده است.

۳. نمونه‌برداری از رگه C₁ در معدن پروده مرکزی در مختصات "33° 01' 39.9" و "56° 48' 59.2" در عمق ۲۵ متری انجام شد. این رگه زغالی دارای ضخامت ۱۷۵ سانتیمتر (با یک لایه واسط ۸ سانتیمتری) و شیب ۱۵ درجه است. ضریب تورم زغال‌سنگ این رگه ۶/۵ اندازه‌گیری شد که حاکی از قابلیت کک‌شوندگی متوسط آن است. قابلیت پایین کک‌شوندگی این رگه در معدن مرکزی نسبت به رگه متناظر در معادن شرقی و جنوبی احتمالاً به دو دلیل است:

الف) بلوغ زغال‌سنگ در این رگه زیاد است؛ کم بودن درصد مواد فرّار در زغال‌سنگ موجب کاهش ضریب تورم و در نتیجه افت قابلیت کک‌شوندگی می‌شود.

ب) میزان خاکستر این معدن از معادن شرقی و جنوبی بیشتر است.

۴. نمونه‌برداری از رگه‌های B₁ و B₂ معدن پروده جنوبی در مختصات "33° 00' 48.1" و "50'

۱. ضریب تورم‌پذیری عددی بدون واحد است که در بازه ۰ تا ۹ متغیر است؛ زغال‌سنگ با ضریب ۹ دارای قابلیت کک‌شوندگی بسیار بالاست.

۲. حد پایین ضریب تورم‌پذیری زغال‌سنگ برای شرکت ذوب اصفهان پنج است؛ لذا، قابلیت کک‌شوندگی رگه C₁ در معدن پروده جنوبی متوسط رو به پایین است.

3. Dry Mineral Matter Free Coal is Analysed to Measure the Organic Volatile Matter Content Which is a Measure for Determining the Rank.

4. Medium Volatile Bituminous

۵. مقادیر مذکور مربوط به خاکستر زغال‌سنگ خام نمونه‌برداری شده است.

6. Low Volatile Bituminous

" $20.9^{\circ} 56$ صورت گرفت. رگه B_1 با ضخامت 100 سانتیمتر در عمق $2/5$ متری قرار دارد و رگه B_2 با ضخامت 97 سانتیمتر (با دو لایه واسط 5 و 10 سانتیمتری) در عمق 3 متری قرار دارد. رگه B_1 به دلیل درصد پایین مواد فرآر (بلوغ زیاد) و خاکستر زیاد قابلیت کک‌شوندگی ندارد، اما رگه B_2 با داشتن میزان بیشتر مواد فرآر (نسبت به رگه B_1) دارای قابلیت کک‌شوندگی متوسط (رو به پایین) است. بر خلاف رگه C_1 ، رگه B_1 در این معدن دارای مقادیر قابل توجهی از گوگرد آلی است.

شکل ۹. محل انجام نمونه‌برداری‌ها از معادن پروده



جدول ۱۱. مشخصات تقریبی معادن زغال‌سنگ پروده

B_2			C_1			رگه
شرقی	جنوبی	مرکزی	شرقی	جنوبی	مرکزی	معدن
۲۴/۶	۲۶	۲۳/۵	۲۸/۳	۲۷	۲۱	مواد فرآر (%)
۳۹	۳۲	۳۰	۲۵	۱۳	۳۰	خاکستر (%)
۲	۴/۵	۳	۷/۵	۹	۶	FSI
۲	۱/۶	۱/۷	۲/۶	۱/۹	۱/۵	گوگرد (%)

مأخذ: شهرابی و اسماعیلی (۱۳۹۳).

۵. میزان گوگرد حاضر در نمونه‌های زغال‌سنگ معدن پروده در بازه $1/2$ تا $2/6$ درصد قرار دارد. شایان ذکر است که اندازه‌گیری میزان دقیق گوگرد و خاکستر نیاز به نمونه‌برداری‌های متعدد دارد؛ به عنوان مثال، در مطالعه دیگری، میانگین میزان گوگرد موجود در رگه‌های C_1 و B_2 در بلوک شمالی پروده شرقی به ترتیب $2/2$ و $2/7$ درصد و میزان خاکستر به ترتیب 16 و 20 درصد اندازه‌گیری شده



است.^۱ لذا، کارکرد جدول ۱۱ و مطالعه صورت گرفته در سازمان زمین‌شناسی محدود به ارائه تصویر کلی (البته با دقت پایین) از ذخایر زغال‌سنگ ناحیه پروده است.

۶. گوگرد در زغال‌سنگ به صورت پیریت، سولفات و آلی یافت می‌شود؛ پیریت و گوگرد آلی بخش اعظم گوگرد موجود در زغال‌سنگ را شامل می‌شوند. غیر از رگه B₂ در معدن پروده مرکزی، غالباً ۵۰ تا ۷۰ درصد گوگرد به صورت پیریت است. برخلاف سولفات‌ها که غالباً طی شستشو در آب حل می‌شوند، حذف پیریت و گوگرد آلی دارای دشواری بیشتری است.

۵. فراوری زغال‌سنگ^۲

به فرایند فراوری زغال‌سنگ که همراه با حذف مواد معدنی از زغال‌سنگ است، «زغال‌شویی» اطلاق می‌شود. فرایندهای زغال‌شویی به طور سنتی مبتنی بر تفاوت برخی خواص فیزیکی نظیر چگالی و کشش سطحی است. چگالی زغال‌سنگ‌های کک‌شو و حرارتی در بازه $1/3 \text{ g/cm}^3$ تا $1/35 \text{ g/cm}^3$ قرار دارد در صورتی که مواد معدنی SiO_2 و Al_2O_3 که بخش اعظم خاکستر زغال‌سنگ را تشکیل می‌دهند، به ترتیب دارای چگالی $2/56 \text{ g/cm}^3$ و $3/99 \text{ g/cm}^3$ هستند. انتخاب تکنولوژی و طراحی خط زغال‌شویی وابسته به مشخصات به‌خصوص قابلیت شستشوپذیری زغال‌سنگ است؛ لذا، هر کارخانه زغال‌شویی برای فراوری زغال‌سنگ معدن مشخصی ساخته می‌شود. به طور کلی، یک کارخانه فراوری زغال‌سنگ از واحدهای زیر تشکیل شده است:

- واحد انتقال زغال‌سنگ از معدن به کارخانه (Run-Off-Mine)
- واحد ذخیره‌سازی زغال (Stock Yard)
- واحد سنگ‌شکن (Rotary Breaker)
- نوسان‌گیر (Surge Bin)
- نمونه‌گیر نواری
- واحد طبقه‌بندی (Screen House)
- جدایش واسطه سنگین (Heavy Media Separation)
- جدایش فلوتاسیون ستونی (Column Flotation)
- واحدهای آبگیری و فیلتراسیون (Screens, Thickener, Filter Press)
- واحد ذخیره‌سازی زغال تمیز و انتقال (Clean Coal)

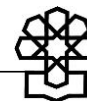
1. D.K. Ahangaran et al. "An Evaluation of The Quality of Metallurgical Coking Coal Seams Within the North Block of Eastern Parvadeh Coal Deposit, Tabas, Iran", Journal of Mining and Metallurgy, 47 A (1) (2011) 1 – 16.

۲. مطالب این بخش عمدتاً حاصل بررسی‌های میدانی پژوهشگر است.

در مراحل آماده‌سازی، زغال‌سنگ استخراج شده از معدن ابتدا خرد و الک می‌شود تا به اندازه دانه‌های بین ۰/۵ تا ۵۰ میلیمتر برسد؛ دانه‌های زیر ۰/۵ میلیمتر (خاکه) با نوار نقاله به واحد جدایش فلوتاسیون ستونی منتقل می‌شود تا با دانه‌های زغال‌سنگ دمش هوا و ایجاد حباب از خاکستر جدا شوند. دانه‌های درشت نیز وارد واحد جدایش واسطه سنگین می‌شود تا دانه‌های زغال‌سنگ و مواد معدنی به دلیل اختلاف چگالی از یکدیگر جدا شود. مواد معدنی به دلیل چگالی بالاتر از محیط واسطه، در این واحد ته‌نشین و از دانه‌های زغال‌سنگ جدا می‌شود. گفتنی است که ذرات ته‌نشین شده صرفاً مواد معدنی نیستند و معمولاً دارای مقادیری زغال‌سنگ نیز هستند؛ لذا، مواد ته‌نشین شده پس از آب‌گیری الک می‌شود تا دانه‌های بزرگ‌تر از ۱۰ میلیمتر مجدداً جهت خردایش وارد سنگ‌شکن شود. واسطه سنگین غالباً یک سوسپانسیون مایع/ جامد است که چگالی آن با تنظیم میزان فاز جامد کنترل می‌شود. غالباً از ذرات مگنتیت با اندازه دانه در بازه ۱۰ تا ۵۰ میکرون و دانسیته حدود 5 g/cm^3 در کارخانه‌های زغال‌شویی کشور استفاده می‌شود. به طور کلی، هرچه اندازه دانه‌های مگنتیت کوچک‌تر باشد، بازدهی فرایند بیشتر است، اما اتلاف مگنتیت (به دلیل دشوار بودن بازیابی ذرات مگنتیت در فرایند) افزایش می‌یابد. بر اساس استانداردهای جهانی ۰/۵ تا ۰/۱۵ کیلوگرم مگنتیت به ازای تن زغال‌سنگ اتلاف می‌شود که مقدار آن متناسب با دانه‌بندی زغال‌سنگ است؛ هرچه زغال‌سنگ در مرحله آماده‌سازی بیشتر خرد شود، اتلاف مگنتیت در فرایند بیشتر است به نحوی که برای فراوری زغال‌سنگ معادن کانادا اتلاف تا ۰/۶ کیلوگرم در هر تن زغال‌سنگ افزایش می‌یابد.^۱

فلوچارت فرایند فراوری زغال‌سنگ برای اکثر کارخانه‌های زغال‌شویی در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود. فناوری‌های نوین در حوزه فراوری زغال‌سنگ به شرح ذیل است:

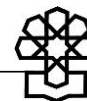
۱. روتاری بریکر که علاوه بر خردایش، بخشی از مواد اضافی را نیز حذف می‌کند. این فناوری موجب افزایش ظرفیت کارخانه، کاهش هزینه‌های تولید و بهبود کیفیت محصول می‌شود.
۲. استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته جهت اتوماسیون فرایندهای زغال‌شویی که علاوه بر بهبود کیفیت محصول، موجب افزایش بهره‌وری می‌شود.
۳. بخش اصلی زغال‌سنگ در واحد جدایش واسطه سنگین از باطله جدا می‌شود؛ تجهیزاتی قابل استفاده در این بخش به ترتیب کارایی عبارتند از: تری فلو، سیکلون واسطه سنگین، دیناورپول و جیگ ماشین.



جدول ۱۲. فهرست واحدهای زغال‌شویی بزرگ حوزه طبس و کرمان

ردیف	نام	توضیحات
۱	زغال‌شویی شرکت زغال‌سنگ پروده طبس	این واحد در ناحیه پروده در مجاورت معادن زغال‌سنگ مستقر با هدف فراوری زغال‌سنگ رگه C ₁ پروده طراحی شده است.
۲	زغال‌شویی شرکت فراوری زغال‌سنگ پروده طبس	این واحد نخستین زغال‌شویی تمام اتوماتیک کشور است که در حال حاضر، با ۶۰ درصد ظرفیت اسمی فعال است.
۳	زغال‌شویی پابدانا	این واحد متعلق به هلدینگ میدکو و مستقر در زرنند کرمان است. این واحد مشابه زغال‌شویی طبس است که توسط پیمانکاران داخلی ساخته شد.
۴	زغال‌شویی ممرادکو	این واحد در پروده شرقی در حال ساخت است.
۵	زغال‌شویی زرنند کرمان	این کارخانه در سال ۱۳۸۶ به تجهیزات سیکلون واسطه سنگین به کارخانه مجهز شد.
۶	کارخانه زغال‌شویی شرکت زغال‌سنگ البرز مرکزی	این کارخانه در شهرستان سوادکوه استان مازندران مستقر است و با ظرفیت بسیار کمتر از ظرفیت اسمی فعال است.

صرف‌نظر از جزئیات تجهیزات، فرایندهای زغال‌شویی رایج در کشور دارای محدودیت‌های جدی هستند. به‌طور کلی، حذف خاکستر با روش‌های جداسازی فیزیکی همراه با اتلاف زغال‌سنگ است، چراکه ذرات باطله همواره دارای مقادیری زغال‌سنگ است. نظر به درصد بالای خاکستر در ذخایر زغال‌سنگ پروده، حذف هرچه بیشتر آن همراه با کاهش سطح تولید خواهد بود. از طرفی، روش‌های فیزیکی (جدایش با واسطه سنگین و فلوتاسیون) قادر به حذف مواد معدنی بازی (K_2O و Na_2O) به طور انتخابی نیست. گوگرد در دو نوع آلی و غیرآلی در زغال‌سنگ وجود دارد: ۱. برخی مینرال‌های معدنی نظیر پیریت (FeS_2) و سولفات‌ها دارای گوگرد هستند. ۲. گوگرد به صورت اتمی و با پیوندهای کووالانسی با اتم‌های کربن در حلقه‌های آروماتیک ساختار زغال‌سنگ حضور پیدا می‌کند. روش‌های شستشوی فیزیکی قادر به حذف گوگرد آلی و نیز برخی مورفولوژی‌های پیریت (ذرات ریز و پراکنده) نیست. بدین منظور، فرایندهای جدید فراوری زغال‌سنگ که مبتنی بر روش‌های شیمیایی و بیولوژیک است، در دهه‌های اخیر توسعه پیدا کرده است که در ادامه این گزارش مورد بررسی قرار خواهد گرفت.



شکل ۱۱. بخش‌های مختلف زغال‌شویی یکی از واحدهای زغال‌شویی منطقه طبس



سنگ‌شکن دوار



سرندها



واسطه سنگین



فلوتاسیون



تیکنر



فیلتر پرس



بونکر ۶۰۰۰ تنی



بونکر ۲۰۰۰ تنی

مأخذ: بازدید میدانی پژوهشگر از یک کارخانه زغال‌شویی در طبس.

۶. روش‌های نوین زغال‌شویی

ذخایر زغال‌سنگ پروده بلوغ مناسبی برای تولید کک دارد، اما وجود خاکستر به نسبت زیاد موجب افت CSR می‌شود. شایان ذکر است که CSR کک تولیدی مهم‌ترین معیار تعیین‌کننده کیفیت زغال‌سنگ است و بازدهی کلی کوره بلند را کنترل می‌کند. مشکل دیگر ذخایر زغال‌سنگ کک‌شوی طبس، میزان زیاد گوگرد است، البته درصد آن در بخش‌های مختلف ناحیه پروده متغیر است. میزان گوگرد عموماً در بازه ۱/۳ تا ۵/۲ درصد (میانگین ۳/۳ درصد) گزارش شده است. همچنین، رگه زغالی C₁، گوگرد و خاکستر کمتری نسبت به رگه B₂ دارد.^۱ لذا، قابلیت حذف خاکستر و گوگرد باید به طور جداگانه برای معادن مختلف ناحیه پروده مورد بررسی قرار گیرد.

گوگرد در سه نوع پیریت (FeS₂)، سولفات و آلی در زغال‌سنگ حضور دارد؛ سهم سولفات‌ها از گوگرد کل اندک است و معمولاً طی فراوری با روش‌های فیزیکی در آب حل می‌شود. حذف گوگرد آلی که با پیوندهای کووالانسی به اتم‌های کربن زغال‌سنگ متصل است، تنها با فرایندهای شیمیایی امکان‌پذیر است. به عبارت دیگر، درصد گوگرد آلی، تعیین‌کننده حد پایین گوگردزدایی با روش‌های فراوری فیزیکی است. خوشبختانه، بیش از ۵۰ درصد گوگرد حاضر در زغال‌سنگ معادن پروده به صورت پیریت است. پیریت محصول تحولات بیوشیمیایی تدریجی در زغال‌سنگ است؛ سولفات‌ها در محیط اسیدی ضعیف توسط باکتری‌های خاص به H₂S تبدیل می‌شوند که طی واکنش با گوگرد آلی حاضر در ساختار زغال‌سنگ و در مجاورت یون آهن، موجب تشکیل تدریجی پیریت می‌شود. مورفولوژی پیریت وابسته به شرایط محیطی است به طوری که این ماده با سه مورفولوژی در زغال‌سنگ یافت می‌شود: ۱. دانه‌های درشت، ۲. دانه‌های ریز و به هم پیوسته، ۳. دانه‌های ریز پراکنده.

شکل ۱۲. انواع مورفولوژی پیریت حاضر در زغال‌سنگ؛^۲ نواحی روشن در تصاویر ذرات پیریت را نشان می‌دهند، حذف پیریت با مورفولوژی حاضر در تصویر (ج) دشوارتر از سایر تصاویر است.



1. D.K. Ahangaran et al. "An Evaluation of The Quality of Metallurgical Coking Coal Seams Within the North Block of Eastern Parvadeh Coal Deposit, Tabas, Iran", Journal of Mining and Metallurgy, 47 A (1) (2011) 1 – 16.
2. A. Ahmadi, "Characterization and Washability of Pyrite in High Sulphur Coals from Tabas, Iran", J. Chem. Eng. Chem. Res. (2015) 2-1 457.



حذف پیریت و خاکستر از زغال سنگ با روش های فیزیکی از قواعد مشابهی تبعیت می کند. قابلیت حذف خاکستر طی زغال شویی با تست شستشوی پذیری^۱ ارزیابی می شود. تست شستشوی پذیری زغال سنگ معدن تخت زیتون (با ۳۵ درصد خاکستر) در دانه بندی ۰/۵-۲۵ میلی متر نشان داد که امکان تولید کنسانتره با ۱۰ درصد خاکستر با بازدهی ۷۴ درصد وجود دارد، در صورتی که تولید کنسانتره با ۱۰ درصد خاکستر از زغال سنگ معدن مهرآذین (با ۲۵ درصد خاکستر) در دانه بندی یکسان با راندمان حدود ۵۲ درصد قابل تحقق است. با کاهش دانه بندی زغال سنگ معدن مهرآذین به زیر ۰/۵ میلی متر، راندمان تولید کنسانتره با ۱۰ درصد خاکستر به ۸۲ درصد افزایش پیدا کرد.^۲ به عبارت دیگر، قابلیت حذف خاکستر از زغال سنگ صرفاً به میزان آن در زغال سنگ خام بستگی ندارد، بلکه وابستگی شدیدی به نحوه توزیع آن در ساختار زغال سنگ است. درجه آزادی مواد معدنی^۳ زغال سنگ وابسته به مورفولوژی توزیع ذرات خاکستر در ساختار زغال سنگ و در نتیجه تعیین کننده میزان خردایش مورد نیاز برای تولید یک محصول مناسب (خاکستر پایین + بازدهی بالا) است. به طور کلی، هرچه مواد معدنی (خاکستر) در زغال سنگ پراکنده تر باشد، جدایش فیزیکی در دانه بندی ریزتر با بازدهی بالاتری محقق می شود.

تحقیقات بر روی زغال سنگ معادن پروده نشان داده است که بعضاً درجه آزادی مواد معدنی این ذخایر با یکدیگر تفاوت دارد^۴ که در این صورت واحدهای زغال شویی نمی توانند خوراک خود را با اختلاط زغال سنگ استخراج شده از معادن مختلف تأمین کنند. بدین منظور، توسعه و تجهیز واحدهای کنترل کیفیت جهت تست زغال سنگ ورودی به انبار ذخیره سازی و نیز تدوین دستورالعمل های اجرایی برای آماده سازی خوراک واحدهای زغال شویی حائز اهمیت است.

کنسانتره زغال سنگ، خوراک کارخانه های کک سازی است. کنسانتره زغال سنگ در واحدهای کک سازی آسیاب می شود تا به دانه بندی ۳- میلی متر برسد؛ دانه بندی ۰/۵- میلی متر (نرمه زغال سنگ) نباید بیش از ۴۵ درصد شارژ کوره را تشکیل دهد. بدین منظور، سهم دانه بندی ۰/۵- میلی متر در خوراک واحد کک سازی (کنسانتره زغال سنگ تولیدی در واحدهای زغال شویی) باید کمتر از حدود ۲۰ درصد باشد تا میزان نرمه پس از آسیاب از ۴۵ درصد عبور نکند. لذا، میزان خردایش زغال سنگ خام برای آزادسازی مواد معدنی زغال سنگ در واحدهای فراوری دارای محدودیت است. این مهم موجب می شود که واحدهای زغال شویی بعضاً جریمه ناشی از خاکستر زیاد را نسبت به افزایش درصد نرمه (کاهش بازدهی) فرایند ترجیح دهند. لذا، طرح های تحقیقاتی جهت دستیابی به پارامترهای بهینه فرایند ضروری است.

1. Washability

2. A. Ahmadi, "Characterization and Washability of Pyrite in High Sulphur Coals from Tabas, Iran", J. Chem. Eng. Chem. Res. (2015) 2-1 457.

3. Degree of Mineral Matter Liberation

4. Reza Dehghan and Mohsen Aghaei, "Evaluation of the Performance of Tri-Flo Separators in Tabas (Parvadeh) Coal Washing Plant", Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology 7(3): 510-514, 2014.

نظر به اینکه پیریت یک ماده معدنی است، قواعد حذف آن با روش‌های فیزیکی مشابه حذف خاکستر است. میزان خردایش زغال سنگ قبل از ورود به واحد جدایش بر میزان گوگردزدایی تأثیرگذار است. به عنوان مثال، حذف ۵۰ درصد پیریت از زغال سنگ معدن تخت زیتون و معدن مهرآذین به ترتیب با دانه‌بندی ۲۵-۹/۵+ و ۵-۰/۵-۰/۱۵+ میلی‌متر محقق می‌شود.^۱ گفتنی است که ۵۰ تا ۷۰ درصد گوگرد حاضر در ذخایر پروده از نوع پیریتی است که در صورت رعایت ظرافت‌های فنی فرایند زغال‌شویی، امکان کاهش قابل توجه گوگرد با روش‌های فیزیکی وجود دارد. هرچه ذرات پیریت ریزتر و پراکنده‌تر باشد، حذف آن با روش‌های فیزیکی دشوارتر است. بخش قابل توجهی از پیریت حاضر در ذخایر پروده دارای مورفولوژی ریز و پراکنده (شکل ۱۲-ج) است به نحوی که صرفاً با کنترل فرایندهای سنتی زغال‌شویی نظیر واسطه سنگین و فلوتاسیون امکان حذف آن وجود ندارد. نظر به بلوغ مناسب ذخایر پروده، انجام طرح‌های تحقیقاتی جهت به‌کارگیری روش‌های مکمل برای فراوری زغال سنگ معادن این ناحیه ضروری به نظر می‌رسد.

نظر به سهم قابل توجه زغال سنگ در تأمین انرژی و نیز محدودیت ذخایر با گوگرد پایین در دنیا، در دهه‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای با هدف توسعه فناوری‌های نوین فراوری زغال سنگ که مبتنی بر روش‌های شیمیایی و بیولوژیک هستند، صورت گرفته است. به طور کلی، گوگردزدایی و حذف خاکستر به طور هم‌زمان در روش‌های بیولوژیک و شیمیایی محقق می‌شود؛ این نکته برای ذخایر پروده که دارای خاکستر بالاست، حائز اهمیت است. عملکرد فناوری‌های نوین فراوری زغال سنگ در مقیاس آزمایشگاهی و پایلوت اثبات شده است، اما تاکنون در مقیاس صنعتی مورد استفاده قرار نگرفته‌اند.^۱ جامعه دانشگاهی با همکاری صنایع کشور مطالعات متعددی را در مقیاس آزمایشگاهی و پایلوت بر روی ذخایر زغال سنگ کشور به خصوص ذخایر ناحیه طبس انجام داده‌اند.^۲

در روش‌های بیولوژیک، گوگرد توسط آنزیم‌هایی که به وسیله برخی باکتری‌های خاص تولید می‌شود، اکسید و به محصولی محلول در آب تبدیل می‌شود؛ لذا، نوع باکتری و شرایط محیط کشت نظیر pH و دما در عملکرد فرایند بسیار تأثیرگذار هستند. هزینه گوگردزدایی بیولوژیک برای زغال سنگ با ۲ درصد گوگرد پیریتی معادل ۱۰ تا ۱۴ دلار در هر تن است.^۳ شایان ذکر است که روش‌های بیولوژیک حذف محتوای گوگرد آلی حاضر در زغال سنگ توسعه کمتری داشته است؛ این مهم غالباً به دلیل عدم توسعه باکتری‌های با عملکرد مناسب است. به طور کلی، روش‌های بیولوژیک کُند هستند و معمولاً برای گوگردزدایی از نرمه زغال سنگ (دانه‌بندی ۰/۵- میلی‌متر) پیشنهاد می‌شود. متأسفانه، میزان نرمه قابل

1. G.J. Oslon, "Prospects For Biondesulfurization of Coal: Mechanisms and Related Process Designs" Fuel Processing Technologies 40 (1994) 103-114.

2. F. Eghbali et al, "Biondesulfurization of Tabas Coal in Pilot Plant Scale", Iran. J. Chem. Chem. Eng. 29-4 (2010) 75-78.

3. L.K. Ju, "Microbial Desulfurization of Coal", Fuel Science and Technology International 10-8 (1992) 1251-1290.



قبول واحدهای کک‌سازی برای خریداری کنسانتره از واحدهای فراوری حدود ۲۰ درصد است؛ لذا، به نظر می‌رسد که توسعه فناوری‌های گوگردزدایی مبتنی بر روش‌های بیولوژیک برای ذخایر پروده چندان مطلوب نباشد. مطالعات متعددی در این زمینه در مقیاس پایلوت در کشور انجام شده است که حاکی از پتانسیل استفاده از روش‌های بیولوژیک به عنوان مکمل روش‌های فیزیکی است.

فرایندهای فراوری زغال‌سنگ مبتنی بر روش‌های شیمیایی نظیر لیچینگ با محلول سود نیز به طور گسترده در مقیاس آزمایشگاهی و پایلوت مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. به دلیل استفاده از محلول‌های غلیظ و خورنده در این روش، هزینه‌های سرمایه‌گذاری نسبتاً بالاست. به دلیل نرخ بالای گوگردزدایی، حذف هم‌زمان گوگرد و خاکستر و نیز قابلیت حذف هم‌زمان گوگرد آلی و غیرآلی، به نظر می‌رسد که لیچینگ شیمیایی روش کارآمدتری نسبت به فرایندهای بیولوژیک باشد. مهم‌ترین نگرانی در استفاده از روش‌های شیمیایی برای فراوری زغال‌سنگ‌های کک‌شو، تخریب ساختار زغال‌سنگ و تأثیر منفی آن بر قابلیت کک‌شوندگی است. گزارش‌های موجود از فراوری نمونه‌های زغال‌سنگ معادن پروده در دانه‌بندی ۳-۵+ میلی‌متر در مقیاس آزمایشگاهی حاکی از تأثیر ناچیز لیچینگ شیمیایی بر قابلیت کک‌شوندگی محصول است.^۱ به طور کلی در دنیا، سرمایه‌گذاری‌های انجام شده برای توسعه فرایندهای نوین زغال‌شویی غالباً متمرکز بر زغال‌سنگ‌های حرارتی بوده است که سهم قابل توجهی در سبد تولید انرژی کشورهای توسعه یافته دارد. تولید فولاد در کوره بلند با استفاده از زغال‌سنگ‌های با گوگرد پایین ذخایر استرالیا در دنیا به بلوغ رسیده است، اما حدی برای ارتقای استانداردهای زیست‌محیطی نیروگاه‌های زغال‌سوز وجود ندارد و محدودیت‌های زیست‌محیطی در کشورهای توسعه یافته به طور مستمر در حال ارتقا هستند. به عبارت دیگر، ضرورت گوگردزدایی از ذخایر پروده، اهداف متفاوتی را نسبت به روند کلی تحقیقات در سطح دنیا جستجو می‌کند. لذا، ضروری است که سرمایه‌گذاری‌ها بر روی طرح‌های پژوهشی متناسب با اهداف بومی صورت گیرد.

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

زغال‌سنگ محصول تجزیه تدریجی گیاهان طی سلسله تحولات شیمیایی و بیولوژیک است. در این فرایند، مواد فرّار از ساختار زغال‌سنگ حذف و محتوای کربن و در نتیجه بلوغ زغال‌سنگ افزایش می‌یابد؛ درجه بلوغ مهم‌ترین مشخصه زغال‌سنگ و تعیین‌کننده خواص فیزیکی و شیمیایی آن نظیر محتوای انرژی و قابلیت کک‌شوندگی است. زغال‌سنگ‌های با درجه بلوغ بیتومینی و حاوی ۲۴ تا ۲۸ درصد مواد فرّار آلی، دارای بهترین قابلیت کک‌شوندگی هستند. با افزایش یا کاهش میزان مواد فرّار آلی از این بازه،

۱. محمدرضا احسانی و همکاران. «گوگردزدایی شیمیایی زغال‌سنگ‌های پرگوگرد ایران (طیس) با استفاده از سود، متانول/ آب و متانول/ سود»، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، دوره ۲۴، ش ۱، ۱۳۸۴، ص ۲۴-۲۱.

قابلیت کک‌شوندگی زغال سنگ افت می‌کند. زغال سنگ‌های با درجه بلوغ پیش بیتومینی از نوع حرارتی هستند و برای تولید انرژی در نیروگاه‌های برق استفاده می‌شوند. شایان ذکر است که «درجه بلوغ» مشخصه ذاتی و غیرقابل تغییر ذخایر زغال سنگ است و ذخایر زغال سنگ ناحیه پروده دارای بلوغ بسیار مناسبی هستند.

عوامل مؤثر بر کیفیت کک و اثر آنها در نظام قیمتگذاری، جرائم و پاداش‌ها

۱. استحکام باقی‌مانده کک (CSR)

کیفیت زغال سنگ بر اساس کیفیت کک تولیدی تعریف می‌شود. در کوره بلند شرکت ذوب آهن اصفهان، مواد شارژ کوره (کک + سنگ آهن)، از بالا به سمت پایین و گاز اکسیژن در جهت معکوس حرکت می‌کند. کک که دارای ساختاری شبه کریستالی از اتم‌های کربن است، با اکسیژن واکنش می‌دهد و گاز احیاکننده CO را تولید می‌کند؛ این واکنش موجب کاهش استحکام دانه‌های کک و خرد شدن آنها می‌شود. گفتنی است که استحکام مناسب کک، تضمین‌کننده نفوذپذیری حداقلی شارژ کوره بلند برای عبور گازها به سمت بالاست است. لذا، عدم افت سریع استحکام کک در کوره بلند امری ضروری است؛ این ویژگی با کمیت CSR اندازه‌گیری می‌شود. در واقع، CSR مهم‌ترین معیار تعیین‌کننده عملکرد کک در کوره بلند است؛ انواع باکیفیت کک دارای CSR بالای ۶۵ درصد هستند. برای تولید کک با CSR بالا، زغال سنگ باید دارای سیالیت مناسب ($Y > 16$) و در نتیجه ضریب تورم بالا ($FSI > 7.5$) باشد؛ نظر به وابسته بودن کمیت‌های فوق، همواره یکی از کمیت‌های فوق در نظام قیمتگذاری (پاداش و جریمه) لحاظ می‌شود. نکته حائز اهمیت دیگر آنکه بلوغ زغال سنگ دارای بیشترین تأثیرگذاری بر کمیت‌های فوق و در نتیجه CSR کک تولیدی است.

۲. خاکستر

ترکیب شیمیایی زغال سنگ تأثیرگذار بر کیفیت کک است. خاکستر به دو طریق موجب کاهش CSR زغال سنگ می‌شود:

۱. حضور خاکستر در کنسانتره زغال سنگ (خوراک واحدهای کک‌سازی) موجب کاهش سیالیت در باتری کک‌سازی و در نتیجه افت CSR کک تولیدی می‌شود. به طور کلی، یک درصد افزایش خاکستر کنسانتره زغال سنگ موجب ۲-۳ درصد افت CSR کک می‌شود. انواع باکیفیت زغال سنگ کک‌شو، دارای حداکثر ۸/۵ درصد خاکستر هستند به نحوی که زغال سنگ با خاکستر بالای ۱۱ درصد در صنعت فولاد مصرف نمی‌شود. حد پذیرش خاکستر کنسانتره زغال سنگ در کشور ۱۰/۵ درصد است که به ازای هر درصد افزایش میزان خاکستر ۲ درصد (برای خاکستر زیر ۱۲/۵ درصد) یا ۵ درصد (برای خاکستر بیش از ۱۲/۵ درصد) جریمه وضع می‌شود. به عبارت دیگر، حد بالایی برای خاکستر جهت مردود کردن زغال سنگ در



کشور تعیین نشده است و واحدهای کک‌سازی با کسر جراثیم نسبت به خریداری زغال سنگ اقدام می‌کنند. به عنوان مثال، زغال سنگی با ۱۳/۵ درصد خاکستر با وضع ۹ درصد جریمه خریداری می‌شود.

۲. برخی مواد معدنی حاضر در کک نظیر K_2O ، Na_2O و Fe_2O_3 به دلیل برخورداری از خاصیت کاتالیستی موجب افزایش واکنش‌پذیری کک در کوره بلند می‌شود که به تسریع افت استحکام دانه‌های کک می‌انجامد. به عبارت دیگر، علاوه بر درصد خاکستر کنسانتره زغال سنگ، ترکیب شیمیایی آن نیز حائز اهمیت است. متأسفانه، مقدار $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ در معادن زغال سنگ کشور به خصوص معادن ناحیه پروده بسیار بالاست؛ حد مجاز اکسیدهای قلیایی در انواع باکیفیت زغال سنگ ۱/۸ درصد است در صورتی که میزان آن در ذخایر پروده ۴-۵ درصد است. به نظر می‌رسد که CSR نسبتاً پایین زغال سنگ‌های معادن پروده (به‌رغم برخورداری از سیالیت مناسب) به دلیل حضور مقادیر زیاد مواد معدنی بازی باشد؛ نمودار شکل ۴ (ب) و جدول ۶ مؤید این ادعا هستند. شایان ذکر است که در حال حاضر جریمه بر روی مقادیر $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ موجود در کنسانتره زغال سنگ در کشور وضع نمی‌شود.

معیار عملکرد مناسب کک در کوره بلند CSR است. اهمیت مشخصات زغال سنگ از منظر ارتقای عدد CSR کک است؛ لذا، نظام قیمتگذاری زغال سنگ‌های کک‌شو باید در وهله اول باید تضمین‌کننده CSR کک تولیدی باشد. پیش‌بینی CSR کک بر اساس مشخصات زغال سنگ نخستین بار در شرکت فولادی نیپون^۱ ژاپن با در نظر گرفتن سه متغیر انجام شد: ۱. سیالیت که وابستگی شدید با درجه بلوغ (و تا حدودی به میزان خاکستر) زغال سنگ دارد، ۲. درصد خاکستر، ۳. درصد مواد معدنی بازی. در نظام قیمتگذاری زغال سنگ‌های کک‌شوی باکیفیت CSR زیر ۶۲ درصد مردود است و برای CSR زیر ۶۸ درصد جریمه اندکی (۳/۰ درصد در هر واحد افت) پیش‌بینی شده است. در این نظام جریمه‌ای برای میزان $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ پیش‌بینی نشده است که احتمالاً به دلیل مقدار بسیار پایین آن در ذخایر استرالیا است. همچنین، جراثیم بر خاکستر و مواد فرار تنها پس از اطمینان از عدد CSR وضع می‌شود. این در حالی است که نظام قیمتگذاری زغال سنگ کشور تلاش دارد تا کیفیت کک را به طور غیرمستقیم (بدون لحاظ کردن CSR) و وضع جراثیم سنگین بر مشخصات زغال سنگ نظیر سیالیت، خاکستر و مواد فرار تضمین نماید. از طرفی، این نظام قیمتگذاری نسبت به مشخصات بومی معادن زغال سنگ کشور به خصوص میزان بالای اکسیدهای قلیایی $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ معادن پروده بی‌توجه است و نسخه‌ای مشابه زغال سنگ معادن استرالیا تجویز می‌کند.

۳. رطوبت

رطوبت زیاد کنسانتره موجب افزایش مصرف انرژی در واحدهای کک‌سازی می‌شود. به منظور جلوگیری از اتلاف انرژی، در کشورهای توسعه‌یافته، معمولاً یک مرحله رطوبت‌گیری (خشک‌کن) قبل از شارژ

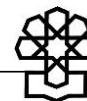
زغال سنگ داخل کوره کک‌سازی پیش‌بینی می‌شود. حد پذیرش رطوبت برای زغال سنگ‌های باکیفیت استرالیا ۱۰ درصد است و ۱/۲ درصد جریمه برای هر درصد افزایش رطوبت وضع می‌شود. احداث واحد خشک کردن در کارخانه‌های کک‌سازی به دلیل قیمت پایین انرژی در کشور فاقد توجیه اقتصادی است. حضور گوگرد در زغال سنگ موجب افزایش مصرف کک در کوره بلند، افزایش زمان تصفیه و در نتیجه افزایش هزینه تولید می‌شود.

۴. گوگرد

گوگرد به چهار نوع کلی در زغال سنگ یافت می‌شود: ۱. پیریت (FeS_2)، ۲. گوگرد آلی، ۳. مواد معدنی سولفاتی و ۴. گوگرد عنصری. سهم سولفات‌ها و گوگرد عنصری از کل گوگرد زغال سنگ ناچیز است؛ ۵۰ تا ۷۰ درصد گوگرد زغال سنگ معادن ناحیه پروده از نوع پیریت و مابقی آلی است. پیریت با سه مورفولوژی کلی در زغال سنگ وجود دارد: ۱. ذرات درشت، ۲. دانه‌های ریز و مجتمع (نزدیک به هم) و ۳. دانه‌های ریز و پراکنده. هرچه اندازه ذرات پیریت حاضر در زغال سنگ ریزتر باشد، حذف آن از کنسانتره دشوارتر است. متأسفانه، بخش قابل توجهی از پیریت حاضر در ذخایر ناحیه پروده دارای مورفولوژی ریز و پراکنده هستند که امکان حذف آن با کارخانه‌های زغال‌شویی محدود است؛ کنسانتره تولیدی از زغال سنگ معادن پروده دارای ۱/۵ تا ۲ درصد گوگرد است. به دلیل مقررات زیست‌محیطی حاکم بر کشورهای توسعه‌یافته و اخیراً کشورهای در حال توسعه‌ای نظیر چین و هند و نیز افزایش هزینه‌های تولید ناشی از گوگرد بالای کک، زغال سنگ کک‌شوی ایران در شرایط کنونی به سختی قابل عرضه در بازارهای خارجی است.

نظام قیمتگذاری، جرائم و پاداش در ایران و کشورهای دنیا

عدم رغبت فولادسازان بزرگ دنیا به مصرف زغال سنگ‌های پُرگوگرد و فراهم نبودن امکان صادرات زغال سنگ کک‌شوی ایران، موجب شده است که اساساً نظام قیمتگذاری مشخصی برای زغال سنگ ایران وجود نداشته باشد. در نظام قیمتگذاری زغال سنگ‌های باکیفیت استرالیا، برای حداکثر ۱ درصد گوگرد و در نظام قیمتگذاری زغال سنگ‌های ایالات متحده آمریکا برای حداکثر ۱/۲۵ درصد گوگرد جریمه پیش‌بینی شده است. نظر به عدم وجود مکانیسم‌های بازار برای کشف قیمت زغال سنگ‌های ایران، قیمت پایه کنسانتره زغال سنگ در کشور معادل ۲۶/۵ درصد قیمت شمش صادراتی فولاد خوزستان تعیین شده است؛ این فرمول در سال ۱۳۹۷ به توافق شرکت ذوب آهن اصفهان و انجمن زغال سنگ ایران رسید و توسط وزارت صمت ابلاغ شد. آخرین عرضه شرکت فولاد خوزستان در تاریخ ۱۲ خردادماه ۱۳۹۸ (۳۰ هزار تُن بلوم) با قیمت حدود ۴,۰۲۵,۰۰۰ تومان در تُن معامله شد که با احتساب ۱۰,۸۰۰ تومان برای هر دلار آمریکا، معادل ۳۷۳ دلار در هر تُن است. لذا، قیمت پایه کنونی کنسانتره زغال سنگ معادن ایران



۹۹ دلار در هر تُن است. با فرض یک شرکت فراوری زغال سنگ مستقر در ناحیه پروده طبس که محصولی با CSR ۵۰ درصد، سیالیت مناسب (Y=20)، ۱۱/۵ درصد خاکستر، ۱/۷ درصد گوگرد، ۱۱ درصد رطوبت، ۲۶/۵ درصد مواد فرّار و ۵ درصد اکسید قلیایی تولید می‌کند؛ بر اساس نظام قیمتگذاری کنونی زغال سنگ در کشور، جرائم و پاداش‌های این محصول به شرح ذیل خواهد بود:

پاداش سیالیت مناسب:

$$4 \times 3\% = 12\%$$

جریمه خاکستر زیاد:

$$1 \times 1.75\% = 1.75\%$$

جریمه اکسیدهای قلیایی زیاد:

صفر

جریمه رطوبت زیاد:

$$1 \times 1\% = 1\%$$

جریمه گوگرد زیاد:

$$3 \times 0.5 + 4 \times 1.05\% = 5.7\%$$

در نتیجه، باید ۷ درصد پاداش برای محصول با مشخصات فوق لحاظ شود تا قیمت کنسانتره زغال سنگ معادن ناحیه پروده حدود ۱۰۶ دلار در تُن باشد.

اگرچه بازار خارجی برای محصول با مشخصات مذکور وجود ندارد، در ادامه تلاش می‌شود تا با وضع جرائم منطقی بر این محصول با مرجع قیمت پایه زغال سنگ یکی از معادن^۱ استرالیا که بر اساس گزارش نشریه پلتس در هفته اول ژوئن ۲۰۱۹ با قیمت FOB ۲۰۰ دلار در هر تُن معامله شد، قیمت زغال سنگ ایران برآورد شود. بدین منظور، جرائم ذیل پیش‌بینی شده است:

- ۰/۵ درصد جریمه برای ۱ درصد افت CSR؛ این جریمه از CSR ۶۰ درصد برای زغال سنگ‌های استرالیا لحاظ می‌شود. لذا، مشابه زغال سنگ معادن ایالات متحده فرض می‌شود که جریمه ۰/۵ درصدی برای CSR کمتر از ۶۰ درصد نیز قابل اعمال باشد.

- ۱/۵ درصد جریمه برای ۱ درصد افزایش خاکستر (تا سقف ۱۰/۵ درصد خاکستر) و ۲ درصد جریمه برای ۱ درصد خاکستر (بیش از ۱۰/۵ درصد خاکستر)؛ گفتنی است که زغال سنگ با ۱۰/۵+ درصد خاکستر برای زغال سنگ‌های استرالیا و ایالات متحده تعریف شده نیست.

- ۱ درصد جریمه برای ۱ درصد افزایش رطوبت.

۱ - درصد جریمه برای ۰/۱ درصد گوگرد (تا سقف ۱ درصد گوگرد)، ۱/۵ درصد جریمه برای ۰/۱ درصد گوگرد (تا سقف ۱/۳ درصد گوگرد) و ۲/۵ درصد جریمه برای ۰/۱ درصد گوگرد (بیش از ۱/۳ درصد گوگرد)؛ گفتنی است که زغال سنگ کک‌شو با بیش از ۱/۲۵ درصد گوگرد برای بازارهای زغال سنگ‌های استرالیا و ایالات متحده تعریف شده نیست.

- ۰/۵ درصد جریمه برای ۱ درصد افزایش مواد فرار در بازه ۱۸-۲۷ درصد.

با در نظر گرفتن مشخصات زغال سنگ معدن Peak Downs استرالیا در جدول ۵، جرائم اعمالی به محصول شرکت فرضی مذکور به شرح ذیل محاسبه می‌شود:

جریمه CSR پایین:

$$20 \times 0.5 = 10\%$$

جریمه خاکستر زیاد:

$$1 \times 1.5 + 1 \times 2 = 3.5\%$$

جریمه رطوبت زیاد:

$$1.7 \times 1 = 1.7\%$$

جریمه گوگرد زیاد:

$$5 \times 1 + 3 \times 1.5 + 4 \times 2.5 = 19.5\%$$

جریمه مواد فرار زیاد:

$$4 \times 0.5 = 2\%$$

از طرفی، هزینه حمل دریایی زغال سنگ از استرالیا به مقصد بنادر اصلی چین حدود ۱۰ دلار در هر تن است در صورتی که هزینه صادرات به چین از مبدأ ایران پس از خروج ایالات متحده از برجام به حدود ۳۰ دلار در هر تن افزایش یافته است. با احتساب حدود ۵ دلار در هر تن هزینه حمل ریلی از طبس به بنادر جنوبی کشور، هزینه صادرات کنسانتره زغال سنگ به چین از مبدأ ایران حدود ۲۵ دلار بیش از صادرات از مبدأ استرالیا خواهد بود. بدین ترتیب، با وضع تقریباً ۳۷ درصد جریمه بر محصول شرکت فرضی مستقر در ناحیه پروده طبس و با مرجع قیمت FOB ۲۰۰ دلار برای هر تن زغال سنگ معادن Peak Downs استرالیا و نیز با احتساب ۲۵ دلار هزینه‌های اضافی برای حمل از مبدأ طبس، قیمت زغال سنگ معادن پروده طبس درب زغال شویی (Ex-work) در حال حاضر حدود ۱۰۰ دلار در هر تن است. به عبارت دیگر، اگرچه شاخص‌های مورد توافق مابین شرکت ذوب آهن اصفهان و انجمن زغال سنگ ایران با شاخص‌های بین‌المللی قیمتگذاری کنسانتره زغال سنگ تفاوت دارد، در عمل به قیمتی منطقی و منصفانه برای کنسانتره زغال سنگ منجر شده است.



نکته حائز اهمیت آن است که وضع جرائم بر کیفیت یک محصول صرفاً دارای ابعاد فنی و مالی کوتاهمدت نیست، بلکه پایه و اساس تدوین نقشه راه، طرح‌های توسعه‌ای و ارتقای کیفیت محصول در بلندمدت است. متأسفانه، شاخص‌های کیفی مورد توافق در نظام قیمتگذاری کنونی تا حدودی در تضاد با موازین علمی حوزه زغال‌سنگ است. در این گزارش تلاش شده است تا اهمیت کمیت CSR کک بر عملکرد کوره بلند و تأثیر متغیرهای کیفی زغال‌سنگ بر CSR تشریح شود. هدف غایی زنجیره ارزش زغال‌سنگ‌های کک‌شو در بخش فنی ارتقای CSR کک است، اما جریمه‌ها نه بر CSR، بلکه بر متغیرهای مؤثر بر آن وضع شده است؛ به عبارت دیگر، نظام قیمتگذاری کنونی زغال‌سنگ در ایران به طور غیرمستقیم به مقوله کیفیت کک می‌پردازد و لذا دقت و کارآمدی پایین‌تری دارد. عدم پیش‌بینی جرائم برای متغیرهای مهمی نظیر اکسیدهای قلیایی از ریسک‌های این نظام قیمتگذاری است. اگرچه نظام کنونی قیمتگذاری به قیمتی منصفانه برای زغال‌سنگ‌های ایران منتج می‌شود، اما مسیر سرمایه‌گذاری‌های آتی بر روی طرح‌های تحقیق و توسعه در بخش فراوری زغال‌سنگ را تا حدود زیادی از مسیر صحیح خارج می‌کند. با این حال، تحقق این نظام قیمتگذاری علی‌رغم وجود برخی ایرادات، گامی مثبت در مسیر توسعه معادن و کارخانه‌های فراوری زغال‌سنگ است.

سرمایه‌گذاری‌های آتی در زنجیره ارزش زغال‌سنگ باید در دو بخش متمرکز شود:

۱. تجهیز معادن ناحیه پروده و افزایش تولید زغال‌سنگ خام در کشور: این امر از مهم‌ترین

ضروریات زنجیره ارزش زغال‌سنگ در کشور است به نحوی که در صورت عدم تحقق برنامه‌های پیش‌بینی شده در بخش تجهیز معادن، به دلیل افزایش تولید شرکت ذوب آهن اصفهان و آغاز بهره‌برداری از کوره بلند سایر شرکت‌های خصوصی، کشور نیاز به واردات گسترده زغال‌سنگ در سال‌های پیش رو خواهد داشت. کمیت و کیفیت تجهیز معادن زغال‌سنگ موضوع این گزارش نیست.

۲. توسعه فناوری‌های نوین زغال‌شویی جهت کاهش گوگرد کنسانتره به کمتر از ۱/۳

درصد: برآوردها حاکی از آن است که در صورت تحقق این هدف، قیمت زغال‌سنگ معادن پروده در شرایط تحریمی حدود ۱۳۰ دلار در هر تن و در شرایط غیرتحریمی حدود ۱۵۰ دلار در هر تن خواهد بود. این برآورد بر این موارد استوار است:

- با کاهش میزان گوگرد به زیر ۱/۳ درصد، محدودیت‌های زیست‌محیطی عرضه زغال‌سنگ ایران به بازارهای خارجی مرتفع و لذا امکان کشف قیمت با مکانیسم‌های بازار وجود خواهد داشت. بر اساس نظام قیمتگذاری بین‌المللی، کاهش میزان گوگرد از ۱/۷ به ۱/۳ درصد موجب کاهش حدود ۱۰ درصدی جریمه می‌شود.

- گوگردزدایی با روش‌های شیمیایی و بیولوژیک موجب حذف خاکستر نیز می‌شود. در صورت کاهش میزان خاکستر به زیر ۱۰/۵ درصد، امکان کشف قیمت با مکانیسم‌های بازار وجود خواهد داشت که در نتیجه کاهش میزان خاکستر از ۱۱/۵ به ۱۰/۵ درصد، جریمه حدود ۲ درصد کاهش می‌یابد. یک

درصد کاهش خاکستر همراه با ۲-۳ درصد افزایش CSR است؛ لذا، کاهش یک درصدی خاکستر، موجب رفع ۱-۱/۵ درصد جریمه CSR می‌شود. به عبارت دیگر، کاهش خاکستر به ۱۰/۵ درصد موجب رفع حدود ۳/۵ درصدی جریمه‌ها می‌شود.

- ترکیب شیمیایی نامطلوب ($K_2O + Na_2O$) خاکستر زغال‌سنگ معادن پروده مشکل جدی‌تری از درصد خاکستر است. در صورت حذف ترجیحی (Selective) عناصر و اکسیدهای قلیایی از کنسانتره زغال‌سنگ، علاوه بر کشف قیمت با مکانیسم‌های بازار، با افزایش CSR از میزان جرائم زغال‌سنگ کاسته می‌شود.

درصد بالای گوگرد، خاکستر و اکسیدهای قلیایی سه مشکل اصلی ذخایر زغال‌سنگ پروده برای ورود به بازارهای خارجی است. البته، گوگرد با اختلاف زیاد مشکل اصلی این ذخایر است؛ گوگرد در کنسانتره زغال‌سنگ تولیدی از معادن پروده معمولاً بیش از ۱/۷ درصد (فرض محاسبات فوق) است و لذا تمرکز بر گوگردزدایی موجب می‌شود تا علاوه بر ورود به بازارهای خارجی، قیمت زغال‌سنگ ایران حدود ۱۵ درصد (معادل حدود ۳۰ دلار) افزایش یابد. گفتنی است که ارتقای کیفیت کنسانتره زغال‌سنگ با استفاده از روش‌های نوین فراوری موجب متضرر شدن مصرف‌کنندگان داخلی نخواهد شد، چراکه واحدهای کک‌سازی نیز به تبع افزایش کیفیت زغال‌سنگ داخلی، نیاز کمتری به واردات زغال‌سنگ باکیفیت (و گران‌قیمت) خواهند داشت. نظر به هزینه ۳۵-۴۰ دلاری واردات زغال‌سنگ از مبدأ استرالیا، کاهش مصرف زغال‌سنگ وارداتی می‌تواند افزایش قیمت زغال‌سنگ‌های داخلی را جبران کند.

فراوری زغال‌سنگ در کارخانه‌های زغال‌شویی به طور سنتی بر پایه روش‌های فیزیکی نظیر واسطه سنگین، فلوتاسیون و سانتریفیوژ است. جداسازی زغال‌سنگ از باطله در روش‌های فیزیکی مبتنی بر اختلاف خواص فیزیکی است. چگالی زغال‌سنگ خالص با درجه بلوغ بیتومینی در بازه $1-35 \text{ g/cm}^3$ است در صورتی که چگالی خاکستر حدود 5 g/cm^3 است؛ سیلیس، آلومینا، اکسید آهن و پیریت (FeS_2) بخش عمده خاکستر زغال‌سنگ را تشکیل می‌دهد. خاکستر به دلیل چگالی بالاتر در واسطه سنگین ته‌نشین می‌شود، اما کیفیت جداسازی خاکستر از زغال‌سنگ وابسته به نحوه توزیع ذرات خاکستر در زغال‌سنگ است؛ هرچه ذرات خاکستر ریزتر و پراکنده‌تر باشد، دستیابی به کنسانتره با خاکستر مناسب (زیر ۱۰/۵ درصد) دشوارتر (با هزینه بیشتر) است. بخش عمده گوگرد زغال‌سنگ معادن طبس از نوع پیریت است؛ متأسفانه، مورفولوژی پیریت در این ذخایر از نوع ریز و پراکنده است و حذف آن با روش‌های سنتی تنها با راندمان پایین محقق می‌شود.

محدودیت‌های روش‌های فیزیکی فراوری زغال‌سنگ در حذف گوگرد آلی و ذرات ریز پیریت نیروی محرکه توسعه فرایندهای شیمیایی و بیولوژیک مکمل در دهه‌های گذشته بوده است. لیچینگ کنسانتره زغال‌سنگ با محلول‌های شیمیایی نظیر محلول سود یا هیدروژن پراکسید با هدف حذف پیریت توسعه پیدا کرده است. فرایندهای شیمیایی قادر به کاهش قابل توجه میزان خاکستر (علاوه بر ذرات پیریت) و نیز حذف مقادیر اندکی گوگرد آلی است. پیریت در روش‌های بیولوژیک توسط آنزیم‌های تولید شده توسط برخی



باکتری‌های خاص در آب حل می‌شود؛ حذف بیولوژیک گوگرد آلی کمتر توسعه پیدا کرده است. به طور کلی، فرایندهای بیولوژیک کند و تنها برای کنسانتره با دانه‌بندی $0/5$ - میلیمتر دارای سرعت مناسب هستند، اما لیچینگ شیمیایی در دانه‌بندی $3 - 0/5$ + میلیمتر نیز با راندمان و سرعت مناسب قابل انجام است. نکته حائز اهمیت آنکه درصد نرمه (دانه‌بندی $0/5$ - میلیمتر) در کنسانتره زغال‌سنگ نباید بیش از حدود ۳۰ درصد باشد. به نظر می‌رسد که روش‌های نوین فراوری زغال‌سنگ باید همراه با برخی اصلاحات در فرایندهای قبلی نظیر خردایش و سرند زغال‌سنگ خام و نیز فرایند آماده‌سازی شارژ باتری کک‌سازی باشد.

توصیه‌های سیاستی

۱. تعریف طرح اولویت‌دار در ایمیدرو

زنجیره ارزش زغال‌سنگ (استخراج + فراوری) با اشتغال‌زایی مستقیم حدود ۳۰,۰۰۰ نفر، دارای گردش مالی سالیانه ۱۳۰ میلیون دلار است که با تکمیل طرح‌های توسعه‌ای در سال‌های پیش رو به ۳۵۰ میلیون دلار در سال خواهد رسید. مشکل اصلی ذخایر زغال‌سنگ کک‌شو کشور درصد بالای گوگرد است که در صورت حذف آن از کنسانتره زغال‌سنگ، ارزش تولیدات این زنجیره تا ۵۰ درصد افزایش خواهد یافت. نظر به نقش پُررنگ ایمیدرو در توسعه و بهره‌برداری از معادن ناحیه پروده، پیشنهاد می‌شود که طرح توسعه و تجاری‌سازی فرایندهای نوین گوگردزدایی به صورت اولویت‌دار در ایمیدرو تعریف شود. پیشنهاد می‌شود که رویکرد کلی ایمیدرو در این طرح از جنس سرمایه‌گذاری و مدیریت توسعه فناوری باشد.

۲. آمایش ملی توسعه فناوری‌های نوین فراوری زغال‌سنگ

در دو دهه گذشته مطالعات تحقیقاتی متعددی در زمینه گوگردزدایی و خاکستردزدایی از زغال‌سنگ طی همکاری صنعت و دانشگاه در کشور انجام شده است. بررسی‌ها حاکی از آن است که تلاش‌های زیادی جهت توسعه فناوری‌های نوین فراوری زغال‌سنگ در مقیاس پایلوت در کشور انجام شده که بعضاً همراه با موفقیت بوده است. لذا، پیشنهاد می‌شود که ایمیدرو طی همکاری با کلیه ذی‌نفعان (تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان کنسانتره زغال‌سنگ) نسبت به برگزاری یک کنفرانس ملی با هدف آمایش وضعیت کنونی فناوری‌های نوین مرتبط با زغال‌شویی اقدام کند. این کنفرانس فرصتی مغتنم برای ارائه آخرین دستاوردهای متخصصان و شرکت‌های فناور داخلی و خارجی در زمینه فراوری زغال‌سنگ کک‌شو خواهد بود.

۳. سرمایه‌گذاری بر روی دانش فنی موجود

پیشنهاد می‌شود که ایمیدرو از هرگونه موازی‌کاری و احیاناً ورود مستقیم به حوزه طرح‌های تحقیقاتی

در زمینه فراوری زغال سنگ اجتناب کند. نظر به ریسک‌های فنی - اقتصادی طرح‌های توسعه فناوری، با استناد به تبصره «۳» ماده (۳) قانون اجرای سیاست‌های کلی اصل چهارم قانون اساسی، ایمیدرو مجاز به مشارکت با شرکت‌های خصوصی و در اختیار گرفتن حداکثر ۴۹ درصد سهام است. لذا، ایمیدرو می‌تواند با ارزیابی سطح دانش فنی شرکت‌هایی مدعی (آن دسته از شرکت‌هایی که موفق به گوگردزدایی / خاکسترزدایی حداقل در مقیاس پایلوت شده‌اند) مستقلاً یا همراه با سرمایه‌گذاران بخش خصوصی، نسبت به سرمایه‌گذاری در احداث و راه‌اندازی واحد(های) صنعتی اقدام کند.

منابع و مأخذ

۱. طرح جامع زغال سنگ کشور (ایمیدرو).
۲. آمار و اطلاعات ارائه شده از سوی شرکت سهامی ذوب آهن اصفهان.
۳. آمار دفتر بهره‌برداری معادن معاونت امور معادن و صنایع معدنی وزارت صمت.
۴. اطلاعات حاصل از بازدید میدانی پژوهشگر از معادن و واحدهای فراوری طبس.
۵. شهرابی، مصطفی و علی اسماعیلی. ارزیابی زغال سنگ‌های ایران با نگاهی به زغال سنگ‌های دنیا، انتشارات جوان امروز، ۱۳۹۳.
۶. احسانی، محمدرضا و همکاران. «گوگردزدایی شیمیایی زغال سنگ‌های پُرگوگرد ایران (طبس) با استفاده از سود، متانول / آب و متانول / سود»، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، دوره ۲۴، ش ۱، ۱۳۸۴.
7. <https://www.ucsusa.org/clean-energy/all-about-coal/how-coal-works>
8. Elsevier, Applied Coal Petrology (2008), Chapter one: Colin R. Ward & Isabel Suarez-Ruiz, "Introduction to Applied Coal Petrology".
9. Elsevier, Applied Coal Petrology (2008), Chapter Two: Colin R. Ward & Isabel Suarez-Ruiz, "Basic Factors Controlling Coal Quality and Technological Behaviour"
10. Kyung Eun, The University of South Wales (2012), Master thesis: "The Effect of Coal Properties on Carburization Behaviour and Strength of Coal Blends"
11. P.P. Kumar et al., Ironmaking and steelmaking (2008), Vol. 35, No. 6
12. Q. Zhang et al., Fuel Processing Technology 86 (2008) 1-11
13. D.E. Pearson, Pearson Coal Technology, "Influence of Geology on CRS"
14. D.K. Ahangaran et al. "An Evaluation of The Quality of Metallurgical Coking Coal Seams Within the North Block of Eastern Parvadeh Coal Deposit, Tabas, Iran", Journal of Mining and Metallurgy, 47 A (1) (2011) 1 - 16
15. M.W. Mickail et al. Coal Preparation (1990) 8, 111-121
16. A. Ahmadi, "Characterization and Washability of Pyrite in High Sulphur Coals from Tabas, Iran", J. Chem. Eng. Chem. Res. (2015) 2-1 457
17. A. Ahmadi, "Characterization and Washability of Pyrite in High Sulphur Coals from Tabas, Iran", J. Chem. Eng. Chem. Res. (2015) 2-1 457.
18. Reza Dehghan and Mohsen Aghaei, "Evaluation of the Performance of Tri-Flo Separators in Tabas (Parvadeh) Coal Washing Plant", Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology 7(3): 510-514, 2014.
19. <https://www.uky.edu/KGS/coal/coal-rank.php>



مرکز پژوهش‌ها
مجلس شورای اسلامی

شماره مسلسل: ۱۶۵۵۷

شناسنامه گزارش

عنوان گزارش: الزامات توسعه فناوری برای ارتقای کیفیت و توان رقابت‌پذیری زغال‌سنگ
کک‌شوی ایران

نام دفتر: مطالعات انرژی، صنعت و معدن (گروه معدن و صنایع معدنی)

مدیران مطالعه: مهدی صادق احمدی، بابک بهادری

تهیه و تدوین: مهدی یعقوبی

ناظران علمی: حسین افشین، علی اصغر اژدری

ویراستار تخصصی: _____

ویراستار ادبی: _____

واژه‌های کلیدی:

۱. معدن
۲. زغال‌سنگ
۳. کک
۴. زغال‌شویی
۵. گوگردزدایی



تاریخ انتشار: ۱۳۹۸/۵/۱۲