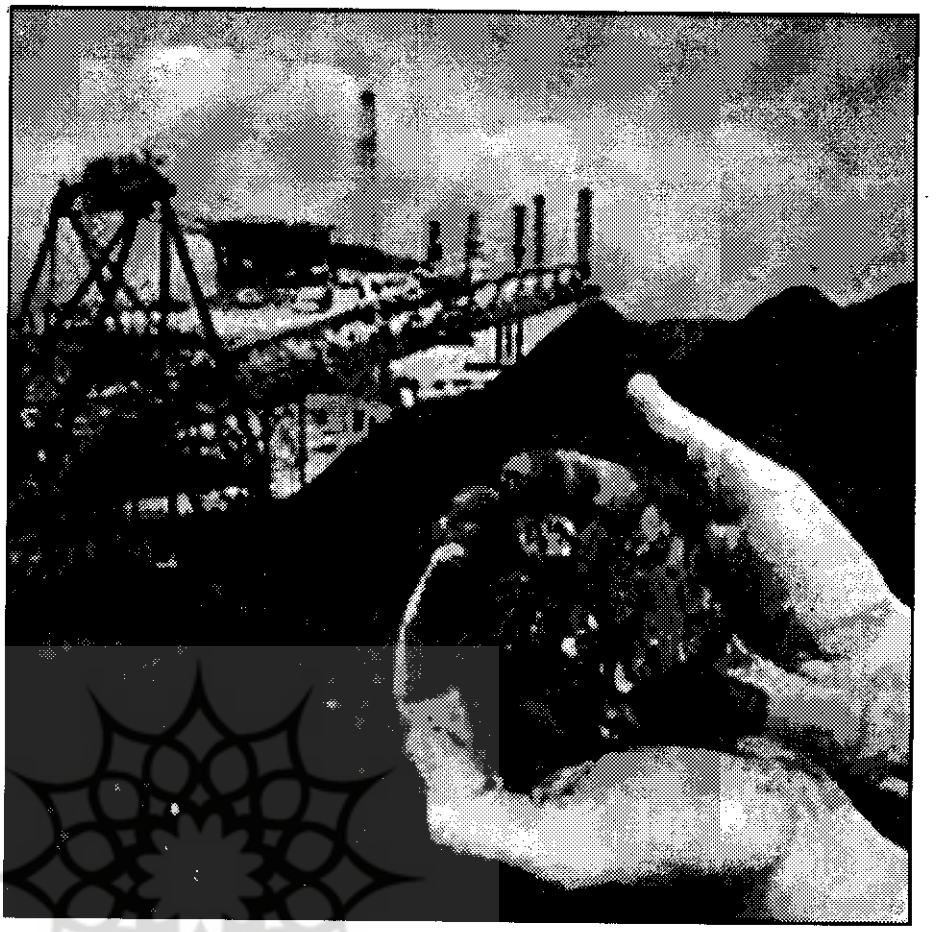
زغال سنگ و نقش آن در تأمین انرژی جهان

قسمت اول

فرهاد محمدی



از مواد انرژی‌زایی که نقش بسیار مهمی در توسعهٔ صنعتی جهان داشته است، می‌توان از زغال‌سنگ نام برد. زغال‌سنگ از قدیمی‌ترین اشکال انرژی است که در جهان به خدمت بشر درآمده است. قدمت استفاده از این مادهٔ انرژی‌زا، جایگاه ویژه‌ای برای آن در صنایع اولیه و همچنین توسعه یافته و پیشرفته باز کرده است. البته به دنبال پیشرفت در صنایع، تکنولوژی‌های استفاده از زغال‌سنگ نیز پیشرفته کرده‌اند.

در طی بلوغ صنعتی، همزمان صنایع زغال‌سنگ نیز به عنوان سوخت توانست خود را با شرایط جدید تطبیق دهد و به اشکال جامد، گاز، پودر و مایع در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گیرد. تمام این اشکال دارای تکنولوژی‌های تکامل یافته و جا افتاده‌ای هستند، گو اینکه اقتصادی نبودن استفاده از تکنولوژی معینی ممکن است منجر به منسوخ شدن برخی از این اشکال شده باشد.

مصرف زغال‌سنگ بیش از هر نوع سوخت فسیلی دیگر با نگرانیهای زیست‌محیطی ارتباط دارد. به همین دلیل و همچنین به خاطر تأثیر آشکار آلودگی‌های ناشی از سوختن زغال‌سنگ بر کیفیت لایه‌های زیرین جوّ، مصرف آن در آینده به ویژه در کشورهای صنعتی بسیار محدود خواهد شد. این در حالی است که انرژی مورد نیاز اکثر صنایع سنگین و حیاتی در کشورهای با مصرف بالای انرژی از طریق زغال‌سنگ تأمین می‌شود.

با توجه به مسائل زیست‌محیطی، در توافق‌های انجام شدهٔ این کشورها تصریح شده است که از اختصاص یارانه به منابع زغال‌سنگ اجتناب شود، اما قوانین نوشته شده در کشورهای اروپایی و آمریکا خلاف آن را نشان می‌دهند.

در این مورد به ویژه می‌توان به اختصاص یارانه‌های سنگین در آمریکا و آلمان اشاره کرد. انگلیس نیز در سالهای اخیر صنایع زغال سنگ خود را از دریافت یارانه معاف کرده است. این مسئله نشان می‌دهد که زغال سنگ به عنوان یک مادهٔ انرژی‌زای راهبردی، نقش مالکیت خود را در جهان صنعتی و مراکز مصرف، علی‌رغم نقش آلوده کنندگی زیست‌محیطی آن حفظ کرده است. زغال سنگ در برخی صنایع و رشد و توسعهٔ آن نقش عمده‌ای برعهده دارد. صنایع تولید برق، سیمان، آهن و فلزات از آن جمله‌اند.

در این بررسی ضمن اشاره به خصوصیات و طبقه‌بندی انواع زغال سنگ‌ها به عنوان مادهٔ اساسی در تأمین انرژی جهان، به ذخایر پراکندگی ذخایر زغال سنگ در جهان، مسائل عمده زیست‌محیطی زغال سنگ تکنولوژی به کار گرفته شده در آن تا این زمان پرداخته خواهد شد. و در ادامهٔ بحث، میزان تولید و مصرف جهانی، هزینهٔ تولید و قیمت و تجارت جهانی و کاربردهای مصرف آن را در صنایع مختلف مورد توجه قرار خواهیم داد.

درجهٔ مرغوبیت زغال سنگ

بررسی درجهٔ مرغوبیت زغال سنگها به وسیلهٔ روشهای شیمیایی و نوری انجام می‌شود، و شامل تعیین میزان رطوبت، مواد فرّار و مقدار کربن ثابت است.

درجهٔ مرغوبیت زغال سنگ با مقدار کربن آن افزایش و با افزایش رطوبت و مواد فرار آن کاهش می‌یابد. از زغال سنگ نارس تا آنتراسیت، مقدار رطوبت ساختاری کم و جنس زغال سنگ متراکم و سخت‌تر می‌شود.

لیگنیت

این زغال سنگ از درجهٔ خلوص پایین برخوردار است. رنگ آن قهوه‌ای تا سیاه بوده و دارای ۳۰ تا ۴۰ درصد رطوبت است. اگر در معرض هوا قرار گیرد، به سرعت از هم می‌پاشد و احتمال احتراق همزمان وجود دارد.

زغال سنگ مشابه قیر (نیمه بیتومن)

این زغال سنگ سیاه رنگ و در زمان استخراج دارای ۱۵ تا ۳۰ درصد رطوبت

جدول ۱ـ طبقه‌بندی براساس درجهٔ زغال در استاندارد ASTM

کلاس	گروه	علامت اختصاری	کربن ثابت (%dmmf)		مواد فرّار (%dmmf)		ارزش گرمایی (الف) (Mj/Kg mmmf)	
			>	≤	>	≤	<	≤
الف- آنتراسیت	۱ـ متاآنتراسیت	ma		۹۸	۲			
	۲ـ آنتراسیت	an	۹۸	۹۲	۸	۲		
	۳ـ نیمه آنتراسیت	sa	۹۲	۹۶	۱۴	۹		
ب-بیتومن	۱ـ بیتومن فرّار	vb	۸۶	۷۹	۲۲	۱۴		
	۲ـ بیتومن متوسط فرّار	mvb	۷۸	۶۹	۳۱	۲۲		
	۳ـ بیتومن پرفرّار الف	hvAb	۶۹			۳۱		(ب)۳۲/۵۶ [۱۴۰۰۰]
	۴ـ بیتومن پرفرّار ب	hvBb					۳۲/۵۶	۳۰/۲۴ [۱۳۰۰۰
ج- نیمه بیتومن	۵ـ بیتومن پرفرّار ج	hvCb					۳۰/۲۴ [۱۱۵۰۰	۲۶/۷۵ [۱۰۵۰۰
د- لیگنیت	۱ـ نیمه بیتومن الف						۲۶/۷۵ [۱۰۵۰۰	۲۴/۴۲ [۹۵۰۰
	۲ـ نیمه بیتومن ب						۲۴/۴۲ [۸۳۰۰	۲۲/۱۰ [۶۳۰۰
	۳ـ نیمه بیتومن ج						۲۲/۱۰	۱۹/۳
	۱ـ لیگنیت الف						۱۹/۳۱	۱۴/۵۶
	۲ـ لیگنیت ب						۱۴/۵۶	

الف) اعداد داخل کروشه Btu/lb می‌باشند. (mmmf=mineral matter and moisture-Free)

ب) زغال‌های با میزان درصد کربن ثابت کمتر از ۶۹ درصد براساس ارزش گرمایی طبقه‌بندی می‌گردند.

است. هوازده می‌شود و احتمال احتراق همزمان دارد، اما با درجهٔ کمتری نسبت به لیگنیت.

زغال سنگ قیری شکل (بیتومن)

با به همراه داشتن مواد فرار کم تا متوسط، جزو انبوه‌ترین نوع با درجهٔ خلوص متوسط تا بالاست. سیاه‌رنگ و لایه‌دار و دارای خاصیت کُک‌شو است.

طبقه‌بندی و ترکیبات موجود در زغال سنگ

کلیهٔ زغال‌ها را صرف نظر از منشأ تشکیل، سن و نوعشان، می‌توان برحسب افزایش میزان درصد کربن به ترتیب زیر دسته‌بندی نمود.

بدین ترتیب، زغال‌های نارس و لیگنیت جزء زغال‌های درجهٔ پایین در زغال‌های بیتومن و آنتراسیت جزء زغال‌های درجهٔ بالا محسوب می‌گردند و هدف از طبقه‌بندی‌های اولیه نیز مطالعه در خصوص ارتباط این درجه و خلوص زغال‌ها می‌باشد.

در حال حاضر برای طبقه‌بندی انواع زغال در عمل از جدول ویژه‌ای استفاده می‌شود که یک نمونه از این جدول‌ها در استاندارد ASTM آمده است (جدول ۱).

رده‌بندی مزبور در قالب چهار کلاس برای زغال صورت گرفته است که هر کلاس به چندین گروه تقسیم می‌شود. در این رده‌بندی، زغال خشک عاری از مواد معدنی و درجهٔ بالا تا ردهٔ زغال بیتومن متوسط فرار، براساس میزان مواد فرار و کربن ثابت و زغال‌های آب‌دار عاری از خاکستر درجات پایین‌تر، براساس ارزش گرمایی، طبقه‌بندی شده‌اند.

مسائل زیست‌محیطی

آلودگی‌های ناشی از زغال را در سه گروه زیر می‌توان دسته‌بندی نمود:

پسماندهای جامد. تأثیرات زیست‌محیطی از پسماندهای جامد زغال به منشأ و حجم آنها بستگی دارد. که در این میان، پسماندهای ناشی از کارخانه‌های زغال‌شویی نیز باید مدنظر قرار گیرند. تجمع پیریت می‌تواند موجبات بروز زیان‌هایی را فراهم آورد. مثلاً اگر تحت شرایطی

آنتراسیت ← بیتومن ← نیمه بیتومن ← لیگنیت ← زغال نارس

پیریت اکسید شود و یا در اثر نفوذ آب به انباشته‌های حاوی پیریت، اسید تولید خواهد نمود.

همچنین در اثر دفع ناقص پسماندها، مواد معدنی موجود در آن قادرند عناصر کمیاب و مضر خود را آزاد نمایند. اما ذرات ریز آلاینده، موضوع دیگری محسوب می‌گردد و در صورتی که در مقادیر زیاد در محیط تخلیه گردند، باعث آلودگی هوا و آب می‌شوند. ذرات ارگانیکی که اغلب شامل غبار زغال ناشی از حمل و نقل آن توشط کامیون‌های روباز یا واگنها، مراحل سنگ‌شکنی، آسیاب و خشک کردن (خشک کردن حرارتی) زغال در کارخانه‌های زغال‌شویی می‌باشند نیز مسئله‌ساز بوده و در این راستا ثابت شده است که غبارهایی که قابل تنفس باشند (lum-) برای سلامتی مضرند و اگر چنین ذراتی برای مدت طولانی استنشاق گردند، بیماری سیاه شدن ششها را به دنبال خواهند داشت.

پساب‌ها: به طور کلی می‌توان پساب‌ها را به دو دسته تقسیم نمود:

الف- آب‌های اسیدی زهکشی شده از معادن، اسید تولید شده در اثر شستشوی انباشته‌های زغال و با دمپ‌های پسمانده‌های معدن و پساب‌های اسید مشابه، ناشی از کارخانه‌های زغالشویی.

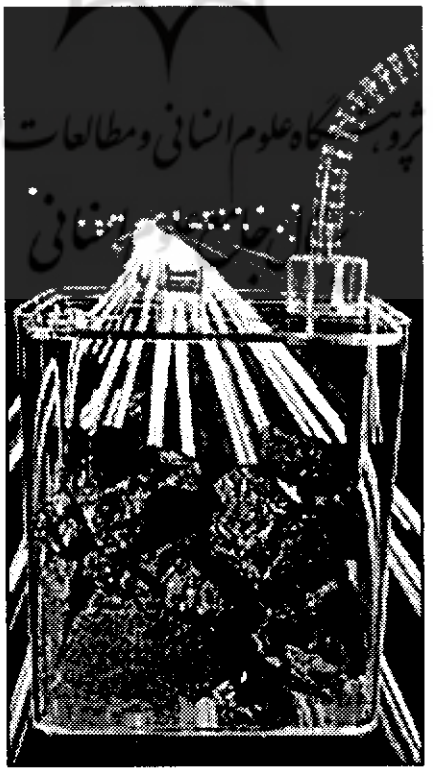
ب- پساب‌های ناشی از ایستگاه‌های حرارتی، کوره‌ای کک و سایر محصولات به دست آمده از تغییر شکل زغال.

پساب‌های اسیدی در نتیجهٔ اکسیداسیون Fes_x موجود در زغال و سنگ‌های دربرگیرندهٔ آن در معرض هوا و سپس انحلال سولفات آهن حاصله در آبهای نفوذی پدید می‌آیند. در ضمن پساب‌های ناشی از سلول‌های فلوتاسیون در کارخانه‌های زغالشویی نیز نقش عمده‌ای در آلودگی آب داشته و حاوی ذرات ریز رُسی و زغالی همراه با نفت و گازوییل روغن کاج می‌باشند که از ترکیب‌های آلوده و سمی محسوب گشته و اثرات زیست‌محیطی قابل ملاحظه‌ای را دربر دارند و باعث آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌شوند.

انتشار گاز: از میان چندین آلایندهٔ گازی منتشر شده از صنایعی که از سوخت زغال سنگ استفاده می‌کنند، خطرناکترین آنها از نقطه نظر زیست‌محیطی، So_x و NO_x ناشی از سوخت زغال سنگ می‌باشند. این گازها به شدت سمی بوده و قادرند با گذشت زمان در سیستم تنفسی اختلال ایجاد کرده و نیز رشد گیاهان را متوقف سازند. هم‌چنین این گازها در آب حل شده و باران‌های اسیدی را ایجاد می‌نمایند. به علاوه، زغال سنگ در هنگام سوختن بیشترین میزان ترکیب کربن‌دار را وارد هوا می‌کند. میزان انتشار دی‌اکسید کربن در اثر سوختن زغال سنگ، برحسب واحد انرژی آزاد شده ۸۰ درصد بیش از مشتقات نفت است.

به پیش‌بینی EIA، میزان انتشار گاز دی‌اکسید کربن بین سالهای ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۰ در همهٔ کشورهای جهان افزایش خواهد یافت. این افزایش در ایالات متحده ۳۴ درصد، در ژاپن ۲۵ درصد و در اروپای غربی ۱۳ درصد خواهد بود. اگر کاهش انتشار دی‌اکسید کربن در این کشورها طبق مفاد پروتکل کیوتو صورت پذیرد (یعنی حفظ میزان انتشار در سطحی معادل یا پایین‌تر از سال ۱۹۹۰)، در اغلب این کشورها رشد مصرف سوختهای فسیلی به ویژه زغال سنگ (خصوصاً در آمریکا شدیداً به آن وابسته است) محدود خواهد شد. همچنین EIA پیش‌بینی کرده است که زغال سنگ در سال ۲۰۲۰، پس از نفت (با ۳۹ درصد سهم)، بیشترین سهم را (۳۸ درصد) در انتشار دی‌اکسید کربن در سطح جهان خواهد داشت. ۲۳ درصد باقیمانده نیز تقریباً به تمامی گاز اختصاص خواهد یافت.

از نظر جغرافیایی نیز، در سال ۱۹۹۵ ایالات متحدهٔ آمریکا و چین به ترتیب با ۲۴ درصد و ۱۴ درصد صاحب بیشترین سهم در انتشار گاز دی‌اکسید کربن در جهان بوده‌اند. براساس پیش‌بینی، در سال ۲۰۲۰ میلادی چین با ۲۲ درصد مقام نخست و ایالات متحده آمریکا با ۱۹ درصد مقام دوم انتشار کربن در جو زمین را به خود اختصاص خواهند داد.



بالا بردن راندمان حاصل از سوزاندن زغال سنگ

اشکال اصلی و عمده در به کارگیری زغال سنگ، ایجاد آلودگی محیط زیست در اثر احتراق آن می‌باشد که بدترین نوع این آلودگی در اثر سوزاندن سنتی زغال سنگ یعنی به صورت کلوخه یا قطعات آجری شکل در دستگاههای مورد استفاده به وجود می‌آید. برای رفع این نقیصهٔ بزرگ و همچنین بالا بردن راندمان حاصل از سوزانیدن یک واحد وزنی زغال سنگ، چند روش مورد استفاده است که به شرح زیر می‌باشد:

گازی کردن زغال سنگ

در این روش، زغال سنگ در حرارت بالا، در مجاورت بخار آب و هوا یا اکسیژن خالص قرار گرفته و در نتیجه گازهای مختلفی که شامل منواکسید کربن، دی‌اکسید کربن، هیدروژن، متان و سولفید هیدروژن است، تولید می‌نماید. گازهای تولیدی سپس در مراحل دیگری مورد فرآورش قرار می‌گیرند تا به صورت قابل استفاده درآیند.

در این مراحل، ابتدا منواکسید کربن در اثر عکس‌العمل با آب تبدیل به هیدروژن و دی‌اکسید کربن می‌شود و سپس دی‌اکسید کربن و سولفید هیدروژن در یک سیستم تصفیه‌کننده از مدار خارج می‌شود که هر کدام موارد استفاده خاص خود را دارند. در مرحلهٔ بعدی و در صورت ادامهٔ عملیات، هیدروژن در عکس‌العمل با منواکسید کربن به صورت گاز متان درمی‌آید، که آن نیز مورد استفاد خاص خود را دارد.

درصد گازهای تولید شده توسط این روش که در دستگاه‌هایی به نام گازیفایر انجام می‌شود، بستگی به میزان اختلاط زغال سنگ و بخار و هوا و اکسیژن دارد. فشار دستگاه گازیفایر در هنگام گازی کردن نیز از مسائل مهم دیگر است که فشار بالاتر باعث ایجاد گاز متان بیشتری خواهد شد و با روش‌های مختلفی که در حال حاضر در جهان برای گازی کردن زغال سنگ به کار گرفته می‌شوند، می‌توان بسته به روش

انتخاب شده از هر واحد حجمی گازهای تولید شده بین ۱۷ تا ۴۴ درصد گاز هیدروژن و ۴/۵ تا ۲۳ درصد گاز متان دست آورد.

مایع کردن زغال سنگ

می‌توان از زغال سنگ فرآورده‌های مایع تهیه کرد و آنها را مانند فرآورده‌های نفتی به مصرف رسانید. در این صنعت، آلمانها از همهٔ کشورهای جهان پیشروتر بوده‌اند و به خصوص در زمان جنگ جهانی دوم با استفاده از روش‌های هیدروژن اسیدی فیشر- تروپس موفق به تهیهٔ سوخت هواپیما، بنزین و گازوییل گردیدند و قسمت اعظم احتیاجات خود را از این طریق تأمین می‌نمودند. به طور کلی، مایع کردن زغال سنگ به این طریق صورت می‌گیرد که زغال سنگ خرد شده و یک حلال به آن اضافه می‌شود تا به صورت لجن زغال درآید، سپس این ماده در مجاورت هیدروژن آن قدر حرارت داده می‌شود تا زغال به طور کامل به صورت محلول درآید. ماده‌ای که از این عمل حاصل می‌گردد، خنک می‌شود تا گازهای هیدروژن و سولفید هیدروژن و گازهای هیدروکربنی حاصل جدا شوند. مایع باقیمانده در فشار کم تقطیر می‌شود تا مواد قابل مایع شدن مجدد آن در فشارهای مختلف و در سطوح مختلف جدا گردند. مواد معدنی و ارگانیکی باقیمانده از این عمل، مجدداً جدا شده و در مرحلهٔ نهایی عمل سولفورزدایی از مواد مایع تولید شده که به صورت بنزین، گازوییل، گاز مایع و یا سایر فرآورده‌ها می‌باشند، انجام می‌پذیرد. عمل مایع کردن زغال سنگ دو روش کلی دارد که به نام‌های، مایع کردن مستقیم و مایع کردن غیر مستقیم معروف هستند. در روش مایع کردن مستقیم، در محلول زغال سنگ و هیدروژن در مجاورت یکدیگر قرار می‌گیرند و عمل صورت می‌پذیرد.

سه روش اصلی که امروزه برای مایع کردن مستقیم زغال سنگ مورد استفاده هستند عبارتند از:

ـ روش SRC-II که برای مایع کردن زغال‌سنگ‌های دارای سولفور و خاکستر زیاد به کار گرفته می‌شود.

ـ روش H-coal که در آن سعی شده است تا برای بهتر شدن کیفیت مایعات حاصل، تماس بین زغال سنگ، هیدروژن و کاتالیست مربوط طوری باشد که ایجاد چسبندگی و کلوخه ننماید.

ـ روش EDS که در آن هیدروژن، جای حالت گازی، به حالت محلول در یک حلال و در مجاورت یک کاتالیست در حرارت و فشار بالا در تماس با زغال سنگ قرار می‌گیرد.

در هر سه حالت مذکور، مایع ایجاد شده حالت نهایی خود را هنوز به دست نیاورده است و باید مجدداً در یک چرخهٔ اضافه شدن مجدد هیدروژن،کراکینگ و رفورمینگ محصول نهایی‌را به دست دهد که معمولاً شامل بنزین، گازوییل، سوخت جت و نفت کوره می‌باشد. مقدار ایسن محصولات متناسب با میزان سرمایه‌گذاری و روش اجرایی می‌باشد و به طورمثال می‌توان از یک عمل مایع کردن، فرآورده‌هایی شامل ۶۱ درصد سوخت جت، ۲۷ درصد بنزین، ۱۲ درصد نفت کوره یا ۹۱ درصد بنزین و ۹ درصد گازوییل به دست آورد. در طریقهٔ غیر مستقیم مایع کردن زغال سنگ در یک دستگاه گازیفایر زغال سنگ در مجاورت اکسیژن و بخار آب گازهای مختلف تولید می‌نماید و با تنظیم نسبت منواکسید کربن به هیدروژن در این گاز سنتز و تحت فشار و حرارت مجدد قرار دادن آن در مجاورت یک کاتالیست، بنزین یا متانول تولید می‌گردد که خود متانول نیز مجدداً در یک عمل فرآورش دیگر به بنزین تبدیل می‌شود. میزان و نوع محصولات به دست آمده در این عمل نیز بستگی به حرارت و فشاری دارد که گاز سنتز تولید شده تحت آن فشار و حرارت قرار می‌گیرد.

پودر کردن زغال سنگ

در این روش که به طور معمول در واحدهای بزرگ صنعتی و به خصوص در نیروگاه‌ها مورد استفاده است زغال سنگ حرارتی ابتدا خرد شده، سپس به پودر تبدیل می‌شود به طوری که چسبندگی لایه‌های آن به حداقل خود برسد.

سپس این پودر با فشار زیادی به داخل محفظهٔ احتراق رانده می‌شود، به طوری که یک حالت غبار مانند پیدا می‌کند و ضمن ترکیب با هوا محترق می‌گردد. برای آنکه احتراق به صورت هرچه کاملتر انجام شود، باید اتاق احتراق در فشاری بالاتر از فشار اتمسفر قرار داشته باشند.

استفاده از زغال سنگ به خصوص به عنوان سوخت نیروگاه‌های برق در کشورهای صنعتی دارای منابع زغال سنگ بسیار معمول می‌باشد و هر روزه نیز توجه بیشتری به این امر به عمل می‌آید به خصوص که ذخایر زغال سنگ جهان حدود ۴ برابر ذخایر نفتی آن (به صورت مقایسهٔ انرژی حرارتی معادل) می‌باشند. برای نشان دادن اهمیت موضوع کافی است گفته شود که ۸۸ درصد از زغال سنگ تولید شده در امریکا به مصرف تولید برق در نیروگاه‌های آن می‌رسد و این کشور درنظر دارد تا سال ۲۰۱۰ میلادی، ۲۹۰۰۰ مگاوات ظرفیت جدید نیروگاهی با استفاده از زغال سنگ وارد مدار تولید بنماید. از کشورهای دیگر در این خصوص، می‌توان از چین نام برد که برپایی سالانه ۱۰۰۰۰ مگاوات نیروگاه جدید برقی با استفاده از زغال سنگ را در برنامه‌های ۱۰ سال آینده خود دارد و کشورهای اندونزی و هند نیز به ترتیب درنظر دارند طی ۱۰ سال آینده ۳۱۰۰۰ مگاوات و ۱۰۰۰۰ مگاوات ظرفیت جدید نیروگاهی با استفاده از زغال سنگ ایجاد نماید.

تکنولوژی‌های مورد استفاده در تولید زغال سنگ

قوانین و مقررات محیط زیست به عنوان سرعت دهنده به مصرف بیشتر زغال سنگ و شتاب‌دهندهٔ تحولات تکنولوژیک محسوب می‌شوند تکنولوژی‌های موجود در زغال سنگ را به ترتیب زیر می‌توان برشمرد:

1- Integratged gasification Combined cycle (IGCC)

2- pressurised fluild Bed combustion (PFBC)

3- Atmospheric Fluidised Bed combustion (AFBC)

4- Advanced pulverised fuel (PF)

در یک بررسی که توسط IEA به عمل آمده، انتخاب تکنولوژی مناسب با توجه به چند عامل که در زیر آورد می‌شود، انجام می‌گیرد:

ـ تکامل یافتگی تکنولوژی
ـ اندازهٔ نیروگاه
ـ انعطاف در نوع سوخت
ـ کارایی حرارتی
ـ سابقهٔ عملکرد
ـ عملکرد در قبال محیط زیست
ـ قابلیت دسترسی دائمی در تعمیر پذیری
ـ موضوعات تأسیسات و ساختمانی
ـ هزینه‌های سرمایه‌ای

در بررسی به عمل آمده به این نتیجه رسیده‌اند که هیچ تکنولوژی‌ای، جوابگوی تمام ۹ قلم معیار مذکور نیست، در حالی که PF (Pulverised Fuel) به تکامل رسیده‌ترین تکنولوژی زغال سنگ است که فعلاً در حال کار کردن است. PF کارآترین تکنولوژی زغال سنگ

جدول ۲ـ خلاصهٔ عملکرد، کارآیی و سرمایه‌گذاری لازم در تکنولوژی‌های مختلف در زغال‌سنگ

وضعیت تکنولوژی	IGCC	PFBC	AFBC	Supercritical PF	Subcritical PF
تکامل یافتگی تکنولوژی	فقط یک واحد تجاری در حال کار کردن است	فقط پنج واحد	در واحدهای کوچک ۲۲۰۰ Mwe موجود است.	اکثراً ثابت شده است	کاملا اثبات شده است.
انعطاف‌پذیری سوختی	باید انواع زغال سنگ را بتواند استفاده کند، ولی ثابت نشده است.	هرچیز قابل سوختن می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد، ولی هنوز ثابت نشده است.	هرچیز قابل سوختن می‌توانند مورد استفاده قرار گیرد.	اکثر زغال سنگها را استفاده می‌کند، ولی در صورت تر بودن و تولید خاکستر، کارآیی خوبی ندارد.	اکثر زغال سنگها را استفاده می‌کند، ولی در صورت تر بودن و تولید خاکستر زیاد کارایی ندارد.
کارآیی حرارتی	بالاست و هرچه توربین گازی پیشرفت نماید کارآیی آن هم بالاتر می‌رود	ذاتا از IGCC پایین‌تر است، در صورت افزودن ژنراتور ثانویه افزایش هم خواهد داشت.	نسبتا پایین است، ولی در صورتی که دمای بخار به سوپر کرتیکال برسد، بالاتر می‌رود.	بالاست و در صورتی که مواد مورد استفاده بهبود یابند، این هم بهبود بیشتری خواهد داشت.	با شرایط بخار محدود می‌گردد.
هزینهٔ سرمایه‌ای	گران قیمت‌ترین است ۱۶۰۰-۱۵۰۰ دلار در هر کیلووات	گران قیمت ۱۵۰۰-۱۱۰۰ دلار به هر کیلووات	از PF و F6D ارزانتر است. ۱۶۰۰-۱۰۰۰ دلار در هر کیلووات	متوسط ۱۶۰۰-۹۵۰ دلار در هر کیلووات	۱۳۰۰-۹۵۰ دلار در هر کیلووات
دورهٔ شروع تا اتمام واحد	۴ سال	۴۲ ماه	۳۶-۲۴ ماه	۵۸-۳۸	۵۸-۳۸
ضریب کارآیی	٪۴۵-۴۳	٪۴۵-۴۲	٪۴۶-۴۰	٪۴۶-۴۰	٪۳۸-۳۶

می‌باشد. اگر انعطاف در سوخت مورد نظر باشد، AFBC کارآترین تکنولوژی زغال سنگ می‌باشد. در مقایسهٔ به عمل آمده، همچنین نتیجه‌گیری شده است که تکنولوژی‌هایی که در مراحل آزمایشی قدم می‌گذارند، سعی در پایین آوردن هزینه‌ها و قابل استفاده بودن تکنولوژی دارند تا افزایش در کارایی و غیره.

همان طور که در جدول ۲ مشخص است تکنولوژی‌ها در مراحل مختلف سیر تکامل تکنولوژیک خود قرار دارند و بسته به هدفی که دنبال می‌شود، می‌توانند در بازار فعلی استفادهٔ مورد نظر را پیدا کنند. ولی اگر واقعاً هدف بالا بردن کارآیی باشد، فعلاً فقط تکنولوژی PF است که اقتصادی می‌باشد. قابل استفاده بودن و پیشرفت‌های آتی در هر یک از تکنولوژی‌های نوین، مستلزم زمان و انگیزه‌هایی است که در زمان مناسب به صورت تجاری و عمومی مورد مصرف قرار گیرند.

در طی دههٔ آینده پیش‌بینی گردیده است که نیروگاه‌های برق از نوع PF در مناطق آسیای جنوب شرقی به خصوص چین و هندوستان ایجاد گردند که از کارایی کمتری نسبت به تکنولوژی‌های تمیز زغال سنگ برخوردار خواهند بود.

برای استفادهٔ بهتر از زغال سنگ، منافع و ارجحیت‌های تکنولوژی‌های جدیدزغال‌سنگ به خصوص PF درمناطق مذکورباید تشویق و ترویج گردد و در کشورهای توسعه‌یافتهٔ صنعتی نیز انگیزه‌هایی برای توسعهٔ صنایع و تکنولوژی‌های تمیزتر ایجاد گردد. آیندهٔ زغال سنگ در کنار عوامل دیگر، در گرو این پیشرفت‌ها خواهد بود.

پراکندگی و ذخایر زغال سنگ در جهان

میزان ذخایر زغال سنگ جهان در سال ۱۹۹۸ با کاهشی حدود ۴/۶ درصد نسبت به سال ماقبل آن به ۹۸۴/۲۱۱ میلیارد تن رسید. همچنین کفایت ذخایر زغال سنگ جهان تنها ۲ سال کاهش یافت و به ۲۱۸ سال رسید.

از کل ذخایر زغال سنگ موجود، ۵۰۹/۴۹۱ میلیارد تن آن مربوط به زغال سنگ آنتراسیت و بیتومینه، ۴۷۴/۷۲ میلیارد تن آن مربوط به زغال سنگ نیمه بیتومینه و لیگنیت بوده است. سهم هر یک از مناطق مختلف جهان از ذخایر زغال سنگ در سال ۱۹۹۸ بدین شرح بود:

آمریکای شمالی ۲۶/۱ درصد، آمریکای جنوبی و مرکزی ۲/۲ درصد، اروپا ۱۲/۴ درصد، شوروی سابق ۲۳/۴ درصد، افریقا و خاورمیانه ۶/۲ درصد، آسیا و اقیانوسیه ۲۹/۷ درصد. در جدول ۳، ذخایر تثبیت شدهٔ زغال سنگ جهان در پایان سال ۱۹۹۸ آورده شده است.

شایان ذکر است که بیشترین ذخایر زغال سنگ جهان همچنان به کشورهای ایالات متحده، شوروی سابق، چین، استرالیا، هند و آلمان تعلق دارد که در مجموع ۷۶/۲ درصد از کل ذخایر جهان را به خود اختصاص داده‌اند. در جدول ۴، پراکندگی کل منابع زغال سنگ جهان در مناطق مختلف جهان ارایه شده است.

زغال سنگ برخلاف نفت یا گاز طبیعی، از نظر کیفیت و ویژگی‌های جغرافیایی کالایی بسیار ناهمگون است. کیفیت و ویژگی‌های زغال سنگ از منطقه‌ای به منطقهٔ دیگر و حتی در معادن مجاور هم، با یکدیگر بسیار متفاوت است. مثلاً زغال سنگ استرالیا، ایالات متحدهٔ امریکا و کانادا از نوع کُک بسیار مرغوبی است که به ویژه برای مصرف در صنایع فولادسازی، ایده‌آل است. از این رو، این سه کشور روی هم رفته، ۸۶

جدول ۳ـ ذخایر تثبیت شدهٔ زغال سنگ جهان در پایان سال ۱۹۹۸

(میلیون تن)

نام مناطق و کشورها	آنتراسیت و بیتومینه	لیگنیت و نیمه بیتومینه	جمع	سهم در کل (درصد)	نسبت ذخایر به تولید
آمریکای شمالی					
ایالات متحدهٔ آمریکا	۱۱۱۳۳۸	۱۳۵۳۰۵	۲۴۶۶۴۳	۲۵/۱	۲۴۵
کانادا	۴۵۰۹	۴۱۱۴	۸۶۲۳	۰/۹	۱۱۴
مکزیک	۸۶۰	۳۵۱	۱۲۱۱	۰/۱	۱۱۰
جمع آمریکای شمالی	۱۱۶۷۰۷	۱۳۹۷۷۰	۲۵۶۴۷۷	۲۶/۱	۲۳۵
آمریکای مرکزی و جنوبی					
برزیل	-	۱۱۹۵۰	۱۱۹۵۰	۱/۲	*
کلمبیا	۶۳۶۸	۳۸۱	۶۷۴۹	۰/۷	۲۲۴
ونزوئلا	۴۷۹	-	۴۷۹	۰/۱	۸۱
سایر	۹۹۲	۱۴۰۴	۲۳۹۶	۰/۲	*
جمع آمریکای مرکزی و جنوبی	۷۸۳۹	۱۳۷۳۵	۲۱۵۷۴	۲/۲	*
اروپا					
بلغارستان	۱۳	۲۶۹۸	۲۷۱۱	۰/۳	۹۵
جمهوری چک	۲۶۱۳	۳۵۶۴	۶۱۷۷	۰/۶	۸۴
فرانسه	۹۵	۲۱	۱۱۶	-	۲۰
آلمان	۲۴۰۰۰	۴۳۰۰۰	۶۷۰۰۰	۶/۸	۳۲۲
یونان	-	۲۸۷۴	۲۸۷۴	۰/۳	۴۷
مجارستان	۵۹۶	۳۸۶۵	۴۴۶۱	۰/۴	۳۰۵
لهستان	۱۲۱۱۳	۲۱۹۶	۱۴۳۰۹	۱/۴	۸۰
رومانی	۱	۳۶۱۰	۳۶۱۱	۰/۴	۱۳۸
اسپانیا	۲۰۰	۴۶۰	۶۶۰	۰/۱	۲۶
ترکیه	۴۴۹	۶۲۶	۱۰۷۵	۰/۱	۲۵
انگلستان	۱۰۰۰	۵۰۰	۱۵۰۰	۰/۲	۳۶
سایر	۵۸۴	۱۶۹۵۴	۱۷۵۳۸	۱/۸	۲۶۹
جمع اروپا	۴۱۶۶۴	۸۰۳۶۸	۱۲۲۰۳۲	۱۲/۴	۱۵۸
شوروی سابق					
قزاقستان	۳۱۰۰۰	۳۰۰۰	۳۴۰۰۰	۳/۵	۴۸۷
فدراسیون روسیه	۴۹۰۸۸	۱۰۷۹۲۲	۱۵۷۰۱۰	۱۵/۹	*
اوکراین	۱۶۳۸۸	۱۷۹۶۸	۳۴۳۵۶	۳/۵	۴۴۶
سایر	۱۰۰۰	۳۸۱۲	۴۸۱۲	۰/۵	*
جمع شوروی سابق	۹۷۴۷۶	۱۳۲۷۰۲	۲۳۰۱۷۸	۲۳/۴	*
آفریقا و خاورمیانه					
آفریقای جنوبی	۵۵۳۳۳	-	۵۵۳۳۳	۵/۶	۲۴۸
زیمبابوه	۷۳۴	-	۷۳۴	۰/۱	۱۴۵
سایر	۵۰۹۵	۲۵۰	۵۳۴۵	۰/۵	*
خاورمیانه	۱۹۳	-	۱۹۳	-	۱۸۶
جمع آفریقا و خاورمیانه	۶۱۳۵۵	۲۵۰	۶۱۶۰۵	۶/۲	۲۶۶
آسیا و اقیانوسیه					
استرالیا	۴۷۳۰۰	۴۳۱۰۰	۹۰۴۰۰	۹/۲	۳۱۲
چین	۶۲۲۰۰	۵۲۳۰۰	۱۱۴۵۰۰	۱۱/۶	۹۲
هندوستان	۷۲۷۳۳	۲۰۰۰	۷۴۷۳۳	۷/۶	۲۳۳
اندونزی	۷۷۰	۴۴۵۰	۵۲۲۰	۰/۵	۸۷
ژاپن	۷۸۵	-	۷۸۵	۰/۱	۲۱۰

نام مناطق و کشورها	آنتراسیت و بیتومینه	لیگنیت و نیمه بیتومینه	جمع	سهم در کل (درصد)	نسبت ذخایر به تولید
زلاندنو	۲۹	۵۴۲	۵۷۱	۰/۱	۱۷۶
کره شمالی	۳۰۰	۳۰۰	۶۰۰	۰/۱	۲۰
پاکستان	-	۲۹۲۸	۲۹۲۸	۰/۳	*
کره جنوبی	۸۲	-	۸۲	-	۱۹
سایر	۲۵۱	۲۲۷۵	۲۵۲۶	۰/۲	۶۹
جمع آسیا و اقیانوسیه	۱۸۴۴۵۰	۱۰۷۸۹۵	۲۹۲۳۴۵	۲۹/۷	۱۴۶
کل جهان	۵۰۹۴۹۱	۴۷۴۷۲۰	۹۸۴۲۱۱	۱۰۰/۰	۲۱۸
شامل: کشورهای OECD	۲۰۶۴۸۳	۲۴۰۶۱۷	۴۴۷۱۰۰	۴۵/۴	۲۱۸
سایر کشورهای OEMEs	۲۰۵۴۴۸	۷۸۲۳۸	۲۸۳۶۸۶	۲۸/۸	۱۴۴

مأخذ: BP Amoco Statistical Review of World Energy, 1999

*** نسبت ذخایر به تولید بیش از ۵۰۰ سال می‌باشد**

جدول ۴ـ کل منابع زغال سنگ جهان [1]

(میلیارد تن معادل زغال سنگ)

نام مناطق	زغال سنگ سخت	زغال سنگ نرم و لینیت	جمع (10^{18} ژول)
آمریکای شمالی	۶۷۴	۲۰۱	۲۵۶۳۸
آمریکای لاتین و کارائیب	۳۷	۲	۱۱۴۳
اروپای شرقی	۳۳۷	۱۱	۱۰۱۹۶
اروپای غربی و مرکزی	۱۰۶	۱۴	۳۵۱۶
کشورهای شوروی سابق	۳۰۲۵	۷۵۱	۱۱۰۶۳۷
خاورمیانه و آفریقای شمالی	۱	۱	۵۸
کشورهای حاشیهٔ صحرای آفریقا	۱۸۱	<۱	۵۳۰۳
چین و آسیای مرکزی	۴۲۹	۳۵	۱۳۵۹۵
آسیای جنوبی	۸۴	۱	۲۴۹۱
دیگر کشورهای آسیای پاسیفیک	۱۳۹	۵۷	۶۰۳۰
OECD پاسیفیک	۱۳۹	۶۷	۶۰۳۰
جمع	۵۰۲۱	۱۰۸۹	۱۷۹۰۰۰

مأخذ: BGR. Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 1998.

۱ـ منابع: انباشت طبیعی سوخت‌های فسیلی و کانی شناخته شده‌ای که ارزش اقتصادی داشته یا آنکه ارزش اقتصادیشان در آیندهٔ نزدیکی قابل پیش‌بینی باشد.

ـ ذخایر: قسمتی از منابع شناخته شده هیدروکربورهای مایع یاگازی موجود در زمین می‌باشند که برآورد و اندازه‌گیری شده‌اند و در شرایط محلی زمان ارزیابی، به طور اقتصادی قابل استخراج هستند.

درصد صادرات جهانی کک را در سال ۱۹۹۶ در اختیار داشته‌اند.

در انتهای دیگر این طیف، انواع زغال سنگ قهوه‌ای یا زغال سنگ با ضریب حرارتی کم (لیگنیت) قرار دارد که می‌توان گفت تقریباً ارزش تجارتی بین‌المللی ندارد. در سال ۱۹۹۵،لیگنیت ۱۹ درصد کل تولید زغال سنگ جهان را تشکیل می‌داد. بزرگترین تولیدکنندگان آن آلمان، روسیه و ایالات متحدهٔ آمریکا بودند که ۴۴ درصد کل لیگنیت جهان را تولید می‌کردند. به علاوه، ارزش حرارتی لیگنیت استخراج شده از مناطق مختلف بسیار با یکدیگر تفاوت دارد. مثلاً هر تن لیگنیت کانادا ۱۳/۵ میلیون بی‌تی‌یو و هر تن لیگنیت یونان تنها ۵/۲ میلیون بی‌تی‌یو ارزش حرارتی دارد.

منابع:

۱ـ ترازنامهٔ انرژی سال ۱۳۷۷. دفتر برنامه‌ریزی انرژی وزارت نیرو

۲ـ طرح بهره‌گیری کاربرد بهینه انرژی، ذخایر انرژی و بهره‌برداری بهینه. ۱۳۷۳. مؤسسه مطالعات بین‌المللی انرژی

۳ـ طرح جامع بیست ساله گاز طبیعی کشور. فصل اول اقتصاد جهانی و تحولات انرژی. جلد سوم پتانسیل‌های انرژی‌های فسیلی، نفت خام و زغال سنگ. مؤسسه مطالعات بین‌المللی انرژی

۴ـ نگرشی بر تولید زغال سنگ و اثرات زیست‌محیطی آن. ناصر مهردادی. بابک وقار. بهرام رضایی. مجموعه مقالات دومین همایش ملی انرژی ایران. ۱۳۷۸ ■