روند جهانی تولید کنسانتره آهن و فـولاد و ارائه روش های کاهش میزان انرژی مصرفی

■ **فردیس نخعی** [*+]

دانشجوی دکتری فرآوری مواد معدنی، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

■ **مالک نادری** [1]

استادیار دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

■ **مهدی ایران نژاد** [2]

دانشیار دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

در این مقاله به تحلیل جریان تولید مواد و مصرف انرژی در صنایع معدنی آهن و فولاد در مقیاس جهانی، پرداخته می‌شود. این تحلیل‌ها نشان می‌دهد که تولید کنسانتره آهن جهان از 274 میلیون تـن در سـال 1950 بـه 3000 میلیـون تـن در سـال 2012 افزایش یافته است و در زمان مشابه تولید فولاد جهان از 207 به 1540 میلیون تن رسیده اسـت. از آنجـایی کـه میـزان تولیـد در صنایع معدنی و فولاد سازی به شدت رو به افزایش است، لذا صرفه جویی کم در مصرف انرژی می‌تواند در کل ذخیره انرژی بسـیار زیادی را شامل شود. ذخیره انرژی و کاهش گازهای آلاینده موضوع تحقیقاتی بسیاری از مقالات بـوده اسـت ولـی مطالعـات انجـام گرفته، محدود به اطلاعات کلی و کلیشه‌ای بوده و در سطح فرآیندی دارای ضعف هستند. در این مطالعه، ابتدا میزان ذخایر، تولیـد کنسانتره آهن و فولاد در جهان مورد بررسی قرار می‌گیرد، سپس به تحلیل میزان انرژی مصرفی در صنایع معدنی و فولاد بـه طـور مجزا پرداخته می‌شود. در نهایت پیشنهادهایی برای کاهش مصرف انرژی در مراحل مختلف تولیـد بیـان مـی‌شـود. بـالاترین سـهم انرژی مصرفی در فرآیند معدن کاری مربوط به فرآیند آسیاکنی (40 درصد) و انتقال مواد (در حدود 17 درصد) است. از آنجایی که چین بزرگترین تولید کننده فولاد در جهان (46 درصد فولاد جهان) و یکی از بزرگترین مصـرف کننـدگان انـرژی و تولیـد کننـده آلودگی است، در این مقاله به صورت موردی بررسی می‌گردد. بررسی نتایج نشـان داد در سـال 2007 بـا بکـارگیری فنـاوری‌هـای جدید، انرژی مصرفی کل، آب تازه و انتشار دی اکسید گوگرد به ازای هر تن فولاد 8، 24 و 4/5درصد در مقایسـه بـا سـال 2005، کاهش یافته است. همچنین نتایج نشان داد که انرژی مصرفی برای کوره‌های دمشی 2/5 برابر انرژی مصـرفی در کـوره‌هـای قـوس الکتریکی (100 درصد قراضه) است.

واژگان کلیدی: جریان تولید مواد، مصرف انرژی، آهن، فولاد، کوره‌های دمشی، کوره قوس الکتریکی.

---

* عهده دار مکاتبات

+ شماره نمابر: 66405846-021 و آدرس پست الکترونیکی: Fardis_nakhaei@aut.ac.ir

۱ شماره نمابر: 66405846-021 و آدرس پست الکترونیکی: Mnaderi@aut.ac.ir

۲ شماره نمابر: 66405846-021 و آدرس پست الکترونیکی: Iranajad@aut.ac.ir

1- مقدمه

توسعه پایدار با توجه به آینده مشترک انسان‌ها به معنی برآورده کردن نیازهای حال حاضر، بدون به خطر انداختن توانایی نسل‌های آینده است. توسعه پایدار مفهوم جدیدی است که به دلیل نگرانی‌های بشر در خصوص کمبود منابع طبیعی، رشد سریع جمعیت و تخریب شدید محیط زیست در کمیسیون جهانی محیط زیست براتلند در سال 1987 معرفی شد و در سال 1992 در کنفرانس ریو موردپذیرش کلیه کشورهای جهان قرار گرفت. بر این اساس دو چالش مهم در صنعت معدن و فولاد وجود دارد:

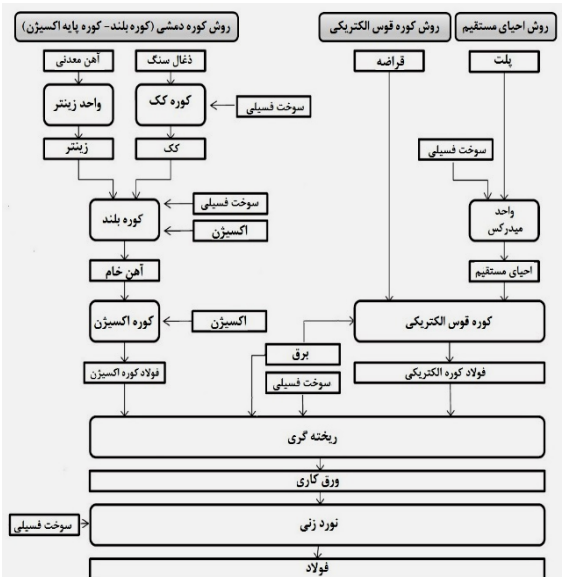
1- مدیریت پایدار منابع معدنی

2- تولید کنسانتره معدنی و در پی آن تولید فولاد که هر دو انرژی گسترده‌ای مصرف می‌کنند و آلودگی زیست محیطی زیادی ایجاد می‌کنند.

ارزیابی توسعه پایدار نیاز به دانشی از شاخص های تولید، میزان انرژی مصرفی (برق، سوخت)، آب مصرفی، باطله تولید شده و ایمنی و محیط زیست دارد. بهره وری انرژی یکی از عوامل کلیدی برای کاهش گازهای گلخانه‌ای، انرژی مصرفی و هزینه تولید است. به طور کلی، مطالعات بهره‌وری انرژی در صنعت معدن کاری و فولاد به سه بخش تقسیم می‌گردد. در ابتدا، باید بررسی میزان تولید و بهره‌وری انرژی صنعت معدن و فولاد با رویکرد مقایسه‌ای در سطح بین‌المللی صورت پذیرد. سپس به مطالعه عملکرد تولید و مصرف انرژی بر روی یک کشور خاص پرداخته شود و نهایتا روش‌های کاهش انرژی و آلودگی ارائه برای صنعت مربوطه پیشنهاد گردد.

از آنجایی که میزان تولید در صنایع معدنی و فولاد سازی بسیار زیاد است، لذا صرفه جویی کم در مصرف انرژی می‌تواند در کل شامل ذخیره انرژی بسیار زیادی گردد. در صنایع آهن و فولاد، فرصت‌های زیادی جهت افزایش راندمان و کاهش گازهای گلخانه‌ای وجود دارد که می توان به فراهم کردن فرآیند تولید پیوسته و بازیافت انرژی تلف شده اشاره کرد. مطالعات انجام شده بر روی عملکرد انرژی در بخش معدن کاری شامل عملیات استخراج، انتقال و فرآوری بسیار محدود و کلی است. دو مصرف کننده اصلی انرژی در معدن کاری، فرایندهای خردایش و انتقال مواد است که به عنوان فرصتی برای ذخیره انرژی پیشنهاد می‌گردد.

امروزه برای تولید فولاد از سنگ معدن آهن، از سه روش اصلی کوره بلند (دمشی)، احیا مستقیم و کوره قوس الکتریکی استفاده می‌گردد. مهمترین روش با استفاده از کوره دمشی و کوره اکسیژن پایه است. روش کوره قوس الکتریکی از قراضه ها به عنوان خوراک اولیه استفاده کرده و آنها را ذوب می‌کند. روش دیگر احیای مستقیم ماده معدنی به کمک گاز طبیعی است که محصول آن به کوره قوس الکتریکی ارسال می گردد. شکل شماره 1 دید کلی از فرآیندهای تولید فولاد به همراه حامل‌های انرژی را نشان می‌دهد.



شکل 1: روش‌های تولید فولاد

صنعت فولاد در طی 5 دهه اخیر قدم‌های بزرگی برای کاهش انرژی مصرفی به ازای هر تن فولاد برداشته است و در تحقیقات زیادی به این موضوع پرداخته شده است. ورل و همکاران (1997) انرژی مصرفی ویژه کشورهای آلمان، چین و برزیل بین سال‌های 1980-1991 را مقایسه کرده‌اند[1]. ژانگ و همکاران (2008) تأثیر بکارگیری فناوری‌های جدید در کارخانه-های فولاد چین بین سال‌های 1990- 2000 را ارائه داده‌اند[2]. ورل و همکاران (2001) گزارش جامعی در زمینه پتانسیل‌های صرفه جویی در مصرف انرژی و کاهش دی اکسید کربن در صنایع فولاد آمریکا ارائه کرده‌اند[3]. دی بر و همکاران (2000) تخمین زدند که راندمان صنایع فولاد با فناوری‌های موجود تا سال 2020، 29 درصد افزایش پیدا خواهد کرد[4]. دالمان و همکاران (2010) روش‌های محاسبه کارآیی انرژی برای هر فرآیند را مطالعه کرده‌اند[5]. فروندل و همکاران (2010) از سال 1990، به تحلیل انرژی مصرفی ویژه در آلمان پرداخته‌اند. آنها به تأثیر افزایش سهم تولید کوره‌های قوس الکتریکی نسبت به کوره‌های پایه اکسیژن در کاهش انرژی مصرفی اشاره کرده-اند[6].

هدف از این مطالعه، بررسی دقیق میزان انرژی مصرفی از عملیات معدن کاری تا تولید فولاد در سطح فرآیندی است. بدین منظور، در این مقاله در ابتدا میزان ذخایر آهن، تولید کنسانتره آهن و فولاد در جهان تحلیل می‌شود. سپس به بررسی میزان انرژی مصرفی در صنایع معدنی و فولاد به طور مجزا پرداخته می‌شود و در نهایت روش‌های نوین کاهش انرژی مصرفی بیان می‌گردد.

2- منابع آهن در جهان

2-1- کلیاتی در مورد آهن

آهن پر مصرف‌ترین فلز در سطح جهان است و در حدود 5 درصد پوسته زمین را تشکیل می‌دهد. آهن به جز در شهاب سنگ‌ها، هرگز به صورت یک فلز طبیعی یافت نمی‌شود. بیشتر کانسنگ‌های آهن به صورت اکسیدی، سولفیدی و درصد کمتری به صورت کربناته وجود دارند. برای اینکه سنگ آهنی به‌عنوان ذخیره باارزش معدنی در نظر گرفته شود، باید حاوی مقادیر نسبتا بالایی از آهن (حداقل 25 درصد و در ذخایر پلاسری در حدود 6 درصد) باشد. بیشتر از سیصد کانی حاوی عنصر آهن در طبیعت وجود دارد. کانی‌های هماتیت، مگنیتیت، گوتیت، سیدریت و پیریت پنج کانی اصلی ذخیره آهن هستند. در جدول شماره 1 کانی‌های اقتصادی سنگ آهن ارائه شده است. از میان کانی‌های ذکر شده مگنتیت و هماتیت به دلیل بالاتر بودن درصد آهن و آسان‌تر بودن روش فرآوری از اهمیت بیشتری برخوردار هستند[7].

جدول 1: کانی‌های اقتصادی آهن

نام کانی	ترکیب شیمیایی	درصد آهن
مگنتیت	Fe_3O_4	72/4
هماتیت	Fe_2O_3	70
لیمونیت	$.H_2OFe_2O_3$	60-63
سیدریت	$FeCO_3$	48/2
ایلیمینیت	$FeTiO_3$	36/8
پیریت	FeS_2	46/6
گوئتیت	$HFeO_2$	62/85

بیش از 98 درصد ذخایر معدنی آهن، برای تولید فولاد و مابقی آنها در صنایع دیگر نظیر شستشوی زغال و تولید سیمان استفاده می‌گردد[7].

2-2- ذخایر اقتصادی آهن جهان

تلاش‌های فراوانی برای ارزیابی تخمین ذخایر آهن جهان شده است. سازمان زمین شناسی ایالات متحده آمریکا منابع اقتصادی آهن دنیا را در سال 2012 در حدود 170000 میلیون تن تخمین زده است (ژانویه 2013). بزرگترین ذخایر آهن درکشورهای استرالیا، برزیل، روسیه، چین و اوکراین قرار دارد[8](جدول شماره 2).

جدول 2: بزرگترین ذخایر معدنی آهن در جهان

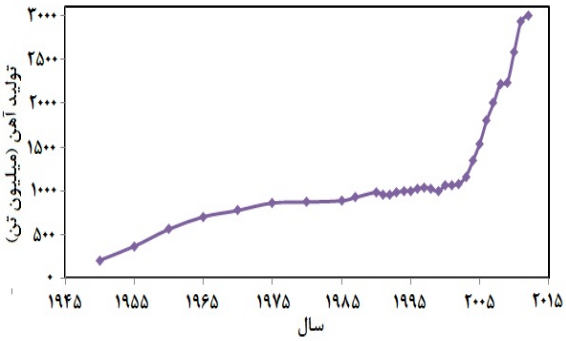
کشور	ذخیره معدنی (میلیون تن)	آهن محتوی (میلیون تن)
چین	23000	7200
برزیل	29000	16000
استرالیا	35000	17000
روسیه	25000	14000
اوکراین*	6500	2300
هند	7000	4500
آمریکا	6900	2100
دیگر کشورها	37600	16900
جهان	170000	80000
*براساس مدل‌های A+B+C1+C2	30000	9000

2-3- روند تولید کنسانتره آهن در جهان

از اوایل انقلاب صنعتی در اروپا، استفاده از فولاد به بخش ضروری صنعت تبدیل گردید و با افزایش تقاضای فولاد، بالتبع تولید کنسانتره آهن افزایش یافت. اگرچه تولید کنندگان آهن به طور گسترده در جهان توزیع شده‌اند (48 کشور) ولی حجم وسیعی از کنسانتره تولیدی آهن، در پنج کشور قرار دارد. بزرگ‌ترین تولیدکنندگان آهن در سال 2012، چین (42%)، برزیل (13%)، استرالیا (17%)، هند (8%) و روسیه (3/5%) هستند. اوکراین، آمریکا و کانادا در رده‌های بعدی قرار دارند. در جدول شماره 3 میزان تولید کنسانتره بزرگترین تولید کنندگان آهن جهان در سال‌های اخیر آمده است. شکل شماره 2 روند جهانی تولید کنسانتره آهن بین سال‌های 1950-2011 را نشان می‌دهد[8].

جدول 3: بزرگترین تولید کنندگان کنسانتره آهن جهان

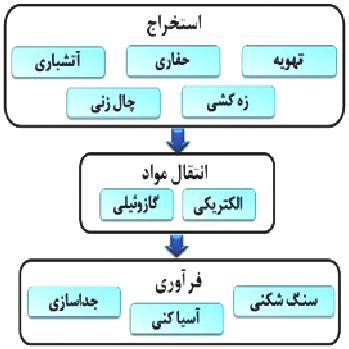
کشور	کنسانتره تولید شده (میلیون تن)						
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
چین	648	661	824	880	1070	1330	1300
استرالیا	303	353	342	394	433	488	525
برزیل	351	397	355	300	370	373	375
هند	154	176	220	245	230	240	245
روسیه	112	121	100	92	101	100	100
اوکراین	82	84	73	66	78	81	81
آمریکا	58	57	54	27	50	55	53
دیگر کشورها	276	245	252	236	258	273	321
جهان	1984	2094	2220	2240	2590	2940	3000



شکل 2: روند جهانی تولید کنسانتره آهن بین سال‌های 2012-1950

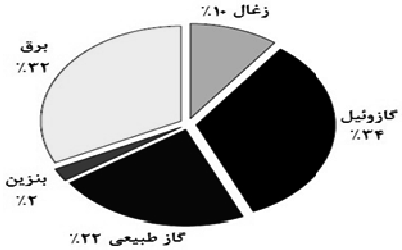
3- مصرف انرژی در بخش معدن

اگرچه معدن کاری می‌تواند منافع اقتصادی زیادی نظیر درآمدهای ملی، درآمدهای ارزی، اشتغالزایی، توسعه و ایجاد زیرساخت‌ها، انتقال و توسعه تکنولوژی، مهارت آموزی و آموزش کارکنان را دربرداشته باشد اما برای رسیدن به این هدف باید بر یک‌سری چالش‌هایی مانند مصرف انرژی غلبه کرد. به طور کلی فرآیندهای معدن کاری و تولید کنسانتره آهن با عیار مطلوب به سه بخش استخراج، انتقال مواد و پرعیار سازی تقسیم می‌گردد (شکل شماره 3). به منظور بررسی میزان مصرف انرژی در فرآیند معدن کاری هر تجهیز با کار مشخص در یک بخش جداگانه قرار می‌گیرد. انواع تجهیزات در جدول شماره 4 نشان داده شده‌اند. متأسفانه به دلیل عدم توجه به انرژی مصرفی در بخش معدن کاری، گزارشات رسمی کمی از آنها ارائه شده است ولی از آنجایی که بیشترین توسعه فرآیندهای معدن کاری مربوط به دهه اخیر است، لذا دستیابی و بررسی اطلاعات در این دهه ارزشمند و قابل تعمیم است. در این مقاله فرآیند معدن کاری بر روی هشت معدن فلزی ایالات متحده آمریکا (سال 2001) ارائه شده است. لازم به ذکر است در مطالعه حاضر، در حدود 8 درصد از میزان تولید، مربوط به معادن زیرزمینی و 92 درصد به معادن روباز اختصاص دارد[9].



شکل 3: مراحل مختلف تولید کنسانتره آهن

منابع اصلی انرژی در عملیات معدن کاری، مشتقات نفتی، الکتریسیته، زغال و گاز طبیعی است. سهم هر یک از این منابع انرژی در شکل شماره 4 نشان داده شده است. نوع سوخت مصرفی در واحد معدنی بستگی به نوع معدن (روباز و زیرزمینی) و فرآیند فرآوری دارد.



شکل 4: سهم منابع انرژی در بخش معدن کاری

برای هر تجهیز، انرژی مصرفی واقعی، مصرف انرژی با کارایی انرژی بالا (بهترین شرایط عملیاتی)، حداقل انرژی عملیاتی مورد نیاز پس از بهبود های قابل توجه در کارآیی انرژی و انرژی مصرفی تئوری (انرژی لازم برای تکمیل فرآیند) مورد بررسی قرار گرفتند. میزان انرژی ذخیره شده به عنوان اختلاف بین انرژی واقعی و حداقل انرژی عملیاتی با فرض نرخ تولید ثابت، بیان می‌شود. صنعت معدن آمریکا 72/6 میلیون تن کنسانتره فلزی در سال تولید می‌کند (سال 2001) که سهم آهن 63 میلیون تن در سال است. تخمین انرژی مصرفی در جدول شماره 5 آمده است.

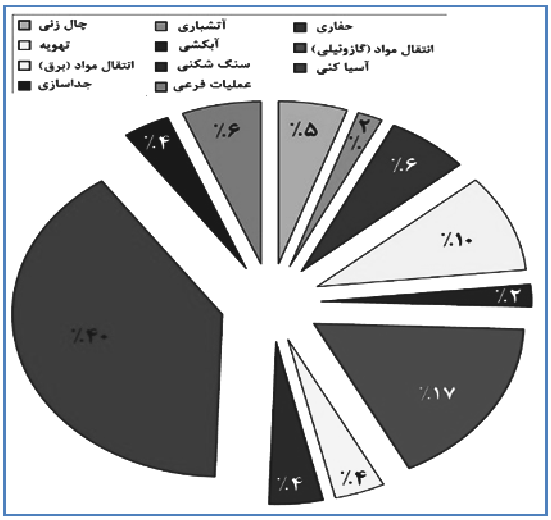
جدول 5: انرژی مصرفی واقعی در بخش معدن

کنسانتره تولیدی (Mt)	معدنکاری شده (Mt)	انرژی واقعی مصرف شده در معدن (Btu/t)	انرژی مصرف شده در صنعت معدن (TBtu/y)
72/6	1683	342200	552/1

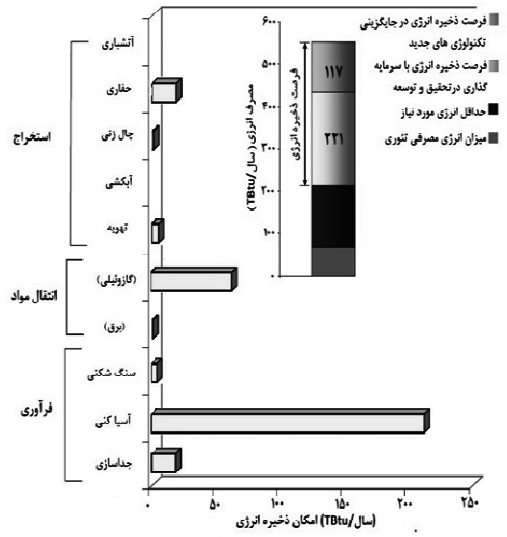
شکل‌های شماره 5 و 6 سهم انرژی مصرفی هر بخش معدن کاری را نشان می‌دهد. بالاترین سهم انرژی مصرفی مربوط به فرآیند آسیاکنی با 40 درصد و انتقال مواد در حدود 17 درصد است. دو مصرف کننده اصلی انرژی (آسیا کنی و انتقال مواد) به عنوان فرصتی برای ذخیره انرژی پیشنهاد می‌گردد. همانطور که در شکل شماره 7 نشان داده شده است، اگر انرژی مصرفی فرآیند آسیاکنی و انتقال مواد، فقط به میزان حداقل عملیاتی کاهش یابد، صنعت معدن تقریبا به میزان 300TBtu فرصت ذخیره انرژی دارد. به طور کلی نتایج نشان می‌دهدکه با سرمایه گذاری در جایگزینی فناوری‌های جدید و تحقیق و توسعه، صنعت معدن توانایی ذخیره 338TBt در سال را دارد[9].

جدول 4: رده بندی تجهیزات معدن کاری

عملیات	تجهیزات استخراج		عملیات	تجهیزات انتقال مواد	عملیات	تجهیزات فرآوری	
چالزنی	تراک حمل آنفو	حفاری ضربه ای	گازوئیلی	تراک	سنگ شکنی	اولیه	ثانویه
	حفاری الماسه	حفاری چرخشی		بولدوزر		ثالثیه	
آتش باری	ماده منفجره	خرج		لودر	آسیا کنی	خودشکن- نیمه خودشکن	سرند
حفاری	شاول‌های هیدرولیکی	شاول‌های کابلی		دامپ تراک		میله‌ای	هیدروسیکلون
	ماشین‌های معدنی پیوسته	ماشین‌های لانگ وال	الکتریکی	نوار نقاله		غلطکی فشار بالا	گلوله‌ای
	گریدر	دراگ لاین		پمپ	جداسازی	جداکننده مغناطیسی	تیکنر
تهویه	فن			خطوط لوله		استخراج حلال	الکترووینینگ
زه کشی	پمپ			جرثقیل		فیلتراسیون	فلوتاسیون

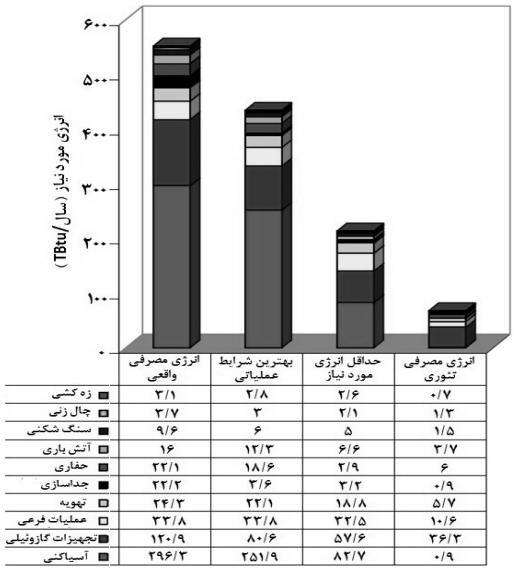


شکل 5: درصد توزیع سهم انرژی مصرفی واقعی هر بخش در معدن کاری[9]



شکل 7: فرصت‌های ذخیره انرژی در بخش‌های مختلف معدن کاری[9]

عملکرد عملیاتی نشان می‌دهد که کشورهای پیشرفته، صنایع معدنی خود را به سمت بهبود انرژی مصرفی پیش می‌برند. به دلیل اینکه معدنکاری، صنعتی با انرژی بالاست و بهره‌وری انرژی، عامل مهمی در رقابت‌های بین المللی است. همچنین در حدود 95 درصد از گازهای گلخانه‌ای معدنکاری ناشی از سوخت‌های فسیلی است.



	انرژی مصرفی واقعی	بهترین شرایط عملیاتی	حداقل انرژی مورد نیاز	انرژی مصرفی تئوری
زه کشی	۳/۱	۳/۸	۳/۶	۰/۷
چال زنی	۳/۷	۳	۲/۱	۱/۳
سنگ شکنی	۹/۶	۶	۵	۱/۵
آتش باری	۱۶	۱۲/۳	۶/۶	۳/۷
حفاری	۲۲/۱	۱۸/۶	۳/۹	۶
جداسازی	۲۲/۲	۳/۶	۳/۲	۰/۹
تهویه	۲۴/۳	۲۲/۱	۱۸/۸	۵/۷
عملیات فرعی	۳۳/۸	۳۳/۸	۳۲/۵	۱۰/۶
تجهیزات گازوئیلی	۱۲۰/۹	۸۰/۶	۵۷/۶	۳۶/۳
آسیاکنی	۲۹۶/۳	۲۵۱/۹	۸۲/۷	۰/۹

شکل 6: توزیع سهم انرژی هر بخش در فرآیند معدن کاری[9]

4- تولید فولاد

انقلاب صنعتی در اروپا با تولید انبوه فولاد توسط آقای هنری بسمر در سال 1856 آغاز گردید. فرآیند تولید فولاد بسمر توسط فرآیندهای زیمنس، مارتین و توماس تکمیل و بهینه گردید. روش تولید فولاد به روش کوره قوس الکتریکی و کنورتور اکسیژنی در سال‌های 1906 و 1952 به صنعت فولاد وارد شدند.

در سال 1860 میزان تولید فولاد در جهان 22000 تن بوده است. در حالی که در سال 2009 میزان تولید فولاد در جهان از مرز 1250 میلیون تن گذشت.

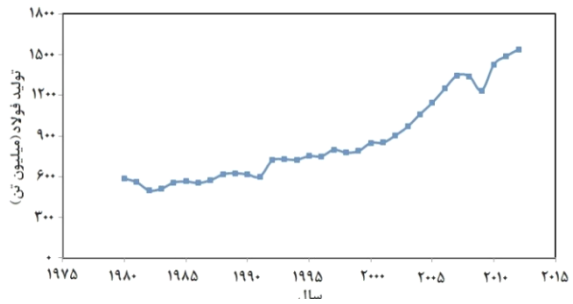
امروزه فولاد با زندگی روزمره بشر آمیخته شده است و اغلب اشیا و لوازم مورد استفاده بشر یا از فولاد ساخته شده‌اند و یا توسط ماشین، قالب و یا ابزارهای فولادی تهیه گردیده‌اند. مصرف سرانه فولاد در هر کشور نشانگر سطح توسعه یافتگی آن کشور است. به طور کلی در کشورهای در حال توسعه مصرف سرانه فولاد بین 100 تا 300 کیلوگرم و در کشورهای صنعتی و توسعه یافته بیش از 300 کیلوگرم است. تولید فولاد می‌تواند در یک مرکز یکپارچه یا در یک مرکز ثانویه به طور عمده از بازیافت قراضه انجام شود. از چدن تولید شده توسط کوره‌های بلند با استفاده از کوره‌های اکسیژن پایه فولاد خام تولید می‌شود. دومین روش ساخت فولاد اغلب در کوره‌های قوس الکتریکی رخ می‌دهد.

1-4- روند تولید فولاد در جهان

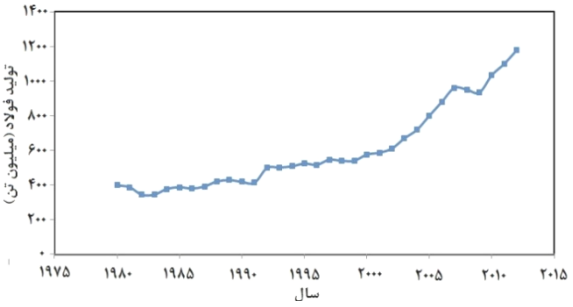
در سال 2009 کوره‌های اکسیژن پایه حدود 67/35 درصد و کوره‌های قوس الکتریکی 30/7 درصد از تولید فولاد جهان را به خود اختصاص دادند که این میزان در سال 2012 به ترتیب به 69/9 و 29 درصد رسیده است. شکل‌های شماره 8 تا 10روند تولید فولاد جهان را در بین سال‌های 2012-1980 نشان می‌دهد. چین دارای بالاترین سهم فولاد با کوره‌های پایه اکسیژن، آمریکا با بیشترین سهم تولید با کوره‌های قوس الکتریکی و اوکراین بالاترین تولیدرا با کوره‌های زیمنس مارتین دارد (جدول شماره 6) [11،10]. آنچه مشخص است که استفاده از کوره‌های اکسیژن پایه و قوس الکتریکی به طور نمایی افزایش می‌یابد ولی تا سال 2015، کوره‌های زیمنس به دلیل بهره‌وری پایین و انتشار گازهای گلخانه‌ای بیش از حد، کاملا منسوخ می‌شوند.

جدول 6 : سهم فرآیندهای تولید فولاد در کشورهای مورد مطالعه[11]

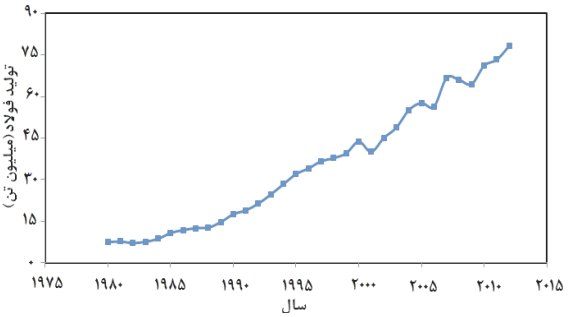
کشور	کوره دمشی اکسیژن پایه	کوره قوس الکتریکی	کوره زیمنس مارتین
استرالیا	82/2	17/79	-
برزیل	76/15	22/02	-
چین	87/56	9/1	-
هند	48/95	41/80	2/45
ژاپن	74/35	25/65	-
روسیه	61/61	16/33	22/07
اوکراین	49/95	9/83	40/24
آمریکا	45	58	-
جهان	67/35	30/7	1/95



شکل 8 : روند تولید فولاد خام در جهان[10]



شکل 9: روند تولید فولاد با استفاده از روش کوره دمشی در جهان[10]



شکل 10: روند تولید فولاد با استفاده از روش احیای مستقیم در جهان[10]

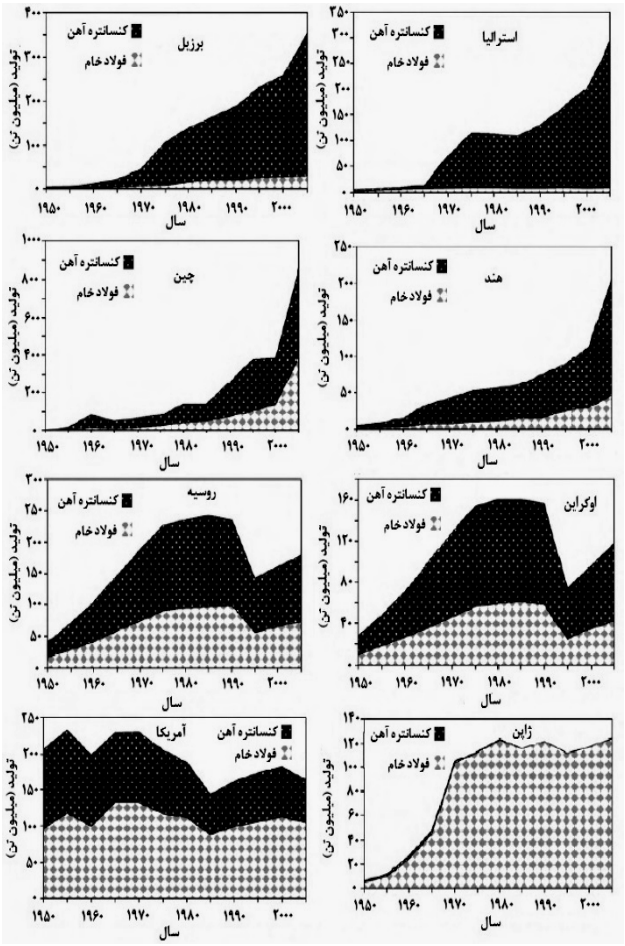
در سال 2011 میزان تولید آهن اسفنجی جهان بالغ بر 73 میلیون تن بوده است. کشورهای هند، ایران و مکزیک با تولید به ترتیب 21/97، 10/37 و 5/85 میلیون تن آهن اسفنجی رده‌های اول تا سوم را از آن خود کردند[12].

2-4- مقایسه روند تولید کنسانتره آهن و فولاد

تولید آهن و فولاد در کشورهای اصلی تولید کننده آهن و فولاد از سال1950 تا 2005 در شکل شماره 11 نشان داده شده است. تولید فولاد جهان در سال 2006 نسبت به سال 2005، 7 درصد افزایش یافته و از 1/14 گیگا تن در سال 2005 به 1/25 گیگا تن رسیده است. در سال 2006، تولید فولاد در چین نسبت به سال 2005، حدود 100 میلیون تن افزایش داشته است. دیگر کشورها (روسیه، ژاپن و آمریکا) روی همرفته 12 میلیون تن فولاد خام بیشتری نسبت به سال 2005 تولید کرده‌اند. تقریبا به طور میانگین تولید فولاد جهان به جز چین سالانه 35 میلیون تن افزایش دارد. برخلاف تولیدکنندگان آهن در اروپا و آمریکا که

بخش عمده محصولاتشان را داخل کشور مصرف می‌کنند، استرالیا و برزیل قسمت عمده کنسانتره تولیدی خود را صادر می‌کنند. استرالیا، برزیل و چین اکنون صادرکنندگان عمده ماده معدنی آهن در جهان هستند. دلیل اصلی آن دسترسی وسیع به آب‌های آزاد و حمل و نقل دریایی ارزان است. سهم استرالیا و برزیل در تولید آهن جهان از سال 2002 تا 2005 در حدود 35 درصد بوده است. ژاپن بزرگترین وارد کننده آهن بوده و ذخایر آهن بسیار اندکی دارد. تولید فولاد ژاپن افزایش چشمگیری از سال 1950 در حدود 5/3 به 124 میلیون تن در سال 2005 داشته است. برای بیشتر سال‌ها تولید ماده معدنی آهن در مورد ژاپن و آمریکا کاهش یافته، در مقابل تولید فولاد آنها افزایش داشته است.

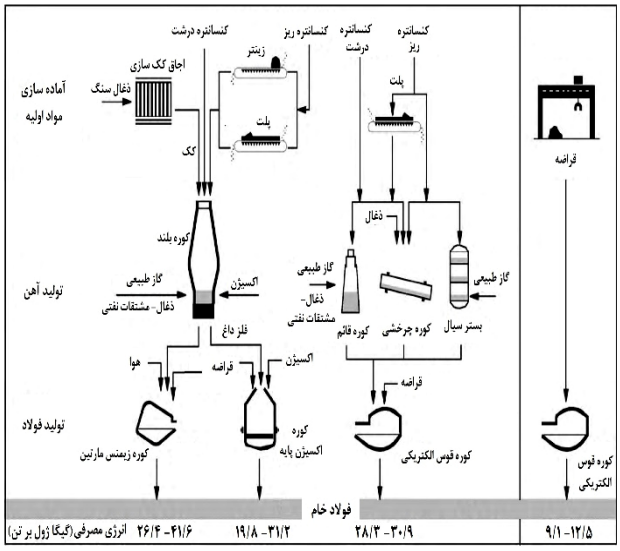
در طی سال‌های مورد مطالعه، میزان تولید آهن برزیل روند صعودی داشته، در حالی که تولید فولاد آن رشد کمی داشته است[14،13]. تولید آهن آن از 2/9 میلیون تن در سال 1950 به 322 میلیون تن در سال 2005 رسیده است و تولید فولاد آن از 0/79 به 31/61 میلیون تن افزایش داشته است. به طور مشابه تولید آهن استرالیا از 2/64 به 284 میلیون تن افزایش یافته درحالی که برای زمان مشابه تولید فولاد از 1/28 به 7/76 میلیون تن افزایش می‌یابد. تولید آهن چین از 2/20 به 470 میلیون تن رسیده است؛ در حالی که تولید فولاد آن از 0/61 به 356 میلیون تن افزایش می‌یابد. استرالیا و برزیل از ذخایر آهن و زغال بزرگی برخوردارند ولی بیشتر آنها به چین و اروپا صادر می‌شود که از لحاظ اقتصادی بسیار تأسف بار است. استرالیا جمعیت کمی داشته؛ لذا میزان قراضه تولید شده آن کم بوده و این یک عامل محدود کننده برای بازیافت فولاد است. بنابراین منطقی است استرالیا و برزیل فولاد را تولید و صادر کرده و از قراضه‌ها، برای کنترل تولید فولاد اولیه استفاده کنند. در بیشتر کشورهای با جمعیت بالا و بدون هیچ منابع معدنی مانند ژاپن، به منظور توسعه اقتصادی، بازیافت گسترده از قراضه‌ها امری منطقی است و این کشور در سال 2008 در حدود 44 میلیون تن فولاد، از قراضه‌ها تولید کرده است. روسیه و اوکراین روند تولید فولاد و آهن ثابتی داشته به طوری که تولید آهن روسیه از 23 میلیون تن در سال 1950 به حدود 106 میلیون تن در سال 2005 رسیده است[14،13].



شکل 11: تولید آهن و فولاد در کشور های اصلی تولید کننده آهن و فولاد از سال 1950 تا 2005[14،13]

5- مصرف انرژی در صنایع فولاد

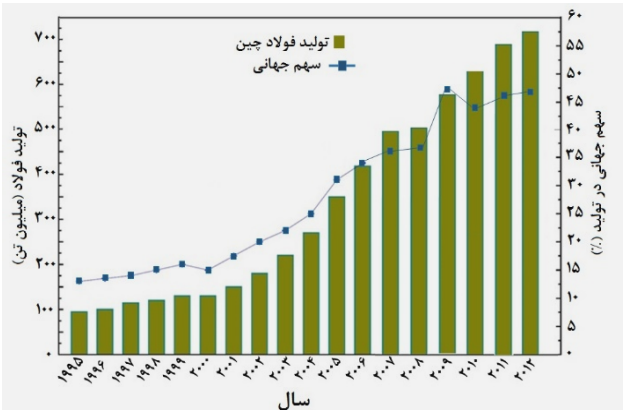
صنعت فولاد در هر کشور یکی از عمده‌ترین مصرف کننده‌های انرژی و انتشار دهنده‌های گاز دی اکسید کربن است، که حدود 5-3 درصد از گازهای گلخانه‌ای جهان را تولید می‌کند. بنابراین نیازمند توجه خاص در مقیاس محلی و جهانی است. صنعت فولاد در آمریکا بیشتر از 3 درصد کل انرژی مصرفی و بیشتر از 10 درصد انرژی مورد استفاده تمامی بخش‌های تولید کشور را به خود اختصاص می‌دهد. شکل شماره 12 شماتیک فرآیندهای تولید فولاد و انرژی مصرفی را نشان می‌دهد[11].



شکل 12: روش های تولید فولاد و میزان انرژی مصرفی [10]

مطالعه میانگین‌های جهانی انرژی مصرفی تولیدکنندگان فولاد (استرالیا (1996-2008)، برزیل (1980-1991)، چین (1980-1991)، هند (1977-2005)، ژاپن (1980-1991) و آمریکا (1950-2008)) نشان داد که در بین سال‌های 1990 و 1998 میانگین انرژی مصرفی از 31 به 21 گیگا ژول کاهش می‌یابد. آنچه به طور واضح مشخص است، کاهش قابل ملاحظه میانگین انرژی مصرفی جهان از 63 گیگاژول در 1950 به 18 گیگاژول در سال 2005 است. از دلایل عمده آن می‌توان به جایگزینی کوره‌های اکسیژن پایه به جای زیمنس مارتین، افزایش تولید با کوره‌های قوس الکتریکی و استفاده از فناوری-های بازیابی انرژی اشاره کرد. از 1950 تا سال 2005 نرخ انرژی مصرفی ویژه صنعت فولاد جهان 85 درصد کاهش یافته است[15،10].

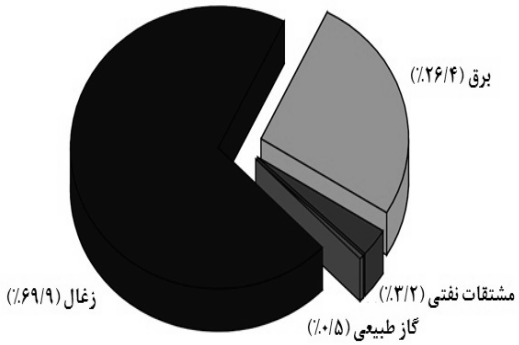
در دهه گذشته صنعت فولاد چین رشد بسیارسریعی داشته و امروزه بزرگترین تولید کننده فولاد در جهان است. علیرغم این دستیابی‌ها، کارایی انرژی در صنعت فولاد چین پایین بوده است و امروزه با توسعه علم و دانش و بکارگیری روش‌های جدید در صنعت، کارایی انرژی تا حدی بهبود یافته است. یک دلیل ساده آن، رشد سریع روش ریخته گری پیوسته است. سهم ریخته گری پیوسته از 30 درصد به 95 درصد در سال‌های 1992 به 2004 افزایش یافته است. در زمان مشابه، کارخانه‌های زیادی کوره‌های بلند را جایگزین کوره‌های زیمنس مارتین کردند. در دهه اخیر با بهبود روش‌های فنی در صنعت فولاد، سهم تولید به شدت افزایش یافت. سهم چین از تولید فولاد جهان از 13 درصد در سال 1995 به 34 درصد در سال 2006 و 46 درصد در سال 2012 رسیده است (شکل شماره 13)[16]. هدف از این بخش ارائه بررسی عوامل کلیدی در رابطه با توسعه صنعت فولاد چین و انرژی مصرفی است.



شکل 13: تولید فولاد چین و میزان سهم تولید آن در جهان در سال های 1995-2012

5-1- حامل‌های انرژی تولید فولاد در چین

در سال 2005 سهم حامل‌های انرژی مصرفی صنعت فولاد چین، 69/9 درصد زغال، 26/4 درصد الکتریسیته، 3/2 درصد سوخت‌های نفتی و 0/5 درصد گازهای طبیعی است که در شکل شماره 14 نشان داده شده است. زغال نه تنها به عنوان سوخت، بلکه به عنوان ماده خام در صنعت آهن و فولاد و مابقی آن در تولید برق مصرف می‌شود[17].

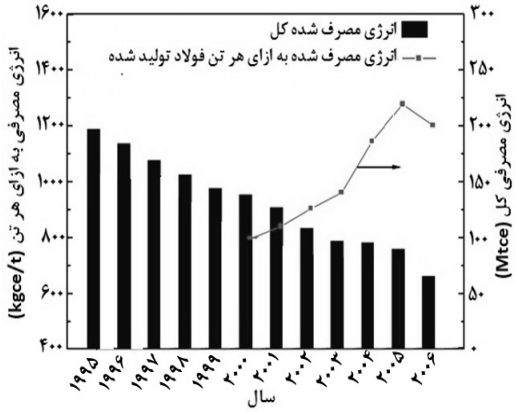


شکل 14: سهم حامل های انرژی در تولید فولاد چین در سال 2005

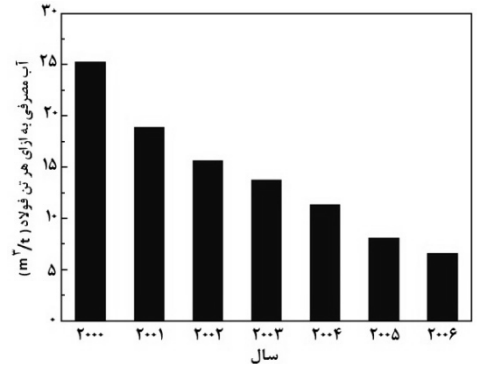
5-2- وضعیت مصرف انرژی در صنعت فولاد چین

روش تولید فولاد در چین نقش مهمی در میزان انرژی مصرفی ایفا می‌کند. در سال 2003، ده کارخانه بزرگ، بیشتر از یک سوم فولاد چین را تولید کرده‌اند. این نشان می‌دهد که فناوری‌های بسیار جدید در صنعت فولاد چین بکار گرفته می-شود. صنعت فولاد یکی از بزرگترین مصرف کنندگان انرژی و تولیدکنندگان آلودگی در چین به حساب می‌آید که 15/2 درصد از انرژی کل، 14 درصد از آب و گازهای آلوده و 6 درصد ذرات جامد باطله را در سطح ملی تولید می‌کند. شکل شماره 15 انرژی مصرفی صنعت فولاد چین را بین سال‌های 1995 تا

2006 نشان می‌دهد. در سال 2004 تولید کلی چین 274 میلیون تن بود که افزایش 107/7 درصدی نسبت به سال 2000 و 184 درصدی نسبت به سال 1995داشته است. مصرف انرژی کل با بالارفتن تولید افزایش می‌یابد، به طوری که میزان انرژی مصرفی کل از 96/3 Mtce[3] در سال 2000 به 198 Mtce در سال 2006 (حدود 2 برابر) افزایش یافت. هرچند این روند افزایشی در سال 2006 با کاهش 8/8 درصدی نسبت به سال قبل مواجه شد. با کاربرد وسیع فناوری‌ها و تجهیزات جدید، شاخص انرژی مصرفی به ازای هر تن در چین به طور چشمگیری کاهش یافته است. انرژی مصرفی کل به ازای هر تن فولاد در سال 2005 در حدود 741 kgce[4] بر تن بود که نسبت به سال 2000، 20 درصد کاهش داشته است. در سال 2006 هم این روند کاهشی ادامه داشت و انرژی مصرفی به 645 kgce بر تن فولاد رسید. روند میزان آب مصرفی تازه، به ازای تولید هر تن فولاد در شکل16 نشان داده شده است. مصرف کل آب به ازای هر تن فولاد تولیدی در سال 2006 در حدود 6/5 متر مکعب به دست آمد که 15 درصد کمتر از سال 2005 بود[18].



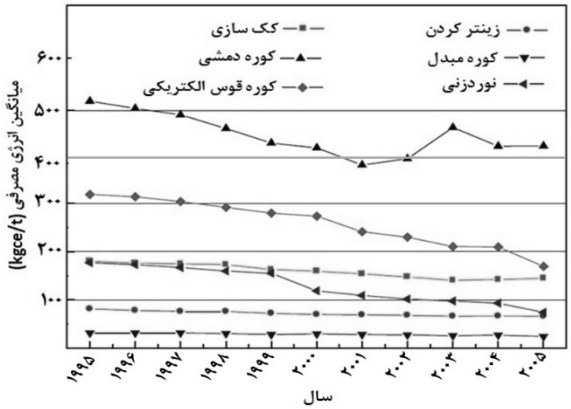
شکل 15: انرژی مصرفی صنعت فولاد چین را بین سال های 1995 تا 2006[17]



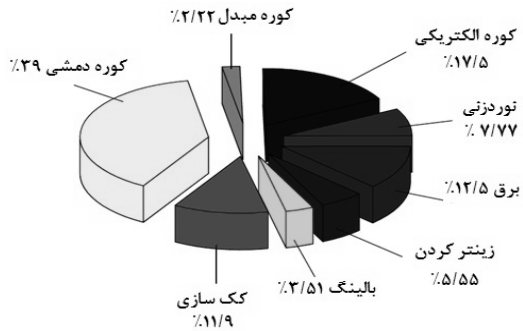
شکل 16: آب مصرفی تازه به ازای هر تن فولاد[17]

3-5- مصرف انرژی در فرآیندهای تولید فولاد چین

شکل شماره 17 تغییرات در مصرف انرژی در فرآیندهای مهم تولید فولاد چین در بین سال‌های 1995 تا 2005 را نشان می‌دهد. انرژی مصرفی در کوره‌های دمشی، الکتریکی و فرآیند نوردزنی به طور قابل توجه کاهش یافته و فرآیندهای دیگر نظیر کک سازی، تشویه، مبدل‌ها نرخ کاهش کمتری را نشان دادند. سهم مصرف انرژی هر یک از فرآیندهای تولید فولاد در چین در شکل شماره 18 نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که انرژی مصرفی برای کوره‌های دمشی 2/5 برابر انرژی مصرفی در کوره‌های قوس الکتریکی (100 درصد قراضه) است.



شکل 17: میانگین مصرف انرژی هر یک از فرآیند های تولید فولاد در چین[18]



شکل 18: سهم مصرف انرژی هر یک از واحد های تولید فولاد در چین

مصرف انرژی در چین در مقایسه با دیگر کشورها بالاتر است. در مقایسه با ژاپن، انرژی مصرفی شرکت‌های بزرگ و متوسط چین در سال 2004، 705 kgce بر تن فولاد بوده که 7/5 درصد بالاتر از ژاپن (656 kgce) است. کارایی انرژی کل، در صنعت فولاد چین به دلیل وجود واحدهای کوچک تولیدی، عدم وجود واحدهای متمرکز وکارایی کم بازیابی منابع انرژی ثانویه نسبتا پایین است[18].

3 Million Ton Coal Equivalent
4 Kilo Gram Coal Equivalent

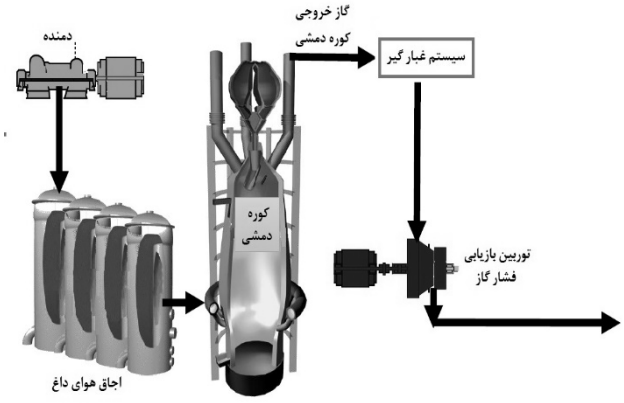
6- روش های نوین برای کاهش انرژی مصرفی

- **توسعه روش سرد کردن خشک کک**

به طور مرسوم، دمای کک داغ در محفظه کک سازی 1050-950 درجه سانتیگراد است که برابر 40-35 درصد میزان حرارت مصرف شده در فرآیند کک سازی است. با بکار گیری روش سرد کردن خشک کک می‌توان در حدود 80 درصد از حرارت کک داغ را بازیابی نمود. بر این اساس، در فرآیند سرد کردن خشک یک تن کک داغ می‌توان 0/6-0/45 تن بخار تولید کرد. در پایان سال 2005 سهم روش خشک کردن سرد کک در چین حدود 30 درصد بود، ولی سهم استفاده از آن در سال 2007 به 45 درصد رسید[18].

- **گسترش توربین بازیابی فشار گاز بالای کوره (TRT)**

برق می‌تواند با انرژی فشار گاز بالای کوره دمشی با استفاده از توربین‌ها تولید شود. در تولید فولاد با کوره‌های دمشی، افزایش فشار در بالای کوره به طور سودمندی منجر به بازیابی انرژی می‌شود. میزان برق تولید شده با زدودن گرد و غبار از گاز افزایش می‌یابد. در صورت استفاده از توربین‌ها می‌توان حدود 30 درصد انرژی را بازیابی نمود. فرآیند بازیابی فشار گاز کوره دمشی در شکل شماره 19 نشان داده شده است[19].



شکل 19: توربین بازیابی فشار گاز بالای کوره دمشی (TRT)

- **تزریق پودر زغال برای کوره های دمشی**

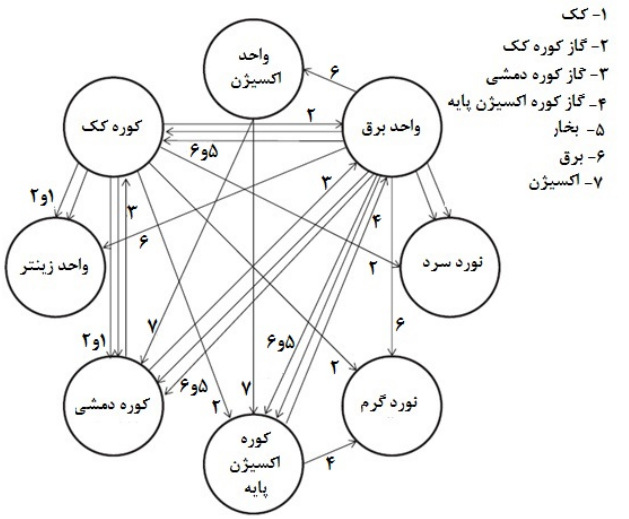
استفاده از فناوری تزریق پودر زغال دستاورد مهمی برای بهینه سازی سیستم‌های تولید فولاد در کوره‌های دمشی است. بعلاوه یک انگیزه قوی برای ارتقای صنعت فولاد و پیشرفت در بسیاری جنبه‌ها مانند بهینه سازی انرژی، ذخیره انرژی و کاهش مواد مصرفی و هزینه را ایجاد می‌کند. با جایگزینی زغال با کک می‌توان آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از تولید کک را کاهش داده و بازگشت سرمایه را از تفاوت قیمت کک و زغال فراهم کرد[20،18].

- **حذف تجهیزات سطح پایین و معرفی روش‌های جدید**

مصرف انرژی در واحدهای کوچک در حدود 1/5 برابر واحدهای متوسط و بزرگ است. زمان اجرای برنامه 5 ساله توسعه برای ذخیره انرژی و کاهش آلودگی در چین، تجهیزات و ظرفیت‌ها افزایش داده شدند و استفاده از فناوری‌های جدید شدت گرفت. در سال 2007 تعداد کوره‌های دمشی با ظرفیت 2000 متر مکعب، برابر 63 یعنی 17 تا بیشتر از سال 2005 بود و ظرفیت تولید 35 درصد افزایش یافت. در سال 2007، انرژی مصرفی کل، آب تازه و انتشار دی اکسید گوگرد به ازای هر تن 8، 24، 4/5درصد در مقایسه با 2005، کاهش یافت[2 و20].

- **ایجاد شبکه زنجیره‌ای بازیابی در صنعت فولاد**

هدف از ایجاد شبکه زنجیره‌ای، ابتدا بازیابی گازهای خروجی کوره دمشی، مبدل‌ها، کوره‌های کک سازی و تحقق بخشیدن انتشار گاز در حد صفر است. شکل شماره 20 سیستم جریان انرژی در یک واحد متمرکز فولاد سازی را نشان می‌دهد[20]. دوم بازیابی آب باطله و حداقل کردن آب تازه و نهایتا بازیابی ذرات جامد باطله است.



شکل 20: جریان انرژی در واحد های تولید فولاد متمرکز

7- نتیجه گیری

بخش صنعت آهن و فولاد یکی از مشکل‌ترین بخش‌ها برای تخمین انرژی مصرفی در مقیاس بین‌المللی به دلیل در دسترس نبودن اطلاعات است. در این مقاله، به بررسی جریان تولید مواد و انرژی در صنایع معدنی آهن و فولاد در جهان پرداخته می‌شود. با توسعه و گسترش روش‌های تولید آهن و فولاد، تولید آهن معدنی جهان از 274 میلیون تن در سال 1950 به 1554 میلیون تن در سال 2005 و 3000 میلیون تن در سال 2012

افزایش یافته است. همچنین در زمان مشابه تولید فولاد جهان از 207 به 1259 میلیون تن افـزایش داشـته و در سـال 2012 بـه 1540 میلیون تن رسیده است. از آنجـایی کـه میـزان تولیـد در صنایع معدنی و فولاد سازی به شـدت رو بـه افـزایش اسـت، لـذا صرفه جویی کم در مصرف انرژی می‌تواند در کل شـامل ذخیـره انرژی بسیار زیادی گردد. در این مطالعه تولیـد کننـدگان عمـده آهـن و فـولاد در جهـان از نظـر میـزان ذخیـره معـدنی، تولیـد کنسانتره و فولاد، صادرات و واردات و مصرف انرژی در بخش‌های مختلف از استخراج تا تولید فولاد خام مورد بررسی قرار گرفتند و در نهایت پیشنهادهایی بـرای کـاهش مصـرف انـرژی در مراحـل مختلف ارائه شد. مطالعـه میـانگین‌هـای جهـانی انـرژی مصـرفی تولیدکنندگان حاکی از کـاهش قابـل ملاحظـه میـانگین انـرژی مصرفی جهان از 63 گیگاژول در 1950 به 18 گیگاژول در سـال 2005 بود. دلیل عمده آن جایگزینی کوره‌های اکسیژن پایـه بـه جای زیمنس مارتین، افزایش تولید با کوره‌های قوس الکتریکی و استفاده از فناوری‌های بازیابی انرژی است.

بالاترین سهم انرژی مصرفی در فرآیند معدن کاری مربوط به فرآیند آسیاکنی با 40 درصد و انتقال مواد در حـدود 17 درصـد است. بررسـی نتـایج نشـان داد کشـور چـین در سـال 2007 بـا بکارگیری فناوری‌های جدید، انرژی مصرفی کل، آب تازه و انتشار دی اکسید گوگرد بـه ازای هـر تـن فـولاد 8، 24، 4/5درصـد در مقایسه با 2005، کاهش یافت.

تاریخ دریافت: 92/1/20 و تاریخ پذیرش: 92/6/24

فهرست منابع

[1] Worrell, E.; Price, L.; Martin, N.; Farla, J.; Schaeffer, R.; "*Energy intensity in the iron and steel industry: a comparison of physical economic indicators*", Energy Policy 25(7–9), p.p.727–744, 1997.

[2] Zhang, J.; Wang, G.; "*Energy saving technologies and productive efficiency in the Chinese iron and steel sector*", Energy 33(4), p.p. 525-37, 2008.

[3] Worrell, E.; Price, L.; Martin, N.; "*Energy efficiency and carbon dioxide emissions reduction opportunities in the US iron and steel sector*", Energy26(5), p.p. 513-536, 2001.

[4] De Beer, JG.; Harnisch, J.; Kerssemeeckers, M.; *Greenhouse gas emissions from iron and steel production. In*: IEA greenhouse gas research and development program, 2000.

[5] Dahlmann, P.; Endemann, G.; Kerkhoff, HJ.; Lüngen, HB.; "*WegezurEffizienzsteigerung in der Stahlindustrie. Düsseldorf: StahlinstitutVDEh*", Wirtschaftsvereinigung Stahl im Stahl-Zentrum, 2010 [in German].

[6] Frondel, M.; Grösche, P.; Halstrick-Schwenk, M.; Janßen-Timmen, R.; Ritter, N.; "*Die Klimavorsorgeverpflichtung der deutschenWirtschaft e Monitoringbericht 2009*". Essen: Rheinisch-WestfälischesInstitutfürWirtschaftsforschung, 2010 [in German].

[7] USGS; *Iron ore statistics and information*. US Geological Survey Minerals Information, US Department of Interior, 2011,http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/iron ore/ [accessed on December 15, 2011].

[8] Indian Bureau of Mines. *Iron ore*—a market survey. Issued by Controller General, Indian Bureau of Mines, prepared by mineral economics division, pp.153, 2007.

[9] BCS Incorporated, *Mining industry energy bandwidth study*, US. Department of Energy. June 2007.

[10] Worldsteel; *Steel and energy-fact sheet energy*, World Steel Association; 2012b, Available at: http://www.worldsteel.org/pictures/programfiles/Fact%20 sheet Energy.pdf.

[11] Worldsteel; *Steel statistical yearbook 2010*, IISI Committee on Economic Studies- Brussels, Worldsteel Association (Worldsteel); 2010.

[12] Worldsteel; *Direct reduced iron production*, World Steel Association; 2010b, Available at:http://www.worldsteel.org

[13] Jorgenson, JD.; *2006 minerals yearbook—iron ore*, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey; 2008 May, 22 pp.

[14] Yellishetty, M.; Ranjith, P.G.; Tharumarajah, A.; "*Iron ore and steel production trends and material flows in the world:Is this really sustainable?*" Resources, Conservation and Recycling 54, p.p. 1084–1094, 2010.

[15] International Energy Agency. Tracking industrial energy efficiency; 2007.

[16] http://www.sdpc.gov.cn/cyfz/hxfx/t20070126_113627.htm .

[17] Wang, K.; Wang, C.; Lu, XD.; Chen, JN.; *"Scenario analysis on CO2 emissions reduction potential in China's iron and steel industry*", Energy Policy 35, p.p. 20–35, 2007.

[18] Guo, Z.C.; Fu, Z.X.; "*Current situation of energy consumption and measures taken for energy saving in the iron and steel industry in China*". Energy 35, p.p. 4356–4360, 2010.

[19] Zhu, Q.; Geng., Y.; "*Drivers and barriers of extended supply chain practices for energy saving*", Journal of Cleaner Production, 2010.

[20] Arens, M.; Worrell, E.; Schleich, J.; "*Energy intensity development of the German iron and steel industry between 1991 and 2007*". Energy, 45, p.p. 786-797, 2012.