

توسعه یک مدل غیرخطی بهینه‌سازی جهت ارزیابی تاثیر استفاده از آهن اسفنجی روی سود تولید کوره‌بلندهای صنعت فولاد کشور (بررسی موردی: شرکت ذوب آهن اصفهان)

مهدی نصر آزادانی^۱، سید محمدرضا داودی^{۲*}، شهرام معینی^۳

۱- دانشجوی دکتری، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

۲- استادیار، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت، واحد دهقان، دانشگاه آزاد اسلامی، دهقان، ایران

۳- استادیار، گروه اقتصاد، دانشکده امور اداری و اقتصاد، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

رسید مقاله: ۱۰ بهمن ۱۳۹۹

پذیرش مقاله: ۱۱ مرداد ۱۴۰۰

چکیده

سخت‌گیری‌های روزافزون زیست‌محیطی شرکت‌های فولادی داخلی را با چالش جدی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای مواجه کرده‌است. در سال‌های اخیر شرکت‌های فولادسازی پیشرو، آهن اسفنجی را به‌عنوان ماده‌اولیه آهن‌دار سازگار با محیط‌زیست با بخشی از سنگ آهن و آگلومره در بار مواداولیه کوره‌بلندها جایگزین کرده‌اند و این باعث کاهش مصرف انرژی و انتشار گاز گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن همراه با تخفیف جریمه‌های زیست‌محیطی شده‌است. از دلایل ضرورت انجام این پژوهش متفاوت بودن شرایط فولادسازان داخلی با رقبای بین‌المللی به‌علت استفاده از سنگ آهن یارانه‌ای و گاز طبیعی ارزان قیمت، اختلاف زیاد قیمت آهن اسفنجی با سایر مواداولیه آهن‌دار و هزینه زیاد تامین کک و زغال‌خارجی ناشی از تحریم‌های تجاری است. بررسی استفاده از آهن اسفنجی روی هزینه تولید، بهره‌وری کوره‌بلند، و میزان انتشار گاز گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن می‌باشد. در این تحقیق یک مدل غیرخطی بهینه‌سازی برای پیشینه‌سازی سود تولید چدن در صنعت فولاد توسعه داده شده‌است. در این مدل نسبت به تحقیقات قبلی، تصمیم‌گیری بهینه در انتخاب جایگزینی مواداولیه به همراه محدودیت‌های جدید و توجه به محیط‌زیست ارایه شده‌است. مدل پیشنهاد شده با داده‌های کوره‌بلند شماره ۳ شرکت ذوب آهن اصفهان در نرم‌افزار متلب اجرا و اعتبارسنجی گردید. نتایج نشان می‌دهد که مدل پژوهش در کسب منافع اقتصادی و چگونگی جایگزینی مواداولیه به‌طور قوی موثر است.

کلمات کلیدی: مدل غیرخطی بهینه‌سازی، دی‌اکسید کربن، آهن اسفنجی، ذوب آهن.

* عهده‌دار مکاتبات

آدرس الکترونیکی: smrdavoodi@ut.ac.ir

۱ مقدمه

صنعت فولاد یکی از بخش‌های مهم و موثر در اقتصاد کلان کشور شناخته می‌شود. در شرایط کنونی حفظ و مدیریت ظرفیت‌های ایجادشده در زنجیره تامین تولید و فولاد از معدن کاری تا محصول نهایی و مدیریت فرصت‌ها و تهدیدها در مسیر بلوغ این صنعت در سند چشم انداز کشور هدف گذاری شده است. نیازهای مختلف تولید؛ ظرفیت‌ها و تنوع در کیفیت مواد اولیه از جمله مشکلات برخی از تولیدکنندگان محصول نهایی به شمار می‌رود. فولاد یک ماده‌ی آهنی است که از مقادیر کمی کربن و عناصر آلیاژی تشکیل می‌شود و می‌تواند به صورت هزاران ترکیب با خواص دقیق جهت برآورد نیازهای مختلف ایجاد شود. فولاد در مجموعه‌ی وسیعی از صنایع مانند تولید وسایل حمل و نقل از جمله، اتومبیل‌ها و راه آهن‌ها، خانه‌ها، انتقال انرژی مثل الکتروسیته و گاز طبیعی، تولید غذا به وسیله‌ی ماشین‌های کشاورزی، آبرسانی به وسیله‌ی پمپ‌ها و خطوط لوله و توجه به سلامتی با تجهیزات پزشکی کاربرد دارد. با توجه به تنوع استفاده از فولاد در دنیا و گسترده شدن مصرف فولاد، تولید فولاد همگام با پیشرفت تکنولوژی تغییرات بسیاری داشته است، که در پی این تغییرات تولیدکنندگان سعی در بالا بردن بهره‌وری و استفاده از انرژی و سوخت‌های ارزان‌تر با توجه به محیط جغرافیایی خود کرده‌اند. امروزه فن‌آوری‌های مورد استفاده در تولید محصولات فولادی در مراحل بعد از به دست آوردن فولاد خام^۱ یعنی ریخته‌گری و نورد، کم و بیش یکسان است؛ اما برای تولید فولاد خام دو فرآیند عمده زیر وجود دارد:

تولید چدن مذاب^۲ در کوره بلند و سپس تولید فولاد در کنورترهای اکسیژنی، که این روش در کارخانه ذوب آهن اصفهان انجام می‌شود و از احیای غیرمستقیم آهن استفاده گردیده، سنگ آهن پس از فرآوری به همراه آهنک و کک وارد کوره بلند شده، آهن خام یا چدن مذاب به دست می‌آید. در مرحله‌ی بعد، چدن مذاب در یک کوره اکسیژنی مبدل به نام کنورتور^۳ به فولاد مذاب تبدیل گردیده، کربن، فسفر و ناخالصی‌های دیگر آن به کمک اکسیژن خارج و فولاد خام تولید می‌گردد. امروزه ۹۳٪ از کل آهن خام تولیدی در جهان به وسیله کوره‌بلندها تولید می‌شود و ۶۶٪ از کل فولاد خام از این روش فرآیند تولید می‌شود که این اهمیت و جایگاه ویژه کوره‌بلند را در تولید فولاد نشان می‌دهد.

تولید آهن اسفنجی^۴ به روش احیای مستقیم سنگ آهن و ذوب آهن اسفنجی و قراضه در کوره‌های قوس الکتریکی^۵ است که این فرآیند تولید در کارخانه‌هایی چون فولاد مبارکه و فولاد خوزستان انجام می‌شود. در این روش می‌توان به همراه قراضه از آهن اسفنجی نیز برای ذوب در کوره قوس الکتریکی استفاده نمود و در حدود ۵٪ از کل آهن خام به وسیله واحدهای احیاء مستقیم و ۳۱٪ از کل فولاد خام از این روش فرآیند تولید می‌شود. لازم به ذکر است که سهم اندکی از تولید فولاد به روش‌های دیگری نظیر روش کوره باز نیز انجام می‌گیرد که طبق آمار جامعه‌ی جهانی فولاد حدود ۳ درصد از کل تولید فولاد جهان می‌باشد [۱]. امروزه شرط بقاء هر واحد فولادی امکان تولید در شرایط رقابتی و با رعایت استانداردهای محیط‌زیستی است. کوره‌بلند مهم‌ترین بخش یک

¹ Crude steel

² Hot metal

³ Converter

⁴ DRI

⁵ Electric arc furnaces

کارخانه فولادسازی است و هزینه اصلی تولید این واحد شامل هزینه‌های مواد اولیه آهن دار، انرژی، نیروی انسانی، تعمیر و نگهداری نقش موثری در رقابت پذیری فولادساز خواهد داشت. مواد اولیه آهن دار کوره بلند از ترکیب نسبت متفاوتی از آگلومره^۱، گندله^۲ و سنگ آهن درشت دانه^۳، و از معادن با عیارهای آهنی مختلفی همراه با کک متالوژی به عنوان منبع اصلی تامین انرژی و گازهای احیاء کننده تامین می‌شوند [۱]. میزان مصرف کک و هزینه انرژی کوره بلند نیز وابسته به نوع و نسبت ترکیب مواد اولیه آهن دار کوره می‌باشد. با لحاظ محدودیت‌های فنی جهت کاهش هزینه‌های انرژی کوره بلند امکان جایگزینی بخشی از کک با سوخت‌های فسیلی چون مازوت^۴، گاز طبیعی و پودرزغال^۵ وجود دارد. در کوره بلند مقدار مصرف موادی چون آهک و دولومیت و روانسازها تابع ترکیب شارژ مواد آهن دار و محدودیت‌های فنی است.

در برخی از کارخانه‌های فولادسازی نسبت ترکیب مواد اولیه کوره بلندها به صورت تجربی و توسط متخصصین فنی در فرآیندهای کک‌سازی، آگلومراسیون و کوره بلند با توجه به قیمت، تحلیل، و مقدار قابل تامین در بازار محاسبه می‌شود که این کاری وقت گیر و بر مبنای سعی و خطا خواهد بود [۲]. وضعیت کسب و کار فعلی تولید فولاد در جهان بسیار رقابتی است و کاهش هزینه‌های تولید در بخش کوره بلند باعث کاهش کل هزینه‌ها، و امکان رقابت پایدار را ممکن می‌سازد از این رو پیدا کردن مدلی جهت مدیریت این هزینه‌ها به وسیله تنظیم نسبت ترکیب مواد اولیه آهن دار کوره بلند به منظور حصول پیشینه سود تولید، در رقابت پذیری اهمیت بسیاری دارد [۳].

هدف اصلی کارگاه‌های کوره بلند در ذوب آهن تولید چدن مذاب جهت تولید فولاد در بخش فولادسازی است. ابتدا فرآیند تولید چدن در کوره بلند به اختصار شرح داده می‌شود.

اکسیدهای آهن در قالب سنگ آهن درشت دانه به صورت هماتیت^۶ (Fe_2O_3) یا مگنتیت^۷ (Fe_3O_4) و با عیار آهن حدود ۶۰٪ به طور مستقیم بدون هیچ عملیات اضافی به داخل کوره بلند وارد می‌شوند و یا بعد از فراوری سنگ آهن ریزدانه در واحدهای گندله‌سازی و کلوخه‌سازی به صورت آگلومره یا گندله به کوره بلند بار می‌شوند. آهک، دولومیت^۸ و کوارتزیت^۹ برای تنظیم درجه قلیایی سرباره به کوره بلند شارژ می‌شوند. در واحد کک‌سازی زغال کک شو وارد باطری‌های کک می‌شوند و بعد از طی زمانی بین ۱۸ تا ۲۴ ساعت و جداسازی مواد فرار و گوگرد تبدیل به کک می‌شوند. کک محتوی ۹۰٪ تا ۹۳٪ کربن است و منبع تولید انرژی و گاز احیاء اکسیدهای آهن در کوره بلند است.

در این مطالعه کوشش می‌شود با توسعه و تکمیل آخرین مطالعات قبلی، با اضافه نمودن محدودیت‌های فنی جدید، لحاظ تلفات حرارتی کوره بلند، بررسی اثر سوخت‌های کمکی گاز طبیعی، مازوت، پودر زغال و محاسبه

¹ Sinter

² Pellet

³ Lump

⁴ Oil

⁵ Pulverized coal

⁶ Hematite

⁷ Magnetite

⁸ Dolomite

⁹ Quartzite

مقدار دقیق کک، مدلی طراحی شود که در مدیریت و برنامه‌ریزی تامین و تدارک کوتاه‌مدت و بلندمدت مواد اولیه آهن‌دار، کک و تولید اقتصادی در کنار توجه به محیط‌زیست موثر باشد [۲]. مدل این پژوهش در نرم افزار متلب اجرا می‌شود و می‌تواند علاوه بر سود تولید میزان مصرف کک، هزینه کک مورد نیاز، اثر استفاده از آهن اسفنجی در کوره بلند روی سود تولید و میزان انتشار گاز دی‌اکسید کربن، درجه حرارت گاز جلو فرمها، دما و ترکیب شیمیایی گازدهانه، مقدار هوای دم مورد نیاز و تاثیر غنی‌سازی هوای دم با اکسیژن را پیش‌بینی و ارایه دهد. در ذوب آهن اصفهان به‌عنوان کارخانه فولادسازی مورد مطالعه به‌علت شرایط رقابتی فضای کسب و کار و سخت‌گیری‌های زیست‌محیطی با چالش‌های جدی فنی و اقتصادی مرتبط با تامین مواد اولیه مواجه شده‌است. با توجه به تنوع معادن و منابع تامین‌کننده مواد اولیه و همچنین محدودیت‌های موجود برای دسترسی به هریک از این منابع، هزینه تامین آنها و محدودیت‌های زیست‌محیطی، برای ذوب آهن گزینه‌های مختلفی برای تامین مواد آهن‌دار متصور است. استفاده از آهن اسفنجی به‌عنوان مواد اولیه آهن‌دار کوره‌بلند و تاثیر آن در کاهش انتشار آهن اسفنجی مطالعه شده است [۴]. ولی پژوهشی بر اساس ممیزات اقتصادی خاص کشور ایران یعنی استفاده از سنگ آهن و گاز طبیعی ارزان قیمت یارانه‌ای توسط تولیدکنندگان فولاد انجام نشده است. بنابراین نتایج پژوهش‌های قبلی برای فولادسازهای داخلی چون ذوب آهن اصفهان قابل استفاده نمی‌باشند. در این پژوهش با در نظر گرفتن ممیزات اقتصادی کشور و با توسعه مطالعه و مدل ژانگ و همکاران [۲]، تابع هدف پیشنهادی کردن سود عملیاتی تولید تعریف شده‌است. بر این اساس این سوال مطرح است که کدام مجموعه انتخاب، ضمن سازگاری با محدودیت‌ها می‌تواند بیشترین سود و رقابت‌پذیری تولید را به همراه داشته باشد و چگونه می‌توان یک مدل غیرخطی بهینه‌سازی جهت ارزیابی تاثیر استفاده از آهن اسفنجی روی سود تولید کوره‌بلندهای صنعت فولاد کشور توسعه داد؟

بر اساس اطلاعات حوزه مالی و اقتصادی کارخانه، در ذوب آهن در سال ۱۳۹۹ به‌طور تقریبی به ترتیب ۵۰٪ و ۲۳٪ قیمت تمام‌شده برای تولید هر تن محصول نهایی نوردی، ناشی از هزینه کک و هزینه مواد اولیه آهن‌دار کوره‌بلند است. این شاخص‌ها در اتحادیه اروپا به ترتیب و به‌طور متوسط ۲۰/۵۶٪ و ۲۰/۹۱٪ هستند. در این مقاله نتایج حاصل از مدل با نتایج تجربی اندازه‌گیری شده برای کوره‌بلند شماره ۳ ذوب آهن مقایسه شده و نتیجه‌گیری می‌گردد که به کارگیری مدل می‌تواند منافع اقتصادی زیادی داشته باشد. پرسش اصلی و فرعی پژوهش به ترتیب زیر تعریف می‌شود.

چگونه می‌توان با طراحی مدلی، با تنظیم ترکیب مواد اولیه آهن‌دار کوره‌بلند به سود بهینه تولید در کوره‌بلندها دست یافت؟

استفاده از آهن اسفنجی به‌عنوان ماده آهن‌دار در کوره‌بلند شماره ۳ ذوب آهن چه تاثیری روی سود تولید و انتشار گاز گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن دارد؟

در ادامه و در بخش ۲، پیشینه تحقیق و مبانی نظری بررسی شده است. در بخش ۳، مدل ریاضی تحقیق ارایه شده است. در بخش ۴، روند اجرا و حل مدل بررسی گردیده است. در بخش ۵، جایگزینی آهن اسفنجی به‌جای

آگلومره بحث شده است. در بخش ۶، اعتبارسنجی مدل با مقایسه خروجی های مدل با نتایج تجربی انجام گردیده است و در نهایت نتیجه گیری و پیشنهادها برای انجام پژوهش های آتی در بخش ۷ ارایه شده است.

۲ پیشینه پژوهش

تولید فولاد در دهه های اخیر رشد سریعی را شاهد بوده است به طوری که تولید جهانی فولاد از ۲۰۰ میلیون تن در سال ۱۹۵۰ به بیش از ۱۸۷۷ میلیون تن در سال ۲۰۲۰ رسیده است و این روند صعودی، افزایش تقاضا برای مواد اولیه و انتشار حدود ۷٪ از کل گازهای گلخانه ای جهان توسط این صنعت را در پی داشته است [۵]. محدودیت در تامین مواد اولیه آهن دار، کک و زغال در کنار سخت گیری های زیست محیطی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه ای باعث شده است که امروزه انتخاب بهینه نوع و ترکیب مواد آهن دار کوره بلندها جهت ادامه کار اقتصادی و پایدار، مورد توجه جدی تولیدکنندگان فولاد واقع شود. در ایران در پنج دهه پیش با بهره برداری از کارخانه ذوب آهن اصفهان به طور عملی تولید فولاد بر اساس فن آوری کوره بلند شروع شد و محدودیت های ذکر شده همراه با توسعه واحدهای تولید کنسانتره و احیاء مستقیم در کشور و صادرات بی رویه سنگ آهن، این کارخانه را با چالش جدی برای تامین و تدارک اقتصادی مواد اولیه مورد نیاز کوره بلندها مواجه کرده است. براساس مرور دقیقی که انجام گرفته است در کشور تاکنون تحقیقی در خصوص مدل سازی انتخاب نوع و ترکیب بهینه و اقتصادی مواد آهن دار کوره بلند با توجه به ممیزات محیط اقتصادی کشور انجام نشده است. ذوب آهن به صورت سنتی و بر اساس روند اولیه، مواد آهن دار را از ترکیب ۳۰٪ سنگ درشت دانه معدن باقی و ۷۰٪ آگلومره تامین و بار کوره بلندها می کند که این روند دیگر با محدودیت های تامین و تدارک مواد آهن دار در بازار و شرایط اقتصادی متحول کنونی، همخوانی ندارد. در مطالعات خارجی هم تاکنون پژوهش های زیاد و کاملی برای حل مساله تعیین ترکیب بهینه مواد اولیه آهن دار انجام نگردیده است [۲]. و مطالعات انجام شده، به طور عمده حول دو محور اصلی کاهش مصرف انرژی و حفاظت از محیط زیست با کاهش انتشار گاز گلخانه ای دی اکسید کربن تولیدی کوره بلند می باشند که برخی از مهم ترین و جدیدترین آنها به طور مختصر ذکر می شود.

متکیایی و همکاران (۱۳۹۷) در مقاله خود تحت عنوان "طراحی مدل کیفی بهینه مواد اولیه برای تولید آهن اسفنجی با استفاده از مدل سازی ریاضی احتمالی در شرکت آهن و فولاد غدیر ایرانیان" بیان کردند که در تولید آهن اسفنجی، مواد اولیه مناسب مهم ترین نقش را در کیفیت نهایی محصول و فواصل زمانی تولید و میزان دقیق آن برای ماکزیمم کردن کیفیت و در راستای آن یک زنجیره تامین پایدار در بازار فولاد به وجود می آورد. در تولید پیوسته تصمیم گیری برای بهینه سازی اقتصادی مواد اولیه و نیاز بازار با یکدیگر در تقابل هستند و نیاز به تجزیه و تحلیل همزمان دارد. در این پژوهش مدل احتمالی زنجیره مارکوف در سطوح تولید توسعه داده شده است. مدل با استفاده از رویکرد بهینه سازی بر مبنای اطلاعات پایه از گندله ورودی به روز شده و در اختیار سیستم قرار می گیرد. برای تحلیل دقیق تر از روش آماری برای تخمین استفاده شده است. مدل پیشنهادی در شرکت آهن و فولاد غدیر ایرانیان مورد آزمون قرار می گیرد تا نشان دهیم این مدل برای پشتیبانی تصمیم در تامین مواد اولیه مطلوب در جهت تصمیمات بازار موثر خواهد بود [۶].

سنجری و همکاران (۱۳۹۶) در مقاله‌ای تحت عنوان "ارزیابی خطر محیط‌زیستی واحد تولید آهن اسفنجی شرکت فولاد خراسان با استفاده از روش‌های تطبیقی JSA و ETBA" بیان کردند که با توجه به پیشرفت تکنولوژی و رشد قابل توجه تولید و سیر صعودی خطرهای محیط کار و آگاهی و تمایل تولیدکنندگان جهت به حداقل رساندن خطرات، این پژوهش انجام شده است. هدف از ارائه این مقاله ارزیابی خطر محیط‌زیستی واحد احیای مستقیم با استفاده از دو روش تجزیه و تحلیل ایمنی شغلی (JSA) و ردیابی انرژی و تجزیه و تحلیل حفاظها (ETBA) بوده است. بدین منظور ابتدا خطرهای محیط‌زیستی واحد مذکور با استفاده از دو روش فوق شناسایی و سپس با شناخت خطرات، نکات قوت و ضعف هر روش با یکدیگر مقایسه و در نهایت نمره‌دهی جداگانه در هر روش انجام گرفت. در روش تجزیه و تحلیل آنالیز ایمنی شغلی، ۶ شغل پرخطر شناسایی شد، در این روش ۴۷ خطر شناسایی که ۲ مورد غیرقابل قبول، ۲۸ مورد دارای خطر نامطلوب و ۱۷ مورد قابل قبول بود. در روش ETBA، ۹ انرژی با استفاده از چک‌لیست انرژی شناسایی شدند که مهم‌ترین خطرات این انرژی‌ها نشت گاز احیا و افزایش فشار گاز داخل کوره می‌باشد. در این روش ۱۷ خطر شناسایی گردید که ۳ مورد غیرقابل قبول، ۷ مورد نامطلوب، ۳ مورد قابل قبول با تجدیدنظر و ۴ مورد نیز قابل قبول بدون نیاز به تجدیدنظر می‌باشند [۷].

فتحی و همکارانش (۱۳۹۰) در تحقیقی با عنوان تحلیل و مدل‌سازی کوره بلند به منظور افزایش راندمان و کاهش مصرف کک، کارایی کوره بلند با استفاده از معادلات بقای جرم، انرژی و قابلیت کاردهی مدل‌سازی شده و براساس این مدل‌سازی، کوره بلند به عنوان یک حجم کنترل با ورودی‌ها و خروجی‌های مشخص در نظر گرفته شده و شرایط کوره بلند به صورت پایدار و مستقل از زمان بررسی گردیده است [۸].

شن^۱ و همکاران (۲۰۱۸)، در پژوهشی با نام "نسب مواد آهن‌دار، تجزیه و تحلیل فن‌آوری‌های نو صرفه‌جویی در مصرف انرژی و بهینه‌سازی برای تولید آهن و فولاد" کمینه کردن مصرف انرژی و انتشار گاز گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن به عنوان توابع هدف بهینه‌سازی ۷ متغیر کاری با ۶۱ محدودیت در نظر گرفته شده است و از روش‌های برنامه‌ریزی خطی و برنامه‌ریزی غیرخطی و تجزیه و تحلیل e-p استفاده گردیده است. از دستور `fmincon` و الگوریتم SQP در نرم افزار متلب جهت بهینه‌سازی استفاده شده است. پس از بهینه‌سازی مصرف انرژی در حدود ۲/۳۹ درصد کاهش می‌یابد و بر اساس نتایج بهینه‌سازی افزایش عیار آهن در آگلومره، مصرف بیشتر پودر زغال، افزایش دمای هوای دم و افزایش نسبت مصرف سنگ آهن درشت دانه باعث کاهش مصرف کک انرژی و انتشار گاز دی‌اکسید کربن می‌شوند [۹].

ایلماز^۲ و همکاران (۲۰۱۷)، در پژوهشی با نام "مدل سازی و شبیه‌سازی استفاده از آهن اسفنجی در کوره بلند برای کاهش انتشار گاز دی‌اکسید کربن" اثر مصرف آهن اسفنجی تولید شده از روش‌های پروسسی میدرکس و اچ‌وای ال^۳ را در کوره بلند بر روی میزان مصرف انرژی و گاز دی‌اکسید کربن بررسی و شبیه‌سازی نموده‌اند. در این تحقیق با تزریق ۱۲۰ کیلوگرم پودر زغال و بارگیری آهن اسفنجی برای تولید چدن مذاب،

¹ Shen

² Yilmaz

³ Midrex and HYL

کاهش قابل توجهی در مصرف کک و انرژی مشاهده شده است و تولید گاز دی اکسید کربن هم در حدود ۲۶/۷٪ کاهش یافته است. با توجه به قیمت متفاوت گاز طبیعی در نقاط مختلف جهان امکان سنجی استفاده از آهن اسفنجی باید تحت شرایط فنی اقتصادی خاص محل مورد استفاده انجام شود [۴].

کوراموچی^۱ و همکارانش (۲۰۱۷) در تحقیقی تحت عنوان ارزیابی روند انتشار گاز دی اکسید کربن صنعت آهن و فولاد ژاپن تا سال ۲۰۳۰ با در نظر گرفتن قابلیت های فرآیندی و محدودیت های کاری و انعطاف در تغییر مقدار تولید با ارایه نقشه راهی برای کاهش دی اکسید کربن تولیدی در صنعت فولاد ژاپن می پردازد، این مطالعه با لحاظ سناریوهای مختلف برای کل ظرفیت تولید ژاپن و افزایش میزان مصرف قراضه، با ارایه مدلی به صورت کمی روند تولید دی اکسید کربن در صنعت فولاد ژاپن را تا سال ۲۰۳۰ بررسی و پیش بینی کرده است و نتیجه می گیرد که مصرف قراضه ضمن اثر روی کاهش گاز دی اکسید کربن تولیدی، هزینه تولید را هم تحت تاثیر قرار خواهد داد [۱۰].

شو^۲ و همکاران (۲۰۱۶)، در مطالعه ای تحت عنوان "میزان انتشار گاز دی اکسید کربن در صنعت آهن و فولاد چین" بیان نمود مصرف انرژی و میزان انتشار گاز دی اکسید کربن در صنایع آهن و فولاد چین در مقایسه با سایر نقاط جهان بالاست. این مطالعه انتشار کربن در کوره بلند و کنورتور را به وسیله تحلیل جریان مواد^۳ بررسی کرده است و اولین تحقیق در مورد انتشار گاز دی اکسید کربن در صنایع آهن و فولاد چین است که هم انتشار مستقیم ناشی از سوختن زغال و احتراق سوخت های غیر فسیلی و هم انتشار غیر مستقیم را شامل می شود. با ارایه یک روش محاسبه ابتکاری، میزان تولید این گاز توسط واحدهای فولادسازی چین را ۱۳۳۶ میلیون تن در سال برآورد کرده اند همچنین اقداماتی که باعث کاهش میزان گاز دی اکسید کربن تولیدی می شوند و در هزینه تولید تاثیر خواهند داشت مورد بررسی قرار گرفته است [۱۱].

لی یو^۴ و همکاران (۲۰۱۵)، در پژوهشی با نام "کمینه کردن مصرف انرژی برای کوره بلند با تجزیه و تحلیل جریان انرژی" اقدام به کمینه کردن تلفات انرژی کوره بلند بر اساس توازن مواد و توازن انرژی نموده اند و تاثیر درجه حرارت گاز خروجی کوره بلند، میزان تزریق پودر زغال، درجه قلیایی سرباره و پارامترهای هوای دم روی نتایج بهینه سازی بررسی شده است. نتایج بهینه سازی مشخص می کند که با افزایش میزان تزریق پودر زغال و دمای هوای دم تلفات کاهش می یابد و با افزایش رطوبت در هوای دم، افزایش غنی سازی هوای دم با اکسیژن، زیاد شدن درجه قلیایی سرباره و افزایش دمای گاز خروجی تلفات در کوره زیاد می شود. تابع هدف غیر خطی است و از نرم افزار متلب و الگوریتم SQP^۵ برای حل مدل استفاده شده است [۱۲].

مویا و همکارانش^۶ [۱۳] در مقاله ای به نام ظرفیت های بهبود در بازدهی انرژی و انتشار دی اکسید کربن در صنعت آهن و فولاد ۲۷ کشور اتحادیه اروپا، اقدامات اصلاحی که با استفاده از بهترین تکنولوژی های در دسترس

¹ Kuramochi Takeshi

² Xu Wenqing

³ Material Flow Analysis (MFA)

⁴ Liu Xiong

⁵ Sequential quadratic programming

⁶ Moya Jose Antonio, Pardo Nicolas.

می‌تواند باعث کاهش مصرف انرژی و انتشار دی‌اکسید کربن در صنایع فولاد اتحادیه اروپا شود را به کمک مدلی غیرخطی مورد مطالعه قرار داده‌اند و میزان سرمایه‌گذاری انجام این بهبودها و اثر آنها را برآورد کرده‌اند. ژانگ^۱ و همکاران (۲۰۱۱)، در مطالعه‌ای با عنوان "یک سیستم دانش‌بنیان پشتیبان تصمیم‌گیری برای بهینه‌سازی ترکیب و نسبت مواد اولیه کوره‌بلند" هزینه تولید کوره‌بلند را به عنوان تابع هدف بهینه‌سازی به وسیله یک مدل غیرخطی در نرم‌افزار متلب مورد بررسی قرار داده‌اند. در این مطالعه تحلیل شیمیایی و قیمت مواد اولیه و کک بعنوان ورودی به مدل اعمال می‌شوند و مدل‌سازی برای ۱۵ نوع سنگ آهن و مواد آهن دار از معادن مختلف و با لحاظ ۱۴ عنصر و ترکیب شیمیایی اصلی آنها انجام شده است. میزان مصرف زغال و کک برای تولید هر تن چدن مذاب ثابت فرض می‌شود یعنی اثر تغییرات مواد آهن دار روی مصرف کک در نظر گرفته نشده است. خروجی مدل ترکیب بهینه مواد اولیه آهن دار می‌باشد که با نتایج تجربی در یک کارخانه فولادسازی در کشور چین مقایسه شده است [۲].

هله و همکارانش^۲ (۲۰۱۱) در پژوهشی تحت عنوان بهینه‌سازی غیرخطی تولید فولاد با استفاده از استراتژی‌های کاری کوره‌بلندهای سنتی و جدید و با تابع هدف حداقل کردن هزینه تولید هر تن فولاد خام تحت محدودیت‌های فرآیندی و مواد اولیه، چرخش دوباره گاز خروجی کوره‌بلند را بعد از جدا کردن دی‌اکسید کربن آن از نظر اقتصادی به وسیله یک مدل غیرخطی و شبیه‌سازی کامپیوتری امکان‌سنجی کرده‌اند. نتیجه این بررسی چرخش دوباره گاز خروجی به کوره‌بلند را اقتصادی نشان داده است. همچنین جداسازی دی‌اکسید کربن از گاز خروجی کوره باعث عدم نیاز به شارژ مازوت شده است و انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش داده است [۱۴].

وانگ و همکارانش^۳ (۲۰۰۹) در تحقیقی با عنوان مدلی برای کاهش گاز دی‌اکسید کربن در مجتمع‌های فولادسازی به کمک روش‌های بهینه‌سازی و با همکاری کارخانه فولادسازی ساب سوئد برای فرآیندهای کوره‌بلند و کنورتور به عنوان یک سیستم یکپارچه، مدلی دوهدفه را برای حداقل نمودن هزینه تولید فولاد و مقدار گاز دی‌اکسید کربن تولیدی به وسیله شارژ قراضه در مجموعه کوره‌بلند کنورتور بررسی نموده و نتیجه گرفتند که با افزایش قراضه در بار میزان دی‌اکسید کربن تولیدی کاهش ولی هزینه تولید زیادتر می‌شود. در این تحقیق محدودیت مقدار قراضه تا ۲۵٪ بررسی شده است و با اولویت کنورتور، بخشی از قراضه در کنورتور و بخشی در کوره‌بلند اضافه شده است [۳].

راسول و همکارانش^۴ (۲۰۰۷) در مطالعه‌ای با نام مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل عملکرد کوره‌بلند برای استفاده موثر از انرژی، مدلی بر اساس معادلات بالانس جرم و انرژی ارائه داده‌اند و از یک فرمول تجربی برای ارزیابی تلفات کوره‌بلند استفاده شد. بر اساس خروجی‌های مدل افزایش دمای هوای دم، کاهش خاکستر کک و کاهش میزان سیلیس چدن باعث کاهش مصرف کک و افزایش بهره‌وری کوره‌بلند می‌شود خروجی‌های این مدل با نتایج عملی در یک کوره‌بلند در کشور هند مورد راست‌آزمایی قرار گرفته است [۱۵].

¹ Zhang

² Helle Hannu, Helle Mikko, Saxen Henrik

³ Wang C., Larsson M., Ryman C.

⁴ Rasoul M.G.

ارتم و همکارانش^۱ (۲۰۰۶) در پژوهشی تحت عنوان تجزیه و تحلیل بالانس انرژی در کوره بلند شماره یک کارخانه اردمیر ترکیه بالانس انرژی ورودی و خروجی کوره بلند را بر اساس یک مدلی ژاپنی برای این کوره بلند مورد بررسی قرار داده است و انرژی مورد نیاز جهت پروسس احیاء را از تفاوت کل انرژی ورودی از کل انرژی خروجی محاسبه کرده‌اند [۱].

لارسون و همکارانش^۲ (۲۰۰۳) در پژوهشی با عنوان کاهش انرژی استفاده شده، اثر یک مدل بهینه‌سازی مصرف انرژی برای یک مجتمع فولادسازی را بررسی کرده‌است؛ بدین ترتیب که ابتدا هر یک از واحدهای کک‌سازی، کوره بلند، کنورتور، ریخته‌گری و نیروگاه مدل شده‌اند و سپس تابع هدف کمینه نمودن انرژی مجتمع فولادسازی به وسیله مدل برنامه‌ریزی خطی تعریف شده‌است و شدت انرژی برای هشت حالت ترکیب مختلف شارژ مواد در کوره بلند و کنورتور بررسی و شبیه‌سازی گردیده‌است. همچنین اثر بهینه نمودن مصرف انرژی روی کاهش انتشار گاز دی‌اکسید کربن هم بررسی شده است [۱۶].

مقاله ژانگ و همکاران در ارتباط با اثر ترکیب مواد اولیه آهن‌دار کوره بلند روی هزینه تولید می‌باشد که محدودیت‌های زیر در آن دیده می‌شود.

- تمرکز بر کاهش هزینه مواد اولیه می‌باشد، در صورتی که عامل اصلی اقتصادی در تولید، سود است. به عبارت دیگر کاهش هزینه مواد اولیه لزوماً به معنی افزایش سود نیست. در این خصوص نقش متغیرهایی نظیر بهره‌وری یا مقدار تولید روزانه به ازای واحد حجم کوره بلند و سایر هزینه‌های تولید نظیر هزینه‌های اکسیژن، هوای دم و انرژی الکتریکی و شرایط و مقدار تولید محصولات جانبی گاز کوره بلند و سرباره، مورد توجه قرار نگرفته است.

- مصرف کک در کوره بلند مقداری ثابت فرض شده است اما در عمل مصرف کک تابعی از ترکیب مواد اولیه آهن‌دار و سایر متغیرهای تولید است و با ثابت فرض کردن مصرف کک، تقریبی بزرگ و غیر واقعی اعمال شده‌است.

- میزان تزریق پودرزغال ثابت فرض شده، و تزریق مازوت و گاز طبیعی هم بررسی نشده‌است که با شرایط واقعی کار همخوانی ندارد.

- تاثیر استفاده از قراضه و آهن اسفنجی به عنوان مواد اولیه سازگار با محیط‌زیست و کاهنده مصرف انرژی روی سود تولید بررسی و مدل‌سازی نشده است.

برای اولین بار در این تحقیق استفاده توأم از هر سه سوخت کمکی مازوت، پودرزغال و گاز طبیعی در کنار کک مدل‌سازی شده‌است و آثار استفاده از این سوخت‌ها روی کاهش مصرف کک و افزایش سود تولید توسط مدل ارایه شده قابل بررسی و محاسبه‌است همچنین در این مقاله علاوه بر محدودیت‌های ترکیب شیمیایی چدن و سرباره تولیدی، برای اولین بار درجه حرارت منطقه جلوی فرم‌های کوره بلند و درجه حرارت گاز خروجی هم

¹ Emre Ertem M., Gurgun Sabit.

² Larsson Mikael and Dahl. Jan.

به‌عنوان محدودیت‌های فنی در نظر گرفته شده‌اند که در نتیجه میزان غنی‌سازی هوای دم با اکسیژن هم قابل محاسبه است.

۳ روش‌شناسی تحقیق

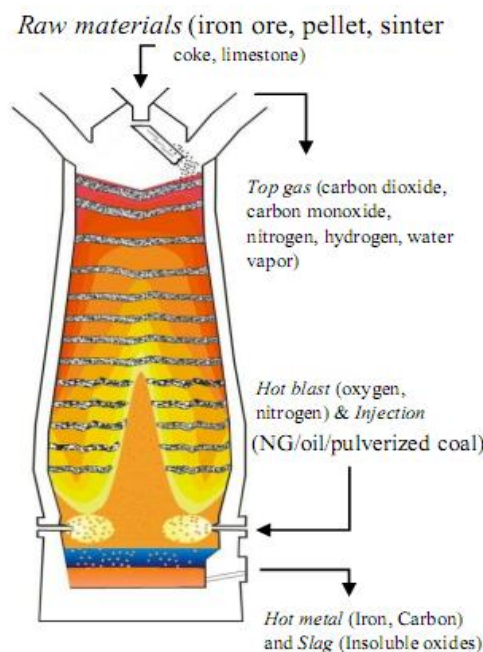
در این پژوهش مدل ارائه شده توسط ژانگ و همکاران تکمیل شده و تابع هدف از هزینه مواد اولیه به سود عملیاتی تولید، تغییر یافته است و ضمن موازنه کامل جرم و انرژی در کوره بلند، ترکیب شیمیایی مذاب، مقدار مواد آهن دار، کمک ذوب، کک مصرفی، اکسیژن و هوای دم مورد نیاز، دما، حجم و ترکیب شیمیایی گاز دهانه و ترکیب و مقدار سرباره تولیدی به عنوان تابعی از متغیرهای تولید نظیر ترکیب شیمیایی و نسبت مواد اولیه در بار کوره بلند و دمای هوای دم محاسبه شده و به عنوان متغیرهای تابع هدف یا در محدودیت‌های آن مورد استفاده قرار گرفته است. بر اساس روابط فرآیندی، معادلات توازن جرم و انرژی و قوانین ترمودینامیکی در فرآیند کار کوره بلند، مدلی جهت عملکرد کوره بلند و محاسبه حداکثر سود تولید کوره ارائه گردید. تحقیق حاضر به لحاظ روش و ماهیت کار توصیفی و از نظر هدف کاربردی و از نظر زمان مقطعی می‌باشد. به این دلیل توصیفی می‌باشد که مطالعه وضعیت کنونی شرکت مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش رابطه میان متغیرها بر اساس اهداف پژوهش تحلیل می‌شود و به بهینه‌سازی توابع هدف خواهیم پرداخت. با توجه به این که هدف این تحقیق استفاده از نتایج آن جهت پیشینه کردن سود تولید و همچنین بهینه کردن میزان انتشار گاز گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن ناشی از تولید می‌باشد؛ بنابراین این تحقیق، از نوع کاربردی است. جامعه آماری این پژوهش شرکت ذوب آهن اصفهان در سال ۱۴۰۰ می‌باشد که به عنوان شرکت مورد نظر انتخاب شد. در این پژوهش برای جمع‌آوری اطلاعات در زمینه مبانی نظری موضوع پژوهش، از طریق مطالعه کتب، مقالات و مراجع به سایت‌های تخصصی، اطلاعات لازم از روش کتابخانه‌ای استفاده شده است و برای جمع‌آوری اطلاعات لازم جهت اجرای این تحقیق با مراجعه به مسئولین مربوطه در بخش کوره بلند و بخش آزمایشگاه مرکزی شرکت ذوب آهن اصفهان نیز از روش میدانی استفاده شده است. همچنین بر طبق این مدل میزان مصرف کک و بهره‌وری کوره قابل محاسبه است و بر اساس معادلات و روابط استفاده شده در مدل‌سازی به کمک نرم افزار متلب برنامه مدل نوشته و اجرا شده و خروجی‌های مدل با نتایج عملی اعتبارسنجی گردید.

۳-۱ مدل تحقیق

مدل این تحقیق یک مدل غیرخطی بهینه‌سازی است که از معادلات ترمودینامیک، روابط فرآیندی، توازن جرم و انرژی بهره می‌گیرد. این مدل، به‌عنوان یک سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری برای خرید و تدارک مواد اولیه و بررسی اثر استفاده از مواد اولیه مختلف روی سود تولید و انتشار دی‌اکسید کربن است. در شکل شماره ۱ کوره بلند نمایش داده شده است. ورودی‌های کوره بلند شامل سنگ آهن درشت‌دانه^۱، آگلومره^۲، گندله^۳، آهن قراضه، آهن

¹ Lump
² Sinter
³ Pellet

اسفنجی^۱، سنگ منگنز، کک، پودرزغال، مازوت، آهک، مواد روان ساز، هوای دم واکسیژن هستند. خروجی های کوره بلند شامل چدن مذاب، سرباره و گاز خروجی کوره بلند می باشند. چدن مذاب محصول اصلی تولید شده در کوره بلند است که حاوی حدود ۹۴٪ آهن و ۴ تا ۵ درصد کربن می باشد و به عنوان ورودی به کنورتور اکسیژنی جهت تولید فولاد منتقل می شود. سرباره و گاز کوره خروجی های جانبی می باشند. گاز خروجی دارای ارزش حرارتی حدود یک دهم گاز طبیعی است و جهت تولید برق در نیروگاه استفاده می شود. سرباره به عنوان ماده جانبی تولیدی برای تولید سیمان و آسفالت به کارخانه های سیمان فروخته می شود و همچنین به عنوان ماده اولیه در تولید عایق های صوتی و حرارتی می تواند مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۱. ورودی ها و خروجی های کوره بلند

۲-۳ معرفی اندیس ها، نمادها و معادلات اصلی استفاده شده در مدل

i: ماده اولیه i ام در بار کوره بلند

j: ترکیب شیمیایی j ام در مواد بار کوره بلند

k: عنصر شیمیایی k ام در ترکیب شیمیایی مواد بار کوره بلند

جدول ۱. اندیس ها

اندیس	i	j	K	اندیس	i	j	k
۱	آگلومره	Fe	Fe	۱۲	سایر ۳	Mgo	Mg
۲	گندله	SiO ₂	Si	۱۳	سایر ۴	Al ₂ O ₃	Al
۳	سنگ آهن	CaO	Ca	۱۴	سایر ۵	K ₂ O	K

^۱ DRI

۴	آهن اسفنجی	P	P	۱۵	سایر ۶	Na ₂ O	Na
۵	قراضه	As	As	۱۶	اکسیژن	Fe _{0.947} O	
۶	سنگ منگنز	Cu	Cu	۱۷	گاز طبیعی	C	
۷	سنگ آهک	Pb	Pb	۱۸	پودر زغال	H ₂ O	
۸	دولومیت	Zn	Zn	۱۹	مازوت	ash	
۹	کوارتزیت	S	S	۲۰	کک	H ₂	
۱۰	سایر ۱	Ti	Ti	۲۱		N ₂	
۱۱	سایر ۲	Mn	Mn	۲۲		O	

۳-۳ پارامترها

a_{ij} : در صد وزنی عنصر j ام در ماده اولیه i ام

$W_{j, total}$: وزن ترکیب یا عنصر شیمیایی j ام بر حسب کیلوگرم در جمع کل بار کوره، زغال و کک برای هر تن چدن تولیدی

$W_{k, total}$: وزن عنصر k ام بر حسب کیلوگرم در جمع کل بار کوره، زغال و کک برای هر تن چدن تولیدی

d_{hearth} : قطر بوته کوره بلند بر حسب متر

n_{uyere} : تعداد فورم‌های هوای دم کوره بلند

V_{bf} : حجم موثر کوره بلند بر حسب مترمکعب است.

C_{fix} : هزینه‌های ثابت سالانه تولید چدن بر حسب تومان

Pr_i ($i=1,2,3,\dots,15$): قیمت هر کیلوگرم ماده اولیه i ام بر حسب تومان

Pr_{O_2} : قیمت هر نرمال مترمکعب اکسیژن بر حسب تومان

Pr_{NG} : قیمت هر نرمال مترمکعب گاز طبیعی بر حسب تومان

Pr_k : قیمت هر کیلوگرم کک خشک مصرفی بر حسب تومان

Pr_{oil} : قیمت هر کیلوگرم مازوت مصرفی بر حسب تومان

Pr_{PC} : قیمت هر کیلوگرم پودر زغال مصرفی بر حسب تومان

Pr_{slag} : قیمت هر کیلوگرم سرباره تولیدی بر حسب تومان

Pr_{hm} : قیمت هر کیلوگرم چدن مذاب تولیدی بر حسب تومان

r_{si} : میزان سیلیس بر حسب کیلوگرم برای هر تن چدن تولیدی

γ : میزان آهن خالص یک تن چدن، برابر ۹۴۵ کیلوگرم در هر تن چدن مذاب تولیدی

λ : ضریب بازیابی چدن مذاب، معادل با ۰.۹۶۳.

θ_j : ضریب تصفیه

T_{wrc} : دمای ناحیه احیاء و ستیت کوره بلند بر حسب کلونین

T_{tg} : درجه حرارت گاز خروجی کوره بلند بر حسب سانتیگراد

T_{blast} : دمای هوای دم بر حسب کلوین

HV_{tg} : ارزش حرارتی هر نرمال متر مکعب گاز کوره بلند بر حسب کیلو ژول

LHV_{NG} : حد پایین ارزش حرارتی هر نرمال متر مکعب گاز طبیعی بر حسب کیلو ژول

Ash_K : درصد خاکستر کک

Ash_C : درصد خاکستر زغال

CSR : استحکام کک پس از واکنش

η : بهره‌وری کوره بلند بر حسب تن تولید چدن بر متر مکعب حجم کوره بلند در روز

۳-۴ متغیرها

X_i ($i=1,2,\dots,15$): درصد وزنی ماده اولیه خشک i به وزن کل مواد اولیه بردن

r_{O_2} : میزان تزریق اکسیژن برای غنی‌سازی هوای دم بر حسب نرمال متر مکعب برای هر تن چدن تولیدی

r_V : میزان مصرف حجم گاز طبیعی بر حسب نرمال متر مکعب برای هر تن چدن تولیدی

W_{PC} : میزان مصرف پودر زغال بر حسب کیلوگرم برای هر تن چدن تولیدی

W_{oil} : میزان مصرف مازوت بر حسب کیلوگرم برای هر تن چدن تولیدی

X_r : میزان مصرف کک خشک بر حسب کیلوگرم برای هر تن چدن تولیدی

جدول ۲. روابط اصلی حاکم بر مدل‌سازی

نماد	رابطه	توضیح رابطه
W_{burden}	$X_i = X_{wet} \times \frac{1 - a_{i18}}{100}, W_{burden} = \frac{10000 \times \gamma}{\lambda \times \sum_{i=1}^{15} a_{i1} \times X_i}$	محاسبه بار کوره بلند
W_{mi}	$W_{mi} = \frac{W_{burden} \times X_i}{100}$	محاسبه وزن ماده اولیه i ام در بار
W_j	$W_j = \frac{\gamma \times \sum_{i=1}^{15} X_i \times a_{ij}}{\lambda \times \sum_{i=1}^{15} X_i \times a_{i1}}$	محاسبه عنصر j ام در چدن
$Fe_{m-burden}$	$Fe_{m-burden} = \frac{X_r \times \left[a_{r1} - a_{r16} \times \frac{52}{68} \right]}{100} + \frac{X_\Delta \times \left[a_{\Delta 1} - a_{\Delta 16} \times \frac{52}{68} \right]}{100}$	محاسبه آهن متالیک در بار
$Fe_{t-burden}$	$Fe_{t-burden} = \frac{\sum_{i=1}^{15} X_i \times a_{i1}}{\sum_{i=1}^{15} X_i}$	محاسبه آهن کل در بار
W_{slag}	$W_{slag} = \sum (W_j) \times (1 - \theta k), j = 2, 3, 10, 11, 12, 13$	محاسبه سرباره

Basicity	$Basicity = \frac{10000 \times \gamma \times \sum_{i=1}^{15} X_i \times a_{i\gamma} + \lambda \times \sum_{i=1}^{15} X_i \times a_{i1} \times U}{10000 \times \gamma \times \sum_{i=1}^{15} X_i \times a_{i\gamma} + \lambda \times \sum_{i=1}^{15} X_i \times a_{i1} \times V}$ $U = W_{Coke-dry} \times Ash_K \times X_{kAr} + W_{pc} \times Ash_C \times X_{CAr}$ $V = W_{Coke-dry} \times Ash_K \times X_{kAr} + W_{pc} \times Ash_C \times X_{CAr} - 214000 \times HM_{Comp,\gamma}$	محاسبه بازیسته
H_{Fe}	$H_{Fe} = \Delta(-H_{1300,FeO}^f) + (H_{1723Fe} - H_{1300,Fe})$	حرارت احیاء وستیت
H_{Si}	$H_{Si} = (-H_{1300,SiO_2}^f) + (H_{1723Si} - H_{1300,Si}) - 95$	حرارت احیاء SiO ₂
H_{Mn}	$H_{Mn} = (-H_{1300,MnO}^f) + (H_{1723Mn} - H_{1300,Mn}) + 4$	حرارت احیاء MnO
H_C	$H_C = (H_{1723C} - H_{1300,C}) + 30$	حرارت گرمایش - وانحلال کربن در چدن مذاب
H^{Slag}	$H^{Slag} = n_i^{Slag} \left\{ (H_i^{fus}) + (H_{1723} - H_{1300})_i \right\}$	حرارت تشکیل سرباره حرارت تشکیل سرباره
h_{loss}	$h_{loss} = \frac{\Delta / 4 \times 10^7 \times \text{Hearth dia.} + \Delta \times 10^7 \times \text{No of Tuyers}}{\text{Pig iron production per hour} \times \frac{\text{Pig iron Fe\%}}{100}} \times \frac{55}{85}$	حرارت اتلافی کوره
$n^l H^l$	$n^l H^l = n^l \left\{ (-H_{CH_4}^f) + (H_{1723} - H_{1300})_{CH_4} \right\}$	حرارت تجزیه‌ی گاز طبیعی
n_O^B	$n_O^B = 1/28n_C^A + 0/42n_{H_2}^l - \left\{ 1/0.6 + 2(Si/Fe)^m + (Mn/Fe)^m \right\},$	تعداد مول اکسیژن هوای دم
n_C^A	$n_C^A = \frac{H_D^{wrc} + H_{Blast} \left\{ 1/0.6 + 2(Si/Fe)^m + (Mn/Fe)^m \right\} - 0/42n_{H_2}^l (249/473 + H_{Blast})}{192/658 + 1/28H_{Blast}}$	تعداد مول کربن فعال
n_{CO}^g	$n_{CO}^g = n_C^A \cdot X_{CO}^g$	تعداد مول CO در گاز فوقانی
$n_{CO_2}^g$	$n_{CO_2}^g = n_C^A \cdot X_{CO_2}^g$	تعداد مول CO ₂ در گاز فوقانی
$n_{H_2}^g$	$n_{H_2}^g = n_{H_2}^l \cdot X_{H_2}^g$	تعداد مول H ₂ در گاز فوقانی
$n_{H_2O}^g$	$n_{H_2O}^g = n_{H_2}^l \cdot X_{H_2O}^g$	تعداد مول H ₂ O در گاز فوقانی

۳-۵ تابع هدف مدل

تابع هدف مساله، پیشینه‌سازی سود سالیانه تولید چدن کوره‌بلند با مدیریت نسبت ترکیب مواد آهن‌دار ورودی کوره‌بلند است. تابع هدف با Z نمایش داده می‌شود که Z سود عملیاتی سالیانه تولید چدن است و به صورت زیر نوشته می‌شود.

سود عملیاتی سالیانه تولید = (درآمد فروش چدن + درآمد فروش سرباره + درآمد فروش گاز کوره) - هزینه مصرف مواد اولیه + هزینه مصرف کک + هزینه مصرف پودر زغال + هزینه مصرف مازوت + هزینه مصرف گاز طبیعی + هزینه مصرف اکسیژن + هزینه مصرف هوای دم) - هزینه ثابت تولید

$$Z = \text{Max} \left[350 \times \eta \times V_{bf} \times (Pr_{hm} + Pr_{slag} \times W_{slag} + Pr_{NG} \times r_{ig} \times \frac{HV_{ig}}{LHV_{NG}} - \frac{100 \times \gamma \times \sum_{i=1}^{i=9} X_i \times Pr_i}{\lambda \times \sum_{i=1}^{i=9} a_i \times X_i} - (1) \right. \\ \left. Pr_k \times X_{r_c} - Pr_{O_2} \times r_{O_2} - Pr_{ba} \times r_{ba} - Pr_{NG} \times r_{V_{NG}} - Pr_{PC} \times W_{PC} - Pr_{oil} \times W_{oil} \right) - C_{fix}]$$

برای تولید سالیانه کوره بلند ۳۵۰ روز کاری در نظر گرفته شده است. بهره‌وری کوره بلند با η نمایش داده می‌شود و مقدار تولید روزانه به ازای واحد حجم کوره بلند تعریف می‌شود که به تمام ورودی‌ها وابسته است [۱۷] و با تابع f_1 نمایش داده می‌شود. همچنین میزان مصرف کک و میزان هوای دم به عنوان ورودی‌های کوره بلند تابع سایر ورودی‌ها چون میزان مصرف پودر زغال، گاز طبیعی، مازوت، آگلومره، سنگ آهن درشت دانه، آهن اسفنجی، قراضه، دمای هوای دم، اکسیژن، است [۱۷] و با توابع f_2 و f_3 زیر نمایش داده می‌شود.

$$\eta = f_1(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{15}, x_{16}, x_{17}, x_{18}, x_{19}, x_{20}) \quad (2)$$

$$X_{r_c} = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{15}, x_{16}, x_{17}, x_{18}, x_{19}, r_{ba}, Ash_C) \quad (3)$$

$$r_{ba} = f_3(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{15}, x_{16}, x_{17}, x_{18}, x_{19}, x_{20}) \quad (4)$$

میزان تولید گاز کوره بلند هم به ترکیب شارژ کوره و سوخت‌های هیدروکربنی وابسته است [۱۷] و با تابع f_4 زیر بیان می‌شود

$$r_{ig} = f_4(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{15}, x_{16}, x_{17}, x_{18}, x_{19}, r_{ba}) \quad (5)$$

هدف این است که بر اساس روابط فرآیندی، معادلات توازن جرم و انرژی و قوانین ترمودینامیکی در فرآیند کار کوره بلند، مدلی جهت عملکرد کوره بلند و محاسبه حداکثر سود تولید کوره ارائه گردد همچنین بر طبق این مدل میزان مصرف کک و بهره‌وری کوره قابل محاسبه است و بر اساس معادلات و روابط استفاده شده در مدل‌سازی به کمک نرم افزار متلب برنامه مدل نوشته و اجرا می‌شود.

۳-۶ محدودیت‌ها

محدودیت‌های ناشی از توازن انرژی ورود و خروج از کوره، تعادل بین مواد ورودی و خروجی کوره، حداکثر مجاز قراضه و آهن اسفنجی در بار، حداکثر امکان تامین ماهیانه مواد اولیه، محدودیت‌های فرآیندی کوره بلند و روابط بین متغیرها می‌باشند.

S_i : مقدار خرید ماهیانه ممکن ماده اولیه i ام

C_i : مقدار مصرف ماهیانه ممکن ماده اولیه i

B_1 : حد پایین درجه قلیایی سرباره

B_7 : حد بالای درجه قلیایی سرباره

L_{Ej} : حد پایین عنصر j در چدن مذاب بر حسب کیلوگرم در تن چدن مذاب

U_{Ej} : حد بالای عنصر j در چدن مذاب بر حسب کیلوگرم در تن چدن مذاب

L_{Fi} : حد پایین درصد ماده آهن دار i در ترکیب مواد آهن دار

U_{Fi} : حد بالای درصد ماده آهن دار i در ترکیب مواد آهن دار

T_{flame} : حداکثر درجه حرارت شعله بر حسب سانتیگراد

$$W_{Fe}^{in} = W_{Fe}^{Out} \quad (6) \quad \text{معادله توازن جرم عنصر آهن در کوره بلند}$$

$$n_o^{Burden} + n_o^{Blast} = n_o^t g \quad (7) \quad \text{معادله توازن جرم اکسیژن در کوره بلند}$$

$$n_c^{coke} + n_c^t = \left(\frac{C}{Fe} \right)^m + (n_{co}^{tg} + n_{cor}^{tg}) \quad (8) \quad \text{معادله توازن جرم کربن در کوره بلند}$$

$$H_D = H_S \quad (9) \quad \text{معادله توازن انرژی در کوره بلند}$$

$$X_f + X_s \leq 2.5\% \quad (10) \quad \text{محدودیت میزان شارژ قراضه و آهن اسفنجی در بار کوره بلند}$$

$$C_i \leq S_i \quad (11) \quad \text{ذخیره ماهیانه باید بیشتر از مصرف ماهیانه هر ماده باشد}$$

میزان عنصر j ام در بار مواد باید بین مقادیر حداقل و حداکثری باشد

$$\frac{\gamma \sum_{i=1}^{15} x_i a_{ij} + r_k Ash_K a_{\gamma j} + r_c Ash_C a_{\gamma j}}{\lambda \sum_{i=1}^{15} x_i a_{i,1}} \leq U_{Ej}, j = 2, 3, 12, 13, 14 \quad (12)$$

$$\frac{\gamma \sum_{i=1}^{15} x_i a_{ij} + r_k Ash_K a_{\gamma j} + r_c Ash_C a_{\gamma j}}{\lambda \sum_{i=1}^{15} x_i a_{i,1}} \geq L_{Ej}, j = 2, 3, 12, 13, 14 \quad (13)$$

میزان عنصر j ام در چدن مذاب با لحاظ اتلاف طی فرآیند تولید، باید در محدوده مجاز باشد.

$$\frac{\gamma \sum_{i=1}^{15} x_i a_{ij} + r_k Ash_K a_{\gamma j} + r_c Ash_C a_{\gamma j}}{\lambda \sum_{i=1}^{15} x_i a_{i,1}} \leq \frac{U_{Ej}}{\theta_j}, j = 4, 5, \dots, 11 \quad (14)$$

$$\frac{\gamma \sum_{i=1}^{15} x_i a_{ij} + r_k Ash_K a_{\gamma j} + r_c Ash_C a_{\gamma j}}{\lambda \sum_{i=1}^{15} x_i a_{i,1}} \geq \frac{L_{Ej}}{\theta_j}, j = 4, 5, \dots, 11 \quad (15)$$

با توجه به محدودیت‌های فنی و فرآیندی برای کار مناسب کوره باید درجه قلیایی سرباره کوره بلند بین حداقل ۱ و حداکثر ۱/۱ باشد.

$$\frac{10000 \cdot \gamma \sum_{i=1}^{15} a_{i,2} x_i + \lambda \sum_{i=1}^{15} x_i a_{i,1} (r_k Ash_K a_{\gamma,2} + r_c Ash_C a_{\gamma,2})}{10000 \cdot \gamma \sum_{i=1}^{15} a_{i,2} x_i + \lambda \sum_{i=1}^{15} x_i a_{i,1} (r_k Ash_K a_{\gamma,2} + r_c Ash_C a_{\gamma,2} - 214000 \cdot r_{si})} \leq 1/1 \quad (16)$$

$$\frac{10000 \cdot \gamma \sum_{i=1}^{15} a_{i,2} x_i + \lambda \sum_{i=1}^{15} x_i a_{i,1} (r_k Ash_K a_{\gamma,2} + r_c Ash_C a_{\gamma,2})}{10000 \cdot \gamma \sum_{i=1}^{15} a_{i,2} x_i + \lambda \sum_{i=1}^{15} x_i a_{i,1} (r_k Ash_K a_{\gamma,2} + r_c Ash_C a_{\gamma,2} - 214000 \cdot r_{si})} \geq 1 \quad (17)$$

درصد سهم هر ماده آهن دار ترکیب شارژ کوره بین دو محدودیت حداقل و حداکثر است.

$$x_i \geq L_{Fi} \quad \forall i \in I, \quad (18)$$

$$x_i \geq U_{Fi} \quad \forall i \in I, \quad (19)$$

$$x_i \geq 0 \quad \forall i \in I, \quad (20)$$

حاصل جمع درصدهای مواد اولیه آهن دار شارژ به کوره بلند ۱۰۰ است.

$$\sum_{i=1}^{\Delta} x_i + \sum_{i=10}^{15} x_i = 100 \quad (21)$$

میزان مصرف گاز طبیعی در کوره بلند بین صفر تا ۱۱۰ نرمال متر مکعب بر هر تن چدن تولیدی است.

$$0 \leq r_{VNG} \leq 110 \quad (22)$$

درجه حرارت شعله جلوی فرم‌ها باید بزرگ‌تر یا مساوی ۲۰۵۰ درجه سانتیگراد باشد.

$$T_{flame} \geq 2050 \text{ C} \quad (23)$$

درجه حرارت گاز خروجی کوره بلند بزرگ‌تر یا مساوی ۱۱۰ درجه سانتیگراد باشد.

$$T_{ig} \geq 110 \text{ Co} \quad (24)$$

میزان غنی‌سازی هوای دم با اکسیژن بین صفر تا حداکثر ۱۰٪ است.

$$0 \leq r_{O_2} \leq 10\% \quad (25)$$

میزان تزریق پودر زغال بین صفر تا حداکثر ۱۵۰ کیلوگرم برای تولید یک تن چدن است.

$$0 \leq W_{PC} \leq 150 \quad (26)$$

میزان تزریق مازوت بین صفر تا حداکثر ۹۰ کیلوگرم برای تولید یک تن چدن است.

$$0 \leq W_{oil} \leq 90 \quad (27)$$

۴ حل مساله

با توجه به تابع هدف و محدودیت‌ها، مدل غیرخطی است و یک مدل غیرخطی به صورت زیر در نرم افزار متلب ارائه می‌شود.

$$\text{Min } f(x)$$

$$\text{s.t. } C(x) \leq 0$$

$$C_{eq}(x) = 0$$

$$Ax \leq b$$

$$A_{eq} x = b_{eq}$$

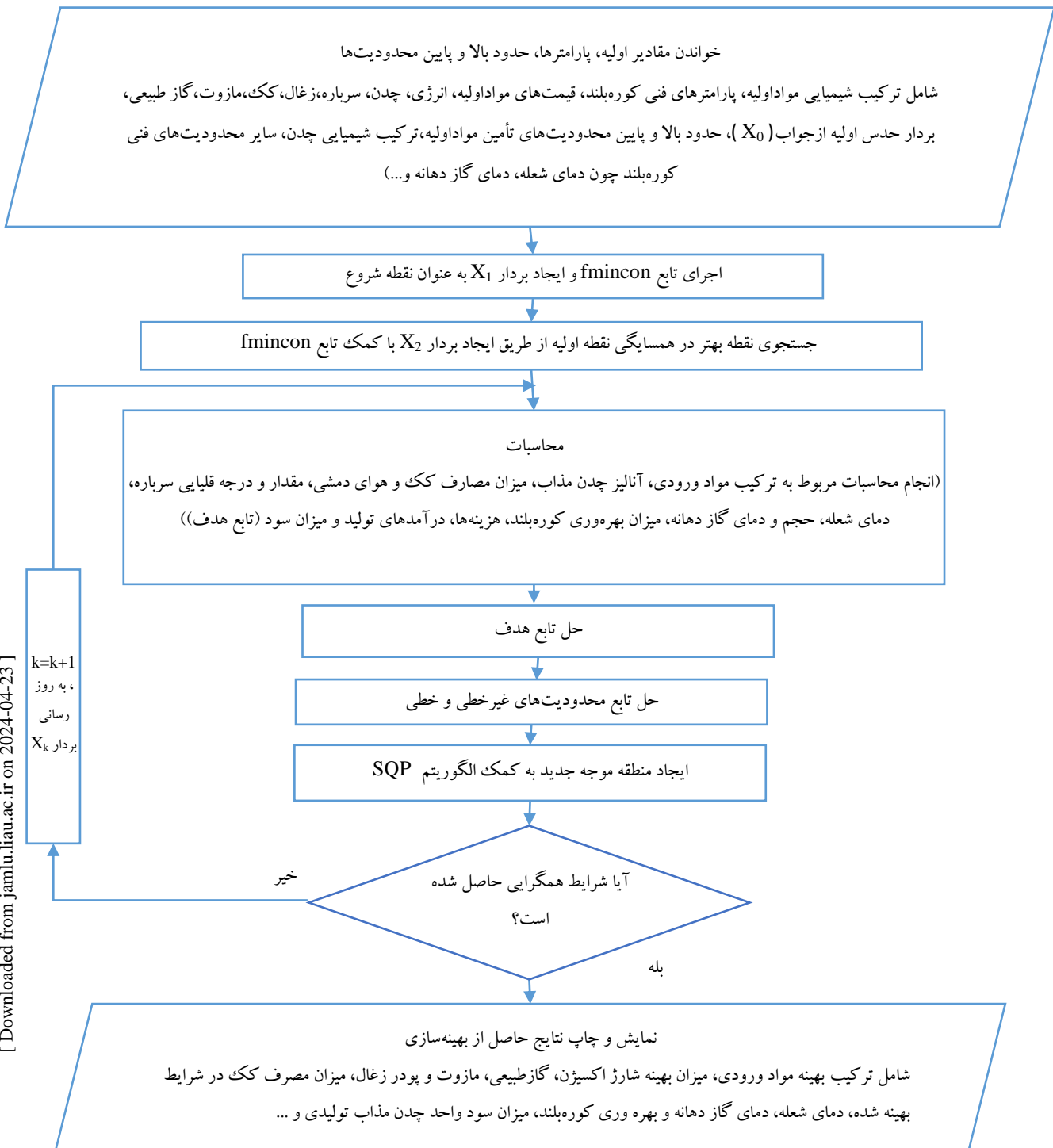
$$lb \leq X \leq ub$$

که بردار متغیر بهینه، $f(x)$ تابع هدف، lb و ub بردارهای ستونی حدود پایین و بالا بردار منغیر X ، b و b_{eq} بردارهای ستونی، $C(x)$ و $C_{eq}(x)$ توابع غیرخطی بردار متغیر بهینه، A و A_{eq} ماتریس هستند. در این مقاله چون پیشینه کردن تابع هدف مد نظر است؛ بنابراین تابع هدف در منفی یک ضرب می‌شود و برای حل این مدل از

الگوریتم درونیابی و تابع *fmincon* استفاده می‌گردد. این تابع برای یافتن کمینه یک تابع چند متغیره غیرخطی محدود شده استفاده می‌شود. الگوریتم فوق از بردار حدس اولیه از جواب (X_0) به عنوان نقطه اولیه استفاده می‌کند و با انجام تکرارهای متوالی و ارزیابی تابع هدف و محدودیت‌ها جواب بهینه را پیدا می‌کند در این الگوریتم در هر تکرار جهت و گام حرکت به طور همزمان انتخاب می‌شوند و اگر یک گام قابل قبول نبود، با کاهش ناحیه یافتن جواب بهینه، جواب کمینه جدیدی برای آن تکرار پیدا می‌شود. در عمل ناحیه یافتن جواب بهینه هر تکرار بر اساس تجربه تکرار قبلی تعیین می‌شود. شکل کلی تابع *fmincon* در متلب به صورت زیر است.

$$[X_{opt}, f_{opt}] = fmincon('fun', X_0, A, b, Aeq, beq, lb, ub, 'nonlcon')$$

که $'nonlcon', lb, ub, beq, Aeq, b, A, X_0$ ورودی‌های تابع *fmincon* هستند و *nonlcon* محدودیت‌های غیرخطی است جواب بهینه در X_{opt} و مقدار کمینه تابع هدف در f_{opt} ارایه می‌شود. برای سهولت کاربر، اطلاعات ورودی از طریق اکسل وارد و متلب این اطلاعات را از اکسل می‌خواند و نتایج اجرای مدل علاوه بر متلب در اکسل هم ارایه می‌گردد. اطلاعات ورودی شامل ترکیب شیمیایی کلیه مواد اولیه بار کوره بلند، قیمت هر کیلوگرم مواد اولیه، ترکیب شیمیایی و پارامترهای فنی حامل‌های انرژی کک، پودر زغال، مازوت و گاز طبیعی، قیمت هر واحد حامل‌های انرژی، مشخصات فنی اصلی کوره بلند، حداکثر میزان ممکن تهیه و خرید مواد اولیه و انرژی در بازار، هزینه‌های ثابت تولید شامل هزینه‌های مدیریت، پرسنلی، برق، آب، تعمیرات و....، ترکیب شیمیایی چدن تولیدی، محدودیت عناصر موجود در چدن تولیدی، قیمت فروش هر کیلو چدن، قیمت فروش هر کیلو سرباره تولیدی، قیمت هر واحد اکسیژن و قیمت هر واحد هوای دم تولیدی، حدود درجه قلیایی، درجه حرارت گاز خروجی کوره بلند، درجه حرارت شعله می‌باشند. مدل در تعدادی *m-file* نرم افزار متلب نوشته و به کمک دستور *fmincon* بهینه‌سازی انجام می‌شود و خروجی‌های مدل شامل سود بهینه تولید، درصد و مقدار ترکیب بهینه مواد اولیه و حامل‌های انرژی و میزان دی‌اکسید کربن می‌باشند. در فلوجارت شکل ۲ روند اجرای مدل در نرم‌افزار متلب ارایه شده است.



شکل ۲. روند اجرای مدل در نرم‌افزار متلب

۴- اجواب بهینه

مدل ارایه شده برای کوره بلند شماره ۳ شرکت ذوب آهن اصفهان مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا ورودی‌های مدل، شامل ترکیب شیمیایی مواد اولیه، پارامترهای فنی کوره بلند، قیمت‌های مواد اولیه و انرژی، حدود بالا و پایین محدودیت‌های فنی، محدودیت تامین و تدارک مواد اولیه آهن دار که ۲۵۰ هزار تن در ماه آگلومره، ۵۰ هزار تن در ماه گندله و ۲۵۰ هزار تن در ماه سنگ آهن درشت دانه هستند در اکسل وارد شده‌اند سپس برنامه مدل در نرم افزار متلب اجرا گردیده است که در جواب بهینه بخشی از مواد اولیه آهن دار با گندله و سهمی از کک با پودرزغال جایگزین شده است و ترکیب بهینه مواد آهن دار کوره بلند ۱۲٪ سنگ آهن معدن چاه گز، ۳٪ سنگ آهن معدن احیاء، ۱٪ سنگ آهن معدن آسیا، ۱۸٪ سنگ آهن معدن امیر سنگان، ۱۲٪ سنگ آهن معدن تنگه زاغ ۵۵٪ آگلومره، سود بیشینه هر کیلوگرم چدن تولیدی ۴۱۶۵ تومان توسط مدل محاسبه شده است. شکل ۳ نمونه‌ای از جواب بهینه محاسبه شده فوق توسط برنامه متلب می باشد که میزان آهن اسفنجی صفر محاسبه شده است که به علت قیمت بالای آهن اسفنجی در مقایسه با سایر مواد اولیه آهن دار استفاده از این ماده اقتصادی نمی باشد.

Optimization date: 29-Jul-2021

Optimization Algorithm: sqp

Hot Metal Unit Cost (Toman/kg) = 5398/7071

Hot Metal Unit Profit (Toman/kg)..... = 4164/9402

CO2 emisson only by BF top gas (kg/ton HM) = 0/65056 331/1961(Nm3/ton HM)

Total CO2 emisson (CO2+Co from BF & Other Plants) (kg/ton HM) = 1/8445939/0141(Nm3/ton HM)

Productivity (ton/m3)/Day = 2/5041

Burden:

Sinter = 55/8852(%) 931/0423(kg/ton HM)

Pellet = 4/0372e-21(%) 6/7259e-20(kg/ton HM)

Lump Ore1 Chadormaloo = 1/0906e-20(%) 1/8169e-19(kg/ton HM)

DRI = 8/4703e-21(%) 1/4111e-19(kg/ton HM)

Scrap = 9/4629e-22(%) 1/5765e-20(kg/ton HM)

Lump Ore2 Ehya = 3/3881e-21(%) 5/6446e-20(kg/ton HM)

Lump Ore3 Chah gaz = 12/3276(%) 205/377(kg/ton HM)

Lump Ore4 Asia = 1/2328(%) 20/5377(kg/ton HM)

Lump Ore5 Amirsangan = 18/2268(%) 303/6575(kg/ton HM)

Lump Ore6 Dolati = 3/3881e-21(%) 5/6446e-20(kg/ton HM)

Lump Ore7 Tange zagh = 12/3276(%) 205/377(kg/ton HM)

Fluxes:

Mn Ore (kg/ton HM) = 0

Limestone (kg/ton HM) = 18/9069

Dolomite (kg/ton HM) = 0

Quartzite (kg/ton HM) = 5/7087e-20

Injectants:

O2 Enrichment (M3/ton HM) = 5

Natural Gas Consumption (Nm3/ton HM) .. = 40/2675

Pulverized Coal Consumption (kg/ton HM) = 150

Oil Consumption (kg/ton HM) = 0

Coke Consumption:

Coke weight Dry (kg/ton HM) = 341/2561

Weight of Burden & Slag:

Burden (kg/ton HM) = 1665/9915

Slag (kg/ton HM) = 325/7862

Flame temperature & Top gas information:

Flame temperature (°C) = 2050

Top gas temperature (°C) = 308/7342

Top gas Heat value (kcal/Nm3) = 867/5965

Topgas_volume (Nm3/ton HM) = 1573.274

CO2 ratio in top gas (%) = 0/21051

CO ratio in top gas (%) = 0/23828

H2 ratio in top gas (%) = 0/048985

Blast air information:

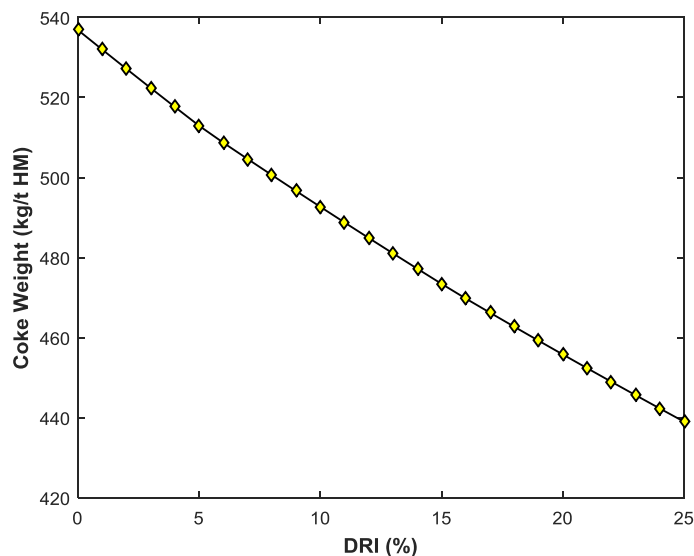
Blast air Consumption (Nm3/ton HM) = 1055/8113

Maximum Blast air Production by Power Plant (Nm3/min) = 3700

شکل ۳. نمونه‌ای از خلاصه نتایج محاسبه شده به وسیله نرم افزار متلب

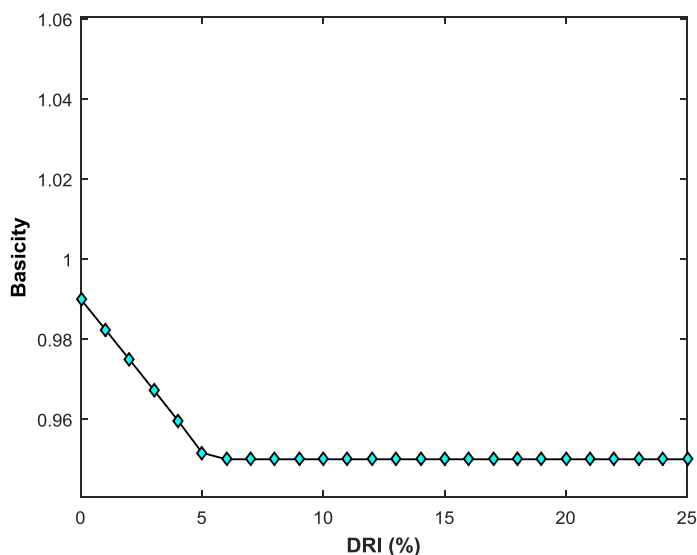
۵ بحث و تحلیل حساسیت

چون قیمت سنگ آهن ارزان تر از آگلومره است و براساس محدودیت فنی رابطه (۱۰) حداکثر می توان ۲۵٪ آهن اسفنجی در کوره بلند بار کرد؛ بنابراین فقط جایگزینی آگلومره با آهن اسفنجی برای کوره بلند شماره ۳ ذوب آهن اصفهان توسط مدل در نرم افزار متلب بررسی می شود. در شکل ۴ نتایج تحلیل حساسیت جایگزین نمودن آگلومره با آهن اسفنجی بر میزان مصرف کک نشان داده شده است. ملاحظه می شود که با افزایش میزان جایگزینی آگلومره با آهن اسفنجی، مصرف کک به عنوان ماده تامین کننده انرژی با شیب تندی کاهش می یابد. در مقادیر بیشتر از ۱۸ درصد آهن اسفنجی، افت نامحسوسی در شیب کاهش مصرف کک دیده می شود. علت کاهش مصرف کک با افزایش مقدار آهن اسفنجی، تفاوت قابل توجه درصد عنصر آهن موجود در آهن اسفنجی (۸۰/۰۶٪) نسبت به آگلومره (۵۵/۲۶٪) و وجود مقدار زیاد آهن فلزی در آهن اسفنجی است، این باعث می شود که با افزایش درصد آهن اسفنجی در بار مواد آهن دار، درصد آهن بار و درصد آهن فلزی آن افزایش یابد. علت تغییر شیب شکل در ۱۸ درصد آهن اسفنجی، رسیدن درجه قلیایی سرباره به حد پایین محدودیت در رابطه (۱۷) و نیاز به افزایش مصرف سنگ آهک برای جبران این کاهش می باشد.



شکل ۴. تاثیر جایگزینی آگلومره با آهن اسفنجی در بار مواد آهن دار کوره بلند بر میزان مصرف کک-انرژی

همان گونه که در شکل ۵ دیده می‌شود به دلیل کاهش میزان آگلومره با جایگزینی آهن اسفنجی تا ۵ درصد، با افزایش مصرف آهن اسفنجی، درجه‌قلیایی کاهش می‌یابد تا این که در ۶ درصد، به حداقل مقدار مجاز خود در رابطه (۱۷) کاهش می‌یابد. در مقادیر بالاتر از ۶ درصد آهن اسفنجی، برای کنترل درجه‌قلیایی لازم است سنگ آهک به کوره بلند بار شود با عنایت به انرژی مورد نیاز جهت تکلیس سنگ آهک در ناحیه احیاء و سستیت در کوره بلند، انتظاری می‌رود که برای تامین این انرژی مصرف کک افزایش یابد.

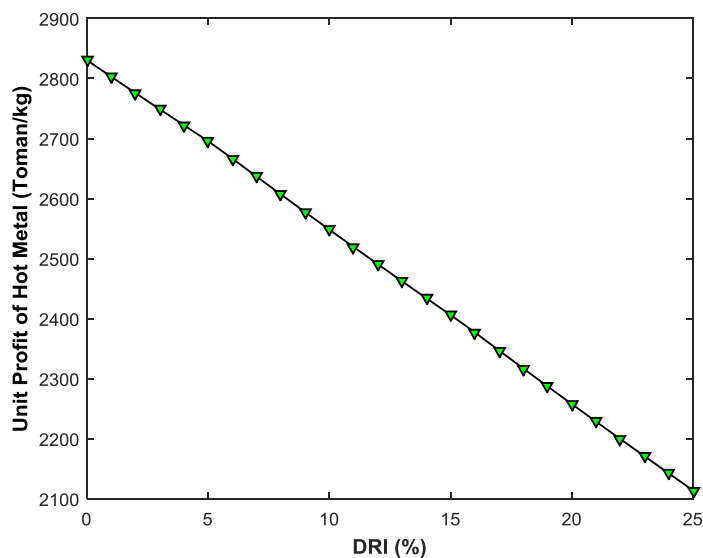


شکل ۵. تاثیر جایگزینی آگلومره با آهن اسفنجی در بار مواد آهن دار بر محدودیت درجه‌قلیایی سرباره

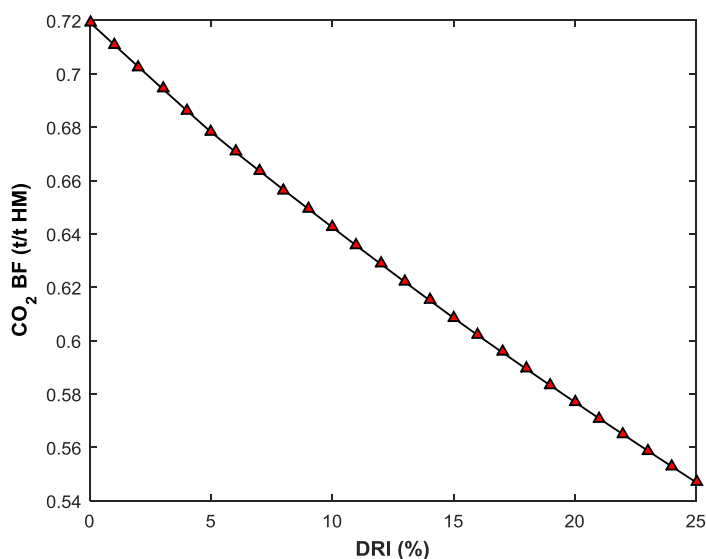
در شکل ۶ تغییرات سود حاصل از تولید یک تن چدن بر اثر جایگزینی آگلومره با آهن اسفنجی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش درصد آهن اسفنجی، سود کاهش می‌یابد. علت کلی کاهش سود، اختلاف

قابل توجه قیمت آهن اسفنجی در مقایسه با آگلومره در ایران می‌باشد. با وجود این که جایگزینی آگلومره با آهن اسفنجی سبب افزایش بهره‌وری و کاهش مصرف کک می‌گردد، اما تاثیر اختلاف قیمت این دو ماده بر میزان سود بیشتر است.

در شکل ۷ تغییرات انتشار دی‌اکسید کربن بر حسب مقدار جایگزینی آگلومره با آهن اسفنجی، کاهش انتشار دی‌اکسید کربن با افزایش درصد آهن اسفنجی را نشان می‌دهد. چون با افزایش جایگزینی آگلومره با آهن اسفنجی، درصد آهن فلزی بار افزایش و مصرف کک کاهش می‌یابد افزایش مقدار آهن فلزی در بار کوره بلند به معنی کاهش نسبت (O/Fe) در بار است. کاهش مقدار کک به معنی کاهش حجم گاز ورودی از ناحیه احیاء و ستیت به منطقه احیاء هماتیت است که چون درصد دی‌اکسید کربن این گاز ثابت می‌باشد، می‌توان نتیجه گرفت که مقدار گاز دی‌اکسید کربن ورودی از ناحیه احیاء و ستیت به منطقه احیاء هماتیت کاهش می‌یابد. از سوی دیگر با کاهش نسبت (O/Fe) در ناحیه مذکور، از درصد هماتیت موجود در این ناحیه کاسته می‌شود و بنابراین حجم گاز دی‌اکسید کربن تولیدی در این ناحیه بر اثر واکنش هماتیت با گاز منواکسید کربن و تولید و ستیت و دی‌اکسید کربن نیز کاهش می‌یابد.



شکل ۶. تاثیر جایگزینی آگلومره با آهن اسفنجی در بار مواد آهن‌دار کوره بلند بر میزان سود تولید



شکل ۷. تاثیر جایگزینی آگلومره با آهن اسفنجی در بار مواد آهن دار کوره بلند بر میزان انتشار گاز دی اکسید کربن

۶ بررسی اعتبار مدل

نتایج مدل برای دو حالت مختلف ترکیب مواد اولیه در کوره بلند شماره ۳ ذوب آهن مورد آزمایش قرار گرفت یعنی حالت یک که جواب بهینه ترکیب مواد اولیه آهن دار کوره بلند شامل ۱۲٪ سنگ آهن معدن چاه گز، ۳٪ سنگ آهن معدن احیاء، ۱٪ سنگ آهن معدن آسیا، ۱۸٪ سنگ آهن معدن امیر سنگان، ۱۲٪ سنگ آهن معدن تنگه زاغ ۵۵٪ آگلومره، سود بیشینه هر کیلوگرم چدن تولیدی ۴۱۶۵ تومان و میزان انتشار دی اکسید کربن کوره بلند ۶۵۵ کیلوگرم بر تن چدن تولیدی می باشد. در حالت دو که اجباراً ۱۵٪ از بار مواد اولیه آهن دار آهن اسفنجی شارژ می شود جواب بهینه ترکیب مواد اولیه آهن دار کوره بلند شامل ۱۵٪ آهن اسفنجی، ۸٪ سنگ آهن معدن چادرملو، ۱۲٪ سنگ آهن معدن چاه گز، ۱٪ سنگ آهن معدن آسیا، ۱۲٪ سنگ آهن معدن تنگه زاغ، و ۵۲٪ آگلومره است که سود تولید به ۳۵۹۴ تومان برای هر کیلو چدن تولیدی و میزان انتشار دی اکسید کربن کوره بلند به ۵۵۰ کیلوگرم بر تن چدن تولیدی کاهش می یابد. در دو حالت ذکر شده بالا، منابع تامین انرژی کک، پودر زغال و گاز طبیعی هستند. مقایسه پیش بینی های مدل و نتایج تجربی در جداول زیر، نشان دهنده دقت بسیار بالای مدل است و علت اختلاف کوچک بین سود محاسباتی مدل و مقدار ارایه شده بوسیله بخش مالی و اقتصادی ذوب آهن وجود تفاوت بین خروجی های مدل و مقادیر تجربی برای مصرف کک، اکسیژن، گاز طبیعی، هوای دم و مواد آهن دار می باشد که با توجه به اطلاعات جدول های ۳ و ۴ این اختلاف برای کک، اکسیژن و هوای دم بیشتر است و این مصارف نقش اصلی در اختلاف بین سود محاسباتی و واقعی دارند. در ادامه دلایل تفاوت خروجی های مدل و نتایج عملی برای مصرف کک و هوای دم بررسی می شود.

۶-۱ وجود خطا در سیستم‌های اندازه‌گیری وزن کک و باسکول‌های توزین پاتیل چدن، اندازه‌گیری ترکیب شیمیایی مواد اولیه و آهک، یکی دیگر از عوامل موثر بروز خطا در محاسبات مصرف کک توسط مدل و تفاوت آن با شرایط عملی است.

۶-۲ خطا در آنالیز گاز طبیعی و وجود هیدروژن در گاز طبیعی می‌تواند در میزان مصرف اکسیژن و به تبع آن هوای دم کوره بلند تاثیر بگذارد. با توجه به این که آنالیز گاز طبیعی به صورت مرتب اندازه‌گیری نمی‌شود؛ بنابراین تغییرات آن می‌تواند باعث خطای محاسباتی گردد و خطای اندازه‌گیری در وزن مذاب، دبی هوای دم و اکسیژن می‌تواند سبب اختلاف در نتایج مدل و واقعی شود.

۶-۳ گازهای احیاء کننده از فضای خالی بین دانه‌های کک و بار آهن‌دار عبور می‌کنند و اگر توزیع کک و بار آهن‌دار یکنواخت نباشد بخشی از این گازها بدون تماس موثر با سطح بار آهن‌دار از دهانه کوره خارج می‌شوند که باعث بهره‌وری CO کمتر و به تبع آن مصرف کک از مقادیر محاسبه شده توسط مدل کمی بیشتر باشد و فشار دهانه پایین در کوره موجب کاهش زمان ماند این گازها در کوره می‌شود و آنها فرصت احیاء مواد آهن‌دار را پیدا نمی‌کنند و بهره‌وری عملی گاز CO دهانه کمتر از مقدار محاسبه شده توسط مدل می‌شود و باعث افزایش مصرف کک می‌گردد.

۶-۴ محدودیت احیاء پذیری مواد آهن‌دار و نفوذ گاز از بین لایه‌های احیاء شده در سطوح مواد آهن‌دار از عوامل مهم تاثیر گذار بر سرعت احیاء می‌باشد؛ بنابراین بخشی از هماتیت در ناحیه احیاء هماتیت به همین دلیل وارد ناحیه احیاء وستیت می‌شود و نسبت (O/Fe) در این ناحیه در شرایط عملی اندکی بیشتر از محاسبه نرم افزار مدل است و این باعث افزایش مصرف کک می‌شود.

۶-۵ مهم‌ترین علت اختلاف نتایج مدل و نتایج عملی اندازه‌گیری شده برای مصرف هوای دم کوره بلند، اختلاف مصرف واقعی و محاسبه شده کک در کوره بلند توسط مدل می‌باشد زیرا هر چه مصرف کک بیشتر شود مصرف هوای دم هم افزایش می‌یابد.

۶-۶ محدودیت احیاء پذیری مواد آهن‌دار کوره بلند سبب می‌گردد که نسبت (O/Fe) در ناحیه احیاء وستیت نسبت به شرایط تئوریک افزایش یابد که موجب بهم خوردن توازن اکسیژن در این ناحیه می‌شود.

جدول ۳. حالت ۱، مواد آهن‌دار بار کوره شامل سنگ آهن، گندله و آگلومره

نام متغیر	واحد	مقدار بهینه محاسبه شده به وسیله مدل	مقدار واقعی اندازه‌گیری شده	انحراف نتایج مدل با نتایج عملی
آگلومره	کیلوگرم/تن تولید	۹۳۸	۹۶۳	۲/۷٪-
گندله	کیلوگرم/تن تولید	۰	۰	۰
سنگ آهن	کیلوگرم/تن تولید	۷۲۷	۷۳۷	۱۴٪-
آهن اسفنجی	کیلوگرم/تن تولید	۰	۰	۰
آهن قراضه	کیلوگرم/تن تولید	۰	۰	۰
سنگ منگنز	کیلوگرم/تن تولید	۰	۰	۰
سنگ آهک	کیلوگرم/تن تولید	۲/۳	۲	۱۵٪+

نصر آزادانی و همکاران، توسعه یک مدل غیرخطی بهینه‌سازی جهت ارزیابی تاثیر استفاده از آهن اسفنجی...

دولومیت	کیلوگرم/ تن تولید	۰	۰	۰
کوارتزیت	کیلوگرم/ تن تولید	۰	۰	۰
کک	کیلوگرم/ تن تولید	۳۴۷	۴۰۰	+٪ ۱۷/۳۵
پودر زغال	کیلوگرم/ تن تولید	۱۵۰	۱۲۰	+۲۰٪
گاز طبیعی	نرمال مترمکعب/ تن تولید	۳۸	۴۳	-۱۱٪
مازوت	کیلوگرم/ تن تولید	۰	۰	۰
اکسیژن غنی سازی	نرمال مترمکعب/ تن تولید	۵۳	۴۰/۸	+٪ ۱۵/۵
تولید هوای دم	نرمال مترمکعب/ تن تولید	۳۷۰۰	۳۷۰۰	۰
مصرف هوای دم	نرمال مترمکعب/ تن تولید	۱۰۶۴	۱۱۷۴	-٪ ۹
گاز کوره	نرمال مترمکعب/ تن تولید	۱۵۸۲	۱۶۷۶	- ۶٪
دمای گاز کوره	درجه سانتیگراد	۲۸۲	۲۸۷	-۲٪
دی اکسید کربن	تن/ تن تولید	۶۵۵	۶۷۵	-٪ ۳
بار کوره	کیلوگرم/ تن تولید	۱۶۶۷	۱۶۵۰	+٪ ۱
سرباره	کیلوگرم/ تن تولید	۳۲۷	۳۵۰	- ۷٪
بهره وری	تن / مترمکعب / روز	۲/۴۸	۲/۳۰	+٪ ۷
سود	ریال / کیلوگرم	۴۱۶۵	۴۰۴۰	+ ۳٪
چدن مذاب	تن تولید / روز	۴۹۶۰	۴۶۰۰	+٪ ۷

جدول ۴. حالت ۲، مواد آهن دار بار کوره بلند شامل سنگ آهن، گندله، آگلومره و ۱۵٪ آهن اسفنجی

نام متغیر	واحد	مقدار بهینه محاسبه شده به وسیله مدل	مقدار واقعی اندازه گیری شده	انحراف نتایج مدل با نتایج عملی
آگلومره	کیلوگرم/ تن تولید	۸۲۷	۸۴۳	-٪ ۲
گندله	کیلوگرم/ تن تولید	۳	۳	۰
سنگ آهن	کیلوگرم/ تن تولید	۵۰۷	۵۲۲	- ۳٪
آهن اسفنجی	کیلوگرم/ تن تولید	۲۳۷	۲۳۹	-٪ ۱
آهن قراضه	کیلوگرم/ تن تولید	۰	۰	۰
سنگ منگنز	کیلوگرم/ تن تولید	۶/۱۵	۶	+ ۲٪
سنگ آهک	کیلوگرم/ تن تولید	۲۱/۲۷	۲۲	- ۳٪
دولومیت	کیلوگرم/ تن تولید	۰	۰	۰
کوارتزیت	کیلوگرم/ تن تولید	۰	۰	۰
کک	کیلوگرم/ تن تولید	۲۸۹	۳۰۳	-٪ ۵
پودر زغال	کیلوگرم/ تن تولید	۱۵۰	۱۲۵	+ ۲۰٪
گاز طبیعی	نرمال مترمکعب/ تن تولید	۲۶	۲۸	- ۶٪
مازوت	کیلوگرم/ تن تولید	۰	۰	۰
اکسیژن	نرمال مترمکعب/ تن تولید	۴۷	۴۹	-٪ ۴
تولید هوای دم	نرمال مترمکعب/ تن تولید	۳۴۰۰	۳۴۰۰	۰
مصرف هوای دم	نرمال مترمکعب/ تن تولید	۹۳۷	۹۱۹	+ ٪ ۲
گاز کوره	نرمال مترمکعب/ تن تولید	۱۳۷۷	۱۳۳۵	+٪ ۳

دمای گاز کوره	درجه سانتیگراد	۲۹۲	۳۰۱	-۰.۳٪
دی اکسید کربن	کیلوگرم / تن تولید	۵۵۰	۶۰۵	-۰.۱۰٪
بار کوره	کیلوگرم / تن تولید	۱۵۷۷	۱۵۹۲	-۰.۱٪
سرباره	کیلوگرم / تن تولید	۳۰۲	۳۰۸	-۰.۲٪
بهره وری	تن / مترمکعب / روز	۲/۸۲	۲/۶	+ ۸٪
سود	ریال / کیلوگرم	۳۵۹۴	۳۴۵۰	+ ۴٪
چدن مذاب	تن تولید / روز	۵۶۴۰	۵۲۰۰	+ ۸٪

جدول ۵. قیمت مواد و حامل‌های انرژی در تیرماه سال ۱۴۰۰ دریافت شده از بخش مالی و اقتصادی ذوب آهن

ردیف	شرح	واحد	قیمت	ردیف	شرح	واحد	قیمت
۱	آگلومره	ریال / کیلوگرم	۱۷۴۲۲	۱۰	کک	ریال / کیلوگرم	۶۴۸۵۱
۲	گندله	ریال / کیلوگرم	۲۳۷۵۳	۱۱	پودر زغال	ریال / کیلوگرم	۳۸۸۳۴
۳	سنگ آهن	ریال / کیلوگرم	۱۸۵۴۴	۱۲	مازوت	ریال / کیلوگرم	۷۷۸۰
۴	آهن اسفنجی	ریال / کیلوگرم	۶۱۹۰۰	۱۳	اکسیژن	ریال / نرمال مترمکعب	۶۴۸۳
۵	آهن قراضه	ریال / کیلوگرم	۹۰۰۰۰	۱۴	گاز طبیعی	ریال / نرمال مترمکعب	۷۳۶۵
۶	سنگ منگنز	ریال / کیلوگرم	۲۱۰۹۹	۱۵	هوای دم	ریال / نرمال مترمکعب	۶۴۸
۷	سنگ آهک	ریال / کیلوگرم	۹۶۵	۱۶	چدن مذاب	ریال / کیلوگرم	۹۵۰۰۰
۸	دولومیت	ریال / کیلوگرم	۷۹۲	۱۷	سرباره	ریال / کیلوگرم	۶۰۰
۹	کوارتزیت	ریال / کیلوگرم	۱۹۱۱				

۷ نتیجه گیری

در ارتباط با مساله اصلی تحقیق مقالات بسیاری مورد مطالعه و بررسی قرار گرفتند که هیچ کدام از این پژوهش‌ها بر اساس ممیزات اقتصادی خاص کشور ایران یعنی استفاده از سنگ آهن و گاز طبیعی ارزان قیمت یارانه‌ای توسط تولیدکنندگان فولاد انجام نشده است؛ بنابراین نتایج این خروجی‌ها برای ذوب آهن اصفهان قابل استفاده نمی‌باشند. در مقاله‌های بررسی شده در پیشینه پژوهش سه مطالعه‌ای که توضیح داده خواهد شد به موضوع این تحقیق نزدیک تر هستند که به اختصار نتایج آن‌ها با نتایج حاصل از این تحقیق مقایسه می‌شود:

تحقیق ارتم و همکاران [۱]، فقط در ارتباط با تجزیه و تحلیل انرژی در کوره بلند شماره یک کارخانه اردمیر ترکیه است که با در نظر نگرفتن تلفات کوره بلند و عدم محاسبه میزان مصرف کک و سایر سوخت‌های کمکی و ثابت فرض کردن آنها دارای تقریبی بزرگ است و از شرایط عملی فرآیند کوره بلند انحراف داشته و در رابطه با ترکیب مواد اولیه آهن دار و اثر مصرف انرژی و مواد اولیه روی سود و هزینه‌های تولید بحثی نشده است.

مطالعه راسول و همکاران [۱۵]، در ارتباط با مدل سازی و تجزیه و تحلیل عملکرد کوره بلند برای استفاده موثر از انرژی و بهبود بهره‌وری کوره بلند می‌باشد که مقدار مصرف کک و تاثیر پارامترهای مختلف کاری چون افزایش دمای هوای دم، کاهش خاکستر کک و میزان سیلیس چدن روی مصرف کک و بهره‌وری کوره بلند بررسی شده

است. در این مقاله هیچ‌گونه بررسی برای سوخت‌های کمکی جایگزین کک و تجزیه و تحلیل اقتصادی برای تولید کوره‌بلند انجام نشده است.

مطالعه ژانگ [۲]، در ارتباط با اثر ترکیب مواد اولیه آهن‌دار کوره‌بلند روی هزینه تولید بوده و مقاله مبنای تحقیق فعلی نیز می‌باشد که شامل محدودیت‌های زیر است:

- تمرکز بر کاهش هزینه مواد اولیه می‌باشد، در صورتی که عامل اصلی اقتصادی در تولید، سود است. به عبارت دیگر کاهش هزینه مواد اولیه لزوماً به معنی افزایش سود نیست. در این خصوص نقش متغیرهایی نظیر بهره‌وری یا مقدار تولید روزانه به ازای واحد حجم کوره بلند و سایر هزینه‌های تولید نظیر هزینه‌های اکسیژن، هوای دم و انرژی الکتریکی و شرایط و مقدار تولید محصولات جانبی گاز کوره بلند و سرباره، مورد توجه قرار نگرفته است.

- مصرف کک در کوره بلند مقداری ثابت فرض شده است اما در عمل مصرف کک تابعی از ترکیب مواد اولیه آهن‌دار و سایر متغیرهای تولید است و با ثابت فرض کردن مصرف کک، تقریبی بزرگ و غیرواقعی اعمال شده است.

- میزان تزریق پودرزغال ثابت فرض شده، و تزریق مازوت و گاز طبیعی هم بررسی نشده است که با شرایط واقعی کار همخوانی ندارد.

- استفاده از قراضه و آهن اسفنجی بعنوان مواد اولیه سازگار با محیط‌زیست و کاهنده مصرف انرژی بررسی و مدل‌سازی نشده است.

در این پژوهش با در نظر گرفتن ممیزات اقتصادی کشور و با توسعه مطالعه و مدل ژانگ و همکاران [۲]، تابع هدف پیشینه‌کردن سود عملیاتی تولید تعریف شده است و ضمن موازنه کامل جرم و انرژی در کوره‌بلند، ترکیب شیمیایی مذاب، مقدار مواد آهن‌دار، کمک ذوب، کک مصرفی، اکسیژن و هوای دم مورد نیاز، دما، حجم و ترکیب شیمیایی گازدهانه و ترکیب و مقدار سرباره تولیدی به عنوان تابعی از متغیرهای تولید نظیر ترکیب شیمیایی و نسبت مواد اولیه در بار کوره‌بلند و دمای هوای دم محاسبه شده و به عنوان متغیرهای تابع هدف یا در محدودیت‌های آن مورد استفاده قرار گرفته است. برای اولین بار در این تحقیق استفاده توأم از هر سه سوخت مازوت، پودرزغال و گاز طبیعی در کنار کک مدل‌سازی شده است و آثار استفاده از آنها روی کاهش مصرف کک و افزایش سود تولید توسط مدل ارایه شده قابل بررسی است همچنین در این تحقیق علاوه بر محدودیت‌های ترکیب شیمیایی چدن و سرباره تولیدی، برای اولین بار درجه حرارت منطقه جلوی فرم‌های کوره‌بلند و درجه حرارت گاز خروجی هم به عنوان محدودیت‌های فنی در نظر گرفته شده‌اند که در نتیجه میزان غنی‌سازی هوای دم با اکسیژن هم قابل محاسبه است. همچنین در این مقاله نتایج حاصل از مدل با نتایج تجربی اندازه‌گیری شده برای کوره‌بلند شماره ۳ ذوب آهن مقایسه شده و نتیجه‌گیری می‌گردد که به کارگیری مدل می‌تواند منافع زیادی داشته باشد.

در این پژوهش، برای تدارک و خرید مواد اولیه کوره‌بلندهای هر کارخانه فولادسازی با فن آوری کوره‌بلند مدلی بر مبنای حصول بیشینه سود کوره‌بلند ارایه گردید و برای کوره‌بلند شماره ۳ ذوب‌آهن اصفهان در نرم افزار متلب اجرا شد و خروجی‌های مدل با نتایج عملی اعتبارسنجی گردید. مدل معرفی شده علاوه بر محاسبه ترکیب بهینه مواد آهن‌دار برای حصول سود بیشینه تولید، قادر است برای هر ترکیب و تحلیل دیگری از مواد اولیه آهن‌دار کوره‌بلند سود تولید و مصارف مهمی چون کک، انرژی، هوای دم، اکسیژن و میزان انتشار دی‌اکسید کربن را پیش‌بینی کند. وضعیت فعلی تولید فولاد در جهان بسیار رقابتی است و کاهش هزینه‌های تولید امکان رقابت پایدار را ممکن می‌سازد. مدل ارایه‌شده جهت مدیریت این هزینه‌ها بوسیله تنظیم نسبت ترکیب مواد اولیه آهن‌دار کوره‌بلند به منظور حصول حداکثر سود تولید، به کار می‌رود و این مدل در مدیریت و برنامه‌ریزی تامین و تدارک کوتاه‌مدت و بلندمدت مواد اولیه آهن‌دار، کک و تولید رقابتی در کنار توجه به محیط‌زیست می‌تواند بسیار موثر باشد. همچنین توسط مدل این پژوهش می‌توان هزینه کک و انرژی مورد نیاز کوره‌بلند و اثر استفاده از آهن اسفنجی در کوره‌بلند را با توجه به ممیزات محیط اقتصادی کشور روی سود تولید و میزان انتشار گاز دی‌اکسید کربن پیش‌بینی کرد. به‌طور عملی به کمک این مدل هر کارخانه فولادسازی با فن آوری کوره‌بلند قادر است نوع و مقدار مواد اولیه مورد نیاز کوره‌بلندها را با توجه به محدودیت‌های عرضه در بازار طوری تدارک و خرید کند که بیشترین سود ممکن تولید حاصل شود و خرید مواد اولیه بر اساس این مدل نسبت به خرید سنتی می‌تواند منافع اقتصادی بزرگی داشته باشد. بر مبنای قیمت‌های جدول ۵ برای مواد و انرژی کوره‌بلند که مربوط به تیرماه سال ۱۴۰۰ است و بر اساس تحلیل حساسیت خروجی‌های مدل، نتیجه می‌شود که تا زمانی که مانند کشورهای اروپایی استانداردهای سخت‌گیرانه زیست محیطی کشور در مورد انتشار گازهای گلخانه‌ای ارتقاء نیابد و با حذف یارانه‌های دولتی قیمت سنگ آهن افزایش قابل ملاحظه‌ای نداشته باشد استفاده از آهن اسفنجی با وجود مزایایی که در کاهش مصرف کک، کاهش انتشار گاز گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن و افزایش بهره‌وری کوره‌بلند دارد به‌عنوان مواد آهن‌دار در بار مواد اولیه کوره‌بلند دارای توجیه اقتصادی نخواهد بود. و گزینه‌های اقتصادی مواد آهن‌دار کوره‌بلند فقط شامل سنگ آهن، آگلومره و گندله خواهد بود. موضوعات زیر برای پژوهش‌های آتی که می‌تواند منجر به افزایش دقت مدل بهینه‌سازی سود تولید شود پیشنهاد می‌گردد.

- ۱- بررسی نحوه توزیع بار مواد اولیه در دهانه کوره‌بلند بر روی مصرف مواد اولیه، کک، بهره‌وری و سود تولید و انتشار گاز گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن
- ۲- بررسی تاثیر سرعت و زمان ماند گاز در کوره‌بلند بر روی مصرف مواد اولیه، کک، بهره‌وری و سود تولید و انتشار گاز گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن
- ۳- توسعه و بهره‌گیری عملی از مدل ارایه شده جهت خرید و تدارک مواد اولیه و انرژی کوره‌بلندهای کارخانه‌های فولادسازی

منابع

- [1] Emre Ertem M., Gurgun S., (2006). Energy balance analysis for Erdemir blast furnace number one. *Applied Thermal Engineering* 26, 1139-1148.
- [2] Zhang R., Lu J., Zhang G., (2011). A knowledge-based multi-role decision support system for ore blending cost optimization of blast furnaces. *European Journal of Operational Research* 215, 194-203.
- [3] Wang C., Larsson M., Ryman C., Grip C.E., Wikstrom J. O. , Johnsson A. and Engdahl J. (2008). A model on CO2 emission reduction in integrated steelmaking by optimization methods. *International Journal of Energy Research* 32, 1092-1106.
- [4] Yilmaz, C., & Turek, T. (2017). Modeling and simulation of the use of direct reduced iron in a blast furnace to reduce carbon dioxide emissions. *Journal of Cleaner Production*, 164, 1519-1530.
- [5] An R., Yu B., Li R., Wei Y., (2018). Potential in energy saving and CO2 reduction in China iron and steel industry. *Applied Energy* 226, 862-880.
- [6] Mottakiaei, Rasul, Safari, Babak, Mazaheri, Mohammad Ali, ... & Mohammad Ali. (2018). Designing the optimal qualitative model of raw materials for the production of sponge iron using probabilistic mathematical modeling in Iranian Ghadir Iron and Steel Company. *Market and Capital*, 97(9), 96-99
- [7] Sanjari, Samaneh, Rezayan, Sahar, Jozi, Seyed Ali. (2016). Environmental risk assessment of sponge iron production unit of Khorasan Steel Company using JSA and ETBA comparative methods. *Environmental Science and Technology Quarterly*, 19((Special Issue No. 5)), 93-102.
- [8] Saboonji A., Fathi H., Saidi A., Dovazdeh Emami M., (2013) Thermodynamic analysis and modeling of blast furnace in order to increase efficiency and reduce coke consumption, master's thesis, Isfahan University of Technology
- [9] Shen, X., Chen, L., Xia, S., Xie, Z., & Qin, X. (2018). Burdening proportion and new energy-saving technologies analysis and optimization for iron and steel production system. *Journal of Cleaner Production*, 172, 2153-2166.
- [10]. Kuramochi Takeshi. (2017). Assesment of CO2 emissions pathways for the Japanese iron and steel industry towards 2030 with consideration of process capacities and operational constraints to flexibly adapt to a range of production levels. *Journal of Cleaner Production* 147, 668-680.
- [11] Xu Wenqing, Wan Bin, Zhu Tingyu, Shao Mingpan. (2016). CO2 emissions from China's iron and steel industry. *Journal of Cleaner Production* 139, 1504-1511 .
- [12] Liu, X., Chen, L., Qin, X., & Sun, F. (2015). Exergy loss minimization for a blast furnace with comparative analyses for energy flows and exergy flows. *Energy*, 93, 10-19.
- [13] Moya J., Pardo N., (2013). The potential for improvements in energy efficiency and CO2 emissions in the EU27 iron and steel industry under different payback periods. *Journal of Cleaner Production* 52, 71-83.
- [14] Helle H., Helle M., Saxen H., (2011). Nolinear optimization of steel production using traditional and novel blast furnace operation strategies. *Chemical Engineering Science* 66, 6470-6481.
- [15] Rasul M. G., Tanty B.S., Mohanty B. (2007). Modelling and analysis of blast furnace performance for efficient utilization of energy. *Applied Thermal Engineering* 27, 78-88.
- [16] Larsson Mikael and Dahl. Jan. (2003). Reduction of the Specific Energy Use in an Integrated Steel Plant – The Effect of an Optimization Model. *ISIJ International*, Vol. 43, No. 10, pp. 1664-1673.
- [17] Peacey J.G., Davenport W.G. (1979). *The Iron Blast Furnace*. Toronto, Canada Pergamon Press.