مجله تحقیق در عملیات در کاربردهای آن، سال بیستم، شماره اول (پیاپی ۷۶)،بهار ۰۲، ص ص ۷۸-۴۹
شاپا ۷۲۸۶-۲۲۵۱

توسعه یک مدل غیرخطی بهینه‌سازی جهت ارزیابی تاثیر استفاده ازآهن 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 دهاقان، دانشگاه آزاد اسلامی، دهاقان، 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، آهن‌اسفنجی را به‌عنوان ماده‌اولیه‌آهن‌دار سازگار با محیط‌زیست با بخشی از سنگ‌آهن و آگلومره در بار مواداولیه کوره‌بلندها جایگزین کرده‌اند و این باعث کاهش مصرف انرژی و انتشار گازگلخانه‌ای دی‌اکسیدکربن همراه با تخفیف جریمه‌های زیست‌محیطی شده‌است. از دلایل ضرورت انجام این پژوهش متفاوت بودن شرایط فولادسازان داخلی با رقبای بین‌المللی به‌علت استفاده از سنگ‌آهن یارانه‌ای و گازطبیعی ارزان قیمت، اختلاف زیاد قیمت آهن‌اسفنجی با سایر مواداولیه‌آهن‌دار و هزینه زیاد تامین کک و زغال‌خارجی ناشی از تحریم‌های‌تجاری است. بررسی استفاده از آهن‌اسفنجی روی هزینه‌تولید، بهره‌وری کوره‌بلند، و میزان انتشار گازگلخانه‌ای دی‌اکسیدکربن می‌باشد. در این تحقیق یک مدل غیرخطی بهینه‌سازی برای پیشینه‌سازی سود تولید چدن در صنعت فولاد توسعه داده‌شده‌است. در این مدل نسبت به تحقیقات قبلی، تصمیم‌گیری بهینه در انتخاب و جایگزینی مواداولیه به همراه محدودیت‌های جدید و توجه به محیط‌زیست ارایه شده‌است. مدل پیشنهاد شده با داده‌های کوره‌بلند شماره ۳ شرکت‌ذوب‌آهن‌اصفهان در نرم‌افزار متلب اجرا و اعتبارسنجی گردید. نتایج نشان می‌دهد که مدل پژوهش در کسب منافع‌اقتصادی و چگونگی جایگزینی مواداولیه به‌طور قوی موثر است.

کلمات کلیدی: مدل غیرخطی بهینه‌سازی، دی اکسیدکربن، آهن اسفنجی، ذوب آهن.

* عهده‌دار مکاتبات

آدرس الکترونیکی: smrdavoodi@ut.ac.ir

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.61186/jamlu.20.1.49]

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 هدف‌گذاری شده است. نیازهای مختلف تولید؛ ظرفیت‌ها و تنوع در کیفیت مواد اولیه از جمله مشکلات برخی از تولیدکنندگان محصول نهایی به شمار می رود. فولاد یک ماده‌ی آهنی است که از مقادیر کمی کربن و عناصر آلیاژی تشکیل می‌شود و می‌تواند به‌صورت 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 راه‌آهن‌ها، خانه‌ها، انتقال انرژی مثل الکتریسیته و گاز طبیعی، تولید غذا به‌وسیله‌ی ماشین‌های کشاورزی، آبرسانی به‌وسیله‌ی 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 به‌دست آوردن فولاد خام[1] یعنی ریخته‌گری و نورد، کم و بیش یکسان است؛ اما برای تولید فولاد خام دو فرآیند عمده زیر وجود دارد:

تولیدچدن مذاب[2] در کوره بلند و سپس تولید فولاد در کنورترهای اکسیژنی، که این روش در کارخانه ذوب‌آهن اصفهان انجام می‌شود و از احیای غیرمستقیم آهن استفاده گردیده، سنگ‌آهن پس از فرآوری به همراه آهک 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[3] 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 به‌وسیله 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 آهن‌اسفنجی[4] به‌روش احیای مستقیم سنگ‌آهن و ذوب آهن‌اسفنجی و قراضه در کوره‌های قوس الکتریکی[5] است که این فرآیند تولید در کارخانه‌هایی چون فولادمبارکه 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 به‌وسیله 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] Convertor
[4] DRI
[5] Electric arc furnaces

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.61186/jamlu.20.1.49]

کارخانه فولادسازی است و هزینه‌اصلی تولید این واحد شامل هزینه‌های مواداولیه‌آهن‌دار، انرژی، نیروی انسانی، تعمیر و نگهداری نقش موثری در رقابت‌پذیری فولادساز خواهد داشت. مواداولیه آهن‌دار کوره‌بلند از ترکیب نسبت متفاوتی از آگلومره[۱]، گندله[۲] و سنگ‌آهن درشت‌دانه[۳]، و از معادن با عیارهای آهنی مختلفی همراه با کک متالوژی به عنوان منبع‌اصلی تامین انرژی و گازهای احیاءکننده تامین می‌شوند [۱]. میزان مصرف کک و هزینه انرژی کوره‌بلند نیز وابسته به نوع و نسبت ترکیب مواداولیه آهن‌دارکوره می‌باشد. با لحاظ محدودیت‌های فنی جهت کاهش هزینه‌های انرژی کوره‌بلند امکان جایگزینی بخشی از کک با سوخت‌های فسیلی چون مازوت[۴]، گازطبیعی و پودرزغال[۵] وجود دارد. در کوره‌بلند مقدار مصرف موادی چون آهک و دولومیت و روانسازها تابع ترکیب شارژ موادآهن‌دار و محدودیت‌های فنی است.

در برخی از کارخانه‌های فولادسازی نسبت ترکیب مواداولیه کوره‌بلندها به‌صورت تجربی و توسط متخصصین فنی در فرآیندهای کک‌سازی، آگلومراسیون و کوره‌بلند با توجه به قیمت، تحلیل، و مقدار قابل تامین در بازار محاسبه می‌شود که این کاری وقت‌گیر و بر مبنای سعی و خطا خواهد بود [۲]. وضعیت کسب وکار فعلی تولید فولاد در جهان بسیار رقابتی است و کاهش هزینه‌های تولید در بخش کوره‌بلند باعث کاهش کل هزینه‌ها، و امکان رقابت پایدار را ممکن می‌سازد از این‌رو پیدا کردن مدلی جهت مدیریت این هزینه‌ها به‌وسیله تنظیم نسبت ترکیب مواد اولیه‌آهن‌دار کوره‌بلند به‌منظور حصول پیشینه سود تولید، در رقابت‌پذیری اهمیت بسیاری دارد [۳].

هدف اصلی کارگاه‌های کوره بلند در ذوب‌آهن 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 درشت‌دانه به‌صورت هماتیت[۶] (Fe_2O_3) یا مگنتیت[۷] (Fe_3O_4) و با عیارآهن حدود ۶۰٪ به‌طور مستقیم بدون هیچ عملیات اضافی به داخل کوره بلند وارد می‌شوند و یا بعد از فراوری سنگ‌آهن 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 کوره‌بلند شارژ می‌شوند. در واحد کک‌سازی زغال کک شو وارد باطری های 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 کوره‌بلند است.

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

[1] Sinter
[2] Pellet
[3] Lump
[4] Oil
[5] Pulverized coal
[6] Hematite
[7] Magnetite
[8] Dolomite
[9] Quartzite

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.61186/jamlu.20.1.49]

مقدار دقیق کک، مدلی طراحی شود که در مدیریت و برنامه‌ریزی تامین و تدارک کوتاه‌مدت و بلندمدت مواداولیه آهن‌دار، کک و تولید اقتصادی درکنار 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 آهن‌اسفنجی در کوره بلند روی سود تولید و میزان انتشار گاز دی‌اکسیدکربن، درجه‌حرارت گاز جلو فرمها، دما و ترکیب شیمیایی گازدهانه، مقدار هوای‌دم مورد نیاز و تاثیر غنی‌سازی هوای‌دم با اکسیژن را پیش‌بینی و ارایه دهد. در ذوب‌آهن‌اصفهان به‌عنوان کارخانه‌فولادسازی مورد مطالعه به‌علت شرایط رقابتی فضای کسب وکار و سخت‌گیری‌های زیست‌محیطی با چالش‌های جدی فنی و اقتصادی مرتبط با تامین مواداولیه مواجه شده‌است. با توجه به تنوع معادن و منابع تامین‌کننده مواداولیه و همچنین محدودیت‌های موجود برای دسترسی به هریک از این منابع، هزینه تامین آنها و محدودیت‌های زیست‌محیطی، برای ذوب‌آهن گزینه‌های مختلفی برای تامین موادآهن‌دار متصور است. استفاده از آهن اسفنجی به عنوان 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 سنگ‌آهن و گازطبیعی ارزان قیمت یارانه‌ای توسط تولیدکنندگان فولاد انجام نشده است. بنابراین نتایج پژوهش‌های قبلی برای فولادسازهای داخلی چون ذوب‌آهن اصفهان قابل استفاده نمی‌باشند. در این پژوهش با در نظر گرفتن ممیزات اقتصادی کشور و با توسعه مطالعه و مدل ژانگ وهمکاران [۲]، تابع هدف‌بیشینه‌کردن سودعملیاتی 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 مدل‌غیرخطی بهینه‌سازی جهت ارزیابی تاثیر استفاده ازآهن‌اسفنجی روی سود تولید کوره‌بلندهای صنعت فولاد کشور توسعه داد؟

بر اساس اطلاعات حوزه مالی و اقتصادی کارخانه، در ذوب‌آهن در سال ۱۳۹۹ به‌طور تقریبی به‌ترتیب ۵۰٪ و ۲۳ ٪ قیمت تمام‌شده برای تولید هر تن محصول نهایی نوردی، ناشی از هزینه کک و هزینه مواداولیه‌آهن‌دار کوره‌بلند است. این شاخص‌ها در اتحادیه اروپا به‌ترتیب و به‌طور متوسط ۲۰/۵۶ ٪ و ۲۰/۹۱ ٪ هستند. در این مقاله نتایج حاصل از مدل با نتایج تجربی اندازه‌گیری‌شده برای کوره‌بلند شماره۳ ذوب‌آهن مقایسه‌شده و نتیجه‌گیری می‌گردد که به‌کارگیری مدل می‌تواند منافع اقتصادی زیادی داشته باشد. پرسش اصلی و فرعی پژوهش به ترتیب زیر تعریف می شود.

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

استفاده از آهن‌اسفنجی به‌عنوان ماده آهن‌دار در کوره‌بلند شماره۳ ذوب‌آهن چه تاثیری روی سود تولید و انتشار گازگلخانه‌ای دی‌اکسیدکربن دارد؟

در ادامه و در بخش۲، پیشینه تحقیق و مبانی نظری بررسی شده است. در بخش۳، مدل ریاضی تحقیق ارایه شده است. در بخش۴، روند اجرا و حل مدل بررسی گردیده است. در بخش ۵، جایگزینی آهن‌اسفنجی به‌جای

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.61186/jamlu.20.1.49]

آگلومره بحث شده‌است. در بخش۶، اعتبارسنجی مدل با مقایسه خروجی‌های مدل با نتایج تجربی انجام گردیده است و در نهایت نتیجه‌گیری و پیشنهادها برای انجام پژوهش‌های آتی در بخش ۷ ارایه شده است.

۲ پیشینه پژوهش

تولید فولاد در دهه‌های اخیر رشد سریعی را شاهد بوده‌است به‌طوری‌که تولید جهانی فولاد از ۲۰۰ میلیون تن در سال ۱۹۵۰ به بیش از ۱۸۷۷میلیون تن در سال ۲۰۲۰رسیده‌است و این روند صعودی، افزایش تقاضا برای مواداولیه و انتشار حدود ۷٪ ازکل گازهای گلخانه‌ای جهان توسط این صنعت را در پی داشته‌است [۵]. محدودیت در تامین مواداولیه آهن‌دار، کک و زغال در کنار سخت‌گیری‌های زیست‌محیطی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای باعث شده‌است که امروزه انتخاب بهینه نوع و ترکیب موادآهن‌دار کوره‌بلندها جهت ادامه کار اقتصادی و پایدار، مورد توجه جدی تولیدکنندگان فولاد واقع شود. در ایران در پنج دهه پیش با بهره‌برداری از کارخانه ذوب‌آهن اصفهان به‌طور عملی تولید فولاد بر اساس فن‌آوری کوره‌بلند شروع شد و محدودیت‌های ذکرشده همراه با توسعه واحدهای تولید کنسانتره و احیاءمستقیم درکشور و صادرات بی‌رویه سنگ‌آهن، این کارخانه را با چالش جدی برای تامین و تدارک اقتصادی مواداولیه مورد نیاز کوره‌بلندها مواجه‌کرده‌است. براساس مرور دقیقی که انجام گرفته‌است در کشور تاکنون تحقیقی در خصوص مدل‌سازی انتخاب نوع و ترکیب بهینه و اقتصادی مواد آهن‌دار کوره بلند با توجه به ممیزات محیط اقتصادی کشور انجام نشده است. ذوب‌آهن به‌صورت سنتی و بر اساس روند اولیه، موادآهن‌دار را از ترکیب ۳۰٪ سنگ درشت دانه معدن بافق و ۷۰٪ آگلومره تامین و بار کوره‌بلندها می‌کند که این روند دیگر با محدودیت‌های تامین و تدارک مواد آهن‌دار در بازار و شرایط اقتصادی متحول کنونی، همخوانی ندارد. در مطالعات خارجی هم تاکنون پژوهش‌های زیاد وکاملی برای حل مساله تعیین ترکیب بهینه مواداولیه آهن‌دار انجام نگردیده است [۲]. و مطالعات انجام شده، به‌طور عمده حول دو محور اصلی کاهش مصرف انرژی و حفاظت از محیط زیست با کاهش انتشارگاز گلخانه‌ای دی‌اکسیدکربن تولیدی کوره‌بلند می‌باشند که برخی از مهم‌ترین و جدیدترین آنها به‌طور مختصر ذکر می‌شود.

متکیایی و همکاران (۱۳۹۷) در مقاله خود تحت عنوان "طراحی مدل کیفی بهینه مواد اولیه برای تولید آهن اسفنجی با استفاده از مدلسازی ریاضی احتمالی در شرکت آهن و فولاد غدیر ایرانیان" بیان کردند که در تولید آهن اسفنجی، مواد اولیه مناسب مهم‌ترین 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 به‌وجود می‌آورد. در تولید پیوسته تصمیم‌گیری برای بهینه‌سازی 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 بهینه‌سازی بر مبنای اطلاعات پایه از گندله ورودی به‌روزشده و در اختیار سیستم قرار می‌گیرد. برای تحلیل دقیق‌تر از روش آماری برای تخمین استفاده شده است. مدل پیشنهادی در شرکت آهن و فولاد غدیر ابرانیان مورد آزمون قرار می‌گیرد تا نشان دهیم این مدل برای پشتیبانی تصمیم در تامین مواد اولیه مطلوب در جهت تصمیمات بازار موثر خواهد بود [۶].

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.61186/jamlu.20.1.49]

سنجری و همکاران(۱۳۹۶) در مقاله‌ای تحت عنوان "ارزیابی خطر محیط‌زیستی واحد تولید آهن اسفنجی شرکت فولاد خراسان با استفاده از روش‌های تطبیقی JSA وETBA" بیان کردند که با توجه به پیشرفت تکنولوژی و رشد قابل‌توجه تولید و سیر صعودی خطرها در محیط کار و آگاهی و تمایل تولیدکنندگان جهت به حداقل رساندن خطرات، این پژوهش انجام‌شده است. هدف از ارایه این مقاله ارزیابی خطر محیط‌زیستی واحد احیای مستقیم با استفاده از دو روش تجزیه‌وتحلیل 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 یک دیگر مقایسه و درنهایت نمره‌دهی جداگانه در هر روش انجام گرفت. در روش تجزیه‌وتحلیل آنالیز ایمنی شغلی،۶ شغل پرخطر شناسایی شد، در این روش ۴۷ خطر شناسایی که ۲ مورد غیرقابل‌قبول، ۲۸ مورد دارای خطر نامطلوب و ۱۷ مورد قابل‌قبول بود. در روشETBA ، 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 غیرقابل‌قبول، ۷ مورد نامطلوب، ۳ مورد قابل‌قبول با تجدیدنظر و ۴ مورد نیز قابل‌قبول بدون نیاز به تجدیدنظر می‌باشند [۷].

فتحی و همکارانش(۱۳۹۰) درتحقیقی با عنوان تحلیل و مدل‌سازی کوره‌بلند 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 به‌عنوان یک حجم کنترل با ورودی‌ها و خروجی‌های مشخص درنظر گرفته شده و شرایط کوره‌بلند به‌صورت پایدار و مستقل از زمان بررسی‌گردیده است [۸].

شن[1] 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 دی‌اکسیدکربن به‌عنوان توابع هدف بهینه‌سازی ۷ متغیر کاری با ۶۱ محدودیت در نظر گرفته شده‌است 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 دی‌اکسیدکربن می‌شوند [۹].

ایلماز[2] و همکاران (۲۰۱۷)، در پژوهشی با نام "مدل سازی و شبیه‌سازی استفاده از آهن اسفنجی در کوره بلند برای کاهش انتشار گاز دی اکسید کربن" اثر مصرف آهن اسفنجی تولید شده از روش‌های پروسسی میدرکس و اچ وای ال[3] را در کوره بلند بر روی میزان مصرف انرژی و گاز دی اکسید 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

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-28]
[DOI: 10.61186/jamlu.20.1.49]

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

کوراموچی[1] و همکارانش(۲۰۱۷) در تحقیقی تحت عنوان ارزیابی روند انتشار گاز دی‌اکسیدکربن صنعت آهن‌وفولاد ژاپن تا سال ۲۰۳۰ با در نظرگرفتن قابلیت‌های فرآیندی و محدودیت‌های کاری و انعطاف در تغییر مقدار تولید با ارایه نقشه راهی برای کاهش دی‌اکسیدکربن تولیدی در صنعت فولاد ژاپن می‌پردازد، این مطالعه با لحاظ سناریوهای مختلف برای کل ظرفیت تولید ژاپن و افزایش میزان مصرف قراضه، با ارایه مدلی به‌صورت کمی روند تولید دی‌اکسیدکربن در صنعت فولاد ژاپن را تا سال ۲۰۳۰ بررسی و پیش‌بینی کرده‌است و نتیجه می‌گیرد که مصرف قراضه ضمن اثر روی کاهش گاز دی‌اکسیدکربن تولیدی، هزینه تولید را هم تحت تاثیر قرارخواهد داد [۱۰].

شو[2] و همکاران (۲۰۱۶)، در مطالعه‌ای تحت عنوان "میزان انتشار گاز دی‌اکسیدکربن در صنعت آهن و فولاد چین" بیان نمود مصرف انرژی و میزان انتشار گاز دی‌اکسیدکربن در صنایع آهن و فولاد چین در مقایسه با سایر نقاط جهان بالاست. این مطالعه انتشار کربن در کوره‌بلند و کنورتور را به‌وسیله تحلیل جریان مواد[3] بررسی کرده‌است و اولین تحقیق در مورد انشار گاز دی‌اکسیدکربن در صنایع آهن و فولاد چین است که هم انتشار مستقیم ناشی از سوختن زغال و احتراق سوخت‌های غیر فسیلی و هم انتشار غیرمستقیم را شامل می‌شود. با ارایه یک روش محاسبه ابتکاری، میزان تولید این گاز توسط واحدهای فولادسازی چین را ۱۳۳۶میلیون تن در سال برآوردکرده‌اند همچنین اقداماتی‌که باعث کاهش میزان گاز دی‌اکسیدکربن تولیدی می‌شوند و در هزینه تولید تاثیرخواهند داشت مورد بررسی قرار گرفته‌است [۱۱].

لی یو[4] و همکاران (۲۰۱۵)، در پژوهشی با نام "کمینه کردن مصرف انرژی برای کوره‌بلند با تجزیه و تحلیل جریان انرژی" اقدام به کمینه کردن تلفات انرژی‌کوره‌بلند بر اساس توازن مواد و توازن انرژی نموده‌اند و تاثیر درجه‌حرارت گاز خروجی‌کوره‌بلند، میزان تزریق پودر زغال، درجه قلیایی سرباره و پارامترهای هوای دم روی نتایج بهینه‌سازی بررسی شده‌است. نتایج بهینه‌سازی مشخص می‌کند که با افزایش میزان تزریق پودر زغال و دمای هوای دم تلفات کاهش می‌یابد و با افزایش رطوبت در هوای دم، افزایش غنی‌سازی هوای‌دم با اکسیژن، زیاد شدن درجه قلیایی سرباره و افزایش دمای گاز خروجی تلفات در کوره زیاد می‌شود. تابع هدف غیرخطی است و از نرم‌افزار متلب و الگوریتم SQP[5] برای حل مدل استفاده شده است [۱۲].

مویا و همکارانش[6] [۱۳] در مقاله‌ای به‌نام ظرفیت‌های بهبود در بازدهی انرژی و انتشار دی‌اکسیدکربن در صنعت آهن‌وفولاد ۲۷ کشور اتحادیه‌اروپا، اقدامات اصلاحی‌که با استفاده از بهترین تکنولوژی‌های دردسترس

[1] Kuramochi Takeshi
[2] Xu Wenqing
[3] Material Flow Analysis (MFA)
[4] Liu Xiong
[5] Sequential quadratic programming
[6] Moya Jose Antonio, Pardo Nicolas.

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.61186/jamlu.20.1.49]

می‌تواند باعث کاهش مصرف انرژی و انتشار دی‌اکسیدکربن در صنایع فولاد اتحادیه اروپا شود را به کمک مدلی غیرخطی مورد مطالعه قرار داده‌اند و میزان سرمایه‌گذاری انجام این بهبودها و اثرآنها را برآورد کرده‌اند.

ژانگ[1] و همکاران (۲۰۱۱)، در مطالعه‌ای با عنوان "یک سیستم دانش‌بنیان پشتیبان تصمیم‌گیری برای بهینه‌سازی ترکیب و نسبت مواداولیه کوره‌بلند" هزینه تولید کوره‌بلند را به عنوان تابع هدف بهینه‌سازی به‌وسیله یک مدل غیرخطی در نرم‌افزار متلب مورد بررسی قرارداده‌اند. در این مطالعه تحلیل شیمیایی و قیمت مواداولیه و کک بعنوان ورودی به مدل اعمال می‌شوند و مدل‌سازی برای ۱۵ نوع سنگ‌آهن و موادآهن‌دار 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 موادآهن‌دار روی مصرف کک در نظر گرفته نشده است. خروجی مدل ترکیب بهینه مواداولیه آهن‌دار می‌باشد که با نتایج تجربی در یک کارخانه فولادسازی در کشور چین مقایسه شده‌است [۲].

هله و همکارانش[2](۲۰۱۱) در پژوهشی تحت عنوان بهینه‌سازی غیرخطی تولید فولاد با استفاده از استراتژی‌های کاری کوره‌بلندهای سنتی و جدید و با تابع هدف حداقل‌کردن هزینه تولید هر تن فولاد خام تحت محدودیت‌های فرآیندی و مواد اولیه، چرخش دوباره گاز خروجی کوره‌بلند را بعد از جدا کردن دی‌اکسیدکربن آن از نظر اقتصادی به‌وسیله یک مدل غیرخطی و شبیه‌سازی کامپیوتری امکان‌سنجی کرده‌اند. نتیجه این بررسی چرخش دوباره گاز خروجی به کوره‌بلند را اقتصادی نشان داده‌است. همچنین جداسازی دی‌اکسیدکربن از گاز خروجی کوره باعث عدم نیاز به شارژ مازوت شده‌است و انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش داده‌است [۱۴].

وانگ و همکارانش[3](۲۰۰۹) در تحقیقی با عنوان مدلی برای کاهش گاز دی‌اکسیدکربن در مجتمع‌های فولادسازی به کمک روش‌های بهینه‌سازی و با همکاری کارخانه فولادسازی ساب سوئد برای فرآیندهای کوره‌بلند و کنورتور به‌عنوان یک سیستم یکپارچه، مدلی دوهدفه را برای حداقل نمودن هزینه‌تولید فولاد و مقدارگاز دی‌اکسیدکربن تولیدی به‌وسیله شارژ قراضه در مجموعه کوره‌بلندکنورتور بررسی نموده و نتیجه گرفتند که با افزایش قراضه در بار میزان دی‌اکسیدکربن تولیدی کاهش ولی هزینه تولید زیادتر می‌شود. در این تحقیق محدودیت مقدار قراضه تا ۲۵٪ بررسی شده‌است و با اولویت کنورتور، بخشی از قراضه در کنورتور و بخشی در کوره‌بلند اضافه شده‌است [۳].

راسول و همکارانش[4] (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 ارایه داده‌اند و از یک فرمول تجربی برای ارزیابی تلفات کوره‌بلند استفاده شد. بر اساس خروجی‌های مدل افزایش دمای هوای دم، کاهش خاکسترکک 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 قرارگرفته است [۱۵].

[1] Zhang
[2] Helle Hannu, Helle Mikko, Saxen Henrik
[3] Wang C., Larsson M., Ryman C.
[4] Rasoul M.G.

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.61186/jamlu.20.1.49]

ارتم و همکارانش[1](۲۰۰۶) در پژوهشی تحت عنوان تجزیه و تحلیل بالانس انرژی در کوره‌بلند شماره یک کارخانه اردمیر ترکیه بالانس انرژی ورودی و خروجی کوره‌بلند را بر اساس یک مدلی ژاپنی برای این کوره‌بلند مورد بررسی قرارداده است و انرژی مورد نیاز جهت پروسس احیاء را از تفاوت کل انرژی ورودی از کل انرژی خروجی محاسبه کرده‌اند [۱].

لارسون و همکارانش[2] (۲۰۰۳) در پژوهشی با عنوان کاهش انرژی استفاده‌شده، اثر یک مدل بهینه‌سازی مصرف انرژی برای یک مجتمع فولادسازی را بررسی کرده‌است؛ بدین ترتیب که ابتدا هر یک از واحدهای کک‌سازی، کوره‌بلند، کنورتور، ریخته‌گری و نیروگاه مدل شده‌اند و سپس تابع هدف کمینه نمودن انرژی مجتمع فولادسازی به‌وسیله مدل برنامه‌ریزی خطی تعریف شده‌است و شدت انرژی برای هشت حالت ترکیب مختلف شارژ مواد درکوره‌بلند وکنورتور بررسی و شبیه‌سازی گردیده‌است. همچنین اثر بهینه نمودن مصرف انرژی روی کاهش انتشار گاز دی اکسیدکربن هم بررسی شده است [۱۶].

مقاله ژانگ و همکاران در ارتباط با اثر ترکیب مواد اولیه‌آهن‌دار کوره‌بلند روی هزینه‌تولید می‌باشدکه محدودیت‌های زیر در آن دیده می‌شود.

- تمرکز بر کاهش هزینه مواد اولیه می‌باشد، در صورتی‌که 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 هزینه های 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 مواداولیه آهن‌دار و سایر متغیر های تولید است و با ثابت فرض کردن مصرف کک ،تقریبی بزرگ و غیر واقعی اعمال شده‌است.
- میزان تزریق پودرزغال ثابت فرض‌شده، و تزریق مازوت و گازطبیعی هم بررسی نشده‌است که با شرایط واقعی‌کار همخوانی ندارد.
- تاثیر استفاده از قراضه و آهن‌اسفنجی به‌عنوان مواداولیه سازگار با محیط‌زیست و کاهنده مصرف انرژی روی سود تولید بررسی و مدل‌سازی نشده است.

برای اولین بار در این تحقیق استفاده توام از هر سه سوخت کمکی مازوت، پودرزغال و گازطبیعی 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 کوره‌بلند و درجه حرارت گاز خروجی هم

[1] Emre Ertem M., Gurgen Sabit.
[2] Larsson Mikael and Dahl. Jan.

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-28]
[DOI: 10.61186/jamlu.20.1.49]

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

۳ روش‌شناسی تحقیق

در این پژوهش مدل ارایه‌شده توسط ژانگ و همکاران تکمیل‌شده وتابع هدف از هزینه مواد اولیه به سودعملیاتی تولید، تغییر یافته است و ضمن موازنه کامل جرم و انرژی در کوره‌بلند، ترکیب شمیایی 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 متغیر های تولید نظیر ترکیب شیمیایی و نسبت مواد اولیه در بار کوره بلند و دمای هوای دم محاسبه شده و به عنوان متغیر های تابع هدف یا در محدودیت های آن مورد استفاده قرارگرفته است. بر اساس روابط فرآیندی، معادلات توازون جرم و انرژی و قوانین ترمودینامیکی در فرآیند کار کوره‌بلند، مدلی جهت عملکرد کوره‌بلند و محاسبه حداکثر سود تولید کوره ارایه گردید. تحقیق حاضربه لحاظ روش وماهیت کارتوصیفی وازنظرهدف کاربردی و از نظر زمان مقطعی می‌باشد. به این دلیل توصیفی می‌باشد که مطالعه وضعیت کنونی شرکت مورد بررسی قرارگرفته است. در این پژوهش رابطه میان متغیرها براساس اهداف پژوهش تحلیل می‌شود و به بهینه‌سازی توابع هدف خواهیم پرداخت. باتوجه به این که هدف این تحقیق استفاده از نتایج آن جهت پیشینه کردن سود تولید و همچنین بهینه کردن میزان انتشار گازگلخانه‌ای دی‌اکسیدکربن ناشی از تولید می‌باشد؛ بنابراین این تحقیق، ازنوع کاربردی است. جامعه آماری این پژوهش شرکت ذوب‌آهن اصفهان درسال ۱۴۰۰ می‌باشد که به عنوان شرکت مورد نظر انتخاب شد. در این پژوهش برای جمع آوری اطلاعات درزمینه مبانی نظری موضوع پژوهش، از طریق مطالعه کتب، مقالات ومراجعه به سایت‌های تخصصی، اطلاعات لازم از روش کتابخانه ای استفاده شده است و برای جمع‌آوری اطلاعات لازم جهت اجرای این تحقیق با مراجعه به مسئولین مربوطه در بخش کوره‌بلند و بخش آزمایشگاه‌مرکزی شرکت ذوب‌آهن 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 استفاده‌شده در مدل‌سازی به کمک نرم افزار متلب برنامه مدل نوشته و اجرا شده و خروجی‌های مدل با نتایج عملی اعتبارسنجی گردید.

۳-۱مدل تحقیق

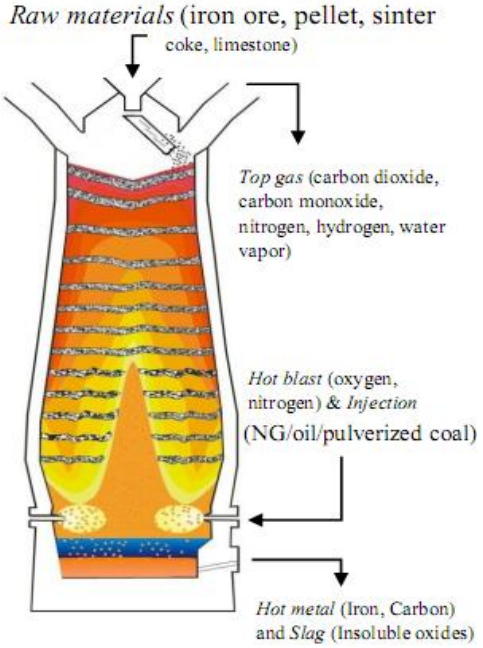
مدل این تحقیق یک مدل غیرخطی بهینه‌سازی است که از معادلات ترمودینامیک، روابط فرآیندی، توازون جرم و انرژی بهره می‌گیرد. این مدل، به‌عنوان یک سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری برای خرید و تدارک مواد اولیه و بررسی اثر استفاده از مواداولیه مختلف روی سودتولید و انتشار دی‌اکسیدکربن است. در شکل شماره۱ کوره‌بلند نمایش داده شده‌است. ورودی‌های کوره‌بلند شامل سنگ‌آهن درشت‌دانه[1]، آگلومره[2]، گندله[3]، آهن قراضه، آهن

[1] Lump
[2] Sinter
[3] Pellet

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.61186/jamlu.20.1.49]

اسفنجی[1]، سنگ‌منگنز، کک، پودرزغال، مازوت، آهک، مواد روان‌ساز، هوای‌دم واکسیژن هستند..خروجی‌های کوره‌بلند شامل چدن مذاب، سرباره و گاز خروجی کوره‌بلند می‌باشند. چدن مذاب محصول اصلی تولیدشده درکوره‌بلند است که حاوی حدود ۹۴ ٪ آهن و ۴ تا ۵ درصدکربن می‌باشد و به‌عنوان ورودی به کنورتور اکسیژنی جهت تولید فولاد منتقل می‌شود. سرباره و گاز کوره خروجی‌های جانبی می‌باشند. گاز خروجی دارای ارزش حرارتی حدود یک دهم گازطبیعی است و جهت تولید برق در نیروگاه استفاده می‌شود. سرباره به‌عنوان ماده‌جانبی تولیدی برای تولید سیمان و آسفالت به کارخانه‌های سیمان فروخته می‌شود و همچنین به‌عنوان ماده اولیه در تولید عایق‌های صوتی و حرارتی می‌تواند مورد استفاده قرارگیرد.



شکل ۱. ورودی‌ها و خروجی‌های کوره‌بلند

۳-۲ معرفی اندیس‌ها، نمادها و معادلات اصلی استفاده‌شده در مدل

i : ماده اولیه i ام در بار کوره‌بلند

j : ترکیب شیمیایی j ام در مواد بارکوره‌بلند

k : عنصر شیمیایی k ام در ترکیب شیمیایی مواد بارکوره‌بلند

جدول ۱. اندیس‌ها

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_2O_3	Al
۳	سنگ آهن	Cao	Ca	۱۴	سایر ۵	K_2O	K

[1] DRI

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.61186/jamlu.20.1.49]

۴	آهن اسفنجی	P	P	۱۵	سایر ۶	Na_2O	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_2O	
۸	دولومیت	Zn	Zn	۱۹	مازوت	ash	
۹	کوارتزیت	S	S	۲۰	کک	H_2	
۱۰	سایر ۱	Ti	Ti	۲۱		N_2	
۱۱	سایر۲	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 کوره‌بلند بر حسب متر

n_{tuyere}: تعداد فورم‌های هوای دم کوره‌بلند

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

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

$Pr_{i\ (i=1,2,3,\ldots..15)}$: قیمت هر کیلوگرم ماده اولیه i ام بر حسب تومان

Pr_{O2}: 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 تولید بر حسب تومان

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

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

λ: ضریب بازیابی چدن مذاب، معادل با ۹۶۳/.

θ_j : ضریب تصفیه

T_{wrz}: دمای ناحیه احیاء وستیت کوره بلند بر حسب کلوین

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.61186/jamlu.20.1.49]

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

۳-٤ متغیرها

X_i $(i=۱,۲,...۱۵)$: درصد وزنی ماده اولیه خشک i به وزن کل مواد اولیه بردن

$r_{O۲}$: میزان تزریق اکسیژن برای غنی‌سازی هوای دم بر حسب نرمال متر مکعب برای هر تن چدن تولیدی

$r_{V\ NG}$: 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

$X_{۲۰}$: میزان مصرف کک خشک بر حسب کیلوگرم برای هر تن چدن تولیدی

جدول۲. روابط اصلی حاکم بر مدل‌سازی

نماد	رابطه	توضیح رابطه
W_{burden}	$X_i = X_{wet} \times \frac{۱ - a_{i۱۸}}{۱۰۰}, W_{burden} = \frac{۱۰۰۰۰ \times \gamma}{\lambda \times \sum_{i=۱}^{۱۵} a_{i۱} \times x_i}$	محاسبه بار کوره بلند
W_{mi}	$W_{mi} = \frac{W_{burden} \times X_i}{۱۰۰}$	محاسبه وزن ماده اولیه i ام در بار
W_j	$W_j = \frac{\gamma \times \sum_{i=۱}^{i=۱۵} X_i \times a_{ij}}{\lambda \times \sum_{i=۱}^{i=۱۵} X_i \times a_{i۱}}$	محاسبه عنصر j ام در چدن
$Fe_{m-burden}$	$Fe_{m-burden} = \frac{X_۴ \times \left[a_{۴۱} - a_{۴۱۶} \times \frac{۵۲/۸۸}{۶۸/۸۸} \right]}{۱۰۰} + \frac{X_۵ \times \left[a_{۵۱} - a_{۵۱۶} \times \frac{۵۲/۸۸}{۶۸/۸۸} \right]}{۱۰۰}$	محاسبه آهن متالیک در بار
$Fe_{t-burden}$	$Fe_{t-burden} = \frac{\sum_{i=۱}^{i=۱۵} X_i \times a_{i۱}}{\sum_{i=۱}^{i=۱۵} X_i}$	محاسبه آهن کل در بار
W_{slag}	$W_{slag} = \Sigma(Wj) \times (۱ - \theta k),\ j = ۲,۳,۱۰,۱۱,۱۲,۱۳$	محاسبه سرباره

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.61186/jamlu.20.1.49]

محاسبه بازیسیته	$Basicity = \frac{۱۰۰۰۰\times \gamma \times \sum_{i=۱}^{۱۵} X_i \times a_{i۳} + \lambda \times \sum_{i=۱}^{۱۵} X_i \times a_{i۱} \times U}{۱۰۰۰۰\times \gamma \times \sum_{i=۱}^{۱۵} X_i \times a_{i۲} + \lambda \times \sum_{i=۱}^{۱۵} X_i \times a_{i۱} \times V}$ $U = W_{Coke-dry} \times Ash_K \times X_{kA۳} + W_{pc} Ash_C \times Ash_C \times X_{CA۳}$ $V = W_{Coke-dry} \times Ash_K \times X_{kA۲} + W_{pc} \times Ash_C \times X_{CA۲} - ۲۱۴۰۰۰ \times HM_{Comp.۲}$	$Basicity$
حرارت احیاء وستیت	$H_{Fe} = ۰/۵(-H^f_{۱۳۰۰FeO}) + (H_{۱۷۲۳Fe} - H_{۱۳۰۰Fe})$	H_{Fe}
حرارت احیاء SiO_2	$H_{Si} = (-H^f_{۱۳۰۰SiO_۲}) + (H_{۱۷۲۳Si} - H_{۱۳۰۰Si}) - ۹۵$	H_{Si}
حرارت احیاء MnO	$H_{Mn} = (-H^f_{۱۳۰۰MnO}) + (H_{۱۷۲۳Mn} - H_{۱۳۰۰Mn}) + ۴$	H_{Mn}
حرارت گرمایش-وانحلال کربن در چدن مذاب	$H_C = (H_{۱۷۲۳C} - H_{۱۳۰۰C}) + ۳۰$	H_C
حرارت تشکیل سرباره حرارت تشکیل سرباره	$H^{Slag} = n_i^{Slag}\left\{(H_i^{fus}) + \left(H_{۱۸۲۳} - H_{۱۳۰۰}\right)_i\right\}$	H^{Slag}
حرارت اتلافی کوره	$h_{loss} = \frac{۵/۴\times ۱۰^۳ \times Hearth\ dia. + ۰/۸۵ \times ۱۰^۳ \times No\ of\ Tuyers}{\frac{Pig\ iron\ production\ per\ hour}{۵۵/۸۵}} \times \frac{Pig\ iron\ Fe\%}{۱۰۰}$	h_{loss}
حرارت‌تجزیه‌ی گاز طبیعی	$n^I H^I = n^I\left\{\left(-H^f_{CH_۴}\right) + \left(H_{۱۴۷۳} - H_{۱۳۰۰}\right)_{CH_۴}\right\}$	$n^I H^I$
تعداد مول اکسیژن هوای دم	$n_O^B = ۱/۲۸ n_C^A + ۰/۴۲ n_{H_۲}^I - \left\{۱/۰۶ + ۲\left(Si/Fe\right)^m + \left(Mn/Fe\right)^m\right\}$,	n_O^B
تعداد مول کربن فعال	$n_C^A = \frac{H_D^{wrz} + H_{Blast}\left\{۱/۰۶ + ۲\left(Si/Fe\right)^m + \left(Mn/Fe\right)^m\right\} - ۰/۴۲ n_{H_۲}^I \left(۲۴۹/۴۷۳ + H_{Blast}\right)}{۱۹۲/۶۵۸ + ۱/۲۸ H_{Blast}}$	n_C^A
تعداد مول CO در گاز فوقانی	$n_{CO}^g = n_C^A . X_{CO}^g$	n_{CO}^g
تعداد مول CO_2 در گاز فوقانی	$n_{CO_۲}^g = n_C^A . X_{CO_۲}^g$	$n_{CO_۲}^g$
تعداد مول H_2 درگاز فوقانی	$n_{H_۲}^g = n_{H_۲}^I . X_{H_۲}^g$	$n_{H_۲}^g$
تعداد مول H_2O درگاز فوقانی	$n_{H_۲O}^g = n_{H_۲}^I . X_{H_۲O}^g$	$n_{H_۲O}^g$

۳-۵ تابع هدف مدل

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

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.61186/jamlu.20.1.49]

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

$$Z = Max[۳۵۰\times\eta\times V_{bf}\times(Pr_{hm}+Pr_{slag}\times W_{slag}+Pr_{NG}\times r_{tg}\times\frac{HV_{tg}}{LHV_{NG}}-\frac{۱۰۰\times\gamma\times\sum_{i=۱}^{i=۹}X_i\times Pr_i}{\lambda\times\sum_{i=۱}^{i=۹}a_{i۱}\times X_i}- \quad (۱)$$
$$Pr_k\times X_{۲۰}-Pr_{O۲}\times r_{O۲}-Pr_{ba}\times r_{ba}-Pr_{NG}\times r_{V\ NG}-Pr_{PC}\times W_{PC}-Pr_{oil}\times W_{oil})-C_{fix}]$$

برای تولید سالیانه کوره‌بلند ۳۵۰ روز کاری در نظر گرفته شده‌است. بهره‌وری کوره‌بلند با η نمایش داده می‌شود و مقدار تولید روزانه به ازای واحد حجم کوره بلندتعریف می‌شود که به تمام ورودی‌ها وابسته است [۱۷] و با تابع $f_۱$ نمایش داده می‌شود. همچنین میزان مصرف کک و میزان هوای دم به‌عنوان ورودی‌های کوره‌بلند تابع سایر ورودی‌ها چون میزان مصرف پودرزغال، گازطبیعی، مازوت، آگلومره، سنگ آهن درشت دانه، آهن اسفنجی، قراضه، دمای هوای دم، اکسیژن، است [۱۷] و با توابع $f_۲$ و $f_۳$ زیر نمایش داده می‌شود.

$$\eta = f_۱(x_۱,x_۲,x_۳,x_۴,x_۵,x_۶,x_۷,x_۸,x_۹,x_{۱۰},x_{۱۱},x_{۱۲},x_{۱۳},x_{۱۴},x_{۱۵},x_{۱۶},x_{۱۷},x_{۱۸},x_{۱۹},x_{۲۰}) \quad (۲)$$

$$X_{۲۰} = \left(x_۱,x_۲,x_۳,x_۴,x_۵,x_۶,x_۷,x_۸,x_۹,x_{۱۰},x_{۱۱},x_{۱۲},x_{۱۳},x_{۱۴},x_{۱۵},x_{۱۶},x_{۱۷},x_{۱۸},x_{۱۹},r_{ba},Ash_C\right) \quad (۳)$$

$$r_{ba} = f_۳\left(x_۱,x_۲,x_۳,x_۴,x_۵,x_۶,x_۷,x_۸,x_۹,x_{۱۰},x_{۱۱},x_{۱۲},x_{۱۳},x_{۱۴},x_{۱۵},x_{۱۶},x_{۱۷},x_{۱۸},x_{۱۹},x_{۲۰}\right) \quad (۴)$$

میزان تولید گاز کوره‌بلند هم به ترکیب شارژ کوره و سوخت‌های هیدروکربنی وابسته است [۱۷] و با تابع $f_۴$ زیر بیان می‌شود

$$r_{tg} = f_۴\left(x_۱,x_۲,x_۳,x_۴,x_۵,x_۶,x_۷,x_۸,x_۹,x_{۱۰},x_{۱۱},x_{۱۲},x_{۱۳},x_{۱۴},x_{۱۵},x_{۱۶},x_{۱۸},x_{۱۹},x_{۲۰},r_{ba}\right) \quad (۵)$$

هدف این است که بر اساس روابط فرآیندی، معادلات توازون جرم و انرژی و قوانین ترمودینامیکی در فرآیند کار کوره‌بلند، مدلی جهت عملکرد کوره‌بلند و محاسبه حداکثر سود تولید کوره ارایه 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.

۳-۶محدودیت‌ها

محدودیت‌های ناشی از توازون انرژی ورود و خروج از کوره، تعادل بین مواد ورودی وخروجی کوره، حداکثر مجاز قراضه و آهن‌اسفنجی در بار، حداکثر امکان تامین ماهیانه مواداولیه، محدودیت‌های فرآیندی کوره‌بلند و روابط بین متغیرها می‌باشند.

S_i: مقدار خرید ماهیانه ممکن ماده اولیه i ام

C_i: مقدار مصرف ماهیانه ممکن ماده اولیه i

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.61186/jamlu.20.1.49]

B_1: حد پایین درجه قلیایی سرباره

B_2: 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 آهن‌دار i در ترکیب مواد آهن‌دار

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

T_{flame}: حداکثردرجه حرارت شعله بر حسب سانتیگراد

معادله توازون جرم عنصرآهن در کوره بلند (۶)

$$W_{Fe}^{in} = W_{Fe}^{Out}$$

معادله توازون جرم اکسیژن در کوره بلند (۷)

$$n_o^{Burden} + n_o^{Blast} = n_o^t g$$

معادله توازون جرم کربن در کوره بلند (۸)

$$n_c^{coke} + n_c^I = \left(\frac{C}{Fe}\right)^m + \left(n_{co}^{tg} + n_{co_2}^{tg}\right)$$

معادله توازون انرژی در کوره بلند (۹)

$$H_D = H_S$$

محدودیت میزان شارژ قراضه و آهن‌اسفنجی در بار کوره‌بلند (۱۰)

$$X_4 + X_5 \le 25\%$$

ذخیره ماهیانه باید بیشتر از مصرف ماهیانه هر ماده باشد (۱۱)

$$C_i \le S_i$$

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

$$\frac{\gamma \sum_{i=1}^{15} x_i a_{ij}}{\lambda \sum_{i=1}^{15} x_i a_{i,1}} + \frac{r_k Ash_K a_{16j} + r_c Ash_C a_{17j}}{10000} \le U_{Ej},\ j = 2,3,12,13,14 \quad (12)$$

$$\frac{\gamma \sum_{i=1}^{15} x_i a_{ij}}{\lambda \sum_{i=1}^{15} x_i a_{i,1}} + \frac{r_k Ash_K a_{16j} + r_c Ash_C a_{17j}}{10000} \ge L_{Ej},\ j = 2,3,12,13,14 \quad (13)$$

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

$$\frac{\gamma \sum_{i=1}^{15} x_i a_{ij}}{\lambda \sum_{i=1}^{15} x_i a_{i,1}} + \frac{r_k Ash_K a_{16j} + r_c Ash_C a_{17j}}{100} \le \frac{U_{Ej}}{\theta_j} \qquad j = 4,5,\ldots,11 \quad (14)$$

$$\frac{\gamma \sum_{i=1}^{15} x_i a_{ij}}{\lambda \sum_{i=1}^{15} x_i a_{i,1}} + \frac{r_k Ash_K a_{16j} + r_c Ash_C a_{17j}}{100} \ge \frac{L_{Ej}}{\theta_j} \qquad j = 4,5,\ldots,11 \quad (15)$$

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.

$$\frac{10000\gamma \sum_{i=1}^{15} a_{i,3} x_i + \lambda \sum_{i=1}^{15} x_i a_{i,1} (r_k Ash_K a_{16,3+} r_c Ash_C a_{17,3})}{10000\gamma \sum_{i=1}^{15} a_{i,2} x_i + \lambda \sum_{i=1}^{15} x_i a_{i,1} . \left(r_k Ash_K a_{16,2+} r_c Ash_C a_{17,2} - 214000 . r_{si}\right)} \le 1/1 \quad (16)$$

$$\frac{10000\gamma \sum_{i=1}^{15} a_{i,3} x_i + \lambda \sum_{i=1}^{15} x_i a_{i,1} (r_k Ash_K a_{16,3+} r_c Ash_C a_{17,3})}{10000\gamma \sum_{i=1}^{15} a_{i,2} x_i + \lambda \sum_{i=1}^{15} x_i a_{i,1} . \left(r_k Ash_K a_{16,2+} r_c Ash_C a_{17,2} - 214000 . r_{si}\right)} \ge 1 \quad (17)$$

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

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.61186/jamlu.20.1.49]

$$x_i \geq L_{Fi} \qquad \forall i \in I, \qquad (۱۸)$$

$$x_i \geq U_{Fi} \qquad \forall i \in I, \qquad (۱۹)$$

$$x_i \geq ۰ \qquad \forall i \in I, \qquad (۲۰)$$

حاصل جمع درصدهای مواد اولیه‌آهن دار شارژ به کوره‌بلند ۱۰۰ است.

$$\sum_{i=۱}^{۵} x_i + \sum_{i=۱۰}^{۱۵} x_i = ۱۰۰ \qquad (۲۱)$$

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

$$۰ \leq r_{VNG} \leq ۱۱۰ \qquad (۲۲)$$

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

$$T_{flame} \geq ۲۰۵۰\, C \qquad (۲۳)$$

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

$$T_{tg} \geq ۱۱۰\, Co \qquad (۲۴)$$

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

$$۰ \leq r_{O۲} \leq ۱۰\% \qquad (۲۵)$$

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

$$۰ \leq W_{PC} \leq ۱۵۰ \qquad (۲۶)$$

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

$$۰ \leq W_{oil} \leq ۹۰ \qquad (۲۷)$$

٤ حل مساله

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

$$\begin{aligned} &Min\ f\ (x) \\ &s.t. \quad C\ (x)\ \leq ۰ \\ &\quad\ \ Ceq\ (x)\ = ۰ \\ &\quad\ \ Ax\ \leq\ b \\ &\quad\ \ Aeq\ x = beq \\ &\quad\ \ lb \leq\ X\ \leq\ ub \end{aligned}$$

که بردار متغیر بهینه، $f(x)$ تابع هدف، lb و ub بردارهای ستونی حدود پایین و بالا بردار منغییر X ، b و beq بردارهای ستونی، $C(x)$ و $Ceq(x)$ توابع غیرخطی بردار متغیر بهینه ، A و Aeq ماتریس هستند. در این مقاله چون پیشینه‌کردن تابع هدف مد نظر است؛ بنابراین تابع هدف در منفی یک ضرب می‌شود و برای حل این مدل از

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.61186/jamlu.20.1.49]

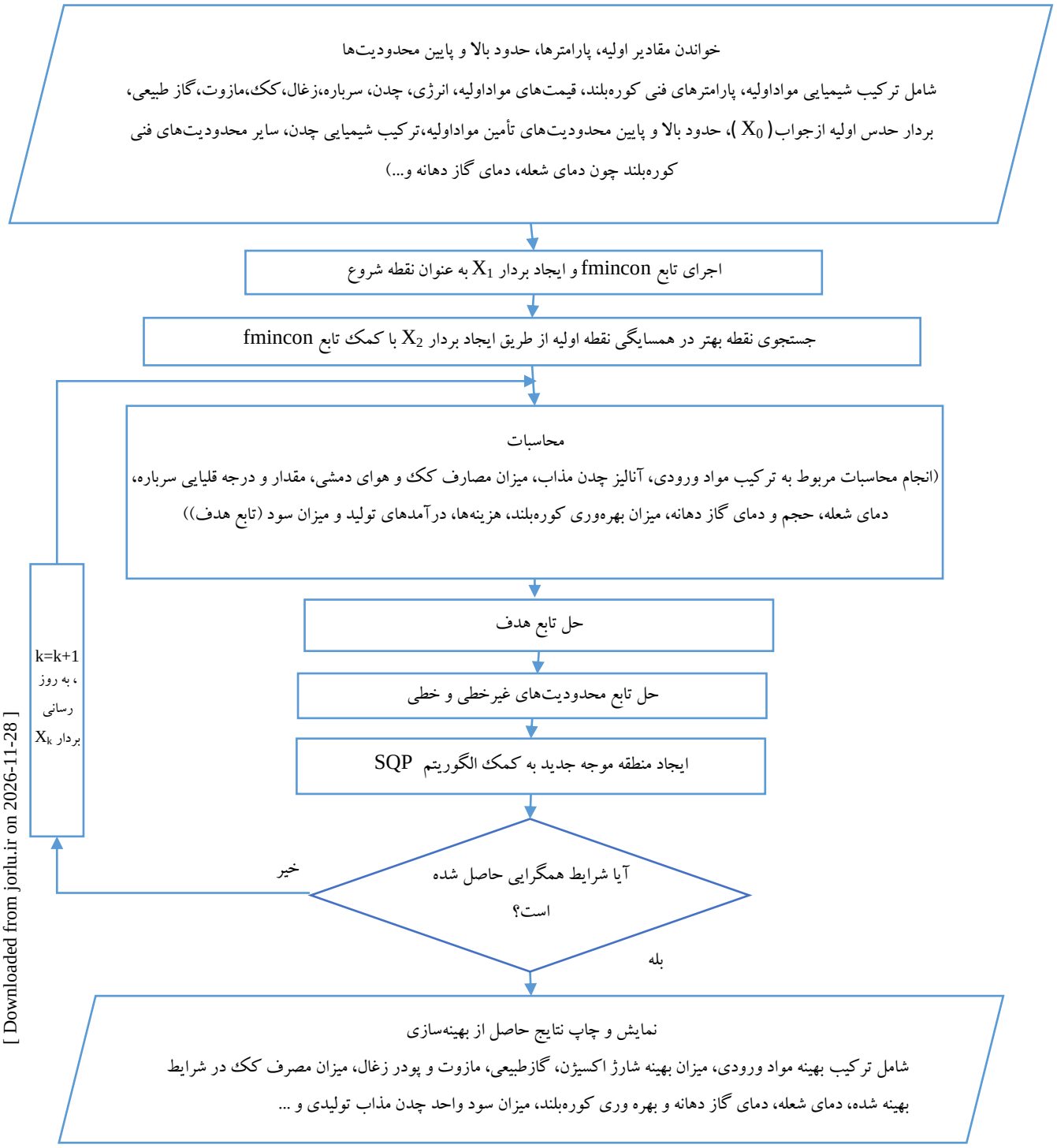
الگوریتم درون‌یابی و تابع *fmincon* استفاده می‌گردد. این تابع برای یافتن کمینه یک تابع چند متغیره غیرخطی محدود شده استفاده می‌شود. الگوریتم فوق از بردار حدس اولیه از جواب(*X0*) به‌عنوان نقطه اولیه استفاده می‌کند و با انجام تکرارهای متوالی و ارزیابی تابع‌هدف و محدودیت‌ها جواب‌بهینه را پیدا می‌کند در این الگوریتم در هر تکرار جهت و گام حرکت به‌طور 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 به‌صورت زیر است.

$$[Xopt,\ fopt] = fmincon\ (\text{'}fun\text{'},\ X\ 0,\ A,\ b,\ Aeq,\ beq,\ lb,\ ub,\text{'}nonlcon\text{'})$$

که $X\ 0, A, b, Aeq, beq, lb, ub, \text{'}nonlcon\text{'}$ ورودی‌های تابع *fmincon* هستند و *nonlcon* محدودیت‌های غیرخطی است جواب بهینه در $Xopt$ و مقدار کمینه تابع هدف در *fopt* 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، ترکیب‌شیمیایی 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 دی‌اکسیدکربن می‌باشند. در فلوچارت شکل ۲ روند اجرای مدل در نرم‌افزار متلب ارایه شده‌است.

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.61186/jamlu.20.1.49]



شکل ۲. روند اجرای مدل در نرم‌افزار متلب

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.61186/jamlu.20.1.49]

٤-١جواب بهینه

مدل ارایه‌شده برای کوره بلند شماره ۳ شرکت ذوب‌آهن‌اصفهان مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا ورودی‌های مدل، شامل ترکیب شیمیایی مواد اولیه، پارامترهای فنی کوره‌بلند، قیمت‌های مواد اولیه و انرژی، حدود بالا و پایین محدودیت‌های فنی، محدودیت تامین و تدارک مواد اولیه آهن‌دار که ۲۵۰ هزار تن در ماه آگلومره، ۵۰ هزار تن درماه گندله و ۲۵۰ هزار تن درماه سنگ آهن درشت دانه هستند در اکسل وارد شده‌اند سپس برنامه مدل در نرم افزار متلب اجرا گردیده‌است که در جواب بهینه بخشی از مواداولیه‌آهن دار با گندله و سهمی از کک با پودرزغال جایگزین شده‌است و ترکیب بهینه موادآهن‌دار 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 هرکیلوگرم چدن تولیدی۴۱۶۵ تومان توسط مدل محاسبه شده‌است. شکل ۳ نمونه‌ای از جواب بهینه محاسبه‌شده فوق توسط برنامه متلب می‌باشد که میزان آهن‌اسفنجی صفر محاسبه شده‌است که به علت قیمت بالای آهن اسفنجی در مقایسه با سایر مواداولیه آهن‌دار استفاده از این ماده اقتصادی نمی‌باشد.

****

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) = 1/8445 .....939/0141(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 Consumptiom (kg/ton HM) = 150
Oil Consumptiom (kg/ton HM) ..... = 0
Coke Consumption:
Coke weight Dry (kg/ton HM) ..... = 341/2561

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-28]
[DOI: 10.61186/jamlu.20.1.49]

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 Consumptiom (Nm3/ton HM) ..... = 1055/8113
Maximum Blast air Production by Power Plant (Nm3/min) = 3700

****

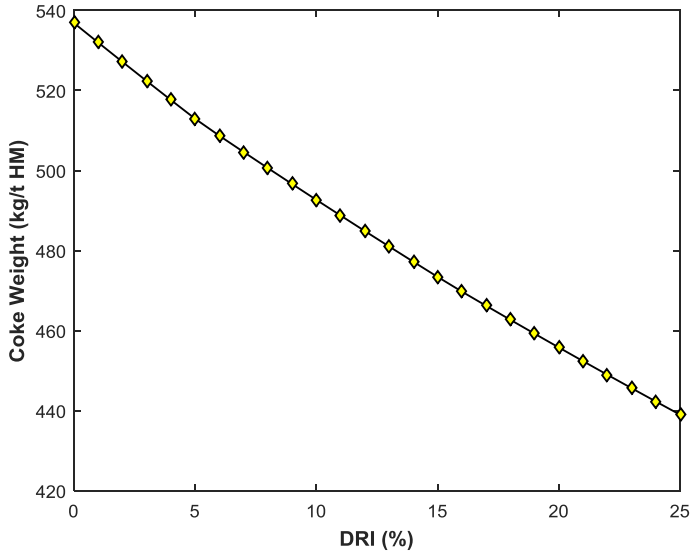
شکل ۳. نمونه‌ای از خلاصه نتایج محاسبه‌شده به‌وسیله نرم افزار متلب

۵ بحث و تحلیل‌حساسیت

چون قیمت سنگ‌آهن ارزان‌تر از آگلومره است و براساس محدودیت فنی رابطه (۱۰) حداکثر می‌توان ۲۵٪ آهن‌اسفنجی در کوره‌بلند بار کرد؛ بنابراین فقط جایگزینی آگلومره با آهن‌اسفنجی برای کوره‌بلند شماره ۳ ذوب‌آهن‌اصفهان توسط مدل در نرم‌افزارمتلب بررسی می‌شود. در شکل ۴ نتایج تحلیل حساسیت جایگزین نمودن آگلومره با آهن‌اسفنجی بر میزان مصرف کک نشان داده‌شده‌است. ملاحظه می‌شود که با افزایش میزان جایگزینی آگلومره با آهن‌اسفنجی، مصرف کک به‌عنوان ماده تامین‌کننده انرژی با شیب تندی کاهش می‌یابد. در مقادیر بیشتر از ۱۸ درصد آهن‌اسفنجی، افت نامحسوسی در شیب کاهش مصرف کک دیده می‌شود. علت کاهش مصرف کک با افزایش مقدار آهن‌اسفنجی، تفاوت قابل توجه درصد عنصر آهن موجود در آهن اسفنجی (٪ ۸۰/۰۶) نسبت به آگلومره (٪ ۵۵/۲۶) و وجود مقدار زیاد آهن‌فلزی در آهن‌اسفنجی است، این باعث می‌شود که با افزایش درصدآهن‌اسفنجی دربار موادآهن‌دار، درصد آهنِ بار و درصد آهن‌فلزی آن افزایش یابد. علت تغییر شیب شکل در ۱۸ درصد آهن‌اسفنجی، رسیدن درجه‌قلیایی سرباره به حد پایین محدودیت در رابطه (۱۷) و نیاز به افزایش‌مصرف سنگ‌آهک برای جبران این کاهش می‌باشد.

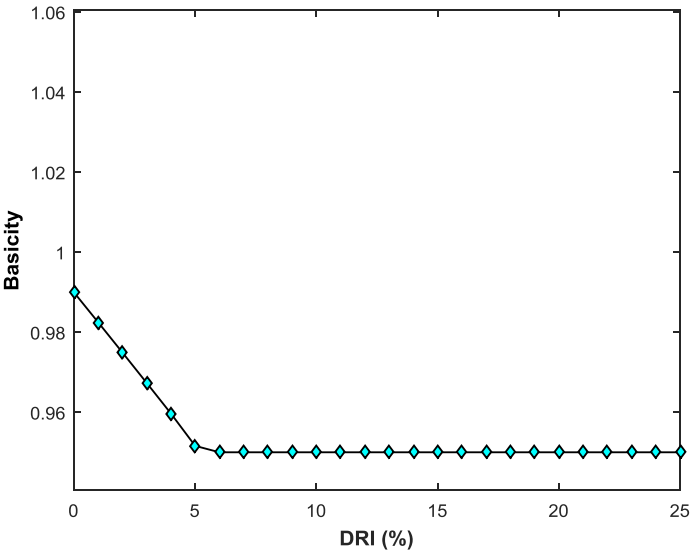
[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.61186/jamlu.20.1.49]



شکل ٤. تاثیر جایگزینی آگلومره با آهن‌اسفنجی در بار مواد آهن‌دار کوره‌بلند بر میزان مصرف کک-انرژی

همان‌گونه که در شکل ۵ دیده می‌شود به دلیل کاهش میزان آگلومره با جایگزینی آهن اسفنجی تا ۵ درصد، با افزایش مصرف آهن‌اسفنجی ، درجه‌قلیایی کاهش می‌یابد تا این‌که در ۶ درصد، به حداقل مقدار مجاز خود در رابطه (۱۷) کاهش می‌یابد. در مقادیر بالاتر از ۶ درصد آهن‌اسفنجی، برای کنترل درجه‌قلیایی لازم است سنگ‌آهک به کوره‌بلند بار شود با عنایت به انرژی مورد نیاز جهت تکلیس سنگ‌آهک در ناحیه احیاءوستیت در کوره‌بلند، انتظاری می‌رود که برای تامین این انرژی مصرف کک افزایش یابد.



شکل ۵. تاثیر جایگزینی آگلومره با آهن‌اسفنجی در بار موادآهن‌دار بر محدودیت درجه قلیایی سرباره

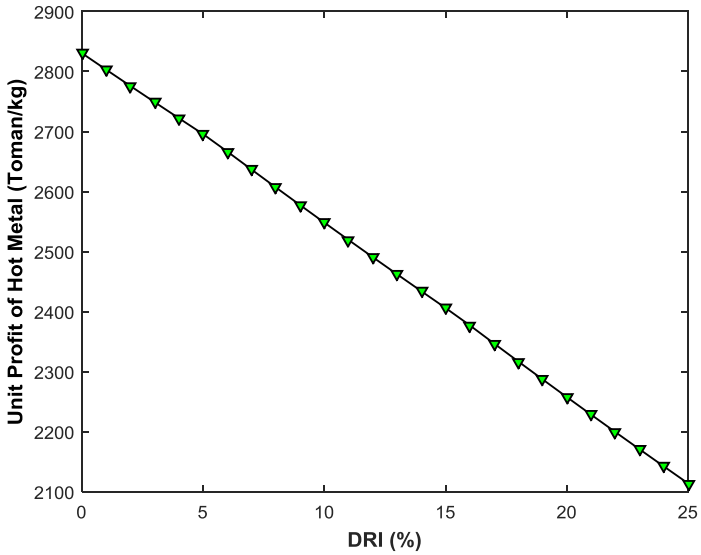
در شکل ۶ تغییرات سود حاصل از تولید یک تن چدن بر اثر جایگزینی آگلومره با آهن‌اسفنجی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش درصد آهن‌اسفنجی، سود کاهش می‌یابد. علت کلی کاهش سود، اختلاف

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.61186/jamlu.20.1.49]

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

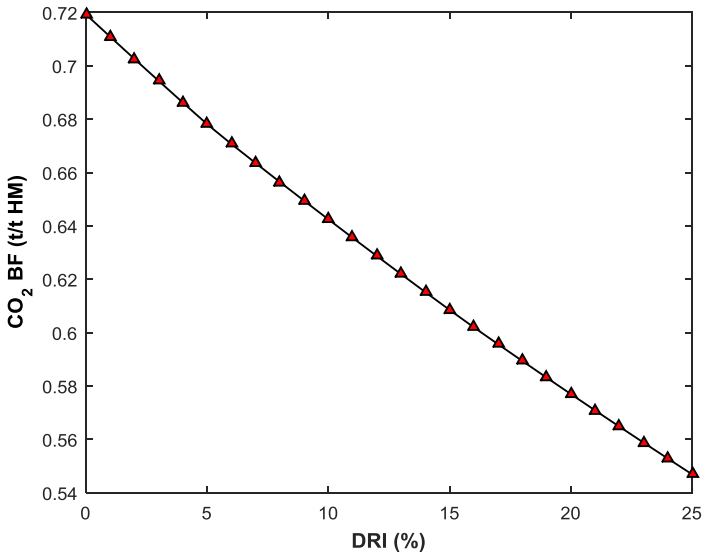
در شکل۷ تغییرات انتشار دی‌اکسیدکربن بر حسب مقدار جایگزینی آگلومره با آهن‌اسفنجی، کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن با افزایش درصد آهن‌اسفنجی را نشان می‌دهد. چون با افزایش جایگزینی آگلومره با آهن اسفنجی، درصد آهن‌فلزی بار افزایش و مصرف کک کاهش می‌یابد افزایش مقدار آهن‌فلزی در بار کوره‌بلند به معنی کاهش نسبت (O/Fe) در بار است. کاهش مقدار کک به معنی کاهش حجم گاز ورودی از ناحیه احیاءوُستیت به منطقه احیاءهماتیت است که چون درصد دی‌اکسیدکربن این گاز ثابت می‌باشد، می‌توان نتیجه گرفت که مقدار گاز دی‌اکسیدکربن ورودی از ناحیه احیاء وستیت به منطقه احیاءهماتیت 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 دی‌اکسیدکربن تولیدی در این ناحیه بر اثر واکنش هماتیت با گاز منواکسیدکربن و تولید وُستیت و دی‌اکسیدکربن نیز کاهش می‌یابد.



شکل٦. تاثیر جایگزینی آگلومره با آهن‌اسفنجی در بار مواد آهن‌دار کوره‌بلند بر میزان سود تولید

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.61186/jamlu.20.1.49]



شکل ۷. تاثیر جایگزینی آگلومره با آهن اسفنجی در بار مواد آهن‌دار کوره‌بلند بر میزان انتشار گاز دی اکسید کربن

٦ بررسی اعتبار مدل

نتایج مدل برای دو حالت مختلف ترکیب مواد اولیه در کوره‌بلندشماره ۳ ذوب‌آهن مورد آزمایش قرارگرفت یعنی حالت یک که جواب‌بهینه ترکیب مواداولیه‌آهن‌دار 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 هرکیلوگرم چدن تولیدی۴۱۶۵ تومان و میزان انتشاردی‌اکسیدکربن کوره بلند ۶۵۵ کیلوگرم بر تن چدن تولیدی می‌باشد. در حالت دو که اجباراً ۱۵٪ از بار مواداولیه‌آهن‌دار آهن‌اسفنجی شارژ می‌شود جواب‌بهینه ترکیب مواداولیه‌آهن‌دار کوره بلند شامل ۱۵٪ آهن‌اسفنجی، ۸٪ سنگ‌آهن معدن چادرملو،۱۲٪ سنگ آهن معدن چاه گز، ۱٪ سنگ آهن معدن آسیا، ۱۲٪ سنگ آهن معدن تنگ زاغ، و ۵۲٪ آگلومره است که سودتولید به ۳۵۹۴ تومان برای هر کیلو چدن‌تولیدی و میزان انتشار دی‌اکسیدکربن کوره بلند به ۵۵۰ کیلوگرم بر تن چدن تولیدی کاهش می‌یابد. در دو حالت ذکرشده بالا، منابع تامین انرژی کک، پودر زغال و گازطبیعی هستند. مقایسه پیش‌بینی‌های مدل و نتایج‌تجربی درجداول زیر، نشان دهنده دقت بسیار بالای مدل است و علت اختلاف کوچک بین سود محاسباتی مدل و مقدار ارایه شده بوسیله بخش مالی‌واقتصادی ذوب‌آهن وجود تفاوت بین خروجی‌های مدل و مقادیر تجربی برای مصرف کک، اکسیژن، گاز طبیعی، هوای‌دم و مواد آهن‌دار می‌باشد که با توجه به اطلاعات جدول‌های ۳ و ۴ این اختلاف برای کک، اکسیژن و هوای‌دم بیشتراست و این مصارف نقش‌اصلی در اختلاف بین سود محاسباتی و واقعی دارند. در ادامه دلایل تفاوت خروجی‌های مدل و نتایج عملی برای مصرف کک و هوای دم بررسی می‌شود.

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.61186/jamlu.20.1.49]

۶-۱وجود 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.

۶-۲خطا درآنالیزگازطبیعی و وجود هیدروژن درگازطبیعی می‌تواند درمیزان مصرف اکسیژن و به تبع آن هوای‌دم کوره‌بلند تاثیر بگذارد. با توجه به این‌که آنالیزگازطبیعی به‌صورت مرتب اندازه‌گیری نمی‌شود؛ بنابراین تغییرات آن می‌تواند باعث خطای محاسباتی گردد وخطای اندازه‌گیری در وزن مذاب، دبی هوای دم و اکسیژن می‌تواند سبب اختلاف در نتایج مدل و واقعی شود.

۶-۳ گازهای احیاءکننده از فضای خالی بین دانه‌های کک و بار آهن‌دار عبور می‌کنند و اگر توزیع کک و بارآهن‌دار یکنواخت نباشد بخشی از این گازها بدون تماس موثر با سطح بار آهن‌دار از دهانه کوره خارج می‌شوند که باعث بهره‌وری CO کمتر و به‌تبع 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 احیاءپذیری مواد آهن‌دار و نفوذ گاز از بین لایه‌های احیاءشده در سطوح مواد آهن‌دار از عوامل مهم تاثیرگذار 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 محاسبه‌شده کک در کوره بلند توسط مدل می‌باشد زیرا هر چه مصرف کک بیشتر شود مصرف هوای دم هم افزایش می‌یابد.

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

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

نام متغیر	واحد	مقدار بهینه محاسبه شده به‌وسیله مدل	مقدار واقعی اندازه‌گیری‌شده	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٪

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.61186/jamlu.20.1.49]

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 / کیلو گرم	۴۱۶۵	۴۰۴۰	+ ۳٪
چدن مذاب	تن تولید / روز	۴۹۶۰	۴۶۰۰	+٪ ۷

جدول ٤. حالت ۲، مواد آهن‌دار بارکوره‌بلند شامل سنگ‌آهن، گندله،آگلومره و ۱۵٪ آهن‌اسفنجی

نام متغیر	واحد	مقدار بهینه محاسبه شده به‌وسیله مدل	مقدار واقعی اندازه‌گیری‌شده	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

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.61186/jamlu.20.1.49]

دمای گاز کوره	درجه سانتیگراد	۲۹۲	۳۰۱	٪۳-
دی اکسید کربن	کیلوگرم/ تن تولید	۵۵۰	۶۰۵	٪۱۰-
بار کوره	کیلوگرم/ تن تولید	۱۵۷۷	۱۵۹۲	٪۱-
سرباره	کیلوگرم/ تن تولید	۳۰۲	۳۰۸	٪۲-
بهره وری	تن / مترمکعب / روز	۲/۸۲	۲/۶	٪۸+
سود	ریال / کیلو گرم	۳۵۹۴	۳۴۵۰	٪۴+
چدن مذاب	تن تولید / روز	۵۶۴۰	۵۲۰۰	٪۸+

جدول ۵. قیمت مواد و حامل‌های انرژی در تیرماه سال ۱۴۰۰ دریافت‌شده از بخش مالی‌واقتصادی ذوب‌آهن

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 نتیجه‌گیری

در ارتباط با مساله اصلی تحقیق مقالات بسیاری مورد مطالعه و بررسی قرار گرفتند که هیچ‌کدام از این پژوهش‌ها بر اساس ممیزات اقتصادی خاص کشور ایران یعنی استفاده از سنگ‌آهن و گازطبیعی ارزان قیمت یارانه‌ای توسط تولیدکنندگان فولاد انجام نشده است؛ بنابراین نتایج این خروجی‌ها برای ذوب‌آهن اصفهان قابل استفاده نمی‌باشند. در مقاله‌های بررسی‌شده در پیشینه پژوهش سه مطالعه‌ای که توضیح داده خواهدشد به موضوع این تحقیق نزدیک‌تر 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 کوره‌بلند شماره یک کارخانه اردمیر ترکیه است که با در نظر نگرفتن تلفات کوره‌بلند و عدم محاسبه میزان مصرف کک و سایر سوخت‌های کمکی و ثابت فرض‌کردن آنها دارای تقریبی بزرگ است و از شرایط عملی فرآیند کوره بلند انحراف داشته و در رابطه با ترکیب مواداولیه‌آهن‌دار و اثر مصرف انرژی و مواداولیه روی سود و هزینه‌های تولید بحثی نشده است.

مطالعه راسول و همکاران [۱۵]، در ارتباط با مدل‌سازی و تجزیه‌وتحلیل عملکرد کوره‌بلند برای استفاده موثر از انرژی و بهبود بهره‌وری کوره‌بلند می‌باشد که مقدار مصرف کک و تاثیر پارامترهای مختلف کاری چون افزایش دمای هوای دم، کاهش خاکسترکک و میزان سیلیس چدن روی مصرف کک و بهره‌وری کوره‌بلند بررسی‌شده

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.61186/jamlu.20.1.49]

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

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

- تمرکز بر کاهش هزینه مواد اولیه می‌باشد، در صورتی‌که 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 هزینه های 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 مواداولیه آهن‌دار و سایر متغیرهای تولید است و با ثابت فرض‌کردن مصرف کک ،تقریبی بزرگ و غیرواقعی اعمال شده‌است.
- میزان تزریق پودرزغال ثابت فرض شده، و تزریق مازوت و گازطبیعی هم بررسی نشده‌است که با شرایط واقعی‌کار همخوانی ندارد.
- استفاده از قراضه و آهن‌اسفنجی بعنوان مواداولیه 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 وهمکاران [۲]، تابع هدف بیشینه‌کردن‌سودعملیاتی تولید تعریف شده است و ضمن موازنه کامل جرم و انرژی در کوره‌بلند، ترکیب شمیایی مذاب، مقدار مواد آهن دار، کمک ذوب، کک مصرفی، اکسیژن و هوای دم مورد نیاز، دما، حجم و ترکیب‌شیمیایی گازدهانه و ترکیب و مقدار سرباره تولیدی به عنوان تابعی از متغیرهای تولید نظیر ترکیب شیمیایی و نسبت مواداولیه در بار کوره‌بلند و دمای هوای‌دم محاسبه‌شده و به عنوان متغیرهای تابع هدف یا در محدودیت‌های آن مورد استفاده قرارگرفته است. برای اولین بار در این تحقیق استفاده توام از هر سه سوخت مازوت، پودرزغال و گازطبیعی در کنار کک مدل‌سازی شده‌است 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 به‌عنوان محدودیت‌های فنی در نظر گرفته شده‌اند که در نتیجه میزان غنی‌سازی هوای دم با اکسیژن هم قابل محاسبه‌است. همچنین در این مقاله نتایج حاصل از مدل با نتایج تجربی اندازه‌گیری‌شده برای کوره‌بلند شماره۳ ذوب‌آهن مقایسه شده و نتیجه‌گیری می‌گردد که به‌کارگیری مدل می‌تواند منافع زیادی داشته باشد.

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.61186/jamlu.20.1.49]

در این پژوهش، برای تدارک و خرید مواداولیه کوره‌بلندهای هرکارخانه فولادسازی با فن‌آوری کوره‌بلند مدلی بر مبنای حصول بیشینه سود کوره‌بلند ارایه گردید و برای کوره‌بلند شماره۳ ذوب‌آهن‌اصفهان در نرم افزار متلب اجرا شد و خروجی‌های مدل با نتایج عملی اعتبارسنجی گردید. مدل معرفی‌شده علاوه بر محاسبه ترکیب بهینه مواد آهن‌دار برای حصول سود پیشینه تولید، قادر است برای هر ترکیب و تحلیل دیگری از مواد اولیه‌آهن دار کوره بلند سود تولید و مصارف مهمی چون کک، انرژی، هوای دم، اکسیژن و میزان انتشار دی‌اکسیدکربن 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 هزینه ها بوسیله تنظیم نسبت ترکیب مواد اولیه‌آهن‌دار کوره‌بلند به‌منظور حصول حداکثر سود تولید، به‌کار می‌رود و این مدل در مدیریت و برنامه‌ریزی تامین و تدارک کوتاه‌مدت و بلندمدت مواد اولیه‌آهن‌دار،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 سودتولید و میزان انتشار گاز دی‌اکسیدکربن پیش‌بینی کرد. به‌طور عملی به کمک این مدل هر کارخانه فولادسازی با فن‌آوری کوره‌بلند قادر است نوع و مقدار مواداولیه مورد نیاز کوره‌بلندها را با توجه به محدودیت‌های عرضه در بازار طوری تدارک و خریدکند که بیشترین سود ممکن تولید حاصل شود و خرید مواد اولیه بر اساس این مدل نسبت به خرید سنتی می تواند منافع اقتصادی بزرگی داشته باشد. بر مبنای قیمت‌های جدول۵ برای مواد وانرژی کوره‌بلند که مربوط به تیرماه سال ۱۴۰۰است و بر اساس تحلیل‌حساسیت خروجی‌های مدل، نتیجه می‌شود که تا زمانی‌که مانند کشورهای اروپایی استانداردهای سخت‌گیرانه زیست محیطی کشور در مورد انتشار گازهای‌گلخانه‌ای ارتقاء نیابد و با حذف یارانه‌های دولتی قیمت سنگ‌آهن افزایش قابل ملاحظه‌ای نداشته باشد استفاده از آهن‌اسفنجی باوجود مزایایی که در کاهش مصرف‌کک، کاهش انتشار گازگلخانه‌ای دی‌اکسیدکربن و افزایش بهره‌وری کوره‌بلند دارد به‌عنوان موادآهن‌دار در بار مواداولیه کوره‌بلند دارای توجیه اقتصادی نخواهد بود. و گزینه‌های اقتصادی مواد آهن‌دارکوره‌بلند فقط شامل سنگ‌آهن، 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 مواداولیه در دهانه کوره‌بلند بر روی مصرف مواداولیه، کک، بهره‌وری و سود تولید و انتشار گاز گلخانه‌ای دی‌اکسیدکربن

۲- بررسی تاثیر سرعت و زمان ماند گاز در کوره‌بلند بر روی مصرف مواداولیه ، کک، بهره‌وری و سود تولید و انتشار گاز گلخانه‌ای دی‌اکسیدکربن

۳- توسعه و بهره‌گیری عملی از مدل ارایه شده جهت خرید و تدارک مواداولیه و انرژی کوره‌بلندهای کارخانه‌های فولادسازی

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.61186/jamlu.20.1.49]

منابع

[1] Emre Ertem M., Gurgen 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] Mottakiai, 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 Production52, 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.

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.61186/jamlu.20.1.49]