

## طراحی و بهینه‌سازی یک مدل غیرخطی تولید و تأثیر استفاده از آهن اسفنجی بر انتشار گاز دی‌اکسید کربن و مصرف کک-انرژی در کوره بلند شماره ۳ ذوب آهن اصفهان

مهدی نصر آزادانی<sup>۱</sup>، سیدمحمدرضا داوودی<sup>۲\*</sup>، شهرام معینی<sup>۳</sup>

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

nasr.mehdi@gmail.com

۲- استادیار، گروه مدیریت صنعتی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دهقان، دهقان، ایران، smrdavoodi@ut.ac.ir

۳- استادیار، گروه اقتصاد، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران، sh.moeeni@ase.ui.ac.ir

**چکیده:** در این پژوهش یک مدل غیرخطی بهینه‌سازی برای بررسی اثر تغییرات بار مواد اولیه آهن‌دار کوره بلند روی سود تولید و میزان انتشار گاز گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن ارائه شده است. این مدل، سیستم پشتیبانی برای برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری خرید بهینه مواد اولیه و انرژی باتوجه به محیط‌زیست است. مدل با نرم‌افزار متلب و در نظر گرفتن روابط و محدودیت‌های فرآیندی، بالانس جرم و انرژی و میزان عرضه مواد اولیه اجرا شده است. علاوه بر محاسبه سود، پارامترهایی نظیر میزان مصرف کک، درجه حرارت گاز جلو فرم‌ها، دما و ترکیب شیمیایی گاز دهانه، مقدار هوای دم لازم و تأثیر غنی‌سازی هوای دم با اکسیژن در این مدل ارائه می‌شود. با استفاده از این مدل نتایج سود حاصل از مدل با نتایج تجربی تولید کوره بلند شماره ۳ ذوب آهن مقایسه شده است. با این مقایسه نتیجه می‌شود به‌کارگیری مدل باعث ۱۶٪ افزایش - سود از ترکیب بهینه مواد اولیه آهن‌دار و ۱۸٪ سود اضافی از انتخاب بهینه انرژی است. همچنین آثار استفاده از آهن اسفنجی روی سود تولید، مصرف انرژی و میزان انتشار گاز گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن بررسی شده است.

**واژه‌های کلیدی:** مدل غیرخطی، بهینه‌سازی، سود، انتشار گاز دی‌اکسید کربن، کوره بلند، آهن اسفنجی

## مقدمه

در سال‌های اخیر شرکت‌های فولادساز پیشرفته خارجی برای امکان ادامه حیات تولید کوره بلندها و تخفیف جریمه‌های زیست‌محیطی ناشی از انتشار گاز گلخانه‌ای دی‌اکسیدکربن، تا حد امکان از مواد اولیه آهن‌دار سازگار با محیط‌زیست مانند قراضه و آهن اسفنجی استفاده کرده‌اند و بخشی از کک لازم را با سوخت‌هایی مانند گاز طبیعی و پودر زغال جایگزین کرده‌اند. کوره بلند مهم‌ترین بخش یک کارخانه فولادسازی است. هم‌چنین میزان مصرف کک و هزینه انرژی کوره بلند وابسته به نوع و نسبت ترکیب مواد اولیه آهن‌دار کوره است. مقدار مصرف موادی مانند آهنک، دولومیت و روان‌سازها<sup>۱</sup> نیز تابع ترکیب شارژ مواد آهن‌دار و محدودیت‌های فنی است.

در برخی از کارخانه‌های فولادسازی نسبت ترکیب مواد اولیه کوره بلندها به‌صورت تجربی و به‌وسیله متخصصین فنی در فرآیندهای کک‌سازی، آگلومراسیون و کوره بلند با توجه به قیمت، آنالیز و مقدار درخور تأمین در بازار محاسبه می‌شود. این کار، وقت‌گیر و بر مبنای سعی و خطا بود (ژانگ و لو<sup>۲</sup>، ۲۰۱۱). وضعیت کسب‌وکار فعلی تولید فولاد در جهان بسیار رقابتی است و کاهش هزینه‌های تولید در کنار توجه به محیط‌زیست، امکان رقابت پایدار را ممکن می‌سازد؛ از این رو پیدا کردن مدلی برای مدیریت این هزینه‌ها به وسیله تنظیم نسبت ترکیب مواد اولیه آهن‌دار کوره بلند برای حصول بیشینه سود تولید در رقابت‌پذیری اهمیت بسیاری دارد. در این مطالعه کوشش می‌شود با توسعه و تکمیل آخرین مطالعات قبلی، اضافه کردن محدودیت‌های فنی جدید، لحاظ تلفات حرارتی کوره بلند، بررسی اثر سوخت‌های کمکی گاز طبیعی، مازوت، پودر زغال و محاسبه مقدار دقیق کک مدلی طراحی شود که در مدیریت و برنامه‌ریزی تأمین و تدارک کوتاه‌مدت و بلندمدت مواد اولیه آهن‌دار، کک و تولید اقتصادی در کنار توجه به محیط‌زیست مؤثر باشد. در سال‌های اخیر شرکت ذوب آهن اصفهان که یک کارخانه فولادسازی است، به علت شرایط رقابتی فضای کسب‌وکار و سخت‌گیری‌های زیست‌محیطی با چالش‌های جدی فنی و اقتصادی مرتبط با تأمین مواد اولیه مواجه شده است. با توجه به تنوع معادن و منابع تأمین‌کننده مواد اولیه، هم‌چنین محدودیت‌های موجود برای دسترسی به هریک از این منابع، هزینه تأمین آنها و محدودیت‌های زیست‌محیطی برای ذوب آهن گزینه‌های مختلفی برای تأمین مواد آهن‌دار متصور است و بر این اساس این سؤال مطرح است که کدام مجموعه انتخاب شود و ضمن سازگاری با محدودیت‌ها بیشترین سود و رقابت‌پذیری تولید کسب شود. بر اساس اطلاعات حوزه مالی و اقتصادی کارخانه، در ذوب آهن به طور تقریبی به ترتیب ۳۳ و ۱۵٪ قیمت تمام‌شده برای تولید هر تن محصول نهایی نوردی، ناشی از هزینه کک و هزینه مواد اولیه آهن‌دار کوره بلند است. این شاخص‌ها در اتحادیه اروپا به ترتیب و به طور متوسط ۲۰/۵۶ و ۲۰/۹۱٪ هستند. با توجه به درصدهای مذکور، اگر هزینه کک و مواد آهن‌دار کوره بلند حداقل ۴۰٪ قیمت تمام‌شده هر تن محصول نهایی نوردی و قیمت تمام‌شده هر تن محصول ۵۸۰ دلار بر تن در نظر گرفته شود، هزینه انرژی و مواد آهن‌دار کوره بلند ۲۳۲ دلار بر تن محصول خواهد بود که این هزینه برای کارخانه‌ای با ظرفیت ۳/۵ میلیون تن تولید در سال، ۸۱۲ میلیون دلار در سال می‌شود. در این مقاله نتایج حاصل از مدل با نتایج تجربی اندازه‌گیری‌شده برای کوره بلند شماره ۳ ذوب آهن مقایسه شده است و نتیجه می‌شود به‌کارگیری مدل منافع اقتصادی زیادی دارد.

در ادامه، پیشینه پژوهش و مبانی نظری بررسی و با ارائه مدل ریاضی پژوهش، روند اجرا و حل مدل بررسی شده است. سپس جایگزینی آهن اسفنجی به جای آگلومره و سنگ آهن بحث و تحلیل حساسیت شده است. با مقایسه خروجی‌های مدل با اندازه‌گیری‌های تجربی اعتبارسنجی انجام شده است. در پایان نتیجه‌گیری و پیشنهادها برای پژوهش‌های آتی ارائه شده است.

## پیشینه پژوهش

در دهه‌های اخیر تولید فولاد رشد سریعی داشته است؛ به طوری که تولید جهانی فولاد از ۲۰۰ میلیون تن در سال ۱۹۵۰ به بیش از ۱۷۸۹ میلیون تن در سال ۲۰۱۸ رسیده است. براساس مطالعه آن و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۱۸) این روند صعودی، باعث افزایش تقاضا برای مواد اولیه و انتشار حدود ۷٪ از کل گازهای گلخانه‌ای جهان به وسیله این صنعت شده است. امروزه محدودیت در تأمین مواد اولیه آهن‌دار، کک و زغال در کنار سخت‌گیری‌های زیست-محیطی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای باعث شده است انتخاب بهینه نوع و ترکیب مواد آهن‌دار کوره بلندها برای ادامه کار اقتصادی و پایدار، توجه جدی تولیدکنندگان فولاد را به خود جلب کند. در ایران در پنج دهه پیش با بهره‌برداری از کارخانه ذوب آهن اصفهان به طور عملی تولید فولاد براساس فن‌آوری کوره بلند شروع شده است. هم‌چنین براساس بررسی پژوهش‌های انجام‌شده در کشور تاکنون پژوهشی درخصوص مدل‌سازی انتخاب نوع و ترکیب بهینه و اقتصادی مواد آهن‌دار کوره بلند با توجه به ممیزات محیط اقتصادی کشور انجام نشده است. با استناد به مرور کامل ژانگ و همکاران (۲۰۱۱)، در مطالعات خارجی هم تاکنون پژوهش‌های زیاد و کاملی برای حل مسئله تعیین ترکیب بهینه مواد اولیه آهن‌دار انجام نشده است. مطالعات انجام‌شده به طور عمده در دو محور اصلی کاهش مصرف انرژی و حفاظت از محیط زیست با کاهش انتشار گاز گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن تولیدی کوره بلند بوده است. در ادامه برخی از مهم‌ترین و جدیدترین آنها به طور مختصر ذکر می‌شود.

ژانگ کی<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۹) در پژوهشی بهینه‌سازی مصرف انرژی را همراه با کاهش انتشار گاز دی‌اکسید-کربن در بخش‌های کک‌سازی، آهن‌سازی، آگلومراسیون، فولادسازی، نورد گرم و نیروگاه برق یک کارخانه فولادسازی مطالعه کرده‌اند. آنها به کمک روابط توازن جرم و حرارت، مدلی برای مصرف انرژی ارائه داده‌اند و تابع هدف این پژوهش حداقل کردن مصرف انرژی برای یک مجتمع تولید فولاد در نظر گرفته شده است. نتیجه بهینه-سازی ۱۴٪ کاهش در مصرف انرژی و حدود ۶٪ در انتشار گاز گلخانه‌ای دی‌اکسیدکربن بوده است.

گریفین<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۱۹) در مقاله‌ای تجزیه و تحلیل پتانسیل‌های کاهش انرژی و انتشار گاز دی‌اکسیدکربن را در صنعت فولاد همراه با فرصت‌ها و چالش‌های کاهش انرژی و دی‌اکسیدکربن در صنعت فولاد و با تمرکز بر صنعت فولاد بریتانیا و ایرلند شمالی بررسی کرده‌اند؛ اگرچه می‌توان نتایج به دست آمده را برای تمام صنعت فولاد استفاده کرد. در این مطالعه با استفاده از بهترین تکنولوژی‌های در دسترس با حداقل کردن اتلاف انرژی و بازیابی انرژی حرارتی در بخش‌های کک‌سازی، کنورتور، آگلومراسیون، نورد و استفاده از ظرفیت‌های کاهش گاز خروجی کوره بلند، میزان انتشار گاز گلخانه‌ای دی‌اکسیدکربن حداقل شده است. لی هیو<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۱۷) در پژوهشی بررسی و ارزیابی جریان انرژی و انتشار کربن در مجتمع‌های فولادسازی را براساس جریان مواد در فولادسازی منتخب با استفاده از قانون بقای جرم و قانون اول ترمودینامیک درباره انرژی و به کمک معادلات توازن مربوطه مدلی به نام تجزیه و تحلیل جریان مواد را معرفی کرده‌اند. این مدل دارای سه لایه مواد اولیه، آهن و انرژی است. مقایسه خروجی مدل برای مقادیر انرژی، کربن و آهن لازم برای تولید یک تن فولاد خام با اندازه‌گیری‌های عملی بیانگر دقت مناسب مدل است. براساس نتایج مدل تولید، یک تن فولاد خام نیاز به ۱/۱ تن آهن دارد. همچنین مقدار مصرف انرژی و انتشار کربن برای تولید یک تن فولاد خام در چین بالاتر از شاخص‌های جهانی است. کوراموچی<sup>۷</sup> (۲۰۱۷) در پژوهشی روند انتشار گاز دی‌اکسیدکربن صنعت آهن و فولاد ژاپن را تا سال ۲۰۳۰ بررسی کرده‌اند. در این پژوهش با در نظر گرفتن قابلیت‌های فرآیندی، محدودیت‌های کاری و انعطاف در تغییر مقدار تولید، نقشه راهی

برای کاهش دی‌اکسیدکربن تولیدی در صنعت فولاد ژاپن ارائه شده است. در این مطالعه، با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف برای کل ظرفیت تولید ژاپن و افزایش میزان مصرف قراضه و با ارائه مدلی به صورت کمی روند تولید دی‌اکسیدکربن در صنعت فولاد ژاپن تا سال ۲۰۳۰ بررسی و پیش‌بینی شده است. نتایج نشان می‌دهد مصرف قراضه ضمن اثر روی کاهش گاز دی‌اکسیدکربن تولیدی، روی هزینه تولید هم تأثیر می‌گذارد. وان و همکاران<sup>۸</sup> (۲۰۱۶) در مطالعه‌ای میزان انتشار گاز دی‌اکسیدکربن در صنعت آهن و فولاد چین را بررسی کرده‌اند و با ارائه یک روش محاسبه ابتکاری میزان تولید این گاز را به وسیله واحدهای فولادسازی چین ۱۳۳۶ میلیون تن در سال برآورد کرده‌اند. همچنین اقداماتی را بررسی کرده‌اند که باعث کاهش میزان گاز دی‌اکسیدکربن تولیدی می‌شوند و در هزینه تولید تأثیر دارند. لی یو و همکاران<sup>۹</sup> (۲۰۱۵) در پژوهشی براساس تجزیه و تحلیل جریان انرژی و در نظر گرفتن بازده کوره بلند<sup>۱۰</sup> (تابع هدف) و به کمک روابط کاری و معادلات ترمودینامیکی، تلفات انرژی کوره بلند را حداقل کردند. آنها هم چنین اثر غنی‌سازی هوای دم و کاهش استفاده از آگلومره و افزایش پودر زغال را روی بازده کوره بررسی کردند. واضح است افزایش بازده تولید کوره بلند روی کاهش هزینه تولید اثر دارد. مویا و همکاران<sup>۱۱</sup> (۲۰۱۳) در مقاله‌ای ظرفیت‌های بهبود در بازدهی انرژی و انتشار دی‌اکسیدکربن را در صنعت فولاد ۲۷ کشور اتحادیه اروپا بررسی کردند. آنها هم چنین اقدامات اصلاحی را به کمک مدلی غیرخطی مطالعه کردند که با استفاده از بهترین تکنولوژی‌های در دسترس باعث کاهش مصرف انرژی و انتشار دی‌اکسیدکربن در صنایع فولاد اروپا می‌شود. در نهایت میزان سرمایه‌گذاری انجام این بهبودها و اثر آنها را برآورد کرده‌اند. هله و همکاران<sup>۱۲</sup> (۲۰۱۱) در پژوهشی بهینه‌سازی غیرخطی تولید فولاد را با استفاده از استراتژی‌های کاری کوره بلندهای سنتی و جدید به کمک حداقل کردن هزینه تولید هر تن فولاد خام به عنوان تابع هدف امکان‌سنجی کرده‌اند. در واقع این مسئله با استفاده از یک مدل غیرخطی و شبیه‌سازی کامپیوتری و در نظر گرفتن محدودیت‌های فرآیندی، مواد اولیه و چرخش دوباره گاز خروجی کوره بلند بعد از جدا کردن دی‌اکسیدکربن از نظر اقتصادی بهینه‌سازی شده است. نتیجه این بررسی چرخش دوباره گاز خروجی را به کوره بلند اقتصادی نشان داده است. همچنین جداسازی دی‌اکسیدکربن از گاز خروجی کوره باعث نیازداشتن به شارژ مازوت شده و انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش داده است. وانگ و همکاران<sup>۱۳</sup> (۲۰۰۸) یک مدل دوهدفه برای حداقل کردن هزینه تولید فولاد و مقدار گاز دی‌اکسیدکربن تولیدی به وسیله شارژ قراضه را در مجموعه کوره بلند کنورتور بررسی کرده‌اند. نتیجه این بررسی نشان داد که با افزایش قراضه در بار، میزان دی‌اکسیدکربن تولیدی کاهش ولی هزینه تولید زیادتر می‌شود. در این پژوهش محدودیت مقدار قراضه تا ۲۵٪ بررسی و با اولویت کنورتور، قراضه در کنورتور و بخشی در کوره بلند اضافه شده است.

ژانگ و همکاران<sup>۱۴</sup> (۲۰۱۱) در مطالعه‌ای سیستم دانش‌بنیان پشتیبان تصمیم‌گیری را با بهینه‌سازی مدل غیرخطی هزینه تولید برای کوره بلند ارائه کرده‌اند. در این مطالعه، آنالیز شیمیایی، قیمت مواد اولیه و کک ورودی مدل است. هم چنین میزان مصرف زغال و کک برای تولید هر تن چدن مذاب ثابت فرض می‌شود. خروجی مدل، ترکیب بهینه مواد اولیه آهن‌دار است که با نتایج تجربی در یک فولادسازی کشور چین مقایسه شده است. راسول و همکاران<sup>۱۵</sup> (۲۰۰۷) در مطالعه‌ای با تجزیه و تحلیل عملکرد کوره بلند برای استفاده مؤثر از انرژی مدلی براساس معادلات بالانس جرم و انرژی ارائه داده‌اند. آنها از یک فرمول تجربی برای ارزیابی تلفات کوره بلند استفاده کرده‌اند. براساس خروجی‌های مدل، افزایش دمای هوای دم، کاهش خاکستر کک و کاهش میزان سیلیس چدن باعث کاهش مصرف کک و افزایش بهره‌وری کوره بلند می‌شود. خروجی‌های این مدل با نتایج عملی در یک کوره بلند در کشور هند

راست‌آزمایی شده است.

ارتم و همکاران<sup>۶</sup> (۲۰۰۶) در پژوهشی تجزیه و تحلیل توازن انرژی را در کوره بلند شماره یک کارخانه اردمیر ترکیه براساس مدلی ژاپنی برای این کوره بلند بررسی کرده‌اند. آنها انرژی لازم برای فرآیند احیاء را از تفاوت کل انرژی ورودی از کل انرژی خروجی محاسبه کرده‌اند.

لارسون و همکاران<sup>۷</sup> (۲۰۰۳) در پژوهشی اثر یک مدل بهینه‌سازی مصرف انرژی را برای یک مجتمع فولادسازی بررسی کرده‌اند؛ بدین ترتیب که ابتدا هریک از واحدهای کک‌سازی، کوره‌بلند، کنورتور، ریخته‌گری و نیروگاه مدل شده‌اند و سپس تابع هدف حداقل کردن انرژی مجتمع فولادسازی به وسیله مدل برنامه‌ریزی خطی تعریف شده است. در ادامه شدت انرژی برای ۸ حالت ترکیب مختلف شارژ مواد در کوره بلند و کنورتور بررسی و شبیه‌سازی شده است. همچنین اثر بهینه‌کردن مصرف انرژی روی کاهش انتشار گاز دی‌اکسیدکربن بررسی شده است.

در مقاله‌های بررسی شده، مطالعه ژانگ و همکاران (۲۰۱۱) در ارتباط با اثر ترکیب مواد اولیه آهن‌دار کوره بلند روی هزینه تولید است و محدودیت‌های زیر در آن دیده می‌شود.

- تمرکز بر کاهش هزینه مواد اولیه است؛ 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 به‌ازای 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 در نظر گرفته نشده 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.

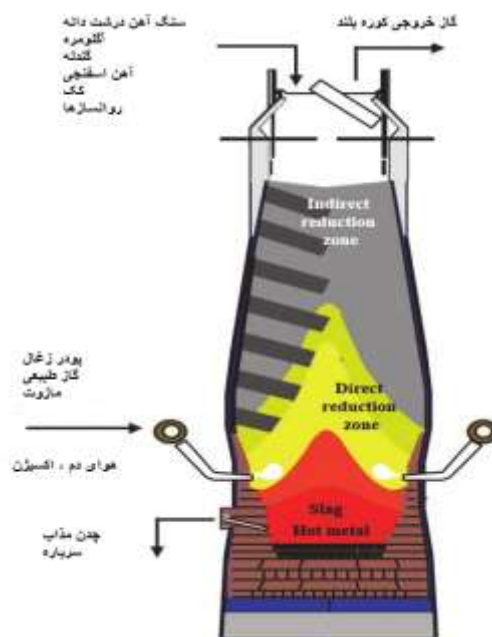
- میزان تزریق پودر زغال ثابت فرض شده و تزریق مازوت و گاز طبیعی بررسی نشده است. این مفروضات با شرایط واقعی کار هم‌خوانی ندارد.

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

در این پژوهش با توسعه مطالعه و مدل ژانگ و همکاران (۲۰۱۱) توابع هدف، حداکثر کردن سود عملیاتی تولید و حداقل کردن میزان انتشار گاز دی‌اکسیدکربن تعریف شده‌اند. همچنین ضمن موازنه کامل جرم و انرژی در کوره - بلند، متغیرهای ترکیب شیمیایی مذاب، مقدار مواد آهن‌دار، کمک ذوب، کک مصرفی، اکسیژن و هوای دم لازم، دما، حجم و ترکیب شیمیایی گاز دهانه و ترکیب و مقدار سرباره تولیدی تابعی از متغیرهای تولید نظیر ترکیب شیمیایی و نسبت مواد اولیه در بار کوره بلند و دمای هوای دم هستند. همچنین این متغیرها در تابع هدف و محدودیت‌ها استفاده می‌شوند. برای نخستین بار در این پژوهش استفاده هم‌زمان از هر سه سوخت مازوت، پودر زغال و گاز طبیعی در کنار کک، مدل‌سازی شده است و آثار استفاده از آنها روی کاهش مصرف کک و افزایش سود تولید با مدل ارائه‌شده قابل بررسی است. همچنین در این مقاله علاوه بر محدودیت‌های ترکیب شیمیایی چدن و سرباره تولیدی، برای نخستین بار درجه حرارت منطقه جلوی فرم‌های کوره بلند و درجه حرارت گاز خروجی محدودیت‌های فنی در نظر گرفته شده‌اند. در نتیجه میزان غنی‌سازی هوای دم با اکسیژن هم محاسبه‌شده است.

## مدل ریاضی پژوهش

مدل این پژوهش یک مدل غیرخطی بهینه‌سازی است که از معادلات ترمودینامیک، روابط فرآیندی، توازن جرم و انرژی بهره می‌گیرد. این مدل، سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری برای خرید و تدارک مواد اولیه است و برای بررسی اثر استفاده از مواد اولیه مختلف روی میزان انتشار دی‌اکسیدکربن و ارزیابی سود تولید استفاده می‌شود. در شکل شماره ۱، کوره بلند نمایش داده شده است. ورودی‌های کوره بلند شامل سنگ آهن درشت‌دانه<sup>۱۸</sup>، آگلومره<sup>۱۹</sup>، گندله<sup>۲۰</sup>، آهن قراضه، آهن اسفنجی<sup>۲۱</sup>، سنگ منگنز، کک، پودر زغال، مازوت، آهک، مواد روان‌ساز، هوای دم و اکسیژن هستند. خروجی‌های کوره بلند شامل چدن مذاب، سرباره و گاز خروجی کوره بلند هستند.



شکل ۱- ورودی‌ها و خروجی‌های کوره بلند

چدن مذاب، محصول اصلی تولیدشده در کوره بلند است و حاوی حدود ۹۴٪ آهن و ۴ تا ۵ درصد کربن است. این ماده، ورودی به کنورتور اکسیژنی برای تولید فولاد است. سرباره و گاز کوره خروجی‌های جانبی هستند. گاز خروجی دارای ارزش حرارتی حدود یک‌دهم گاز طبیعی است و برای تولید برق در نیروگاه استفاده می‌شود. سرباره، ماده جانبی تولیدی است که به کارخانه‌های سیمان و آسفالت فروخته می‌شود و ماده اولیه در تولید عایق‌های صوتی و حرارتی است.

## معرفی اندیس‌ها، نمادها و معادلات اصلی استفاده‌شده در مدل

در جدول ۱ اندیس‌های استفاده‌شده در این مطالعه معرفی شده‌اند.

i: ماده اولیه  $i$ ام در بار کوره بلند.

j: ترکیب شیمیایی  $j$ ام در مواد اولیه و انرژی کوره بلند.

k: عنصر شیمیایی  $k$ ام در ترکیب شیمیایی مواد اولیه و انرژی کوره بلند.

جدول ۱- اندیس‌ها

اندیس	i	j	K	اندیس	i	j	k
۱	آگلومره	Fe	Fe	۱۲	سایر ۳	MgO	Mg
۲	گندله	SiO <sub>2</sub>	Si	۱۳	سایر ۴	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al
۳	سنگ آهن	CaO	Ca	۱۴	سایر ۵	K <sub>2</sub> O	K
۴	آهن اسفنجی	P	P	۱۵	سایر ۶	Na <sub>2</sub> O	Na
۵	قراضه	As	As	۱۶	اکسیژن	Fe <sub>0.947</sub> O	
۶	سنگ منگنز	Cu	Cu	۱۷	گاز طبیعی	C	
۷	سنگ آهک	Pb	Pb	۱۸	پودر زغال	H <sub>2</sub> O	
۸	دولومیت	Zn	Zn	۱۹	مازوت	ash	
۹	کوارتزیت	S	S	۲۰	کک	H <sub>2</sub>	
۱۰	سایر ۱	Ti	Ti	۲۱		N <sub>2</sub>	
۱۱	سایر ۲	Mn	Mn	۲۲		O	

### پارامترها

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

$W_{j,total}$ : وزن ترکیب یا عنصرشیمیایی  $j$ ام برحسب کیلوگرم در کل بار کوره، زغال و کک برای هر تن چدن - مذاب تولیدی<sup>۲۲</sup>.

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

$X_{i,wet}$ : درصد وزنی ماده اولیه مرطوب  $i$  به وزن کل مواد اولیه آهن‌دار بار کوره بلند.

$d_{hearth}$ : قطر بوته کوره بلند برحسب متر.

$n_{tuyere}$ : تعداد فورم‌های هوای دم کوره بلند.

$V_{bf}$ : حجم مؤثر کوره بلند برحسب مترمکعب است.

$C_{fix}$ : هزینه‌های ثابت سالانه تولید چدن برحسب تومان.

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

$Pr_{O_2}$ : قیمت هر نرمال مترمکعب اکسیژن برحسب تومان.

$Pr_{NG}$ : قیمت هر نرمال مترمکعب گاز طبیعی برحسب تومان.

$Pr_k$ : قیمت هر کیلوگرم کک خشک مصرفی برحسب تومان.

$Pr_{oil}$ : قیمت هر کیلوگرم مازوت مصرفی برحسب تومان.

$Pr_{PC}$ : قیمت هر کیلوگرم پودر زغال مصرفی برحسب تومان.

$Pr_{slag}$ : قیمت هر کیلوگرم سرباره تولیدی برحسب تومان.

$Pr_{hm}$ : قیمت هر کیلوگرم چدن مذاب تولیدی برحسب تومان.

$r_{si}$ : میزان سیلیس برحسب کیلوگرم برای هر تن چدن مذاب تولیدی.

$\phi$ : میزان آهن خالص یک تن چدن مذاب، برابر ۹۴۵ کیلوگرم در هر تن چدن مذاب تولیدی.

$\lambda$ : ضریب بازیابی چدن مذاب، معادل با ۹۶۳٪.

$\theta_j$ : ضریب تصفیه.

$T_{wrz}$ : دمای ناحیهٔ احیاء و ستیت کوره بلند برحسب کلوین.

$T_{tg}$ : درجه حرارت گاز خروجی کوره بلند برحسب سانتی گراد.

$T_{blast}$ : دمای هوای دم برحسب کلوین.

$HV_{tg}$ : ارزش حرارتی هر نرمال مترمکعب گاز کوره بلند برحسب کیلوژول.

$LHV_{NG}$ : حد پایین ارزش حرارتی هر نرمال مترمکعب گاز طبیعی برحسب کیلوژول.

$Ash_K$ : درصد خاکستر کک.

$Ash_C$ : درصد خاکستر زغال.

$X_{KAj}$ : درصد وزنی عنصر زام در کک.

$X_{CAj}$ : درصد وزنی عنصر زام در پودر زغال.

CSR: استحکام کک پس از واکنش.

$\eta$ : بهره‌وری کوره بلند برحسب تن تولید چدن مذاب بر مترمکعب حجم کوره بلند در روز.

$H_{tx}$ : آنتالپی مادهٔ x در دمای t درجه کلوین.

$H_{tx}^f$ : آنتالپی ساخت عنصر مرکب x از عناصر تشکیل‌دهندهٔ آن در دمای t درجه کلوین.

### متغیرها

$X_i$  ( $i=1,2,\dots,15$ ): درصد وزنی مادهٔ اولیهٔ خشک i به وزن کل مواد اولیهٔ آهن‌دار بار کوره بلند.

$T_{O2}$ : میزان تزریق اکسیژن برای غنی‌سازی هوای دم برحسب نرمال مترمکعب برای هر تن چدن مذاب تولیدی.

$T_{ba}$ : میزان مصرف هوای دم برحسب نرمال مترمکعب برای هر تن چدن مذاب تولیدی.

$T_{VNG}$ : میزان مصرف حجم گاز طبیعی برحسب نرمال مترمکعب برای هر تن چدن مذاب تولیدی.

$T_C$ : میزان مصرف پودر زغال برحسب کیلوگرم برای هر تن چدن مذاب تولیدی.

$T_{oil}$ : میزان مصرف مازوت برحسب کیلوگرم برای هر تن چدن مذاب تولیدی.

$T_k$ : میزان مصرف کک خشک برحسب کیلوگرم برای هر تن چدن مذاب تولیدی.

جدول ۲- روابط اصلی حاکم بر مدل‌سازی

نماد	رابطه	توضیح رابطه
$W_{burden}$	$X_i = X_{wet} \times \frac{1 - a_{i18}}{100}, W_{burden} = \frac{10000 \times \phi}{\lambda \times \sum_{i=1}^{15} a_{i1} \times X_i}$	محاسبهٔ بار کوره بلند
$W_{mi}$	$W_{mi} = \frac{W_{burden} \times X_i}{100}$	محاسبهٔ وزن مادهٔ اولیهٔ آم در بار کوره بلند
$W_j$	$W_j = \frac{\phi \times \sum_{i=1}^{15} X_i \times a_{ij}}{\lambda \times \sum_{i=1}^{15} X_i \times a_{ij}}$	محاسبهٔ عنصر زام در بار مواد آهن‌دار
$HM_{Com j}$	$W_j total = W_j + \frac{W_{coke dry} \times Ash_K \times X_{KAj}}{10000} + \frac{W_{PC} \times Ash_C \times X_{CAj}}{10000}$ $HM_{Com j} = \frac{W_j total \times \theta_j}{10}$	محاسبهٔ عنصر زام در چدن مذاب

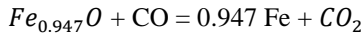


ادامه جدول ۲- روابط اصلی حاکم بر مدل‌سازی

نماد	رابطه	توضیح رابطه
$Fe_{m-burden}$	$Fe_{m-burden} = \frac{X_4 \times [a_{41} - a_{416} \times 52.88 / 68.88]}{100} + \frac{X_5 \times [a_{51} - a_{516} \times 52.88 / 68.88]}{100}$	محاسبه آهن متالیک در بار
$Fe_{t-burden}$	$Fe_{t-burden} = \frac{\sum_{i=1}^{i=15} X_i \times a_{i1}}{\sum_{i=1}^{i=15} X_i}$	محاسبه آهن کل در بار
$W_{slag}$	$W_{slag} = \sum(W_j) \times (1 - \Theta_j), \quad j = 2, 3, 10, 11, 12, 13$	محاسبه وزن سرباره
Basicity	$\text{Basicity} = \frac{10000 \times \phi \times \sum_{i=1}^{15} X_i \times a_{i3} + \lambda \times \sum_{i=1}^{15} X_i \times a_{i1} \times U}{10000 \times \phi \times \sum_{i=1}^{15} X_i \times a_{i2} + \lambda \times \sum_{i=1}^{15} X_i \times a_{i1} \times V}$ $U = W_{Coke-dry} \times Ash_K \times X_{kA3} + W_{pc} \times Ash_C \times X_{CA3}$ $V = W_{Coke-dry} \times Ash_K \times X_{kA2} + W_{pc} \times Ash_C \times X_{CA2} - 214000 \times HM_{Comp.2}$	محاسبه درجه قلیایی سرباره کوره بلند
$H_{Si}$	$H_{Si} = (-H_{1300SiO_2}^f) + (H_{1723Si} - H_{1300Si}) - 95$	حرارت احیاء $SiO_2$
$H_{Fe}$	$H_{Fe} = 0.5(-H_{1300FeO}^f) + (H_{1723Fe} - H_{1300Fe})$	حرارت احیاء وستیت
$H_{Mn}$	$H_{Mn} = (-H_{1300MnO}^f) + (H_{1723Mn} - H_{1300Mn}) + 4$	حرارت احیاء MnO
$H_C$	$H_C = (H_{1723C} - H_{1300C}) + 30$	حرارت گرمایش و انحلال کربن در چدن مذاب
$H^{Slag}$	$H^{Slag} = n_i^{Slag} \{ (H_i^{fus}) + (H_{1823} - H_{1300})_i \}$	حرارت تشکیل سرباره
$h_{loss}$	$h_{loss} = \frac{5.4 \times 10^3 \times \text{Hearth dia.} + 0.85 \times 10^3 \times \text{No of Tuyers}}{\text{Pig iron production per hour} \times \frac{\text{Pig iron Fe\%}}{100}}$	حرارت اتلافی کوره
$n^I H^I$	$n^I H^I = n^I \{ (-H_{CH_4}^f) + (H_{1473} - H_{1300})_{CH_4} \}$	حرارت تجزیه گاز طبیعی
$n_O^B$	$n_O^B = 1.28n_C^A + 0.42n_{H_2}^I - \{ 1.06 + 2(Si/Fe)^m + (Mn/Fe)^m \},$	تعداد مول اکسیژن - هوای دم
$n_C^A$	$\left[ n_C^A = \frac{H_D^{wrc} + H_{Blast} \{ 1.06 + 2(Si/Fe)^m + (Mn/Fe)^m \} - 0.42n_{H_2}^I (249.473 + H_{Blast})}{192.658 + 1.28H_{Blast}} \right] [ ]$	تعداد مول کربن فعال
$n_{CO}^{tg}$	$n_{CO}^{tg} = n_C^A \cdot X_{CO}^{tg}$	تعداد مول CO در گاز فوقانی
$n_{CO_2}^{tg}$	$n_{CO_2}^{tg} = n_C^A \cdot X_{CO_2}^g$	تعداد مول $CO_2$ در گاز فوقانی
$n_{H_2}^g$	$n_{H_2}^{tg} = n_{H_2}^I \cdot X_{H_2}^{tg}$	تعداد مول $H_2$ در گاز فوقانی
$n_{H_2O}^{tg}$	$n_{H_2O}^{tg} = n_{H_2}^I \cdot X_{H_2O}^{tg}$	تعداد مول $H_2O$ در گاز فوقانی

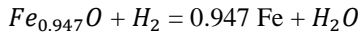
محاسبه میزان انتشار دی اکسید کربن

معادله احیاء و ستیت با گاز



منواکسید کربن (۱)

$$\Delta G_{01} = a+b.T.\log(T)+C.T : a = -4190 , b = 0 , c = 5.13 \quad (2)$$



احیاء و ستیت با گاز هیدروژن (۳)

$$\Delta G_{02} = a+b.T.\log(T)+C.T : a = 6060 , b = 4.48 , c = -17.83 \quad (4)$$

$$\Delta G_{01} = (-4190 + 5.13 \times T_{WRZ}) \quad (5)$$

$$\Delta G_{02} = (6060 + 4.48 \times T_{WRZ} \times \log T_{WRZ} - 17.83 \times T_{WRZ}) \quad (6)$$

$$(CO_2/CO)_{eq} = \exp(-\Delta G_{01} / (1.982 \times T_{WRZ})) \quad (7)$$

$$(H_2O / H_2)_{eq} = \exp(-\Delta G_{02} / (1.982 \times T_{WRZ})) \quad (8)$$

$$CO_{2eq} = (CO_2/CO)_{eq} / (1 + (CO_2/CO)_{eq}) \quad (9)$$

$$CO_{eq} = 1 - CO_{2eq} \quad (10)$$

$$H_2O_{eq} = (H_2O / H_2)_{eq} / (1 + (H_2O/H_2)_{eq}) \quad (11)$$

$$H_{2eq} = 1 - H_2O_{eq} \quad (12)$$

$$n_o^B = n_c^A m \times (CO_{eq} + 2 \times CO_{2eq}) + H_2_{injectants} \times H_2O_{eq} - (O/Fe)_{WRZ} - 2nCaCO_3 - O_{injectants} - 2nSi - nMn$$

تعداد مول اکسیژن هوای دم به ازاء هر

مول آهن (۱۳)

$$r_b = \frac{n_o^B / 2}{(0.21 + O_{2e} / 100) \times J \times 22.4}$$

میزان هوای دم برای هر تن تولید

چدن مذاب (۱۴)

$$r_{O_2} = \frac{r_b \times O_{2e}}{100}$$

میزان اکسیژن برای هر تن تولید چدن

مذاب (۱۵)

$$J = \frac{HMcom_1 \times 10}{55.85} \quad (\text{K mole Fe / thm})$$

مقدار کیلومول آهن در هر تن چدن

(۱۶)

$$Fe_{0.947}O_{burden} = \frac{\sum_{i=1}^{i=15} X_i \times a_{i16}}{\sum_{i=1}^{i=15} X_i}$$

مقدار وستیت در بار مواد آهن دار

(۱۷)

$$Fe_2O_3\text{-burden} = \frac{(Fe_t \text{ burden} - (Fe_{0.947}O_{burden} \times 52.89 / 68.89 + Fe_m \text{ burden})) \times 159.7}{111.7}$$

مقدار هماتیت در بار مواد آهن دار

(۱۸)

$$(O/Fe)_{burden} =$$

$$\frac{Fe_{0.947}O_{burden} / 68.89 + Fe_2O_3 \text{ burden} \times 3 / 159.7}{Fe_m \text{ burden} / 55.85 + Fe_{0.947}O_{burden} \times 0.947 / 68.89 + Fe_2O_3 \text{ burden} \times 2 / 159.7}$$

نسبت اکسیژن به آهن در مواد آهن دار

(۱۹)

$$(O/Fe)_{WRZ} = 1.06 \times (1 - \frac{Fe_m \text{ burden}}{Fe_t \text{ burden}})$$

نسبت اکسیژن به آهن در ناحیه

وستیت (۲۰)

کل انرژی لازم (۲۱)

$$D_{total} = DHM + DSlag + DCaCO_3 + \text{Heat loss WRZ} + DNG + DCoal + DOil$$

$$E^B = 0.5 \times \frac{29.9288 \times (T_{blast} - 1200) + 0.5 \times 0.00418 \times (T_{blast}^2 - 1200^2) + 167200 \times (1200/T_{blast} - 1) + 0.79 - C}{0.21 + O_{2e}/100 \times (27.8388 \times (T_{blast} - 1200) + 0.5 \times 0.0059356 \times (T_{blast}^2 - 1200^2))} \quad (22)$$

$$n_C^{Am} = \frac{D_{total} + E^B \times ((O/Fe)_{WRZ} + O_{injectants} + 2n_{Si} + n_{Mn} + 2n_{CaCO3}) - H_2O_{eq} \times H_2_{injectants} \times (249000 + E^B)}{198000 + E^B \times (CO_{eq} + 2CO_{2eq})} \quad (23)$$

$$X_{H_2O}^{tg} = \frac{(O/Fe)_{Burden} - (O/Fe)_{WRZ}}{n_C^{Am} \times CO_{eq}} + H_2O_{eq} / H_{2eq} + H_2_{injectants} \quad \text{نسبت مقدار آب در گاز خروجی کوره بلند (24)}$$

$$X_{H_2}^{tg} = 1 - X_{H_2O}^{tg} \quad \text{نسبت عنصر هیدروژن در گاز خروجی کوره بلند (25)}$$

$$(O/C)_{tg} = \frac{(X_{H_2O} - H_2O_{eq}) \times CO_{eq}}{H_{2eq} + CO_{eq} + 2 \times CO_{2eq}} \quad \text{نسبت عنصر اکسیژن به کربن در گاز خروجی کوره بلند (26)}$$

$$X_{CO_2}^{tg} = (O/C)_{tg} - 1 \quad \text{نسبت دی‌اکسیدکربن در گاز خروجی کوره بلند (27)}$$

$$X_{CO}^{tg} = 1 - X_{CO_2}^{tg} \quad \text{نسبت منواکسیدکربن در گاز خروجی کوره بلند (28)}$$

$$n_{H_2O}^{tg} = X_{H_2O}^{tg} \times H_2 - injectant + \frac{W_{burden} \times \sum_{i=1}^9 X_i wet \times a_{i18}}{10000 \times 18 \times J} \quad \text{تعداد مول‌های آب در گاز خروجی کوره بلند (29)}$$

$$n_{H_2}^{tg} = X_{H_2}^{tg} \times H_2 - injectant \quad \text{تعداد مول‌های آب در گاز خروجی کوره بلند (30)}$$

$$n_{CO}^{tg} = n_C^{Am} n_C^{Am} \times X_{CO}^{tg} \quad \text{تعداد مول‌های دی‌اکسیدکربن در گاز خروجی (31)}$$

$$n_{CO_2}^{tg} = n_C^{Am} n_C^{Am} \times X_{CO_2}^{tg} \quad \text{تعداد مول‌های دی‌اکسیدکربن در گاز خروجی (32)}$$

$$n_{N_2}^{tg} = \frac{0.5 \times n_O^B \times (0.79 - 0.01 O_{2e})}{0.21 + 0.01 O_{2e}} \quad \text{تعداد مول‌های نیتروژن در گاز خروجی (33)}$$

$$CO^{tg} = \frac{n_{CO}^{tg}}{n_{H_2}^{tg} + n_{CO}^{tg} + n_{CO_2}^{tg} + n_{N_2}^{tg}} \quad \text{نسبت منواکسیدکربن در گاز خروجی کوره بلند (34)}$$

$$CO_2^{tg} = \frac{n_{CO_2}^{tg}}{n_{H_2}^{tg} + n_{CO}^{tg} + n_{CO_2}^{tg} + n_{N_2}^{tg}} \quad \text{نسبت دی‌اکسیدکربن در گاز خروجی کوره بلند (35)}$$

$$H_2^{tg} = \frac{n_{H_2}^{tg}}{n_{H_2}^{tg} + n_{CO}^{tg} + n_{CO_2}^{tg} + n_{N_2}^{tg}} \quad \text{نسبت هیدروژن در گاز خروجی کوره بلند (36)}$$

$$N_2^{tg} = \frac{n_{N_2}^{tg}}{n_{H_2}^{tg} + n_{CO}^{tg} + n_{CO_2}^{tg} + n_{N_2}^{tg}} \quad \text{نسبت هیدروژن در گاز خروجی کوره بلند (37)}$$

$$r_{tg} = \frac{(n_{H_2tg} + n_{CO_2tg} + n_{N_2tg}) \times J \times 22.4}{\lambda} \quad (\text{Nm}^3/\text{thm})$$

میزان تولید گاز خروجی کوره بلند  
(۳۸)

$$HV_{tg} = \frac{CO_{tg} \times 283.136 + H_{2tg} \times 283.8 \times 1000}{22.4} \quad (\text{KJ}/\text{Nm}^3)$$

ارزش حرارتی گاز خروجی کوره بلند  
(۳۹)

$$r_{CO_2-BF} = r_{tg} \times (CO_{tg} + CO_{2tg}) \quad (\text{Nm}^3/\text{thm})$$

میزان انتشار گاز دی‌اکسیدکربن از کوره بلند  
(۴۰)

$$r_{CO_2-Coke} = 0.794 \times r_k \times 22.4/44 \quad (\text{Nm}^3/\text{thm})$$

میزان انتشار گاز دی‌اکسیدکربن از تولید کک  
(۴۱)

$$r_{CO_2-Sinter} = 0.2 \times W_{m1} \times 22.4/44 \quad (\text{Nm}^3/\text{thm})$$

میزان انتشار گاز دی‌اکسیدکربن از تولید آگلومره  
(۴۲)

$$r_{CO_2-Pellet} = 0.057 \times W_{m2} \times 22.4/44 \quad (\text{Nm}^3/\text{thm})$$

میزان انتشار گاز دی‌اکسیدکربن از تولید گندله  
(۴۳)

$$r_{CO_2-DRI} = 0.65 \times W_{m4} \times 22.4/44 \quad (\text{Nm}^3/\text{thm})$$

میزان انتشار گاز دی‌اکسیدکربن از تولید آهن اسفنجی  
(۴۴)

میزان انتشار گاز دی‌اکسیدکربن کارگاه‌های جانبی تولیدکننده مواد اولیه کوره بلند با رابطه (۴۵) ارائه می‌شود.

$$r_{CO_2-Plants} = r_{CO_2-Coke} + r_{CO_2-Sinter} + r_{CO_2-Pellet} + r_{CO_2-DRI} \quad (\text{Nm}^3/\text{thm}) \quad (۴۵)$$

میزان انتشار کل گاز دی‌اکسیدکربن ناشی از کوره بلند و کارگاه‌های تولیدکننده کک و مواد آهن‌دار کوره بلند به صورت رابطه (۴۶) نوشته می‌شود که میزان انتشار گاز دی‌اکسیدکربن هر کارگاه از روابط (۴۱) تا (۴۴) محاسبه و جایگزین می‌شود.

$$r_{CO_2-total} = r_{CO_2-BF} + r_{CO_2-Plants} \quad (\text{Nm}^3/\text{thm}) \quad (۴۶)$$

### توابع هدف مدل

تابع هدف سود عملیاتی سالیانه تولید چدن مذاب کوره بلند با  $Z_1$  از طریق رابطه شماره (۴۷) نمایش داده می‌شود که با مدیریت نسبت ترکیب مواد آهن‌دار و انرژی ورودی کوره بلند باید بیشینه شود و تابع هدف میزان انتشار کل گاز دی‌اکسیدکربن کوره بلند و کارگاه‌های جانبی تهیه‌کننده مواد اولیه آهن‌دار و کک با  $Z_2$  به وسیله روابط شماره (۴۸) و (۴۹) نمایش داده می‌شود که با تغییر نسبت ترکیب مواد آهن‌دار و انرژی ورودی کوره بلند، باید میزان انتشار کل گاز گلخانه‌ای دی‌اکسیدکربن ناشی از تولید چدن کوره بلند و کارگاه‌های تولید کننده مواد آهن‌دار و کک کوره بلند حداقل شود.

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 ثابت تولید

$$Max Z_1 = [350 \times \eta \times V_{bf} \times (Pr_{hm} + Pr_{slag} \times W_{slag} + Pr_{NG} \times r_{tg} \times \frac{HV_{tg}}{LHV_{NG}} - \frac{100 \times \phi \times \sum_{i=1}^{i=15} x_i \times Pr_i}{\lambda \times \sum_{i=1}^{i=15} a_{i1} \times x_i} - Pr_k \times r_k - Pr_{O_2} \times r_{O_2} - Pr_{ba} \times r_{ba} - Pr_{NG} \times r_{VNG} - Pr_c \times r_c - Pr_{oil} \times r_{oil}) - C_{fix}] \quad (47)$$

$$Min Z_2 = (r_{CO_2-total}) \quad (48)$$

$$Min Z_2 = [r^{tg} \times (CO^{tg} + CO_2^{tg}) + 0.794 \times r_k \times 22.4/44 + 0.2 \times W_{m1} \times 22.4/44 + 0.057 \times W_{m2} \times 22.4/44 + 0.65 \times W_{m4} \times 22.4/44] (Nm^3/thm) \quad (49)$$

برای تولید سالیانه کوره بلند ۳۵۰ روز کاری در نظر گرفته شده است. بهره‌وری کوره بلند با  $\eta$  نمایش داده می‌شود و مقدار تولید روزانه به‌ازای واحد حجم کوره بلند تعریف می‌شود و به تمام ورودی‌ها وابسته است. با توجه به روابط (۱۳)، (۱۴)، (۲۲)، (۲۳) و (۲۸) و معادلات  $n_{CO}^{tg}$ ،  $n_{CO_2}^{tg}$  در جدول (۲)، توابع  $f_1$  تا  $f_4$  را به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$\eta = f_1(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{15}, x_{16}, x_{17}, x_{18}, x_{19}, r_{VNG}, r_{oil}, r_c, r_k) \quad (50)$$

میزان مصرف کک و میزان هوای دم، ورودی‌های کوره بلند هستند که تابع سایر ورودی‌ها مانند میزان مصرف پودر زغال، گاز طبیعی، مازوت، آگلومره، سنگ آهن درشت‌دانه، آهن اسفنجی، قراضه، دمای هوای دم و اکسیژن هستند و با توابع  $f_2$  و  $f_3$  زیر نمایش داده می‌شود.

$$r_k = f_2(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{15}, x_{16}, x_{17}, x_{18}, x_{19}, r_{ba}, r_{VNG}, r_c, r_{oil}, Ash_k) \quad (51)$$

$$r_{ba} = f_3(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{15}, x_{16}, x_{17}, x_{18}, x_{19}, r_k, r_{VNG}, r_c, r_{oil}) \quad (52)$$

هم‌چنین میزان تولید گاز کوره بلند و انتشار گاز دی‌اکسید کربن به ترکیب شارژ کوره و سوخت‌های هیدروکربنی وابسته است و به ترتیب با تابع  $f_4$  و تابع  $f_5$  بیان می‌شوند.

$$r_{tg} = f_4(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{15}, x_{16}, x_{18}, x_{19}, r_k, r_{ba}, r_{VNG}, r_c, r_{oil}) \quad (53)$$

$$r_{CO_2-BF} = f_5(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{15}, x_{16}, x_{18}, x_{19}, r_k, r_{ba}, r_{VNG}, r_c, r_{oil}) \quad (54)$$

هدف این است که براساس روابط فرآیندی، معادلات توازن جرم و انرژی و قوانین ترمودینامیکی در فرآیند کار کوره بلند، مدلی برای عملکرد کوره بلند، محاسبه بیشینه سود عملیاتی و کمینه انتشار کل گاز گلخانه‌ای دی‌اکسید-کربن ارائه شود.

#### محدودیت‌ها

محدودیت‌های ناشی از توازن انرژی ورودی به کوره و خروجی از کوره، تعادل بین مواد ورودی کوره و مواد خروجی کوره، حداکثر مجاز قراضه و آهن اسفنجی در بار، حداکثر امکان تأمین ماهیانه مواد اولیه، محدودیت‌های فرآیند کوره بلند و روابط بین متغیرها هستند.

$S_i$ : مقدار خرید ماهیانه ممکن ماده اولیه  $i$ ام.

$C_i$ : مقدار مصرف ماهیانه ممکن ماده اولیه  $i$ ام.

$B_1$ : حد پایین درجه قلیایی سرباره.

$B_2$ : حد بالای درجه قلیایی سرباره.

$L_{Ej}$ : حد پایین عنصر  $j$  در چدن مذاب برحسب کیلوگرم در تن چدن مذاب.

$U_{Ej}$ : حد بالای عنصر  $j$  در چدن مذاب برحسب 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 برحسب سانتی گراد.

$$W_{Fe}^{in} = W_{Fe}^{Out} \quad \text{معادله توازن جرم عنصر آهن در کوره بلند (۵۵)}$$

$$n_o^{Burden} + n_o^{Blast} = n_o^{tg} \quad \text{معادله توازن جرم اکسیژن در کوره بلند (۵۶)}$$

$$n_c^{coke} + n_c^I = \left(\frac{C}{Fe}\right)^m + (n_{co}^{tg} + n_{co2}^{tg}) \quad \text{معادله توازن جرم کربن در کوره بلند (۵۷)}$$

$$H_S = H_D \quad \text{معادله توازن انرژی در کوره بلند (۵۸)}$$

$$X_4 + X_5 \leq 25\% \quad \text{محدودیت میزان شارژ قراضه و آهن اسفنجی در}$$

بار کوره بلند (۵۹)

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

باشد (۶۰)

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

$$\frac{\phi \sum_{i=1}^{15} x_i a_{ij} + \frac{r_k Ash_K a_{16j} + r_c Ash_C a_{17j}}{10000}}{\lambda \sum_{i=1}^{15} x_i a_{i,1}} \leq U_{Ej} \quad j = 2,3,12,13,14, \quad (۶۱)$$

$$\frac{\phi \sum_{i=1}^{15} x_i a_{ij} + \frac{r_k Ash_K a_{16j} + r_c Ash_C a_{17j}}{10000}}{\lambda \sum_{i=1}^{15} x_i a_{i,1}} \geq L_{Ej} \quad j = 2,3,12,13,14, \quad (۶۲)$$

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

$$\frac{\phi \sum_{i=1}^{15} x_i a_{ij} + \frac{r_k Ash_K a_{16j} + r_c Ash_C a_{17j}}{100}}{\lambda \sum_{i=1}^{15} x_i a_{i,1}} \leq \frac{U_{Ej}}{\theta_j} \quad j = 4,5, \dots, 11, \quad (۶۳)$$

$$\frac{\phi \sum_{i=1}^{15} x_i a_{ij} + \frac{r_k Ash_K a_{16j} + r_c Ash_C a_{17j}}{100}}{\lambda \sum_{i=1}^{15} x_i a_{i,1}} \geq \frac{L_{Ej}}{\theta_j} \quad j = 4,5, \dots, 11, \quad (۶۴)$$

باتوجه به محدودیت‌های فنی و فرآیندی برای کار مناسب کوره باید درجه قلیایی سرباره کوره بلند بین حداقل ۱

و حداکثر ۱/۱ باشد.

$$\frac{10000 \phi \sum_{i=1}^{15} a_{i,3} x_i + \lambda \sum_{i=1}^{15} x_i a_{i,1} (r_k Ash_K a_{16,3} + r_c Ash_C a_{17,3})}{10000 \phi \sum_{i=1}^{15} a_{i,2} x_i + \lambda \sum_{i=1}^{15} x_i a_{i,1} (r_k Ash_K a_{16,2} + r_c Ash_C a_{17,2} - 214000 \cdot r_{si})} \leq 1.1 \quad (۶۵)$$

$$\frac{10000 \phi \sum_{i=1}^{15} a_{i,3} x_i + \lambda \sum_{i=1}^{15} x_i a_{i,1} (r_k Ash_K a_{16,3} + r_c Ash_C a_{17,3})}{10000 \phi \sum_{i=1}^{15} a_{i,2} x_i + \lambda \sum_{i=1}^{15} x_i a_{i,1} (r_k Ash_K a_{16,2} + r_c Ash_C a_{17,2} - 214000 \cdot r_{si})} \geq 1 \quad (۶۶)$$

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

$$x_i \geq L_{Fi} \quad \forall i \in I, \quad (67)$$

$$x_i \leq U_{Fi} \quad \forall i \in I \quad (68)$$

$$x_i \geq 0 \quad \forall i \in I, \quad (69)$$

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

$$\sum_{i=1}^5 x_i + \sum_{i=10}^{15} x_i = 100 \quad (70)$$

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

$$0 \leq r_{VNG} \leq 110 \quad (71)$$

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

$$T_{flame} \geq 2050 \text{ C} \quad (72)$$

درجه حرارت گاز خروجی کوره بلند باید بزرگتر یا مساوی ۱۱۰ درجه سانتی گراد باشد.

$$T_{tg} \geq 110 \text{ Co} \quad (73)$$

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

$$0 \leq r_{O2} \leq 10\% \quad (74)$$

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

$$0 \leq r_c \leq 150 \quad (75)$$

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

$$0 \leq r_{oil} \leq 90 \quad (76)$$

### حل مدل و جواب بهینه

مدل غیرخطی مدلی است که تابع هدف یا یک یا چند محدودیتی در یک مدل برنامه ریزی، تابعی غیرخطی از متغیرهای تصمیم گیری باشد. مدل این پژوهش به علت روابط غیرخطی ارائه شده برای توابع هدف و محدودیت های این پژوهش، مدلی غیرخطی است. درحالت کلی یک مدل غیرخطی به صورت زیر در نرم افزار متلب ارائه می شود.

$$\begin{aligned} & \text{Min } f(x) \\ & \text{s.t. } \quad C(x) \leq 0 \\ & \quad \quad C_{eq}(x) = 0 \\ & \quad \quad Ax \leq b \\ & \quad \quad A_{eq} x = b_{eq} \\ & \quad \quad lb \leq X \leq ub \end{aligned}$$

که  $X = [X_i]$  بردار متغیر بهینه،  $f(x)$  تابع هدف،  $lb$  و  $ub$  بردارهای ستونی حدود پایین و بالا بردار متغیر  $X$ ،  $b$  و  $b_{eq}$  بردارهای ستونی،  $C(x)$  و  $C_{eq}(x)$  توابع غیرخطی بردار متغیر بهینه،  $A$  و  $A_{eq}$  ماتریس هستند. برای حل این مدل از الگوریتم درون یابی و تابع  $fmincon$  استفاده می شود. این تابع برای یافتن حداقل یک تابع چند متغیره غیرخطی محدود شده استفاده می شود. الگوریتم اشاره شده در بالا از بردار حدس اولیه از جواب  $(X_0)$  به عنوان نقطه اولیه استفاده می کند. شکل کلی تابع  $fmincon$  در متلب به صورت زیر است.

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

که 'nonlcon', 'X0,A,b,Aeq,beq,lb,ub', و 'nonlcon' تابع fmincon هستند و محدودیت‌های غیرخطی است. جواب بهینه در Xopt و مقدار کمینه تابع هدف در foft ارائه می‌شود. برای سهولت کاربر، اطلاعات ورودی از طریق اکسل وارد و متلب این اطلاعات را از اکسل می‌خواند. هم‌چنین نتایج اجرای مدل علاوه بر متلب در اکسل هم ارائه می‌شود. 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، 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 هستند. مدل در تعدادی m-file نرم‌افزار متلب نوشته و به کمک دستور fmincon بهینه‌سازی انجام می‌شود. خروجی‌های مدل شامل مقدار سود بهینه عملیاتی تولید برای هر کیلوگرم چدن مذاب تولیدی، حجم انتشار گاز دی‌اکسیدکربن برای هر تن چدن مذاب تولیدی، درصد و مقدار ترکیب بهینه مواد اولیه و حامل‌های انرژی هستند.

چون مدل‌سازی براساس معادلات توازن جرم و انرژی و قوانین ترمودینامیک و روابط بسیار دقیق فرآیندی انجام شده است، جواب مدل دقیق است. برای ارائه یک حل عملی، داده‌های کوره بلند شماره ۳ ذوب آهن (که کوره-بلندی مدرن و با اتوماسیون بالا است) به مدل اعمال و جواب بهینه محاسبه شده است. بدین ترتیب که ابتدا ورودی‌های مدل (شامل ترکیب شیمیایی مواد اولیه، پارامترهای فنی کوره بلند مانند مشخصات هندسی و تعداد فرم‌های هوا، قیمت‌های مواد اولیه و انرژی، حدود بالا و پایین محدودیت‌های فنی، محدودیت تأمین مواد اولیه آهن‌دار که ۱۳۶ هزار تن در ماه آگلومره، ۳۷۶۰۰ تن در ماه گندله و ۵۵۲۰۰ تن در ماه سنگ آهن درشت‌دانه هستند) در اکسل وارد شده‌اند و برنامه مدل در نرم‌افزار متلب برای سه حالت اجرا شده است. در حالت ۱ (که کار معمول و غیربهینه است)، ۳۰ درصد از بار مواد اولیه آهن‌دار، سنگ آهن و ۷۰ درصد بقیه آگلومره است و از کک و گاز طبیعی برای تأمین انرژی و انجام واکنش‌های احیاء استفاده می‌شود. مقدار سود عملیاتی ۱۸۲۰ ریال برای هر کیلو تولید است و میزان انتشار کل گاز دی‌اکسیدکربن برابر ۱۰۳۵ نمرال مترمکعب برای هر تن چدن مذاب معادل ۲۰۳۴ کیلوگرم دی-اکسیدکربن برای هر تن چدن مذاب است. در حالت ۲، تابع هدف  $Z_1$  یعنی سود تولید در نرم‌افزار متلب اجرا می‌شود و خروجی‌های مدل، سود بیشینه هر کیلوگرم چدن مذاب تولیدی را ۲۴۶۰ ریال، میزان انتشار کل گاز گلخانه‌ای دی‌اکسیدکربن را ۹۳۴ نمرال مترمکعب برای هر تن چدن مذاب معادل ۱۸۳۵ کیلوگرم دی‌اکسیدکربن برای هر تن چدن مذاب، ترکیب بهینه مواد آهن‌دار کوره بلند شامل ۲۴٪ سنگ آهن، ۵۹٪ آگلومره، ۱۶٪ گندله و ترکیب انرژی کوره بلند ۱۵۰ کیلوگرم پودر زغال، ۵۶ نمرال مترمکعب گاز طبیعی و ۳۲۰ کیلوگرم کک را برای تولید هر تن چدن مذاب محاسبه و ارائه می‌دهد. در مقایسه با سود ۱۸۲۰ ریال برای ترکیب کار معمول غیربهینه ۶۴۰ ریال سود اضافی برای هر کیلو تولید چدن حاصل می‌شود که ۳۰۰ ریال این سود متعلق به ترکیب بهینه مواد اولیه آهن‌دار و ۳۴۰ ریال دیگر از ترکیب بهینه انرژی حاصل می‌شود و این ۶۴۰ ریال سود اضافی هر کیلو تولید برای ۳/۵ میلیون تن تولید در سال یعنی افزایش ۲۲۴۰ میلیارد ریال منافع اقتصادی در سال است.



\*\*\*\*\*

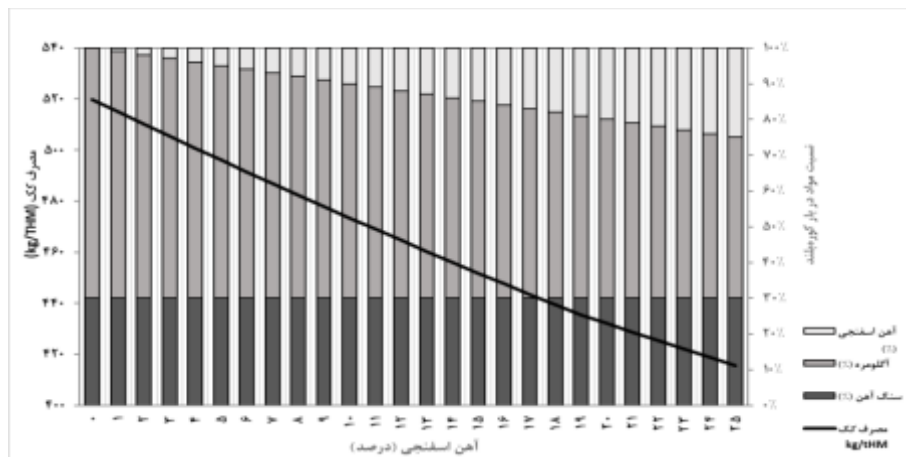
Optimization date : 01-Aug-2019  
 Optimization Algorithm : interior-point:  
 Hot Metal Unit Cost (Toman/kg) ..... = 965.3892  
 Hot Metal Unit Profit (Toman/kg) ..... = 246.7303  
 CO2 emission only by BF top gas.= 325.0268 (Nm3/ton HM) ..... 638.4456(kg/ton HM)  
 Total CO2 emission =933.9653 (Nm3/ton HM). ..... 1834.5747(kg/ton HM)  
 Productivity (ton/m3)/Day ..... = 2.4218  
 Sinter = 59.4418(%) ..... 962.5879(kg/ton HM)  
 Pellet = 16.4315(%) ..... 266.0888(kg/ton HM)  
 Lump Ore = 24.1267(%) ..... 390.7027(kg/ton HM)  
 DRI = 0(%) ..... 0(kg/ton HM)  
 Scrap = 0(%) ..... 0(kg/ton HM)  
 Mn Ore (kg/ton HM) = 0.029565  
 Limestone (kg/ton HM) = 0.021414  
 Dolomite (kg/ton HM) = 0  
 Quartzite (kg/ton HM) = 0.13369  
 O2 Enrichment (M3/ton HM) ..... = 7.4129  
 Natural Gas Consumption (Nm3/ton HM) .. = 56.5034  
 Pulverized Coal Consumption (kg/ton HM) = 149.981  
 Oil Consumption (kg/ton HM) ..... = 0  
 Coke weight Dry (kg/ton HM) ..... = 323.2943  
 Weight of Burden & Slag:  
 Burden (kg/ton HM) ..... = 1619.3794  
 Slag (kg/ton HM) ..... = 315.4078  
 Flame temperature (°C) ..... = 2050.025  
 Top gas temperature (°C) ..... = 305.4718  
 Top gas Heat value (kcal/Nm3) ..... = 934.2786  
 Topgas\_volume (Nm3/ton HM) ..... = 1503.0899  
 CO2 ratio in top gas (%) ..... = 0.21624  
 CO ratio in top gas (%) ..... = 0.24784  
 H2 ratio in top gas (%) ..... = 0.06148  
 Blast air Consumption (Nm3/ton HM) ..... = 982.9035  
 Maximum Blast air Production by Power Plant (Nm3/min) = 3400  
 Elapsed Total time (read & write & Optimization & Plot) : 00:00:23  
 \*\*\*\*\*

شکل ۲- نمونه ای از خلاصه نتایج محاسبه شده با نرم افزار متلب برای تابع هدف Z<sub>2</sub>

در حالت ۳ تابع هدف Z<sub>2</sub> یعنی انتشار کل گازی اکسید کربن کمینه می‌شود و در جواب بهینه نسبت به حالت ۱ بخشی از مواد اولیه آهن دار با گندله و قراضه و سهمی از کک با پودر زغال جایگزین شده است و ترکیب بهینه مواد آهن دار کوره بلند ۴۱/۸٪ آگلومره، ۱۳٪ گندله، ۱۹٪ سنگ آهن و ۲۵٪ قراضه و مقدار انتشار کل دی‌اکسید کربن ۶۳۹ نرمال مترمکعب به ازاء هر تن تولید چدن معادل ۱۲۵۵ کیلوگرم دی‌اکسید کربن برای هر تن چدن مذاب است و هر کیلوگرم چدن تولیدی ۱۶۳ تومان محاسبه شده است. در شکل ۳ نتایج محاسبات نرم افزار متلب برای جواب - بهینه انتشار گاز دی‌اکسید کربن ارائه شده است. از مقایسه جواب‌های بهینه توابع هدف Z<sub>1</sub> و Z<sub>2</sub> تفاوت سود عملیاتی دو تابع هدف ۷۲۵ ریال برای هر کیلو تولید نتیجه می‌شود؛ یعنی برای حداقل کردن انتشار گاز گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن باید برای هر کیلو تولید حدود ۳۴٪ از سود بیشینه فاصله گرفت. این به دلیل پرداخت هزینه بیشتر برای خرید مواد اولیه آهن دار سازگار با محیط زیست (مانند قراضه و آهن اسفنجی) است. شکل ۳ نمونه‌ای از جواب بهینه تابع هدف Z<sub>1</sub> محاسبه شده با کدنویسی متلب را نشان می‌دهد که با الگوریتم درون‌یابی و یک سیستم رایانه‌ای دارای پردازنده ۲/۶۰ گیگاهرتزی ۶۴ بیتی و ۴ گیگابایت حافظه RAM در مدت ۲۳ ثانیه اجرا شده است.

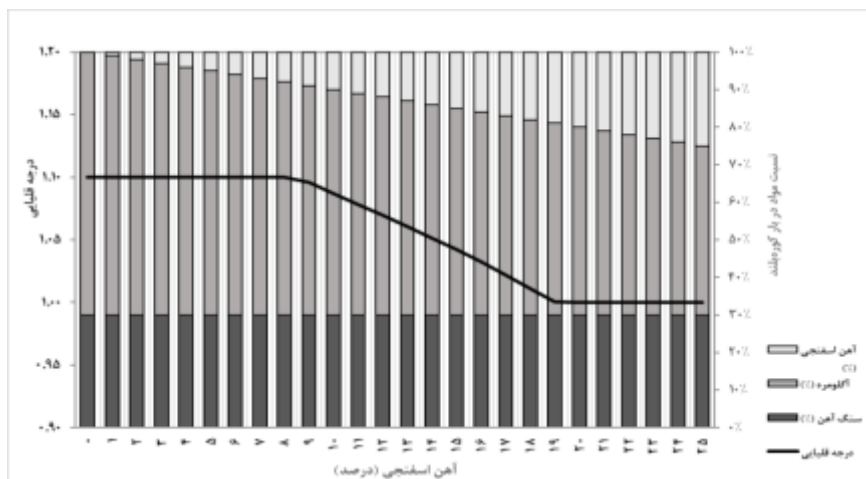
## بحث و تحلیل حساسیت

در شکل ۳ براساس خروجی مدل، نتایج تحلیل حساسیت جایگزین کردن آگلومره با آهن اسفنجی بر میزان مصرف کک در کوره بلند شماره ۳ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود با افزایش میزان جایگزینی آگلومره، مصرف کک با شیب تندی کاهش می‌یابد. در مقادیر بیشتر از ۱۸ درصد آهن اسفنجی، افت نامحسوسی در شیب کاهش مصرف کک دیده می‌شود. علت کاهش مصرف کک با افزایش مقدار آهن اسفنجی، تفاوت درخور توجه درصد Fe موجود در آهن - اسفنجی (۸۰/۰۶٪) نسبت به آگلومره (۵۵/۲۶٪) و وجود مقدار زیاد آهن فلزی در آهن اسفنجی است. با افزایش درصد آهن اسفنجی در بار مواد آهن دار، درصد آهن بار و درصد آهن فلزی آن افزایش می‌یابد. علت تغییر شیب در ۱۸ درصد آهن اسفنجی رسیدن درجه قلیایی سرباره به حداقل مجاز و نیاز به افزایش سنگ آهک برای جبران این کاهش است.



شکل ۳- تأثیر جایگزینی آگلومره آهن اسفنجی در بار مواد آهن دار کوره بلند بر میزان مصرف کک

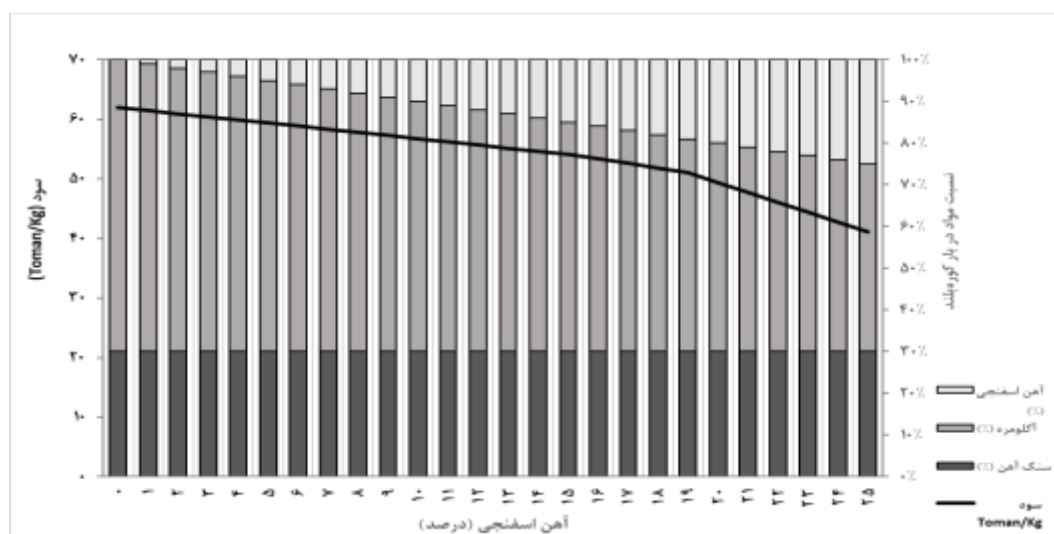
همان گونه که در شکل ۴ دیده می‌شود تا ۸ درصد درجه قلیایی ثابت مانده است. علت کاهش شارژ کوارتزیت است که برای کاهش درجه قلیایی استفاده می‌شود تا اینکه کوارتزیت در ۸ درصد آهن اسفنجی به صفر می‌رسد. در مقادیر ۸ تا ۱۸ درصد آهن اسفنجی با افزایش مصرف آهن اسفنجی درجه قلیایی کاهش می‌یابد و در ۱۸ درصد، درجه قلیایی به حداقل مقدار مجاز خود کاهش می‌یابد. در مقادیر بیشتر از ۱۸ درصد، برای کنترل درجه قلیایی سنگ آهک به کوره بلند شارژ می‌شود. هم چنین انتظار می‌رود برای تأمین انرژی تکلیس سنگ آهک در ناحیه احیاء وستیت کوره بلند، مصرف کک افزایش یابد و تغییر جزئی شیب شکل مصرف کک نیز ناشی از همین است.



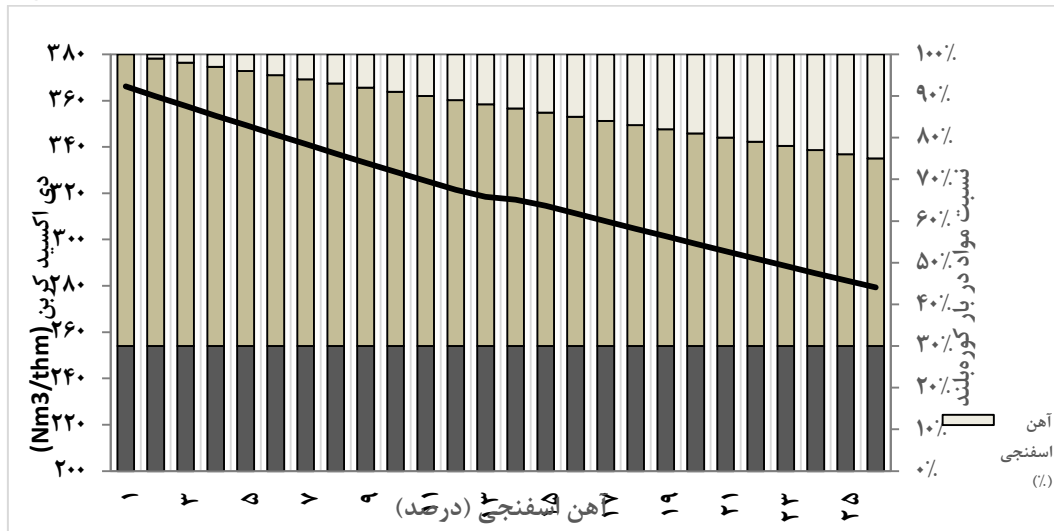
شکل ۴ - تأثیر جایگزینی آگلومره با آهن اسفنجی در بار مواد آهن دار کوره بلند بر درجه قلیایی سرباره کوره بلند

در شکل ۵ تغییرات سود حاصل از تولید یک تن چدن بر اثر جایگزینی آگلومره با آهن اسفنجی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود با افزایش درصد آهن اسفنجی سود کاهش می‌یابد و نرخ کاهش سود در دو نقطه ۸ درصد و ۱۸ درصد آهن اسفنجی افزایش می‌یابد. علت اصلی کاهش سود، اختلاف درخور توجه قیمت آهن اسفنجی در مقایسه با آگلومره است. برخلاف اینکه جایگزینی آگلومره با آهن اسفنجی سبب افزایش بهره‌وری و کاهش مصرف کک می‌شود، تأثیر اختلاف قیمت این دو ماده بر میزان سود بیشتر است. علت تشدید نرخ کاهش سود در ۸ درصد آهن اسفنجی، لزوم شارژ سنگ منگنز درشت دانه به کوره بلند از مقادیر بیش از ۸ درصد آهن اسفنجی برای جبران افت منگنز به کمتر از محدودیت پایینی منگنز چدن مذاب است. لازم به ذکر است آگلومره حاوی ۱/۱۲ درصد اکسید منگنز است که این میزان در آهن اسفنجی صفر است. تغییر شیب تغییرات سود در ۱۸ درصد آهن اسفنجی نیز ناشی از افزایش نرخ مصرف کک است که قبلاً درباره آن بحث شده است.

تغییرات انتشار دی‌اکسید کربن برحسب مقدار جایگزینی آگلومره با آهن اسفنجی در خروجی کوره بلند ۳ در شکل ۶ نشان داده شده است. براین اساس انتشار دی‌اکسید کربن با افزایش درصد آهن اسفنجی کاهش می‌یابد. در مقادیر بیش از ۱۸ درصد آهن اسفنجی، نرخ کاهش تولید دی‌اکسید کربن کاهش نامحسوسی را از خود نشان می‌دهد؛ زیرا 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 کوره بلند است. کاهش مقدار کک به معنی کاهش حجم گاز ورودی از ناحیه احیاء و ستیت به منطقه احیاء هماتیت<sup>۳۳</sup> است. با در نظر گرفتن این نکته که درصد دی‌اکسید کربن این گاز ثابت است، نتیجه می‌شود مقدار دی‌اکسید کربن ورودی از ناحیه احیاء و ستیت به منطقه احیاء هماتیت کاهش می‌یابد. از سوی دیگر با کاهش نسبت (O/Fe) در این ناحیه ذکر شده، از درصد هماتیت موجود در این ناحیه کاسته می‌شود؛ بنابراین حجم دی‌اکسید کربن تولیدی در این ناحیه بر اثر واکنش هماتیت با منواکسید کربن و تولید و ستیت و دی‌اکسید کربن کاهش می‌یابد. تغییر جزئی شیب نرخ کاهش دی‌اکسید کربن در مقادیر بیش از ۱۸ درصد آهن اسفنجی، ناشی از کاسته شدن از نرخ کاهش مصرف کک در این ناحیه است.

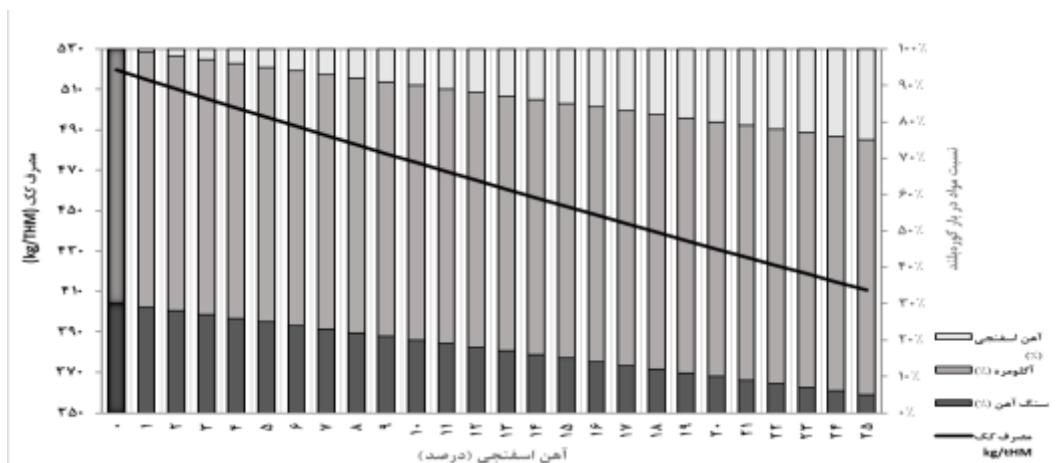


شکل ۵- تأثیر جایگزینی آگلومره با آهن اسفنجی در بار مواد آهن دار کوره بلند بر میزان سود تولید



شکل ۶- تأثیر جایگزینی آگلومره با آهن اسفنجی در بار مواد آهن دار کوره بلند بر میزان انتشار گاز دی اکسید کربن

در شکل ۷ تحلیل حساسیت تأثیر جایگزینی سنگ آهن با آهن اسفنجی در کوره بلند شماره ۳ ذوب آهن روی مصرف کک زیر شارژ اولیه ۷۰ درصد آگلومره و ۳۰ درصد سنگ آهن با برنامه مدل نشان داده شده است. آهن اسفنجی مطالعه شده حاوی ۸۰/۰۶ درصد آهن و ۹/۵۵ درصد FeO بوده است. با افزایش میزان جایگزینی سنگ آهن، مصرف کک کاهش می یابد. همان گونه که در معادلات مصرف کک نشان داده شده است، مصرف کک تابعی از نسبت (O/Fe) در ناحیه احیاء و ستیت است و با کاهش این نسبت مصرف کک نیز کاهش می یابد. در صورتی که بار مواد آهن دار کوره بلند حاوی آهن فلزی نباشد، اکسیدهای آهن در ناحیه احیاء و ستیت به صورت  $FeO_{0.947}$  است؛ بنابراین نسبت (O/Fe) برابر با ۱/۰۶ است. در صورتی که بخشی از مواد آهن دار کوره بلند را آهن فلزی تشکیل دهد، آهن فلزی وارد ناحیه احیاء و ستیت می شود و در نتیجه نسبت (O/Fe) در این ناحیه کاهش می یابد. چون نسبت (O/Fe) در آهن اسفنجی استفاده شده برابر با ۰/۰۵۸ است با افزایش مصرف آن در بار کوره - بلند به جای سنگ آهن، میزان مصرف کک نیز کاهش می یابد.

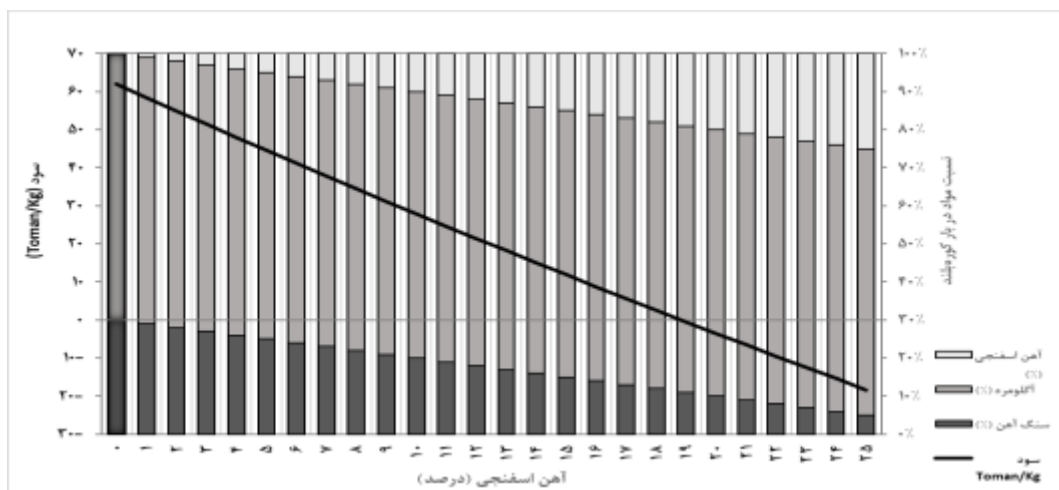
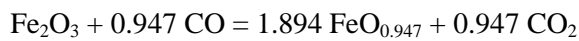


شکل ۷- تأثیر جایگزینی سنگ آهن با آهن اسفنجی در بار مواد آهن دار کوره بلند بر میزان مصرف کک

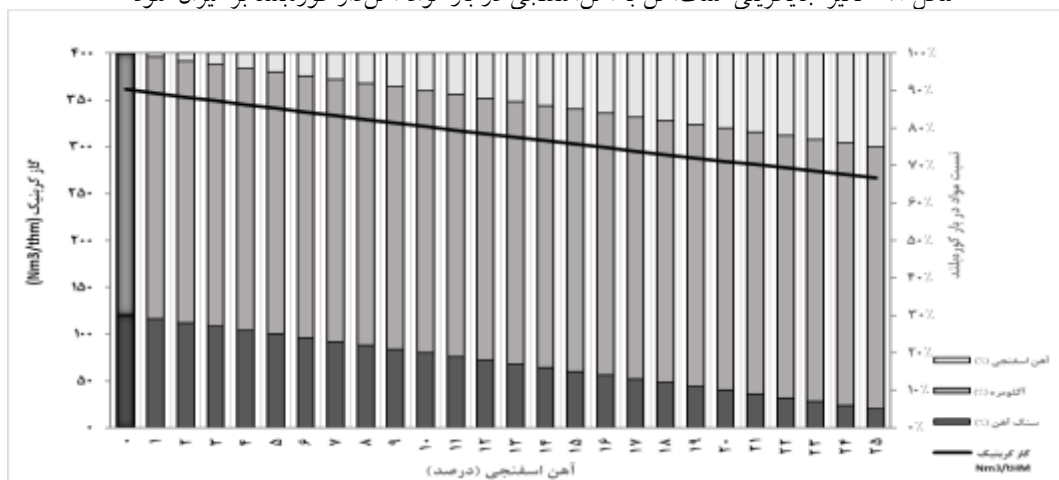
شکل ۸ نشان دهنده نتایج تحلیل تأثیر میزان جایگزینی سنگ آهن با آهن اسفنجی بر میزان سود حاصل از تولید یک کیلوگرم چدن در کوره بلند به کمک مدل است. این شکل نشان می‌دهد، با وجود افزایش بهره‌وری و کاهش میزان مصرف کک در اثر جایگزین کردن سنگ آهن با آهن اسفنجی، سود حاصل از تولید هر کیلوگرم چدن به علت اختلاف شدید قیمت سنگ آهن با آهن اسفنجی کاهش می‌یابد. در شکل ۹ تأثیر میزان جایگزینی سنگ آهن اسفنجی در بار مواد آهن دار کوره بلند روی میزان انتشار دی‌اکسید کربن خروجی کوره بلند به ازاء هر تن چدن تولیدی نشان داده شده است. علت کاهش انتشار گاز دی‌اکسید کربن به دو علت زیر نسبت داده شده است.

الف- کاهش مصرف کک به ازاء تولید یک چدن مذاب که سبب میزان تولید گاز در ناحیه احیاء و وستیت می‌شود؛ باتوجه به اینکه نسبت دی‌اکسید کربن به منواکسید کربن در گاز خروجی کوره بلند از ناحیه احیاء و وستیت برابر با ۰/۷ به ۰/۳ است، با کاهش میزان تولید گاز مقدار دی‌اکسید کربن تولیدی در این ناحیه نیز کاهش می‌یابد.

ب- مقدار هماتیت در بار مواد آهن دار به ازاء هر تن چدن تولیدی در اثر جایگزینی سنگ آهن با آهن اسفنجی کاهش می‌یابد. باتوجه به اینکه واکنش احیاء هماتیت به وستیت در دهانه کوره بلند به کمک منواکسید کربن به صورت ذیل انجام می‌شود، با کاهش مقدار هماتیت مقدار دی‌اکسید کربن تولیدی در دهانه کوره بلند نیز کاهش می‌یابد.



شکل ۸ - تأثیر جایگزینی سنگ آهن با آهن اسفنجی در بار مواد آهن دار کوره بلند بر میزان سود



شکل ۹ - تأثیر جایگزینی سنگ آهن با آهن اسفنجی در بار مواد آهن دار کوره بلند بر میزان انتشار دی‌اکسید کربن

## بررسی اعتبار مدل

باتوجه به ماهیت مدل که شامل ورودی‌های متعددی است و هر ورودی شامل پارامترهای عملی مختلفی است که خروجی‌های خاص خود را تولید می‌کند، مدل باید با ورودی‌های عملی مشخص اعتبارسنجی شود. این کار برای کوره - بلند مدرن شماره ۳ ذوب آهن انجام شد. ابتدا تابع هدف حداکثرکردن سود ( $Z_1$ )، سپس تابع هدف حداقل کردن انتشار گاز گلخانه‌ای دی‌اکسیدکربن ( $Z_2$ ) اجرا و نتایج حاصل از آن آزمایش شد. جواب بهینه ترکیب مواد اولیه آهن‌دار با تابع هدف حداکثرکردن سود شامل ۲۹٪ سنگ آهن، ۵۲٪ آگلومره، ۲۰٪ گندله، سود بیشینه هر کیلوگرم چدن مذاب تولیدی ۱۹۸۰ ریال و میزان انتشار کل دی‌اکسیدکربن ۱۹۷۹ کیلوگرم بر تن چدن تولیدی است. جواب بهینه ترکیب مواد اولیه - آهن‌دار با تابع هدف حداقل کردن میزان انتشار گاز دی‌اکسیدکربن شامل ۲۵٪ آهن اسفنجی، ۲۳٪ سنگ آهن، ۱۶٪ گندله، ۳۶٪ آگلومره است. سود تولید ۴۳۰ ریال برای هر کیلوگرم چدن تولیدی و میزان انتشار کل دی‌اکسیدکربن کوره‌بلند ۱۷۹۲ کیلوگرم بر تن چدن تولیدی است. در دو حالت ذکرشده، باتوجه به شرایط آزمایش در ذوب آهن منابع تأمین انرژی فقط کک و گاز طبیعی هستند. مقایسه پیش‌بینی‌های مدل و نتایج تجربی در جداول زیر، نشان‌دهنده دقت بسیار زیاد مدل است و علت اختلاف کوچک بین سود محاسباتی مدل و مقدار ارائه‌شده به وسیله بخش اقتصادی ذوب آهن وجود تفاوت بین خروجی‌های مدل و مقادیر تجربی برای مصرف کک، اکسیژن، گاز طبیعی، هوای دم و مواد آهن‌دار است. باتوجه به اطلاعات جدول‌های (۳) و (۴) این اختلاف برای کک، اکسیژن و هوای دم بیشتر است.

جدول ۳- تابع هدف حداکثرکردن سود تولید ( $Z_1$ )

نام متغیر	واحد	مقدار بهینه محاسبه‌شده با مدل	مقدار واقعی اندازه‌گیری‌شده	انحراف نتایج مدل با نتایج عملی
آگلومره	کیلوگرم/تن تولید	۸۲۸	۸۱۸	٪+۱/۱
گندله	کیلوگرم/تن تولید	۳۱۴	۳۱۹	٪-۱/۵
سنگ آهن	کیلوگرم/تن تولید	۴۶۰	۴۷۰	٪-۲
آهن اسفنجی	کیلوگرم/تن تولید	۰	۰	۰
آهن قراضه	کیلوگرم/تن تولید	۰	۰	۰
سنگ منگنز	کیلوگرم/تن تولید	۶	۵/۷	٪+۵
سنگ آهک	کیلوگرم/تن تولید	۰	۰	۰
دولومیت	کیلوگرم/تن تولید	۲۳	۲۴	٪-۴
کوارتزیت	کیلوگرم/تن تولید	۰	۰	۰
کک	کیلوگرم/تن تولید	۴۴۰	۴۷۵	٪۰/۸
پودر زغال	کیلوگرم/تن تولید	۰	۰	۰
گاز طبیعی	نرمال مترمکعب/تن تولید	۱۱۰	۱۱۰	۰
مازوت	کیلوگرم/تن تولید	۰	۰	۰
اکسیژن	نرمال مترمکعب/تن تولید	۶۱	۷۰/۵	٪-۱۵/۵
تولید هوای دم	نرمال مترمکعب/تن تولید	۳۴۰۰	۳۴۰۰	۰
مصرف هوای دم	نرمال مترمکعب/تن تولید	۱۱۵۹	۱۱۹۹	٪-۳/۴۵
گاز کوره	نرمال مترمکعب/تن تولید	۱۶۹۴	۱۷۰۵	٪-۰/۷
دمای گاز کوره	درجه سانتی‌گراد	۳۱۷	۳۱۶	۰
کل دی‌اکسیدکربن	کیلوگرم/تن تولید	۱۹۷۹	۲۱۱۸	٪-۸
بار کوره	کیلوگرم/تن تولید	۱۶۰۲	۱۶۰۱	٪۰/۸
سرباره	کیلوگرم/تن تولید	۳۱۰	۳۰۶	٪+۱
بهره‌وری	تن/نرمال مترمکعب/روز	۲/۰۶	۲/۰۳	٪+۱
سود	ریال/کیلوگرم	۱۹۸۰	۱۸۱۲	٪-۰/۸
تولید چدن مذاب	تن تولید/روز	۴۱۲۰	۴۰۶۰	٪+۱

جدول ۴- تابع هدف حداقل کردن میزان انتشار کل دی‌اکسیدکربن ( $Z_2$ )

نام متغیر	واحد	مقدار بهینه محاسبه‌شده با مدل	مقدار واقعی اندازه‌گیری‌شده	انحراف نتایج مدل با نتایج عملی
آکومره	کیلوگرم/ تن تولید	۵۲۴	۵۳۵	۲- %
گندله	کیلوگرم/ تن تولید	۲۳۲	۲۳۸	۳- %
سنگ آهن	کیلوگرم/ تن تولید	۳۴۰	۳۳۷	۱+ %
آهن اسفنجی	کیلوگرم/ تن تولید	۳۶۶	۳۷۳	۲- %
آهن قراضه	کیلوگرم/ تن تولید	۰	۰	۰
سنگ منگنز	کیلوگرم/ تن تولید	۲۰	۱۹	۵+ %
سنگ آهک	کیلوگرم/ تن تولید	۰	۰	۰
دولومیت	کیلوگرم/ تن تولید	۷۴	۷۵	۱- %
کوارتزیت	کیلوگرم/ تن تولید	۰	۰	۰
کک	کیلوگرم/ تن تولید	۳۳۸	۳۵۸	۶- %
پودر زغال	کیلوگرم/ تن تولید	۰	۰	۰
گاز طبیعی	نرمال مترمکعب/ تن تولید	۱۱۰	۱۱۰	۰
مازوت	کیلوگرم/ تن تولید	۰	۰	۰
اکسیژن	نرمال مترمکعب/ تن تولید	۷۴	۷۶	۳- %
تولید هوای دم	نرمال مترمکعب/ تن تولید	۳۴۰۰	۳۴۰۰	۰
مصرف هوای دم	نرمال مترمکعب/ تن تولید	۸۵۷	۸۹۲	۴- %
گاز کوره	نرمال مترمکعب/ تن تولید	۱۲۸۱	۱۲۵۵	۲- %
دمای گاز کوره	درجه سانتی‌گراد	۲۵۳	۳۰۱	۳+ %
کل دی اکسید کربن	کیلوگرم/ تن تولید	۱۷۹۲	۱۸۸۰	۵- %
بار کوره	کیلوگرم/ تن تولید	۱۴۶۲	۱۴۹۱	۲- %
سرباره	کیلوگرم/ تن تولید	۲۷۴	۲۷۷	۱- %
بهره وری	تن / مترمکعب / روز	۲/۷۸	۲/۶	۴+ %
سود	ریال/ کیلو گرم	۱۴۳۰	۱۴۰۱	۲+ %
تولید چدن مذاب	تن تولید / روز	۵۵۶۰	۵۳۳۷	۴- %

در ادامه دلایل تفاوت خروجی‌های مدل و نتایج عملی بررسی می‌شود.

- وجود خطا در سیستم‌های اندازه‌گیری وزن کک و باسکول‌های توزین پاتیل چدن، اندازه‌گیری ترکیب شیمیایی مواد اولیه و آهک، یکی دیگر از عوامل مؤثر بروز خطا در محاسبات مصرف کک با مدل و تفاوت آن با شرایط عملی است.
- خطا در آنالیز گاز طبیعی و وجود هیدروژن در گاز طبیعی در میزان مصرف اکسیژن و به تبع آن هوای دم کوره بلند تأثیر می‌گذارد. با توجه به اینکه آنالیز گاز طبیعی به صورت مرتب اندازه‌گیری نمی‌شود، تغییرات آن باعث خطای محاسباتی می‌شود و خطای اندازه‌گیری در وزن مذاب، دبی هوای دم و اکسیژن سبب اختلاف در نتایج مدل و واقعی می‌شود.
- گازهای احیاءکننده از فضای خالی بین دانه‌های کک و بار آهن‌دار عبور می‌کنند. اگر توزیع کک و بار آهن‌دار یکنواخت نباشد بخشی از این گازها بدون تماس مؤثر با سطح بار آهن‌دار از دهانه کوره خارج می‌شوند.

که باعث بهره‌وری CO کمتر می‌شود و به تبع آن مصرف کک از مقادیر محاسبه شده با مدل کمی بیشتر است. هم‌چنین فشار دهانه پایین کوره موجب کاهش زمان ماند این گازها در کوره می‌شود که فرصت احیاء مواد آهن-دار را پیدا نمی‌کنند و بهره‌وری عملی گاز CO دهانه کمتر از مقدار محاسبه شده و مصرف کک افزایش می‌یابد.

۴. محدودیت احیاءپذیری مواد آهن‌دار و نفوذ گاز از بین لایه‌های احیاء شده در سطوح مواد آهن‌دار از عوامل تأثیرگذار بر سرعت احیاء است؛ 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 نرم‌افزار مدل است و این باعث افزایش مصرف کک می‌شود.

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 با مدل است؛ زیرا هرچه مصرف کک بیشتر شود، مصرف هوای دم افزایش می‌یابد.

۶. محدودیت احیاءپذیری مواد آهن‌دار کوره بلند سبب می‌شود نسبت (O/Fe) در ناحیه احیاء وستیت نسبت به شرایط تئوریک افزایش یابد. این مسئله باعث به هم خوردن توازن اکسیژن در این ناحیه می‌شود.

جدول ۵- قیمت مواد و حامل‌های انرژی در سال ۱۳۹۷ دریافت شده از بخش مالی و اقتصادی ذوب آهن

ردیف	شرح	واحد	قیمت	ردیف	شرح	واحد	قیمت
۱	آکلومره	ریال/ کیلوگرم	۳۲۶۰	۱۰	کک	ریال/ کیلوگرم	۱۰۱۴۰
۲	گندله	ریال/ کیلوگرم	۳۵۱۰	۱۱	پودر زغال	ریال/ کیلوگرم	۵۰۳۰
۳	سنگ آهن	ریال/ کیلوگرم	۲۱۹۰	۱۲	مازوت	ریال/ کیلوگرم	۱۲۶۴۰
۴	آهن اسفنجی	ریال/ کیلوگرم	۸۷۵۰	۱۳	اکسیژن	ریال/ نرمال مترمکعب	۱۳۳۰
۵	آهن قراضه	ریال/ کیلوگرم	۱۱۶۵۰	۱۴	گاز طبیعی	ریال/ نرمال مترمکعب	۱۵۶۰
۶	سنگ منگنز	ریال/ کیلوگرم	۲۸۵۰	۱۵	هوای دم	ریال/ نرمال مترمکعب	۱۴۰
۷	سنگ آهک	ریال/ کیلوگرم	۹۰	۱۶	چدن مذاب	ریال/ کیلوگرم	۱۲۰۰۰
۸	دولومیت	ریال/ کیلوگرم	۱۷۰	۱۷	سرباره	ریال/ کیلوگرم	۸۰
۹	کوارتزیت	ریال/ کیلوگرم	۳۸۰				

## نتیجه‌گیری

امروزه توسعه پایدار صنعت فولاد بدون توجه به فضای رقابتی تولید، استانداردها و مخاطرات زیست‌محیطی ممکن نیست. در این پژوهش برای پشتیبانی تدارک و خرید مواد اولیه کوره بلندهای هر کارخانه فولادسازی، مدلی براساس حداکثرکردن سود عملیاتی تولید یا حداقل کردن انتشار گاز گلخانه‌ای دی‌اکسیدکربن کوره بلند و کارگاه-های تأمین‌کننده مواد اولیه آهن‌دار و کک کوره بلند ارائه و برای داده‌های کوره بلند شماره ۳ ذوب آهن اصفهان در نرم‌افزار متلب اجرا شد. در ادامه خروجی‌های مدل با نتایج عملی اعتبارسنجی شد. مدل معرفی شده علاوه بر محاسبه ترکیب بهینه مواد آهن‌دار برای حصول حداکثر سود تولید یا حداقل کردن انتشار گاز دی‌اکسیدکربن، قادر است برای هر ترکیب و آنالیز شیمیایی دیگری از مواد اولیه آهن‌دار کوره بلند سود تولید کند و مصارف مهمی مانند کک، انرژی، هوای دم، اکسیژن و میزان انتشار دی‌اکسیدکربن را پیش‌بینی کند. به کمک مدل این پژوهش هزینه کک و



انرژی لازم برای کوره بلند و اثر استفاده از قراضه و آهن اسفنجی در کوره بلند باتوجه‌به ممیزات محیط اقتصادی کشور روی سود تولید و میزان انتشار گاز دی‌اکسید کربن پیش‌بینی می‌شود. به‌طور عملی به‌کمک این مدل هر کارخانه فولادسازی با فن‌آوری کوره بلند قادر است نوع و مقدار مواد اولیه لازم برای کوره بلندها را باتوجه‌به محدودیت‌های عرضه در بازار طوری تدارک کند که بیشترین سود تولید و یا کمترین میزان انتشار گاز دی‌اکسید-کربن حاصل شود؛ بنابراین خرید مواد اولیه براساس این مدل نسبت به خرید سنتی منافع اقتصادی و زیست محیطی زیادی دارد. بر مبنای قیمت‌های جدول (۵) برای مواد و انرژی کوره بلند و براساس تحلیل حساسیت خروجی‌های مدل نتیجه می‌شود جایگزین کردن بخشی از کک و انرژی با گاز طبیعی و پودر زغال باعث کاهش انتشار دی‌اکسید-کربن و افزایش سود تولید است. استفاده از آهن اسفنجی با وجود مزایایی که در کاستن مصرف کک، کاهش انتشار گاز گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن و افزایش بهره‌وری کوره بلند دارد در بار مواد اولیه کوره بلند توجه اقتصادی ندارد؛ زیرا استانداردهای سخت‌گیرانه زیست‌محیطی کشور درباره انتشار گازهای گلخانه‌ای مانند کشورهای اروپایی ارتقاء نیافته است و قیمت سنگ آهن با حذف یارانه‌های دولتی به شدت افزایش می‌یابد. گزینه‌های مواد آهن‌دار کوره بلند فقط شامل سنگ آهن، آگلومره و گندله هستند. موضوعات زیر برای پژوهش‌های آتی برای افزایش دقت مدل بهینه-سازی سود تولید پیشنهاد می‌شود.

- ۱- بررسی نحوه توزیع بار مواد اولیه در دهانه کوره بلند روی مصرف مواد اولیه، کک، بهره‌وری و سود تولید.
- ۲- بررسی اثر جدا کردن دی‌اکسید کربن از گاز خروجی کوره بلند، چرخش و استفاده دوباره آن روی انتشار گاز گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن و سود تولید
- ۳- بررسی تأثیر سیستم اتوماسیون سطح ۲ روی مصرف مواد اولیه، کک، بهره‌وری و سود تولید.

## References

- Emre Ertem M., Gurgen Sabit. (2006). "Energy balance analysis for Erdemir blast furnace number one." *Applied Thermal Engineering*, 26(11-12), 1139-1148.
- Geerdes Maarten, Chaigneau Renard, Kurunov Ivan, Lingiard Oscar, Ricketts John. (2015). "Modern Blast Furnace." *The authors and IOS Press*,
- H Huachune, Guan Hongjun, Zhu Xiang, Lee Haiyu. (2017). "Assessment on the energy flow and carbon emissions of integrated steelmaking plants." *Energy Reports*, 3, 29-36.
- Helle Hannu, Helle Mikko, Saxon Henrik. (2011). "Nolinear optimization of steel production using traditional and novel blast furnace operation strategies." *Chemical Engineering Science*, 66(24), 6470-6481.
- 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.
- Liu Xiong, Chen Lingen, Feng Huijun, Qin Xiaoyong, Sun Fengrui. (2016). "Constractal design of a blast furnace iron-making process based on multi objectives optimization." *Energy*, 109, 137-151.
- Liu Xiong, Chen Lingen, Qin Xiaoyong, Sun Fengrui. (2015). "Exergy loss minimization for a blast furnace with comparative analyses for energy flows and exergy flows." *Energy*, 93, 10-19.
- 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*, 43(10), 1664-1673.
- Moya Jose Antonio, Pardo Nicolas. (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.
- Paul W. Griffin, Geoffrey P. Hammond. (2019). “Analysis of the potential for energy demand and carbon emissions reduction in the iron and steel sector” *Energy Procedia*, 158, 3915-3922.
- Peacey J.G. , Davenport W.G. (1979). “The Iron Blast Furnace.” *Pergamon Press*.
- Rying An, Biying Yu, Ru Li, Yi-Ming Wei. (2018). “Potential in energy saving and CO2 reduction in China iron and steel industry” *Applied Energy*, 226, 862-880.
- 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(1), 78-88.
- Wang Chuan, Ryman Christer, Dahl Jan. (2009). “Potential CO2 emission reduction for BF-BOF steelmaking based on optimized use of ferrous burden materials.” *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 3, 29-38.
- 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(12), 1092-1106
- 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.
- Yilmaz Can, Tureka Thomas. (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.
- Zhang Qi , Ziqing Wei, Jialin Ma, Ziyang Qiu, Tao Du. (2019). “Optimization of energy use with CO2 emission reducing in an integrated iron and steel plant.” *Applied Thermal Engineering*, 157, 113-635.
- Zhou Dongdong, Cheng Shusen, Wang Yingsheng, Jiang Xi. (2017). “The production of large blast furnaces during 2016 and future development of ironmaking in China.” *Ironmaking & Steelmaking*, 44(5).
- Zhang R., Lu Jie, Zhang Guangquan. (2011). “A knowledge-based multi-role decision support system for ore blending cost optimization of blast furnaces.” *European Journal of Operational Research*, 215(1), 194-203.

---

<sup>1</sup>- Flux

<sup>2</sup>- Zhang Ruijun, Lu Jie, Zhang Guangquan

<sup>3</sup>- An

<sup>4</sup>- Zhang Qi

<sup>5</sup>- Griffin

<sup>6</sup>- Lee Haiyu

<sup>7</sup>- Kuramochi Takeshi

<sup>8</sup>- Wan Bin, Xu Wenqing, , Zhu Tingyu, Shao Mingpan.

<sup>9</sup>- Liu Xiong, Chen Lingen, Qin Xiaoyong, Sun Fengru

<sup>10</sup>- Yield

<sup>11</sup>- Moya Jose Antonio, Pardo Nicolas.

<sup>12</sup>- Helle Hannu, Helle Mikko, Saxen Henrik

<sup>13</sup>- Wang C., Larsson M., Ryman C.

<sup>14</sup>- Zhang Ruijun, Lu Jie, Zhang Guangquan

<sup>15</sup>- Rasoul M.G.

<sup>16</sup>- Emre Ertem M., Gurgen Sabit.

<sup>17</sup>- Larsson Mikael and Dahl. Jan.

<sup>18</sup>- Lump

<sup>19</sup>- Sinter

<sup>20</sup>- Pellet

<sup>21</sup>- Direct reduction iron(DRI)

<sup>22</sup>- Ton hot metal(thm)

<sup>23</sup>- Chemical Reserve Zone