

ارزیابی جامع جهت کاهش مصرف انرژی و انتشار گاز CO₂ در صنایع آهن و فولاد بر پایه آنالیز

جریان مواد دینامیک

منصور طورانی^۱، پژوهشکده فولاد، دانشگاه صنعتی اصفهان

چکیده:

جهت بررسی پتانسیل ذخیره انرژی و کاهش انتشار گاز در طول دوره زمانی ۲۰۱۵-۲۰۵۰ میلادی در صنعت فولاد، مطالعه‌ای جامع بر پایه مدل آنالیز جریان مواد (MFA) و مدل مصرف انرژی و انتشار گاز CO₂ انجام گرفت. ۴ سناریوی مختلف شامل بیزینس معمولی (BAU)، سناریو تنظیم ساختار (STA)، سناریو بهبود بهره‌وری انرژی (EEI) و سیاست تقویت شده (STP) جهت توصیف استراتژی‌های آینده به منظور ذخیره انرژی و کاهش کربن در ارتباط با توسعه صنعت آهن و فولاد مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج مدل‌سازی‌های انجام شده نشان داد که تقاضای جهانی فولاد ابتدا افزایش و سپس با نزدیک شدن به سال‌های پایانی دوره ۲۰۱۵-۲۰۵۰ کاهش می‌یابد. همچنین منابع قراضه موجود جهت حمایت از ارتقا ساختار تولید تحت هر ۴ سناریو کافی می‌باشد. نتایج به دست آمده همچنین نشان داد که مصرف انرژی و انتشار CO₂ تحت اثرات سینرژسم ارتقا تکنولوژی و تنظیمات ساختاری در طول دوره زمانی مورد مطالعه؛ به تدریج کاهش می‌یابد. کاهش مصرف انرژی و انتشار CO₂ در کوتاه‌مدت به میزان زیادی وابسته به بهبودهای تکنولوژیکی و در بلندمدت به خصوص بعد از سال ۲۰۴۰ میلادی وابسته به ترویج تنظیم ساختار تولید

¹ faranimt@gmail.com

می‌باشد. ۳۵ تکنولوژی ذخیره انرژی در کاهش نرخ انرژی و انتشار گاز CO₂ برای تولید فولاد خام شرکت داشتند، که اثر بخشی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

۱- مقدمه:

در سال‌های اخیر اثرات شدید مصرف انرژی و انتشار گاز CO₂ بر تغییرات اقلیمی و کاهش منابع انرژی، توجهات و نگرانی‌های زیادی را در سراسر جهان به خود معطوف کرده است. تلاش در جهت کاهش انتشار گاز CO₂ در تمامی صنایع به خصوص صنعت آهن و فولاد به منظور مقابله با تغییرات اقلیمی جهانی از وظایف مهم و حیاتی می‌باشد. توجه به میزان مصرف انرژی و انتشار گاز CO₂ و کاهش اثرات نامطلوب آن از عوامل اساسی جهت ایجاد شتاب به سمت توسعه اقتصادی و ارتقا تحولات صنعتی می‌باشد. هوشیاری عمیق در مورد اهمیت و گستردگی تأثیر و آگاهی کامل در خصوص دشواری‌ها و ضرورت وظایف مربوط به تغییرات اقلیمی، پژوهشگران را مجبور به پیش‌بینی انتشار گازهای CO₂ و مصرف انرژی در آینده کرده است.

رونق و پیشرفت صنعت آهن و فولاد هر کشور برای ارتقا اقتصاد ملی بسیار اساسی و بنیادین می‌باشد. با توجه به روند تولید فولاد از سنگ آهن و فرایندهای تکمیلی جهت تولید محصول دلخواه، مصرف انرژی، تولید و انتشار گاز CO₂ در این صنعت بسیار قابل توجه است. به طور مثال در سال ۲۰۱۵ صنعت آهن و فولاد تقریباً ۱۵٪ از کل انرژی مصرف شده^۱ در چین (TEC) را به همراه آزاد سازی ۱۵۳۲/۷ میلیون تن گاز CO₂ به خود اختصاص داد که این مقدار، خود برابر با ۱۵/۴٪ از کل گازهای CO₂ انتشار یافته^۲ (TCE) در این کشور بود [۱-۴]. با توجه به نتایج به دست آمده از تحقیقات اخیر، سه فاکتوری که بر روی کاهش میزان انرژی مصرف شده و کاهش انتشار گاز CO₂ تأثیر گذار هستند عبارتند از: روش تولید فولاد خام، ساختار تولید و نرخ پذیرش و اتخاذ تکنولوژی‌های خاص [۵-۷]

¹ Total energy consumption

² Total CO₂ emissions

مطالعات متعددی بر روی پیش‌بینی تقاضای جهانی فولاد در آینده متمرکز شده‌اند. آلسون^۱ با استفاده از روشی که به اصطلاح « شدت استفاده »^۲ نامیده می‌شود، نیاز فولاد در آینده را برای کشورهای هند و چین پیش‌بینی کرد [۸]. وانگ^۳ و همکارانش با به کارگیری مدل « گهواره- تا گهواره »^۴، جریان فولاد در آینده را تا سال ۲۱۰۰ برای کشور چین پیش‌بینی کردند [۹]. ژوان و یوئی^۵ از مدل IPAT اصلاح شده برای پیش‌بینی میزان فولاد تولید شده چین در آینده، استفاده کردند و تأثیر آن را بر روی محیط زیست، اقتصاد، جمعیت، تکنولوژی، و سیاست ملی مورد بررسی قرار دادند [۴]. اکثر پیش‌بینی‌های انجام شده نشان از آن دارند که مصرف فولاد در دنیا، تا رسیدن به یک پیک به صورت پیوسته رشد خواهد کرد و سپس پس از آن به تدریج کاهش خواهد یافت. به‌عنوان مثال تولید فولاد در چین به‌عنوان بزرگ‌ترین تولید کننده و مصرف کننده فولاد دنیا به تدریج از سال ۲۰۱۴ کاهش یافته است. این مشی احتمالاً در آینده ادامه خواهد یافت. بنابراین بسیار ضروری است که مجموع فعالیت‌های مربوط به صنعت آهن و فولاد در آینده با استفاده از یک مدل جامع پیش‌بینی شود.

تولید فولاد خام با استفاده از قراضه‌های فولادی بازیافت شده نسبت به حالت تولید فولاد از سنگ آهن، مقدار انرژی کمتری مصرف می‌کند و همچنین به‌طور قابل توجهی گاز CO_2 کمتری انتشار می‌دهد؛ زیرا این فرآیند یعنی تولید فولاد خام با استفاده از قراضه‌های فولادی نیازی به عوامل احیاکننده همچون کک و زغال سنگ ندارد [۱۰]. میانگین مقدار انرژی مصرف شده برای تولید فولاد خام از طریق کوره قوس الکتریکی^۶ (EAF) چیزی در حدود 0.3 tce/t^7 (تن معادل زغال سنگ به ازای هر تن) فولاد خام است، این در حالی است که متوسط مقدار انرژی مصرف شده برای

¹ Olsson

² Intensity-of Use

³ Wang

⁴ Cradle-to-cradle model

⁵ Xuan and Yue

⁶ Electric arc furnace

⁷ Tce=tonnes of coal equivalent

تولید فولاد خام از طریق کوره دمشی/کوره پایه اکسیژن^۱ (BF/BOF) برابر با ۰/۵ vtce/t فولاد خام است [۱۱]. یلی شتی^۲ و همکارانش نشان دادند که مجتمع تولید فولاد از طریق BF/BOF ۲/۱ تن گاز CO₂ به ازای هر تن فولاد خام تولیدی انتشار می‌دهد، این در حالیست که تولید فولاد از طریق EAF باعث انتشار ۰/۶ تن گاز CO₂ به ازای هر تن فولاد خام تولیدی می‌شود [۱۲]. با این حال قیمت قراضه‌های فولادی به‌عنوان یکی از عوامل تأثیرگذار در میزان استفاده آن به‌عنوان منبع آهن در تولید فولاد می‌باشد.

جهت پذیرش و اتخاذ تکنولوژی‌های خاص، صنعت فولاد به‌عنوان یک صنعت سرمایه‌بر^۳ و صنعتی با تکنولوژی بالا محسوب می‌شود؛ بنابراین ارتقا و استعمال تکنولوژی‌های مبتنی بر صرفه‌جویی انرژی^۴ (ESTs) به‌عنوان یک قدم مهم برای افزایش بهره‌وری انرژی و کاهش میزان مصرف انرژی، در صنعت فولاد محسوب می‌شود [۵].

منحنی‌های تأمین حفاظت انرژی و انتشار^۵ (CSC) به‌عنوان یکی از روش‌های مؤثر برای تجزیه و تحلیل کمی اندازه‌گیری‌های بهره‌وری انرژی‌های ویژه مطرح است. ماررو^۶ و همکارانش با استفاده از روش CSC، ۲۵ اقدام قابل اجرا در راستای بهره‌وری انرژی برای صنعت آهن و فولاد هند را مورد ارزیابی قرار دادند [۱۳]. همچنین لی و جو^۷ نیز تغییرات CSC که تکیه بر پتانسیل‌های صرفه‌جویی انرژی در تولیدات آهن و فولاد چین دارند، را مورد مقایسه قرار دادند [۱۴]. در پژوهش حاضر به‌منظور تجزیه و تحلیل مزایای به‌کارگیری EST در صنعت تولید فولاد، EST ۳۵ موجود انتخاب شدند [۱۵]. بنابراین، اثر تکنولوژی‌های مربوط به بازیابی حرارت هدررفته بر بهبود بهره‌وری انرژی در نظر گرفته شده و همچنین کاهش میزان مصرف انرژی مورد بررسی قرار گرفته است. اما توجه اندکی به تجزیه و

¹ Blast furnace/basic oxygen furnace

² Yellishetty

³ Capital-intensive

⁴ Energy saving technologies

⁵ Conservation supply curves

⁶ Morrow

⁷ Li and Zhu

تحلیل کاهش پتانسیل انتشار گاز CO_2 از بُعد فنی و اقتصادی شده است؛ علی‌الخصوص این توجه اندک در ارزیابی اثرات تکنولوژی‌های مختلف مبتنی بر صرفه‌جویی انرژی و کاهش انتشار گازهای CO_2 مشهود است. در این مطالعه، مزایای کاهش میزان انتشار گازهای CO_2 و به‌کارگیری ESTs را بر صنعت فولاد نیز در نظر گرفته شده است.

چندین مطالعه به‌منظور تخمین مصرف انرژی آینده و انتشار گازهای CO_2 در صنعت آهن و فولاد انجام شده است [۱۶-۱۸]. آرنزاو همکارانش مصرف انرژی و انتشار گازهای CO_2 در آینده را با تکیه بر مسیرهای پرجزئیات تکنولوژیکی و تغییرات در سطح تولیدات فرض شده در صنعت فولاد آلمان بررسی کردند [۱۹]. ما^۱ و همکارانش روش ارزیابی یکپارچه‌ای را بکار گرفتند که با ترکیب مدل بر پایه استوک^۲، مدل چین-TIMES و مدل تجزیه و تحلیل هم‌مزایا^۴ توسعه یافته بود، تا روند مصرف انرژی و انتشار گازها را در طی سال‌های ۲۰۱۰ الی ۲۰۵۰ شبیه‌سازی کند [۲۰]. نتایج آن‌ها نشان داد با تغییر^۵ ساختار تولید و اجرای تکنولوژی‌های صرفه‌جویی انرژی و کاهش انتشار گازها، بخش تولید فولاد به‌طور قابل توجهی می‌تواند از مزایای صرفه‌جویی انرژی و کاهش انتشارات گازها، باهم، برخوردار شود. به‌منظور تجزیه و تحلیل و اندازه‌گیری اثر فاکتورهای مختلف بر شکل‌دهی روندهای مصرف انرژی در گذشته و در آینده در صنعت آهن و فولاد چین، حسن‌بیگی^۶ و همکارانش از شاخص لگاریتمی دیویزیا میانگین اصلاح شده^۷ (LMDI) استفاده کردند [۵]. نتایج آن‌ها نشان داد که اثرات ساختاری و اثر نرخ آهن اسفنجی نقش مهمی را در کاهش انرژی مورد استفاده نهایی در طی سال‌های ۲۰۱۰ الی ۲۰۳۰ ایفا خواهد کرد. برخی مطالعات نشان داده‌اند که بهبود بهره‌وری انرژی، پذیرش و به‌کارگیری فرآیندهای EST پیشرفته و تنظیم ساختار تولید، نقش بسیار

¹ Arens

² Ma

³ Stock-based model

⁴ Cobenefits

⁵ Switching

⁶ Hasanbeigi

⁷ Refined Logarithmic Mean Divisia Index

مهمی را در مصرف انرژی و کاهش انتشار گاز CO_2 در آینده ایفا خواهد کرد [۵, ۱۵, ۲۰]. ون^۱ و همکارانش پتانسیل حفظ انرژی^۲ و کاهش انتشار گاز CO_2 در طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰، را بر پایه مدل یکپارچه آسیا اقیانوسیه^۳ (AIM) در صنعت فولاد چین ارزیابی کردند [۱۱]. آن‌ها نشان دادند که برای ذخیره انرژی و کاهش انتشارات گازها، ارتقای تکنولوژیکی، محرک مهم تری نسبت به تنظیم ساختاری محسوب می‌شود.

مطالعات فوق‌الذکر مصرف انرژی و انتشار گاز CO_2 را با تأکید بر سهم فولاد تولیدی از طریق EAF، و ارتقای تکنولوژیکی در صنعت آهن و فولاد مورد تحلیل و بررسی قرار دادند. با این حال بیشتر مفروضات در نظر گرفته شده در اینجا به جای آنکه بر پایه فرآیندهای منطقی پرجزئیات باشد، بر پایه اطلاعات تاریخی است و اثر فاکتورهای تحلیل جامع برای پتانسیل صرفه‌جویی انرژی و کاهش انتشار گاز CO_2 کمتر مورد بحث قرار گرفته است. به دلیل کمبود قراضه‌های فولادی و هزینه بالای آن در اکثر کشورهای جهان و سایر کاستی‌ها، برای شرکت‌های تولید فولاد بر پایه کوره الکتریکی، بسیار مشکل است که برای بهره‌وری کامل پتانسیل صرفه‌جویی انرژی و کاهش میزان گاز CO_2 ، نرخ قراضه فولادی را در EAF افزایش دهند. با در نظر گرفتن نیازهای امروز صنعت فولاد جهان که بر پایه کاهش مصرف انرژی و انتشار گازهای CO_2 است، بسیار ضروری است که میزان انرژی مورد استفاده و انتشار گازهای CO_2 با استفاده از نسبت‌های مختلفی از آهن اسفنجی در فرآیند EAF مورد تحلیل و بررسی قرار گیرد. ارزیابی جامعی از رابطه بین تولید فولاد و بازیابی قراضه‌ها از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است [۲۱]. هنوز یک تحلیل و ارزیابی جامع در خصوص رابطه تولید فولاد و در دسترس بودن قراضه‌های فولادی در بلندمدت و کوتاه‌مدت در کشورهای جهان وجود ندارد.

¹ Wen

² Energy conservation

³ Asian-Pacific Integrated Model

هدف این تحقیق بر نمودن شکاف‌های مربوط به تحقیقات قبلی بر اساس یک مدل جامع می‌باشد که این مدل متشکل از پیش‌بینی تقاضای فولاد در بلندمدت و در دسترس بودن منابع قراضه‌های فولادی، مصرف انرژی و انتشار گازهای CO_2 در بازه‌ی بین سال‌های ۲۰۱۵ الی ۲۰۵۰ می‌باشد. لذا در این مقاله LMDI مورد استفاده قرار گرفته، تا فاکتورهای مؤثر بر مصرف انرژی و انتشار گاز CO_2 را تجزیه و تحلیل کند؛ همچنین اثر سیاست‌های مرتبط با انرژی را نیز مورد ارزیابی قرار دهد. در این تحقیق مزایای مصرف انرژی و انتشار گاز و مقرون بصرفه بودن اعمال و به‌کارگیری روش‌های EST، با استفاده از روش‌های بر پایه CSC مورد مطالعه قرار گرفتند. متدولوژی در مقاله شامل اثرات هم‌افزایی تولید فولاد، ترویج و ارتقای تکنولوژی و تنظیم ساختاری به‌منظور بهبود بهره‌وری انرژی و کاهش میزان انتشار گاز CO_2 و همچنین محرک‌های مربوط به این فاکتورها می‌باشد که می‌تواند به میزان بیشتری بر روی کشورها و صنایع انرژی بر^۱ (متمرکز از لحاظ انرژی)، اعمال شود.

به‌منظور یادآوری بیان می‌شود که این مقاله متشکل از بخش‌های زیر است: بخش ۲ به‌طور خلاصه متدولوژی مورد استفاده در این مطالعه را شرح می‌دهد. بخش ۳، جمع‌آوری اطلاعات، مفروضات اولیه و طراحی سناریوها را فراهم می‌کند. نتایج اصلی و بحث بر روی نتایج در بخش ۴ و ۵ ارائه شده است. در نهایت در بخش ۶ این مقاله جمع‌بندی شده است.

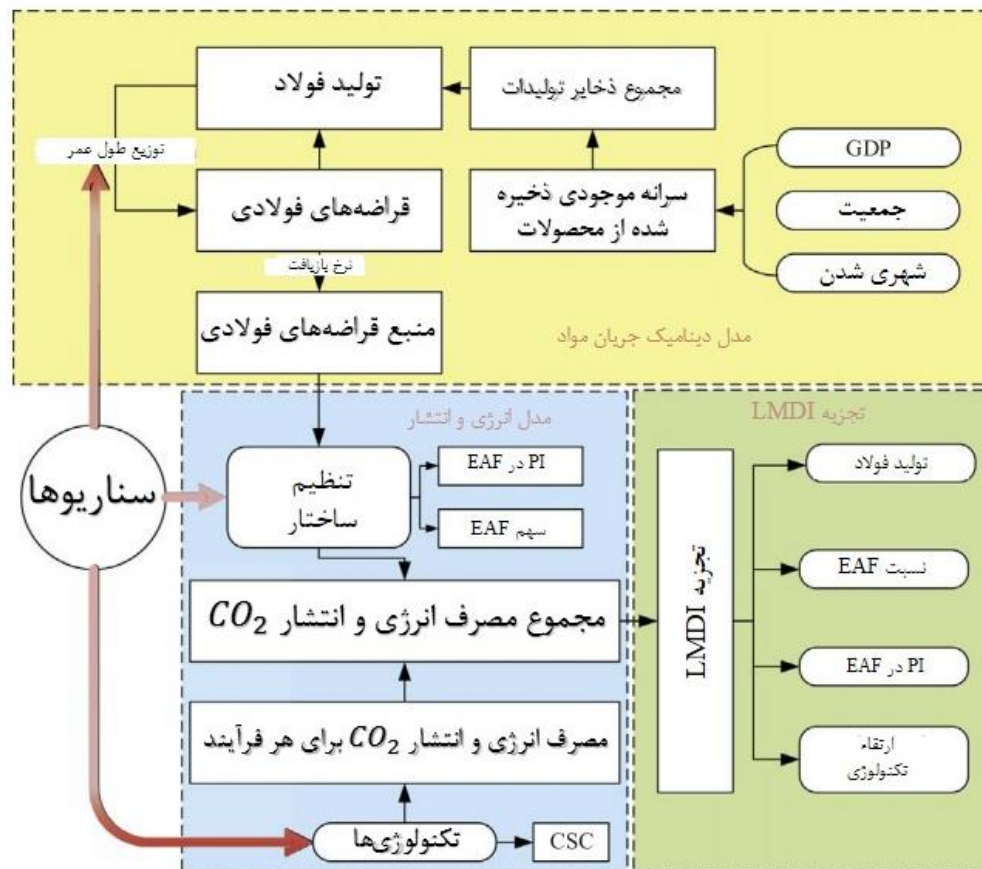
۲- متدولوژی

مدل MFA^2 دینامیک جهت پیش‌بینی تولید و مقدار قراضه فولادی در آینده مورد استفاده قرار گرفته است. توضیحات مختصری در رابطه با این مدل در بخش ۲-۱ ارائه شده است. در ادامه مدل مصرف انرژی و انتشار گاز CO_2 در بخش ۲-۲ معرفی شد تا مصرف انرژی و انتشار گازهای CO_2 تخمین زده شود. در بخش ۲-۳ یک مدل تکنولوژیکی-

¹ Energy-intensive

² Dynamic material flow analysis

اقتصادی جدید ارائه شد تا به صورت کمی، پتانسیل اقتصادی و ترمودینامیکی فرآیند EST را اندازه‌گیری کنند. در نهایت فاکتورهای تأثیرگذار با استفاده از مدل LMDI اندازه‌گیری شدند (۲-۴). این مدل‌های آنالیز، همان‌طور که در شکل ۱ نمایش داده شده اساساً باهم در ارتباطند.



شکل ۱. چهارچوب مدل‌های تحلیل و بررسی جامع.

۲-۱- تحلیل دینامیکی جریان مواد

MFA، به‌عنوان یک آنالیز ارزیابی سیستماتیک برای جریان و ذخایر مواد در یک سیستم زمانی و مکانی مورد استفاده قرار گرفته و یک ابزار مؤثر برای شناسایی و ارزیابی جریان مواد ورودی و خروجی در سیستم می‌باشد.

MFA ایستا به‌عنوان یک مدل تحلیل و بررسی پر استفاده جهت ارزیابی جریان مواد مطابق با مرزهای فضایی و زمانی مورد نیاز، مطرح می‌باشد. MFA دینامیک که تحت عنوان MFA وابسته به زمان نیز شناخته می‌شود؛ یک روش رایج

است که برای اندازه‌گیری جریان مواد حال حاضر و گذشته مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش یک متغیر زمانی معرفی کرده و این حقیقت را در نظر می‌گیرد که محصولات قراضه شده زمانی که به پایان عمر خود برسند از استفاده خارج می‌شوند. در این مدل مخزن شامل جریان حال حاضر و گذشته است تا روش منطقی‌تری را برای تخمین زدن (مقدار) قراضه پیدا کند و تغییرات زمانی را در جریان مواد دنبال نماید.

در این مطالعه MFA دینامیک اعمال شد تا تقاضای فولاد و منابع قراضه‌های فولادی را به‌طور هم‌زمان و دائم تخمین زده و پیش‌بینی کند؛ که این کار از طریق پیش‌بینی کثرت فولاد، طول عمر محصولات، پارامترهای اجتماعی و اقتصادی همچون تولید ناخالص داخلی^۱ (GDP) و جمعیت صورت می‌گیرد. مصرف فولاد در پایین دست^۲ بین پنج صنعت تقسیم می‌شود: ساخت‌وساز، خودرو (وسایل نقلیه)، ماشین‌آلات، لوازم و سایر مواد که در سال ۲۰۱۰ سه مورد اول تقریباً ۷۳,۴٪ از کل مصرف ظاهری فولاد را در جهان شامل می‌شدند.

۲-۲- مدل مصرف انرژی و انتشار گاز CO_2

با افزایش نگرانی‌ها در خصوص تغییرات اقلیمی، مصرف بالای انرژی و انتشار گاز CO_2 به یک مسئله مهم داخلی و بین‌المللی تبدیل شده است که این موضوع به دلیل وابستگی آن‌ها به سوخت‌های فسیلی است. کاهش میزان مصرف انرژی و انتشار گاز CO_2 در صنعت آهن و فولاد به‌عنوان یک هدف بسیار ضروری در سطح جهان مطرح است بنابراین در نظر گرفتن یک مدل مناسب برای ارزیابی این دو فاکتور از اهمیت بالایی برخوردار است. یک مدل انرژی برای ارزیابی مصرف انرژی در صنعت آهن و فولاد بکار گرفته شده است. مصرف انرژی مخصوص^۳ (SEC) معمولاً به‌عنوان مقدار انرژی مصرف شده در واحد خروجی محصول (گیگا ژول به ازای هر تن

¹ Gross domestic product

² Downstream

³ Specific energy consumption

محصول فرآیند^۱ (GJ/t) تعریف می‌شود. این شاخص بهره‌وری انرژی به‌طور قابل توجه و گسترده‌ای در صنایع مختلف برای اندازه‌گیری بهره‌وری انرژی هر فرآیند یا کل سیستم، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این نکته نیز باید اشاره شود که شدت انرژی [۲۲] و شدت مصرف انرژی [۲۳] همان معنای SEC را دارند. به دنبال محاسبات مصرف انرژی، انتشار مخصوص گازهای CO_2 (SCE)^۲ (کیلوگرم کربن دی‌اکسید به ازای هر تن محصول فرآیند، $kg CO_2 / t$) نیز قابل اندازه‌گیری است.

۲-۳- ESTها

ESTهای متعددی برای کاهش میزان مصرف انرژی و انتشار گازهای CO_2 در هر دو فرایند BF/BOF و EAF مورد استفاده قرار گرفته است [۱۹]. این ESTها باید تصاعدی^۳ (رو به رشد و ترقی)، تضمین شده و قابل استفاده بوده و این امکان برای آنها فراهم باشد که به‌طور گسترده در صنعت فولاد هر کشور مورد استفاده قرار گیرند [۱۱]. در این مطالعه اثر ESTها بر روی مصرف انرژی و انتشار گازهای CO_2 در تولید فولاد مورد بحث قرار گرفت. مشخصه‌یابی در بخش ۳-۱ ارائه شده است.

۲-۴- LMDI

در این مقاله به‌منظور بررسی توزیع فاکتورهای مختلف در پتانسیل صرفه‌جویی انرژی و انتشار گاز CO_2 روش LMDI به کار گرفته شد. استفاده و رهنمودهای تجربی روش LMDI - که به‌طور گسترده در بخش‌های صنعتی مورد استفاده است - در تحقیقات قبلی ارائه شده است [۲۴, ۲۵]. در این مقاله به‌منظور بررسی کمی تأثیر فاکتورهای مختلف در اندازه‌گیری پتانسیل صرفه‌جویی انرژی و انتشار گاز CO_2 از تحلیل و بررسی تجزیه LMDI اصلاح شده، استفاده شد. این فاکتورها در شکل‌گیری روند مصرف انرژی در بازه بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۵۰ مؤثر است [۵]. این مطالعه شامل

^۱ GJ/t process product

^۲ Specific CO₂ emissions

^۳ Progressive

کل تولید فولاد خام، ساختار تولید، که بیانگر نسبت آهن اسفنجی در فرآیند EAF و سهم فولاد تولیدی از طریق EAF از کل فولاد تولیدی بوده و مطالعه روش‌های کاهش مصرف انرژی می‌باشد. در این مقاله تجزیه افزایشی^۱ انتخاب شد. تفاوت تغییرات، $\Delta E_{tot} = E^T - E^0$ و $\Delta C_{tot} = C^T - C^0$ تجزیه می‌شود تا مقادیر زیر را بدهد:

$$\Delta E_{tot} = \Delta E_{pdn} + \Delta E_{Esh} + \Delta E_{PIr} + \Delta E_{tec} \quad (1)$$

$$\Delta C_{tot} = \Delta C_{pdn} + \Delta C_{Esh} + \Delta C_{PIr} + \Delta C_{tec}, \quad (2)$$

که در اینجا E_{Δ} و ΔC به ترتیب بیانگر اثرات تخمین زده شده بر روی مصرف انرژی و انتشار گاز CO_2 است؛ pdn و PIR و tec به ترتیب بیانگر محصولات فولادی، سهم تولید فولاد از طریق روش EAF، نسبت آهن اسفنجی در فولادسازی به روش EAF و تکنولوژی‌ها می‌باشد. فرمول دقیق‌تر LMDI را می‌توان در تحقیقات قبلی پیدا کرد [۵]. نتایج تجزیه صنعت فولاد با استفاده از اطلاعات تاریخی در بازه بین سال‌های ۲۰۱۰ الی ۲۰۱۵ بررسی شد و علاوه بر این، بررسی و تحلیل تجزیه و برای دوره‌های پیش‌بینی ۲۰۱۵ - ۲۰۲۰، ۲۰۲۰ - ۲۰۳۰، ۲۰۳۰ - ۲۰۴۰، ۲۰۴۰ - ۲۰۵۰ با استفاده از اطلاعات پیش‌بینی انجام شد.

۳- جمع آوری داده، طراحی سناریو

۳-۱- جمع آوری داده

به منظور تکمیل به کارگیری مدل MFA دینامیک در صنعت تولید فولاد، ۵ بخش پایین دستی مصرف کننده فولاد، در این مطالعه مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. داده‌های تاریخی از پژوهش‌های قبلی جمع آوری شد که شامل دسته بندی محصولات و سرانه موجودی ذخیره شده از محصولات است. اطلاعات دیگر از صنعت ساخت و ساز [۲۶-۲۸] و شرایط صنعت خودرو [۲۹-۳۱] از تحقیقات قبلی قابل برداشت است. در این مطالعه سرانه موجودی محصولات با

¹ additive decomposition

استفاده از شاخص‌های اقتصادی همچون GDP، جمعیت، نرخ شهری شدن قابل اندازه‌گیری است و بر اساس داده‌های منطقی پیش‌بینی می‌شود.

آژانس‌های مرتبط و بخش‌های دولتی از جمله انجمن صنایع آهن و فولاد در کشورهای مختلف و دیوان ملی آمار و ارقام^۱ (NBS) مطالبی را در مورد مصرف انرژی در صنعت آهن و فولاد و فرایندهای زیرمجموعه آن منتشر کردند که دارای یک نقص در مورد اطلاعات دقیق و جامع است که باعث به وجود آمدن چند مشکل در ارزیابی بهره‌وری انرژی در سطح ملی می‌شود. (۱) تقریباً غیرممکن است که اطلاعات جزئی از شرکت‌های کوچک فولاد جمع‌آوری کرد؛ که معمولاً دارای تکنولوژی‌های تولیدی منسوخ^۲ هستند و بهره‌وری انرژی پایینی دارند. (۲) داده‌های فرایندهای جانبی که بسیار پیچیده هستند و در میان شرکت‌های مختلف تفاوت دارند، معمولاً در آمار در نظر گرفته نمی‌شوند. به‌منظور حل این مشکل ما بررسی‌هایی انجام گرفته، فاکتورهای اصلاح معرفی شد. فاکتورهای انتشار کربن سوخت‌ها به‌منظور اندازه‌گیری انتشار گاز CO_2 حاصل از مصرف انرژی، مورد استفاده قرار گرفت [۳۲]. فرض بر این است که فاکتور انتشار برای الکتریسیته در سال ۲۰۱۰ برابر با $0.77 \text{ kg } CO_2 / \text{kWh}$ (کیلوگرم گاز CO_2 به ازای هر کیلووات ساعت) باشد [۳۳]. با علم به این موضوع که بیشتر سوخت‌های فسیلی مورد استفاده در صنعت فولاد دنیا کک و زغال‌سنگ هستند، در این تحقیق از فاکتور انتشار گاز CO_2 میانگین برای مصرف کک و زغال‌سنگ در صنعت آهن و فولاد استفاده شد که فاکتور انتشار گاز CO_2 برای سوخت در این تحقیق تقریباً برابر با $10.4/4 \text{ kg } CO_2 / \text{GJ}$ (کیلوگرم گاز CO_2 به ازای هر گیگا ژول) است. علاوه بر این فرض شد که فاکتورهای انتشار گاز CO_2 حاصل از سوخت و الکتریسیته تا سال ۲۰۵۰ بی‌تغییر باقی خواهند ماند [۳۲، ۳۳].

^۱ National Bureau of Statistics

^۲ قدیمی شده و از رده خارج

شاخص‌های اجتماعی و اقتصادی در جدول ۱ فهرست شدند. پس از محاسبه اولیه پارامترهای توزیع ویبول^۱ و نتایج پیش‌بینی برای موجودی ذخیره‌شده از محصولات اصلی به ترتیب همان‌طور که در جدول ۲ و ۳ ارائه شده است، حاصل شد. برای صنعت خودرو پارامتر α و β از مرجع [۳۴] اتخاذ شده و به ترتیب پارامتر شکل^۲ و پارامتر مقایس^۳ در توزیع ویبول هستند، که در آن هم هاو^۴ و همکارانش سوابق از کار افتادگی ۷۰۲۴ خودرو را جمع‌آوری کردند و مدت عمر هر دسته را اندازه‌گیری نمودند.

جدول ۱. مفروضات اولیه در خصوص شاخص‌های اجتماعی و اقتصادی

شاخص‌ها	2010	2015	2020	2030	2040	2050
نرخ رشد سالانه GDP	10.6%	6.9%	6.5%	5.6%	3.6%	3.4%
نرخ شهرنشینی	49.9%	56.0%	58.9%	64.3%	68.4%	71.7%

جدول ۲. نتایج پیش‌بینی شده در مورد موجودی ذخیره‌شده محصولات اصلی

دسته‌بندی محصولات	2015	2020	2030	2040	2050
شهری	32.19	33.75	37.00	39.49	41.59
روستایی	36.17	37.75	41.03	43.54	45.66
خودروهای سبک شخصی (به ازای هر ۱۰۰۰ نفر)	88.06	163.48	345.65	395.42	399.85
کامیون‌ها	17.08	24.33	47.37	63.55	68.98

^۱ Weibull distribution

^۲ Shap parameter

^۳ Scale parameter

^۴ Hao

(به ازای هر ۱۰۰۰ نفر)

اتوبوس‌ها		11.86	14.54	21.40	30.34	41.07
(به ازای هر ۱۰۰۰ نفر)						
تهویه هوا	شهری	141.2	168	195.2	203.3	205.3
(واحد به ازای هر ۱۰۰ خانوار)	روستایی	33.0	61.9	120.3	141.2	145.2
یخچال فریزرها	شهری	99.5	102	104.9	106.1	106.6
(واحد به ازای هر ۱۰۰ خانوار)	روستایی	71.3	88.0	102.9	106.2	106.9
ماشین شست‌وشو	شهری	97.1	98.1	99.1	99.9	100.3
(واحد به ازای هر ۱۰۰ خانوار)	روستایی	68.5	80.2	93.1	97.8	99.4
آون ماکروویو	شهری	69.4	80.1	92.1	96.7	98.3
(واحد به ازای هر ۱۰۰ خانوار)	روستایی	35.1	59.0	91.1	98.6	99.8

جدول ۳. پارامترهای توزیع

صنعت	طول عمر میانگین (سال)	α	β
	30	5	31.67
ساخت‌وساز	50	5	54.74
	60	5	65.35
خودروهای سبک شخصی	13	4.79	14.46
کامیون‌ها	9	5.58	10.09
اتوبوس‌ها	12	5.33	13.11

ماشین آلات	15.19	5	16.54
وسایل و ابزار	10.89	5	10.89
سایر موارد	13	5	14.16

۳-۲- تعریف سناریوها

طراحی صورت گرفته برای سناریوها، بازه زمانی بین ۲۰۱۵ تا ۲۰۵۰ را شامل می‌شود. سال ۲۰۱۵ به عنوان سال پایه و شروع در نظر گرفته شد. ۴ سناریو تعریف شده در این مقاله شامل بیزینس معمولی (طبق معمول) ^۱(BAU)، سناریو تنظیم ساختار ^۲(STA)، سناریو بهبود بهره‌وری انرژی ^۳(EEI) و سیاست تقویت شده ^۴(STP) بودند که در جدول ۵ فهرست شدند. چهار سناریو فوق‌الذکر در این بخش تعریف می‌شوند.

جدول ۴. اطلاعات EST موجود در صنعت تولید فولاد.

¹ Business-as-usual

² Structure adjustment (STA)

³ Energy-efficiency improvement

⁴ Strengthened policy

No	Energy saving technologies	Typical energy saving (GJ/t)	Lifetime (year)	Current implementation rate (%)	CO ₂ abatements (kg CO ₂ /t)
<i>Coke making</i>					
T1	Coke dry quenching (CDQ)	0.37	20	85%	50.05
T2	Coal moisture control (CMC)	0.06	15	9%	16.32
<i>Sintering</i>					
T3	Heat recovery from sintering and sinter cooler	0.35	10	20%	73.83
T4		0.08	10	80%	1.48
T5	Increasing bed depth	0.18	10	70%	0.29
T6	Reduction of air leakage Low-temperature sintering tech.	0.35	10	60%	5.25
<i>Iron making - blast furnace</i>					
T7	Pulverized coal injection (130 kg/t)	0.70	20	40%	60.41
T8	Top-pressure recovery turbines (TRT)	0.12	15	83%	27.30
T9	Preheating of fuel and air for hot blast stove	0.25	20	5%	26.03
T10		0.01	20	94%	5.84
T11	Recovery of blast furnace gas ^a	0.18	20	1%	19.00
T12	Slag heat recovery ^a	0.39	20	0%	47.16
T13	Pulverized coke oven gas injection ^a Pulverized waste plastic injection ^a	0.10	20	3%	10.72
<i>Steelmaking - basic oxygen furnace (BOF)</i>					
T14	Recovery of BOF gas and sensible heat	0.12	10	40%	48.19
T15	Dry gas cleaning system (wet to dry)	0.14	15	20%	28.86
T16	Flue gas waste heat recovery	0.09	10	15%	19.24
T17	LT-PR of converter gas	0.69	15	20%	3.92
T18	Slag heat recovery ^a	0.06	20	5%	13.85
<i>Steelmaking - electric arc furnace (EAF)</i>					
T19	Scrap preheating	0.02	30	10%	4.69
T20	Optimization of power supply	0.01	30	15%	15.40
T21	Flue gas waste heat recovery	0.06	30	10%	7.71
T22	Foamy Slag Practices ^a	0.01	30	30%	1.52
<i>Casting and refining</i>					
T23	Continuous casting	0.39	20	75%	36.65
T24	Efficient ladle preheating	0.02	20	15%	0.53
<i>Hot rolling</i>					
T25	Integrated casting and rolling (strip casting) ^a	0.28	30	20%	34.93
T26		0.15	10	40%	46.50
T27	Recuperative or regenerative burner	0.28	10	80%	25.61
T28	Process control in hot strip mill	0.04	15	20%	2.95
T29	Waste heat recovery from cooling water Hot delivery and hot charging of casting billet	0.23	10	80%	33.48
<i>Cold rolling</i>					
T30	Heat recovery on the annealing line	0.11	10	55%	30.60
T31	Automated monitoring and targeting systems	0.20	10	55%	24.04
<i>General technologies</i>					
T32	Preventative maintenance	0.45	15	40%	49.19
T33	Energy monitoring and management systems	0.12	10	50%	36.44
T34		0.38	20	90%	77.99
T35	Cogeneration Combined cycle power plant-CCPP	0.51	15	15%	54.61

در سناریوی BAU استمرار روند حاضر در صنعت تولید فولاد اتفاق خواهد افتاد. بنابراین در این سناریو، ساختار تولید که بیانگر نسبت آهن اسفنجی تغذیه شده به فرآیند EAF و سهم فرآیند EAF در فولادسازی است، در همان سطح سال ۲۰۱۵ باقی خواهد ماند و نرخ اعمال فرآیندهای EST برای دوره زمانی بین سالهای ۲۰۱۰ الی ۲۰۳۰ و ۲۰۳۰ الی ۲۰۵۰ به ترتیب به اندازه ۱٪ و ۲٪ افزایش خواهد یافت. در سناریوی STA نسبت آهن اسفنجی مورد استفاده به عنوان مواد اولیه (تغذیه) در EAF و سهم تولید فولاد از طریق EAF مطابق با جدول ۵ تنظیم شده است. تحت این

سناریو نرخ اجرای فرآیندهای EST همانند سناریوی BAU است. در مقایسه با سناریو BAU، سناریو EEI نرخ اجرای بزرگ تری در فرایندهای EST دارد. نرخ اجرای فرآیندهای EST در دوره زمانی ۲۰۱۰ الی ۲۰۳۰ و ۲۰۳۰ الی ۲۰۵۰ به ترتیب به اندازه ۳٪ و ۴٪ افزایش خواهد یافت. در نهایت STP، به عنوان سناریو کارآمدی انرژی، با هدف ارزیابی پتانسیل صرفه جویی انرژی و کاهش انتشارات گاز CO₂، اثر تنظیم تولید و فرآیندهای EST را با ادغام می کند.

جدول ۵. مقادیر محدودیت ساختار محصول تحت چهار سناریو مختلف.

سال	نسبت آهن اسفنجی در فولادسازی به روش EAF				سهم تولید فولاد به روش EAF				نرخ اجرای ESTها			
	BAU	STA	EEI	STP	BAU	STA	EEI	STP	BAU	STA	EEI	STP
2015	62.8%	62.8%	62.8%	62.8%	4.2%	4.2%	4.2%	4.2%	افزایش سالانه ۱	افزایش سالانه ۳		
2020	62.8%	55.3%	62.8%	53.8%	10.0%	15.0%	10.0%	18%	افزایش سالانه ۴ و ۲ درصد به	افزایش سالانه ۴ و ۴ درصد به		
2030	62.8%	40.2%	62.8%	35.9%	10.0%	20.0%	10.0%	25%	افزایش سالانه ۵ درصد به ترتیب	افزایش سالانه ۴ و ۴ درصد به ترتیب		
2040	62.8%	25.1%	62.8%	18.0%	10.0%	25.0%	10.0%	35%	افزایش سالانه ۵ درصد به ترتیب در بازه	افزایش سالانه ۴ و ۴ درصد به ترتیب در بازه		
2050	62.8%	10.0%	62.8%	0	10.0%	30.0%	10.0%	45%	افزایش سالانه ۵ درصد به ترتیب در بازه سالهای	افزایش سالانه ۴ و ۴ درصد به ترتیب در بازه سالهای		
									2015-2030	2015-2030	2015-2030	2015-2030
									2030-2050	2030-2050	2030-2050	2030-2050
									2050	2050	2050	2050

توجه: نسبت آهن اسفنجی در فولادسازی به طریق فرآیند EAF و سهم EAF از فولاد تولید شده در سال ۲۰۱۵ به دست آمده است.

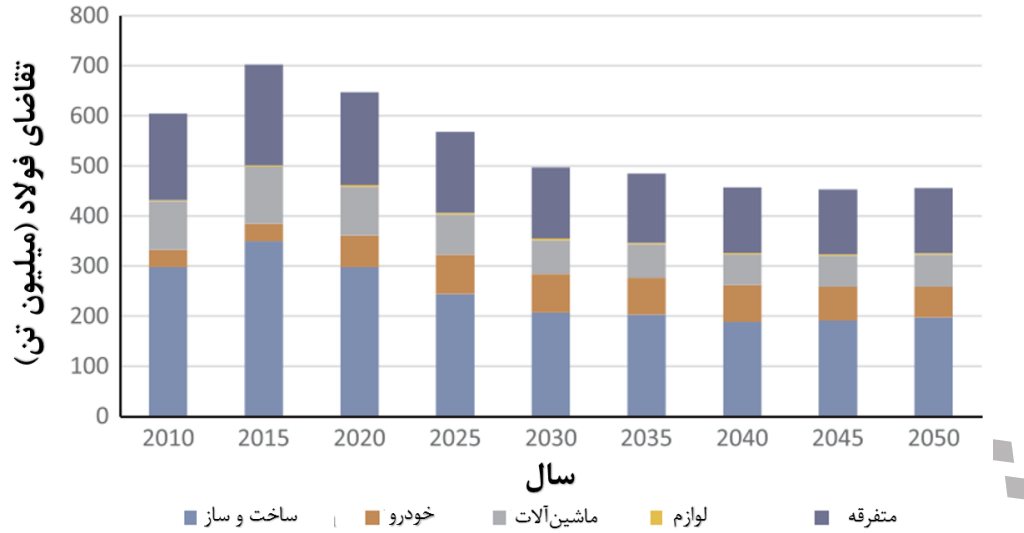
۴- نتایج

۴-۱- روند آینده در تولید فولاد و مقدار قراضه

تعدادی از متغیرها همچون توسعه اقتصادی، جمعیت و طول عمر نقش بسیار مهمی را در مصرف فولاد ایفا می‌کنند. همان‌طور که در شکل ۲ نمایش داده شده است تحت سناریوی BAU، تقاضای فولاد از ۶۰۴/۶۴ میلیون تن در سال ۲۰۱۰ تقریباً به ۷۸۹/۳۵ میلیون تن در سال ۲۰۱۳ افزایش خواهد یافت و سپس به تدریج به مقدار ۴۴۰/۳۸ میلیون تن در سال ۲۰۴۳ کاهش خواهد یافت و در نهایت در محدوده ۴۵۰ میلیون تن پایدار و تثبیت خواهد شد. تقاضای فولاد در بخش ساخت‌وساز که روند مصرف کلی فولاد را تعیین می‌کند، از ۲۹۸/۱۹ میلیون تن در سال ۲۰۱۰ به ۳۹۲/۴۵ میلیون تن در سال ۲۰۱۳ افزایش خواهد یافت و در ادامه به‌طور تدریجی تا ۱۹۷/۲۴ میلیون تن در سال ۲۰۵۰ کاهش خواهد یافت. پیک تقاضای فولاد در بخش خودرو با بقیه تفاوت می‌کند. با توسعه اقتصادی، سهم خودرو از مقدار ۸۰ میلیون تن در سال ۲۰۲۶ و از مقدار ۳۴/۰۳ میلیون تن در سال ۲۰۱۰ کاهش نخواهد یافت؛ پیش‌بینی شده است که سهم خودرو در سال ۲۰۵۰ در محدوده ۶۱/۵۰ میلیون تن باشد. جدول ۶ مقایسه‌ای از مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر حقیقی تقاضای فولاد در شش سال گذشته را بر طبق مدل نشان می‌دهد. نتایج ارائه شده، یک مقدار محدود خطای قابل قبولی را نشان می‌دهند.

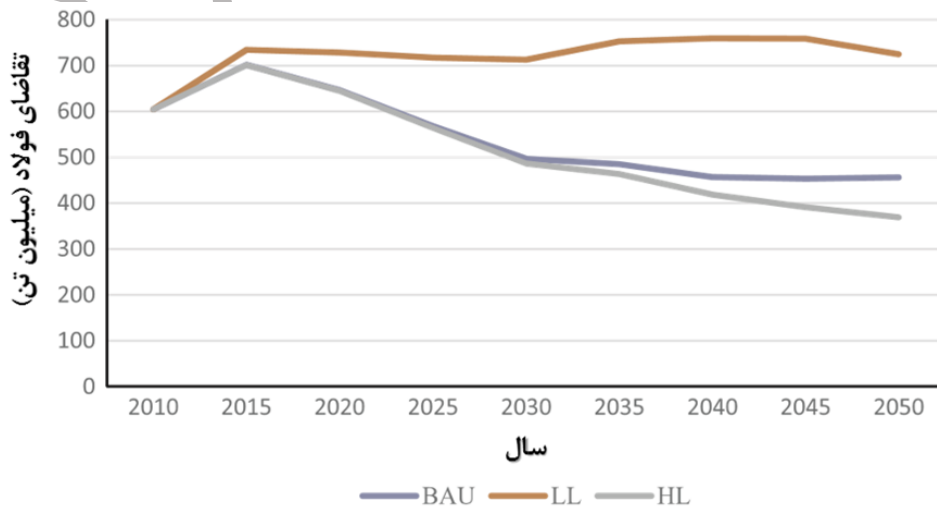
جدول ۶. مقایسه تقاضای فولاد واقعی و مقدار پیش‌بینی شده

سال	2010	2011	2012	2013	2014	2015
مقدار واقعی (Mt)	611	667	770	771	739	700
مقدار پیش‌بینی شده (Mt)	605	657	685	789	738	702



شکل ۲. پیش‌بینی تقاضای فولاد در هر بخش از سال ۲۰۱۰ الی ۲۰۵۰.

به‌عنوان بزرگ‌ترین مصرف‌کننده فولاد، طول عمر در بخش ساخت‌وساز تأثیر بسیار مهمی بر روی تقاضای فولاد دارد. با این حال طول عمر حقیقی قطعات فولادی - که پس از آن خراب و از کار افتاده محسوب می‌شوند - معمولاً بسیار کمتر از عمر طول عمر طراحی آنهاست که معمولاً این مقدار در اکثر کشورها بیش از ۵۰ سال می‌باشد. ناگفته نماند که طول عمر از کار افتادگی کامل و تخریب قطعات فولادی در کشور انگلستان برابر یک‌سوم این میزان در کشور چین است. دو سناریو دیگر به‌منظور مقایسه با BAU طراحی شده‌اند. در سناریو BAU، طول عمر سازه قبل از سال ۱۹۹۰ برابر ۳۰ سال بود پس از سال ۲۰۰۰ مقدار طول عمر به تدریج تا ۵۰ سال افزایش پیدا کرد. در سناریوهایی



با طول عمر بالا^۱ (HL)، طول عمر به ترتیب برابر ۳۰ و ۶۰ سال است و در سناریوهای با طول عمر کم^۲ (LL) طول عمر تا انتها برابر ۳۰ سال باقی می‌ماند.

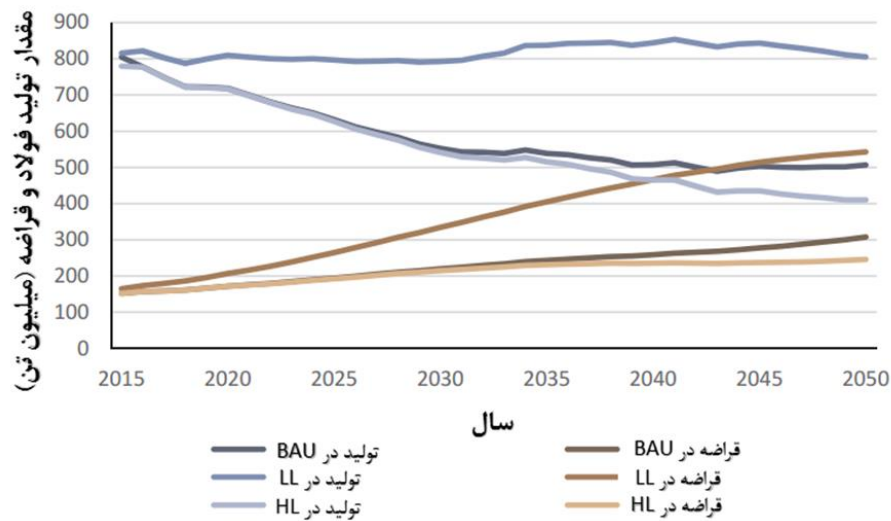
شکل ۳. تقاضای فولاد تحت سناریوهایی با طول عمر مختلف در دوره‌های زمانی مختلف تا سال ۲۰۵۰ میلادی.

همان‌طور که در شکل ۳ نمایش داده شده است، طول عمر در ساخت‌وساز تأثیر کوچکی بر روی زمان پیک تقاضای فولاد دارد. با این حال اثر آن بر روی روند آینده حیاتی است. در مقایسه با سناریوی BAU هنگامی که طول عمر سازه ۳۰ سال باقی بماند (سناریوی LL)، تقاضای فولاد به آرامی کاهش خواهد یافت و تقریباً در سال ۲۰۲۰ در مقدار ۷۳۰ میلیون تن تثبیت می‌شود؛ این زمان ۲۳ سال زودتر از همین مورد در BAU است. تقاضای فولاد به اندازه کافی کاهش نخواهد یافت و در مقادیر بالا باقی خواهد ماند که نتیجه آن هدر رفتن مقادیر زیادی مواد و انرژی می‌باشد. در طرف مقابل به‌طور برعکس، تحت HL مصرف فولاد پس از پیک به سرعت و به‌طور پیوسته کاهش خواهد یافت و هیچ ثبات و پایداری را محدوده زمانی مدل‌سازی نشان نمی‌دهد، تا زمانی که به مقدار ۳۷۰ میلیون تن در سال ۲۰۵۰ می‌رسد. بنابراین طول عمر ساخت‌وساز، نقش حیاتی را در کاهش مصرف بیش از حد بالای فولاد دارد.

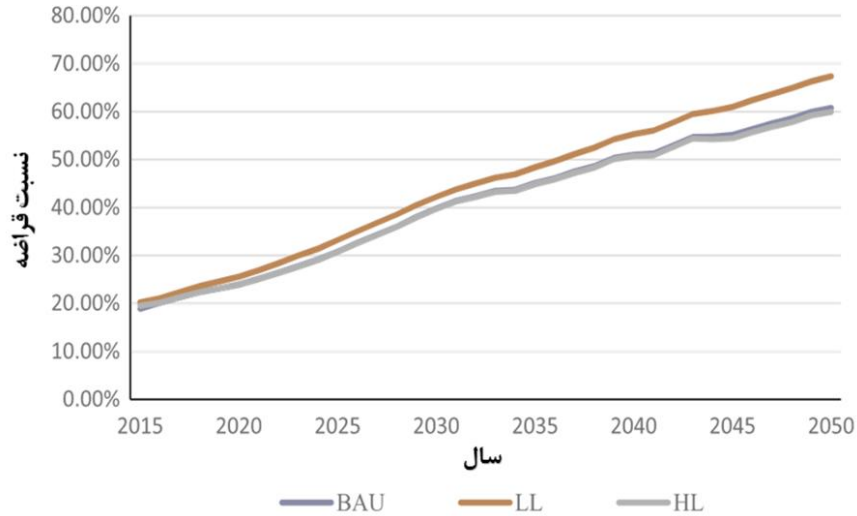
¹ High lifetime scenarios

² Low lifetime scenarios

شکل ۴ مقایسه‌ای از تولید فولاد و قراضه را تحت ۳ سناریو نشان می‌دهد. تحت تمامی سناریوها و در دوره زمانی مدل‌سازی، منابع قراضه در دسترس به‌طور پیوسته افزایش خواهد یافت؛ این افزایش به دلیل رشد شدید کشورها بخصوص چین در دهه اول قرن بیست و یکم است. مقدار قراضه از ۱۷۴/۸۷ میلیون تن در سال ۲۰۱۵ به ۴۲۸/۸۵ میلیون تن در سال ۲۰۵۰ خواهد می‌رسد، که این مقدار اندکی بیشتر از HL است. قراضه در LL با سرعت بیشتر افزایش خواهد یافت. از آنجایی که محصولات فولادی بسیار زودتر مستهلک می‌شوند، این موضوع به‌عنوان یک روند ثابت و پایدار در انتهای دوره مدل‌سازی پدیدار می‌شود. ضمناً، همان‌طور که در شکل ۵ نمایش داده شده است، با رشد منفی تولید، نسبت قراضه به‌طور قابل توجهی افزایش خواهد یافت. تحت سناریو BAU این افزایش از مقدار ۱۸/۹٪ در سال ۲۰۱۵ به مقدار ۶۶٪ در سال ۲۰۵۰ افزایش خواهد یافت، که مشابه همین موضوع در دو سناریو دیگر می‌باشد.



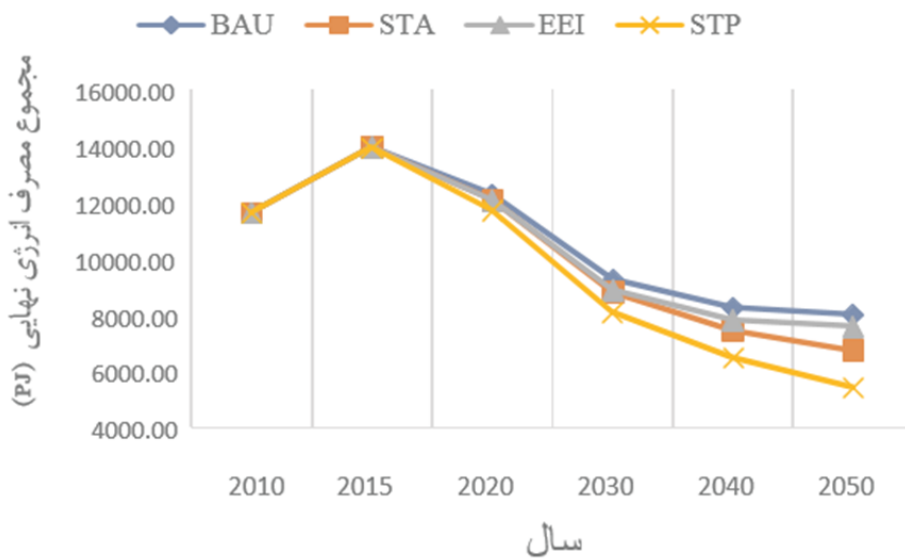
شکل ۴. مقایسه تولید فولاد و قراضه تحت سناریو ۳ تا سال ۲۰۵۰ میلادی.



شکل ۵. پیش‌بینی نسبت قراضه تحت سه سناریو تا سال ۲۰۵۰ میلادی.

۴-۲- مصرف انرژی و انتشار گاز CO_2

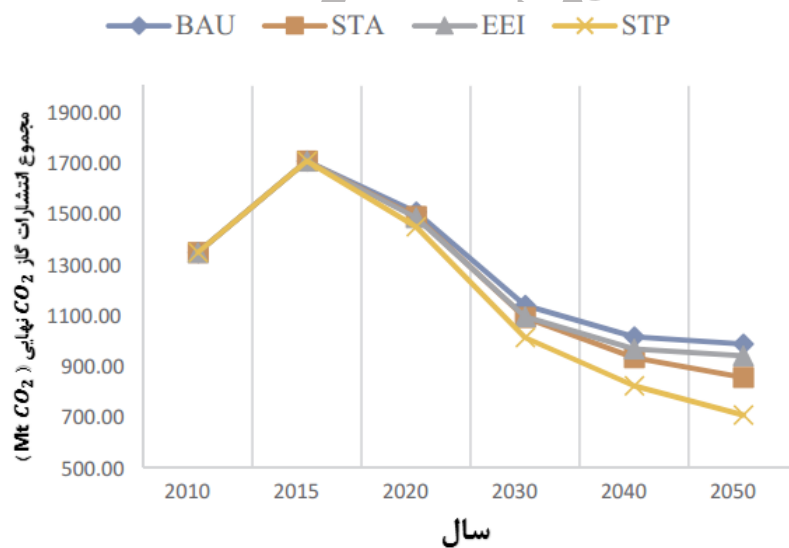
شکل ۶ و شکل ۷ روند کاهشی مجموع مصرف انرژی نهایی و مجموع انتشار گازهای CO_2 نهایی را تحت تمامی ۴ سناریو نشان می‌دهد. بهبود فرمولاسیون ساختار و بهره‌وری انرژی هر دو منجر به تأثیر منفی بر روی مصرف انرژی و انتشار گازهای CO_2 می‌شود.



شکل ۶. مجموع مصرف انرژی نهایی برای صنعت تولید فولاد تحت سناریوهای مختلف در بازه ۲۰۱۰ الی ۲۰۵۰.

شکل ۶ نتایج مصرف کلی انرژی (TEC) را تحت تمامی ۴ سناریو در بازه بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۵۰ نمایش می‌دهد. مقدار کاهش عمدتاً به دلیل کاهش میزان تولید فولاد است. از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۵۰ مصرف انرژی از مقدار ۱۳۹۳۱/۳۸ PJ به ۷۹۹۰/۱۲ PJ، ۶۷۴۴/۱۹ PJ، ۷۵۸۵/۶۴ PJ و ۵۴۲۶/۱۳ PJ به ترتیب برای سناریوهای STA، BAU، EEI و STP کاهش می‌یابد. در مقایسه با سناریوی BAU، سه سناریو دیگر مصرف انرژی کمتری را نمایش می‌دهند. مجموع انرژی نهایی مورد استفاده برای تمامی سناریوها پیکه در بازه ۲۰۱۰ و ۲۰۱۵ دارند.

همان‌طور که در شکل ۷ نمایش داده شده است، انتشارات گاز CO_2 مربوط به صنعت فولاد از ۱۷۰۴/۸۷ میلیون تن به ۹۸۵/۶۳ میلیون تن، ۸۵۳/۵۷ میلیون تن، ۹۳۸/۹۹ میلیون تن و ۷۰۶/۸۷ میلیون تن به ترتیب برای سناریوهای BAU،



STA، EEI و STP در بازه بین سال‌های ۲۰۱۵ الی ۲۰۵۰ کاهش می‌یابد.

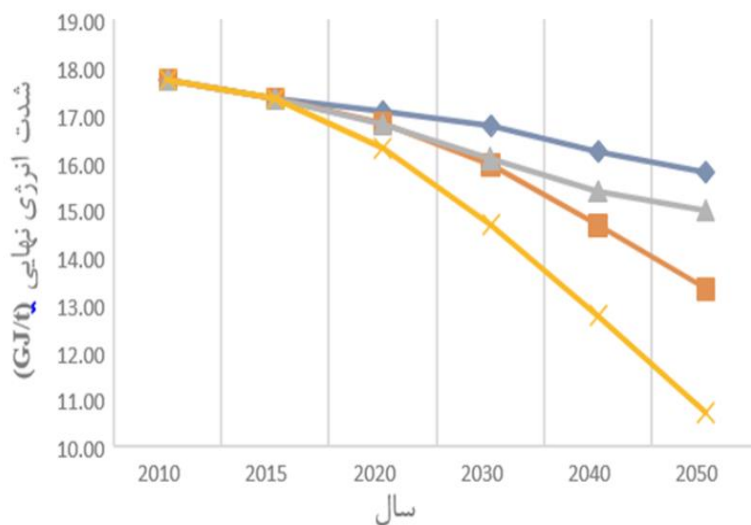
شکل ۷. مجموع انتشارات گاز CO_2 نهایی برای صنعت تولید فولاد تحت سناریوهای مختلف در بازه ۲۰۱۰ الی ۲۰۵۰.

تحت سناریوهای STA و EEI، به ترتیب ساختار تولید فولاد و نرخ محبوبیت فرآیندهای EST تقویت می‌شود و مصرف کل انرژی و مقدار نهایی انتشار گاز CO_2 به صورت تدریجی کاهش می‌یابد. تحت سناریو STP، روند کاهشی

به طور هم‌زمان با کاهش تولید فولاد خام، تنظیم ساختار و نرخ محبوبیت فرآیندهای EST تقویت شد. در کل، افزایش سهم فرآیند EAF از کل فولاد تولیدی و به کارگیری و اجرای بیشتر فرآیندهای EST، نقش بسزایی در کاهش قابل توجه در کل انرژی مصرفی و کاهش انتشار گاز CO_2 دارد [۵، ۳۵]. همچنین روند کاهشی فولاد خام پس از ۲۰۱۵ مطابق با پیش‌بینی‌های محققین سایر صنایع است [۲۰، ۳۶].

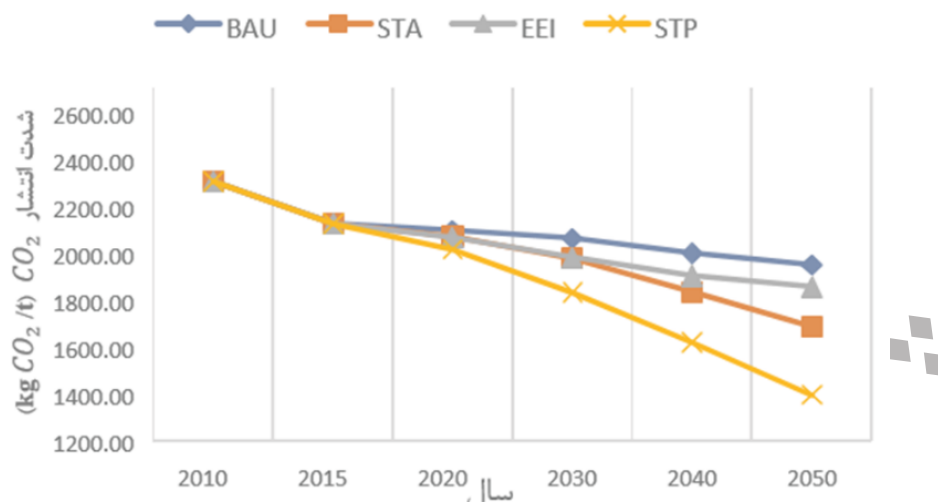
۴-۲-۱- شدت انرژی و شدت CO_2

شکل ۸ و شکل ۹ کاهش پتانسیل شدت انرژی و شدت گاز CO_2 در صنعت فولاد را تحت سناریو BAU و ۳ سناریو دیگر نشان می‌دهد. روند کاهشی در شدت انرژی و شدت گاز CO_2 برای تمامی سناریوها لیست شده‌اند که این روند کاهشی متأثر از تولید فولاد خام، نسبت آهن اسفنجی در EAF، سهم فولاد تولیدی به روش EAF نسبت به کل فولاد تولیدی و نرخ محبوب شدن فرآیندهای EST است. سناریو BAU گرایش کاهشی را بدون الزامات سناریوها در



شدت انرژی و شدت گاز CO_2 نشان می‌دهد.

شکل ۸. شدت انرژی نهایی مربوط به صنعت تولید فولاد در بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۰ الی ۲۰۵۰.



شکل ۹. شدت انتشار نهایی گازهای CO₂ مربوط به صنعت تولید فولاد در بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۰ الی ۲۰۵۰.

تحت سناریو BAU شدت انرژی از $17/72 \text{ GJ/t}^1$ در سال ۲۰۱۰ به $15/77 \text{ GJ/t}$ در سال ۲۰۵۰ کاهش می‌یابد. سه سناریوی دیگر مقادیر شدت انرژی کمتری را تخمین زده‌اند. سهم بیشتری از تولید فولاد به روش EAF از کل فولاد تولیدی و نسبت آهن اسفنجی کمتر در تولید فولاد به روش EAF در سناریو STA منجر به کاهش شدت انرژی در سراسر طول دوره‌های زمانی مدل‌سازی می‌شود. در سناریوهای EEI و STP میزان بهره‌وری انرژی از طریق بهبود در نرخ محبوب‌سازی فرایند EST تأمین می‌شود.

شدت گاز CO₂ در سال ۲۰۱۵ از $2120/95 \text{ kg CO}_2/\text{t}^2$ به مقدار $1945/23 \text{ kg CO}_2/\text{t}$ ، $1684/61 \text{ kg CO}_2/\text{t}$ ، $1853/18 \text{ CO}_2$ و $1395/07 \text{ kg CO}_2/\text{t}$ به ترتیب تحت سناریوهای BAU، STA، EEI و STP کاهش می‌یابد. در مقایسه با سناریو BAU، سه سناریوی دیگر کاهش قابل توجهی را در شدت انرژی و شدت CO₂ نشان می‌دهد که

^۱ گیگا ژول به ازای هر تن
^۲ کیلوگرم گاز کربن دی‌اکسید به ازای هر تن

در میان آن‌ها سناریو STP کمترین مقدار را نشان می‌دهد. اشاره به این نکته ضروری است که روند شدت انرژی و شدت گاز CO_2 بین سال‌های ۲۰۱۵ الی ۲۰۵۰ در مطابقت با تحقیقات قبلی است [۲۰، ۳۷].

۴-۲-۲- پتانسیل کاهش مصرف انرژی و انتشارات گاز CO_2

پتانسیل صرفه‌جویی انرژی و کاهش میزان انتشار گاز CO_2 در صنعت فولاد و تحت سناریوهای STA، EEI و STP مورد مقایسه با سناریوی BAU قرار گرفت و در جدول ۷ ارائه شد. این پتانسیل به صورت گام به گام با کاهش نسبت آهن اسفنجی در فرآیند EAF افزایش می‌یابد، که باعث افزایش سهم تولید فولاد تولیدی از طریق فرایند EAF و افزایش محبوبیت فرآیندهای EST می‌شود. تحت سناریو STA، پتانسیل صرفه‌جویی انرژی نسبت به سال ۲۰۱۵ تقریباً برابر با ۱/۵٪، ۴/۹٪، ۹/۶٪ و ۱۵/۶٪ از مصرف انرژی پیش‌بینی شده به ترتیب در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰، ۲۰۴۰ و ۲۰۵۰ است. تحت سناریوی EEI پتانسیل انرژی به اندازه ۱/۶٪، ۳/۴٪، ۵/۴٪ و ۵/۳٪ از مصرف سالانه انرژی به ترتیب در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰، ۲۰۴۰ و ۲۰۵۰ کاهش می‌یابد. همچنین تحت سناریو STP، به دلیل ترکیبی از تنظیم ساختاری و بهبود تکنولوژی صورت گرفته، پتانسیل کاهش شدت انرژی، بیشینه مقدار خواهد بود. در این سناریو صرفه‌جویی انرژی در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰، ۲۰۴۰ و ۲۰۵۰ به ترتیب برابر با ۴/۷٪، ۱۴/۲٪، ۲۷/۱٪ خواهد بود. در سناریو STP، پتانسیل‌های کاهش در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰، ۲۰۴۰ و ۲۰۵۰ به ترتیب برابر است با ۱۸/۱، ۴۶/۶، ۸۲/۸ و ۱۳۲/۱ میلیون تن گاز CO_2 است. پتانسیل کاهش CO_2 برای سناریو EEI برابر با ۲۲/۳، ۴۴/۱، ۴۸/۵ و ۴۶/۶ میلیون تن گاز CO_2 و برای سناریو STP برابر با ۵۷/۹، ۱۲۶/۳، ۱۹۲/۱ و ۲۷۸/۸ میلیون تن گاز CO_2 می‌باشد، جایی که پتانسیل کاهش انتشار گازهای CO_2 در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ به ترتیب برابر با ۴/۰٪، ۱۲/۵٪، ۲۳/۴٪ از TCE است. حتی پتانسیل کاهش انتشار گازهای CO_2 به مقدار ۳۹/۴٪ از مقدار گازهای CO_2 انتشار یافته در سال ۲۰۵۰ می‌رسد.

^۱ MtCO₂

جدول ۷. پتانسیل صرفه‌جویی انرژی و کاهش انتشار گازهای CO₂ در صنعت فولاد در مقایسه با سناریو BAU.

نوع پتانسیل	STA				EEI				STP			
	2020	2030	2040	2050	2020	2030	2040	2050	2020	2030	2040	2050
صرفه‌جویی انرژی (PJ در سال)	183.3	452.8	788.4	1245.9	192.2	382.5	419.3	404.5	550.7	1151.5	1757.3	2564.0
کاهش انتشار گاز CO ₂ (Mt در سال)	18.1	46.6	82.8	132.1	22.3	44.1	48.5	46.6	57.9	126.3	192.1	278.8

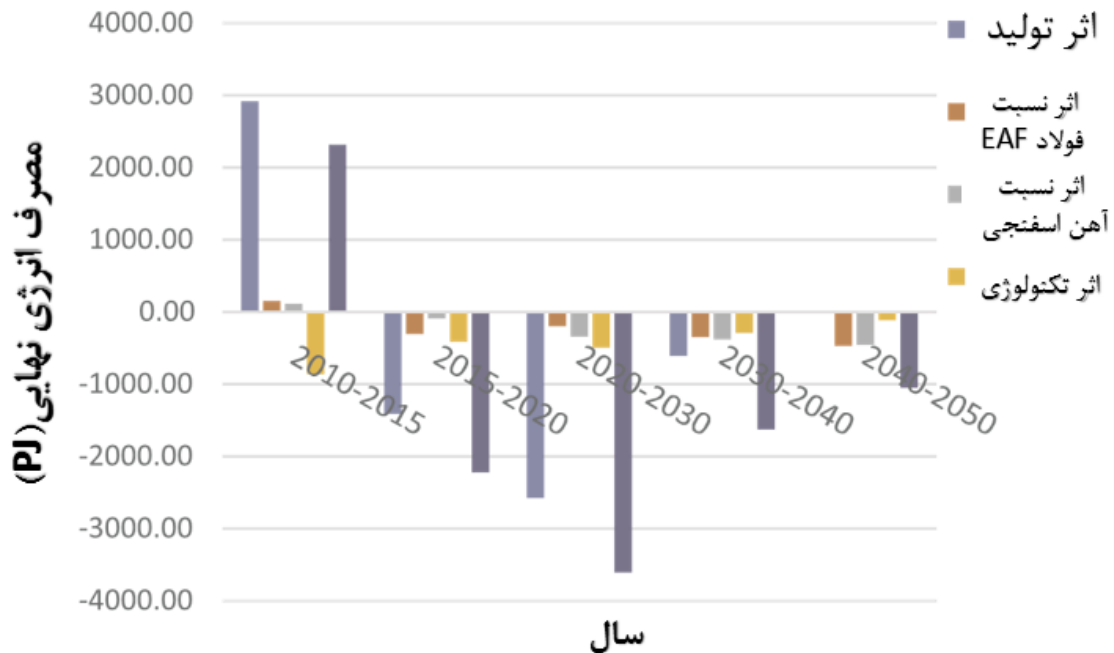
۴-۲-۳- تجزیه فاکتورها

به منظور تحلیل و بررسی میزان مشارکت و سهم فاکتورهای مختلف در پتانسیل صرفه‌جویی انرژی و کاهش انتشار گاز CO₂ روش LMDI برای سناریو STP به کار گرفته شد، تا اثرات این فاکتورها را بر پتانسیل صرفه‌جویی انرژی و کاهش انتشار گاز CO₂ در این مقاله اندازه‌گیری کند؛ این فاکتور شامل تولید فولاد، سهم فولاد تولیدی از روش EAF از کل فولاد تولیدی، نسبت آهن اسفنجی در EAF و ESTها است.

نتایج در جدول ۷ نشان می‌دهد که پتانسیل صرفه‌جویی انرژی به تدریج با تنظیم ساختار تولید و ترویج فرآیندهای EST به تدریج افزایش می‌یابد. با در نظر گرفتن این سناریوها به نمایندگی از آنها ما تنها سناریو STP را به تفصیل مورد بررسی قرار دادیم.

شکل ۱۰ نتایج تجزیه مصرف انرژی نهایی را در صنعت فولاد نشان می‌دهد. این شکل نتایج مربوط به پتانسیل انرژی نهایی را با استفاده از به کارگیری تجزیه LMDI را برای پنج دوره ۲۰۱۰ - ۲۰۱۵، ۲۰۱۵ - ۲۰۲۰، ۲۰۲۰ - ۲۰۳۰، ۲۰۳۰ - ۲۰۴۰ و ۲۰۴۰ - ۲۰۵۰ فهرست کرده است. نیروی محرکه جهت تغییرات در انرژی نهایی مورد استفاده در طی

بازه‌های زمانی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. در بازه سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۵ اثرات تولید، مثبت باقی مانده و انرژی نهایی مورد استفاده افزایش یافته است.



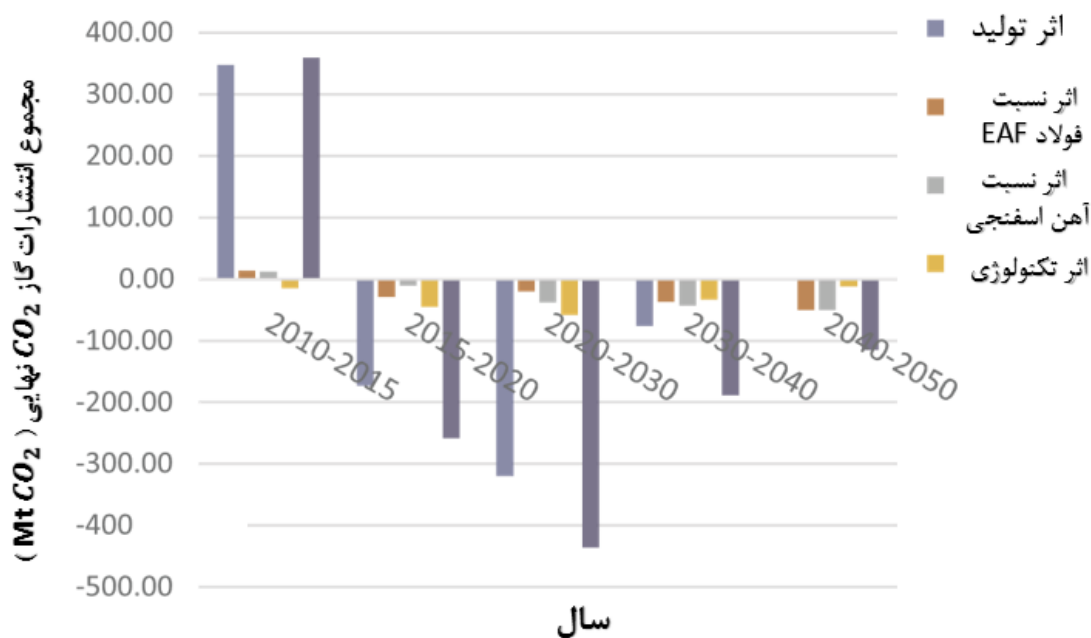
شکل ۱۰. نتایج تجزیه و تحلیل انرژی نهایی مورد استفاده در صنعت فولاد تحت سناریو STP.

در طی این دوره زمانی به دلیل افزایش در تولید فولاد خام، مصرف انرژی نهایی به اندازه ۲۹۲۰/۳۰ پتاژول^۱ افزایش می‌یابد. با این حال، به دلیل کاهش در انرژی مصرفی نهایی در طی سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۵۰، اثرات تولید منفی می‌شود؛ زیرا پیش‌بینی ما از تولید فولاد، یک کاهش را در طی این دوره نشان می‌دهد. تأثیر تولید فولاد خام در طی سال‌های ۲۰۴۰ تا ۲۰۵۰، به دلیل تغییرات بسیار جزئی، بسیار کوچک است. تنظیمات ساختاری، انرژی مصرفی نهایی را در طی سال‌های ۲۰۱۵-۲۰۲۰، ۲۰۲۰-۲۰۳۰، ۲۰۳۰-۲۰۴۰ و ۲۰۴۰-۲۰۵۰ به ترتیب به ۳۹۸/۷۴، ۵۳۶/۴۹، ۷۳۱/۱۰ و ۹۲۲/۲۳ پتاژول کاهش می‌دهد. علاوه بر این ترویج و ارتقای تکنولوژی، انرژی نهایی مورد استفاده را به ترتیب به اندازه ۴۱۲/۹۳، ۴۹۴/۶۱، ۲۹۰/۱۵ و ۱۱۱/۳۸ در طی همان دوره‌های زمانی کاهش می‌دهد. اثرات ساختاری، یک افزایش

^۱ PJ

تدریجی را در طی سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۵۰ به دلیل افزایش سهم تولید فولاد حاصل از فرایند EAF نسبت به کل فولاد تولیدی و افزایش نسبت آهن اسفنجی در تولید فولاد با استفاده از فرآیند EAF، نشان می‌دهد. قبل از سال ۲۰۲۰، محبوبیت فرآیندهای EST یک فاکتور منع‌کننده بزرگ‌تر بنام مصرف انرژی دارد. اگرچه ساختار، اثرات بسیار مهم بر روی صرفه‌جویی انرژی دارد، اما اثر آن در طی این دوره زمانی قابل توجه نیست. نتیجه‌گیری می‌شود که پس از سال ۲۰۲۰ ساختار صنعت فولاد دنیا باید الزاماً به هدف مصرف انرژی در بلندمدت دست یابد.

همان‌طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، مشابه با پتانسیل صرفه‌جویی انرژی، تولید فولاد خام، ESTها و تأثیرات ساختاری نیز نقش بسیار مهمی در کنترل نمودن انتشارات گاز CO_2 در بازه سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۵۰ دارند.



شکل ۱۱. نتایج تجزیه و تحلیل انتشار کلی CO_2 در صنعت فولاد تحت سناریو STP.

قبل از سال ۲۰۳۰، اثرات تکنولوژیکی در صنعت فولاد به مقدار بیشتری نسبت به اثرات ساختاری از انتشار گازهای CO_2 ممانعت به عمل خواهند آورد؛ کاهش TCE - به دلیل تغییرات سازه‌ای - به اندازه ۲۷۷/۵۸ میلیون تن در بازه بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۵۰ بود. پتانسیل اثرات تکنولوژیکی بر روی صنعت فولاد همچنین یک روند منفی را در طی

بازه زمانی این مطالعه به ما نشان می‌دهد. اثرات تکنولوژیکی از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۵۰، انتشارات گازهای CO_2 را به صورت تجمعی به مقدار ۱۴۹/۵۲ میلیون تن کاهش داد. در طی سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۳۰، کاهش میزان انتشار گازهای CO_2 در صنعت فولاد به شدت به توسعه و بهبود تکنولوژی وابسته است. با این حال در بلندمدت، تنظیم ساختار صنعت می‌تواند تا سال ۲۰۳۰، انتشار گازهای CO_2 را به مقدار بیشتری کاهش دهد.

۵- بحث و پیشنهادها

این مطالعه یک مدل پیش‌بینی دقیق و جامع را با استفاده از آنالیز جریان مواد (MFA) فراهم می‌کند که این مدل شامل پیش‌بینی مصرف انرژی و انتشار گاز CO_2 در صنعت فولاد است. در این بخش شرایط استفاده از قراضه‌های فولادی و فاکتورهای مصرف انرژی و انتشارات گاز CO_2 و تکنولوژی‌ها از دیدگاه ترمودینامیکی و اقتصادی و بر پایه آنالیز شدت و حساسیت بحث شده است. در ادامه، پیشنهادها و محدودیت‌های تحقیق ارائه شده است.

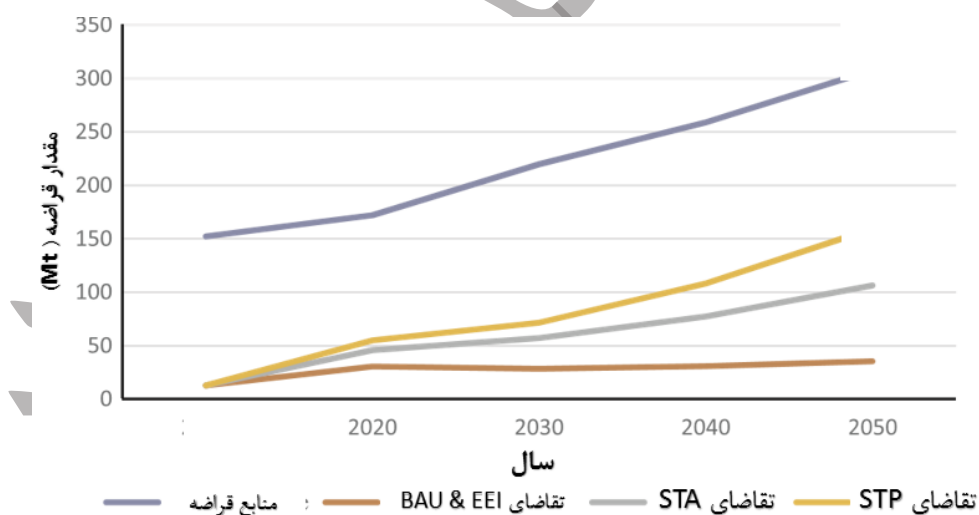
۵-۱- منابع قراضه و تنظیم ساختار

تولید فولاد به‌طور مستقیم مقدار مصرف انرژی و انتشارات کربن را تعیین می‌کند؛ بنابراین منجر به اندازه‌گیری پتانسیل کاهش این فاکتورها می‌گردد. ممکن است که تحقیقات قبلی در مورد تقاضای فولاد و مصرف آن در دنیا بیش- برآورد^۱ (اغراق) کردند؛ که این موضوع منجر به اغراق و برآورد بیش از حد واقعی منابع مصرفی و انتشار گاز CO_2 می‌شود. این مطالعات معمولاً پیش‌بینی می‌کنند که پیک تقاضای فولاد در بین سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۳۰ پدیدار خواهد شد [۴، ۳۷-۴۰]، که این زمان قبل از آن است که تقاضای فولاد، رشد سریع و پایداری را نشان دهد. با این حال مطالعه در زمینه صنعت فولاد چین به این نتیجه رسیده است که تقاضای فولاد به همان اندازه افزایش نخواهد یافت و پیک آن اوایل سال ۲۰۱۳ پدیدار می‌شود. حدس زده می‌شود که دلیل اصلی این موضوع این باشد که رشد اقتصادی سریع

^۱ Overestimate

قبلی در چین آهسته تر شده باشد، که منجر به مصرف کمتر فولاد در جامعه می شود. علاوه بر این توسعه اقتصادی بر روی سیاست های دولت در خصوص تخریب و بازسازی ساخت و ساز و یا به روز کردن سایر محصولات، تأثیر خواهد گذاشت. رشد GDP کندتر می تواند منجر به طولانی شدن و به تعویق افتادن طول عمر محصولات فولادی شود. از سوی دیگر تحت تأثیر سیاست ها و بازار فولاد، تولید واقعی ممکن است در یک دوره زمانی خاص افزایش یابد؛ ولی یک روند معمولی از کاهش در تولید فولاد اجتناب ناپذیر است.

در شکل ۱۲، مقایسه ای بین ضرورت قراضه های فولادی و منابع قراضه در آینده نشان داده شده است. منابع قراضه برای تأمین ارتقا و ترویج ساختار تولید تحت چهار سناریوی فوق الذکر کافی می باشد. بد نیست که این نکته نیز اشاره شود که - همان طور که در شکل ۵ نشان داده شده است - طول عمر تنها تأثیر آرام و ملایمی بر روی نسبت قراضه دارد؛ بنابراین هر تغییر و دگرگونی در سیاست ساخت و ساز، از پیشرفت و تکامل تنظیم ساختاری فولاد جلوگیری نخواهد



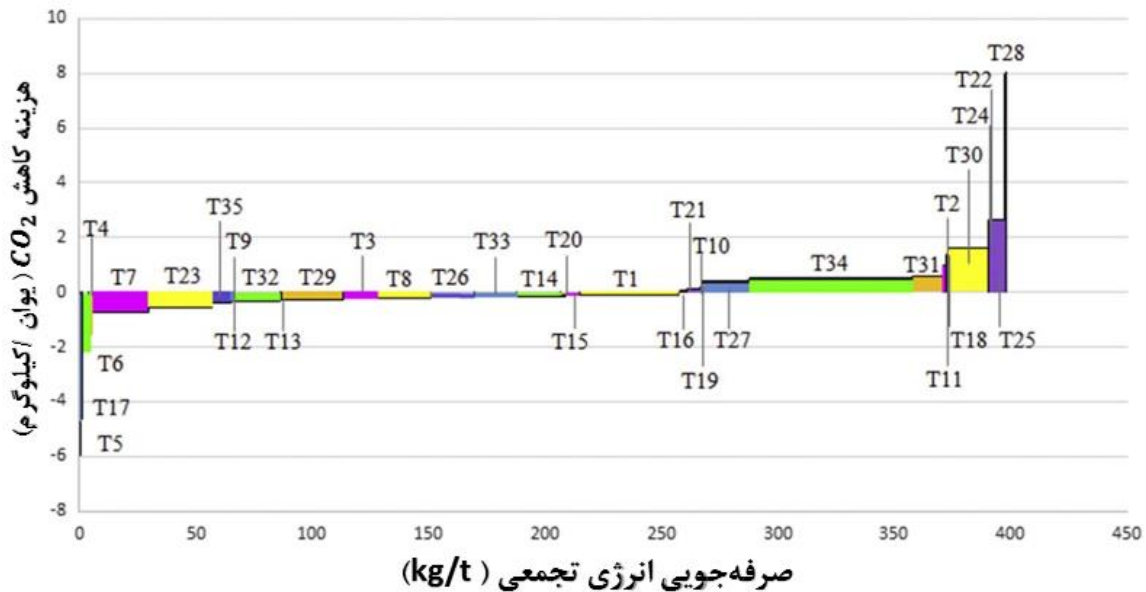
کرد.

شکل ۱۲. مقایسه قراضه فولادی ضروری و منابع قراضه تا سال ۲۰۵۰ میلادی.

به منظور کاهش میزان مصرف انرژی و انتشارات گاز CO_2 ، بدون شک تولید فولاد به عنوان بحرانی ترین فاکتور مدنظر است. تولید بسیار زیاد بدون تقاضای فولاد از ذخیره سازی انرژی و حفظ آن و کاهش انتشارات گازهای حاصل

جلوگیری خواهد کرد. تحقیقات متعددی، بهره‌وری انرژی را مورد بررسی قرار دادند و فاکتورهایی از جمله EST، ساختار انرژی و سیاست‌ها را ارزیابی کردند [۱۱، ۲۰، ۴۱]. با این حال از منظر شدت انرژی کمتر، تولید فولاد از طریق فرآیند EAF - که تقریباً یک سوم فرآیند BF/BOF است - فرایندهای فولادسازی کوتاه‌تر به همراه قراضه، پتانسیل بسیار بالایی برای ذخیره انرژی و کاهش انتشارات گازهای حاصل دارد. همان‌طور که شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان می‌دهد، در بازه بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۳۰، اثر تنظیم ساختار کمتر از پذیرش و اعمال فرآیندهای EST است. با این حال، در بلندمدت اثر تنظیم ساختار، پتانسیل صرفه‌جویی انرژی و کاهش انتشار گازها را به ازای هر تن فولاد تولیدی تا سال ۲۰۳۰، افزایش خواهد داد. پتانسیل القا شده ناشی از ارتقا و ترویج فرآیندهای EST باعث ۵۴/۱۵٪ و ۵۲/۱۰٪ از مجموع پتانسیل صرفه‌جویی انرژی و کاهش انتشارات گازهای CO₂ در طی سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۳۰ می‌شود و پس از سال ۲۰۳۰ نیز تنظیم ساختار به ترتیب منجر به ۷۹/۸۵٪ و ۸۰/۴۶٪ از مجموع پتانسیل صرفه‌جویی انرژی و کاهش انتشارات گازهای CO₂ می‌شود. بنابراین تولیدکنندگان فولاد و بخش‌های مرتبط با آنها باید در کوتاه‌مدت توجه بیشتری به فرآیندهای EST داشته باشند. با این حال توسعه فرایندهای EAF پس از آنکه منابع قراضه به تدریج کافی شدند، تمرکز تحقیق و پژوهش خواهد شد.

بد نیست که گفته شود که قبل از سال ۲۰۵۰، بسیاری از تکنولوژی‌ها به بهره‌وری نزدیک به ۱۰۰ درصد خواهند رسید. با افزایش نرخ پذیرش و به کارگیری معیارهای بهره‌وری انرژی تحت سناریوهای EEI و STP، پتانسیل ذخیره انرژی و پتانسیل کاهش انتشارات CO₂ کوچک و کوچک‌تر می‌شود. قبل از سال ۲۰۳۰، تحت سناریوهای EEI و STP، پتانسیل فرآیندهای EST، بزرگ است. چون سناریو STP، نرخ پذیرش و اعمال فرآیندهای EST بیشتری دارد، پتانسیل آن با سرعت بیشتری کاهش خواهد یافت. بنابراین در مقایسه با سناریو EEI، اثر EST بر روی مصرف انرژی تحت سناریوی STP، قبل از سال ۲۰۳۰ بزرگ‌تر است؛ اما پس از سال ۲۰۳۰ کوچک‌تر می‌شود.

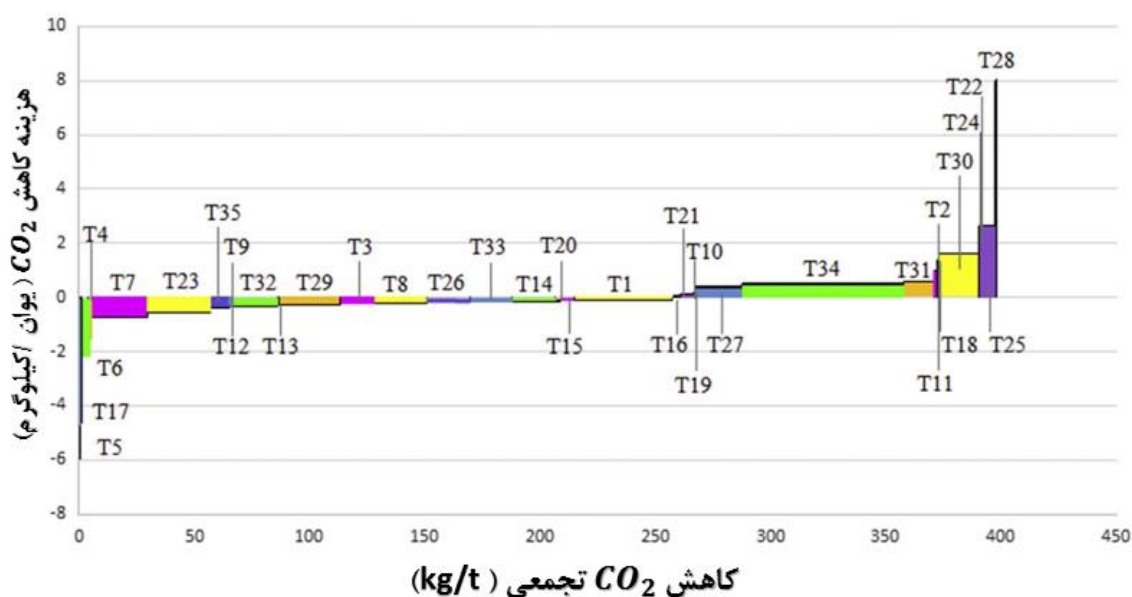


شکل ۱۳. صرفه‌جویی انرژی تجمعی مربوط به EST موجود در صنعت فولاد چین.

۵-۲- کارآمدی اقتصادی فرآیندهای EST در صنعت فولاد

اگرچه در آینده تنظیم ساختار، مشارکت بیشتری در صرفه‌جویی انرژی و کاهش انتشارات گاز CO_2 در صنعت فولاد دارد اما فرآیندهای EST نقش مهم‌تری را قبل از آنکه استفاده از منابع قراضه به سطح بالایی برسند، ایفا می‌کنند. تولیدکنندگان فولاد و بخش‌های دولتی به یک طرح کلی از محبوبیت EST نیاز دارند تا ارجحیت هر فرآیند را در میان فرآیندهای EST تأیید کنند. بنابراین فرآیندهای مقرون به صرفه بکار گرفته شده در صنعت فولاد بهترین و سودمندترین مسیر هستند. CSC یک روش تحلیل کمی بسیار مهم - هم از نظر وجه فنی و هم از نظر وجه اقتصادی - برای فرآیندهای EST است؛ این روش به‌طور گسترده به‌منظور ارزیابی پتانسیل صرفه‌جویی انرژی و کاهش انتشارات مواد کربنی در سیستم‌های صنعتی مورد استفاده قرار گرفته است [۱۴, ۲۰, ۳۳]. مطابق با اطلاعات جزئی از EST ۳۵ موجود (جدول ۴) و تحلیل و بررسی‌های صورت گرفته [۱۵]، هزینه صرفه‌جویی انرژی و کاهش انتشارات

گازهای CO_2 ، در صنعت فولاد چین تخمین زده شد. همان طور که از شکل ۱۳ و ۱۴ مشخص است، هنگامی که نرخ نزولی برابر با ۱۵٪ بود، این ۳۵ فرآیند EST مذکور، توزیع صرفه جویی انرژی در حد ۳/۰۱ گیگا ژول به ازای هر تن و توزیع کاهش CO_2 به اندازه ۳۹۸/۲۲ کیلوگرم به ازای هر تن دارند. ۱۹ تکنولوژی مقرون به صرفه هستند و صرفه-جویی تجمعی انرژی آنها ۱/۸۵ گیگا ژول به ازای هر تن است. نتایج نشان می دهد که نرخ نفوذ فرآیندهای EST اثر مهمی بر مزایای انرژی و مقرون به صرفه بودن دارند؛ که آن هم تحت تأثیر قیمت انرژی و نرخ نزولی است.



شکل ۱۴. کاهش CO_2 تجمعی مربوط به EST موجود در صنعت فولاد چین.

شکل ۱۴ منحنی های تأمین حفاظت CO_2 ^۱ (CCSC) را هنگامی که نرخ نزولی برابر با ۱۵٪ است، نشان می دهد. مطابق با تحلیل های فوق در سال ۲۰۱۵ شدت TCE در صنعت فولاد چین برابر با ۲۱۲۰/۹۵ کیلوگرم به ازای هر تن است و

^۱ CO_2 conservation supply curve

اگر تمامی ۳۵ EST اعمال شود، به مقدار ۱۱۸۰/۳۳ کیلوگرم به ازای هر تن کاهش خواهد یافت که این مقدار برابر با ۵۵/۶۵٪ از TCE کنونی است.

در این مطالعه، به منظور تحلیل و بررسی EST با اثربخشی اقتصادی، قیمت CO_2 برابر با ۱۰۰ یوان به ازای هر تن CO_2 در نظر گرفته شد [۱۴]. ۲۲ فرآیند EST مقرون به صرفه تشخیص داده شد که کاهش جمعی CO_2 آن‌ها برابر با ۲۶۱/۰۶ کیلوگرم است که برابر با ۱۲/۳۱٪ از TCE در سال ۲۰۱۵ است. حضور تکنولوژی‌هایی با سود مثبت، باعث می‌شود که هزینه کاهش انتشارات گاز CO_2 ، نسبتاً پایین‌تر باشد.

در حال حاضر ضروری‌ترین تعهد، به حداکثر رساندن به کارگیری فرآیندهای EST با عملکرد ترمودینامیکی و بهره‌وری اقتصادی بالا است؛ که این موارد شامل تزریق زغال‌سنگ پودر شده^۱، ریخته‌گری پیوسته، تحویل و شارژ داغ^۲ بیلت‌های ریخته‌گری شده^۳ می‌باشد که از لحاظ اقتصادی برای شرکت‌های تولیدی قابل اجراست. در طرف مقابل فرآیندهای EST همچون بازیابی حرارت اتلاف شده از آب خنک‌کننده، عملیات سرباره اسفنجی و بازیابی حرارت سرباره که پتانسیل صرفه‌جویی انرژی، کاهش انتشار CO_2 ، بهره‌وری اقتصادی پایینی دارند؛ از منظر اپراتور شرکت‌ها نباید به دلیل سود کمتر تحت عنوان هدف اولیه سرمایه‌گذاری در نظر و مورد اجرا قرار گیرند. بنابراین توجهات در بلندمدت باید معطوف به گزینه‌های عقلانی از نظر مصرف انرژی و انتشار آلودگی‌ها و در دسترس بودن گزینه‌های تکنولوژیکی بیشتر و گسترده‌تر باشد. بخش تحقیق و توسعه^۴ (R & D) نیاز دارد تا به منظور ترویج و ارتقای سطح فنی و کاهش میزان هزینه‌ها، بر روی فرآیندهای EST در حال ظهور و پرهزینه تمرکز نماید.

۳-۵- پیشنهادها و محدودیت‌های پژوهش

¹ Pulverized coal

² Hot delivery and hot charging

³ Casting billet

⁴ Research and development

صنعت آهن و فولاد یکی از متمرکزترین صنایع تولیدی از نظر کثرت مصرف انرژی و انتشارات [آلودگی‌های ناشی از مصرف انرژی] است. به‌منظور ارتقاء مصرف انرژی و کاهش انتشار گازهای CO_2 چندین پیشنهاد ارائه شده است. ابتدا آنکه تولید بیش از اندازه فولاد، دلیل اصلی TEC بالا و انتشار گازهای CO_2 زیاد است. در اقتصاد به بلوغ رسیده یک کاهش بزرگ در تقاضای فولاد برای شرکت‌هایی که رشد سریع اخیر را تجربه می‌کنند بسیار غیرمنطقی است. تولید فولاد باید مطابق با پیش‌بینی تقاضای آن در آینده باشد. بخش‌های مربوط باید از ورود صنعت به چرخه نامناسب با سود کم و گسترش کورکورانه تولید جلوگیری کنند. در همان زمان بسیار ضروری است که تولیدکنندگان، ظرفیت تولید عقب‌افتاده^۱ را حذف کنند و تولیدات فولادی با ارزش افزوده بالا را توسعه دهند. علاوه بر این باید حتی‌الامکان یک سیستم بازیابی قراضه بهتر به‌زودی زود احداث و راه‌اندازی شود. حتی اگر منابع قراضه از ذخایر موجود همان‌طور که در این تحقیق تخمین زده شده بود به‌زیادی ۱۵۲ میلیون تن باشد (مطابق شکل ۱۲) که از توانایی بازیابی به‌منظور پردازش و استفاده از تمامی قراضه موجود نیز بسیار فراتر است. منابع قراضه برای توسعه منطقی روش EAF در آینده کافی هستند. نرخ تغذیه آهن اسفنجی در فرآیند EAF که تولید معمولی را تأمین می‌کند باید به تدریج کاهش یابد، زیرا آهن اسفنجی به مقادیر زیادی انرژی نیاز دارد. کیفیت فولاد ثانویه به‌عنوان موضوع دیگری مطرح است که نیاز به تمرکز بیشتری دارد. در حال حاضر تمامی محصولات فولادی از آلیاژهای مختلف ساخته شده‌اند، که این موضوع مشکلات زیادی را برای حفاظت از گریدهای فولاد ثانویه به دلیل آنکه این فولادها محتوی عناصری همچون مس، قلع، نیکل، کروم و روی هستند، به وجود می‌آورند [۴۲]. جهت حذف ناخالصی‌ها، مدیریت ضایعات و تکنولوژی‌های اصلاح پیشرفته، نقش بسیار مهمی را در خصوص جلوگیری از توزیع و پخش آلودگی‌ها در میان انواع مختلف محصولات فولادی دارند. علاوه بر این باید سیاست‌های جدید مالیات بر ارزش افزوده و تخفیف مالیاتی توسط

¹ Backward production capacity

دولت‌ها فرموله شود، تا قیمت بسیار بالای قراضه کنونی را کاهش دهد. در نهایت می‌توان معضلات و مسائل فنی و کمبود سرمایه را به‌عنوان موانع اصلی در ارتقاء محبوبیت تکنولوژی‌های صرفه‌جویی انرژی و کاهش انتشار گازها برشمرد. در کوتاه‌مدت، تکنولوژی‌ها به‌عنوان نیروی اصلی جهت ارتقاء بهره‌وری انرژی خواهند بود. بنابراین ضروری‌ترین وظیفه، به حداکثر رساندن تکنولوژی‌هایی با بهره‌وری اقتصادی بالا و نرخ به‌کارگیری کم همچون تزریق زغال‌سنگ پودر شده و فرآیند LT برای خالص‌سازی و بازیابی گازهای مبدل¹، می‌باشد. علاوه بر این منطقی است که باید انرژی، استفاده از آن و در دسترس بودن اختیارات تکنولوژیکی با جزئیات بسیار بیشتری مورد مطالعه قرار گیرد.

عناوین و سرفصل‌های بسیاری در مورد بازسازی ساختار صنعت هستند که ارزش بحث بیشتری دارند. ابتدا آنکه ارتقا و پیشرفت تولید فولاد از طریق فرآیند EAF ضروری است، زیرا منابع قراضه، بیشترشان به هدر می‌روند و صنعت فولاد موقعیت‌های پیشروی بسیار زیادی را از دست می‌دهد. اولویت‌های هر منطقه در احداث سیستم‌های بازیابی قراضه باید مورد توجه قرار گیرد. الگوهایی از سیستم بازیابی، با موقعیت مالی بهتر، می‌توانند در هر یک از نواحی قرار گیرند. دوم آنکه ارتقا و بهبود ابتکار در جاده و کمربندی باعث خواهد شد که صادرات محصولات فولادی به‌عنوان روشی برد-برد تلقی شود، زیرا این موضوع می‌تواند هم‌زمان به ساخت‌وساز کشورهای توسعه‌یافته کمک کند و فشار اقتصادی حاصل از صنعت داخلی فولاد که با کاهش ظرفیت مواجه شده است، را بازیابی نماید. سوم آنکه، بازسازی صنعت باید با یک برنامه جامع با هم انجام شود. برای مثال تغییرات ساخت‌وساز و خودرو بر روی صنایع فلزات غیر آهنی و تولید سیمان نیز اثرگذار خواهد بود؛ همچنین بر صنایع بالادستی همچون معدن زغال‌سنگ نیز اثرگذار است. تولیدکنندگان و بخش‌های مرتبط باید در صورت وقوع زیان‌های بزرگ‌تر آماده باشند. با این

¹ Converter gas

اوصاف، انجام تحقیقاتی همچون تحقیق حاضر، به شدت در سایر صنایع و به خصوص صنعت فولاد ایران پیشنهاد می‌شود.

تحلیل و بررسی ارائه شده در این تحقیق بر پایه اولویت اشکال و مدل‌های منطقی بنیان‌گذاری شده است. اگرچه آن‌ها همچنین می‌توانند در سطح کلان ملی در طی چندین دهه آینده فرآیند پیش‌بینی را انجام دهند، اما محدودیت‌ها و عدم قطعیت‌ها غیرقابل اجتناب است که این موضوع نیاز به تحقیق و مطالعه بیشتری دارد. اول آنکه پیش‌بینی سهم و مصرف فولاد بر پایه‌ی شاخص‌های اقتصادی است؛ موقعیت اقتصادی بهینه شده، تولید فولاد بیشتری را به همراه خواهد داشت. دوم آنکه واردات و صادرات تولید فولاد نیاز به توجه بیشتری دارند. سوم آنکه، مصرف انرژی و انتشار گاز CO_2 از طریق اطلاعات حاصل از شرکت‌های آهن و فولاد با ابعاد بزرگ یا متوسط اندازه‌گیری شده است. با این حال اطلاعات شرکت‌های کوچک و محلی که معمولاً قدیمی¹ (منسوخ شده) هستند و اطلاعات مناطق متمرکز از نظر انرژی (مناطق با مصرف انرژی بالا) نیز نامعلوم است. این شرکت‌ها در اسرع وقت نیاز به نظارت دارند. چهارم، اعمال و به کارگیری تکنولوژی‌های در حال ظهور EST، همچون تکنولوژی کوره انفجاری دمش-اکسیژن²، کاهش مصرف انرژی، استخراج و ذخیره‌سازی کربن که در این مقاله در نظر گرفته نشده‌اند، ممکن است بر روی صرفه‌جویی در انرژی و کاهش انتشارات گازها اثر حیاتی داشته باشد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله از مدل‌های MFA دینامیک به منظور پیش‌بینی تقاضای فولاد در آینده، مقادیر کافی از منابع قراضه و فاکتورهای مصرف انرژی و انتشارات گاز CO_2 در صنعت فولاد استفاده شد.

¹ Outdated

² Oxygen-blown blast furnace technology

پیش‌بینی شده است که تقاضای فولاد در جهان به‌طور قابل توجهی در سال ۲۰۱۳ افزایش می‌یابد، اما سپس به تدریج به مقدار در سال‌های بعدی تا سال ۲۰۵۰ میلادی کاهش یابد. ضایعات قدیم، ضایعات خانگی و ضایعات فوری اصلی‌ترین منابع ضایعات و قراضه را تشکیل می‌دهند. برخی کشورها نظیر چین یک افزایش سریع و پایدار در میزان منابع قراضه را در بازه بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۵۰ تجربه خواهند کرد، که این افزایش، در نتیجه مصرف بالای فولاد در دوره مذکور است. طول عمر به‌طور قابل توجهی بر روی تقاضای فولاد و مقدار قراضه و ضایعات اثرگذار است. با این حال طول عمر، تنها بر روی نسبت قراضه تأثیرگذار است؛ که این فاکتور به‌منظور ارزیابی مقادیر کافی منابع قراضه، معرفی شده است.

پس از سال ۲۰۱۵، مصرف کل انرژی داخلی و انتشارات گاز CO_2 به‌طور قابل توجهی کاهش خواهد یافت و تحت سناریو BAU به ترتیب از مقدار $13931/38$ پتاژول به $7990/12$ پتاژول و از $1704/87$ میلیون تن CO_2 به $985/63$ میلیون تن CO_2 در سال ۲۰۵۰ خواهد رسید. شدت انرژی و شدت گاز CO_2 نیز به ترتیب از $17/72$ GJ/t^۱ و $kgCO_2/t^2$ در سال ۲۰۱۰ به $15/77$ GJ/t و $1945/23$ $kgCO_2/t^3$ کاهش خواهد یافت. در مقایسه با سناریو BAU، ۳ سناریوی دیگر از جمله STA، EEI و STP روند کمتری را نشان می‌دهند. نتایج تجزیه و تحلیل LMDI نشان می‌دهد که تولید فولاد مهم‌ترین نقش را در مصرف انرژی و انتشارات گاز CO_2 دارد. در کوتاه‌مدت آن‌ها وابستگی بیشتری به بهبود تکنولوژی دارند؛ این در حالی است که در بلندمدت علی‌الخصوص پس از سال ۲۰۴۰ پیشرفت ساختار تولید به‌عنوان مهم‌ترین عامل و نیرو در کاهش مصرف انرژی و انتشارات گاز CO_2 مطرح است. همچنین، پیش‌بینی می‌شود که منابع قراضه و ضایعات برای تأمین پیشرفت ساختار تولید، تحت چهار سناریو کافی باشد. ۳۵ فرایند انتخاب شد تا

^۱ گیگاژول به ازای هر تن فولاد
^۲ کیلوگرم گاز کربن دی‌اکسید به ازای هر تن فولاد

پتانسیل کاهش مصرف انرژی و انتشارات گاز CO_2 را اندازه‌گیری کند. به‌منظور تخمین مزایای انرژی و بهره‌وری اقتصادی (مقرون به‌صرفه بودن) این تکنولوژی‌ها، CSC تصویب و به کار گرفته شد. تحت شرایط این تحقیق، ۲۲ فرایند EST، مقرون به‌صرفه هستند. فرایندهای EST با عملکرد ترمودینامیکی بالا و بهره‌وری اقتصادی بالا همچون تزریق زغال‌سنگ پودر شده، ریخته‌گری پیوسته و تحویل و شارژ داغ بیلت‌های ریخته‌گری شده باید در اولویت و ارجحیت توسعه و به‌کارگیری باشد.

همان‌طور که نتایج پیش‌بینی نشان می‌دهد، تولید فولاد باید مطابق با تقاضای آینده باشد. بخش‌های مربوطه باید از ورود صنعت به چرخه معیوب و نامناسب کم سود و گسترش کورکورانه تولید جلوگیری به عمل آورند. در همان حین، بسیار ضروری است که تولیدکنندگان ظرفیت تولید عقب‌مانده را حذف نمایند، محصولات فولادی با ارزش افزوده بالا را توسعه دهند و به دنبال صادرات محصولات فولادی باشند. در کشورهایی که منابع قراضه بیشتری دارند و در حین تلف شدن هستند، باید یک سیستم بازیابی قراضه صوتی احداث شود. پایلوت‌های مربوطه می‌توانند در مناطق توسعه یافته مستقر شوند. علاوه بر این بازسازی صنعت نیز باید در میان چندین صنعت مختلف دیگر، با همدیگر و تحت یک برنامه سراسری صورت بگیرد.

مراجع:

[۱] M. Van der Hoeven, D. Houssin, Energy technology perspectives 2015: mobilising innovation to accelerate climate action, International Energy Agency: Paris, France, (2015).

[۲] L. Chen, B. Yang, X. Shen, Z. Xie, F. Sun, Thermodynamic optimization opportunities for the recovery and utilization of residual energy and heat in China's iron and steel industry: A case study, Applied Thermal Engineering, 86 (2015) 151-160.

- [۳]B. Yu, X. Li, Y. Qiao, L. Shi, Low-carbon transition of iron and steel industry in China: carbon intensity, economic growth and policy intervention, *Journal of Environmental Sciences*, 28 (2015) 137-147.
- [۴]Y. Xuan, Q. Yue, Forecast of steel demand and the availability of depreciated steel scrap in China, *Resources, Conservation and Recycling*, 109 (2016) 1-12.
- [۵]A. Hasanbeigi, Z. Jiang, L. Price, Retrospective and prospective analysis of the trends of energy use in Chinese iron and steel industry, *Journal of cleaner production*, 74 (2014) 105-118.
- [۶]Y. Liu, M. Duan, Y. Zhao, Decomposition of CO₂ emission influencing factors in China's steel and iron industry based on LMDI method, *Safety Environ Eng*, 23 (2016) 7-11.
- [۷]N. Karali, T. Xu, J. Sathaye, Developing long-term strategies to reduce energy use and CO₂ emissions—analysis of three mitigation scenarios for iron and steel production in China, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 21 (2016) 699-719.
- [۸]A. Olsson, Trends and developments in the intensity of steel use: an econometric analysis, in, 2008.
- [۹]P. Wang, W. Li, S. Kara, Cradle-to-cradle modeling of the future steel flow in China, *Resources, Conservation and Recycling*, 117 (2017) 45-57.
- [۱۰]T. Kuramochi, Assessment of midterm CO₂ emissions reduction potential in the iron and steel industry: a case of Japan, *Journal of Cleaner Production*, 132 (2016) 81-97.
- [۱۱]Z. Wen, F. Meng, M. Chen, Estimates of the potential for energy conservation and CO₂ emissions mitigation based on Asian-Pacific Integrated Model (AIM): the case of the iron and steel industry in China, *Journal of cleaner production*, 65 (2014) 120-130.

- [۱۲]M. Yellishetty, G.M. Mudd, P.G. Ranjith, A. Tharumarajah, Environmental life-cycle comparisons of steel production and recycling: sustainability issues, problems and prospects, *Environmental science & policy*, 14 (2011) 650-663.
- [۱۳]W.R. Morrow III, A. Hasanbeigi, J. Sathaye, T. Xu, Assessment of energy efficiency improvement and CO₂ emission reduction potentials in India's cement and iron & steel industries, *Journal of Cleaner Production*, 65.۱۴۱-۱۳۱ (۲۰۱۴)
- [۱۴]Y. Li, L. Zhu, Cost of energy saving and CO₂ emissions reduction in China's iron and steel sector, *Applied Energy*, 130 (2014) 603-616.
- [۱۵]Q. Zhang, X. Zhao, H. Lu, T. Ni, Y. Li, Waste energy recovery and energy efficiency improvement in China's iron and steel industry, *Applied energy*, 191 (2017) 502-520.
- [۱۶]J.C. Rojas-Cardenas, A. Hasanbeigi, C. Sheinbaum-Pardo, L. Price, Energy efficiency in the Mexican iron and steel industry from an international perspective, *Journal of cleaner production*, 158 (2017) 335-348.
- [۱۷]B. Xu, B. Lin, Assessing CO₂ emissions in China's iron and steel industry: A dynamic vector autoregression model, *Applied Energy*, 161 (2016) 375-386.
- [۱۸]B. Lin, X. Wang, Carbon emissions from energy intensive industry in China: evidence from the iron & steel industry, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47 (2015) 746-754.
- [۱۹]M. Arens, E. Worrell, W. Eichhammer, A. Hasanbeigi, Q. Zhang, Pathways to a low-carbon iron and steel industry in the medium-term—the case of Germany, *Journal of Cleaner Production*, 163 (2017) 84-98.
- [۲۰]D. Ma, W. Chen, X. Yin, L. Wang, Quantifying the co-benefits of decarbonisation in China's steel sector: an integrated assessment approach, *Applied energy*, 162 (2016) 1225-1237.

- [۲۱] D.B. Müller, Stock dynamics for forecasting material flows—Case study for housing in The Netherlands, *Ecological Economics*, 59 (2006) 142-156.
- [۲۲] I.E. Agency, I.E. Agency, Tracking industrial energy efficiency and CO2 emissions, Organisation for Economic Co-operation and Development, 2007.
- [۲۳] K. Tanaka, Assessment of energy efficiency performance measures in industry and their application for policy, *Energy policy*, 36 (2008) 2887-2902.
- [۲۴] B.W. Ang, The LMDI approach to decomposition analysis: a practical guide, *Energy policy*, 33 (2005) 867-871.
- [۲۵] B.W. Ang, A. Mu, P. Zhou, Accounting frameworks for tracking energy efficiency trends, *Energy Economics*, 32 (2010) 1209-1219.
- [۲۶] M. Hu, S. Pauliuk, T. Wang, G. Huppel, E. van der Voet, D.B. Müller, Iron and steel in Chinese residential buildings: A dynamic analysis, *Resources, Conservation and Recycling*, 54 (2010) 591-600.
- [۲۷] L. Hong, N. Zhou, W. Feng, N. Khanna, D. Fridley, Y. Zhao, K. Sandholt, Building stock dynamics and its impacts on materials and energy demand in China, *Energy Policy*, 94 (2016) 47-55.
- [۲۸] M. Hu, Dynamic material flow analysis to support sustainable built environment development: with case studies on Chinese housing stock dynamics, Department of Industrial Ecology, Institute of Environmental Sciences (CML ...), 2010.
- [۲۹] T. Wu, H. Zhao, X. Ou, Vehicle ownership analysis based on GDP per capita in China: 1963–2050, *Sustainability*, 6 (2014) 4877-4899.

- [۳۰] T. Wu, M. Zhang, X. Ou, Analysis of future vehicle energy demand in China based on a Gompertz function method and computable general equilibrium model, *Energies*, 7 (2014) 7454-7482.
- [۳۱] T.U. CAERC, Sustainable Automotive Energy System in China, Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [۳۲] I.P.o.C. Change, 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006.
- [۳۳] A. Hasanbeigi, W. Morrow, J. Sathaye, E. Masanet, T. Xu, A bottom-up model to estimate the energy efficiency improvement and CO₂ emission reduction potentials in the Chinese iron and steel industry, *Energy*, 50 (2013) 315-325.
- [۳۴] H. Hao, H. Wang, M. Ouyang, F. Cheng, Vehicle survival patterns in China, *Science China Technological Sciences*, 54 (2011) 625-629.
- [۳۵] M. Arens, Technological change and industrial energy efficiency: Exploring the low-carbon transformation of the German iron and steel industry, Utrecht University, 2017.
- [۳۶] Y. Xuan, Q. Yue, Scenario analysis on resource and environmental benefits of imported steel scrap for China's steel industry, *Resources ,Conservation and Recycling*, 120 (2017) 186-198.
- [۳۷] W. Chen, X. Yin, D. Ma, A bottom-up analysis of China's iron and steel industrial energy consumption and CO₂ emissions, *Applied Energy*, 136 (2014) 1174-1183.
- [۳۸] P. Wang, Z. Jiang, X. Geng, S. Hao, X. Zhang, Quantification of Chinese steel cycle flow: Historical status and future options, *Resources, Conservation and Recycling*, 87 (2014) 191-199.
- [۳۹] X. Yin, W. Chen, Trends and development of steel demand in China: A bottom-up analysis, *Resources Policy*, 38 (2013) 407-415.

[۴۰] S. Pauliuk, T. Wang, D.B. Müller, Moving toward the circular economy: The role of stocks in the Chinese steel cycle, *Environmental science & technology*, 46 (2011) 148-154.

[۴۱] K. Wang, C. Wang, X. Lu, J. Chen, Scenario analysis on CO2 emissions reduction potential in China's iron and steel industry, *Energy Policy*, 35 (2007) 2320-2335.

[۴۲] J. Oda, K. Akimoto, T. Tomoda, Long-term global availability of steel scrap, *Resources, Conservation and Recycling*, 81 (2013) 81-91.

"جهت مطالعه مقالات جدید در زمینه صنعت آهن و فولاد و آشنایی با فناوری های نوین صنعت فولاد، به سایت پژوهشکده فولاد مراجعه نمایید."

031-33913921
031-33912588

SteelResearchCenter
SRC.iut.ac.ir

دانشگاه صنعتی اصفهان
SRC@of.iut.ac.ir