

ارزیابی پتانسیل صرفه‌جویی انرژی الکتریکی و پیش‌بینی مصرف در صنعت فولاد ایران با استفاده از مدل‌های آماری و هوش مصنوعی

مرتضی مهرگو*

استادیار، گروه مدیریت انرژی، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران، mmehrgoo@nri.ac.ir

آزیتا عبدالهی ناناویشه

دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران، abdollahi.azita@ut.ac.ir

چکیده

این مطالعه پتانسیل صرفه‌جویی انرژی الکتریکی و روند آتی مصرف را در صنعت آهن و فولاد ایران با استفاده از روش‌های آماری و هوش مصنوعی بررسی می‌کند. با استفاده از تحلیل داده‌های واقعی، مصرف ویژه انرژی برای بخش‌های کلیدی زنجیره تولید فولاد محاسبه و پتانسیل صرفه‌جویی نسبت به استانداردهای ملی و بهترین فناوری جهانی ارزیابی شده است. برای پیش‌بینی تا افق ۱۴۱۵، از سه مدل (آماری، تقویت گرادیانی و حافظه طولانی کوتاه مدت) و سه سناریو (ادامه روند موجود، خوش‌بینانه ۱ و ۲) استفاده گردید. نتایج نشان می‌دهد پتانسیل صرفه‌جویی سالانه بین ۶۰۶۷ تا ۸۴۲۵ میلیون کیلووات‌ساعت (۱۶ تا ۲۳٪ مصرف بخش فولاد) است که بیشترین فرصت در کوره قوس الکتریکی متمرکز است. پیش‌بینی‌ها حاکی از رشد مصرف به ۱۰۲ تراوات‌ساعت در سناریوی ادامه روند موجود است، درحالی‌که با بهینه‌سازی فناوری (سناریوهای خوش‌بینانه) می‌توان مصرف را ۱۲ تا ۲۸٪ کاهش داد. مطابق با نتایج بدست آمده، مدل حافظه طولانی کوتاه مدت با کمترین خطا (۳/۴٪ = خطای مطلق) به‌عنوان دقیق‌ترین مدل شناسایی شد. **واژه‌های کلیدی:** بهره‌وری انرژی، صنعت فولاد ایران، هوش مصنوعی، حافظه طولانی کوتاه مدت، تقویت گرادیانی، پتانسیل صرفه‌جویی.

Assessment of Electricity Saving Potential and Consumption Forecasting in Iran's Steel Industry Using Statistical and Artificial Intelligence Models

Morteza Mehrgoo

Energy Management Department, Niroo Research Institute, Tehran, Iran

Azita Abdollahi Nanvapishe

Department of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Abstract

This study investigates potential electrical energy savings and future consumption trends in Iran's iron and steel industry using statistical methods and artificial intelligence. Using real-world data, the specific energy consumption of key sectors within the steel production chain was calculated, and the potential savings were assessed against national standards and the best available technologies. To forecast through the 1415 horizon, three models—statistical, gradient boosting, and long short-term memory—and three scenarios—business-as-usual (BAU), Optimistic 1, and Optimistic 2—were used. The results indicate that the annual savings potential ranges from 6067 to 8425 million kilowatt-hours (16 to 23% of the steel sector's consumption), with the greatest opportunity concentrated in the electric arc furnace. The forecasts indicate that consumption will increase to 102 terawatt-hours under the continuation-of-existing-trend scenario, whereas technology optimisation in the optimistic scenarios could reduce consumption by 12% to 28%. Based on the results, the long short-term memory model, which achieved the lowest error (MAE = 3.4%), was identified as the most accurate.

Keywords: Energy Efficiency, Iran's Steel Industry, Artificial Intelligence, Long Short-Term Memory, Gradient Boosting, Savings Potential.

۱- مقدمه

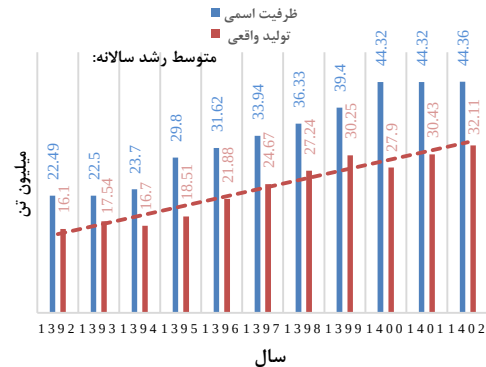
است. کشور چین با تولید ۱۰۲۸/۹ میلیون تن فولاد خام در سال ۲۰۲۳ بزرگ‌ترین تولیدکننده فولاد در جهان بوده است. این کشور علاوه بر رتبه یک تولید فولاد در جهان، رتبه اول در مصرف فولاد را نیز در اختیار دارد. پس از چین و با اختلاف زیاد هند (۱۴۰/۸ میلیون تن) و ژاپن (۸۷ میلیون تن) بزرگ‌ترین تولیدکنندگان فولاد در جهان هستند [۲].

برای تولید هر تن فولاد، بدون در نظر گرفتن فرآوری مواد اولیه و جابجایی، حدود ۶۵۰ تا ۷۵۰ متر مکعب معادل گاز طبیعی انرژی مورد نیاز است [۳]. در نتیجه، مصرف ویژه انرژی این محصول در بین صنایع انرژی‌بر بالاترین مقدار را دارد. میزان تولید فولاد در ایران طی سال‌های ۱۳۹۲-۱۴۰۲ در شکل ۱ نشان داده شده است [۱]. با توجه به مقدار بالای مصرف ویژه انرژی در این صنعت، می‌توان نتیجه گرفت که مصرف انرژی در صنعت فولاد همراه با رشد سریع تولید این صنعت به-

صنعت فولاد و آهن به‌نوعی نبض رشد و توسعه اقتصادی کشور ایران محسوب می‌شود که محصولات حاصل از این صنعت به‌طور گسترده در انواع صنایع دیگر از ساختمان و زیرساخت گرفته تا خودروسازی و انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرد. براساس گزارش‌های منتشرشده توسط سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران (ایمیدرو)، تولید فولاد در طول سال‌های ۱۳۹۵-۱۴۰۲ حدود ۷۳/۵ درصد افزایش یافته و میزان نرخ افزایش سالیانه به‌طور متوسط ۸/۷۶ درصد بوده است [۱].

در سال‌های گذشته میزان تولید و مصرف فولاد خام در جهان به‌صورت چشمگیری افزایش یافته است. در سال ۲۰۲۳ تولید فولاد خام در سرتاسر دنیا حدود ۱۹۰۴ میلیون تن بوده که نسبت به سال ۲۰۱۳ (تولید حدود ۱۶۵۴ میلیون تن) بیش از ۱۵٪ افزایش یافته

طرز قابل توجهی افزایش خواهد یافت. در سال ۲۰۲۳، بخش آهن و فولاد مسئول حدود ۲۱٪ از مصرف انرژی نهایی کل صنایع جهان بوده است [۴]. بنابراین، بهره‌وری انرژی صنعت فولاد نقش مهمی در مصرف انرژی کل دارد و بهبود بهره‌وری انرژی باید دغدغه اصلی صنایع آهن و فولاد باشد. یکی از راه‌های کاهش مصرف ویژه انرژی صنایع از طریق بهبود فناوری است.



شکل ۱- میزان تولید فولاد در طول سال‌های ۱۴۰۲-۱۳۹۲ [۱]

مطالعات بسیاری در خصوص بهبود صنعت فولاد به لحاظ فنی وجود دارد [۵ و ۶]. به عنوان مثال، کویی و همکاران [۷] در سال ۲۰۲۵ پیشرفت‌ها در خصوص فناوری‌های صرفه‌جویی در مصرف انرژی را در کل زنجیره تولید فولاد اعم از کک‌سازی، تولید کنسانتره، ساخت آهن و فولاد، ریخته‌گری و نوردکاری مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که به کارگیری فناوری‌هایی مانند کنترل رطوبت زغال‌سنگ، خشک کردن کک، گردش مجدد دوده‌های خروجی دودکش و تزریق زغال-سنگ پودر شده به‌طور قابل توجهی راندمان را بهبود می‌دهد. در سال ۲۰۲۰، گائو و همکاران [۸] مدلی برای پیش‌بینی مصرف انرژی و آب در صنعت فولاد ارائه دادند. آن‌ها با بررسی ۲۱ فناوری صرفه‌جویی انرژی و ۹ فناوری صرفه‌جویی آب، پتانسیل صرفه‌جویی را در سناریوهای مختلف محاسبه کردند که در یکی از سناریوها به ۷۵/۱ پیکازول برای انرژی رسید. این مطالعه، اجرای سیاست‌های تشویقی برای به کارگیری این فناوری‌ها را به منظور توسعه پایدار صنعت آهن و فولاد پیشنهاد می‌دهد. ناو همکاران [۹] روش‌های ارزیابی و عوامل مؤثر بر بهره‌وری انرژی در صنعت آهن و فولاد (شامل ساختار صنعتی، سطح فناوری، مصرف انرژی و قیمت) را بررسی کردند. نتایج نشان داد که بهینه‌سازی ساختار انرژی و ارتقای سطح فناوری، راهکارهایی مؤثر برای بهبود بهره‌وری انرژی در این صنعت هستند. وانگ و جیانگ [۱۰]، فناوری‌های صرفه‌جویی انرژی در صنعت فولاد را ارزیابی و ترکیب جایگزینی سوخت، بازیابی گرما و بهینه‌سازی سیستم را بررسی کردند. نتایج نشان داد که استفاده از چرخه آلی رانکین و ذخیره‌سازی CO₂ در تولید آهن، انتشار کربن را تا ۶۹٪ کاهش می‌دهد.

در برخی مقالات، پتانسیل صرفه‌جویی انرژی در صنعت فولاد کشورهای مختلف از جمله تایوان، چین، آمریکا، آلمان، اتحادیه اروپا و هند ارزیابی شده است. مطالعه‌ای در تایوان نشان داد که با به کارگیری بهترین فناوری موجود، مصرف انرژی تا ۶/۶۶ تراوات ساعت (معادل ۳/۵٪ از مصرف سالانه کشور) قابل کاهش است [۱۱]. در مورد پتانسیل صرفه‌جویی انرژی در صنعت فولاد چین، به کارگیری

فناوری‌های کم‌کربن به عنوان مؤثرترین راهبرد شناسایی شد. نتایج نشان داد که ترکیب افزایش تولید فولاد با روش قوس الکتریکی، ترویج فناوری‌های کم‌کربن و استفاده از سوخت‌های پاک، می‌تواند در بازه ۲۰۱۵ تا ۲۰۳۰، کاهش تجمعی ۸۱۸/۳ میلیون تنی انتشار CO₂ را به همراه داشته باشد [۱۲].

مدل پیشنهادی جهت آنالیز پتانسیل صرفه‌جویی در صنعت فولاد چین بر مبنای روش‌ها و شاخص‌های آماری توسط هی و همکاران [۱۳] نیز نشان داد که افزایش نسبت قراضه، بیش‌ترین تاثیر را در صرفه‌جویی در انرژی دارد. برای برنامه‌ریزی بلندمدت، بسیاری از مطالعات به تحلیل کمی انرژی با استفاده از مدل‌های ریاضی پرداخته‌اند. اولانریواجو [۱۴ و ۱۵] با ترکیب آنالیز تجزیه شاخص، شبکه عصبی مصنوعی و تحلیل تکاملی داده، پتانسیل صرفه‌جویی انرژی در بخش‌های صنعتی را بررسی کرد. نتایج نشان داد که این مدل یکپارچه، قادر به تعیین مؤثر مصرف انرژی و میزان گازهای گلخانه‌ای منتشر شده است.

شناسایی پتانسیل کاهش مصرف برق نقش مهمی در کاهش فشار بر شبکه سراسری و توسعه پایدار صنعت فولاد دارد. با وجود انجام مطالعاتی در خصوص بازیابی انرژی گرمایی جهت کاهش مصرف انرژی در صنعت فولاد [۱۶]، هنوز مطالعه‌ای در خصوص تحلیل دقیق الگوهای مصرف که می‌تواند نقاط اتلاف انرژی و فرصت‌های بهینه‌سازی را آشکار کند، انجام نشده است.

در این مطالعه، یک تحلیل چندسطحی از مصرف انرژی الکتریکی در صنعت آهن و فولاد ایران ارائه شده است. ابتدا با استفاده از داده‌های واقعی تولید و مصرف، مصرف ویژه انرژی^۱ در هر مرحله از زنجیره ارزش ارزش محاسبه و با معیارهای ملی و جهانی مقایسه گردید تا پتانسیل صرفه‌جویی کمی‌سازی شود. سپس، برای پیش‌بینی روند آتی مصرف تا افق ۱۴۱۵، از ترکیب سه روش مدل‌سازی شامل روش آماری مبتنی بر مصرف ویژه، الگوریتم یادگیری ماشین تقویت گرادینتی^۲ و شبکه عصبی حافظه طولانی کوتاه مدت^۳ استفاده شد. سه سناریوی راهبردی (ادامه روند موجود، خوش‌بینانه ۱ و ۲) تعریف و نتایج با شاخص‌های دقیق سنجش خطا ارزیابی گردید.

نوآوری اصلی این پژوهش در تلفیق منسجم ارزیابی پتانسیل ایستا با پیش‌بینی پویا و داده‌محور است که امکان شناسایی همزمان «حفره‌های کارایی» و «مسیرهای تحول آتی» را فراهم می‌آورد. وجه تمایز روش‌شناختی آن، به کارگیری همزمان مدل‌های تفسیرپذیر آماری با الگوریتم‌های هوش مصنوعی پیشرفته برای کاهش عدم قطعیت در پیش‌بینی‌های بلندمدت است.

ضرورت این تحقیق از دو منظر کلیدی آشکار می‌شود: نخست، فقدان یک مطالعه یکپارچه که پتانسیل صرفه‌جویی را نه به صورت نظری، بلکه بر اساس داده‌های عملیاتی و در یک افق زمانی مشخص کمی کند؛ و دوم، نیاز سیاست‌گذاران و مدیران صنعتی به ابزارهای تحلیلی هوشمند که بتوانند اثرگذاری راهبردهای مختلف بهره‌وری

¹ Specific Energy Consumption (SEC)

² XGBoost

³ LSTM

انرژی و نوسازی فناوری را در شرایط پویای اقتصادی و فنی شبیه‌سازی نمایند.

۲- بخش‌های مختلف در فرآیند تولید فولاد و آهن

زنجیره تولید فولاد شامل بخش‌های کنسانتره، گندله، آهن آسفنجی و فولاد خام است که در ادامه به تشریح هریک از این بخش‌ها پرداخته می‌شود [۱۷].

۱-۲- کنسانتره سنگ آهن

ماده اولیه تولید کنسانتره آهن، سنگ آهن است. به عبارت دیگر، کنسانتره آهن یک محصول خروجی از فرآوری سنگ آهن است که با خردکردن، آسیاب کردن، جداسازی مغناطیسی به دست می‌آید.

۲-۲- گندله

گندله آهن، شامل کنسانتره سنگ آهن، بنتونیت، مواد افزودنی و مقدار معینی رطوبت است که در کوره‌های مخصوصی پخته می‌شود تا استحکام لازم را برای حمل و نقل و استفاده صنعتی به دست آورد.

۳-۲- آهن آسفنجی

هنگامی که اکسیژن موجود در سنگ آهن به صورت مستقیم از آن حذف شود، محصولی با نام آهن آسفنجی به دست می‌آید. فرآیند تولید این ماده که با روش احیای مستقیم انجام می‌شود، باعث می‌گردد، سنگ آهن بدون ذوب شدن به آهن فلزی تبدیل شود.

۴-۲- فولاد خام

تولید فولاد در ایران از طریق دو مسیر اصلی تولید فولاد به روش کوره بلند-کوره اکسیژن پایه^۱ و تولید فولاد به روش کوره قوس الکتریکی^۲ انجام می‌گیرد.

۱-۴-۲- تولید فولاد به روش کوره بلند-کوره اکسیژن پایه

در روش کوره بلند-کوره اکسیژن پایه، ابتدا سنگ آهن در کوره بلند با کک و سنگ آهک ذوب شده و به آهن خام (چدن مذاب) تبدیل می‌شود. سپس این آهن خام مذاب به کوره اکسیژن پایه منتقل شده و با دمیدن اکسیژن و افزودن مواد کمک ذوب، ناخالصی‌های آن سوزانده و کربن آن تنظیم می‌گردد. محصول نهایی این فرآیند، فولاد مذاب با ترکیب شیمیایی مطلوب است که برای ریخته‌گری و تولید محصولات فولادی استفاده می‌شود.

۲-۴-۲- تولید فولاد به روش کوره احیا- قوس الکتریکی

در این روش، ابتدا سنگ آهن در کوره احیای مستقیم و با استفاده از گاز طبیعی، به آهن آسفنجی تبدیل می‌شود. سپس این آهن آسفنجی به همراه قراضه آهن، در کوره قوس الکتریکی ذوب می‌گردد. در نهایت، فولاد مذاب تولید شده برای تنظیم نهایی ترکیب، تصفیه و برای ریخته‌گری آماده می‌شود. مقدار تولید فولاد در هریک از بخش-

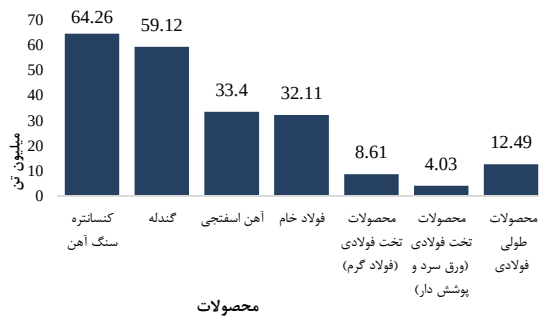
^۱ Basic Oxygen Furnace (BOF)

^۲ Electric Arc Furnace (EAF)

های زنجیره تولید فولاد مطابق با گزارش شرکت ایمیدرو در شکل ۲ نشان داده شده است [۳].

۳- روش‌شناسی

در این بخش میزان تولید در بخش‌های مختلف زنجیره فولاد به همراه برق مصرفی، نحوه محاسبه مصرف ویژه برق، روش محاسبه پتانسیل کاهش مصرف برق در زنجیره تولید فولاد شرح داده می‌شود.

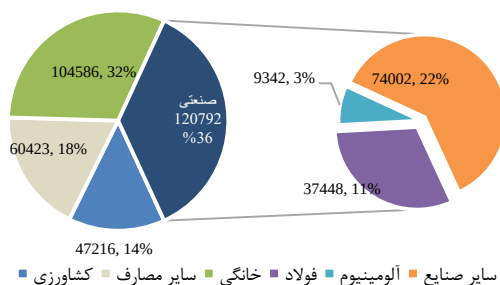


شکل ۲- عملکرد زیربخش‌های زنجیره تولید فولاد (سال ۱۴۰۲).

۱-۳- داده‌ها

بر طبق گزارش‌های شرکت ایمیدرو، تولید فولاد خام کشور در سال ۱۴۰۲ حدود ۳۲/۱۱ میلیون تن شمش فولاد و ۲۵/۱۳ میلیون تن محصولات فولادی بوده است. همچنین، بنابر گزارش شرکت بهینه‌سازی، کل مصرف انرژی صنعت فولاد کشور (گرمایی و الکتریکی) بالغ بر ۱۶ میلیارد مترمکعب معادل گاز طبیعی برآورد می‌شود. میزان هدر رفت انرژی سالیانه این صنعت تا حدود ۱۴ میلیارد متر مکعب معادل گاز طبیعی افزایش یابد [۱۸].

با توجه به گزارش سال ۱۴۰۲ شرکت ایمیدرو [۳]، مصرف برق در زنجیره فولاد کل کشور حدود ۳۷۴۴۸ میلیون کیلووات ساعت بوده است که ۳۱ درصد از مصرف برق بخش صنعت و ۱۱/۲ درصد از مصرف برق کل کشور را به خود اختصاص داده است (شکل ۳).



شکل ۳- مصرف برق در بخش زنجیره فولاد و صنعت برای کل کشور در سال ۱۴۰۲ (بر حسب میلیون کیلووات ساعت).

میزان مصرف برق به تفکیک در بخش کوره بلند و بخش قوس الکتریکی به طور صریح در منابع ذکر نشده است. با این حال، بر طبق گزارش ماهنامه بورس [۱۹]، که نمودار مربوطه در شکل ۴ نشان داده شده است، میزان مصرف ویژه برق در بخش قوس الکتریکی تقریباً ۳/۴ برابر بخش کوره بلند است. مقدار تولید فولاد در این دو بخش با توجه

صرفه‌جویی را محاسبه نمود. لازم به ذکر است که در محاسبه پتانسیل کاهش مصرف از رابطه زیر استفاده شده است [۲۰]:

$$RP = Q^t \times (SEC^t - SEC^0) \quad (2)$$

SEC^0 بیانگر مصرف ویژه انرژی معیار در ایران (یا جهان)، SEC^t بیانگر مصرف ویژه برق در بخش‌های مختلف تولید فولاد و Q^t مقدار کل محصول تولیدی در بخش مربوطه است. معیار مصرف برق در فرآیندهای تولید آهن و فولاد کارخانه‌های موجود و کارخانه‌های جدیدالاحداث در جدول ۲ نشان داده شده است [۱۷].

۴- مصرف ویژه و پتانسیل کاهش مصرف انرژی

با توجه به میزان تولید و میزان برق مصرفی، مصرف ویژه انرژی الکتریکی برای هریک از بخش‌ها قابل محاسبه خواهد بود. مصرف ویژه برق برای بخش‌های مختلف محاسبه‌شده و نتایج آن در جدول ۲ نشان داده شده است. نتایج به‌دست‌آمده، با معیارهای مصرف انرژی در ایران و بهترین فناوری مقایسه شده است.

جدول ۲- نتایج به‌دست آمده با معیارهای مصرف انرژی در ایران و بهترین فناوری.

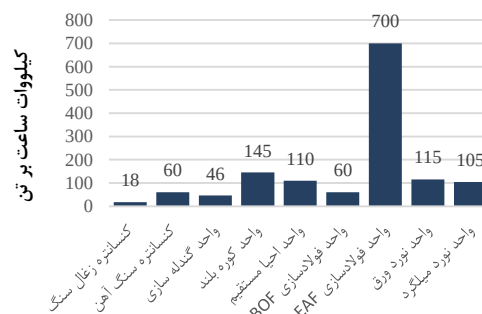
بخش‌های تولید	مصرف ویژه انرژی الکتریکی (کیلووات ساعت بر تن)		
	موجود	معیار مصرف ایران	بهترین فناوری دنیا
کنسانتره	۷۷٫۲۸	۵۳	۳۸
گندله	۵۴٫۴۱	۵۰	۳۸
آهن اسفنجی	۱۳۲٫۰۱	۱۱۵	۱۱۰
کوره بلند-اکسیژن پایه	۲۴۸٫۴۳	۱۵۵	۱۱۰
کوره قوس الکتریکی	۸۴۴٫۶۵	۷۱۸	۶۹۴٫۴۵

همچنین، با توجه به رابطه (۲) پتانسیل صرفه‌جویی برق در بخش‌های مختلف تولید فولاد در جدول ۳ نشان داده شده است. نتایج مندرج در جدول ۳ نشان می‌دهد که صنعت فولاد ایران هنوز فاصله قابل توجهی با بهترین فناوری‌های جهانی از نظر بهره‌وری انرژی دارد. بیشترین فرصت بهینه‌سازی در بخش کوره قوس الکتریکی و پس از آن تولید کنسانتره وجود دارد. با لحاظ نمودن سایر بخش‌های زنجیره، پتانسیل صرفه‌جویی برق در صنعت آهن و فولاد در مقایسه با استاندارد ایران و بهترین فناوری، به‌ترتیب برابر ۶۵۰۹٫۲۲ و ۹۵۳۹٫۸۴ میلیون کیلووات ساعت و معادل با ۲۶٫۲۱ درصد و ۳۸٫۴۱ درصد از کل مصرف برق در بخش فولاد است. بنابراین، در صورت اجرای کامل بهینه‌سازی‌ها، صرفه‌جویی قابل توجهی قابل دستیابی است.

جدول ۳- پتانسیل صرفه‌جویی در بخش‌های زنجیره تولید فولاد

مرحله تولید	پتانسیل صرفه‌جویی در مقایسه با معیار مصرف ایران		پتانسیل صرفه‌جویی در مقایسه با معیار بهترین فناوری	
	انرژی الکتریکی		انرژی الکتریکی	
	میلیون کیلووات ساعت	%	میلیون کیلووات ساعت	%

به مقدار کل تولیدی ۳۲/۱۱ میلیون تن (طبق گزارش شرکت ایمیدرو) و درصد تخصیص‌یافته ۱۱/۹٪ و ۸۸/۱٪ به هریک از این روش‌ها (مطابق با داده‌های ظرفیت اسمی تولید فولاد) محاسبه شده است. به‌طور دقیق‌تر، ظرفیت اسمی تولید به روش قوس الکتریکی و اکسیژن پایه به‌ترتیب ۳۹/۰۷ و ۵/۳ میلیون تن است که در نتیجه درصد تولید به-ترتیب ۸۸/۱ و ۱۱/۹ درصد خواهد بود.



شکل ۴- مصرف ویژه انرژی الکتریکی در صنعت فولاد ایران [۲۰].

با توجه به گزارش شرکت ایمیدرو در خصوص کل مصرف برق در صنعت فولاد (برابر با ۳۷۴۲۷ میلیون کیلووات ساعت) [۳]، میزان انرژی الکتریکی مصرفی بخش‌های مختلف تولید فولاد در جدول ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، مصرف انرژی در زنجیره تولید فولاد در هر بخش متفاوت است و به نوع فرآیند بستگی دارد. در مراحل ابتدایی برق بیشتر برای آسیاب، جدایش و انتقال مواد به‌کار می‌رود. در بخش‌های میانی و نهایی مانند احیای مستقیم و به-خصوص ذوب در کوره قوس الکتریکی، مصرف انرژی الکتریکی بسیار بالاست و بیشترین سهم از کل انرژی الکتریکی زنجیره را به خود اختصاص می‌دهد.

جدول ۱- میزان تولید محصولات و مصرف انرژی الکتریکی در بخش‌های مختلف تولید فولاد در سال ۱۴۰۲.

روش تولید	میزان تولید (میلیون تن)	مصرف برق (میلیون کیلووات ساعت)
کنسانتره	۶۴٫۲۶	۴۹۶۶
گندله	۵۹٫۱۲	۳۲۱۷
آهن اسفنجی	۳۳٫۴	۴۴۰۹
فولادسازی	کوره قوس الکتریکی	۲۸٫۲۸
	کوره بلند-اکسیژن پایه	۳٫۸۳
		۲۳۸۸۲٫۱۴
		۹۵۲٫۸۶

۲-۳- محاسبه مصرف ویژه انرژی و پتانسیل صرفه‌جویی

برق

مصرف ویژه انرژی برابر است با میزان انرژی مصرفی به‌ازای تولید یک تن از محصول و از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$SEC^t = \frac{E}{Q^t} \quad (1)$$

با مقایسه مصرف ویژه انرژی الکتریکی در ایران در وضعیت موجود با معیار مصرف ویژه ایران یا بهترین فناوری روز دنیا، می‌توان پتانسیل

کنسانتره	۳۱/۴۲	۱۵۶۰/۲۲	۵۰/۸۳	۲۵۲۴/۱۲
گندله	۸/۱۱	۲۶۱	۳۰/۱۷	۹۷۰/۴۴
آهن اسفنجی	۱۲/۸۸	۵۶۸	۱۶/۶۷	۷۳۵
کوره بلند-اکسیژن پایه	۳۷/۶۱	۳۵۸/۳۵	۵۵/۷۲	۵۳۰/۹۵
کوره قوس الکتریکی	۱۵	۳۵۸۵/۰۸	۱۷/۷۸	۴۲۴۶/۹۵
مجموع	۲۶/۲۱	۶۵۰۹/۲۲	۳۸/۴۱	۹۵۳۹/۸۴

خطای مطلق^۴ و ضریب تعیین^۵ ارزیابی گردید. این شاخص‌ها امکان سنجش خطای پیش‌بینی، دقت نسبی و میزان تطابق مدل با داده‌های واقعی را فراهم می‌کنند. نتایج اولیه نشان داد که تقویت گرادینانی توانسته است بخشی از رفتارهای غیرخطی مصرف انرژی را با دقت مناسبی استخراج کند و نسبت به مدل آماری، عملکرد قابل توجهی داشته باشد. اطلاعات مربوط به پارامترهای مدل استفاده شده در پیوست الف، جدول الف-۱ ارائه شده است.

۵-۱-۳- کاربرد مدل در سناریوهای پیش‌بینی

در تحلیل سناریوها، مفروضات مربوط به تولید سالانه، مصرف ویژه انرژی و سهم فناوری‌های مختلف اصلاح شده و به‌عنوان ورودی مدل استفاده شد. خروجی مدل، مقادیر پیش‌بینی‌شده مصرف برق برای دوره ۱۴۰۲ تا ۱۴۱۵ است. این ساختار سناریویی به پژوهش اجازه می‌دهد اثرات تغییر فناوری، اصلاح الگوی تولید و روندهای بهره‌وری را در قالب سناریوهای جایگزین بررسی کند.

۵-۲- مدل حافظه طولانی کوتاه مدت

شبکه حافظه طولانی کوتاه مدت نوعی شبکه عصبی بازگشتی است که قابلیت یادگیری وابستگی‌های بلندمدت در داده‌های سری زمانی را دارد. این ویژگی سبب می‌شود شبکه حافظه طولانی کوتاه مدت بتواند روندهای چندساله، بهبود فناوری، تغییر الگوهای تولید و اثرات تجمعی بهره‌وری را به‌خوبی مدل‌سازی کند؛ موضوعی که در تحلیل مصرف انرژی صنایع سنگین اهمیت زیادی دارد.

۵-۲-۱- داده‌های ورودی

برای مدل حافظه طولانی کوتاه مدت، داده‌های سری زمانی سالانه شامل مصرف برق، تولید فرآورده‌ها، سهم قراضه، ترکیب فناوری و مصرف ویژه انرژی طی سال‌های ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۲ به‌صورت توالی‌های زمانی استانداردسازی شدند. استانداردسازی سری زمانی به مدل کمک می‌کند تا الگوهای بلندمدت، نقاط تغییر ساختاری و اثرات تجمعی فناوری را تشخیص دهد.

۵-۲-۲- معماری شبکه و فرآیند آموزش

معماری شبکه شامل سه لایه حافظه طولانی کوتاه مدت پیاپی است که هر لایه قادر به یادگیری وابستگی‌های زمانی با طول‌های متفاوت است. پس از این لایه‌ها، یک لایه سنگین و حجیم به‌عنوان خروجی قرار گرفت و از تابع فعال‌سازی^۶ برای افزایش انعطاف‌پذیری مدل استفاده شد.

اطلاعات مربوط به پارامترهای مدل استفاده شده در پیوست الف، جدول الف-۲ ارائه شده است. ارزیابی عملکرد مدل نشان داد که روش حافظه طولانی کوتاه مدت کمترین مقدار میانگین مربعات خطا و میانگین درصد خطای مطلق و بیشترین مقدار ضریب تعیین را نسبت به سایر مدل‌ها دارد.

۵- روش‌های هوش مصنوعی مورد استفاده در

پیش‌بینی مصرف برق

به‌منظور ارتقاء دقت پیش‌بینی مصرف برق در زنجیره تولید فولاد، این پژوهش افزون بر روش آماری مبتنی بر مصرف ویژه انرژی، از دو رویکرد هوش مصنوعی شامل الگوریتم تقویت گرادینانی و شبکه عصبی با حافظه طولانی کوتاه‌مدت استفاده نموده است. این روش‌ها به دلیل توانایی در مدل‌سازی روابط پیچیده و روندهای چندساله گزینش شده‌اند. نحوه‌ی پیاده‌سازی هر یک در ادامه تشریح می‌شود.

۵-۱- مدل تقویت گرادینانی

تقویت گرادینانی یکی از مشهورترین و کاراترین الگوریتم‌های یادگیری ماشین بر پایه تقویت گرادینانی است. این الگوریتم با ایجاد مجموعه‌ای از درخت‌های تصمیم به‌صورت مرحله‌ای، خطای باقیمانده را در هر تکرار کاهش داده و در نهایت مدلی پایدار و با دقت بالا تولید می‌کند. توانایی تقویت گرادینانی در مدل‌سازی روابط غیرخطی و تعامل‌های چندمتغیره سبب شده در تحلیل مصرف انرژی، به‌ویژه در صنایع پیچیده‌ای همچون فولاد، عملکرد مناسبی داشته باشد.

۵-۱-۱- داده‌های ورودی و پیش‌پردازش

داده‌های مورد استفاده در مدل تقویت گرادینانی بازه زمانی ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۲ را پوشش می‌دهد و شامل مجموعه‌ای از متغیرهای مرتبط با تولید و فناوری است. این متغیرها عبارت‌اند از: میزان تولید کنسانتره، گندله، آهن اسفنجی و فولاد، مصرف برق فرآورده‌های اصلی، سهم قراضه در شارژ، نوع فناوری به‌کاررفته (کوره قوس الکتریکی یا کوره بلند)، ظرفیت اسمی، مصرف ویژه انرژی، نرخ رشد تولید و میانگین دمای سالانه. پیش از آموزش، داده‌ها فرآورده‌های پاک‌سازی، نرمال‌سازی، حذف نقاط پرت و کنترل هم‌خطی‌سپری کردند تا از بروز خطاهای محاسباتی و پدیده بیش‌برازش^۱ جلوگیری شود.

۵-۲-۱- فرآیند آموزش مدل

برای آموزش مدل، ۸۰ درصد داده‌ها به‌عنوان داده آموزش و ۲۰ درصد به‌عنوان داده آزمون مورد استفاده قرار گرفت. تنظیم ابرپارامترها با بهره‌گیری از اعتبارسنجی متقاطع زمان‌محور^۲ انجام شد تا ویژگی‌های وابسته به زمان در داده‌ها حفظ شود. عملکرد مدل با سه شاخص میانگین مربعات خطا^۳، میانگین درصد

^۴ MAPE

^۵ R^2

^۶ Long Short-Term Memory (LSTM)

^۷ ReLU

^۱ Overfitting

^۲ Time-Series Cross Validation

^۳ RMSE

شوند تا پتانسیل کامل صرفه جویی در مصرف برق محقق گردد.

۵-۳-۳- استفاده مدل در سناریوها

در فرآیند پیش‌بینی، مدل حافظه طولانی کوتاه مدت از یک ساختار بازگشتی پیش‌رونده استفاده می‌کند. بدین ترتیب، مقدار واقعی سال ۱۴۰۲ به مدل داده می‌شود و مدل مقدار سال ۱۴۰۳ را پیش‌بینی می‌کند. سپس مقدار پیش‌بینی شده به عنوان ورودی برای سال بعد قرار می‌گیرد و این روند تا سال ۱۴۱۵ ادامه پیدا می‌کند. این روش سبب می‌شود اثرات فناوری، تغییرات بهره‌وری و اصلاحات ساختاری در طول زمان به‌طور تدریجی و انباشته در پیش‌بینی لحاظ گردد.

۷- نتایج

در این بخش، با توجه به مصرف انرژی ویژه در هر بخش، با توجه به اهمیت ویژه انرژی الکتریکی، تغییرات مصرف آن در سال‌های آتی با توجه به سناریوهای ادامه روند موجود و خوش‌بینانه پیش‌بینی می‌گردد.

۷-۱- برآورد مصرف انرژی در صنعت فولاد با روش آماری

نتایج روش آماری (جداول ۴-۶) نشان می‌دهد که در صورت تداوم روند موجود، مصرف برق صنعت فولاد از مقدار ۳۷/۴۲ تراوات ساعت در سال ۱۴۰۲ به ۱۰۲ تراوات ساعت در سال ۱۴۱۵ افزایش می‌یابد. این افزایش بیانگر رشد قابل توجه تقاضای انرژی در اثر توسعه ظرفیت‌های تولیدی و ثبات نسبی شاخص مصرف ویژه در زیربخش‌های مختلف زنجیره تولید فولاد است. مقادیر حاصل از دو سناریوی خوش‌بینانه نشان می‌دهند که در صورت تحقق بهبودهای فناوری و بهره‌وری، مصرف برق در سال ۱۴۱۵ می‌تواند به ۸۷/۲ تراوات ساعت (خوش‌بینانه اول) و ۸۵/۳۱ تراوات ساعت (خوش‌بینانه دوم) کاهش یابد.

جدول ۴- پیش‌بینی مصرف برق در بخش‌های مختلف زنجیره تولید فولاد برای سناریوی ادامه روند موجود.

سال	۱۴۰۲	۱۴۰۶	۱۴۱۰	۱۴۱۵
آگلومراسیون	۴۹۶۶.۰۰	۷۷۳۶.۲۵	۱۲۰۵۱.۸۶	۲۰۹۷۵.۳۳
گندله‌سازی	۳۲۱۷.۰۰	۵۰۳۶.۷۵	۷۸۸۵.۸۷	۱۳۸۱۰.۹۵
آهن اسفنجی	۴۴۰۹.۰۰	۵۹۸۹.۵۱	۸۱۳۶.۶۰	۱۱۹۳۳.۲۲
کوره بلند- اکسیژن پایه	۲۳۸۸۲.۱۴	۳۰۳۶۶.۵۲	۳۸۸۵۰.۳۳	۵۳۲۲۳.۳۸
کوره قوس الکتریکی	۹۵۲.۸۶	۱۲۱۱.۵۷	۱۵۵۰.۰۶	۲۱۲۳.۵۲
مجموع	۳۷۴۲۷.۰	۵۰۳۴۰.۶	۶۸۴۷۴.۷	۱۰۲۰۶۶

جدول ۵- پیش‌بینی مصرف برق (میلیون کیلووات ساعت) در بخش‌های مختلف زنجیره تولید فولاد برای سناریوی خوش‌بینانه اول.

سال	۱۴۰۲	۱۴۰۶	۱۴۱۰	۱۴۱۵
آگلومراسیون	۴۹۶۶.۰۰	۶۶۲۵.۸۶	۹۳۴۵.۵۵	۱۵۱۶۵.۴۰
گندله‌سازی	۳۲۱۷.۰۰	۴۸۴۸.۹۶	۷۴۲۶.۷۷	۱۲۸۲۰.۹۵
آهن اسفنجی	۴۴۰۹.۰۰	۵۶۹۸.۵۲	۷۴۸۱.۶۲	۱۰۶۷۹.۸۹
کوره بلند- اکسیژن پایه	۲۳۸۸۲.۱۴	۲۸۸۴۳.۲۶	۳۵۵۰۴.۰۱	۴۷۰۳۳.۱۷
کوره قوس الکتریکی	۹۵۲.۸۶	۱۰۵۹.۱۴	۱۲۱۵.۲۰	۱۵۰۴۰.۹
مجموع	۳۷۴۲۷.۰۰	۴۷۰۷۵.۷۳	۶۰۹۷۳.۱۵	۸۷۲۰۳.۵۰

جدول ۶- پیش‌بینی مصرف برق (میلیون کیلووات ساعت) در بخش‌های مختلف زنجیره تولید فولاد برای سناریوی خوش‌بینانه دوم.

سال	۱۴۰۲	۱۴۰۶	۱۴۱۰	۱۴۱۵
-----	------	------	------	------

۶- سناریوهای پیش‌بینی روند مصرف انرژی

به منظور پیش‌بینی میزان مصرف برق در صنعت فولاد ابتدا سه سناریو، شامل سناریوی ادامه روند موجود، سناریوی خوش‌بینانه ۱ و سناریوی خوش‌بینانه ۲ تعریف شده است. سپس با استفاده از متوسط رشد تولید سالیانه فولاد خام و روش‌های آماری و هوش مصنوعی میزان تولید و مصرف برق این صنعت محاسبه شده است.

۶-۱- سناریو ادامه روند موجود

در این سناریو با توجه به داده‌های ارائه شده در بخش قبل، میزان افزایش تولید سالیانه در هر بخش زنجیره فولاد مشخص شده است. در ادامه، با در نظر گرفتن مصرف انرژی ویژه فعلی هر فرآیند که در بخش قبلی معین شده، میزان مصرف انرژی الکتریکی سالیانه با توجه به تغییرات میزان تولید محاسبه شده است.

۶-۲- سناریوی خوش‌بینانه ۱

در این سناریو مشابه با سناریوی ادامه روند موجود، تغییرات میزان تولید در هر بخش زنجیره فولاد در نظر گرفته می‌شود. در ادامه فرض شده که افزایش مصرف انرژی الکتریکی هر واحد صنعتی ناشی از افزایش ظرفیت سالیانه مطابق با معیار مصرف کارخانه‌های تازه تاسیس (بهترین فناوری روز دنیا) خواهد بود. همچنین، ۵۰ درصد از پتانسیل کاهش مصرف انرژی که در مرحله قبل محاسبه شده است، در طول بازه زمانی سال ۱۴۰۲ تا ۱۴۱۵ کاهش خواهد یافت. این بدان معناست که صنایع موجود باید تا سال ۱۴۱۵ به‌گونه‌ای تغییر داده شوند که با توجه به معیار مصرف انرژی فعلی که در استانداردهای داخلی مشخص شده است، نیمی از پتانسیل کاهش مصرف انرژی الکتریکی را تامین کنند.

۶-۳- سناریوی خوش‌بینانه ۲

این سناریو مشابه با سناریوی خوش‌بینانه ۱ می‌باشد، یعنی فرض شده است که افزایش مصرف انرژی هر واحد صنعتی که ناشی از افزایش ظرفیت سالیانه است، مطابق با معیار مصرف کارخانه‌های تازه تاسیس (بهترین فناوری روز دنیا) باشد. با این تفاوت که در این سناریو ۱۰۰ درصد از پتانسیل کاهش مصرف انرژی که در مرحله قبل محاسبه شده است، در طول بازه زمانی سال ۱۴۰۲ تا ۱۴۱۵ کاهش خواهد یافت.

صنایع موجود باید تا سال ۱۴۱۵ مطابق استانداردهای داخلی به‌روز

جدول ۷- پیش بینی مصرف برق در زنجیره تولید فولاد با استفاده از روش تقویت گرادانی برای سناریوی ادامه روند موجود

سال	۱۴۰۲	۱۴۰۶	۱۴۱۰	۱۴۱۵
آگلومراسیون	۴۹۶۶.۰۰	۶۸۶۵.۸۹	۹۸۲۵.۶۲	۱۵۹۴۵.۵۱
گندله سازی	۳۲۱۷.۰۰	۴۸۸۹.۱۱	۷۵۰۷.۰۸	۱۲۹۵۱.۴۵
آهن اسفنجی	۴۴۰۹.۰۰	۵۹۴۲.۱۰	۸۰۲۴.۷۷	۱۱۷۰۷.۴۹
کوره بلند- اکسیژن پایه	۲۳۸۸۲.۱۴	۳۰۲۰۴.۴۱	۳۸۴۷۶.۱۳	۵۲۴۸۹.۸۴
کوره قوس الکتریکی	۹۵۲.۸۶	۱۲۰۳.۸۱	۱۵۳۲.۱۴	۲۰۸۸.۴۰
مجموع	۳۷۴۲۷.۰۰	۴۹۱۰۵.۳۲	۶۵۳۶۵.۷۴	۹۵۱۸۲.۶۹

جدول ۸- پیش بینی مصرف برق در بخش های مختلف زنجیره تولید فولاد با استفاده از روش تقویت گرادانی برای سناریوی خوش بینانه اول.

سال	۱۴۰۲	۱۴۰۶	۱۴۱۰	۱۴۱۵
آگلومراسیون	۴۹۶۶.۰۰	۶۰۸۸.۱۵	۷۹۷۰.۱۹	۱۲۰۵۷.۹۹
گندله سازی	۳۲۱۷.۰۰	۴۴۴۷.۶۵	۶۳۹۷.۱۵	۱۰۴۸۴.۶۸
آهن اسفنجی	۴۴۰۹.۰۰	۵۶۳۸.۶۵	۷۳۴۰.۴۳	۱۰۳۹۴.۹۰
کوره بلند- اکسیژن پایه	۲۳۸۸۲.۱۴	۲۸۶۶۲.۴۷	۳۵۰۸۶.۶۷	۴۶۲۱۵.۱۰
کوره قوس الکتریکی	۹۵۲.۸۶	۱۰۱۲.۲۸	۱۱۰۷.۰۳	۱۲۹۲.۰۳
مجموع	۳۷۴۲۷.۰۰	۴۵۸۴۹.۲۰	۵۷۹۰۱.۴۷	۸۰۴۴۴.۷۰

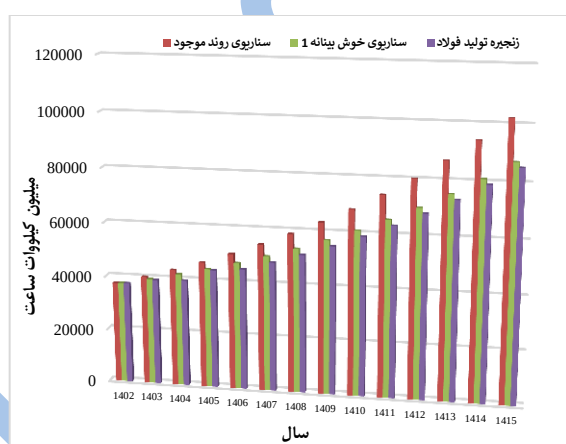
جدول ۹- پیش بینی مصرف برق در بخش های مختلف زنجیره تولید فولاد با استفاده از روش تقویت گرادانی برای سناریوی خوش بینانه دوم.

سال	۱۴۰۲	۱۴۰۶	۱۴۱۰	۱۴۱۵
آگلومراسیون	۴۹۶۶.۰۰	۵۸۴۸.۱۲	۷۴۹۰.۱۲	۱۱۲۷۷.۸۸
گندله سازی	۳۲۱۷.۰۰	۴۴۰۷.۵۰	۶۳۱۶.۸۴	۱۰۳۵۴.۱۸
آهن اسفنجی	۴۴۰۹.۰۰	۵۵۵۱.۲۷	۷۱۶۵.۶۶	۱۰۱۱۰.۹۰
کوره بلند- اکسیژن پایه	۲۳۸۸۲.۱۴	۲۸۱۱۱.۵۳	۳۳۹۸۴.۸۰	۴۴۴۲۴.۵۶
کوره قوس الکتریکی	۹۵۲.۸۶	۹۵۷.۱۵	۹۹۶.۷۷	۱۱۱۲.۸۶
مجموع	۳۷۴۲۷.۰۰	۴۴۸۷۵.۵۶	۵۵۹۵۴.۱۹	۷۷۲۸۰.۳۸

شکل ۶، پیش بینی مصرف انرژی الکتریکی در صنعت فولاد بین سال های ۱۴۰۲ تا ۱۴۱۵ را که توسط روش تقویت گرادانی صورت گرفته است، نمایش می دهد.

آگلومراسیون	۴۹۶۶.۰۰	۶۳۸۵.۸۲	۸۸۶۵.۴۹	۱۴۳۸۵.۲۹
گندله سازی	۳۲۱۷.۰۰	۴۸۰۸.۸۰	۷۳۴۶.۴۶	۱۲۶۹۰.۴۵
آهن اسفنجی	۴۴۰۹.۰۰	۵۶۱۱.۱۳	۷۳۰۶.۸۵	۱۰۳۹۵.۸۹
کوره بلند- اکسیژن پایه	۲۳۸۸۲.۱۴	۲۷۱۰۶.۰۱	۳۴۳۱۱.۱۸	۴۶۵۲۰.۸۸
کوره قوس الکتریکی	۹۵۲.۸۶	۱۰۰۴.۰۱	۱۱۰۴.۹۴	۱۳۲۴.۹۱
مجموع	۳۷۴۲۷.۰۰	۴۴۹۱۵.۷۸	۵۸۹۳۴.۹۲	۸۵۳۱۷.۴۲

نمودار مربوط به پیش بینی مصرف انرژی الکتریکی در سناریوهای مختلف که با استفاده از روش آماری پیش بینی شده، برای سال های ۱۴۰۲ تا ۱۴۰۱۵ در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵- پیش بینی مصرف برق با استفاده از روش آماری

۷-۲- پیش بینی مصرف انرژی در صنعت فولاد با روش تقویت گرادانی

نتایج مدل تقویت گرادانی نشان می دهد که مقدار مصرف برق در سال ۱۴۱۵ تحت سناریوی ادامه روند موجود برابر ۹۵/۱۸ تراوات ساعت پیش بینی شده است، که حدود ۶/۷ درصد کمتر از مقدار متناظر در روش آماری است. در سناریوهای خوش بینانه، مقدار مصرف سال ۱۴۱۵ به ۸۰/۴۴ تراوات ساعت (خوش بینانه اول) و ۷۷/۲۸ تراوات ساعت (خوش بینانه دوم) کاهش می یابد. این کاهش نشان می دهد که مدل نسبت به اعمال سیاست ها و فناوری جدید حساسیت قابل توجهی دارد.

درخصوص ارزیابی عملکرد، روش تقویت گرادانی دارای میانگین خطای مطلق ۶/۴ درصد، خطای میانگین مربعات ۴ درصد و ضریب تعیین حدود ۰/۹۲۵ است. عملکرد این مدل از روش آماری بهتر و از حافظه طولانی کوتاه مدت ضعیف تر بوده است. از دید مدل سازی، تقویت گرادانی قابلیت تحلیل اهمیت متغیرها و استخراج روابط غیرخطی را دارد؛ اما در پیش بینی های بلندمدت ممکن است دچار تجمع خطا شود، زیرا ساختار آن فاقد حافظه زمانی است.

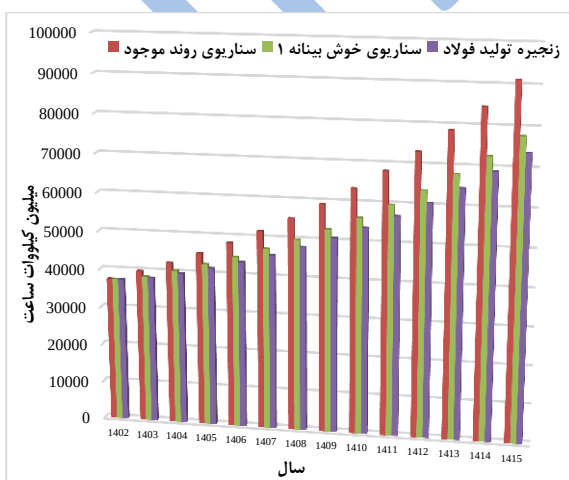
جدول ۱۱- پیش بینی مصرف برق در زنجیره تولید فولاد با استفاده از روش حافظه طولانی کوتاه مدت برای سناریوی خوش بینانه اول.

سال	۱۴۰۲	۱۴۰۶	۱۴۱۰	۱۴۱۵
آگلومراسیون	۴۹۶۶.۰۰	۵۹۰۵.۵۱	۷۷۳۱.۰۸	۱۱۶۹۶.۲۵
گندله سازی	۳۲۱۷.۰۰	۴۳۳۸.۵۱	۶۱۷۸.۸۶	۱۰۱۲۹.۹۶
آهن اسفنجی	۴۴۰۹.۰۰	۵۶۱۲.۹۶	۷۲۸۹.۰۴	۱۰۳۱۱.۴۰
کوره بلند- اکسیژن پایه	۲۳۸۸۲.۱۴	۲۷۸۳۲.۰۹	۳۳۸۲۲.۳۵	۴۴۲۵۵.۲۹
کوره قوس الکتریکی	۹۵۲.۸۶	۹۸۳.۴۴	۱۰۴۸.۶۳	۱۱۹۵.۳۷
مجموع	۳۷۴۲۷.۰۰	۴۴۶۷۲.۵۰	۵۶۰۶۹.۹۷	۷۷۵۸۸.۲۷

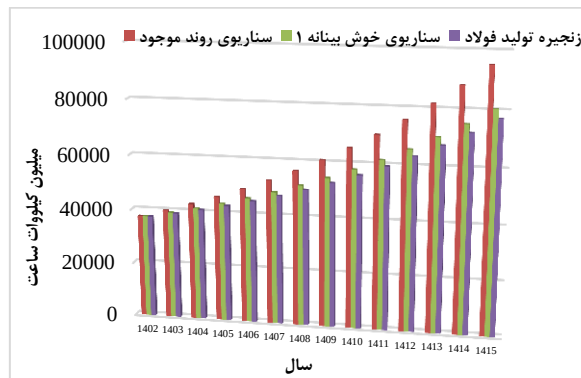
جدول ۱۲- پیش بینی مصرف برق در زنجیره تولید فولاد با استفاده از روش حافظه طولانی کوتاه مدت برای سناریوی خوش بینانه دوم.

سال	۱۴۰۲	۱۴۰۶	۱۴۱۰	۱۴۱۵
آگلومراسیون	۴۹۶۶.۰۰	۵۶۴۳.۴۳	۷۲۲۷.۹۷	۱۰۸۸۳.۱۶
گندله سازی	۳۲۱۷.۰۰	۴۱۸۹.۲۱	۵۸۸۰.۲۶	۹۶۴۴.۷۴
آهن اسفنجی	۴۴۰۹.۰۰	۵۴۹۹.۸۸	۷۰۶۲.۸۹	۹۹۴۳.۹۰
کوره بلند- اکسیژن پایه	۲۳۸۸۲.۱۴	۲۶۹۱۴.۳۱	۳۲۲۰۹.۶۷	۴۱۷۴۳.۹۴
کوره قوس الکتریکی	۹۵۲.۸۶	۹۰۱.۷۵	۸۸۵.۲۶	۹۲۹.۸۹
مجموع	۳۷۴۲۷.۰۰	۴۳۱۴۸.۵۹	۵۳۲۶۶.۰۶	۷۳۱۴۵.۶۳

پیش بینی و مقایسه نتایج مصارف برق زنجیره تولید فولاد در سه سناریوی تعریف شده بین سال های ۱۴۰۲ تا ۱۴۱۵ که با الگوریتم حافظه طولانی کوتاه مدت انجام شده در شکل ۷ نمایش داده شده است.



شکل ۷- نتایج مصارف برق زنجیره تولید فولاد بین سال های ۱۴۰۲ تا ۱۴۱۵ با الگوریتم حافظه طولانی کوتاه مدت



شکل ۶- پیش بینی مصرف انرژی الکتریکی در زنجیره فولاد با استفاده از الگوریتم تقویت گرادیانی

۷-۳- پیش بینی مصرف انرژی در صنعت آهن و فولاد با روش حافظه طولانی کوتاه مدت

مدل حافظه طولانی کوتاه مدت دقیق ترین عملکرد را در میان روش های بررسی شده دارد. براساس نتایج، مقدار مصرف برق در سال ۱۴۱۵ تحت سناریوی ادامه روند موجود برابر ۹۱/۳۱ تراوات ساعت برآورد شده است که کمترین مقدار در میان سه روش است. در سناریوهای خوش بینانه، این مقدار به ۷۷/۵۸ تراوات ساعت و ۷۳/۱۴ تراوات ساعت کاهش می یابد. الگوی کاهش نشان می دهد که این روش نسبت به اعمال سیاست های بهره روری و تحول فناوری بیشترین حساسیت را دارد و اثرات تجمعی بهبودهای فرآیندی را دقیق تر بازنمایی می کند.

در مرحله اعتبارسنجی، مقدار میانگین درصد خطای مطلق مدل حافظه طولانی کوتاه مدت برابر با ۳.۴ درصد است، که پایین ترین مقدار را در میان روش های بررسی شده دارد و نشان دهنده توانایی مدل در بازتولید دقیق رفتار مصرفی دوره گذشته است. همچنین، خطای میانگین مربعات ۳ درصد و ضریب تعیین حدود ۰/۹۶ است. این نتیجه ناشی از قدرت این روش در یادگیری وابستگی های بلندمدت و الگوهای زمانی پیچیده است.

جدول ۱۰- پیش بینی مصرف برق در زنجیره تولید فولاد با استفاده از روش حافظه طولانی کوتاه مدت برای سناریوی ادامه روند موجود

سال	۱۴۰۲	۱۴۰۶	۱۴۱۰	۱۴۱۵
آگلومراسیون	۴۹۶۶.۰۰	۶۷۸۰.۴۰	۹۶۰۶.۹۴	۱۵۴۵۱.۴۳
گندله سازی	۳۲۱۷.۰۰	۴۴۸۷.۸۰	۶۴۷۷.۴۶	۱۰۶۱۵.۱۸
آهن اسفنجی	۴۴۰۹.۰۰	۵۹۱۰.۴۹	۷۹۵۰.۲۲	۱۱۵۵۷.۰۰
کوره بلند- اکسیژن پایه	۲۳۸۸۲.۱۴	۲۹۹۷۷.۴۵	۳۷۹۵۲.۲۴	۵۱۴۶۲.۹۰
کوره قوس الکتریکی	۹۵۲.۸۶	۱۱۹۶.۰۵	۱۵۱۴.۲۳	۲۰۵۳.۲۸
مجموع	۳۷۴۲۷.۰۰	۴۸۳۵۲.۱۹	۶۳۵۰۱.۰۹	۹۱۱۳۹.۸۰

نتایج مقایسه‌ای سه مدل ارائه شده در جدول ۱۳، به وضوح برتری مدل‌های هوش مصنوعی را نسبت به روش آماری سنتی نشان می‌دهد. مدل حافظه طولانی کوتاه مدت با کمترین خطای مطلق و بالاترین ضریب تعیین، دقیق‌ترین ابزار برای شبیه‌سازی روند آتی مصرف شناخته شد. این مدل، با در نظر گرفتن وابستگی‌های زمانی بلندمدت و اثرات تجمعی بهبود فناوری، کمترین مقدار مصرف در سال ۱۴۱۵ را تحت تمامی سناریوها پیش‌بینی می‌کند. مدل تقویت‌گرادیانی نیز اگرچه از نظر دقت در رده میانی قرار دارد، اما با قابلیت تفسیرپذیری بالاتر در تحلیل اهمیت متغیرها، بینش ارزشمندی برای شناسایی عوامل کلیدی مؤثر بر مصرف ارائه می‌دهد. در مقابل، مدل آماری مبتنی بر مصرف ویژه انرژی به دلیل ماهیت خطی و ناتوانی در ثبت پویایی‌های پیچیده، تمایل به بیش‌برآورد^۱ مصرف دارد.

جدول ۱۳- عملکرد مدل‌های پیش‌بینی و نتایج مصرف برق در سال ۱۴۱۵ (تراوات ساعت)

شاخص‌های خطا			
مدل	MAPE (%)	RMSE (%)	R ²
آماري	۹٫۸	۰٫۰۵	۰٫۹۱
تقویت‌گرادیانی	۶٫۴	۰٫۰۴	۰٫۹۲۵
حافظه طولانی کوتاه مدت	۳٫۴	۰٫۰۳	۰٫۹۶
مصرف پیش‌بینی شده (TWh)			
مدل	سناریو ادامه روند موجود	سناریو خوش‌بینانه ۱	سناریو خوش‌بینانه ۲
آماري	۱۰۲٫۰۷	۸۷٫۲	۸۵٫۳۱
تقویت‌گرادیانی	۹۵٫۱۸	۸۰٫۴۴	۷۷٫۲۸
حافظه طولانی کوتاه مدت	۹۱٫۱۴	۷۷٫۵۹	۷۳٫۱۵

۸- بحث

یافته‌های این پژوهش، ابعاد مختلفی از چالش کارایی انرژی در صنعت فولاد ایران و مسیرهای پیش‌روی آن را روشن می‌سازد. در این بخش، به تحلیل عمیق‌تر نتایج، بررسی حساسیت مدل‌ها و شناسایی موانع می‌پردازیم.

۸-۱- برتری مدل حافظه طولانی کوتاه مدت و تفسیر آن

عملکرد برتر شبکه عصبی حافظه طولانی کوتاه مدت در پیش‌بینی مصرف (با کمترین میانگین درصد خطای مطلق و بیشترین ضریب تعیین) را می‌توان به ماهیت ذاتی داده‌های مصرف انرژی در صنایع سنگین نسبت داد. مصرف برق در این صنعت نه تنها تابعی از حجم تولید است، بلکه تحت تأثیر «حافظه بلندمدت» ناشی از عواملی مانند: (الف) تأخیر زمانی بین سرمایه‌گذاری در فناوری‌های جدید و

ظهور تأثیر کامل آن در آمار مصرف، (ب) اثر تجمعی بهینه‌سازی‌های کوچک اما مستمر، و (ج) الگوهای رفتاری و مدیریتی پایدار در واحدهای تولیدی است. روش حافظه طولانی کوتاه مدت به واسطه ساختار دروازه‌های خود، قادر به یادگیری این وابستگی‌های زمانی با تأخیر بلندمدت است، در حالی که مدل‌های مبتنی بر درخت مانند تقویت‌گرادیانی (با وجود قدرت در مدل‌سازی روابط غیرخطی) و مدل خطی آماری، فاقد این قابلیت تفسیر پویای زمانی هستند.

۸-۲- تحلیل حساسیت و عدم قطعیت‌ها

اگرچه سناریوهای خوش‌بینانه کاهش چشم‌گیر مصرف را نشان می‌دهند، اما نتایج نسبت به مفروضات کلیدی حساس هستند. یک تحلیل حساسیت ساده بر روی پارامتر «نرخ رشد سالانه تولید» در سناریوی خوش‌بینانه دوم نشان می‌دهد که تغییر $\pm ۰/۵$ درصدی در این نرخ (از فرض پایه ۴٫۵٪ به ۴٪ یا ۵٪)، می‌تواند مقدار مصرف پیش‌بینی‌شده سال ۱۴۱۵ را بین $4 \pm$ تا ۶ تراوات ساعت تغییر دهد. این حساسیت بالا بر اهمیت دقت در برنامه‌ریزی ظرفیت‌های آتی تولید به عنوان پیش‌نیازی برای هرگونه پیش‌بینی انرژی تأکید می‌کند.

۸-۳- موانع اجرایی کردن سناریوهای خوش‌بینانه

دستیابی به پتانسیل شناسایی شده مستلزم عبور از موانع عمده‌ای است:

موانع اقتصادی: نرخ بازده داخلی پروژه‌های نوسازی فناوری‌های انرژی‌بر در شرایط نرخ ارز و نرخ سود بانکی فعلی، اغلب برای سرمایه‌گذاران خصوصی جذاب نیست.

موانع فنی-زیرساختی: انتقال به فناوری‌های بهینه (مانند کوره‌های قوس الکتریکی با پیش‌گرمایش قراضه یا بازیابی گرمایی از گازهای خروجی) غالباً نیازمند ارتقای همزمان شبکه برق و زیرساخت‌های گاز کارخانه است که سرمایه‌گذاری اولیه را افزایش می‌دهد.

موانع اطلاعاتی و مدیریتی: فقدان سیستم‌های پایش آنلاین انرژی در سطح جزئی در بسیاری از واحدهای قدیمی، شناسایی دقیق نقاط اتلاف را با مشکل مواجه می‌سازد.

۹- نتیجه‌گیری

این مطالعه به تحلیل جامع پتانسیل صرفه‌جویی انرژی الکتریکی و پیش‌بینی روند مصرف در صنعت آهن و فولاد ایران پرداخته است. محاسبات انجام‌شده بر پایه داده‌های واقعی سال ۱۴۰۲، وجود پتانسیل عظیم صرفه‌جویی به میزان ۶ تا ۸٫۴ تراوات ساعت در سال را تأیید می‌کند که عمدتاً در بخش‌های پایانی زنجیره تولید، به‌ویژه کوره قوس الکتریکی، متمرکز است.

مقایسه عملکرد سه مدل پیش‌بینی (آماري، تقویت‌گرادیانی و حافظه طولانی کوتاه مدت) نشان داد که مدل‌های هوش مصنوعی به‌ویژه شبکه عصبی حافظه طولانی کوتاه مدت، به دلیل توانایی در یادگیری وابستگی‌های غیرخطی و بلندمدت، برتری چشمگیری در دقت پیش‌بینی دارند. برآورد روش حافظه طولانی کوتاه مدت حاکی از آن است که در صورت تداوم روند فعلی (سناریوی ادامه روند موجود)، فشار مصرف برق این صنعت بر شبکه ملی تا سال ۱۴۱۵ به‌طور قابل

¹ Overestimation

[۱۶] سعادت طرقي م، نباتي ا. تحليل ترموديناميكي (انرژی و انگرژی) یک سیستم پیشنهادی مبتنی بر ترموالکتریک جهت بازیافت گرما از سرباره مذاب در صنعت فولاد. مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز. ۱۴۰۱. د. ۵۲، ش. ۲، ص ۱۹۳-۲۰۱.

[17] Iron and steel-Energy consumption criteria in production processes, Iranian national standardization organization (INSO 9653), 1st Revision, Feb. 2013.

[18] Iranian fuel conservation optimization company, (<https://ifco.ir/index.php/> - کاهش-مصرف-انرژی-در- (صنایع-آهن-و-فولاد).

[19] Stock monthly magazine (<https://tsemag.ir/>-تحلیل-صنعت-فولاد- (در-ایران).

[20] Geng Z, Gao H, Wang Y, Han Y, Zhu Q. Energy saving analysis and management modeling based on index decomposition analysis integrated energy saving potential method: Application to complex chemical processes. Energy Conversion and Management. 2017; 145:41-52.

پیوست الف: معماری مدل ها و ابرپارامترهای نهایی

به منظور اطمینان از بازتولیدپذیری نتایج، مشخصات کامل معماری شبکه حافظه طولانی کوتاه مدت و پارامترهای نهایی مدل تقویت گرادیانی در جدول های زیر ارائه شده اند. انتخاب این تنظیمات بر اساس جستجوی شبکه ای محدود و اعتبارسنجی متقاطع زمان محور انجام شده است.

جدول الف-۱. ابرپارامترهای نهایی مدل تقویت گرادیانی

پارامتر	مقدار نهایی
max_depth	۵
n_estimators	۶۰۰
learning_rate	۰٫۰۴۵
subsample	۰٫۸
colsample_bytree	۰٫۸
min_child_weight	۳
gamma	۰
reg_lambda	۱
reg_alpha	۰
gbtree	booster

جدول الف-۲. معماری و تنظیمات مدل حافظه طولانی کوتاه مدت

مؤلفه	مقدار / توضیح
تعداد لایه ها	۳ لایه + LSTM یک لایه Dense
لایه LSTM اول	۶۴ واحد
لایه LSTM دوم	۳۲ واحد
لایه LSTM سوم	۱۶ واحد
لایه خروجی	Dense با ۱ نرون
lookback	۳ سال
نرخ یادگیری	۰٫۰۰۱ (Adam)
تابع فعال سازی	ReLU
dropout	۲٫۰

توجهی افزایش خواهد یافت.

به عنوان مسیر تحقیقات آینده، ادغام تحلیل های اقتصادی (هزینه-فایده) با ارزیابی فنی حاضر، در نظر گرفتن اثر همزمان سیاست های کربن زدایی، و بسط مدل ها به سطح خرد (کارخانه محور) پیشنهاد می شود. در نهایت، این پژوهش تأکید می کند که تحقق پتانسیل صرفه جویی شناسایی شده نه یک انتخاب، بلکه یک ضرورت راهبردی برای تضمین رقابت پذیری، امنیت انرژی و تحقق اهداف توسعه پایدار در صنعت آهن و فولاد ایران است.

۱۰- منابع

- [1] Studies of the country's comprehensive steel plan, IMIDRO, Brief report on 2023.
- [2] <https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures/world-steel-in-figures-2025/>.
- [3] Iranian fuel conservation optimization company, https://ifco.ir/index.php?option=com_content&view=article&id=9330&catid=376
- [4] Hasanbeigi A, Arens M, Price L. Alternative emerging ironmaking technologies for energy-efficiency and carbon dioxide emissions reduction: a technical review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014; 33: 645-58.
- [5] Nyakudya Ncube RY, Ayomoh M. Optimisation strategies and technological advancements for sustainable direct reduction iron production—a systematic review. Sustainability. 2025; 5:17(5): 2266.
- [6] Trinca A, Vilardi G, Verdone N. Hybrid hydro-pyrometallurgy route for green steel: Design and cost analysis of innovative and negative carbon dioxide emissions industrial-scale plants with different iron ore grades. Energy Conversion and Management. 2025; 15: 332: 119776.
- [7] Cui, J.; Meng, G.; Zhang, K.; Zuo, Z.; Song, X.; Zhao, Y.; Luo, S. Research Progress on Energy-Saving Technologies and Methods for Steel Metallurgy Process Systems—A Review. Energies; 2025; 18, 2473.
- [8] Gao, Cheng-kang, Hong-ming Na, Kaihui Song, Fan Tian, Natalia Strawa, and Tao Du. Technologies-based potential analysis on saving energy and water of China's iron and steel industry. Science of the Total Environment. 2020; 169: 134225.
- [9] Na H, Du T, Sun W, He J, Sun J, Yuan Y, Qiu Z. Review of evaluation methodologies and influencing factors for energy efficiency of the iron and steel industry. International Journal of Energy Research. 2019; 43(11):5659-77.
- [10] R. Wang, L. Jiang, Y. Wang, A.P. Roskilly, Energy saving technologies and mass-thermal network optimization for decarbonized iron and steel industry: A review. Journal of Cleaner Production. 2020; 274:299.
- [11] Lu S, Lu C, Tseng K, Chen F, Chen C. Energy-saving potential of the industrial sector of Taiwan. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013; 21:674-83.
- [12] An, Runying, Biying Yu, Ru Li, and Yi-Ming Wei. Potential of energy savings and CO2 emission reduction in China's iron and steel industry. Applied energy. 2018; 226: 862-880.
- [13] He K, Wang L, Zhu H, Ding Y. Energy-saving potential of China's steel industry according to its development plan. Energies. 2018; 16; 11:948.
- [14] Olanrewaju, O. A., Jimoh, A. A., & Kholopane, P. A. Integrated IDA-ANN-DEA for assessment and optimization of energy consumption in industrial sectors. Energy. 2012; 16: 629-635.
- [15] Olanrewaju, O. A., Jimoh, A. A., & Kholopane, P. A. Integrated Index decomposition analysis-artificial neural network-data development analysis (IDA-ANN-DEA): Implementation guide. Energy efficiency. 2021; 14: 1-9.

١٦	batch size
٢٠٠	epochs
بله (patience = 20)	early stopping
MSE	معیار خطا
٤٢	seed

In Press