



پژوهش‌نامه ریخته‌گری

مقاله پژوهشی:

مدیریت انرژی الکتریکی در فولادسازی با کوره‌های قوس الکتریک بر اساس میزان مصرف بار با بکارگیری تپ چنجرهای زیر بار

سید محمد رضائیان صلاحی^۱، نبی‌اله رضائی^{۲*}، مجید عباسی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی برق-سیستم‌های قدرت، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران

۳- دانشیار، گروه مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران

* نویسنده مکاتبه کننده: تلفن: ۰۹۱۲۵۵۸۰۱۵۶، بهشهر، صندوق پستی: ۴۸۵۱۸۷۸۱۹۵، E-mail: ramezani@mazust.ac.ir

چکیده:

دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۱۴
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۱۹

مدیریت سمت تقاضا موضوع مهمی است که در سال‌های اخیر به‌طور گسترده مورد بحث و بررسی در صنعت برق قرار گرفته است. فرآیندهای صنعتی مانند تولید فولاد به‌طور کلی برنامه‌ریزی پیچیده‌ای دارند. در بسیاری از کشورهای صنعتی این کارخانه‌ها به‌طور مستمر در برنامه‌های منابع پاسخ‌گوی تقاضا، شرکت می‌کنند. کوره‌های قوس الکتریکی در کارخانه‌های تولید فولاد به‌عنوان پتانسیل بالایی برای مدیریت سمت تقاضا شناخته می‌شوند. روشی که به‌طور معمول برای مدل‌سازی، بهینه‌سازی و به‌طور کلی برنامه‌ریزی چنین کارخانه‌هایی استفاده می‌شود شبکه کار-منابع (RTN) است. برای رفع مشکل دست‌یابی به جواب بهینه استفاده از یک الگوریتم فرا ابتکاری مبتنی بر بکارگیری تپ چنجرهای زیر بار (OLTC) پیشنهاد می‌شود. به منظور مقایسه مطلوب از دو الگوریتم ژنتیک (GEN) و ازدحام ذرات (PSO) برای این منظور استفاده شده است. مطالعات موردی برای نشان دادن تأثیر روش پیشنهادی روی برنامه‌ریزی روزانه یک کارخانه فولاد انجام شد. به‌طور کلی نتایج نشان داد که در نظر گرفتن تپ چنجرهای زیر بار در برنامه‌ریزی کارخانه فولاد سبب بهبود قابل توجهی در کاهش هزینه‌های تمام شده روزانه آن می‌شود.

واژه‌های کلیدی:

صنایع فولاد،
کوره‌های قوس الکتریکی،
مدیریت سمت تقاضا،
تپ چنجرهای آنالین بار،
الگوریتم فرا ابتکاری،

ارجاع به این مقاله:

سید محمد رضائیان صلاحی، نبی‌اله رضائی، مجید عباسی، مدیریت انرژی الکتریکی در فولادسازی با کوره‌های قوس الکتریک بر اساس میزان مصرف بار با بکارگیری تپ چنجرهای زیر بار، پژوهش‌نامه ریخته‌گری، بهار ۱۳۹۹، جلد ۴، شماره ۱، صفحات ۵۱-۶۷.
شناسه دیجیتال: (DOI): 10.22034/FRJ.2020.218472.1114 -

۱- مقدمه

برای تشویق مصرف‌کنندگان به منظور تغییر رفتار خود در مصرف برق استفاده و از این طریق در حفظ تعادل میان عرضه و تقاضا و کاهش فشارهای وارده بر شبکه برق کمک شایانی نمایند. در برخی کارخانه‌های صنعتی بزرگ، هزینه مصرف انرژی الکتریکی بخش قابل توجهی از هزینه‌های عملیاتی را به خود اختصاص می‌دهد. از این رو، اعمال DSM روی بارهای مصرفی برق این کارخانه‌ها از اهمیت بالاتری برخوردار است. این

در سال‌های اخیر موضوع "مدیریت سمت تقاضا" (DSM) به‌طور گسترده مورد توجه محققین صنعت برق قرار گرفته است. قابلیت انعطاف‌پذیری بارهای الکتریکی در شبکه توزیع انرژی الکتریکی به اثبات رسیده و این موضوع می‌تواند به‌منظور ارائه خدماتی ارزشمند در شبکه برق مورد استفاده قرار گیرد [۱-۳]. از این رو، شرکت‌های توزیع برق می‌توانند از انگیزه‌های اقتصادی

^۱ Demand-Side Management (DSM)

[۱۱] و کاهش هزینه برق [۱۲-۱۳] باعث اضافه شدن قیود بیشتر و پیچیدگی این هدف شده است.

امروزه زمان‌بندی کارخانه ریخته‌گری فولاد و یا فولادسازی یکی از سخت‌ترین فرآیندهای صنعتی برای برنامه‌ریزی است، زیرا تولید فولاد یک فرایند مقیاس بزرگ، چند مرحله‌ای و چند محصولی است که شامل تجهیزات موازی و محدودیت‌های حیاتی مربوط به تولید می‌شود [۱۴]. روشی که به‌طور گسترده‌ای برای مدل‌سازی، بهینه‌سازی و به‌طور کلی برنامه‌ریزی چنین کارخانه‌هایی استفاده می‌شود، شبکه کار-منابع^۴ (RTN) است.

شبکه RTN یک چارچوب یک‌پارچه برای توصیف و حل انواع مشکلات برنامه‌ریزی فرآیند است. این کار توسط پروفیسور Costas Pantelides در مرکز مهندسی سیستم‌های پردازش، کالج علوم، فناوری و پزشکی ایمپریال در لندن، انگلستان ساخته شده است [۱۵]. RTN امکان توسعه فرمول‌های برنامه‌نویسی ساده ریاضی را بر اساس توصیف یکنواخت کلیه منابع موجود فراهم می‌کند. RTN تمام فرایندها را به‌عنوان نمودارهای دو طرفه متشکل از دو نوع گره در نظر می‌گیرد: منابع و کارها. یک کار عملی است که مجموعه مشخصی از منابع را به مجموعه دیگری تبدیل می‌کند. مفهوم منابع کاملاً کلی است و کلیه مواردی را که در مراحل فرآیند درگیر هستند از جمله مواد (مواد اولیه، واسطه‌ها و محصولات)، تجهیزات پردازش و ذخیره‌سازی (مخازن، راکتورها و غیره)، تأسیسات (اپراتورها، بخار و غیره) و همچنین شرایط تجهیزات (سالم یا نیاز به تعمیر) را در بر می‌گیرد. «فرمول‌های ریاضی» مبتنی بر RTN با توجه به نوع فرآیند می‌تواند به شکل فرمول‌های «زمان گسسته» یا «زمان پیوسته» باشد [۱۶-۱۸].

در این مقاله، یکی از مدل‌های RTN موجود در مرجع [۱۳] برای انجام مطالعه و بهینه‌سازی هزینه برق کارخانه فولاد نمونه در نظر گرفته شده است. در این مدل علاوه بر در نظر گرفتن انتقال کار به دوره‌های زمانی با برق ارزان‌تر، به‌منظور افزایش انعطاف‌پذیری بیشتر برای کاهش هزینه برق تمام شده کارخانه، قابلیت تنظیم OLTC کوره مورد بررسی قرار می‌گیرد. تغییر در تپ OLTC سبب تغییر در توان ذوب EAF می‌گردد. کارهای قبلی صرفاً با هدف بهینه‌کردن برنامه‌ریزی کارخانه بدون در نظر گرفتن چنین انعطاف‌پذیری انجام گرفته است. هرچه انعطاف‌پذیری کارخانه بیشتر شود، منحنی بار خود را بهتر تنظیم کرده و سرمایه بیشتری را ذخیره می‌کند. با این حال مشاهده شده است که اضافه نمودن OLTC به گونه‌ای سبب افزایش در

کارخانه‌ها می‌توانند هزینه برق خود را با تغییر دادن میزان مصرف انرژی الکتریکی خود با توجه به قیمت انرژی مبتنی بر زمان، کاهش دهند.

مطالعه اخیر اثربخشی DSM را برای صنایع بزرگی چون صنایع فولاد با کوره‌های قوس الکتریکی، الکترولیز آلومینیم و آسیاکاری سیمان در بازارهای برق آلمان مورد بررسی قرار داده و نتیجه حاصل این است که این صنایع به‌طور بالقوه تأثیر قابل توجهی بر بازارهای برق دارند [۴].

به‌طور کلی بارهای صنعتی در مقایسه با حوزه‌های دیگر مانند ساختمان‌ها و مناطق مسکونی بخش بزرگی از کل مصرف بار شبکه را تشکیل می‌دهند [۵-۶]. بارهای صنعتی به‌عنوان منابع پاسخ‌گوی تقاضا^۱ (DR) دارای مزایای زیر هستند:

(۱) میزان مصرف انرژی توسط یک کارخانه صنعتی و تغییرات توان آن به‌طور کلی بسیار زیاد است [۷].

(۲) زیرساخت‌های کنترل، ارتباطات و مشارکت در بازار که باعث DR می‌شود، معمولاً در کارخانه‌ها نصب شده است. حتی مهم‌تر از آن، برخی از کارخانه‌های صنعتی قادر هستند در زمانی کوتاه و دقیق تنظیمات مصرف برق خود را ارائه دهند [۸-۹].

(۳) کارخانه‌های صنعتی به‌طور کلی به لحاظ اقتصادی قابلیت تحریک بیشتری را دارند تا به‌طور فعال به‌عنوان منابع DR شرکت نمایند.

فرآیندهای صنعتی مانند تولید فولاد به‌طور کلی برنامه‌ریزی پیچیده‌ای دارند. در بسیاری از کشورهای صنعتی این کارخانه‌ها به‌طور مستمر در برنامه‌های DR شرکت می‌کنند. کوره‌های قوس الکتریکی^۲ (EAF) در کارخانه‌های تولید فولاد به‌عنوان پتانسیل بالایی برای DSM شناخته شده‌اند، زیرا این کوره‌ها نه تنها حجم زیادی از انرژی الکتریکی مصرف می‌نمایند، بلکه نسبت به تغییر میزان مصرف توان خود نسبتاً انعطاف‌پذیر هستند [۴]. کوره‌های قوس الکتریکی برای انجام کار نیاز به ترانسفورماتور دارند و لذا میزان مصرف برق آن‌ها می‌تواند با تنظیم تپ چنجرهای زیر بار^۳ (OLTC) بسیار سریع تغییر کند. از اهداف سنتی برنامه‌ریزی بهینه کارخانه‌های فولاد، به حداقل رساندن زمان ساخت است. به‌عبارت دیگر، تولید در سریع‌ترین زمان ممکن برای بهره‌برداری بیشتر از امکانات سرمایه‌گذاری شده است. با این حال، در سال‌های اخیر، مشارکت کارخانه‌های فولاد در DSM، مانند مدیریت پیک بار [۱۰]، ردیابی منحنی انرژی از پیش تعیین‌شده

^۳ On-Load Tapchangers (OLTC)

^۴ Resource-Task Network (RTN)

^۱ Demand Response (DR)

^۲ Electric Arc Furnace (EAF)

مسئله برنامه‌ریزی، سه فرض را در مورد کوره قوس الکتریکی در نظر می‌گیرد:

(۱) کوره قوس الکتریکی می‌تواند مصرف انرژی ساعتی خود را در محدوده‌های داده شده بدون کاهش بازده ذوب (تن خروجی در هر مگاوات ساعت برق) و یا به خطر انداختن عملیات ایمنی تغییر دهد.

(۲) انرژی کل مورد نیاز برای ذوب شدن هر شارژ (ذوب) ثابت است که بر اساس توان و زمان پردازش نامی معین می‌شود.

(۳) زمان پردازش واقعی به میزان مصرف توان اکتیو بستگی دارد و ممکن است در یک حد مشخص متفاوت باشد.

این مقاله با استفاده از فرمول RTN زمان گسسته، به مسئله برنامه‌ریزی کارخانه فولاد رسیدگی می‌شود. سختی اصلی مسئله‌های برنامه‌ریزی صنعتی به تعداد زیاد متغیرهای گسسته در مدل برمی‌گردد. برای مثال، نیاز به چندین هزار متغیر دودویی برای نشان دادن برنامه‌ریزی شروع کار در یک کارخانه فولاد ضروری است. به‌طور کلی، یک مدل دقیق‌تر که روند را مناسب‌تر نشان می‌دهد، نیاز به تعداد بیشتری از متغیرها دارد که سبب پیچیدگی در حل مسئله بهینه‌سازی می‌شود.

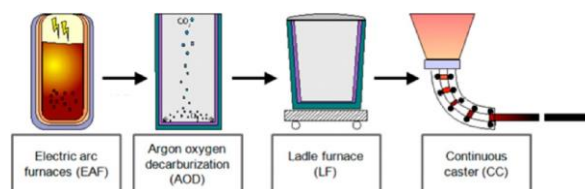
۳- مدل پایه (RTN 1) [۱۳]

مدل پایه RTN با تغییر زمان فعالیت‌های تولید، هزینه برق را بهینه می‌کند. به این ترتیب، توان ذوب EAF همیشه برابر با مقدار نامی است. واحدهای موازی برای سه مرحله اول یکسان هستند، درحالی‌که مرحله ریخته‌گری آن‌ها به‌صورت جداگانه در نظر گرفته می‌شود، زیرا قالب‌های متفاوتی برای ریخته‌گری محصولات خاص طراحی شده است. همچنین این مدل از تفاوت در زمان انتقال مابین دو مرحله متوالی واحدها چشم‌پوشی می‌کند: واحدهای موازی در همان مرحله ممکن است دور از یکدیگر قرار بگیرند، به‌طوری‌که زمان حمل‌ونقل بین مراحل متوالی وابسته به مکان دقیق واحدها در مرحله قبل و بعد دارد. زمان حمل‌ونقل همچنین به حالت حمل‌ونقل نیز بستگی دارد (به‌عنوان مثال توسط ریل یا جرثقیل). اگر فرضاً ۳ واحد برای مرحله اول و ۴ واحد برای مرحله دوم وجود داشته باشد، بنابراین ۱۲ حالت حمل‌ونقل بار ممکن است وجود داشته باشد. RTN پایه برای ساده‌سازی فرض می‌کند که انتقال‌ها مستقل از مکان‌های واحدها هستند، که با این فرض این احتمال وجود می‌آید که تخمین انتقال کم یا بیشتر از حد زمان انتقال واقعی

زمان پردازش می‌شود که قابل چشم‌پوشی نیست. این مقاله به دنبال بر طرف نمودن این مشکل است.

۲- بیان مسئله

همان‌طور که در شکل (۱) مشهود است، فرآیند تولید فولاد در کارخانه نمونه مرجع [۱۳] به چهار مرحله اساسی تقسیم می‌شود: در ابتدای امر قراضه‌های جامد فلزی (از فولاد بازیافتی) در کوره قوس الکتریکی (EAF) ذوب شده و سپس کربن‌زدایی فلز مذاب با استفاده از دمش گاز اکسیژن و آرگون (AOD^۱) انجام می‌شود. پس از آن، فلز مذاب در کوره پاتیلی^۲ (LF) تخلیه شده و دما و ترکیب شیمیایی نهایی آن کنترل می‌شود. در نهایت برای ریخته‌گری، فلز مذاب به سمت ماشین ریخته‌گری مداوم^۳ منتقل و در تاندیش تخلیه می‌شود. مذاب از تاندیش با دبی کنترل شده به داخل قالب ریخته‌گری مداوم ریخته می‌شود. مذاب در داخل قالب مسی آب‌گرد، منجمد می‌شود.



شکل ۱- فرآیندهای تولید فولاد [۱۳]

سه مرحله اول در حالت دسته‌ای^۴ عمل می‌کنند؛ به این معنی که مقدار مشخصی از قراضه در یک زمان پردازش می‌شود. هر مقدار از این قراضه که شارژ می‌شود، یک ذوب^۵ نامیده می‌شود. با این حال، مرحله ریخته‌گری به‌طور مداوم عمل کرده و برخی از محدودیت‌های پردازش حیاتی را دارد. برای نمونه با توجه به شرایط ریخته‌گری، تنها می‌توان تعداد محدودی ذوب از هر جداره کوبی نسوز کوره‌ها تهیه نمود و پس از آن نیاز به تعمیر و نگهداری و تغییر قالب ریخته‌گری و یا جداره‌های کوره، پاتیل و یا تاندیش است.

همان‌طور که بیان شد در یک کارخانه فولاد، بیشتر انرژی الکتریکی توسط کوره قوس الکتریکی در مرحله ذوب مصرف می‌شود (بیش از ۵۵ درصد). از این رو، افزودن انعطاف‌پذیری مصرف برق در این فرایند، بیشترین تأثیر را در هزینه کلی برق کارخانه دارد.

^۴ Batch Mode

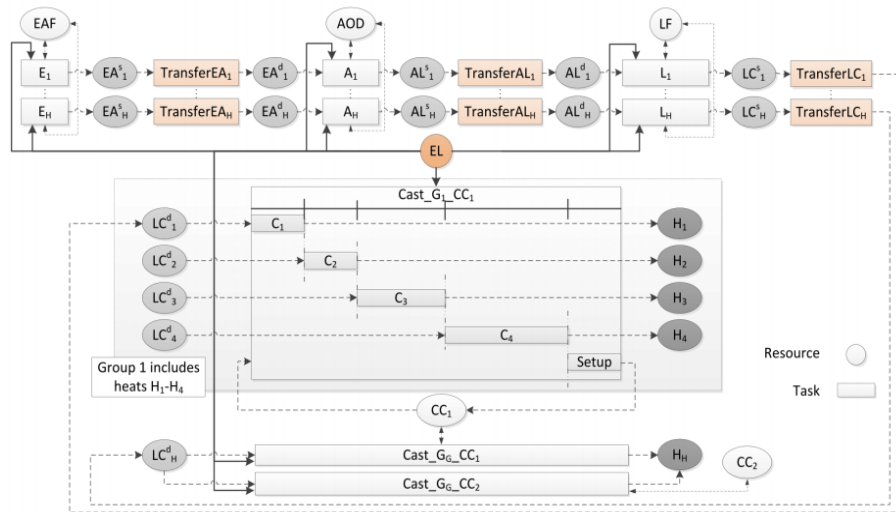
^۵ Heat

^۱ Argon Oxygen Decarburization (AOD)

^۲ Ladle Furnace (LF)

^۳ Continuous Casters (CC)

شود. با توجه به این فرضیه‌ها، RTN پایه یک مدل نسبتاً ساده با محاسبات سریع و نتایج منطقی به دست می‌آورد.



شکل ۲- مدل RTN پایه برای برنامه‌ریزی کارخانه فولاد [۱۳]

به یک قالب اختصاص داده می‌شود. در نتیجه، تنها یکی از این دو کار برنامه‌ریزی می‌شود، درحالی‌که دیگری هرگز اتفاق نمی‌افتد.

نکته: پس از انتقال ذوب h به مرحله بعدی، این احتمال وجود دارد که ذوب h قبل از دنبال کردن پردازش مرحله اصلی بعدی به دلیل عدم دسترسی بودن تجهیز آن مرحله و یا برای دستیابی به قیمت پایین‌تر برق نیاز به صبر داشته باشد.

منابع مورد نیاز شامل تجهیزات، برق، محصولات میانی^۱ و محصولات نهایی است. محصولات میانی از یک مرحله به مرحله بعد منتقل می‌شود. به‌عنوان مثال، EA_h^d محصول میانی از ذوب h واقع در مقصد انتقال (بالانویس d) را نشان می‌دهد که در انتظار ورود به مرحله AOD به‌منظور پردازش است؛ درحالی‌که EA_h^s نشان‌دهنده یک محصول میانی است که در ابتدای انتقال (بالانویس s) قرار دارد که در انتظار انتقال است. برخی از تعاریف مورد استفاده در مراحل اصلی پردازش (EAF، AOD، LF و CC) در جدول (۱) بیان شده است.

پردازش کارها به‌طور پیوسته به منبع برق (EL) وابسته است اما با منابع دیگر به‌صورت گسسته رابطه دارد. ارتباط گسسته، برای مثال، ذوب h فقط یک بار به یک EAF احتیاج دارد و پس از انجام کار روی آن، منبع (تجهیز) EAF برای انجام کار روی ذوب دیگر آزاد می‌شود.

تعریف زمان در روش RTN پایه به شکل ۳ صورت می‌پذیرد:

$$1. \delta: \text{مدت یک توقف زمانی بر حسب دقیقه}$$

RTN پایه در شکل (۲) نشان داده شده است. کارهای در نظر گرفته شده در این مدل شامل چهار مرحله اصلی تولید، یعنی EAF، AOD، LF و ریخته‌گری در CC و همچنین کارهای انتقال بین مراحل اصلی است. هر کار توسط i نشان داده شده و متغیر باینری $N_{i,t}$ شروع کار i را در زمان t نشان می‌دهد. برای مثال $N_{i,t} = 1$ بیانگر شروع کار i در زمان t است. برای کارهای اصلی در سه مرحله اول و تمام کارهای انتقال، برای هر ذوب h یک کار وجود دارد. به‌عنوان مثال، اگر H محصول نهایی وجود داشته باشد که باید تولید شود، پس باید H کار ذوب برنامه‌ریزی شود: یک کار ذوب برای هر محصول. بنابراین کارها برای سه مرحله اول به ترتیب توسط i_{Eh} ، i_{Ah} و i_{Lh} مشخص می‌شود. به‌طور مشابه، کارهای انتقال توسط i_{EAh} ، i_{ALh} و i_{LCh} مشخص می‌شود. برخلاف سه مرحله اول که بین واحدهای موازی از نظر رفتار وجه تمایزی وجود ندارد، مرحله ریخته‌گری واحدهای موازی ممکن است رفتار متفاوتی داشته باشند. از این‌رو، باید هر کار ریخته‌گری را به یک گروه قالب خاص اختصاص داد. کار ریخته‌گری توسط $i_{C_{g,u}}$ مشخص شده است. با یک جفت شاخص (g, u) ، که g نام گروه ریخته‌گری و u یک قالب مخصوص است. این به این دلیل است که کار $i_{C_{g_1,u_1}}$ متفاوت از کار $i_{C_{g_2,u_2}}$ است، به‌عنوان مثال مدت زمان‌های این دو کار به دلیل زمان‌های متفاوت قالب‌گیری‌ها برابر نیست. بنابراین، باید هر دو $i_{C_{g_1,u_1}}$ و $i_{C_{g_2,u_2}}$ را در مسئله فرمول‌بندی در نظر گرفت تا همه تخصیص‌های احتمالی به قالب‌ها را در نظر گرفته شود. البته، ریخته‌گری ذوب h در نهایت فقط

^۱ Intermediate Products

۲. تعداد توقف‌های زمانی در یک دوره ۲۴ ساعت است که از طریق رابطه (۱) به دست می‌آید. همچنین $t \in T$ بیان‌کننده این است که در کدام توقف زمانی قرار دارد، برای مثال $t=2$ یعنی برنامه در توقف زمانی ۲ قرار دارد. شکل (۳) رابطه میان زمان‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۱- تعاریف مورد استفاده در مراحل تولید فولاد [۱۳]

ردیف	تعاریف	توضیحات
۱	EA^s	محصول میانی تولید شده در مرحله EAF که در ابتدای مرحله انتقال از EAF به AOD است.
۲	EA^d	محصول میانی تولید شده در مرحله EAF که در انتهای مرحله انتقال از EAF به AOD بوده و در انتظار ورود به AOD است.
۳	AL^s	محصول میانی تولید شده در مرحله AOD که در ابتدای مرحله انتقال از AOD به LF است.
۴	AL^d	محصول میانی تولید شده در مرحله AOD که در انتهای مرحله انتقال از AOD به LF بوده و در انتظار ورود به LF است.
۵	LC^s	محصول میانی تولید شده در مرحله LF که در ابتدای مرحله انتقال از LF به CC است.
۶	LC^d	محصول میانی تولید شده در مرحله LF که در انتهای مرحله انتقال از LF به CC بوده و در انتظار ورود به CC است.
۷	EL	انرژی الکتریکی
۸	H	محصول نهایی

۴- تابع هدف و محدودیت‌های مسئله برنامه‌ریزی

کارخانه فولاد به روش RTN پایه

۴-۱- تابع هدف

تابع هدف باید سه موضوع را در بر گیرد:

(۱) مدت زمان تولید به حداقل برسد،

(۲) هزینه مصرف برق روزانه به حداقل خود دست یابد و

(۳) انحراف از منحنی بار از پیش تعیین شده به حداقل برسد.

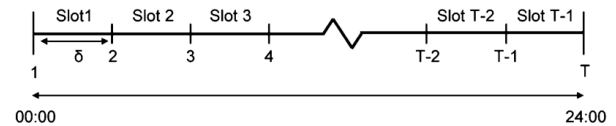
با توجه به موارد مطرح شده تابع هدف به شرح زیر است:

$$\min \sum_{hr} price_{hr} \sum_{t \in I_{hr}} \Pi_{EL,t} \quad (3)$$

که در آن پارامتر $price_{hr}$ [\$/MWh] بیان‌کننده قیمت برق ساعتی کارخانه است که توسط شرکت برق تعیین می‌شود. این تابع هدف به دنبال آن است که هزینه انرژی الکتریکی مصرفی کارخانه برای هر ساعت را به حداقل مقدار خود برساند. T_{hr} بیان‌کننده تعداد توقف زمانی است که در ساعت hr وجود دارد. همچنین مقدار $\Pi_{EL,t}$ از طریق رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\Pi_{EL,t} = \sum_i \sum_{\theta=0}^{\tau_i} u_{EL,i,\theta} N_{i,t-\theta} \quad \forall t \quad (4)$$

که در آن سیگما اول بیان‌کننده مجموع تمام کارهایی است در توقف زمانی t انجام می‌شوند و از انرژی الکتریکی مصرفی می‌نمایند و سیگما دومی مربوط به کار i است که هنوز در زمان t در حال انجام است. همچنین متغیر باینری $N_{i,t-\theta}$ بیان‌کننده وضعیت کار i در زمان t است (اگر در حال انجام باشد برابر یک، در غیر این صورت برابر صفر است).



شکل ۳- رابطه میان زمان‌های تعریف شده در روش RTN پایه [۱۳]

$$T = \frac{24 \times 60 \text{ min}}{\delta} \quad (1)$$

۳. نشان‌دهنده مدت زمان انجام کار i بر حسب توقف زمانی است. اگر d_i مبین مدت زمان انجام کار i بر حسب دقیقه باشد از طریق رابطه (۲) مقدار τ_i به دست می‌آید.

$$\tau_i = \frac{d_i}{\delta} \quad (2)$$

همچنین $\theta \in \tau_i$ بیان‌کننده این است که در کدام توقف زمانی از τ_i قرار دارد. برای مثال اگر فرض شود $\delta = 30$ دقیقه است و مدت زمان نامی ذوب h برابر ۸۰ دقیقه باشد. بنابراین، کار ذوب به مدت ۳ ([۸۰ / ۳۰]) توقف زمانی به طول می‌انجامد ($\tau_i = 3$)

۴-۲- محدودیت‌های مسئله

برقراری تعادل میان منابع

$$R_{r,t} = R_{r,t-1} + \sum_i \sum_{\theta=0}^{\tau_i} u_{r,i,\theta} N_{i,t-\theta} + \pi_{r,t} \quad \forall r \notin EL, t \quad (5)$$

این محدودیت به بررسی در دسترس بودن مقدار منبع τ در زمان t می‌پردازد و برای تمام منابع موجود در کارخانه به غیر از منبع انرژی الکتریکی (EL) صادق است. $R_{r,t-1}$ نشان‌دهنده مقدار منبع r در زمان $t-1$ است. $\sum_i \sum_{\theta=0}^{\tau_i} u_{r,i,\theta} N_{i,t-\theta}$ نشان‌دهنده تأثیر منبع r در زمان t بر روی مجموع کارهای در حال انجام است و $\pi_{r,t}$ بیان‌کننده آن است که آیا منبع r در زمان t نیاز به تعمیر و نگهداری دارد یا نه؛ برای مثال $\pi_{CC,5} = -1$ بیان‌کننده آن است که قالب ریخته‌گری ۱ در توقف زمانی ۵ نیاز به تعمیر و نگهداری دارد.

محدودیت‌های عملیاتی

محدودیت‌های عملیاتی (۶)، (۷) و (۸) استفاده می‌شوند تا اطمینان حاصل شود که کارها به تعداد دفعات مورد نظر اجرا می‌شوند. محدودیت‌ها عبارت‌اند از:

$$\begin{aligned} \sum_t N_{i_{Eh},t} &= 1 \quad \forall h \\ \sum_t N_{i_{Ah},t} &= 1 \quad \forall h \\ \sum_t N_{i_{Lh},t} &= 1 \quad \forall h \end{aligned} \quad (6)$$

با استفاده از روابط (۶) این اطمینان حاصل می‌شود که ذوب h تنها یک بار توسط سه مرحله اول (EAF، AOD و LF) پردازش می‌شود. برای مرحله ریخته‌گری، باید بین قالب‌های منحصربه‌فرد تمایز قائل شد هر چند که در نهایت باید یک قالب را برای هر کار اختصاص داد. اگر دارای C تا قالب منحصربه‌فرد و G تا گروه ذوب باشد، پس تعداد کارهای ریخته‌گری ممکن $C \times G$ است. اما تمام کارهای ریخته‌گری در واقع اجرا نمی‌شوند. هر گروه ذوب باید فقط یک بار توسط هر واحد u از قالب‌های موجود در CCs اجرا شود. برای نشان دادن این محدودیت از رابطه (۷) زیر استفاده می‌شود.

$$\sum_{u \in CCs} \sum_t N_{i_{Cg,u},t} = 1 \quad \forall g \quad (7)$$

به‌طور مشابه برای محصول میانی رابطه (۸) برقرار است:

$$\begin{aligned} R_{EA_h^s,t} &= 0 \quad \forall h,t \\ R_{AL_h^s,t} &= 0 \quad \forall h,t \\ R_{LC_h^s,t} &= 0 \quad \forall h,t \end{aligned} \quad (8)$$

برای مثال متغیر $R_{EA_h^s,t}$ می‌تواند مقدار ۰ یا ۱ را اختیار نماید، اگر برابر با ۱ باشد به معنای آن است که محصول میانی EA_h^s در زمان t در انتظار انتقال است. محدودیت فوق باعث ایجاد یک محدودیت دیگر می‌شود و آن محدودیت زمان انتقال برای هر یک از محصولات میانی است.

زمان انتقال محصولات میانی

$$\begin{aligned} \delta \sum_t R_{EA_h^d,t} + \omega_{EA} &\leq W_{EA} \quad \forall h \\ \delta \sum_t R_{AL_h^d,t} + \omega_{AL} &\leq W_{AL} \quad \forall h \\ \delta \sum_t R_{LC_h^d,t} + \omega_{LC} &\leq W_{LC} \quad \forall h \end{aligned} \quad (9)$$

که در آن برای مثال $\delta \sum_t R_{EA_h^d,t}$ ، مجموع توقف‌های زمانی است محصول میانی ذوب h در انتهای مسیر انتقال از EAF به AOD قبل از ورود به مرحله AOD در انتظار باقی می‌ماند. ω_{EA} ، مدت زمان انتقال محصول میانی از EAF به AOD است. W_{EA} ، حداکثر زمانی که محصول میانی بعد خروج از EAF می‌تواند تحمل نماید تا وارد AOD شود. به‌طور کلی این محدودیت‌ها بیان می‌کند که برای هر محصول میانی، زمان انتقال به‌علاوه زمان انتظار باید محدود شود تا تأثیر خنک شدن محصول میانی به حداقل خود برسد چرا که اگر این زمان از یک مقدار بیشتر شود مستلزم آن است که بار دیگر عملیات گرمایش انجام شود که در نتیجه آن هزینه مالی و زمانی را برای کارخانه به دنبال دارد.

تحویل محصول نهایی

$$R_{H_h,t} = 1 \quad \forall h \quad (10)$$

این محدودیت به دنبال پاسخ این سؤال است که آیا ذوب h در پایان افق زمانی (T) تبدیل به محصول نهایی شده است یا نه؟

اعمال سویچینگ OLTC در مدل RTN پایه

(مدل RTN&OLTC)

فرض شود توان ذوب نامی EAF برابر P_{EAF} باشد و همچنین توان ذوب را بتوان میان حدی پایین (P_{EAF}^L) و بالا (P_{EAF}^U) از مقدار نامی آن تنظیم نمود. به‌طوری‌که P_{EAF}^L و P_{EAF}^U به‌عنوان پارامترهای EAF برای همه ذوب‌ها یکسان است. زمان عملیات ذوب نامی برای شماره ذوب h برابر ω_h است. انرژی الکتریکی مورد نیاز برای ذوب شدن ذوب h برابر با $\omega_h \times P_{EAF}$ است. بنابراین زمان ذوب h بین ω_h^L و ω_h^U محدود می‌شود و از طریق رابطه‌های (۱۱) و (۱۲) به دست می‌آید.

ذوب h در زمان t رخ می‌دهد؛ $S_{h,t}=0$ نشان می‌دهد که مرحله ذوب h در زمان t رخ نمی‌دهد.

$$\omega_h^L = (\omega_h \times P_{EAF}) / P_{EAF}^U \quad \text{حداقل زمان ذوب} \quad (11)$$

تکامل حالت ذوب

$$S_{h,t} - S_{h,t-1} = N_{i_{E_h,t}} - N_{i_{EA_h,t}} \quad (18)$$

این محدودیت در هر توقف زمانی به بررسی این نکته که کار ذوب به پایان رسیده است یا نه می‌پردازد.

$$\omega_h^U = (\omega_h \times P_{EAF}) / P_{EAF}^L \quad \text{حداکثر زمان ذوب} \quad (12)$$

این مقدار از نظر توقف زمانی برابر است با:

$$T_h^L = \frac{\omega_h^L}{\delta} \quad \text{حداقل زمان ذوب} \quad (13)$$

الزامات انرژی ذوب

$$\sum_t P_{h,t} \cdot \delta = P \cdot \omega_h \quad (19)$$

این محدودیت بیان می‌کند که انرژی کل مورد نیاز برای ذوب شدن ثابت است و می‌تواند بر اساس مقدار نامی آن محاسبه شود. در واقع مقدار انرژی مصرف شده در طول افق زمانی برابر با مقدار توان در زمان ذوب نامی است. با توجه به محدودیت‌های مطرح شده تابع هدف مسئله به صورت زیر تغییر می‌نماید.

$$T_h^U = \frac{\omega_h^U}{\delta} \quad \text{حداکثر زمان ذوب} \quad (14)$$

فرض تنظیمات OLTC به گونه‌ای تغییر نماید که زمان هر ذوب h بر حسب دقیقه برابر $T_m \delta$ شود، درحالی که T_m یک عدد صحیح مابین T_h^L و T_h^U است و توان ذوب مربوطه برابر $(P_{EAF} \omega_h) / (T_m \delta)$ است. بنابراین می‌توان از طریق رابطه (۱۵) تعداد حالت‌های ذوب h را به دست آورد.

$$M_h = T_h^U - T_h^L + 1 \quad (15)$$

با فرض اینکه OLTC ترانسفورماتور را بتوان برای هر ذوب یک بار تنظیم نمود، بنابراین نرخ توان EAF می‌تواند قبل از ذوب شدن هر ذوب h تغییر کند. لازم به ذکر است که هرگونه تغییر در OLTC در انرژی الکتریکی لازم برای ذوب h تغییری حاصل نمی‌نماید. به همراه این انعطاف‌پذیری چند محدودیت به برنامه اضافه می‌شود. که به شرح زیر است:

مدت زمان ذوب

$$\sum_{t'=t+\tau_h^L}^{t+\tau_h^U} N_{i_{EA_h,t'}} \geq N_{i_{E_h,t}} \quad \forall h \quad (16)$$

این محدودیت بیان می‌کند که تمام کار ذوب باید در محدوده داده شده تکمیل شود، شروع کار انتقال از EAF به AOD به‌منزله پایان کار ذوب i_{E_h} است، سپس کار انتقال i_{EA_h} باید مابین فاصله زمانی $t+\tau_h^L$ و $t+\tau_h^U$ شروع شود.

مرزهای توان ذوب

$$P^L \cdot S_{h,t} \leq P_{h,t} \leq P^U \cdot S_{h,t} \quad \forall h \quad (17)$$

این محدودیت میزان توان ذوب کوره‌های قوس الکتریک توسط مرزهای پایین (P^L) و بالا (P^U) محدود می‌نماید. $S_{h,t}$ بیان‌کننده وضعیت ذوب است: اگر $S_{h,t}=1$ باشد یعنی مرحله

۶- ارائه راه کار کاهش زمان پردازش در روش مطرح شده

برنامه‌ریزی میزان مصرف برق کارخانه به‌صورت روزانه تهیه می‌شود، بنابراین افق زمانی برنامه ۲۴ ساعت (۱۴۴۰ دقیقه) است. منحنی تعیین قیمت برق ساعتی هر روز در یک بازه زمانی نزدیک، قبل از فرا رسیدن آن روز، توسط شرکت برق برای کارخانه مشخص می‌شود. همچنین در کارخانه مورد مطالعه در این مقاله، قیمت برق از ساعتی به ساعت دیگر متغیر بوده و از طریق پارامتر $price_{hr} [\$/(MWh)]$ به نمایش گذاشته می‌شود. بنابراین برنامه‌ریزی انجام فرآیندهای کارخانه برای هر روز باید در یک بازه زمانی کوتاه (T') انجام شود. پس برنامه با محدودیت دیگری از جنس زمان مواجه است. راه کار رفع این مشکل، ایجاد تعادل مابین افزایش دقت و کاهش زمان برنامه است. حال به نکته زیر توجه شود:

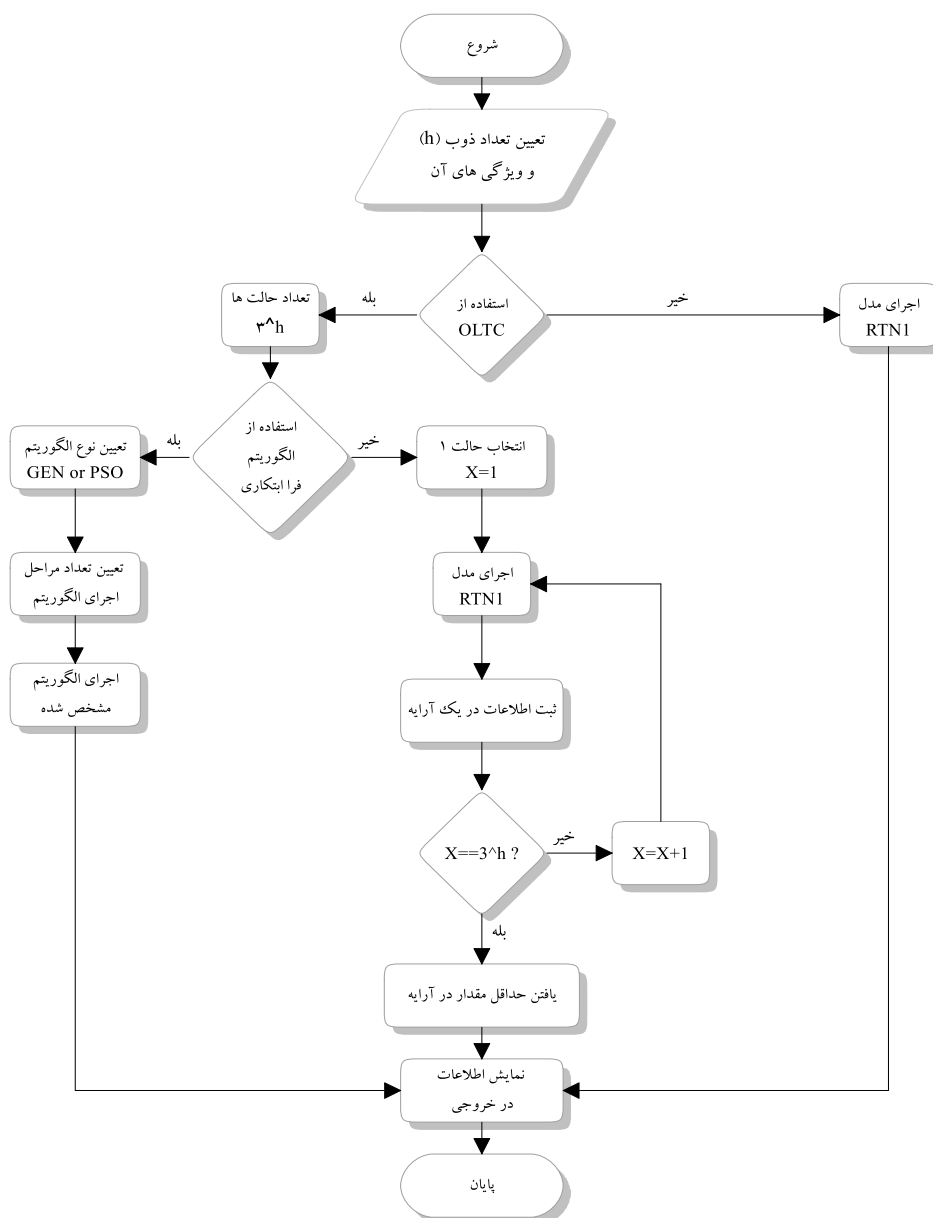
اگر فرض شود OLTC این کارخانه به گونه‌ای عمل نماید که A حالت از سویچینگ آن مورد پذیرش EAF های کارخانه باشد و از سوی دیگر N گروه ذوب برای کار ذوب و انجام فرآیندهای پس از آن موجود باشد، به گونه‌ای که در فرض ایده‌آل قراضه آهن تمام این ذوب‌ها یکسان باشد و در نتیجه توان ذوب نامی آن‌ها یکسان شود و برای همه آن‌ها A حالت برقرار باشد و ترتیب ورود ذوب‌ها اهمیت نداشته باشد. بنابراین تعداد حالت‌های اجرای

۷- مطالعه عددی

۷-۱- فرضیات

در این قسمت، مطالعات موردی را برای نشان دادن تأثیر روش پیشنهادی روی برنامه‌ریزی روزانه یک کارخانه فولاد بیان می‌شود. طرح کارخانه فولاد و پارامترهای مربوطه از مرجع [۱۳] گرفته شده است. به‌طور خاص، این کارخانه دارای ۲ واحد موازی برای عملیات ذول اصلی با استفاده از کوره قوس الکتریک است. هر ذوب متعلق به یک گروه خاص از قالب ریخته‌گری است که در جدول (۲) نشان داده شده است. طبق این جدول تعداد ۲۴ ذوب وجود دارد که توسط ۶ طرح مختلف قالب، ریخته‌گری می‌شود. مصرف توان نامی هر بخش از کارخانه در جدول (۳) ارائه شده است.

برنامه برای یافتن جواب بهینه برابر A^N می‌شود. حال تعداد ذوب‌ها از اهمیت بالایی در تعیین زمان پردازش برنامه برخوردار می‌شود، چرا که افزایش ذوب‌ها باعث ایجاد این احتمال می‌شود که زمان پردازش برنامه به‌گونه‌ای افزایش یابد که از حد مجاز تعیین شده برای آن عبور نماید. به‌عبارت‌دیگر، برنامه در زمان تعیین شده برای آن، قادر به دستیابی به جواب بهینه نباشد. برای رفع این مشکل به نظر استفاده از یک الگوریتم فرا ابتکاری کار عاقلانه‌ای است. در این مقاله به منظور مقایسه از دو الگوریتم ژنتیک (GEN) و ازدحام ذرات (PSO) برای این منظور استفاده می‌شود [۱۹-۲۰]. با توجه به مطالب مطرح شده، فلوچارت روش پیشنهادی در شکل (۳) ارائه شده است.



شکل ۳- فلوچارت الگوریتم پیشنهادی

جدول ۴- زمان پردازش نامی هر شماره ذوب در هر بخش (دقیقه) [۱۳]

ردیف	گرما	EAFl	EAf2	AOD1	AOD2	LF1	LF2	CC1	CC2
۱	h ₁	۸۰	۸۰	۷۵	۷۵	۲۵	۲۵	۵۰	۵۰
۲	h ₂	۸۰	۸۰	۷۵	۷۵	۲۵	۲۵	۵۰	۵۰
۳	h ₃	۸۰	۸۰	۷۵	۷۵	۲۵	۲۵	۵۰	۵۰
۴	h ₄	۸۰	۸۰	۷۵	۷۵	۲۵	۲۵	۵۰	۵۰
۵	h ₅	۸۵	۸۵	۸۵	۸۵	۴۰	۴۰	۶۰	۶۰
۶	h ₆	۸۵	۸۵	۸۵	۸۵	۴۰	۴۰	۶۰	۶۰
۷	h ₇	۸۵	۸۵	۸۵	۸۵	۲۰	۲۰	۵۵	۵۵
۸	h ₈	۸۵	۸۵	۸۵	۸۵	۲۰	۲۰	۵۵	۵۵
۹	h ₉	۹۰	۹۰	۹۵	۹۵	۴۵	۴۵	۶۰	۶۰
۱۰	h ₁₀	۹۰	۹۰	۹۵	۹۵	۴۵	۴۵	۶۰	۶۰
۱۱	h ₁₁	۹۰	۹۰	۹۵	۹۵	۴۵	۴۵	۶۰	۶۰
۱۲	h ₁₂	۹۰	۹۰	۹۵	۹۵	۴۵	۴۵	۶۰	۶۰
۱۳	h ₁₃	۸۵	۸۵	۸۵	۸۵	۲۵	۲۵	۷۰	۷۰
۱۴	h ₁₄	۸۵	۸۵	۸۵	۸۵	۲۵	۲۵	۷۰	۷۰
۱۵	h ₁₅	۸۵	۸۵	۸۵	۸۵	۲۵	۲۵	۷۵	۷۵
۱۶	h ₁₆	۸۵	۸۵	۸۵	۸۵	۲۵	۲۵	۷۵	۷۵
۱۷	h ₁₇	۸۰	۸۰	۸۵	۸۵	۲۵	۲۵	۷۵	۷۵
۱۸	h ₁₈	۸۰	۸۰	۹۵	۹۵	۴۵	۴۵	۶۰	۶۰
۱۹	h ₁₉	۸۰	۸۰	۹۵	۹۵	۴۵	۴۵	۷۰	۷۰
۲۰	h ₂₀	۸۰	۸۰	۹۵	۹۵	۳۰	۳۰	۷۰	۷۰
۲۱	h ₂₁	۸۰	۸۰	۸۰	۸۰	۲۰	۲۰	۵۰	۵۰
۲۲	h ₂₂	۸۰	۸۰	۸۰	۸۰	۲۰	۲۰	۵۰	۵۰
۲۳	h ₂₃	۸۰	۸۰	۸۰	۸۰	۳۰	۳۰	۶۰	۶۰
۲۴	h ₂₄	۸۰	۸۰	۸۰	۸۰	۲۰	۲۰	۶۰	۶۰

جدول ۲- ذوب‌ها و قالب‌های ریخته‌گری مورد نیاز آن‌ها [۱۳]

ردیف	شماره ذوب	نوع قالب ریخته‌گری مورد استفاده
۱	h ₁ -h ₄	G ₁
۲	h ₅ -h ₈	G ₂
۳	h ₉ -h ₁₂	G ₃
۴	h ₁₃ -h ₁₇	G ₄
۵	h ₁₈ -h ₂₀	G ₅
۶	h ₂₁ -h ₂₄	G ₆

جدول ۳- مصرف توان نامی هر بخش کارخانه فولاد نمونه (MW) [۱۳]

نام واحد	EAFl	EAf2	AOD1	AOD2	LF1	LF2	CC1	CC2
مقدار توان نامی مصرفی (MW)	۸۵	۸۵	۲	۲	۲	۲	۷	۷

زمان پردازش نامی هر ذوب متناسب با نوع بخش در جدول (۴) بیان شده است. با ترکیب جدول (۳) و (۴)، مشاهده می‌شود که حدود ۹۰ درصد از کل مصرف انرژی برق در EAFها اتفاق می‌افتد. زمان‌های انتقال ω_{EA} ، ω_{AL} و ω_{LC} به ترتیب ۱۰، ۴ و ۱۰ دقیقه برای انتقال ما بین هر بخش است، همچنین حداکثر زمان انتظار W_{EA} ، W_{AL} و W_{LC} به ترتیب ۲۴۰، ۲۴۰ و ۱۲۰ دقیقه است.

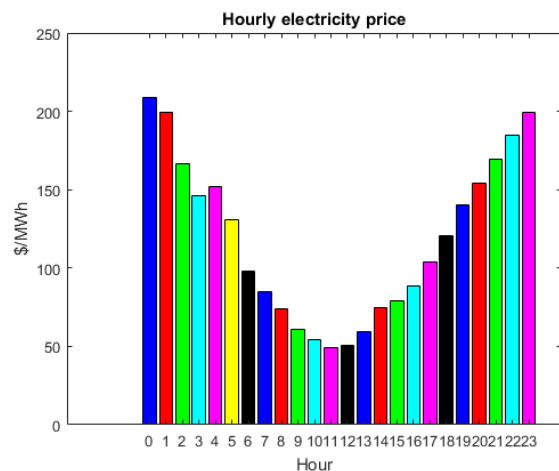
قیمت برق مبتنی بر ساعت برای یک روز کارخانه در شکل (۳) نشان داده شده است. توجه شود که ساعت کاری لزوماً ۰۰:۰۰ - ۰۱:۰۰ در روز نیست. برای برنامه‌ریزی EAF انعطاف‌پذیر، میزان توان ذوب بین ۷۵ تا ۱۲۵ درصد از مقدار نامی قابل تنظیم است. بنابراین با توجه به توان نامی EAF مقدار حداقل و حداکثر در جدول (۵) بیان شده است.

جدول ۵- مقدار حداقل و حداکثر توان برای عملکرد EAF های کارخانه

ردیف	مقدار پارامتر	توضیحات
۱	$P_{EAF} = 85 \text{ MW}$	توان گرمادهی نامی EAF
۲	$P_{EAF}^L = 0.75P_{EAF} = 63.75 \text{ MW}$	کمترین حد توان برای عملکرد EAF
۳	$P_{EAF}^U = 1.25P_{EAF} = 103.25 \text{ MW}$	بیشترین حد توان برای عملکرد EAF

نکته ۱: پیچیدگی مسئله برنامه‌ریزی به ۲ عامل وابسته است:

- تعداد ذوب‌های مورد پردازش: در اینجا ۵ سناریو برای تعداد ذوب‌ها فرض می‌شود، تعداد ذوب برابر ۴، ۸، ۱۲، ۲۰ و ۲۴ باشد.
- مقدار δ : در اینجا ۱ سناریو برای آن در نظر گرفته می‌شود



شکل ۴- پروفیل قیمت ساعتی انرژی الکتریکی [۱۳]

مقدار آن برابر ۱۵ باشد.

نکته ۲: با توجه به مطالب مطرح شده در بخش ۶ و مرجع [۱۳]، حداکثر زمان مورد نیاز به منظور دستیابی به جواب بهینه در مدل‌های برنامه‌ریزی کارخانه برابر ۷۲۰۰ ثانیه یا ۱۲۰ دقیقه قرار داده می‌شود.

برای دستیابی به برنامه زمان‌بندی بهینه کارخانه از ترکیب ۳ نرم‌افزار MATLAB 2017a، GAMS 25.1.2 و نرم‌افزار بهینه‌سازی CPLEX 12.6 استفاده شده است. همچنین سخت‌افزار مورد استفاده Asus FX570UD i7 6700K 8 RAM استفاده شده است.

با توجه به فرضیات مطرح شده، تعداد توقف‌های زمانی مورد نیاز برای انجام کار ذوب‌ها یکسان بوده و مطابق جدول (۶) است. همچنین تعداد توقف‌های زمانی مورد نیاز برای انجام کارهای دیگر به صورت جدول (۷) است. از آنجایی که بیشترین هزینه مصرف انرژی الکتریکی در کارخانه مربوط به EAF ها است، این قسمت از مقاله به بررسی آن‌ها بر اساس سناریوهای مختلف تعداد ذوب‌ها می‌پردازد. همچنین به دلیل حجم بالا خروجی‌های برنامه تصمیم بر آن شد که خروجی‌های برنامه برای سناریو ۲۴ ذوب به نمایش گذاشته شده و در نهایت جدول مقایسه که در بر گیرنده تمام سناریوها است ارائه شود.

جدول ۷- تعداد توقف‌های زمانی انجام عملیات فولادسازی در کارخانه برای هر ذوب (غیر از عملیات اصلی ذوب در کوره قوس الکتریک)

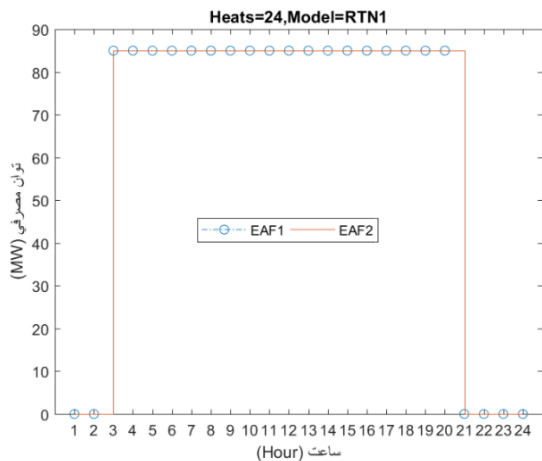
ردیف	شماره ذوب	AOD1	AOD2	LF1	LF2	CC1	CC2
۱	h1	۵	۵	۳	۳	۴	۴
۲	h2	۵	۵	۳	۳	۴	۴
۳	h3	۵	۵	۳	۳	۴	۴
۴	h4	۵	۵	۳	۳	۴	۴
۵	h5	۶	۶	۳	۳	۴	۴
۶	h6	۶	۶	۳	۳	۴	۴
۷	h7	۶	۶	۲	۲	۴	۴
۸	h8	۶	۶	۲	۲	۴	۴
۹	h9	۷	۷	۳	۳	۴	۴
۱۰	h10	۷	۷	۳	۳	۴	۴
۱۱	h11	۷	۷	۳	۳	۴	۴
۱۲	h12	۷	۷	۳	۳	۴	۴
۱۳	h13	۶	۶	۲	۲	۵	۵
۱۴	h14	۶	۶	۲	۲	۵	۵
۱۵	h15	۶	۶	۲	۲	۵	۵
۱۶	h16	۶	۶	۲	۲	۵	۵
۱۷	h17	۶	۶	۲	۲	۵	۵
۱۸	h18	۷	۷	۳	۳	۴	۴
۱۹	h19	۷	۷	۳	۳	۵	۵
۲۰	h20	۷	۷	۲	۲	۵	۵
۲۱	h21	۶	۶	۲	۲	۴	۴
۲۲	h22	۶	۶	۲	۲	۴	۴
۲۳	h23	۶	۶	۲	۲	۴	۴
۲۴	h24	۶	۶	۲	۲	۴	۴

جدول ۶- تعداد توقف زمانی انجام عملیات ذوب در ذوب‌ها

تعداد توقف زمانی نامی	حداقل توقف زمانی گرمادهی	حداکثر توقف زمانی گرمادهی	τ_i
۶	۵	۸	

۷-۲- اگر تعداد ذوب‌ها برابر ۲۴ باشد (Heats=24)

برای مدل RTN پایه (RTN1)، EAF ها روی مقدار نامی خود و شبیه به هم عمل می‌نمایند لذا می‌توان خروجی برنامه‌ریزی هر یک را برای دیگری نیز در نظر گرفت. خروجی‌های برنامه برای واحد EAF در این مدل، برنامه‌ریزی را می‌توان در جدول‌های (۸) و (۹) و شکل‌های (۴) و (۵) مشاهده نمود.



شکل ۴- نمودار توان مصرفی به زمان هر یک از EAF در مدل برنامه‌ریزی RTN1 با در نظر گرفتن ۲۴ عدد ذوب (Heats=24).

برای مدل برنامه‌ریزی RTN1&OLTC تعداد مراحل اجرای برنامه برابر ۳۲۴ می‌شود. خروجی‌های برنامه برای هر واحد EAF در جدول‌های (۱۰) تا (۱۳) و شکل‌های (۶) و (۷) ارائه شده است.

جدول ۱۰- توان مورد نیاز برای ذوب هر یک از ذوب‌ها در EAF1 با در نظر

گرفتن مدل برنامه‌ریزی RTN1&OLTC و Heats=24

ردیف	نام ذوب	توان مورد نیاز (MW)
۱	h1	۸۵
۲	h3	۶۳/۷۵
۳	h5	۱۰۳/۲۵
۴	h7	۸۵
۵	h9	۸۵
۶	h11	۶۳/۷۵
۷	h13	۱۰۳/۲۵
۸	h15	۸۵
۹	h17	۸۵
۱۰	h19	۶۳/۷۵
۱۱	h21	۱۰۳/۲۵
۱۲	h23	۸۵

جدول ۱۱- توان مورد نیاز برای ذوب هر یک از ذوب‌ها در EAF2 با در نظر

گرفتن مدل برنامه‌ریزی RTN1&OLTC و Heats=24

ردیف	نام ذوب	توان مورد نیاز (MW)
۱	h2	۱۰۳/۲۵
۲	h4	۱۰۳/۲۵
۳	h6	۸۵
۴	h8	۱۰۳/۲۵
۵	h10	۱۰۳/۲۵
۶	h12	۱۰۳/۲۵
۷	h14	۸۵
۸	h16	۱۰۳/۲۵
۹	h18	۱۰۳/۲۵
۱۰	h20	۱۰۳/۲۵
۱۱	h20	۸۵
۱۲	h24	۱۰۳/۲۵

جدول ۸- توان مورد نیاز برای هر یک از ذوب‌ها در EAF1 با در نظر گرفتن

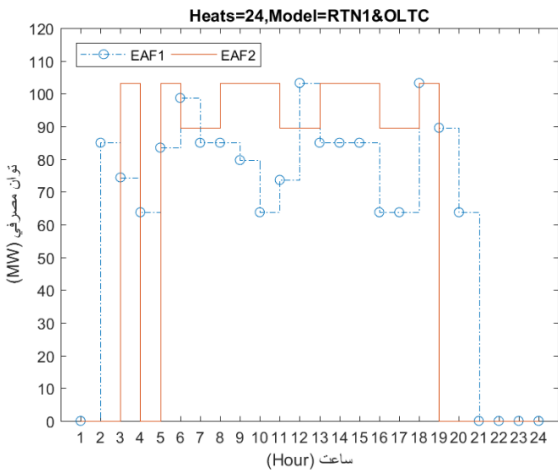
مدل برنامه‌ریزی RTN1 و Heats=24

ردیف	نام ذوب	توان مورد نیاز (MW)
۱	h1	۸۵
۲	h3	۸۵
۳	h5	۸۵
۴	h7	۸۵
۵	h9	۸۵
۶	h11	۸۵
۷	h13	۸۵
۸	h15	۸۵
۹	h17	۸۵
۱۰	h19	۸۵
۱۱	h21	۸۵
۱۲	h23	۸۵

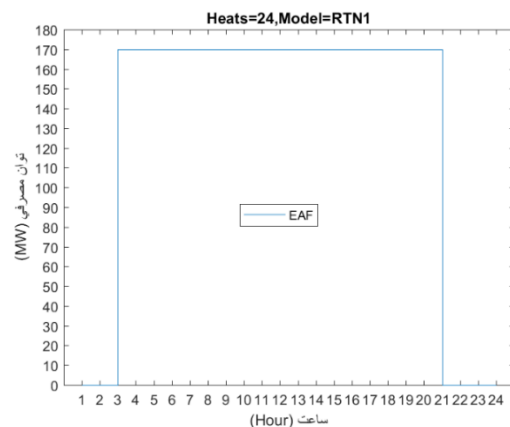
جدول ۹- زمان، انرژی و هزینه انجام کار ذوب برای EAF1 با در نظر گرفتن

مدل برنامه‌ریزی RTN1 و Heats=24

ردیف	ساعت	قیمت (\$/(MWh))	انرژی مورد استفاده (MWh)	هزینه استفاده (k\$)
۱	۳	۱۴۶/۰۴	۸۵	۱۲/۴۱۳
۲	۴	۱۵۱/۸۹	۸۵	۱۲/۹۱۱
۳	۵	۱۳۰/۸۸	۸۵	۱۱/۱۲۵
۴	۶	۹۷/۸۲	۸۵	۸/۳۱۵
۵	۷	۸۴/۸۷	۸۵	۷/۲۱۴
۶	۸	۷۳/۷۶	۸۵	۶/۲۷۰
۷	۹	۶۰/۸۱	۸۵	۵/۱۶۹
۸	۱۰	۵۴/۱۲	۸۵	۴/۶۰۰
۹	۱۱	۴۹/۵۰	۸۵	۴/۲۰۸
۱۰	۱۲	۵۰/۳۶	۸۵	۴/۲۸۱
۱۱	۱۳	۵۹/۶۹	۸۵	۵/۰۷۴
۱۲	۱۴	۷۵/۰۷	۸۵	۶/۳۸۱
۱۳	۱۵	۷۸/۹۰	۸۵	۶/۷۰۷
۱۴	۱۶	۸۸/۷۸	۸۵	۷/۵۴۶
۱۵	۱۷	۱۰۳/۸۸	۸۵	۸/۸۳۰
۱۶	۱۸	۱۲۰/۸۹	۸۵	۱۰/۲۷۶
۱۷	۱۹	۱۴۰/۴۱	۸۵	۱۱/۹۳۵
۱۸	۲۰	۱۵۳/۹۴	۸۵	۱۳/۰۸۵
		مجموع هزینه		۱۴۶/۳۲۷



شکل ۶- نمودار توان مصرفی به زمان هر یک از EAF در مدل برنامه‌ریزی RTN1&OLTC با در نظر گرفتن Heats=24



شکل ۵- نمودار توان مصرفی به زمان کل کار ذوب کارخانه در مدل برنامه‌ریزی RTN1 با در نظر گرفتن Heats=24

جدول ۱۳- زمان، انرژی و هزینه انجام کار ذوب کارخانه برای EAF2 در

نظر گرفتن مدل برنامه‌ریزی RTN1&OLTC و Heats=24

ردیف	ساعت	قیمت (\$/(MWh))	انرژی مورد استفاده (MWh)	هزینه استفاده (k\$)
۱	۳	۱۴۶/۰۴	۱۰۳/۲۵	۱۵/۰۷۹
۲	۵	۱۳۰/۸۸	۱۰۳/۲۵	۱۳/۵۱۳
۳	۶	۹۷/۸۲	۸۹/۵۶	۸/۷۶۱
۴	۷	۸۴/۸۷	۸۹/۵۶	۷/۶۰۱
۵	۸	۷۳/۷۶	۱۰۳/۲۵	۷/۶۱۶
۶	۹	۶۰/۸۱	۱۰۳/۲۵	۶/۲۷۹
۷	۱۰	۵۴/۱۲	۱۰۳/۲۵	۵/۵۸۸
۸	۱۱	۴۹/۵۰	۸۹/۵۶	۴/۴۳۳
۹	۱۲	۵۰/۳۶	۸۹/۵۶	۴/۵۱۰
۱۰	۱۳	۵۹/۶۹	۱۰۳/۲۵	۶/۱۶۳
۱۱	۱۴	۷۵/۰۷	۱۰۳/۲۵	۷/۷۵۱
۱۲	۱۵	۷۸/۹۰	۱۰۳/۲۵	۸/۱۴۶
۱۳	۱۶	۸۸/۷۸	۸۹/۵۶	۷/۹۵۱
۱۴	۱۷	۱۰۳/۸۸	۸۹/۵۶	۹/۳۰۴
۱۵	۱۸	۱۲۰/۸۹	۱۰۳/۲۵	۱۲/۴۸۲
مجموع هزینه				۱۲۵/۱۷۸

جدول ۱۴- توان مورد نیاز ذوب هر یک از ذوب‌ها در EAF1 با در نظر

گرفتن مدل برنامه‌ریزی RTN1&OLTC&GEN و Heats=24

ردیف	نام ذوب	توان مورد نیاز (MW)
۱	h1	۶۳/۷۵
۲	h3	۱۰۳/۲۵
۳	h5	۶۳/۷۵
۴	h7	۶۳/۷۵
۵	h9	۶۳/۷۵
۶	h11	۱۰۳/۲۵
۷	h13	۶۳/۷۵
۸	h15	۶۳/۷۵
۹	h17	۶۳/۷۵
۱۰	h19	۱۰۳/۲۵
۱۱	h21	۶۳/۷۵
۱۲	h23	۶۳/۷۵

جدول ۱۵- توان مورد نیاز ذوب هر یک از ذوب‌ها در EAF2 با در نظر

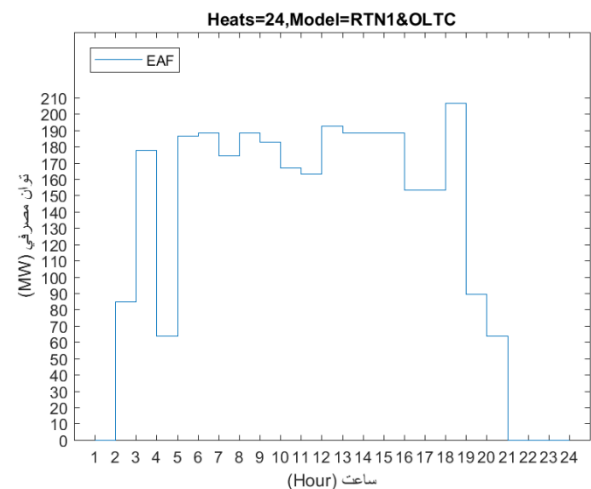
گرفتن مدل برنامه‌ریزی RTN1&OLTC&GEN و Heats=24

ردیف	نام ذوب	توان مورد نیاز (MW)
۱	h2	۱۰۳/۲۵
۲	h4	۱۰۳/۲۵
۳	h6	۱۰۳/۲۵
۴	h8	۶۳/۷۵
۵	h10	۱۰۳/۲۵
۶	h12	۱۰۳/۲۵
۷	h14	۱۰۳/۲۵
۸	h16	۶۳/۷۵
۹	h18	۱۰۳/۲۵
۱۰	h20	۱۰۳/۲۵
۱۱	h20	۱۰۳/۲۵
۱۲	h24	۶۳/۷۵

جدول ۱۲- زمان، انرژی و هزینه انجام عملیات ذوب برای EAF1 با

در نظر گرفتن مدل برنامه‌ریزی RTN1&OLTC و Heats=24

ردیف	ساعت	قیمت (\$/(MWh))	انرژی مورد استفاده (MWh)	هزینه استفاده (k\$)
۱	۲	۱۶۶/۲۹	۸۵	۱۴/۱۳۵
۲	۳	۱۴۶/۰۴	۷۴/۳۸	۱۰/۸۶۲
۳	۴	۱۵۱/۸۹	۶۳/۷۵	۹/۶۸۳
۴	۵	۱۳۰/۸۸	۸۲/۵۰	۱۰/۹۲۸
۵	۶	۹۷/۸۲	۹۸/۶۹	۹/۶۵۴
۶	۷	۸۴/۸۷	۸۵	۷/۲۱۴
۷	۸	۷۳/۷۶	۸۵	۶/۲۷۰
۸	۹	۶۰/۸۱	۸۰	۴/۸۴۶
۹	۱۰	۵۴/۱۲	۶۴	۳/۴۵۰
۱۰	۱۱	۴۹/۵۰	۷۴	۳/۶۴۴
۱۱	۱۲	۵۰/۳۶	۱۰۳	۵/۲۰۰
۱۲	۱۳	۵۹/۶۹	۸۵	۵/۰۷۴
۱۳	۱۴	۷۵/۰۷	۸۵	۶/۲۸۱
۱۴	۱۵	۷۸/۹۰	۸۵	۶/۷۰۷
۱۵	۱۶	۸۸/۷۸	۶۴	۵/۶۶۰
۱۶	۱۷	۱۰۳/۸۸	۶۴	۶/۶۲۲
۱۷	۱۸	۱۲۰/۸۹	۱۰۳	۱۲/۴۸۲
۱۸	۱۹	۱۴۰/۴۱	۹۰	۱۲/۵۷۵
۱۹	۲۰	۱۵۳/۹۴	۶۴	۹/۸۱۴
مجموع هزینه				۱۵۱/۱۹۹



شکل ۷- نمودار توان مصرفی به زمان کل کار ذوب کارخانه در مدل

برنامه‌ریزی RTN1&OLTC با در نظر گرفتن Heats=24

برای مدل برنامه‌ریزی RTN1&OLTC&GEN تعداد مراحل اجرای برنامه برابر ۵۰ در نظر گرفته شده است خروجی‌های برنامه برای واحد EAF در جدول‌های (۱۴) تا (۱۷) و شکل‌های (۸) و (۹) بیان شده است.

جدول ۱۷- زمان، انرژی و هزینه انجام کار ذوب کارخانه برای EAF2 با در

نظر گرفتن مدل RTN1&OLTC&GEN و Heats=24

ردیف	ساعت	قیمت (\$/(MWh))	انرژی مورد استفاده (MWh)	هزینه استفاده (k\$)
۱	۳	۱۴۶/۰۴	۱۰۳/۲۵	۱۵/۰۷۹
۲	۴	۱۵۱/۸۹	۱۰۳/۲۵	۱۵/۶۸۳
۳	۵	۱۳۰/۸۸	۱۰۳/۲۵	۱۳/۵۱۳
۴	۶	۹۷/۸۲	۷۳/۶۳	۷/۲۰۲
۵	۷	۸۴/۸۷	۶۳/۷۵	۵/۴۱۰
۶	۸	۷۳/۷۶	۹۳/۳۸	۶/۸۸۷
۷	۹	۶۰/۸۱	۱۰۳/۲۵	۶/۲۷۹
۸	۱۰	۵۴/۱۲	۱۰۳/۲۵	۵/۵۸۸
۹	۱۱	۴۹/۵۰	۷۳/۶۳	۳/۶۴۴
۱۰	۱۲	۵۰/۳۶	۶۳/۷۵	۳/۲۱۰
۱۱	۱۳	۵۹/۶۹	۹۳/۳۸	۵/۵۷۴
۱۲	۱۴	۷۵/۰۷	۱۰۳/۲۵	۷/۷۵۱
۱۳	۱۵	۷۸/۹۰	۱۰۳/۲۵	۸/۱۴۶
۱۴	۱۶	۸۸/۷۸	۷۳/۶۳	۶/۵۳۶
۱۵	۱۷	۱۰۳/۸۸	۶۳/۷۵	۶/۶۲۲
۱۶	۱۸	۱۲۰/۸۹	۱۵/۹۴	۱/۹۲۷
مجموع هزینه				۱۱۹/۰۵۲

جدول ۱۶- زمان، انرژی و هزینه انجام کار ذوب کارخانه برای EAF1 با در

نظر گرفتن مدل برنامه ریزی RTN1&OLTC&GEN و Heats=24

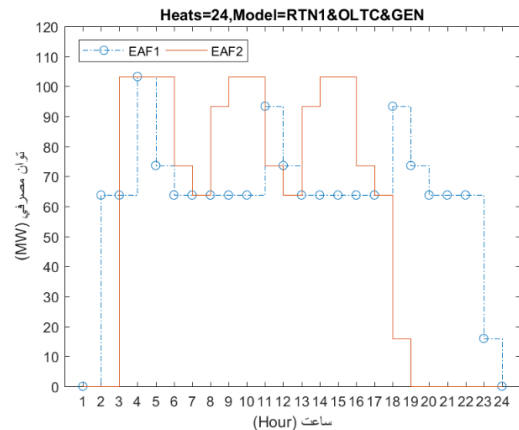
ردیف	ساعت	قیمت (\$/(MWh))	انرژی مورد استفاده (MWh)	هزینه استفاده (k\$)
۱	۲	۱۶۶/۲۹	۶۴	۱۰/۶۰۱
۲	۳	۱۴۶/۰۴	۶۴	۹/۳۱۰
۳	۴	۱۵۱/۸۹	۱۰۳	۱۵/۶۸۳
۴	۵	۱۳۰/۸۸	۷۴	۹/۶۳۶
۵	۶	۹۷/۸۲	۶۴	۶/۲۳۶
۶	۷	۸۴/۸۷	۶۴	۵/۴۱۰
۷	۸	۷۳/۷۶	۶۴	۴/۷۰۲
۸	۹	۶۰/۸۱	۶۴	۳/۸۷۷
۹	۱۰	۵۴/۱۲	۶۴	۳/۴۵۰
۱۰	۱۱	۴۹/۵۰	۹۳	۴/۶۲۲
۱۱	۱۲	۵۰/۳۶	۷۴	۳/۷۰۸
۱۲	۱۳	۵۹/۶۹	۶۴	۳/۸۰۵
۱۳	۱۴	۷۵/۰۷	۶۴	۴/۷۸۶
۱۴	۱۵	۷۸/۹۰	۶۴	۵/۰۳۰
۱۵	۱۶	۸۸/۷۸	۶۴	۵/۶۶۰
۱۶	۱۷	۱۰۳/۸۸	۶۴	۶/۶۲۲
۱۷	۱۸	۱۲۰/۸۹	۹۳	۱۱/۲۸۸
۱۸	۱۹	۱۴۰/۴۱	۷۴	۱۰/۳۳۸
۱۹	۲۰	۱۵۳/۹۴	۶۴	۹/۸۱۴
۲۰	۲۱	۱۶۹/۶۸	۶۴	۱۰/۸۱۷
۲۱	۲۲	۱۸۴/۷۶	۶۴	۱۱/۷۷۸
۲۲	۲۳	۱۹۹/۱۸	۱۶	۳/۱۷۴
مجموع هزینه				۱۶۰/۳۴۷

برای مدل برنامه ریزی RTN1&OLTC&PSO تعداد مراحل اجرای برنامه برابر ۵۰ در نظر گرفته شده است. خروجی های برنامه برای واحد EAF در جدول های (۱۸) تا (۲۱) و شکل های (۱۰) و (۱۱) بیان شده است.

جدول ۱۸- توان مورد نیاز ذوب هر یک از ذوب ها در EAF1 با در نظر

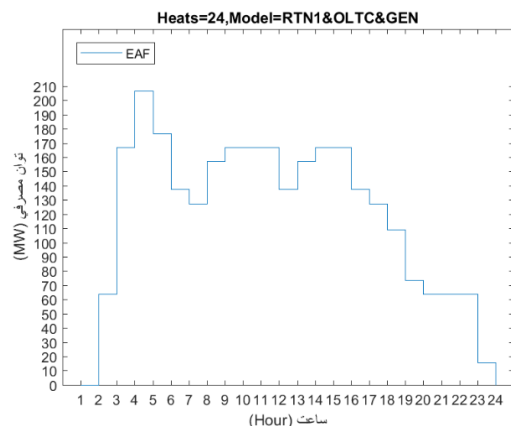
گرفتن مدل برنامه ریزی RTN1&OLTC&PSO و Heats=24

ردیف	نام ذوب	توان مورد نیاز (MW)
۱	h1	۶۳/۷۵
۲	h3	۶۳/۷۵
۳	h5	۶۳/۷۵
۴	h7	۱۰۳/۲۵
۵	h9	۶۳/۷۵
۶	h11	۶۳/۷۵
۷	h13	۶۳/۷۵
۸	h15	۱۰۳/۲۵
۹	h17	۶۳/۷۵
۱۰	h19	۶۳/۷۵
۱۱	h21	۶۳/۷۵
۱۲	h23	۱۰۳/۲۵



شکل ۸- نمودار توان مصرفی به زمان هر یک از EAF در مدل برنامه ریزی

Heats=24 با در نظر گرفتن RTN1&OLTC&GEN



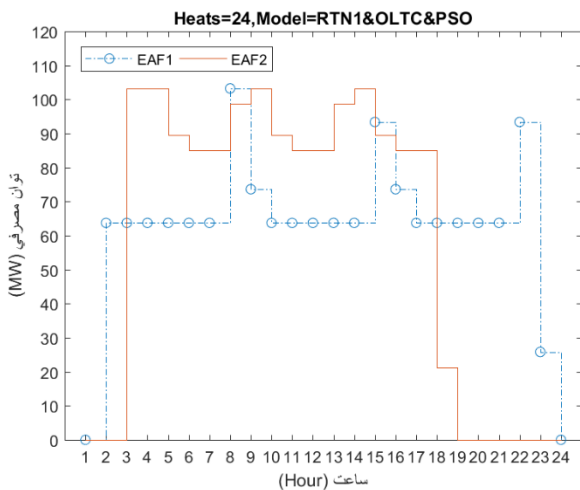
شکل ۹- نمودار توان مصرفی به زمان کل کار ذوب کارخانه در مدل

برنامه ریزی RTN1&OLTC&GEN با در نظر گرفتن Heats=24

جدول ۲۱- زمان، انرژی و هزینه انجام کار ذوب کارخانه برای EAF2 در

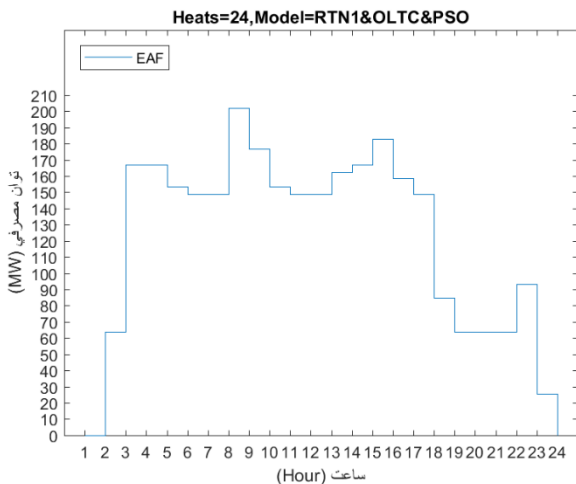
نظر گرفتن مدل RTN1&OLTC&PSO و Heats=24

ردیف	ساعت	قیمت (\$/(MWh))	انرژی مورد استفاده (MWh)	هزینه استفاده (k\$)
۱	۳	۱۴۶/۰۴	۱۰۳/۲۵	۱۵/۰۷۹
۲	۴	۱۵۱/۸۹	۱۰۳/۲۵	۱۵/۶۸۳
۳	۵	۱۳۰/۸۸	۸۹/۵۶	۱۱/۷۲۲
۴	۶	۹۷/۸۲	۸۵	۸/۳۱۵
۵	۷	۸۴/۸۷	۸۵	۷/۲۱۴
۶	۸	۷۳/۷۶	۹۸/۶۹	۷/۲۷۹
۷	۹	۶۰/۸۱	۱۰۳/۲۵	۶/۲۷۹
۸	۱۰	۵۴/۱۲	۸۹/۵۶	۴/۸۴۷
۹	۱۱	۴۹/۵۰	۸۵	۴/۲۰۸
۱۰	۱۲	۵۰/۳۶	۸۵	۴/۲۸۱
۱۱	۱۳	۵۹/۶۹	۹۸/۶۹	۵/۸۹۱
۱۲	۱۴	۷۵/۰۷	۱۰۳/۲۵	۷/۷۵۱
۱۳	۱۵	۷۸/۹۰	۸۹/۵۶	۷/۰۶۶
۱۴	۱۶	۸۸/۷۸	۸۵	۷/۵۴۶
۱۵	۱۷	۱۰۳/۸۸	۸۵	۸/۸۳۰
۱۶	۱۸	۱۲۰/۸۹	۲۱/۲۵	۲/۵۶۰
			مجموع هزینه	۱۲۴/۵۴۹



شکل ۱۰- نمودار توان مصرفی به زمان هر یک از EAF در مدل برنامه‌ریزی

Heats=24 با در نظر گرفتن RTN1&OLTC&PSO



شکل ۱۱- نمودار توان مصرفی به زمان کل کار ذوب کارخانه در مدل

برنامه‌ریزی RTN1&OLTC&PSO با در نظر گرفتن Heats=24

جدول ۱۹- توان مورد نیاز برای ذوب هر یک از ذوب‌ها در EAF2 در نظر

گرفتن مدل برنامه‌ریزی RTN1&OLTC&PSO و Heats=24

ردیف	نام ذوب	توان مورد نیاز (MW)
۱	h2	۱۰۳/۲۵
۲	h4	۱۰۳/۲۵
۳	h6	۸۵
۴	h8	۸۵
۵	h10	۱۰۳/۲۵
۶	h12	۱۰۳/۲۵
۷	h14	۸۵
۸	h16	۸۵
۹	h18	۱۰۳/۲۵
۱۰	h20	۱۰۳/۲۵
۱۱	h20	۸۵
۱۲	h24	۸۵

جدول ۲۰- زمان، انرژی و هزینه انجام کار ذوب کارخانه برای EAF1 در

نظر گرفتن مدل برنامه‌ریزی RTN1&OLTC&PSO و Heats=24

ردیف	ساعت	قیمت (\$/(MWh))	انرژی مورد استفاده (MWh)	هزینه استفاده (k\$)
۱	۲	۱۶۶/۲۹	۶۳/۷۵	۱۰/۶۰۱
۲	۳	۱۴۶/۰۴	۶۳/۷۵	۹/۳۱۰
۳	۴	۱۵۱/۸۹	۶۳/۷۵	۹/۶۸۳
۴	۵	۱۳۰/۸۸	۶۳/۷۵	۸/۳۴۴
۵	۶	۹۷/۸۲	۶۳/۷۵	۶/۲۳۶
۶	۷	۸۴/۸۷	۶۳/۷۵	۵/۴۱۰
۷	۸	۷۳/۷۶	۱۰۳/۲۵	۷/۶۱۶
۸	۹	۶۰/۸۱	۷۴	۴/۴۷۷
۹	۱۰	۵۴/۱۲	۶۴	۳/۴۵۰
۱۰	۱۱	۴۹/۵۰	۶۴	۳/۱۵۶
۱۱	۱۲	۵۰/۳۶	۶۴	۳/۲۱۰
۱۲	۱۳	۵۹/۶۹	۶۴	۳/۸۰۵
۱۳	۱۴	۷۵/۰۷	۶۴	۴/۷۸۶
۱۴	۱۵	۷۸/۹۰	۹۳	۷/۳۶۷
۱۵	۱۶	۸۸/۷۸	۷۴	۶/۵۳۶
۱۶	۱۷	۱۰۳/۸۸	۶۴	۶/۶۲۲
۱۷	۱۸	۱۲۰/۸۹	۶۴	۷/۷۰۷
۱۸	۱۹	۱۴۰/۴۱	۶۴	۸/۹۵۱
۱۹	۲۰	۱۵۳/۹۴	۶۴	۹/۸۱۴
۲۰	۲۱	۱۶۹/۶۸	۶۴	۱۰/۸۱۷
۲۱	۲۲	۱۸۴/۷۶	۹۳	۱۷/۲۵۲
۲۲	۲۳	۱۹۹/۱۸	۲۶	۵/۱۴۱
			مجموع هزینه	۱۶۰/۲۹۲

جدول ۲۲- خروجی مدل‌های برنامه‌ریزی کارخانه فولاد بر اساس تعداد ذوب‌های مختلف

تعداد ذوب	مدل	#bin	#var	#con	MIP (k\$)	#ran	GAP (%)	CPU (s)
۴	RTN1	۲۴۹۶	۶۰۴۸	۳۳۹۷	۲۶/۲۳۹	۱	۰	۰/۲۹
	RTN1&OLTC	۲۴۹۶	۶۸۱۶	۴۹۱۷	۲۵/۸۵۸	۸۱	۰	۷۷/۵۵
	RTN1&OLTC&GEN	۲۴۹۶	۶۸۱۶	۴۹۱۷	۲۵/۸۵۸	۵۰	۰	۵۵/۵۹
	RTN1&OLTC&PSO	۲۴۹۶	۶۸۱۶	۴۹۱۷	۲۵/۸۵۸	۵۰	۰	۴۸/۴۳
۸	RTN1	۴۹۹۲	۱۱۲۳۲	۶۱۲۲	۶۲/۱۷۳	۱	۰	۰/۹۷
	RTN1&OLTC	۴۹۹۲	۱۲۷۶۸	۹۱۶۲	۶۰/۷۳	۶۵۶۱	۰	۶۵۶۰
	RTN1&OLTC&GEN	۴۹۹۲	۱۲۷۶۸	۹۱۶۲	۶۰/۷۳	۲۰۰۰	۰	۲۵۲۹/۵۵
	RTN1&OLTC&PSO	۴۹۹۲	۱۲۷۶۸	۹۱۶۲	۶۱/۶۴۸	۲۰۰۰	۰	۱۸۰۱/۲۶
۱۲	RTN1	۷۴۸۸	۱۶۴۱۶	۸۸۴۷	۱۰۵/۲۰۴	۱	۰	۳/۲۱
	RTN1&OLTC	۷۴۸۸	۱۸۷۲۰	۱۳۴۰۷	۹۹/۹۹	۳۱۲	۲۰۰	۷۲۰۰
	RTN1&OLTC&GEN	۷۴۸۸	۱۸۷۲۰	۱۳۴۰۷	۱۰۱/۱۷۸	۱۵۰۰	۰	۵۳۷۸/۸۸
	RTN1&OLTC&PSO	۷۴۸۸	۱۸۷۲۰	۱۳۴۰۷	۱۰۲/۸۵۸	۱۵۰۰	۰	۴۷۸۲/۱۴
۲۰	RTN1	۱۲۴۸۰	۲۶۷۸۴	۱۴۲۹۷	۲۲۲/۴۲۷	۱	۰	۱۱/۰۸
	RTN1&OLTC	۱۲۴۸۰	۳۰۶۲۴	۲۱۸۹۷	۲۱۱/۴۵۹	۳۲۰	۱۰۵۱	۷۲۰۰
	RTN1&OLTC&GEN	۱۲۴۸۰	۳۰۶۲۴	۲۱۸۹۷	۲۱۴/۱۳۶	۵۰۰	۰	۶۲۰۳/۱
	RTN1&OLTC&PSO	۱۲۴۸۰	۳۰۶۲۴	۲۱۸۹۷	۲۱۷/۵۴	۵۰۰	۰	۵۲۶۷/۲
۲۴	RTN1	۱۴۹۷۶	۳۱۹۶۸	۱۷۰۲۲	۳/۴۷۳۳۰	۱	۰	۹۱/۰۲
	RTN1&OLTC	۱۴۹۷۶	۳۶۵۷۶	۱۷۰۲۲	۲۸۷/۲۸۳	۳۲۴	۱۳۰۱	۷۲۰۰
	RTN1&OLTC&GEN	۱۴۹۷۶	۳۶۵۷۶	۲۶۱۴۲	۲۸۹/۳۳۳	۵۰	۰	۶۵۵۱/۱۱
	RTN1&OLTC&PSO	۱۴۹۷۶	۳۶۵۷۶	۲۶۱۴۲	۲۹۵/۱۰۵	۵۰	۰	۵۱۵۱/۹۷

۸- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

جدول (۲۲) به عنوان جمع‌بندی داده‌ها ارائه می‌شود. در این جدول، ستون‌ها به ترتیب از چپ به راست بیان‌کننده مدل برنامه، تعداد متغیرهای باینری برنامه، تعداد متغیرهای کل، تعداد محدودیت‌های به کار رفته در برنامه، هزینه انرژی الکتریکی تمام شده برای کارخانه (بر حسب k\$)، تعداد اجرا برنامه برای رسیدن به جواب بهینه، فاصله زمانی مورد نیاز در صورت عدم دستیابی به جواب بهینه در زمان تعیین شده و زمان رسیدن برنامه به جواب را نشان می‌دهد. می‌توان به نتایج زیر دست یافت:

- به‌طورکلی، کاهش هزینه تمام شده کارخانه در مدل‌های برنامه‌ریزی همراه با OLTC به نسبت بدون آن مشاهده شد که با افزایش تعداد ذوب‌ها این توقف بیشتر نمایان می‌شود.
 - اگر تعداد ذوب برابر ۴ باشد:
- تعداد حالت‌های مورد بررسی مدل برنامه‌ریزی RTN1&OLTC برابر ۸۱ است و برنامه در بازه معین شده قادر به دستیابی به جواب بهینه است. همچنین مشاهده شد که نتایج حاصل از مدل‌های برنامه‌ریزی RTN1&OLTC&GEN و RTN1&OLTC&PSO مطابق

مدل برنامه‌ریزی RTN1&OLTC است و توقف زمانی رسیدن به جواب بهینه این ۳ مدل چندان زیاد نیست. بنابراین در این حالت استفاده از مدل RTN1&OLTC توصیه می‌شود.

- اگر تعداد ذوب‌ها برابر ۸ باشد:

نتایج به‌دست آمده از مدل‌های برنامه‌ریزی RTN1&OLTC و RTN1&OLTC&GEN یکسان بوده از دو مدل دیگر مناسب‌تر است. توقف زمانی دستیابی به جواب بهینه در این دو مدل بسیار است. مدل RTN1&OLTC تقریباً روی مرز زمانی مشخص شده به جواب می‌رسد، این درحالی است که مدل RTN1&OLTC&GEN با صرف زمانی تقریباً کمتر از نصف آن جواب بهینه را می‌یابد، بنابراین در این حالت مدل RTN1&OLTC&GEN برای برنامه‌ریزی کارخانه توصیه می‌شود.

- اگر تعداد ذوب‌ها برابر ۱۲ یا بیشتر باشد (۱۲، ۲۰ و ۲۴): کمترین هزینه تمام شده همچنان مربوط به مدل RTN1&OLTC می‌شود، با این وجود، این مدل دیگر قادر به دستیابی به جواب بهینه در بازه زمانی مشخص شده نیست و نیاز به صرف زمانی بیشتر دارد (برای ذوب‌های ۱۲،

- [7] Kamyab F., Amini M., Sheykha S., Hasanpour M., Jalali M., Demand response program in smart grid using supply function bidding mechanism, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, 7(3) 1277-1284.
- [8] Ji S., Lu T., Zhao Z., Yu H., Yuan L., Yang S., Secrest C., Physical model analysis during transient for series-connected HVIGBTs, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, 29(11) 5727-5737.
- [9] Zhang X., Hug G., Optimal regulation provision by aluminum smelters, in *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2014.
- [10] Zhang X., Hug G., Kolter J.Z., Harjunkoski I., Model predictive control of industrial loads and energy storage for demand response, in *IEEE PES General Meeting*, 2016.
- [11] Ashok S., Peak-load management in steel plants, *Applied Energy*, 2006, 83(5) 413-424.
- [12] Nolde K., Morari M., Electrical load tracking scheduling of a steel plant, *Computers & Chemical Engineering*, 2010, 34(11) 1899-1903.
- [13] Zhang X., Hug G., Harjunkoski I., Cost-effective scheduling of steel plants with flexible EAFs, *IEEE Trans. on Smart Grid*, 2016.
- [14] Zhang X., Hug G., Kolter J. Z., Harjunkoski I., Computational approaches for efficient scheduling of steel plants as demand response resource, in *IEEE Power Systems Computation Conference*, 2016.
- [15] Harjunkoski I., Grossmann I. E., A decomposition approach for the scheduling of a steel plant production, *Computers & Chemical Engineering*, 2001, 25(11/12) 1647-1660.
- [16] Pantelides C.C., Unified frameworks for the optimal process planning and scheduling, *Proceedings of the 2nd Conference on the Foundations of Computer Aided Operations*, New York: Cache Publications 1994, 253.
- [17] Castro P.M., Barbosa-Póvoa A.P., Matos H.A., Novais A.Q., Simple continuous-time formulation for short-term scheduling of batch and continuous processes, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2004, 43, 105-118.
- [18] P. M. Castro, Ignacio E. Grossmann and Augusto Q. Novais, New continuous-time models for the scheduling of multistage batch plants with sequence dependent changeovers, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2006, 45, 6120-6226.
- [۱۹] فرشاد مریخ بیات، الگوریتم‌های بهینه‌سازی فرا ابتکاری (همراه با کاربردهایی در مهندسی برق)؛ انتشارات جهاد دانشگاهی؛ ۱۳۹۳.
- [۲۰] یقینی م.، کاظم‌زاده اخوان م.ر.، الگوریتم‌های بهینه‌سازی فرا ابتکاری، جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر، چاپ سوم، ۱۳۹۵.

۲۰ و ۲۴ به ترتیب ۲، ۱۰ و ۱۳ برابر). در این حالت با توجه به هزینه تمام شده کارخانه مدل RTN1&OLTC&GEN توصیه می‌شود.

• گنجاندن الگوریتم‌های GEN و PSO به مدل RTN1&OLTC سبب افزایش بار پردازشی سیستم می‌شود (GEN بیشتر از PSO)، لذا هر مرحله دستیابی به جواب در مدل‌های RTN1&OLTC&GEN و RTN1&OLTC&PSO نیاز به صرف زمان بیشتری به نسبت ۲ مدل RTN1 و RTN1&OLTC دارد، بنابراین با توجه به نکته اشاره شده و تعداد ذوب‌ها باید تعداد مراحل اجرا الگوریتم GEN و PSO مشخص شود. به نظر می‌رسد که اگر تعداد ذوب‌ها بیشتر از ۲۴ شود، کاهش تعداد مراحل اجرای الگوریتم GEN بیشتر از الگوریتم PSO بوده و در نتیجه مدل RTN1&OLTC&GEN کارایی خود را زودتر از مدل RTN1&OLTC&PSO از دست می‌دهد.

از آنجایی که سوئیچینگ مکرر در جریان‌های بالا باعث کاهش عمر OLTC می‌شود، بنابراین تجزیه و تحلیل سود و هزینه برای تغییر OLTC باید در مقیاس طولانی مدت (به‌عنوان مثال چندین سال) با انواع مختلفی از ملاحظات عملی شامل طول عمر، هزینه‌ها و ویژگی‌های عملیاتی OLTC، قیمت فروش و تولید سالیانه محصول نهایی و غیره صورت پذیرد.

در این تحقیق، روشی که برای بهینه‌سازی به دست آمد، بدون توجه به کاهش طول عمر آن‌ها است، زیرا این امر نیازمند مقدار قابل توجهی از اطلاعات اضافی است که فراتر از محدوده این تحقیق است. با این وجود با در اختیار داشتن این اطلاعات می‌توان در کارهای آینده این محدودیت‌ها را نیز در نظر گرفته و مدل را به سمت واقعیت بیشتر سوق داد.

مراجع

- [1] Ilic M. D., Xie L., Joo J.-Y., Efficient coordination of wind power and price-responsive demand- Part I: Theoretical foundations, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2011, 26(4) 1875-1884.
- [2] Xu Y., Li N., Low S., Demand response with capacity constrained supply function bidding, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2015, 99, 1-18.
- [3] Wei W., Liu F., Mei S., Energy pricing and dispatch for smart grid retailers under demand response and market price uncertainty, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, 6(3) 1364-1374.
- [4] Fang X., Hu Q., Li F., Wang B., Li Y., Coupon-based demand response considering wind power uncertainty: A strategic bidding model for load serving entities, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 3(2) 1025-1037.
- [5] Paulus M., Borggrefe F., The potential of demand-side management in energy-intensive industries for electricity markets, in Germany, *Applied Energy*, 2011, 88(2) 432-441.
- [6] Li N., Chen L., Dahleh M., Demand response using linear supply function bidding, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, 6(4) 1827-1838.



IRANIAN FOUNDRYMEN'S
SOCIETY

Founding Research Journal

Research Paper:

Energy Management in Steelmaking by Electric Arc Furnace Based on OLTC

Seyed Mohammad Rezaeian Salahi ¹, Nabiollah Ramezani ^{2*}, Majid Abbasi ³

1. MSc Student, Electrical Engineering-Power Systems, Mazandaran University of Science and Technology, Behshahr, Iran.
 2. Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Mazandaran University of Science and Technology, Behshahr, Iran.
 3. Associate Professor, Department of Materials Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.
- * Corresponding Author: Behshahr, Mailbox: 4851878195, E-mail: ramezani@mazust.ac.ir.

Paper history:

Received: 03 February 2020
Accepted: 07 April 2020

Keywords:

Electric arc furnaces (EAF),
Demand side management
(DSM),
Resource-task network
(RTN),
OLTC,
Meta-heuristic algorithm

Demand side management (DSM) is a popular topic that has been widely discussed in the electricity industry in recent years. Industrial processes, such as steel production, have complex planning in general. In many industrialized countries, these plants regularly participate in DR programs. Electric arc furnaces (EAFs) in steel mills have been recognized as having high potential for DSM. The widely used method for modeling, optimizing and planning such plants in general is the Resource-Task Network (RTN). To solve the problem of achieving optimal solution, it is recommended to use a meta-heuristic algorithm. For the purpose of comparison, two genetic (GEN) and particle swarm Optimization (PSO) algorithms are used for this purpose. Case studies were performed to illustrate the impact of the proposed method on the daily planning of a steel plant. Overall, the results indicate that incorporating OLTC into the planning of a steel plant results in improvements in reducing its daily costs.

Please cite this article using:

Seyed Mohammad Rezaeian Salahi, Nabiollah Ramezani, Majid Abbasi, Energy Management in Steelmaking by Electric Arc Furnace Based on OLTC, in Persian, Founding Research Journal, 2020, 4(1) 51-67.
DOI: 10.22034/FRJ.2020.218472.1114

Journal homepage: www.foundingjournal.ir