تجارب صنعتی در به حداکثر رساندن سود تولید فولاد با استفاده از تکنولوژی بهینه‌سازی یکپارچه[1]

ترجمه: محمدحسین نشاطی

این مقاله یک مدل بهینه‌سازی یکپارچه ارائه می‌دهد که هدف آن کمک به فولادسازان برای اتخاذ تصمیمات استراتژیک و بهبود سودآوری کلی با بهینه‌سازی تهیه مواد اولیه و تنظیم برنامه‌ریزی فروش و تولید بر اساس شرایط همواره در حال تغییر بازار است. اجرای موفق این مدل در یک شرکت فولاد می‌تواند به سود سالانه چند یورو بر تن فولاد دست یابد. این مزیت از طریق دو مطالعه موردی در دنیای واقعی نشان داده می‌شود.

۱. مقدمه

در حالی که نشانه‌هایی حاکی از بهبود آهسته اقتصاد جهانی وجود دارد، صنعت فولاد جهان هنوز هم با چالش‌های قابل‌توجهی روبرو است. طبق تحقیقات بازار منتشر شده در سال ۲۰۱۴ [۱]، ظرفیت اضافی بزرگترین تهدید برای صنعت فولاد است. این صنعت در حال تحمل فشار بی‌امان ناشی از سال‌ها ظرفیت اضافی تولید فولاد و حاشیه سود پایین قرار دارد. تحت این شرایط، تنها استراتژی قابل‌دوام برای یک شرکت فولاد تبدیل شدن به تولیدکننده‌ای کم هزینه است.

یک راه دستیابی به آن، بهینه‌سازی پیوسته فرآیندهای تولید آهن‌وفولاد است. در این مقاله، یک ابزار تصمیم‌گیری استراتژیک بر پایه بهینه‌سازی یکپارچه بنام SCOOP ((Steel COst Optimization) ارائه شده است. هدف آن کمک به مدیران ارشد کارخانه‌های فولاد برای بهبود سودآوری و یا کاهش هزینه تولید با بهینه‌سازی خرید مواد اولیه، تنظیم پارامترهای عملیاتی و شناسایی فرصت‌های سرمایه‌گذاری ایجاد ارزش و در عین حال تطابق با کلیه الزامات کیفیتی و عملیاتی است. این سیستم هر دو جنبه فنی و اقتصادی را در نظر می‌گیرد. تعادل‌های شیمیایی، ترمودینامیک فرآیند، محدودیت‌های بهره‌وری و قابلیت‌دسترسی مواد را در نظر می‌گیرد و کلیه هزینه‌های مربوط به فرآیندهای فولادسازی را لحاظ می‌نماید. با استفاده از مفاهیم حد قیمت نهائی و هزینه نهائی معرفی شده در این ابزار، می‌توان تحلیل سناریوهای مختلف یا تحلیل حساسیت را در مورد پارامترهای فرآیند، مواد یا هزینه انجام داد.

با توجه به این واقعیت که بسیاری از شرکت‌های فولاد از قبل دارای مدل‌های بسیار خوب و مفصلی برای هر واحد بهره‌برداری (برای مثال کوره بلند، کارخانه کک‌سازی، کارگاه فولادسازی و غیره) هستند، اما اکثر این مدل‌ها بطور مستقل در حالت "جدا از هم" اجرا می‌شوند، فولادسازان احتمالاً مشکلاتی برای پیدا کردن راه‌حل فراگیر کل برای به حداکثر رساندن سود شرکت یا به حداقل رساندن هزینه خواهند داشت. این سیستم با یکپارچه‌سازی کامل کلیه فرآیندها از خرید مواد اولیه تا تولید محصولات نهایی، خود را از مدل‌های موجود در کارخانه متمایز می‌کند. این یک مزیت مهم را به همراه دارد که تمام تصمیمات مهم مدیریت همزمان در یک مدل واحد در نظر گرفته می‌شوند، به طوری که اهرم‌های جدید بهبود با چشم باز را امکانپذیر می‌کند.

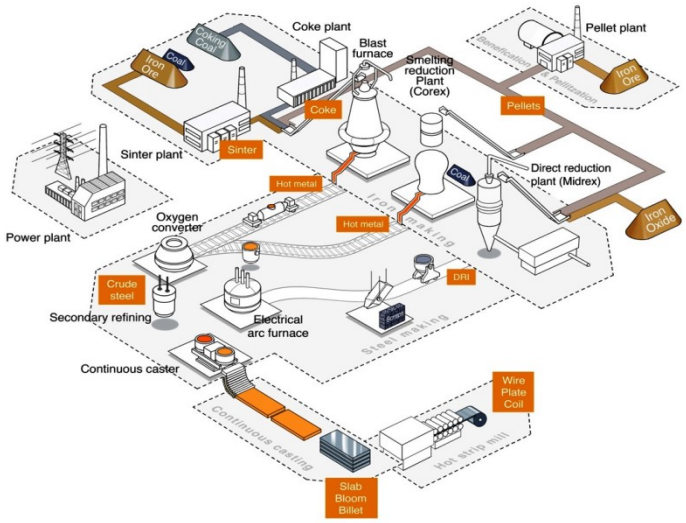
در این مقاله، تکنولوژی بهینه‌سازی بکار رفته در سیستم مذکور در بخش ۲ مورد بحث قرار می‌گیرد، و پس از آن دو مطالعه موردی صنعتی در دنیای واقعی، که در آن مثال اول در مورد هزینه بهینه به صورت تابعی از سطح تولید فولاد بحث می‌کند و مثال دوم نشان می‌دهد که چگونه این ابزار می‌تواند برای ارزیابی تأثیر مواد اولیه قابل‌دسترس جدید بر هزینه تولید مورد استفاده قرار

[1] - Benoit David, Yves Goldblatt and Yale Zhang, Industrial Experiences in Maximizing Profit of Steel Production by Integrated Optimization Technology.

گیرد. مقاله با خلاصه‌ای از مزایای استفاده از این سیستم و همچنین برآورد هزینه صرفه‌جویی به ازای هر تن فولاد به پایان می-رسد.

۲ بهینه‌سازی یکپارچه و کاربردهای آن

بهینه‌سازی یکپارچه مهمترین ویژگی سیستم SCOOP است. همانطورکه در **شکل ۱** نشان داده شده است، با در نظر گرفتن تقریباً تمام چیدمان‌های نمودار جریان ممکن در یک مجتمع یکپارچه تولید فولاد، این سیستم قادر است هر واحد عملیاتی مجزا و همچنین تعاملات آنها را بهینه کند. برای مثال، می-توان به برخی از سؤالات جالب مربوط به تصمیمات بین–قسمتی پاسخ داد:



شکل ۱– دامنه فرآیند کامل سیستم SCOOP

- میزان بهینه گوگرد در چدن خام چقدر خواهد بود؟ آیا باید از ذغال‌سنگ ارزانتر برای تولید کک با گوگرد بالا با هزینه کم که به چدن خام با گوگرد بالا منجر می-شود، یا برعکس آن برای کاهش هزینه گوگردزدایی در فولادسازی استفاده کرد؟ چگونه این مقدار بهینه گوگرد با انواع ترکیب نهایی محصول که توسط تقاضای بازار تعیین می‌شود تغییر خواهد کرد؟
- بسته به ظرفیت تولید متفاوت آنها، ترکیب انواع گرید فولاد، قیمت و قابلیت‌دسترسی به قراضه، بهترین تخصیص چدن خام بین چند کارگاه فولادسازی به چه صورتی خواهد بود؟

مکانیزم پشت صحنه برای پاسخ به این سؤالات، یک مدل بهینه‌سازی غیرخطی روشن در مقیاس بزرگ است که در آن تابع هدف به حداکثر رساندن سودآوری کلی شرکت است، یعنی درآمد حاصل از فروش محصول نهایی منهای کل هزینه‌های ثابت و متغیر، شامل هزینه مواد اولیه، بستانکار محصول جانبی، هزینه انرژی و عملیات و غیره. محدودیت‌های فنی کلیدی و متغیرهای تصمیم‌گیری به شرح زیر است:

- قابلیت‌دسترسی به مواد در بازار؛
- سرعت شارژ کردن و نسبت مخلوط مواد اولیه در هر واحد عملیاتی؛
- ترکیب شیمیایی، کیفیت و مقدار تولید محصولات واسط مانند کک، زینتر، چدن خام و غیره؛
- موازنه جرم و حرارت هر واحد عملیاتی، برای مثال، استفاده از کک/ PCI/گاز طبیعی در کوره بلند بر اساس الزام موازنه حرارتی تعیین می‌شود؛
- بهره‌وری و ظرفیت هر واحد عملیاتی؛
- تقاضای بازار برای هر گروه محصول نهایی.

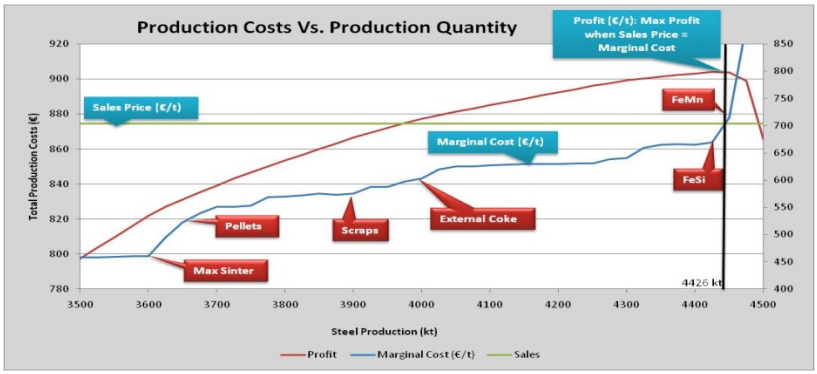
برای یک کارخانه معمول فولاد کربنی 5MT، در این مدل بهینه‌سازی بیش از ۵۰۰ متغیر تصمیم‌گیری وجود خواهد داشت، و تعداد کل محدودیت‌های خطی و غیرخطی فراتر از ۲۵۰۰۰ مورد است.

چالش‌های ریاضی برای حل این مدل بهینه‌سازی در چند دقیقه وجود دارد، گرچه خارج از حیطه این مقاله است. پس از حل مدل، می‌توان از آن برای محاسبه حد قیمت نهایی (LMP) مواد اولیه، هزینه نهایی محصولات نهایی و انجام تحلیل حساسیت و

بررسی سناریو استفاده کرد. همه این تحلیل‌ها می‌تواند کمک بزرگی به فولادسازان برای تصمیم‌گیری درست و پاسخ سریع به تغییر شرایط بازار کند. برخی از کاربردهای معمول این سیستم در زمینه‌های مختلف عملکردی عبارتند از:

- **خرید**: استفاده از LMP برای ارزیابی ارزش واقعی مواد اولیه قابل‌دسترس در بازار و تعیین خرید بهینه. LMP همچنین می‌تواند برای مذاکره در مورد قیمت یا مقدار با تامین‌کنندگان بکار رود.
- **برنامه‌ریزی تولید**: بهینه‌سازی گروه محصول نهایی و تمرکز بر سودآورترین محصولات بر اساس هزینه نهائی محاسبه شده.
- **مطالعه استراتژیک**: شناسایی گلوگاه‌های فرآیند و محاسبه ROI برای بهبودهای فرآیندی جدید.
- **فرآیند/عملیات**: تصمیم‌گیری در مورد پارامترهای بهینه فرآیند، همانند محتوای گوگرد و سیلیسیم در چدن خام، کیفیت کک (با تأثیر بر استفاده از PCI و بهره‌وری کوره بلند) و غیره.
- آخرین مورد اما نه کمترین، در **مدیریت مشارکتی:** این مدل به عنوان یک بستر همکاری در سراسر شرکت عمل می‌کند، ارتباط بین افراد بخش‌های مختلف کارکردی (برای مثال خرید، هزینه، عملیات و ...) را به طور قابل‌توجهی ارتقا می‌بخشد و به سرعت نیروی حاصل برای محو "موارد جدا از هم" عملیات و بهبود کلی عملکرد را تشکیل می‌دهد.

در طی ده سال گذشته، این سیستم با موفقیت در بیش از ۱۵ کارخانه فولاد (شامل ArcelorMittal، Thyssenkrupp، ERDEMIR، ESSAR، Usiminas، CSN، Gerdau، Severstal و غیره) اجرا شده است. در بخش بعدی، دو مطالعه موردی صنعتی برای نشان دادن ارزش این مدل شرح داده شده‌اند.



شکل ۲- هزینه نهائی اسلب فولاد محاسبه شده توسط SCOOP
(تمام اعداد به دلایل محرمانه بودن بازنگری شده‌اند)

۳ مطالعه موردی صنعتی

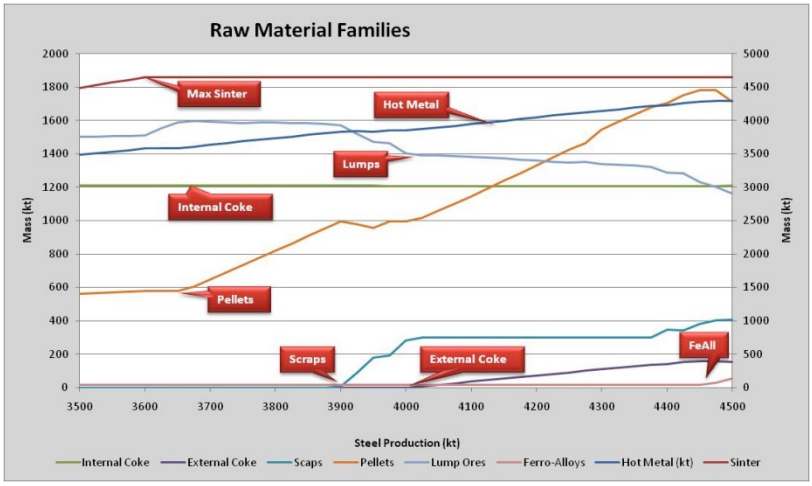
۳,۱ تصمیم‌گیری بهینه سطح تولید

در طی بحران اقتصادی چند سال گذشته [۲۰۰۸]، بسیاری از شرکت‌های فولاد مجبور به کاهش تولید شدند. با بهبود تقاضای فولاد در بازار آمریکا، شرکت "A" شروع به برنامه-ریزی افزایش تولید کرد. اما این بار، مدیریت ارشد بجای مقدار بیشتر بر سودآوری تمرکز نمود. آنها می‌خواستند سطح تولید بهینه برای شرایط بازار مورد نظر را بدانند. برای پاسخ به این سوال، یک کارگروه برای انجام تحلیل با استفاده از این مدل تشکیل شد.

هزینه نهائی اسلب فولاد (یعنی، هزینه تن بعدی اسلب فولاد تولید شده) محاسبه و با قیمت فروش اسلب مقایسه شد، همانطورکه در **شکل 2** نشان داده شده است. هر نقطه از منحنی هزینه نهائی (خط آبی) نتیجه یکبار اجرای بهینه‌سازی این مدل است که حداقل هزینه قابل‌دستیابی برای سطوح تولید مورد نظر را نشان می دهد. همانطورکه نمودار نشان می‌دهد، این کارخانه به طور ثابت قادر به تولید با هزینه کم بود وقتی که تولید کمتر از 3.6MT باشد. بالاتر از آن، هزینه نهائی به طور قابل‌توجهی افزایش یافت، و در نهایت به قیمت فروش اسلب در سطح تولید 4.4MT رسید. در این نقطه حداکثر سود حاصل شد.

دلایل افزایش پیوسته هزینه نهائی چیست؟ مدل پاسخ مفصلی ارائه داد. همانطورکه در **شکل۳** نشان داده شده است، مصرف هر خانواده از مواد اولیه بر حسب تغییرات سطح تولید ترسیم شد. به وضوح دیده می‌شود که برای این مثال خاص، حداکثر ظرفیت کارخانه زینتر در سطح تولید 3.6MT حاصل شده و در نتیجه، مصرف گندله شروع به افزایش کرده که باعث بالا رفتن هزینه تولید گردیده است. در حدود 3.9MT، استفاده از قراضه شروع می‌شود و هزینه تولید را بالاتر می‌برد. در سطح تولید 4.0MT، کارخانه

کک داخلی با ظرفیت کامل در حال کار بود و کک گران قیمت خارجی نیز لازم بود. وقتی تولید از سطح 4.4MT گذشت، هزینه نهائی در مسیر سبقت از قیمت فروش اسلب بود، به کاهش سریع سود کلی منجر گردید. در این مرحله تولید چدن خام بسیار بالا بود که نیاز به استفاده از گندله های گرانتر و کلوخه (لامپ) سنگ معدن کمتری دارد. مصرف قراضه نیز زیاد بود، که دو پیامد داشت: (۱) مصرف FeSi گران برای جلوگیری از کاهش دما؛ و (۲) در این مثال خاص، گریدهای فولادی تولید شده به یک حداقل میزانی منگنز نیاز دارند. به دلیل رقیق بودن منگنز در چدن مذاب، FeMn بسیار گران برای افزایش میزان منگنز در فولاد مذاب مورد نیاز بود.



شکل ۳- میزان مصرف هر خانواده از مواد اولیه

در این مطالعه موردی، تصمیم بهینه‌ای در مورد سطح تولید بر اساس هزینه نهائی فولاد در مقایسه با شرایط فعلی بازار گرفته شد. با تغییر شرایط بازار (قیمت فروش اسلب)، شرکت "A" قادر به تنظیم سریع برنامه تولید برای به حداکثر رساندن سودآوری کل می باشد.

۳,۲ ارزیابی تأثیر PCI جدید بر هزینه اسلب

در این مطالعه موردی، شرکت "B" امکان استفاده از یک کک نفتی کم هزینه PCI با نام CPATE را دارد. البته این فرصت خوبی برای کاهش هزینه تولید چدن مذاب است. اما، CPATE گوگرد نسبتاً بالایی (یعنی، ۴,۵۷ درصد) دارد و بنابراین تأثیر زیادی بر گوگرد موجود در چدن مذاب خواهد داشت، که می‌تواند به هزینه بالاتر گوگردزدایی در کارگاه‌های فولادسازی منجر شود. سوال این است: آیا باید از این ماده جدید استفاده شود و اگر چنین باشد، تأثیر بر هزینه اسلب چه خواهد بود؟ این مجتمع شامل دو واحد عملیاتی مختلف است: آهن‌سازی و فولادسازی. این مدل به دلیل ویژگی بهینه‌سازی یکپارچه آن، ابزار درستی برای پاسخ به این نوع سؤال است. برای انجام این کار، CPATE به عنوان یک ماده اولیه تازه در دسترس، به همراه ترکیب شیمیایی دقیق، خواص فیزیکی، قیمت بازار و در دسترس بودن آن، به مدل اضافه شد.

جدول ۱- گوگرد محتوی چدن مذاب در مطالعه موردی ۲

گوگرد محتوی (٪)	BF#1	BF#2	BF#3
حالت پایه بدون CPATE	۰,۰۴۱	۰,۰۴۰	۰,۰۴۴
حالت جدید با CPATE	۰,۰۸۱	۰,۰۷۹	۰,۰۸۲

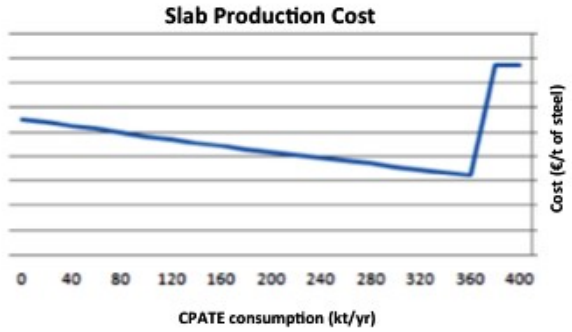
جدول ۲- تأثیر اقتصادی CPATE

اثرات	تفاوت
تأثیر بر هزینه تولید چدن مذاب	-8.71 €/thm
تأثیر بر هزینه گوگردزدایی	+0.66 €/tsl
تأثیر بر هزینه تولید اسلب	-7.34 €/tsl

اجرای مدل نتایج زیر را ارائه داده بود:

- نسبت مخلوط بهینه جدیدی از PCI، که شامل CPATE است. این بدان معنی است که CPATE تأثیر مثبتی بر سودآوری کلی دارد.
- حداکثر نرخ مصرف PCI به میزان 150 kt/thm محاسبه شد.
- مقدار گوگرد چدن مذاب تولید شده توسط هر کوره بلند، در مقایسه با حالت پایه که در آن از CPATE استفاده نشده در **جدول1** آورده شده است.
- و از همه مهمتر، این سیستم تأثیر اقتصادی CPATE بر هزینه اسلب را محاسبه کرد. همانطورکه در **جدول۲** نشان داده شده است، کل هزینه تولید اسلب ۷,۳۴ یورو بر تن فولاد کاهش یافت که عمدتاً به علت کاهش هزینه تولید چدن مذاب به میزان ۸,۷۱ یورو بر تن چدن مذاب و ۰,۶۶ یورو بر تن افزایش هزینه گوگردزدائی از فولاد در فولادسازی است.

می‌توان استنتاج که CPATE یک PCI بسیار جذاب است که می‌تواند بهبود قابل‌توجهی در سودآوری کل ایجاد کند. علاوه بر این، تحلیل حساسیت با استفاده از این مدل انجام شد. **شکل۴** هزینه تولید اسلب را با مصرف مقادیر مختلف CPATE نشان می‌دهد. به وضوح دیده می‌شود که مصرف بهینه CPATE به میزان 367kg/yr است. این هدف تعیین شده برای بخش تدارکات برای خرید از بازار خواهد بود.



شکل ۴- هزینه تولید اسلب بر حسب کل میزان مصرف CPATE در سال.

در این مطالعه موردی، از این مدل برای ارزیابی مواد اولیه قابل‌دسترس جدید برای مقایسه بین کاهش هزینه عملیات کوره بلند و افزایش هزینه گوگردزدائی در کارگاه فولادسازی استفاده شد. این هدف تنها با بهینه سازی یکپارچه قابل‌دستیابی است.

۴. نتیجه‌گیری

سیستم SCOOP کمک قابل‌توجهی به بسیاری از کارخانه‌های فولاد کرده و منفعت سالانه چند دلار بر تن فولاد را حاصل نموده است. این مزیت عمدتا در زمینه‌های زیر حاصل می‌شود:

- بهینه‌سازی یکپارچه کل فرآیند تولید فولاد از خرید مواد اولیه تا امکانات تولیدی پایین‌دستی به جای در نظر گرفتن بهینه-سازی موضعی عملیات منفرد "موارد مجزا".
- درک بهتر فرآیندها و تأثیرات پیچیده مربوط به واحدهای مختلف عملیاتی. در نتیجه تصمیمات را می‌توان متناسب با حداکثر سود کل اتخاذ کرد.
- قدرت مذاکره اضافی حاصل از ارزیابی ارزش واقعی مواد اولیه در مقایسه با قیمت خرید آنها.

به طور خلاصه، این مدل ابزاری استراتژیک است که می‌تواند برای تصمیم‌گیری‌های کلیدی در مورد خرید مواد اولیه، برنامه-ریزی تولید و عملیاتی که سود کل شرکت را به حداکثر می‌رساند، مورد استفاده قرار گیرد. این ابزار جمع‌آوری داده‌ها و دانش موجود در کارخانه فولاد را به منظور تهیه اطلاعات کمی و کیفی که روند تصمیم‌گیری را تقویت می‌کنند، امکانپذیر می‌سازد.

مراجع:

[1] Ernst & Young, Global Steel 2014, http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/EY_-_Global_steel_2014/$FILE/EY-Global-steel-2014.pdf