

ارائه یک الگوریتم ابتکاری کارا برای مسئله زمانبندی خط اسیدشویی نورد سرد مجتمع فولاد مبارکه اصفهان

محبوبه کبیری^{۱*}، پریناز واعظ^۱

۱. کارشناس برنامه‌ریزی تولید، شرکت بین المللی مهندسی سیستم‌ها و اتوماسیون (ایرسا).

خلاصه

با توسعه اقتصاد و افزایش رقابت در صنایع مختلف، کاهش هزینه‌های تولید تبدیل به یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های شرکت‌های تولیدی شده است. برای نیل به این هدف باید تا حد امکان شرایط مدل‌سازی مسئله را به شرایط واقعی نزدیک نمود. در این مقاله، مسئله برنامه‌ریزی و زمان‌بندی خط تولید اسیدشویی در ناحیه نورد سرد مجتمع فولاد مبارکه اصفهان (Pickling Line Scheduling) یا PLS) ارائه شده است. مسئله مورد بررسی، انتخاب مناسب و تعیین توالی برنامه‌های خط تولید و به طور همزمان انتخاب مناسب و تعیین توالی کلاف‌های داخل این برنامه‌ها با در نظر گرفتن محدودیت‌های متنوع حاکم بر تولید خط تولید اسیدشویی است. هدف مسئله، افزایش بهره‌وری خط تولید و کاهش هزینه‌های تولید است. به دلیل حجم بالای تولید در مجتمع فولاد مبارکه و تعدد محدودیت‌های تولیدی، نیاز به یک مدل ابتکاری برای حل مسئله در کوتاهترین زمان است به همین دلیل یک مدل ریاضی غیر خطی و یک الگوریتم ابتکاری برای حل مسئله ارائه شده است. نتایج حاصل از نمونه‌های واقعی مورد بررسی نشان دهنده کارایی الگوریتم نسبت به روش دستی برنامه‌ریزی مورد استفاده در شرکت فولاد مبارکه اصفهان است.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۳۹۴/۱۱/۱۱

پذیرش ۱۳۹۵/۱۲/۲۱

کلمات کلیدی:

اسیدشویی

نورد سرد

الگوریتم ابتکاری

برنامه‌ریزی تولید

۱- مقدمه

امروزه بازارها بسیار رقابتی و جهانی شده‌اند. تقاضای مشتریان به طور مداوم تغییر می‌کند و آنها به دنبال داشتن محصولات متنوع با همان قیمت محصولات تولید انبوهی هستند. این تغییر در بازار، نیاز به محصولات متنوع را افزایش داده است، به طوری که محصولات متنوع و سفارشی جایگزین محصولات استاندارد شده‌اند. شرکت‌های تولیدکننده نیاز دارند که دامنه وسیعی از نیازهای مشتریان را با هزینه‌های تولیدی پایین برآورده کنند. از طرفی صنعت فولاد یکی از مهم‌ترین و تأثیرگذارترین صنایع در رشد و توسعه صنعتی هر کشوری محسوب می‌شود و فولاد به عنوان محصول میانی تقریباً در تمام صنایع از قبیل صنعت حمل‌ونقل، ساختمان، خودروسازی، نفت و گاز، ساخت ماشین‌آلات، معدن و ... کاربرد دارد. در صنایع

تولید فولاد به دلیل تنوع محصولات، چند سطحی بودن تولید، هزینه‌های هنگفت تولید و همچنین امکان زوال محصول، تولید به صورت سفارشی انجام می‌گیرد. با این وجود نیاز به سرمایه درگیر بسیار بالا، هزینه‌های عملیاتی گزاف و افزایش شدید قیمت حامل-های انرژی استفاده بهینه از منابع در دسترس و کمینه کردن هزینه‌های عملیاتی را به یک مسئله بحرانی تبدیل نموده است. از این رو استفاده از روش‌های کارآمد برنامه‌ریزی و زمان‌بندی تولید یکی از موضوعات مهم در این زمینه به شمار می‌آید.

برنامه‌ریزی تولید، به مجموعه فعالیت‌هایی که با هدف استفاده بهینه از منابع تولید به منظور ارضای اهداف تولید در طول یک دوره مشخص صورت می‌گیرد، گفته می‌شود. برنامه‌ریزی تولید عموماً شامل سه بازه زمانی تصمیم‌گیری بلندمدت، میان‌مدت و کوتاه مدت می‌باشد. زمان‌بندی عملیات و توالی کارها موضوع برنامه‌ریزی کوتاه مدت هستند. زمان‌بندی به معنای تعیین دقیق این مسئله است که چه محصولی، در چه زمانی و بر روی چه ماشینی پردازش

* نویسنده مسئول: محبوبه کبیری

تلفن: ۰۷۳۰-۳۶۶۶۰۳۱، پست الکترونیکی: m.kabiri@irisaco.com

مجدد خواهد بود. در نورد سرد برخلاف نورد گرم نیازی به گرم کردن ورق نیست همچنین سطح ورق از پرداخت بسیار بهتری برخوردار است و خواص استحکامی بهتری در ورق ایجاد می شود. در مقابل نورد سرد نیز مشکلات و محدودیت‌هایی از جمله، نیروهای بسیار زیادی برای تقلیل ضخامت ورق، وسایل و تجهیزات بسیار سنگین‌تر و قوی‌تری نیاز دارد همچنین امکان تقلیل ابعاد محدودتر از نورد گرم است و هرچه میزان تقلیل ضخامت بالا می‌رود نیروی فشاری و کششی بیشتری احتیاج دارد. لذا برنامه‌ریزی مناسب توالی کلاف‌ها با توجه به محدودیت‌های تولیدی در نورد سرد از اهمیت خاصی برخوردار است.

ادبیات موضوع برنامه‌ریزی و زمان‌بندی تولید در صنایع فولاد، حوزه وسیعی از سیستم‌های برنامه‌ریزی و زمان‌بندی را در برمی‌گیرد. اما بسیاری از مطالعات بر روی یک فرآیند خاص تمرکز دارند و تعاملات بین بخش‌ها را نادیده می‌گیرند. تانگ و همکاران [۱] تحلیل جامعی بر فرآیندهای مختلف تولید فولاد و سیستم‌های برنامه‌ریزی در این صنعت انجام داده‌اند. برخی افراد نیز روش‌های حل مختلفی برای این مسائل ارائه کرده‌اند. اکانو و همکاران [۲] مسئله زمان‌بندی در خط محصول نهایی در یک شرکت فولادی در ژاپن مورد مطالعه قرار دادند هدف ایشان تعیین کلاف‌های برنامه‌ها و توالی آن‌ها در برنامه‌ها به منظور حداکثر سازی بهره‌وری و کیفیت محصولات و مینیمم‌سازی دیرکردها است. وانگ و همکاران [۳] یک الگوریتم ژنتیک بر پایه فرآیند بهینه‌سازی برای زمان‌بندی خط تاندم میل ارائه نموده‌اند. پورتمن و روهر [۴] از الگوریتم شبیه سازی آنیل برای حل مسئله زمان‌بندی در صنایع فولاد استفاده نموده است. چن و وانگ [۵] از مدل‌سازی برنامه ریاضی، یاکوبز و همکاران [۶] از برنامه‌ریزی آرمانی، لوپز و همکاران [۷] از الگوریتم جستجوی ممنوع، تانگ و همکاران [۸] از برنامه‌ریزی ریاضی، چن و وو [۹]، تانگ و همکاران [۱۰] از الگوریتم ژنتیک، کولینگ و رزیگ [۱۱] از یک الگوریتم ترکیبی برنامه‌ریزی ریاضی و روش ابتکاری استفاده کرده‌اند. یدانپور و همکاران [۱۲] از الگوریتم ابتکاری جستجوی محلی هدایت شونده برای مسئله زمان‌بندی خطوط نورد گرم با در نظر گرفتن شارژ گرم بهره برده‌اند. تانگ و وانگ [۱۳] یک مدل ریاضی غیرخطی برای خط رنگی نورد سرد ارائه نموده‌اند و برای حل آن یک روش فرا ابتکاری جستجوی ممنوع ارائه نموده و با داده‌های واقعی شرکت فولاد در چین مقایسه نموده‌اند. یانگ و همکاران [۱۴] مسئله تعیین توالی در خط گالوانیزه ناحیه نورد سرد را مورد بررسی قرار داده‌اند و یک الگوریتم چند جمله دو مرحله‌ای ارائه نموده‌اند.

در حوزه برنامه‌ریزی تولید و زمان‌بندی مدل‌های مختلفی برای کارخانجات و کارگاه‌های تولیدی ارائه شده است. از جمله فخرزاد و علی نژاد [۱۵] که برنامه‌ریزی و زمان‌بندی پیشرفته با در نظر گرفتن اثر یادگیری در سیستم‌های ساخت کارگاهی انعطاف پذیر را مورد بررسی قرار دادند. آنها برای حل مسئله خود یک الگوریتم ژنتیک

شود. به عبارت دیگر زمان‌بندی، زمان شروع و پایان تمامی کارها و توالی آنها را بر روی هر یک از ماشین‌آلات مشخص می‌نماید. یکی از مهمترین فرضیات که در مسائل برنامه‌ریزی تولید مورد توجه قرار می‌گیرد، فرض آماده‌سازی است. مسائل زمان‌بندی که آماده‌سازی را در نظر می‌گیرند به دو دسته تقسیم می‌شوند. اولین دسته شامل زمان‌های آماده‌سازی مستقل از توالی می‌باشد، دسته دوم شامل زمان‌های آماده‌سازی وابسته به توالی می‌باشد. در شرایط واقعی اغلب آماده‌سازی محصول وابسته به توالی است. آماده‌سازی ماشین برای تولید یک نوع محصول اغلب نیازمند صرف هزینه و زمان است، برای تأمین تقاضای دوره‌های مختلف می‌توان آن‌ها را با یکدیگر جمع و در یک دوره تولید نمود. این کار از یک طرف باعث صرفه‌جویی در زمان و هزینه می‌شود اما در مقابل، باید این موضوع را در نظر گرفت که تولید محصولات در دوره‌ای غیر از دوره‌ی تقاضا، باعث تحمیل هزینه نگهداری موجودی و یا هزینه کمبود محصول می‌شود.

نظام برنامه‌ریزی و کنترل تولید در شرکت فولاد مبارکه اصفهان در یک ساختار سلسله مراتبی، بر پایه برنامه‌ریزی تولید بر اساس سفارش (MTO^۱) بنا شده است که توسط قسمت برنامه‌ریزی و کنترل تولید (PPC^۲) انجام می‌شود. این قسمت به عنوان پل ارتباطی تولید و فروش، با هدف تحویل به موقع محصول به فروش، استفاده بهینه از امکانات و توانایی‌های موجود و موازنه خطوط تولید و موجودی انبارها به فعالیت مشغول است. فرآیند تولید در فولاد مبارکه اصفهان به این شکل است که پودر آهن در واحد گندله-ساز تبدیل به گلوله‌هایی به نام گندله شده و در واحد احیای مستقیم با از دست دادن اکسیژن خود به آهن اسفنجی تبدیل و سپس در کوره‌های قوس الکتریکی واحد فولادسازی همراه با قراضه و فروآلیاژهای مورد نیاز ذوب می‌شود. فولاد مذاب به ماشین‌های ریخته‌گری منتقل شده و به شمش فولادی (تختال) تبدیل می‌گردد. بخشی از کلاف‌های تولید شده در واحد تورد گرم به نورد سرد حمل می‌شود تا با عملیات مختلفی مانند برطرف کردن عیوب فیزیکی، روغن کاری، تقلیل ضخامت، دادن خواص مکانیکی و متالورژیکی و پرداخت سطحی قرار گیرد و در قسمت‌های اسیدشویی، نورد تاندم، خط بازیخت خنثی، نورد سخت کردن سطحی، نورد پوسته‌ای، خطوط تصحیح و برش، مورد عملیات لازم قرار گرفته و بسته بندی گردد.

نورد سرد یا کار سرد در اصطلاح به تغییر شکل پلاستیکی فلزات (در اینجا فولاد) در درجه حرارتی پایین‌تر از دمای تبلور مجدد اطلاق می‌شود که در بیشتر موارد، عملیات در دمای محیط صورت می‌گیرد. برای ایجاد شکل‌پذیری بیشتر ممکن است در شرایط خاصی عمل شکل دادن یا نورد کردن در دمای بالاتری صورت پذیرد ولی در هر صورت این دما پایین‌تر از دمای تبلور

1. Make To Order
2. Production Planning & Control

نیاز سفارش برسد. بخش خروجی شامل دستگاه روغن زن، تجهیز کنترل لبه ورق برای جلوگیری از تلسکوپی شدن کلاف، قیچی خروجی، کلاف جمع کن خروجی، کوپل کار (مجهز به ترازوی اندازه گیری وزن کلاف) می باشد. کلاف اسیدشویی شده هم به صورت مستقیم قابل فروش است و هم می تواند برای تولید محصول با ضخامت کمتر به خط نورد سرد فرستاده شود اما مهمترین دلیل انجام فرایند اسیدشویی، تولید مواد خام برای خط نورد سرد است. کلاف اسیدشویی شده برای فروش، به صورت خشک یا روغن زده شده و با ابعاد مختلف بر اساس نیاز مشتری آماده تحویل می شود. به طور کلی محصولات اسیدشویی شده به سه بخش تقسیم می شوند؛ کلاف های ارسالی جهت واحد تاندم میل، کلاف های ارسالی جهت واحد نورد دو قفسه ای و کلاف های ارسالی جهت مشتری.

۳- تعریف مسئله

در خط اسیدشویی علاوه بر اکسیدزدایی کلاف های این خط اغلب نیاز به کناره بری نیز دارند. کیفیت کناره بری ارتباط مستقیم با تیغه های موجود بر روی دستگاه دارد. در صورتی که تیغه ها بیش از اندازه کار کرده باشند سبب ایجاد پلیسه در کناره های کلاف و معیوب شدن آن می شوند. در نتیجه با وجود هزینه زیاد تعویض تیغه، می بایستی برای حفظ کیفیت محصول در بازه های زمانی معینی آن ها را تعویض نمود. با این وجود نحوه انتخاب کلاف مناسب در فاصله بین این تعویض ها به شدت در بهره وری تیغه ها تاثیرگذار است. در حال حاضر در این خط برنامه ریزی تولید به صورت دستی انجام می شود. منظور از برنامه ریزی دستی این است که یک نفر در هر شیفت بایستی با در نظر گرفتن محدودیت های موجود و شرایط خط برنامه ریزی تولید را به عهده بگیرد که با توجه به حجم زیاد کلاف های موجود در انبار قبل از خط و همچنین تعدد محدودیت های خط و متغیر بودن وضعیت تیغه ها در هر روز، احتمال خطا در برنامه ریزی بالا می رود و در عین حال سرعت برنامه ریزی نیز با افزایش داده های مسئله کاهش می یابد. در چنین شرایطی وجود یک برنامه ریزی عملیاتی اتوماتیک که بتواند با در نظر گرفتن کلیه محدودیت ها و شرایط خط و وضعیت کلاف های انبار قبل از خط، یک جواب بهینه داشته باشد، بسیار موثر است. در این مقاله مدلی برای برنامه ریزی این خط ارائه می گردد که در کمترین زمان ممکن یک جواب نزدیک به بهینه را به دست می آورد و می تواند جایگزین سیستم برنامه ریزی دستی شود.

به مجموعه کلاف هایی که دارای ویژگی های مشترک هستند، یک نوع برنامه^۱ گفته می شود. مجموعه برنامه هایی که در فاصله ای دو تعویض متوالی تیغه های دستگاه کناره بری قرار می گیرند، تحت

چند مرحله ای پیشنهاد دادند. باقری نژاد و قهقائی [۱۶] یک سیستم تولید MTS/MTO با مدل سازی صف را ارائه کردند. آن ها با استفاده از حداقل نمودن هزینه های کل، نقطه بهینه نمودن سفارش و میزان بافر بهینه را تعیین نمودند.

در این مقاله در بخش بعد ابتدا شرح فرایند در خط اسیدشویی بیان گردیده و سپس به تعریف مسئله، اهداف و محدودیت های آن با ارائه یک مدل ریاضی پرداخته می شود. در بخش چهارم نحوه برنامه ریزی کلاف ها در شرایط فعلی توضیح داده شده و سپس به شرح الگوریتم ابتکاری پرداخته می شود. در بخش پنجم کارایی الگوریتم ابتکاری با روش برنامه ریزی دستی موجود در شرکت فولاد مبارکه مقایسه شده و نتایج حاصله مورد بررسی قرار می گیرد.

۲- شرح فرآیند تولید خط اسیدشویی

تولید محصولات سرد و پوشش دار فولاد مبارکه اصفهان در ناحیه نورد سرد صورت می پذیرد. شروع عملیات در نورد سرد با انجام عملیات اسید شویی و حذف اکسیدهای سطحی کلاف های ورودی از نورد گرم آغاز می شود، که پس از اسید شویی تحت عملیات کاهش ضخامت در تاندم میل و نورد دو قفسه ای قرار گرفته و سپس جهت تولید محصولات سرد و پوشش دار به خطوط پایین دستی منتقل می شود. در هر واحد فرایند مربوطه انجام شده و نهایتاً محصولات تولیدی بازرسی، تست، بسته بندی و ارسال می گردد.

اسیدشویی اولین فرآیند مربوط به ورق های فولادی در قسمت نورد سرد مجتمع فولاد مبارکه می باشد.

- در واحد اسید شویی عملیات زیر بر روی ورق صورت می پذیرد
 - حذف اکسیدهای سطحی از روی ورق با عبور دادن آن از حوضچه های اسید کلریدریک
 - کناره بری ورق برای رسیدن به عرض نهایی و حذف عیوب احتمالی موجود در کناره های ورق
 - روغن کاری سطح ورق با استفاده از ماشین الکترواستاتیک
 - اصلاح شکل ورق با استفاده از دستگاه استرچ رولر

محصول این خط کلاف اسیدشویی نامیده می شود. خط اسیدشویی را می توان به چهار بخش تقسیم کرد. بخش ورودی، بخش فرایندی، بخش لبه بری و بخش خروجی. بخش ورودی شامل نوار نقاله، دو قرقره کلاف بازکن، قیچی ورودی، ماشین جوش، دستگاه سنگزنی، تجهیز کنترل مرکز ورق و لوپ ذخیره ورق است. پس از آن کلاف به بخش فرایند می رود. این بخش شامل یک مخزن شستشو، شش حوضچه اسید رقیق شده، حوضچه های شستشوی ورق و خشک کن می باشد. در بخش فرایند اکسیدهای روی، ورق توسط محلول رقیق اسید هیدروکلریک جدا شده و سطح آن با آب شسته شده تا اسید به جا مانده جدا شود. سپس با هوای داغ، خشک شده و به بخش لبه بری می رود. در بخش لبه بری، لبه های ورق بریده شده تا عرض ورق به اندازه مورد

۶. داده‌های مسئله شناخته شده و قطعی است.

۳-۳- مدل ریاضی

مدل ارائه شده توسعه‌ای برمدل تانگ و وانگ [۱۳] است که در این مدل اندیس i و j مربوط به کلاف، اندیس k و l مربوط به برنامه و اندیس p و q مربوط به نوع برنامه هستند. پارامترها و متغیرهای مدل به ترتیب در جدول ۱ و ۲ آمده است.

تابع هدف شامل هزینه آماده‌سازی وابسته به توالی بین برنامه‌ها، هزینه دیرکرد کلاف‌ها و هزینه تعداد تغییر عرض در هر برنامه می‌باشد. محدودیت ۲ تضمین می‌کند که هر کلاف تنها یک بار پردازش شود. محدودیت ۳ تضمین کننده پیوستگی تولید است. محدودیت ۴ و ۵ به ترتیب مربوط به محدودیت حداکثر تعداد برنامه و حداکثر تعداد کلاف در برنامه است. محدودیت ۶ و ۷ تضمین می‌کنند که برنامه به ترتیب پردازش شوند. محدودیت ۸ ارتباط بین شروع برنامه و زمان اتمام پردازش کلاف اول این برنامه را نشان می‌دهد. محدودیت ۹ روند صعودی ضخامت در برنامه را تضمین می‌کند. محدودیت ۱۰ تضمین می‌کند که کلاف‌ها به ترتیب تولید شوند. محدودیت ۱۱ مربوط به حداکثر تعداد مجاز تغییر عرض در برنامه می‌باشد. محدودیت ۱۲ تعداد تغییر عرض در برنامه را تعیین می‌کند. محدودیت ۱۳ تضمین می‌کند که اگر برنامه از نوع p انتخاب شود اجازه قرار دادن کلاف در آن را داریم. محدودیت ۱۴ بیان می‌کند که اگر کلاف مربوط به برنامه نوع p است می‌توان در برنامه قرار گیرد. محدودیت‌های ۱۵ و ۱۶ به ترتیب مربوط به محدودیت مقدار مجاز پرش عرض، ضخامت است. روابط ۱۷ و ۱۸ بیان‌کننده تعریف متغیرها هستند.

جدول (۱): پارامترهای مدل ارائه شده

m	حداکثر تعداد برنامه مورد نیاز
n	حداکثر تعداد کلاف در برنامه
d_i	موعد تحویل کلاف i
wid_i	عرض کلاف i
tkS_i	ضخامت کلاف i
wei_i	وزن کلاف i
p_i	مدت زمان پردازش کلاف i
st_{kplq}	زمان آماده‌سازی وابسته به توالی از برنامه k از نوع p به برنامه l از نوع q
sc_{kplq}	هزینه آماده‌سازی وابسته به توالی از برنامه k از نوع p به برنامه l از نوع q
$prog_{ip}$	کلاف i مربوط به نوع برنامه p است
$JWid$	ماکزیمم مقدار پرش عرض (ماکزیمم اختلاف عرض دو کلاف متوالی)
$JTks$	ماکزیمم مقدار پرش ضخامت (ماکزیمم اختلاف ضخامت دو کلاف متوالی)
Coe_{Tar}	هزینه دیرکرد (کمبود)
Coe_{conWid}	هزینه تغییر عرض
$conWid$	حداکثر تعداد تغییر عرض در برنامه

عنوان یک کمپین شناخته می‌شوند. مفهوم کمپین^۱ در این خط با خطوط نوردی متفاوت است؛ به عبارتی در این خط از کمپین به عنوان یک الگو برای برنامه‌ریزی در روزهای مختلف استفاده می‌شود. زمانی که تیغه‌های دستگاه کناره بری عوض می‌شوند یک کمپین آغاز می‌گردد. مهم‌ترین مشخصه در این کمپین ضخامت کلاف است. در ابتدای کمپین کلاف با کمترین ضخامت انتخاب و به تدریج در روزهای بعد کلاف‌های با ضخامت‌های بیشتر انتخاب می‌شوند. به طور کلی روند ضخامت در طول یک کمپین بهتر است تا حد امکان صعودی باشد. به منظور تولید کلاف‌های با کیفیت سطح مناسب بهتر است روند تغییر عرض به خصوص در روزهای اول به صورت صعودی باشد.

۳-۱- محدودیت‌های مسئله

برای برنامه‌ریزی خط اسیدشویی محدودیت‌های زیر وجود دارد:

- محدودیت برنامه ظرفیت یا حفظ جریان مناسب و هموار بین خطوط: کلاف‌های تولید شده در خط اسیدشویی بر اساس سیکل تولیدی خود، به سه دسته مختلف تقسیم می‌شوند. مجموع تناژ یا کیلومتر کلاف‌های تولیدی در برنامه که به قسمت بعدی ارسال می‌گردد، باید مقداری منطقی باشد تا فرآیندهای بعدی دچار موجودی بیش از حد یا بیکاری نشوند.
- محدودیت حداکثر تعداد کلاف در برنامه
- محدودیت حداکثر پرش ضخامت و عرض کلاف‌ها: تفاوت ضخامت و عرض هر کلاف نسبت به کلاف مجاور نباید از یک مقدار مجاز از پیش تعیین شده بیشتر باشد. این مقادیر پرش باید بین کلاف‌های متوالی داخل یک برنامه و همچنین کلاف‌های بین دو برنامه رعایت شود. روند تغییر ضخامت به صورت صعودی و عرض سینوسی است.

۳-۲- فرضیات مسئله

فرضیات مختلفی برای حل مسئله PLS در نظر گرفته شده است که در ادامه به آنها پرداخته می‌شود.

- زمان‌ها و هزینه‌های آماده‌سازی وابسته به توالی می‌باشند.
- کمبود در مسئله می‌تواند اتفاق بیفتد و از نوع پس‌افت است یعنی هر سفارش می‌تواند دیرتر از موعد تحویل خود آماده شود که در این صورت یک جریمه به عنوان جریمه دیرکرد به آن تعلق می‌گیرد.
- هزینه نگهداری در مدل برابر صفر است به عبارتی آماده شدن محصول پیش از موعد هزینه‌بر نیست.
- در ابتدای برنامه‌ریزی فرض شده است در ابتدای کمپین قرار داریم.
- به دلیل شروع کمپین جدید و تعویض تیغه‌های دستگاه کناره بری برای اولین کلاف در برنامه اول محدودیت ابعادی وجود ندارد.

1. Program Type

۴- روش حل

در ناحیه نورد سرد در مجتمع فولاد مبارکه اصفهان، سیستم برنامه‌ریزی تولید موجود در دو مرحله انجام می‌شود. مرحله اول شامل تعیین مجموعه کلاف‌های قابل برنامه‌ریزی مطابق با ویژگی‌های مورد نظر کاربر برحسب شرایط جاری و مرحله دوم انتخاب کلاف از بین مجموعه قابل برنامه‌ریزی و تعیین توالی کلاف‌ها.

خط اسیدشویی اولین مرحله در ناحیه نورد سرد است که کلاف‌های فرستاده شده از نورد گرم را برای سایر خطوط نورد سرد آماده‌سازی می‌کند. به همین دلیل تنوع محصولات در انبار پیش از این خط بسیار بیشتر از سایر خطوط است و از این رو کاربر برای انتخاب کلاف‌ها می‌بایستی مجموعه بزرگی از کلاف‌ها را از نظر موعد تحویل، میزان ماندگاری در انبار، ویژگی‌های ابعادی کلاف‌ها مانند عرض و ضخامت و ... مورد بررسی قرار دهد و کلاف‌های دارای اولویت بالاتر را انتخاب نماید. از طرفی کاربر برای اطلاع از شرایط فعلی خط باید برای هر بار برنامه‌ریزی اطلاعات بروز شده را از بخش تولید دریافت نماید که این حجم تبادل اطلاعات را بالا می‌برد. همچنین در صورت نادیده گرفتن جریان مواد در خطوط پایین دستی ممکن است انبارهای خطوط بعدی بلوکه و یا برخی خطوط دچار بیکاری اجباری شوند. در چنین شرایطی احتمال دیرکرد سفارشات و رعایت نشدن محدودیت‌های تولیدی نیز چندین برابر می‌شود.

در خط اسیدشویی ویژگی‌های مختلفی در کلاف‌ها وجود دارد که سبب می‌شود دو کلاف به دلیل یکسان نبودن در یک ویژگی، نتوانند در یک برنامه قرار بگیرند. به همین دلیل در این تحقیق ابتدا کلاف‌ها را بر اساس این ویژگی‌ها به دسته‌های مختلف تقسیم کرده و به هر دسته، یک کد افراز تخصیص داده می‌شود. هر کلاف بسته به ویژگی‌های سفارش خود تنها در یکی از این افرازاها قرار می‌گیرد. در روش ابتکاری برای ساخت هر برنامه در هر مرحله به ازای کلیه کد افرازاها بدست آمده کلاف با بالاترین امتیاز، انتخاب و توالی آن تعیین می‌گردد. سپس بین برنامه‌های ساخته شده کم هزینه‌ترین برنامه انتخاب و تایید می‌شود. پس از تایید برنامه‌ها، وضعیت جاری سیستم بروزرسانی می‌گردد و به همین منوال به سراغ انتخاب برنامه‌های بعدی می‌رویم.

به طور کلی محدودیت‌های الگوریتم ابتکاری موجود را در به دو دسته می‌توان تقسیم نمود؛ اول محدودیت‌های "انتخاب". این محدودیت‌ها به هنگام غربال و برای کوچک کردن مجموعه‌ی امکان‌پذیر کلاف‌های قابل برنامه‌ریزی استفاده می‌شوند مانند محدودیت کمپین شامل محدودیت حداقل و حداکثر عرض و نوع برنامه. دسته دوم محدودیت‌های "توالی" که محدودیت‌های مربوط به زمان ساخت و بهبود جواب می‌باشند. این محدودیت‌ها به طور

جدول (۲): متغیرهای مدل ارائه شده

x_{ijkp}	کلاف i بعد از کلاف j در برنامه k از نوع p قرار دارد برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر است.
y_{ikp}	کلاف i در برنامه k از نوع p قرار می‌گیرد برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر است
v_{kp}	اگر برنامه k از نوع p انتخاب شود برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر است
z_{kplq}	برنامه l از نوع q بعد از برنامه k از نوع p پردازش می‌شود برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر است
C_i	زمان اتمام پردازش کلاف i
CP_{pk}	زمان اتمام پردازش برنامه k از نوع p
B_{pk}	زمان شروع پردازش برنامه k از نوع p
con_{kjp}	تعداد تغییر عرض در برنامه k که از نوع p است

$$\text{Min } z \quad (1)$$

$$= \sum_k \sum_l \sum_p \sum_q z_{kplq} SC_{kplq} + Coe_{Tar} \sum_{i (C_i > d_i)} C_i - d_i + Coe_{conWid} \sum_k \sum_p \sum_i \sum_j con_{ijkp}$$

$$\sum_k \sum_p y_{ikp} = 1 \quad \forall i \quad (2)$$

$$\sum_j x_{jikp} = \sum_j x_{ijkp} = y_{ikp} \quad \forall i, k, p \quad (3)$$

$$\sum_k \sum_p \sum_l \sum_a z_{kplq} \leq m - 1 \quad (4)$$

$$\sum_i y_{ikp} \leq n \quad \forall k, p \quad (5)$$

$$B_{pk} \geq CP_{pk} + st_{kplq} z_{kplq} + (z_{kplq} - 1)M \quad \forall k, p, l, q \quad (6)$$

$$B_{pk} \leq CP_{pk} + st_{kplq} z_{kplq} + (1 - z_{kplq})M \quad \forall k, p, l, q \quad (7)$$

$$B_{pk} + p_i - (1 - x_{0ikp})M \leq C_i \quad \forall i, k, p \quad (8)$$

$$x_{ijkp} = 0 \quad \forall i, j, k, p \text{ if } tks_i > tks_j \quad (9)$$

$$C_i \leq (C_j - p_j) + (1 - x_{ijkp}) \leq M \quad \forall i, j, k, p \quad (10)$$

$$\sum_i \sum_i con_{ijkp} \leq conWid \quad \forall k, p \quad (11)$$

$$\sum_i x_{ijkp} (wid_i - wid_j) \leq con_{ijkp} \quad \forall k, p, j \quad (12)$$

$$y_{ikp} \leq v_{kp} \quad \forall i, k, p \quad (13)$$

$$y_{ikp} \leq prog_{ip} \quad \forall i, k, p \quad (14)$$

$$x_{ijkp} |wid_i - wid_j| \leq Jwid \quad \forall i, j, k, p \quad (15)$$

$$x_{ijkp} |tks_i - tks_j| \leq Jtks \quad \forall i, j, k, p \quad (16)$$

$$z_{kplq}, w_{kpr}, y_{ikp}, x_{ijkp}, v_{kp} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j, k, p \quad (17)$$

$$B_{pk}, CP_{pk}, C_i \geq 0 \quad \forall i, k, p \quad (18)$$

و ضخامت بین کلافهای داخل برنامه و کلاف انتخابی و نیز پرش بین برنامه ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۵- نتایج محاسباتی

برای بررسی عملکرد مدل الگوریتم ابتکاری از ۶ سری داده واقعی شرکت فولاد مبارکه استفاده شده است. تعداد کلافها در هر نمونه به عنوان مقیاسی برای ابعاد مختلف مساله در نظر گرفته شده است. محدوده عرض ورودی کلافها بین ۶۴۰ تا ۱۷۰۰ و محدوده ضخامت بین ۱.۸ تا ۵.۳ است. مدل ارائه شده بر روی کامپیوتری با پردازشگر ۳.۲ GHZ و حافظه جانبی ۴ GB حل شده است. برنامه-نویسی الگوریتم توسط نرم‌افزار Visual C# 2010 انجام شده است. نتایج حاصل از ساخت برنامه‌ها توسط الگوریتم ابتکاری با روش دستی مورد استفاده در فولاد مبارکه که مقایسه شده است. ستون-های ۳ و ۴ میانگین زمان حل نمونه در ۵ بار تکرار را نشان می‌دهد. اعداد مربوط به سایر ستون‌ها برابر میانگین تکرار ۵ بار در هر نمونه است.

با مقایسه زمان حل الگوریتم‌های ابتکاری با زمان حل روش دستی ملاحظه می‌گردد زمان محاسبه شده در حالت ابتکاری در ابعاد کوچک برای مدل با زمان روش دستی تفاوت چندانی از لحاظ مقداری نمی‌کند اما با بزرگ شدن ابعاد مسئله به مرور زمان حل روش ابتکاری بهتر از روش دستی می‌شود. به عبارتی زیاد شدن تعداد کلافها امکان برنامه‌ریزی در حالت دستی را سخت‌تر می‌کند. با مقایسه نتایج مربوط به مقادیر تابع هدف می‌توان نتیجه گرفت به ازای مسائل کوچک مقدار تابع هدف، در هر دو حالت تقریباً یکسان است حتی در برخی موارد استفاده از روش دستی ممکن است محدودیت‌های تولید را بهتر ارضا کند اما با بزرگ شدن مساله در ابعاد متوسط، زمان حل روش دستی نسبت به مدل ابتکاری بیشتر می‌شود و تابع هدف روش ابتکاری نسبت به روش دستی بهتر می‌شود. برای ابعاد متوسط این روش، میانگین بهبود ۹.۲٪ در تابع هدف را به دنبال دارد. در ابعاد بزرگتر عملاً روش دستی نمی‌تواند کلیه محدودیت‌ها و مطلوبیت‌های مدل را به دلیل حجم بالای داده‌ها در نظر بگیرد و مقدار تابع هدف اختلاف بیشتری با روش

مستقل برای هر کلاف اعمال می‌شوند که شامل محدودیت‌های پرش‌های مجاز عرض و ضخامت، حداکثر تعداد کلاف در برنامه و زمان مربوط به تعویض تیغه‌ها هستند.

شبه کد الگوریتم ابتکاری مسئله به صورت زیر است.

تا زمانی که شرط اتمام الگوریتم برقرار نشده

تعیین مجموعه کلاف‌های امکان‌پذیر و تعیین کد افراز

مربوط به هر کلاف

محاسبه امتیازات کلاف‌ها

برای هر گروه (کد افراز)

تا زمانی که شرط اتمام برنامه برقرار نشده

انتخاب کلاف با بالاترین امتیاز از لیست اصلی

تعیین مکان مناسب در توالی کلاف‌های برنامه

در صورتی که مکان مناسب پیدا نشود حذف

موقت کلاف هم ابعاد کلاف انتخابی در لیست موقت

اضافه کردن کلاف‌های لیست موقت به اصلی در

صورتی که کلافی در برنامه اضافه شود

پایان شرط اتمام برنامه

پایان برای هر گروه

انتخاب و ثابت کردن بهترین جواب با کمترین هزینه

پایان شرط اتمام الگوریتم

الگوریتم ابتکاری فوق در هر لحظه که شرایط خط تغییر کند

می‌تواند مجدداً اجرا شود و با توجه به شرایط جدید مجدداً

برنامه‌ریزی نماید و لذا دقت خروجی الگوریتم در عمل بالا می‌رود.

شرط اتمام الگوریتم رسیدن به تعداد برنامه‌ها یا بازه زمانی

درخواستی از سوی کاربر است. همچنین شرط اتمام یک برنامه

رسیدن به تعداد حداکثر کلاف مجاز برای هر برنامه یا اتمام کلاف-

های امکان‌پذیر برای یک گروه است. در این روش در صورتی که

بهترین جواب وجود نداشته باشد (به دلیل محدودیت‌های پرش

عرض و ضخامت) مدل مجدداً بدون رعایت پرش ضخامت و عرض

شروع به ساخت برنامه می‌کند و در زمان نمایش به کاربر نشان داده

می‌شود که بین برنامه‌ها محدودیت پرش عرض و ضخامت رعایت

نشده است. در گام تعیین مکان مناسب در توالی، پرش‌های عرض

جدول (۳): نتایج محاسباتی

معیار ارزیابی	تعداد کلاف	زمان حل		تعداد برنامه با رعایت محدودیت‌ها		مقدار تابع هدف		درصد بهبود روش ابتکاری نسبت به روش دستی
		دستی	ابتکاری	دستی	ابتکاری	دستی	ابتکاری	
روش نمونه								
۱	۵۰۰	۵	۰.۳	۵	۶	۷۷۰.۸	۷۷۱.۳	-۰.۰۶
۲	۱۲۰۰	۱۱	۲	۷	۱۰	۸۶۲.۲	۸۰۷	۶.۴
۳	۱۵۰۰	۱۱	۳.۴	۹	۱۴	۸۲۱.۹	۷۶۹.۵	۶.۳۸
۴	۱۹۰۰	۱۵	۶.۲	۱۵	۱۶	۹۶۶.۴	۸۵۷.۱	۱۱.۳۱
۵	۱۹۰۰	۱۵	۵	۱۸	۲۲	۹۵۸.۷	۸۳۶.۵	۱۲.۷۴
۶	۴۰۰۰	۳۰	۶.۵	۳۰	۶۵	۱۷۳۷.۶	۱۰۷۵.۸	۳۸.۰۸

- [4] Protmann, M.C., Rohr, D., (1995). "Hierarchical production management applied to an iron and steel industry", *Journal of Intelligent Manufacturing*, 6(2): 79-85.
- [5] Chen, M., Wang, W., (1997). "A linear programming model for integrated steel production and distribution planning", *International Journal of Operation and Production Management*, 17(6): 592-610.
- [6] Jacobs, T.L., Wright, J.R., Cobbs, A.E., (1988). "Optimal inter-process steel production scheduling", *Computers and Operation Research*, 15(6): 497-507.
- [7] Lopez, L., Carter, M.W., Gendreau, M., (1998). "The hot strip mill Production scheduling problem: a tabu search approach", *European Journal of Operational Research*, 106: 317-335.
- [8] Tang, L., Liu, J., Rong, A., Yang, Z., (2000). "A mathematical programming model for scheduling steelmaking continuous casting production", *European Journal of Operational Research*, 120(2): 423-435.
- [9] Chen, X., Wu, Q., (2002). "Formulating the steel scheduling problem as a TSPTW", *Intell Contr. Automat*, 3: 1744-1748.
- [10] Tang, L., Liu, J., Rong, A., Yang, Z., (2000). "A multiple travelling salesman problem model for hot rolling scheduling in Shanghai Baoshan Iron and Steel Complex", *European Journal of Operational Research*, 124(2): 267-282.
- [11] Cowling, P.I., Rezig, W., (2000). "Integration of continuous caster and hot strip mill planning for steel production", *Journal of Scheduling*, 3(4): 185-208.
- [12] Yadollahpour, M.R., Bijari, M., Kavosh, S., Mahnam, M., (2009). "Guided local search algorithm for hot strip mill scheduling problem with considering hot charge rolling", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 45: 1215-1231.
- [13] Tang, L., Wang, X., (2009). "Simultaneously scheduling multiple turns for steel color-coating production", *European Journal of Operational Research*, 198(3): 715-725.
- [14] Tang, L., Yang, Y., Liu, J., (2010). "An efficient optimal solution to the coilsequencing problem in electro-galvanizing line", *Computers & Operations Research*, 38(1): 1780-1796.
- [۱۵] فخرزاد، م. ب.، علی نژاد، ا.، (۱۳۹۲)، "برنامه‌ریزی و زمان‌بندی پیشرفته با در نظر گرفتن اثر یادگیری در سیستم‌های ساخت کارگاهی انعطاف‌پذیر"، نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید (۱): ۱۳-۲۴.
- [۱۶] باقری نژاد، ج.، قهقایی، آ.، (۱۳۹۵)، "تحلیل سیستم تولیدی MTS/MTO با مدل‌سازی صف مبتنی بر ورود گروهی پواسون و سرویس ارلنگ"، نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید (۷): ۶۹-۷۹.

ابتکاری پیدا می‌کند. همچنین در مقیاس بزرگ الگوریتم همچنان کارا باقی مانده و محدودیت‌های مدل را تا حد امکان ارضا می‌کند. به طور میانگین میزان بهبود تابع هدف در روش ارائه شده برابر ۱۲.۴۸٪ است.

۶- جمع‌بندی و پیشنهادات

در این مقاله مسئله زمان‌بندی کلاف‌ها در خط اسیدشویی ناحیه نورد سرد شرکت فولاد مبارکه اصفهان مورد بررسی قرار گرفت. یک مدل ریاضی غیر خطی و یک الگوریتم ابتکاری کارا برای این مسئله ارائه گردید. به منظور بررسی عملکرد الگوریتم از دسته داده‌های واقعی شرکت فولاد مبارکه استفاده شد. نتایج نشان دادند که علاوه بر پایین بودن زمان حل الگوریتم ابتکاری نسبت به روش مورد استفاده در فولاد مبارکه، الگوریتم ابتکاری توانسته است اغلب محدودیت‌های خط تولید را که توسط کاربر برنامه‌ریزی قابل بررسی نیست را در نظر بگیرد و در ساخت برنامه‌ها و توالی کلاف‌های داخل برنامه‌ها اعمال کند که این منجر به کاهش مصرف تیغه‌ها شده است. از طرفی روش ارائه شده با در نظر گرفتن مطلوبیت‌های مربوط به زمان تحویل کلاف‌ها توانسته است در مجموع زمان تحویل سفارشات را نیز بهبود دهد. تعمیم مسئله مذکور به حالت ترکیبی دو خط به صورت موازی و همچنین ارائه الگوریتم‌های کارا تر که زمان حل پایین‌تری داشته باشند از زمینه‌های مناسب برای ادامه این تحقیق هستند.

۷- تشکر و قدردانی

از همکاری و مساعدت‌های بی‌دریغ مدیریت محترم شرکت فولاد مبارکه اصفهان به‌ویژه بخش برنامه‌ریزی تولید ناحیه نورد سرد، کمال سپاس و قدرشناسی خود را اعلام می‌نمایم. همچنین از مدیریت محترم شرکت ایریسا و تیم برنامه‌ریزی تولید که با حمایت‌های خود در توسعه و پیاده‌سازی این سیستم مذکور ما را یاری نموده‌اند، سپاسگزاریم.

مراجع

- [1] Tang, L., Luh, P.B., Liu, J., Yang, Z., (2002). "Steel-making process scheduling using Lagrangian relaxation", *International Journal of Production Research*, 40(1): 55-70.
- [2] Okano, H., Davenport, A.J., Trumbo, M., Reddy, C., Yoda, K., Amano, M., (2004). "Finishing line scheduling in the steel industry", *IBM Journal of Research and Development*, 48(5/6): 811-830.
- [3] Wang, D.D., Tieu, A.K., Boer de, F.G., Ma, B., Yuen, W.Y.D., (2000). "Toward a heuristic optimum design of rolling schedules for tandem cold rolling mills", *Engineering Application of Artificial Intelligence*, 13(4): 397-406.



An Efficient Heuristic Algorithm for Pickling Line in Esfahan's Mobarakeh Steel Company

M. Kabiri*, P. Vaez

¹ Expert of Production planning, International Systems Engineering & Automation Company (IRISA).

ARTICLE INFO

Article history:

Received 31 January 2016

Accepted 11 March 2017

Keywords:

Pickling Line
Cold Mill
Heuristic Algorithm
Production Planning

ABSTRACT

Reducing production costs has become one of the most important concerns, due to the economic development and increasing competitiveness in industries. To achieve this goal, considering real conditions is important. In this presentation, we investigate the production scheduling of a Pickling Line in Esfahan's Mobarakeh Steel Company called Pickling Line Scheduling (PLS). The problem is to generate multiple production turns for the Pickling Line coils and at the same time determine the sequence of these turns and select coils then the sequence coils of these turn so that the productivity and product quality both maximized while the production cost minimized. We formulate this problem as a mixed integer nonlinear program and propose a heuristic algorithm to obtain satisfactory solutions. Results on real production instances show heuristic algorithm is more effective and efficient with comparison to manual scheduling in Esfahan's Mobarakeh Steel Company.

* Corresponding author. Mahboobeh kabiri

Tel.: 031-36660730; E-mail address: m.kabiri@irisaco.com