

مدیریت تولید و عملیات، دوره پنجم، پیاپی (۹)، شماره (۲)، پاییز و زمستان ۱۳۹۳

دریافت: ۹۱/۵/۳۰ پذیرش: ۹۲/۳/۱۹

صص: ۳۷-۵۶

## ارائه یک مدل برنامه‌ریزی سفارشات موجودی با استفاده از الگوریتم ژنتیک (مطالعه موردی: صنایع فولاد آلیاژی)

مهدی نخعی نژاد<sup>۱</sup>، نسیم نهاوندی<sup>۲\*</sup>، محمد اقدسی<sup>۲</sup>، سید حسام‌الدین ذگردی<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی دکترای مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشیار مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

### چکیده

یکی از مهم‌ترین چالش‌های صنایع فولاد، برنامه‌ریزی تولید مناسب است که با توجه به سفارشی بودن این صنعت، برنامه‌ریزی سفارش‌ها بخش عمده‌ای از آن را شامل می‌شود. همچنین، با توجه به لزوم استفاده حداکثری از ظرفیت ماشین‌آلات در این صنعت، پرداختن به برنامه‌ریزی موجودی‌ها نیز امری ضروری است. در این راستا، مدل ارائه شده در این مقاله با در نظر گرفتن توام برنامه‌ریزی سفارش‌ها و برنامه‌ریزی موجودی، توانایی تصمیم‌گیری در انتخاب سفارش‌ها، تعیین زمان تکمیل سفارش‌ها و تعیین تولیدات مازاد از آنها را در هر فرایند داراست. این مدل در عمل می‌تواند نقش کلیدی در بهبود برنامه‌ریزی تولید صنایع فولاد از طریق تحویل بموقع سفارش‌ها، کاهش موجودی و استفاده مناسب از ظرفیت، دارا باشد. در ادامه، یک الگوریتم حل ابتکاری بر پایه الگوریتم ژنتیک برای مدل فوق ارائه شده و کارایی آن در یک مطالعه موردی و عملی در شرکت فولاد آلیاژی ایران ارزیابی شده است.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم ژنتیک، برنامه‌ریزی سفارشات، برنامه‌ریزی موجودی، فولاد آلیاژی

## ۱- مقدمه

صنعت تولید فولاد آلیاژی در جایگاه صنعت مادر و زیربنایی، علاوه بر تغذیه کارخانجات و کارگاه‌های تولیدی و تامین مواد اولیه برای این گونه واحدها، می‌تواند زمینه‌های مناسبی را برای اقدام سریع‌تر در برای بهره‌برداری و تبدیل آنها به تولیدات مورد نیاز و در نتیجه تضمین رشد اقتصادی کشور فراهم آورد. از این رو، پر واضح است که تحقیق و پژوهش در این صنعت از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. از جمله ویژگی‌های صنعت تولید فولاد آلیاژی، استاندارد بودن فرایندهای تولیدی آن و از طرفی تولید سفارشی آن است. منظور از استاندارد بودن فرایندهای تولیدی این است که در کلیه کشورهای که فولاد تولید می‌کنند، فرایندهای صورت گرفته یکسان و به ترتیب شامل کوره قوس الکتریکی، کوره پاتیلی، ریخته‌گری پیوسته، نورد سنگین و نورد سبک است. تولید سفارشی در این صنعت از جمله مواردی است که توجه بسیاری از محققان را به خود جلب نموده است. برنامه‌ریزی سفارش‌ها درصدد انتخاب سفارش‌ها، تحویل بموقع سفارش‌ها و استفاده مناسب از ظرفیت‌های تولیدی است

بر این اساس، این مقاله به منظور بهبود در صنعت فولاد (کاهش موجودی، استفاده مناسب از ظرفیت و تحویل بموقع سفارش‌ها) به برنامه‌ریزی سفارش‌ها- موجودی خواهد پرداخت. از جمله مهم‌ترین نوآوری‌های این تحقیق لحاظ نمودن برنامه‌ریزی موجودی در برنامه‌ریزی سفارش‌هاست. برنامه‌ریزی سفارش‌های تولیدی، به تعیین زمان شروع و پایان سفارش‌ها، با توجه به محدودیت ظرفیت، به منظور بهینه نمودن توابع هدفی چون: زمان تکمیل محصول، کاهش تاخیرات، کاهش زودکردها و موارد مشابه می‌پردازد. مدل ارائه شده با توجه به اینکه یک مدل

برنامه‌ریزی غیرخطی ترکیبی عدد صحیح است، دارای پیچیدگی بالایی است. بررسی ادبیات نیز نشان می‌دهد که برنامه‌ریزی سفارش‌ها، از جمله مسائل با پیچیدگی بسیار بالا است. از جمله می‌توان به تحقیق لین و کونونو (۲۰۰۷) و همچنین، تحقیق ایرل و قوش (۲۰۰۷) اشاره نمود که در تحقیقات خود Np-hard بودن مسأله برنامه‌ریزی سفارش‌ها را بررسی کرده‌اند. از این رو، برای حل مدل ارائه شده از الگوریتم پیشنهادی بر پایه الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. الگوریتم ژنتیک پیشنهادی توانایی حل مدل را در زمان مناسب با درصد خطای پایینی داراست.

در ادامه این مقاله، در بخش دوم مروری بر صنعت فولاد آلیاژی برای آشنایی با این صنعت و همچنین، بررسی تحقیقات صورت گرفته در سیستم‌های تولیدی فولاد و مرور ادبیات این حوزه صورت می‌گیرد. بخش سوم توسعه مدل ریاضی برنامه‌ریزی سفارش‌ها- موجودی در صنایع فولاد آلیاژی را شرح می‌دهد. بخش چهارم چگونگی استفاده از مدل توسعه داده شده در صنعت فولاد را توضیح می‌دهد. بخش پنجم به ارائه روش حل پیشنهادی می‌پردازد. نتایج به دست آمده از به کارگیری الگوریتم طراحی شده برای حل مدل توسعه داده شده در بخش ششم یعنی نتایج محاسباتی ارائه می‌گردد. در نهایت، بخش هفتم به نتیجه‌گیری و بیان مطالعات آتی می‌پردازد.

## ۲- بررسی تحقیقات صورت گرفته در سیستم‌های

## تولیدی فولاد

فولادهای آلیاژی، فولادهایی هستند که در ترکیب شیمیایی آنها مقادیر درخور توجهی از عناصر آلیاژی دیگر وجود دارد.

(۲۰۰۰) به ارائه مدل TSP به منظور زمانبندی نورد فولاد در یکی از صنایع معروف فولاد به نام «شانقای باوشان»<sup>۳</sup> پرداختند. کولینگ و همکارانش (۲۰۰۳) تحقیق خود را در زمینه ساختار چند عاملی برای زمانبندی پویا در نورد فولاد منتشر نمودند. کولینگ (۲۰۰۳) نیز سیستم حمایت از تصمیم‌گیری انعطاف‌پذیر برای زمانبندی نورد فولاد را منتشر نمود. سینق و همکارانش (۲۰۰۴) در تحقیق خود به بررسی مدل انتخاب بلوم‌ها از میان انباشته‌های بلوم، به منظور نورد فولاد به کمک الگوریتم ژنتیک بهبود یافته پرداختند. تانگ و وانگ (۲۰۰۸) زمانبندی و تولید دسته‌ای یکپارچه در نورد فولاد را منتشر نموده‌اند. پن و یانگ (۲۰۰۹) نیز به ارائه روشی برای حل زمانبندی نورد دسته‌ای در مقیاس‌های زیاد به کمک روش «ساخت ستونی»<sup>۴</sup> پرداختند. ژاو و همکارانش (۲۰۰۹)، یک روش دو مرحله‌ای در زمانبندی نورد را ارائه نمودند. اسد و دمیرلی (۲۰۱۰) تحقیق خود را در زمینه زمانبندی تولید در واحد نورد فولاد در حالت جانشین‌سازی تقاضاها به چاپ رساندند.

دسته سوم تحقیقات در صنعت فولاد، به برنامه‌ریزی سفارش‌ها پرداخته‌اند. از جمله این تحقیقات، تحقیقی است که ژانگ و همکارانش (۲۰۰۵) منتشر نمودند. آنها در تحقیق خود برنامه‌ریزی ریاضی سفارش‌ها در صنعت فولاد را به کمک الگوریتم ژنتیک انجام داده‌اند. در تحقیق دیگری که لیو و همکارانش (۲۰۰۶) به چاپ رساندند، برنامه‌ریزی و سازماندهی را به صورت گام‌هایی در نظر گرفته‌اند و در نهایت، برای انجام مناسب این برنامه‌ریزی به ارائه مدل ریاضی و حل

به طور کلی، تحقیقات صورت گرفته در زمینه فولاد را می‌توان در سه گروه عمده دسته بندی نمود: گروه اول به زمانبندی در واحد فولادسازی؛ گروه دوم به زمانبندی در واحد نورد و در نهایت، گروه سوم به برنامه‌ریزی سفارش‌ها پرداخته‌اند.

کرایج و همکارانش (۲۰۰۱)، تکنیک‌های کنترلی در ریخته‌گری پیوسته فولاد را بررسی نموده‌اند. تانگ و همکارانش (۲۰۰۲) نیز زمانبندی فرایند تولید فولاد را به کمک تکنیک ساده‌سازی لاگرانژین<sup>۱</sup> انجام داده‌اند. مادیراجان و همکارانش (۲۰۰۷) به ارائه الگوریتم‌های ابتکاری برای زمانبندی کوره‌های به کار گرفته شده در ریخته‌گری فولاد پرداخته‌اند. هوگلر و واسکو (۲۰۰۷) نیز روش‌های فرا ابتکاری برای زمانبندی کوره‌ها در صنعت فولاد را منتشر نموده‌اند. رونگ و لاهدلما (۲۰۰۸) مدل برنامه‌ریزی خطی با محدودیت‌های فازی را برای بهینه‌سازی شارژ قراضه آهن در تولید فولاد ارائه نموده‌اند. عتیقه‌چیان و همکارانش (۲۰۰۹) در تحقیقی که منتشر نمودند، به ارائه الگوریتم ترکیبی برای زمانبندی تولید در واحد ریخته‌گری فولاد پرداختند. فاضل زرنندی و احمدپور (۲۰۰۹) نیز فرایند تولید فولاد را به کمک سیستم‌های خبره در شرایط فازی بررسی نموده‌اند.

گروه دوم تحقیقات صنعت فولاد، مربوط به زمانبندی واحد نورد است. لوپز و همکارانش (۱۹۹۸) به فرموله کردن ریاضی مسأله نورد پرداختند و نشان دادند که این مسأله قابل تفسیر به کمک مسأله فروشنده دوره گرد با مجموعه جوایزی<sup>۲</sup> است که حالتی از مسأله فروشنده دوره گرد را شامل می‌شود. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که مسأله زمانبندی در محیط نورد سنگین، Np-hard است (لوپز و همکاران، ۱۹۹۸). تانگ و همکارانش

آن پرداخته‌اند. تانگ و لیو (۲۰۰۷) نیز به ارائه مدل ریاضی در این زمینه پرداختند. آنها در مطالعه خود، مدیریت سفارش‌ها در صنایع فولاد را به شش گام عمده شامل بررسی مشخصات سفارش‌های مشتریان، طراحی کیفیت سفارش‌ها، طراحی سفارش‌ها، زمانبندی سفارش‌ها و در نهایت، اصلاحات مورد نیاز دسته‌بندی نموده‌اند. در مدل ارائه شده توسط تانگ و لیو، تابع هدف، مینیمم نمودن زمان تکمیل سفارش‌ها در نظر گرفته شده است و روش حلی که توسط آنها ارائه شده؛ استفاده از «ساده‌سازی لاگرانژین» است. چون یو و رنگ اکزیا (۲۰۰۸) نیز در تحقیق خود، مدل برنامه‌ریزی سفارش‌های چند هدفه صنعت فولاد را ارائه نموده‌اند. روش حل در تحقیق صورت گرفته استفاده از الگوریتم ژنتیک است. ژانگ و همکارانش (۲۰۰۸) نیز برنامه‌ریزی سفارش‌ها را به صورت مدل برنامه‌ریزی ترکیبی عدد صحیح طراحی و به کمک الگوریتم ژنتیک بهبود داده شده حل نمودند. وان‌هوک و دبلز (۲۰۰۹) نیز به ارائه زمانبندی تولید با ظرفیت محدود برای یک شرکت فولاد بلژیکی پرداختند.

در برنامه‌ریزی تولید فولاد، علاوه بر برنامه‌ریزی سفارش‌ها توجه به برنامه‌ریزی موجودی نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. بنابراین، در زمانبندی تولید باید این نکته را نیز لحاظ نمود، تا توالی تولید بیلتهای سفارش داده شده توسط مشتریان به گونه‌ای باشد که محدودیت انبار و فضای لازم برای موجودی نیز در نظر گرفته شده باشد. انبار بلوم که بین دو مرحله ریخته‌گری و نورد واقع شده است، به عنوان یکی از مراحل تولیدی قلمداد می‌شود و از این‌رو یک مسأله مهم و حیاتی در صنایع فولاد است (زانونی و زاونا، ۲۰۰۵). زانونی و زاونا

(۲۰۰۵) در تحقیق خود برنامه‌ریزی موجودی در صنعت فولاد را بررسی کرده‌اند. این تحقیق بر روی موجودی انتهای مرحله فولادسازی؛ یعنی بعد از ریخته‌گری تمرکز دارد. تابع هدف استفاده شده در این تحقیق، ماکزیمم کردن عایدی به دست آمده با در نظر گرفتن هزینه‌های موجودی و تاخیر در سفارش‌هاست. علاوه بر مرحله بین ریخته‌گری و نورد که لازم است بلوم‌ها انبار شوند، سیستم تولید فولاد ایجاب می‌کند به منظور استفاده حداکثری از ظرفیت‌های تولید، از سیستم انبار کردن و نگهداری موجودی نیز استفاده شود. کرککانن (۲۰۰۷) در تحقیق خود به مقایسه سیستم تولید به صورت سفارشی<sup>۵</sup> و سیستم تولید به صورت نگهداری موجودی<sup>۶</sup> در صنایع فولاد پرداخت. روشی که معمولاً به منظور تفکیک سیستم سفارشی از سیستم موجودی استفاده می‌گردد، نقطه تجزیه سفارش مشتری<sup>۷</sup> و نقطه نفوذ سفارش<sup>۸</sup> است. این نقاط، بیانگر زمانی است که سیستم تولیدی به صورت سفارشی به حالت سیستم تولید به صورت موجودی تبدیل خواهد شد. در بسیاری از موارد فاکتور اصلی در تعیین این نقاط، زمان انجام سفارش و همچنین، زمان تحویل محصول است (کرککانن، ۲۰۰۷).

در حقیقت، برتری مدل ریاضی که در این تحقیق ارائه خواهد شد، نسبت به مدل‌های موجود، در لحاظ نمودن برنامه‌ریزی موجودی است. به عبارت دیگر مدل ارائه شده، برنامه‌ریزی سفارش‌ها و برنامه‌ریزی موجودی را توأم در نظر گرفته است. لزوم این کار در استفاده مناسب از ظرفیت فرایندها و از طرف دیگر، کاهش هزینه‌های مربوط به موجودی است.

تولید و مدیریت سفارش‌ها به کمک سطوح اتوماسیون طراحی شده، صورت می‌گیرد.

تحقیق انجام شده در این مقاله بر اساس مشاهدات صورت گرفته در این کارخانه و مرور عمیق ادبیات به منظور توسعه یک مدل ریاضی مناسب برای برنامه‌ریزی سفارش‌ها و همچنین، موجودی‌ها در صنعت فولاد، شکل گرفته است. مسأله زمانبندی سفارش‌های تولیدی، به تعیین زمان شروع و پایان سفارش‌ها، با توجه به محدودیت ظرفیت، به منظور بهینه نمودن توابع هدفی چون زمان تکمیل محصول می‌پردازد. مطالعه ادبیات نشان می‌دهد که اگر چه تحقیقات زیادی در زمینه زمانبندی وجود دارد، اما تعداد کمی از آنها به مسأله زمانبندی سفارش‌ها تولیدی در صنایع فولاد پرداخته‌اند. زمانبندی مناسب و مؤثر سفارش‌ها تولیدی در صنایع فولاد از پیچیدگی خاصی برخوردار است؛ چرا که فرایند تولید فولاد بسیار پیچیده بوده، شامل عملیات و تکنولوژی خاص آن است. علاوه بر آن، محدودیت‌های فنی پیچیده‌ای نیز باید به منظور پیوسته نمودن و ایجاد ارتباط دقیق بین عملیات‌های تولیدی، لحاظ گردد. این در حالی است که هر عملیاتی ظرفیت محدودی برای تولید را داراست.

در واقع، برنامه‌ریزی تولید در یک واحد تولیدی فولاد، مانند فولاد آلیاژی ایران را می‌توان به دو بخش عمده شامل: (۱) برنامه‌ریزی تولید بلند مدت و (۲) برنامه‌ریزی سطح کارگاه‌ها (فولادسازی، ریخته‌گری و نورد) تقسیم کرد. در برنامه‌ریزی تولید بلندمدت؛ در واقع کار برنامه‌ریزی سفارش‌ها - موجودی صورت می‌گیرد. در برنامه‌ریزی تولید واحد فولادسازی و ریخته‌گری، زمانبندی سفارش‌ها و

### ۳-ارائه مدل ریاضی برنامه‌ریزی سفارش‌ها موجودی در صنایع فولاد آلیاژی

در اکثر صنایع فولاد تولید بر اساس سفارش‌ها مشتریان صورت می‌گیرد. برنامه‌ریزی تولید در این حالت شامل برنامه‌ریزی سفارش‌ها و برنامه‌ریزی تولید روزانه است. هدف از «برنامه‌ریزی سفارش‌ها» تعیین زمان تکمیل هر فرایند از سفارش‌ها بر اساس تاریخ تحویل، ظرفیت تولید و دیگر محدودیت‌های سیستم، به منظور حرکت روان خط تولید است. «برنامه‌ریزی تولید روزانه» شامل برنامه‌ریزی واحد فولاد سازی، برنامه‌ریزی اندازه کارها در ریخته‌گری و برنامه‌ریزی دسته نورد بر اساس برنامه سفارش‌های صادره و برنامه‌های فرایند تولید است. بررسی تحقیقات صورت گرفته در زمینه برنامه‌ریزی سفارش‌ها و برنامه‌ریزی تولید روزانه نشان می‌دهد که به برنامه‌ریزی سفارش‌ها کمتر توجه شده است. این در حالی است که برنامه‌ریزی سفارش‌ها تاثیر بسزایی روی برنامه‌ریزی تولید روزانه خواهد داشت. به هر اندازه برنامه‌ریزی سفارش‌ها مناسب‌تر انجام شده باشد، ترکیب برنامه‌ریزی تولید روزانه امکان‌پذیرتر خواهد شد. در صورتی که اگر برنامه‌ریزی سفارش‌ها مناسب نباشد، تعیین برنامه روزانه بسیار دشوار و در مواردی غیر ممکن می‌شود (لیو و همکاران، ۲۰۰۶).

در کارخانه فولاد آلیاژی ایران، سیستم برنامه‌ریزی سفارش‌ها به کمک واحد فروش و واحد برنامه‌ریزی تولید بر اساس دریافت سفارش‌ها از مشتریان و بررسی و امکان‌سنجی تولید آنها صورت می‌گیرد. سیستم مدیریت سفارش‌ها در این کارخانه بسیار مشابه با سیستمی است که در ادبیات صنعت فولاد مرور گردیده است. در این کارخانه برنامه‌ریزی

موجودی‌های مورد تایید واحد برنامه‌ریزی تولید بلند مدت بر روی عملیات‌های کوره قوس الکتریکی، کوره پاتیلی، VD و VOD و ریخته‌گری پیوسته صورت می‌گیرد. در نهایت، در برنامه‌ریزی تولید واحد نورد سنگین و سبک نیز سفارش‌های تولیدی که مرحله ریخته‌گری را به پایان رسانده‌اند، بر روی ایستگاه‌های نورد سنگین و سبک زمانبندی می‌گردند. در این تحقیق به برنامه‌ریزی سفارش‌ها - موجودی پرداخته خواهد شد تا بر اساس نتایج حاصل از آن هریک از واحدهای فولادسازی و نورد امکان انجام زمانبندی مناسب را دارا باشند.

منظور از سفارش‌ها، آن دسته از مواردی است که توافق با مشتری بر سر تولید آن (از نظر زمان، هزینه و مشخصات) صورت پذیرفته است. به عبارت دیگر، منظور از برنامه‌ریزی سفارش‌ها، انتخاب سفارش‌های تولیدی از میان سفارش‌ها ارائه شده توسط مشتریان و همچنین، برنامه‌ریزی آنها (تعیین زمان تکمیل آنها) است. برای تبدیل سفارش‌های ارائه شده توسط مشتریان به سفارش‌های تولیدی، زمان تحویل بر اساس وضعیت موجود با مشتری مذاکره می‌شود. برای تعیین این زمان نیز مدل استخراج شده برای برنامه‌ریزی سفارش‌ها - موجودی باید استفاده شود.

منظور از ارائه مدل برنامه‌ریزی سفارش‌ها - موجودی در این تحقیق، ارائه مدلی ریاضی است که به کمک آن بتوان از یک طرف تعیین نمود که کدام یک از سفارش‌ها و همچنین، چه گریدهایی از موجودی‌ها، در هر دوره برای تولید انتخاب گردند و از طرف دیگر، این مدل باید تعیین نماید که هر کدام از عملیات مربوط به تولید سفارش‌ها و موجودی‌ها در کدام بازه زمانی در افق برنامه‌ریزی مورد مطالعه

صورت پذیرد. در این مدل افق برنامه‌ریزی یک ماه و بازه زمانی یک هفته در نظر گرفته شده است. منظور از عملیات (فرایند) در برنامه‌ریزی سفارش‌ها - موجودی که در این تحقیق برای صنعت فولاد استخراج خواهد شد، شامل سه دسته عملیات شامل عملیات‌های واحد «فولادسازی»، «ریخته‌گری» و «نورد» است. در واحد فولادسازی عملیات‌ها به ترتیب شامل (۱) شارژ کوره‌های قوس الکتریکی و (۲) عملیات کوره پاتیلی (LF)، VD و VOD است. در واحد ریخته‌گری عملیات مربوط به (۳) ریخته‌گری پیوسته صورت می‌گیرد و در نهایت در واحد نورد نیز عملیات‌ها به ترتیب شامل (۴) نورد سنگین و (۵) نورد سبک است. در حقیقت در مدل ارائه شده ۵ فرایند اصلی در نظر گرفته شده است

در برنامه‌ریزی سفارش‌ها - موجودی صنعت فولاد، درصدد ارائه مدلی هستیم تا برنامه‌ریز تولید قادر به تعیین سفارش‌ها و برنامه هفتگی سفارش‌ها و موجودی‌های مناسب باشد. این برنامه، برای تولید به هریک از واحدهای برنامه‌ریزی تولید فولادسازی و ریخته‌گری و برنامه‌ریزی تولید نورد ارسال می‌شود تا در این واحدها زمانبندی لازم در هر هفته انجام شود. شایان ذکر است که معمولاً در ادبیات برنامه‌ریزی سفارش‌های صنعت فولاد، افق برنامه‌ریزی یک ماهه و دوره‌ها به صورت هفتگی در نظر گرفته می‌شود. در مطالعه موردی صورت گرفته نیز واحد برنامه‌ریزی تولید، برنامه‌های ماهانه‌ای به منظور تعیین سفارش‌ها و موجودی‌ها ترتیب می‌دهد که در این برنامه ماهانه، برنامه‌های هفتگی هریک از واحدها (کوره قوس الکتریکی، کوره پاتیلی، ریخته‌گری پیوسته، نورد سنگین و نورد سبک)

$AC_{jt}$  ماکزیمم ظرفیت در دسترس عملیات  $j$ ام در دوره  $t$ ام

$MC_{jt}$  مینیمم ظرفیت در دسترس عملیات  $j$ ام در دوره  $t$ ام

$I_j^{\max}$  حداکثر موجودی مجاز در انتهای فرایند  $j$ ام

$P_{gj}$  بیانگر متوسط زمان فرایند شدن هر تن موجودی با گرید  $g$  در عملیات  $j$ ام است.

$C_{ij}$  زمان تکمیل سفارش  $i$ ام روی فرایند  $j$ ام

$I_{gjt}$  مقدار موجودی از گرید  $g$ ام در انتهای عملیات  $j$  در پایان هفته  $t$

$s_{igt}$  در صورتی که گرید سفارش  $i$ ام  $g$  باشد، این مقدار برابر با یک و در غیراین صورت، این پارامتر مقدار صفر خواهد شد.

متغیرهای تصمیم این مدل به شرح زیر بیان می‌شوند:  $x_{ijt}$  برابر است با یک در صورتی که عملیات  $j$  از سفارش  $i$ ام در هفته  $t$  انجام شود و در غیر این صورت برابر با صفر خواهد شد.

$y_{gjt}$  مقدار تولید مازاد از سفارش از گرید  $g$  که به منظور استفاده مناسب از ظرفیت مرحله  $j$ ، در هفته  $t$  صورت می‌گیرد.

با توجه به پارامترها و متغیرهای تصمیم تشخیص داده شده، مدل ریاضی این مسأله را به شرح زیر می‌توان نوشت:

تعیین می‌شود. بر این اساس، پارامترهایی را که برای این مدل تعریف می‌شود، به صورت زیر می‌توان خلاصه نمود:

$N$  تعداد سفارش‌ها

$J$  تعداد عملیات

$G$  تعداد گریدهای تولیدی در بازه زمانی مورد بررسی

$i$  بیانگر سفارش  $i$ ام است که از مقدار ۱ تا  $N$  متغیر است.

$j$  بیانگر عملیات  $j$ ام است که از ۱ تا  $J$  عملیات را شامل می‌گردد.

$g$  بیانگر گرید محصول است که از ۱ تا  $G$  متغیر است.

$t$  بیانگر واحد زمانی است که در این مدل به صورت هفتگی تعریف می‌گردد و از مقدار ۱ تا ۴ متغیر است.

$T$  افق زمانی مورد نظر است که در این مدل برابر با ۴ در نظر گرفته شده است که در حقیقت بیانگر ۴ هفته موجود در یک ماه است.

$d_i$  موعد تحویل سفارش  $i$ ام

$w_i$  وزن سفارش  $i$ ام

$AT_{jt}$  زمان در دسترس عملیات  $j$ ام در دوره  $t$ ام

$$\min z_1 = 0.5 * \sum_{i=1}^N \max \left\{ 0, d_i - \sum_{t=1}^T x_{i,t} \right\} + 0.5 * \sum_{i=1}^N \max \left\{ 0, \sum_{t=1}^T x_{i,t} - d_i \right\} \quad (1)$$

s.t.

$$\sum_{i=1}^N w_i \cdot x_{ijt} + \sum_{g=1}^G y_{gjt} \geq MC_{jt} \quad \text{for } j=1, \dots, J; \quad t=1, \dots, T \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N w_i \cdot x_{ijt} + \sum_{g=1}^G y_{gjt} \leq AC_{jt} \quad \text{for } j=1, \dots, J; \quad t=1, \dots, T \quad (3)$$

$$\sum_{g=1}^G I_{gjt} \leq I_j^{\max} \quad \text{for } j=1, \dots, J; \quad t=1, \dots, T \quad (4)$$

$$I_{gjt} = I_{gj(t-1)} + \sum_{i=1}^N w_i \cdot x_{ijt} \cdot s_{ig} + y_{gjt} - \sum_{i=1}^N w_i \cdot x_{i(j+1)t} \cdot s_{ig} - y_{g(j+1)t} \quad \text{for } j=1, \dots, J-1; \quad (5)$$

$$\text{for } g=1, \dots, G; \quad \text{for } t=1, \dots, T$$

$$\sum_{g=1}^G \left( \sum_{i=1}^N w_i \cdot x_{ijt} \cdot s_{ig} + y_{gjt} \right) * p_{gj} \leq AT_{jt} \quad \text{for } j=1, \dots, J; \quad t=1, \dots, T \quad (6)$$

$$\sum_{t=1}^T x_{ijt} \leq 1 \quad \text{for } i=1, \dots, N; \quad j=1, \dots, J \quad (7)$$

$$\sum_{t=1}^T x_{ijt} = \sum_{t=1}^T x_{i(j+1)t} \quad \text{for } i=1, \dots, N; \quad j=1, 2 \quad (8)$$

$$c_{ij} = \sum_{t=1}^T x_{ijt} * t \quad \text{for } i=1, \dots, N; \quad j=1, \dots, J \quad (9)$$

$$c_{ij} \leq c_{i(j+1)} \quad \text{for } i=1, \dots, N; \quad j=1, 2, 4 \quad (10)$$

$$c_{i3} < c_{i4} \quad (11)$$

$$I_{gjt} = 0 \quad \text{for } g=1, \dots, G; \quad j=1, 2; \quad t=1, \dots, T \quad (12)$$

$$x_{ijt} \in \{0, 1\} \quad \text{for } i=1, \dots, I; \quad j=1, \dots, J; \quad t=1, \dots, T \quad (13)$$

$$y_{gjt} \geq 0 \quad \text{for } g=1, \dots, G; \quad j=1, \dots, J; \quad t=1, \dots, T \quad (14)$$

$$I_{gjt} \geq 0 \quad \bullet \quad \text{for } g=1, \dots, G; \quad j=3, 4, 5; \quad t=1, \dots, T \quad (15)$$

در این مدل‌سازی با توجه به شرایط خاص این صنعت، دو تابع هدف مورد نظر قرار گرفته است: تابع هدف اول مربوط به مینیمم کردن زودتر تکمیل نمودن سفارش‌ها (زودکرد) است و تابع هدف دوم سعی می‌کند دیرکرد تحویل سفارش‌ها (دیرکرد) را کاهش دهد. این دو تابع هدف به صورت یک تابع در نظر گرفته شده که با توجه به نیاز این صنعت و اهمیت یکسان این دو معیار، برای هر دو ضریب ۰/۵ منظور شده است. ارتباط تنگاتنگ با این صنعت نشان می‌دهد این دو برنامه‌ریزی؛ یعنی برنامه‌ریزی سفارش‌ها و برنامه‌ریزی موجودی طراحی شده در مدل توسعه داده شده از یک درجه اهمیت برخوردارند. به همین منظور، با توجه به نیاز این صنعت، برای هر دو ضریب ۰/۵ قرار داده شده است. اهمیت مینیمم کردن زودکردها در برنامه‌ریزی موجودی‌های صنعت فولاد و اهمیت مینیمم کردن

در این مدل‌سازی هدف، برنامه‌ریزی سفارش‌ها، موجودی است که در یک بازه زمانی مشخص  $T$  (یک ماهه) صورت می‌پذیرد. در این بازه زمانی، تعیین می‌گردد که هر سفارش در چه هفته‌ای ( $t$ ) تولید گردد. علاوه بر آن، به منظور استفاده مناسب از ظرفیت موجود، تعیین می‌گردد که در هر دوره؛ مثلاً در هر کدام از چهار هفته موجود در یک ماه به چه میزان از گریدهای مختلف، تولید مازاد از سفارش‌ها، صورت گیرد. در انتهای مراحل سوم، چهارم و پنجم انبارهای میانی قرار گرفته است که در انتهای هر دوره ( $t$ ) به میزان  $(I_{gjt})$  در آنها موجودی انبار می‌گردد. شایسته یادآوری است که در این مدل‌سازی پنج عملیات یا فرایند اصلی شامل: (۱) کوره قوس الکتریکی، (۲) کوره پاتیلی به همراه VD و VOD، (۳) ریخته‌گری، (۴) نورد سنگین و (۵) نورد سبک در نظر گرفته شده است.



می‌دهد. این ظرفیت در حقیقت حداقل ظرفیتی است که برای راه‌اندازی هریک از مراحل لازم است. محدودیت (۳) حداکثر ظرفیت تولیدی هریک از مراحل را نشان می‌دهد. ظرفیت تولید اشاره شده در این دو محدودیت برای تولید سفارش‌ها  $(x_{ijt})$  و تولید مازاد از سفارش‌ها  $(y_{gjt})$  استفاده می‌شود. محدودیت (۴) مربوط به ظرفیت انبارهای میانی است. این انبارها در مراحل سوم (ریخته‌گری)، چهارم (نورد سبک) و پنجم (نورد سنگین) قرار دارند. مجموع موجودی انبار شده از گریدهای مختلف از حداکثر ظرفیت انبار نباید بیشتر گردد. محدودیت (۵) در حقیقت محدودیت تعادلی بین هر کدام از مراحل تولیدی است. در هر مرحله به غیر از مرحله نهایی در انتهای هر دوره، میزان موجودی برابر است با میزان موجودی در انتهای دوره (دوره قبلی) به اضافه مجموع تولیدات انجام شده در این مرحله، شامل تولیدات مربوط به سفارش‌ها و تولیدات مازاد منهای مجموع تولیداتی که قرار است در مرحله بعد انجام گردد. محدودیت (۶) زمان در دسترس در هر مرحله در هر دوره را نشان می‌دهد. مجموع زمانی که صرف تولیدات از تمامی گریدها به منظورهای مختلف می‌شود، نباید از کل زمان در دسترس؛ یعنی  $AT_{jt}$  بیشتر گردد. محدودیت (۷) بیان‌کننده این مطلب است که فرایند  $\lambda$ ام از سفارش  $\lambda$ ام تنها در یکی از دوره‌ها می‌تواند صورت گیرد و نمی‌تواند در چند دوره صورت گیرد. محدودیت (۸) نشان می‌دهد که اگر سفارشی فرایند اول آن؛ یعنی کوره قوس الکتریکی صورت گیرد باید به مرحله بعد؛ یعنی کوره پاتیلی و مرحله بعد آن؛ یعنی ریخته‌گری نیز منتقل گردد. اصطلاحاً اگر برای یک سفارشی شماره مذابی تعلق گیرد، باید فرایند کوره پاتیلی و ریخته‌گری نیز برای آن انجام شود. این امر بدان جهت است که

تاخیرها در برنامه‌ریزی سفارش‌های صنعت فولاد است. با توجه به اینکه مدل مورد نظر، برنامه‌ریزی سفارش‌ها - موجودی است، تابع هدف با مینیمم کردن زودکردها و مینیمم کردن تاخیرات مناسب به نظر می‌رسد.

نکته قابل توجه اینکه در تابع هدف طراحی شده پارامترهای هزینه لحاظ نشده است. لحاظ نمودن هزینه زودکرد و دیرکرد، با توجه به اینکه این هزینه‌ها تابع بسیاری از پارامترها مانند: تورم، محل جغرافیایی، نوع سفارش و موارد دیگر هستند، با خطا همراه خواهد بود. بنابراین، در مدل توسعه داده شده مینیمم کردن مجموع زودکردها و دیرکردها معیاری است که با توجه به اینکه عدم تطابق با برنامه تعیین شده را نشان داده و تفسیر آن ساده‌تر و با خطای کمتری همراه خواهد بود؛ مناسب است. از طرف دیگر، ارتباط تنگاتنگ با این صنعت و مطالعه موردی صورت گرفته، مناسب بودن این تابع هدف را توجیه می‌نماید. در حقیقت، همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، هدف اصلی مدل ارائه شده در نظر گرفتن توأم برنامه‌ریزی سفارش‌ها و برنامه‌ریزی موجودی است. در برنامه‌ریزی سفارش‌ها هدف عمده تحویل محصول بدون دیرکرد به مشتری و در برنامه‌ریزی موجودی هدف عمده کاهش موجودی است که ارتباط مستقیم با زودکرد دارد. از این‌رو، تابع هدف، این دو پارامتر را با وزن‌های یکسان در نظر گرفته و تعداد سفارش‌ها دیرکردار و زودکردار را به مینیمم می‌رساند.

محدودیت‌های (۲) و (۳) مربوط به ظرفیت در دسترس برای هر فرایند (کوره قوس الکتریکی، کوره پاتیلی و VD و VOD، ریخته‌گری پیوسته، نورد سنگین و نورد سبک) در هر دوره است. محدودیت (۲) حداقل ظرفیت تولید را در هر مرحله نشان

از جمله ویژگی‌های بارز مدل ارائه شده، همان‌طور که اشاره گردید، برنامه‌ریزی سفارش‌ها و برنامه‌ریزی موجودی به صورت همزمان است. در حقیقت، واحد برنامه‌ریزی تولید بر اساس سفارش‌های پیشنهادی در ابتدای هر دوره باید سفارش‌های را انتخاب نماید. یکی از مهم‌ترین فاکتورهایی که در این انتخاب نقش عمده‌ای دارد محدودیت‌های ظرفیت (محدودیت‌های (۲)، (۳) و (۶)) است. علاوه بر آن، با توجه به تابع هدف، سفارش‌های با کمترین زودکرد و دیرکرد انتخاب می‌گردند. مدل ارائه شده، برنامه‌ریزی سفارش‌ها انتخابی را نیز انجام می‌دهد؛ به این معنا که مشخص می‌کند که هر کدام از فرایندهای مربوط به هر یک از سفارش در کدام هفته صورت گیرد. علاوه بر آن، این مدل تعیین می‌کند که از چه گریدهایی و به چه میزان، موجودی در هر هفته در هر فرایند تولید گردد. این ویژگی‌های منحصر به فرد، مدل فوق را از دیگر مدل‌های موجود در ادبیات متمایز می‌سازد.

مدل فوق یک مدل غیرخطی ترکیبی با صفر و یک<sup>۹</sup> است. پیچیدگی مدل ارائه شده به واسطه غیرخطی بودن مدل از یک طرف و از طرف دیگر، ترکیبی بودن آن با عدد صحیح است. به منظور ساده‌سازی مدل ارائه شده در بخش بعد، راهکار مناسب به منظور خطی‌سازی آن صورت خواهد گرفت. در این صورت مدل ارائه شده به یک مدل خطی ترکیبی با متغیرهای صفر و یک<sup>۱۰</sup> تبدیل خواهد شد. با توجه به اینکه مدل جدید همچنان به صورت ترکیبی با متغیرهای صفر و یک باقی می‌ماند؛ روش‌های بهینه‌سازی دقیق، راهگشای مناسبی برای حل این مدل نخواهند بود. برای این منظور باید از

امکان ذخیره یا انبار نمودن مذاب تولید شده توسط فرایند اول (کوره قوس الکتریکی) وجود ندارد. محدودیت (۹) زمان تکمیل شدن سفارش  $J$ ام در مرحله  $J$ ام را نشان می‌دهد. محدودیت (۱۰) بیان می‌کند که زمان تکمیل شدن یک سفارش در مرحله  $J$ ام باید از زمان تکمیل شدن آن در مرحله بعد کمتر یا نهایتاً مساوی باشد. محدودیت (۱۱) بیانگر این مطلب است که زمان تکمیل شدن فرایند ریخته‌گری باید حتماً کوچک‌تر از فرایند نورد سنگین باشد. این مطلب بدین خاطر است که بین فرایند ریخته‌گری و نورد سنگین انباری وجود دارد که برای سرد شدن تدریجی بلوم‌های تولیدی باید حداقل یک دوره (هفته) منتظر بمانند. بنابراین، امکان ریخته‌گری شدن یک سفارش و نورد آن در یک دوره وجود ندارد. این درحالی است که فرایند کوره قوس، کوره پاتیلی و ریخته‌گری در یک دوره باید صورت گیرند و فرایند نورد سنگین و سبک هم می‌توانند در یک دوره صورت گیرند و یا در دوره‌های متفاوتی فرایند شوند. محدودیت (۱۲) نشان می‌دهد که موجودی انبار در انتهای مرحله اول و دوم از هر گرید باید صفر باشد، زیرا خروجی این مراحل مواد مذابی است که امکان نگهداری و انبار شدن را ندارند. محدودیت (۱۳) نشان می‌دهد که متغیرهای تصمیم  $x_{ijt}$  به صورت صفر و یک هستند. در صورتی که مرحله  $J$ ام از سفارش  $i$  در هفته  $t$  انجام گردد، این متغیر برابر با یک و در غیر این صورت مقدار این متغیر برابر با صفر خواهد شد. در نهایت، محدودیت (۱۴) و (۱۵) نشان می‌دهد که متغیرهای تصمیم  $y_{gjt}$  که بیانگر میزان تولید مازاد از سفارش دریافتی مرحله  $J$  از گرید  $g$  در دوره  $t$  است و  $I_{gjt}$  که بیانگر میزان موجودی گرید  $g$  در انتهای دوره  $t$  از فرایند  $J$  است، مقدار بزرگ‌تر مساوی صفر را می‌توانند بگیرند.

برنامه‌ریزی تولید را میسر می‌سازد، اما طبیعی است که واحد برنامه‌ریزی تولید برای انتخاب و تولید سفارش‌ها و همچنین، تصمیم‌گیری در مورد نوع و میزان تولید مازاد از سفارش‌ها، اگرچه از طریق برقراری ارتباط با واحد فروش و هریک از فرایندها، این مهم را انجام می‌دهد، اما تصمیم گرفته شده از دقت بالایی برخوردار نخواهد بود؛ چرا که در نظر گرفتن توام همه جوانب و مواردی که در این تصمیم‌گیری مهم هستند، به صورت دستی بسیار سخت و تا حدی امکان‌ناپذیر است. این امر موجب ضررهای قابل توجهی برای کارخانه می‌گردد. این ضرر بابت تاخیر در تحویل سفارش‌ها، هزینه موجودی‌ها و هزینه عدم استفاده از ظرفیت موجود است.

برای استفاده از این مدل در صنعت، برنامه‌ریز تولید باید هر ماه داده‌های مورد نیاز را به مدل مورد نظر وارد کند تا تصمیم‌گیری در مورد سفارش‌های انتخابی، زمان تکمیل آنها و تولیدات مازاد از سفارش‌ها در هر دوره صورت گیرد.

داده‌های مورد نیاز عبارتند از

- تعداد سفارش‌های پیشنهادی ( $i$ )
- تعداد گریدها ( $g$ )
- وزن سفارش‌های پیشنهادی که به واحد فروش ارائه شده ( $w_i$ )
- زمان تحویل سفارش‌ها که مشتریان به واحد فروش اعلام نموده‌اند ( $d_i$ )
- حداکثر ظرفیت انبارهای هریک از فرایندها  $I_j^{\max}$
- ظرفیت در دسترس هریک از فرایندها در هر دوره ( $AC_{jt}$ )
- تعیین نوع گریه هریک از سفارش‌ها ( $s_{ig}$ )

روش‌های ابتکاری و فراابتکاری استفاده نمود که در ادامه در بخش ۵ بدان پرداخته می‌شود.

### ۳-۱-۳- خطی سازی مدل ارائه شده

همان‌طور که اشاره شد، مدل طراحی شده یک مدل MZONLP است که دلیل غیر خطی بودن آن به علت تابع هدف است. برای ساده‌تر شدن حل مدل می‌توان به کمک روابط زیر مدل را به شکل MZOLP تغییر داد. برای این منظور، در مدل طراحی شده تابع هدف به صورت زیر تغییر می‌کند:

$$\min z_1 = 0.5 * \sum_{i=1}^N q1_i + 0.5 * \sum_{i=1}^N q2_i \quad (1)$$

و به مجموعه محدودیت‌های مدل محدودیت‌های زیر اضافه می‌گردد:

$$\begin{aligned} d_i - \sum_{t=1}^T x_{it}.t &\leq q1_i \quad \text{for } i=1, \dots, I \\ \sum_{t=1}^T x_{it}.t - d_i &\leq q2_i \quad \text{for } i=1, \dots, I \\ q1_i &\geq 0 \quad \text{for } i=1, \dots, I \\ q2_i &\geq 0 \quad \text{for } i=1, \dots, I \end{aligned}$$

با این راهکار مدل جدید یک مدل MZOLP است که در مقایسه با مدل قبلی ساده‌تر و سریع‌تر حل خواهد شد.

### ۴- استفاده از مدل استخراج شده در صنعت فولاد

در حال حاضر، برنامه‌ریزی سفارش‌ها موجودی در صنایع فولاد بر اساس تجربه، محاسبات دستی و یا بعضاً استفاده از اتوماسیون است. در کارخانه فولاد آلیاژی ایران، همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، سیستم اتوماسیون پایه‌ریزی شده برای این منظور، استفاده می‌شود. این سیستم امکان دسترسی به روز هریک از فرایندها به برنامه تولید اتخاذ شده توسط واحد

استخراج شده از طریق Lingo، در جدول ۱ برای چند مورد نشان داده شده است. همان طور که در این جدول مشخص است، مسأله مورد بحث از ۵ سفارش تا ۱۰ سفارش زمان حل آن از ۲ ثانیه به ۱۴ ثانیه رسیده است، اما تغییر ابعاد مسأله از ۱۰ سفارش به ۱۲ سفارش، زمان حل مسأله، به یک باره تا ۱۸،۱۴ دقیقه و با افزایش تعداد سفارش به ۱۴، زمان حل تا ۲۴،۴۵ دقیقه افزایش می یابد. جالبتر اینکه وقتی ابعاد مسأله به ۱۶ سفارش افزایش می یابد، زمان حل به شدت افزایش یافته تا حدود ۲ ساعت به طول می انجامد

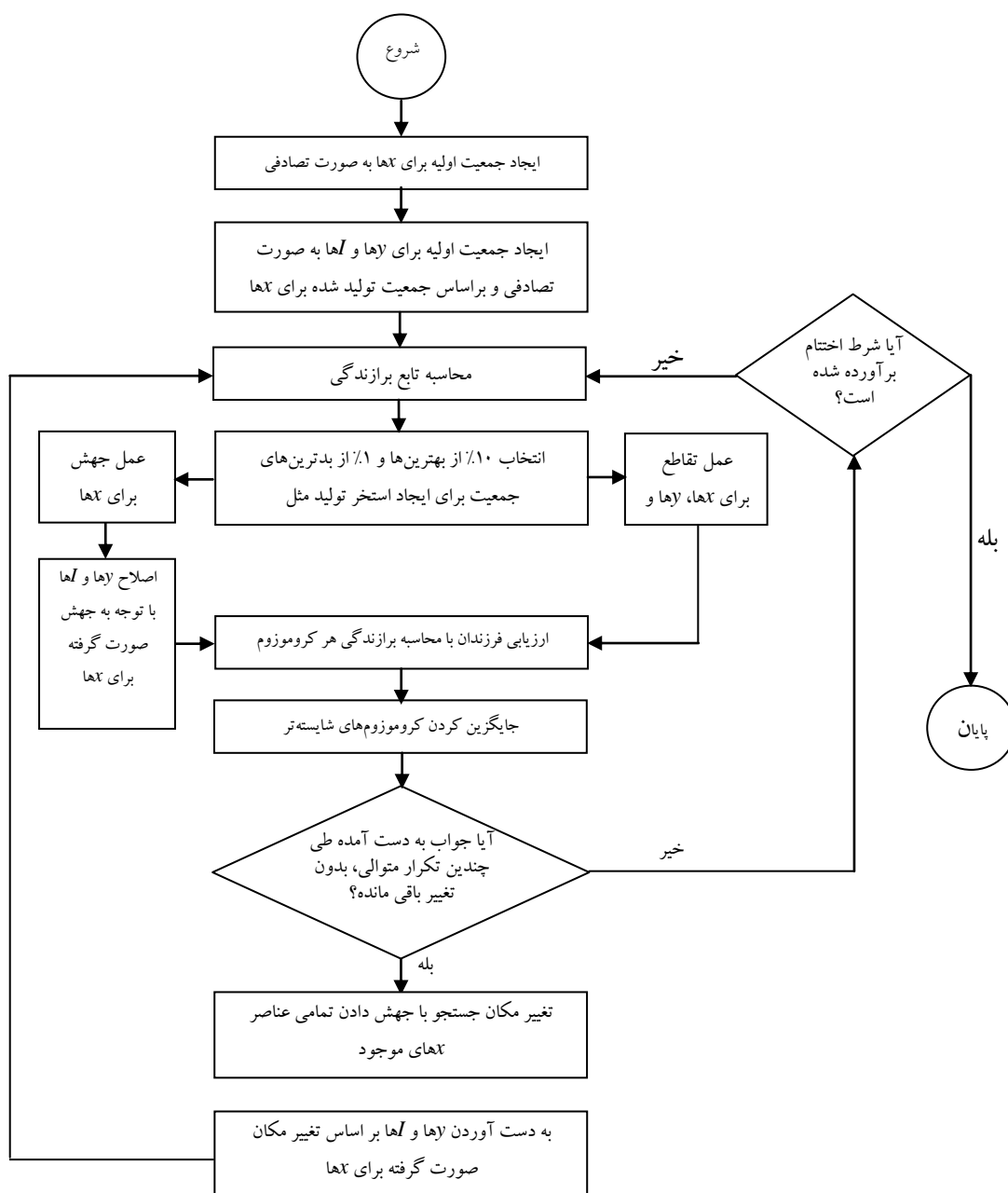
مدل ارائه شده یک مدل برنامه ریزی غیر خطی عدد صحیح است که با توجه به نمودار موجود در شکل ۲ واضح است که جواب دقیق که توسط Lingo به دست خواهد آمد، برای تعداد سفارش های زیاد عملاً با توجه به روند رو به رشد سریع نمودار قابل اجرا نیست. از طرف دیگر، با توجه به اینکه مدل طراحی شده حالتی پیچیده تر از سیستم Flow shop را نشان می دهد، پیچیدگی این مسأله و لزوم استفاده از الگوریتم های فرا ابتکاری کاملاً واضح خواهد بود (ژانگ و همکاران، ۲۰۰۵).. از این رو، در ادامه به بررسی الگوریتم ژنتیک به عنوان یکی از روش های فراابتکاری و حل مدل مورد بحث به کمک آن پرداخته شده است (سینق و همکاران، ۲۰۰۴).

به جز دو عملگر تقاطع و جهش که در تمام الگوریتم های ژنتیک، کاربرد دارند، عملگرهای دیگری هم هستند که در مسائل خاص استفاده می شوند؛ از آن جمله می توان عملگر جمع یا عملگر حذف و همچنین، عملگر جابه جایی را نام برد (کارلسون، ۱۹۹۵).

- زمان فرایند شدن هر تن فولاد از نوع گرید  $g$  در فرایند  $j$  ( $p_{gj}$ )
- زمان در دسترس فرایند  $j$  در دوره  $t$  ( $AT_{jt}$ )
- با ورود داده های فوق به مدل استخراج شده، تصمیمات لازم در مورد برنامه ریزی تولید مناسب در این صنعت صورت می گیرد. این تصمیمات و یا به عبارتی، خروجی های مدل استخراج شده به شرح زیر هستند:
- فرایند شدن و یا عدم فرایند شدن یک سفارش ( $x_{ijt}$ )
- زمان تکمیل یک سفارش ( $c_{ij}$ )
- زمان تکمیل هر کدام از فرایندهای یک سفارش ( $x_{ijit}$ )
- میزان تولید مازاد از سفارش از گرید  $g$  (میزان استفاده از ظرفیت باقی مانده) در هر فرایند ( $y_{gjt}$ )
- مقدار موجودی از گرید  $g$  در انتهای هر فرایند ( $I_{gjt}$ )
- در ادامه، پس از ارائه روش حل پیشنهادی در بخش «نتایج محاسباتی» به نمونه ای از نتایج به دست آمده از این مدل به کمک الگوریتم طراحی شده، اشاره خواهد شد.

#### ۵- روش حل پیشنهادی

نتایج حل مدل برنامه ریزی سفارش ها- موجودی استخراج شده به کمک Lingo نشان می دهد که حل مدل توسعه داده شده در مقیاس های بزرگ، زمان بر بوده و این مطلب به خاطر پیچیدگی بالای مدل استخراج شده است. از این رو در ادامه، تحقیقات به منظور حل مدل و دستیابی به جواب مناسب در زمان کوتاه تر صورت گرفته است. جواب های دقیق مدل



شکل (۱): الگوریتم پیشنهادی برای حل مدل ارائه شده

## ۶- نتایج محاسباتی

را نشان می‌دهد که سیستم تولیدی در بازه مورد مطالعه (یک ماه) توانایی تولید ۵ گرید را داشته باشد. جدول شماره (۲) حالتی که ۷ گرید مجاز باشد و جدول شماره ۳ حالتی که امکان تولید ۹ گرید در ماه وجود داشته باشد را نشان می‌دهد. در این جداول تعداد سفارش‌ها از ۵ تا ۲۰ سفارش متغیر است. علت

به منظور بررسی عملکرد مدل ارائه شده در تصمیم‌گیری‌های مطرح شده در این صنعت و همچنین، توانایی الگوریتم طراحی شده در ارائه جواب مناسب، به حل این مدل برای مثال‌های موجود در جداول ۱، ۲ و ۳ پرداخته شده است. جدول (۱) حالتی

نتایج حاصل از حل مدل ریاضی ارائه شده به کمک الگوریتم پیشنهادی برای یک دوره ۴ هفته‌ای که در آن ۵ سفارش با وزن‌های ۲۰۰۰، ۲۲۰۰، ۲۱۰۰، ۴۰۰۰ و ۵۲۰۰ از گریدهای ۲، ۴، ۱، ۳ و ۵ و تاریخ‌های تحویل در هفته‌های به ترتیب ۳، ۳، ۲، ۴ و ۲ وجود دارد، برای نمونه در جداول ۲ و ۳ ارائه شده‌اند. جدول ۴ برنامه‌ریزی سفارش‌ها و جدول ۵ برنامه‌ریزی موجودی حاصل از این مدل را نشان می‌دهد. همان‌طور که جدول (۴) نیز نشان می‌دهد، سفارش سوم از بین مجموعه سفارش‌های پیشنهادی، انتخاب نمی‌شود و زمان تکمیل سفارش‌های اول و دوم در هفته سوم، زمان تکمیل سفارش چهارم در هفته چهارم و زمان تکمیل سفارش پنجم در هفته دوم است. مدل ارائه شده، همچنین توانایی برنامه‌ریزی موجودی‌ها را نیز داراست. از این‌رو، جدول ۵، نتایج حاصل از اجرای مدل طراحی شده را به کمک الگوریتم ارائه شده نشان می‌دهد.

انتخاب این تعداد سفارش‌ها از این است که بررسی‌های انجام شده در این صنعت (مطالعه موردی در فولاد آلیاژی ایران واقع در یزد) نشان می‌دهد که معمولاً در هر ماه تعداد سفارش‌ها از ۲۰ سفارش تجاوز نمی‌کند.

حل مثال‌های طراحی شده به کمک Lingo همان‌طور که قبلاً نیز بدان اشاره شد، زمان طولانی برای حل مدل طراحی شده را نشان می‌دهد. این مقاله با ارائه یک الگوریتم فراابتکاری بر پایه الگوریتم ژنتیک به حل مجدد مثال‌های مطرح شده پرداخته است. الگوریتم طراحی شده، در محیط Matlab کد نویسی شده که در قسمت قبل تاحدی به این کدنویسی اشاره گردید. محاسبات مربوط به برنامه مرتبط با الگوریتم پیشنهادی در رایانه ای با مشخصات پردازنده AMD Athlon (tm) ۱,۶۷ گیگا هرتز، ویندوز XP و ۲۵۶ مگابایت رم انجام شده است. در ادامه، جداول ۱، ۲ و ۳ نحوه عملکرد الگوریتم پیشنهادی را در حل مدل توسعه داده شده برای مثال‌های متنوع نشان می‌دهد.

جدول (۱): عملکرد الگوریتم ژنتیک در حالتی که ۵ گرید وجود دارد

ردیف	تعداد سفارش	تعداد متغیر	تعداد محدودیت	لینگو		الگوریتم پیشنهادی		خطای نسبی
				تابع هدف	زمان حل	تابع هدف	زمان حل	
۱	(۵، ۵)	۲۸۵	۲۱۱	۱	۰:۰:۲	۱	۰:۰:۱	۰/۵
۲	(۵، ۶)	۳۱۰	۲۲۵	۱/۵	۰:۰:۱۲	۱/۵	۰:۰:۲	۰/۱۷
۳	(۵، ۸)	۳۶۰	۲۵۳	۴	۰:۰:۱۲	۴	۰:۰:۲	۰/۱۷
۴	(۵، ۱۰)	۴۱۰	۲۸۱	۵/۵	۰:۰:۱۴	۵/۵	۰:۰:۲	۰/۱۴
۵	(۵، ۱۲)	۴۶۰	۳۰۹	۵/۵	۰:۱۸:۱۴	۵/۵	۰:۵:۱۶	۰/۲۹
۶	(۵، ۱۴)	۵۱۰	۳۳۷	۶/۵	۰:۲۴:۴۵	۶/۵	۰:۶:۱۲	۰/۲۵
۷	(۵، ۱۶)	۵۶۰	۳۶۵	۸	۰:۵۹:۲۶	۸	۰:۱۰:۲	۰/۰۸
۸	(۵، ۱۸)	۶۱۰	۳۹۳	۷	۰:۴۵:۱۳	۷	۰:۱۰:۵۸	۰/۰۴
۹	(۵، ۲۰)	۶۶۰	۴۲۱	۹/۵	۰:۴۹:۴۴	۹/۵	۰:۱۲:۰۳	۰/۰۵

جدول (۲): عملکرد الگوریتم ژنتیک در حالتی که ۷ گرید وجود دارد

خطای نسبی	نسبت زمانی	الگوریتم پیشنهادی		لینگو		تعداد محدودیت	تعداد متغیر	تعداد سفارش	ردیف
		تابع هدف	زمان حل	تابع هدف	زمان حل				
۰	۱	۰	۰۰:۰۰:۰۲	۰	۰۰:۰۰:۰۲	۲۴۳	۳۴۹	(۷, ۵)	۱
۰	۰/۴۵	۰/۵	۰۰:۰۰:۰۵	۰/۵	۰۰:۰۰:۱۱	۲۵۷	۳۷۴	(۷, ۶)	۲
۰	۰/۰۰۵	۱/۵	۰۰:۰۰:۰۷	۱/۵	۰۰:۲۲:۱۸	۲۸۵	۴۲۴	(۷, ۸)	۳
۰	۰/۲۷	۴	۰۰:۰۰:۲۵	۴	۰۰:۰۱:۳۴	۳۱۳	۴۷۴	(۷, ۱۰)	۴
۰/۰۶	۰/۸۳	۴/۲۵	۰۰:۰۰:۱۵	۴	۰۰:۰۰:۱۸	۳۴۱	۵۲۴	(۷, ۱۲)	۵
۰	۰/۰۴	۶/۵	۰۰:۰۱:۱۴	۶/۵	۰:۲۷:۴۵	۳۶۹	۵۷۴	(۷, ۱۴)	۶
۰/۰۷	۰/۰۰۸	۷/۵	۰۰:۰۱:۴۳	۷	۰۳:۴۰:۰۳	۳۹۷	۶۲۴	(۷, ۱۶)	۷
۰/۰۳	۰/۰۰۹	۸/۷۵	۰۰:۰۱:۵۵	۸/۵	۰۳:۴۴:۲۹	۴۲۵	۶۷۴	(۷, ۱۸)	۸
۰/۰۶	۰/۰۰۹	۹	۰۰:۰۲:۰۴	۸/۵	۰۳:۳۷:۳۱	۴۵۳	۷۲۴	(۷, ۲۰)	۹

جدول (۳): عملکرد الگوریتم ژنتیک در حالتی که ۹ گرید وجود دارد

خطای نسبی	نسبت زمانی	الگوریتم پیشنهادی		لینگو		تعداد محدودیت	تعداد متغیر	تعداد سفارش	ردیف
		تابع هدف	زمان حل	تابع هدف	زمان حل				
۰	۱	۰	۰۰:۰۰:۰۳	۰	۰۰:۰۰:۰۳	۲۷۵	۴۱۳	(۹, ۵)	۱
۰	۱	۰	۰۰:۰۰:۰۲	۰	۰۰:۰۰:۰۲	۲۸۹	۴۳۸	(۹, ۶)	۲
۰	۰/۱۵	۱/۵	۰۰:۰۰:۳۰	۱/۵	۰۰:۰۳:۲۲	۳۱۷	۴۸۸	(۹, ۸)	۳
۰/۰۸	۰/۰۱	۳/۲۵	۰۰:۰۰:۳۷	۳	۰۰:۴۵:۴۷	۳۴۵	۵۳۸	(۹, ۱۰)	۴
۰/۰۷	۰/۰۲	۳/۷۵	۰۰:۰۱:۰۴	۳/۵	۰۰:۵۵:۰۶	۳۷۳	۵۸۸	(۹, ۱۲)	۵
۰/۰۶	۰/۰۳	۴/۷۵	۰۰:۰۱:۴۲	۴/۵	۰۰:۵۷:۰۳	۴۰۱	۶۳۸	(۹, ۱۴)	۶
۰/۰۶	۰/۰۳	۴/۲۵	۰۰:۰۱:۵۴	۴	۰۰:۵۹:۰۳	۴۲۹	۶۸۸	(۹, ۱۶)	۷
۰/۰۹	۰/۰۱	۶	۰۰:۰۲:۱۶	۵/۵	۰۲:۳۱:۲۵	۴۵۷	۷۳۸	(۹, ۱۸)	۸

$$c_{21}=0, \quad c_{22}=0, \quad c_{23}=0, \\ c_{24}=3, \quad c_{25}=3$$

با توجه به  $c_{ij}$  ها می‌توان پی برد که فرایند اول، دوم و سوم سفارش ۲ اگرچه انجام نمی‌شوند، ولی فرایند چهارم و پنجم آن در هفته سوم انجام می‌شود. در حقیقت، فرایند چهارم سفارش ۲ از تولیدات مازاد از سفارش تولید شده در مرحله سوم استفاده می‌نماید و با انجام فرایند چهارم و پنجم، این تولیدات مازاد به سفارش دوم تبدیل می‌گردد. این مطلب برای سایر

جدول ۴ برنامه موجودی‌ها شامل تولیدات مازاد از سفارش‌ها در هر دوره و همچنین، موجودی انتهای هر دوره را نشان می‌دهد. تولیدات مازاد از سفارش ه همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد برای استفاده حداکثری از ظرفیت ماشین‌آلات صورت می‌گیرد. شایان ذکر است که تولیدات مازاد از سفارش‌ها در مراحل بعد قابلیت تبدیل به سفارش‌ها را دارند. به همین دلیل، در خروجی این مدل برای سفارش دوم همان‌طور که در جدول ۴ نیز نشان داده شده است، نتایج حاصل برای  $C_{ij}$  به صورت زیر است:

جدول (۴): برنامه‌ریزی موجودی‌ها در شرایط وجود ۵ سفارش و ۵ گرید برای ۴ هفته

فرایند	هفته اول	هفته دوم	هفته سوم	هفته چهارم
کوره قوس الکتریکی	تولید مازاد	۱۰۰۰ گرید ۲، ۲۵۰۰ گرید ۵	۷۰۰ گرید ۲، ۲۸۰۰ گرید ۵	۳۰۰ گرید ۲، ۱۰۰۰ گرید ۴، ۲۲۰۰ گرید ۳
	موجودی انتهای دوره	۲۵۰۰	۲۸۰۰	۲۵۰۰
کوره پاتیلی	تولید مازاد	۱۰۰۰ گرید ۲، ۲۵۰۰ گرید ۵	۷۰۰ گرید ۲، ۲۸۰۰ گرید ۵	۳۰۰ گرید ۲، ۱۰۰۰ گرید ۴، ۲۲۰۰ گرید ۳
	موجودی پایان دوره	۲۵۰۰	۲۸۰۰	۲۵۰۰
ریخته‌گری	تولید مازاد	۱۰۰۰ گرید ۲، ۲۵۰۰ گرید ۵	۷۰۰ گرید ۲، ۲۸۰۰ گرید ۵	۳۰۰ گرید ۲، ۱۰۰۰ گرید ۴، ۲۲۰۰ گرید ۳
	موجودی پایان دوره	۱۰۰۰	۵۰۰	۲۰۰
نورد سنگین	تولید مازاد	۲۵۰۰ گرید ۵	۱۲۰۰ گرید ۲، ۲۸۰۰ گرید ۵	۸۰۰ گرید ۲، ۱۰۰۰ گرید ۳
	موجودی پایان دوره	۲۵۰۰	۱۲۰۰	۱۰۰۰
نورد سبک	تولید مازاد	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
	موجودی پایان دوره	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰

شده توسط مشتریان انتخاب و زمان تکمیل آنها را تعیین کند و همچنین مشخص نماید که در هر دوره بر اساس ظرفیت موجود و به منظور استفاده مناسب از ظرفیت، به چه میزان تولیدات مازاد (برنامه‌ریزی موجودی) در هر مرحله صورت گیرد. در این میان موجودی پایان هر مرحله نیز باید در نظر گرفته شود. بر این اساس، بعد از پژوهش‌های انجام شده در این صنعت، مدل مورد نظر استخراج گردید. برای حل این مدل، مثال‌های متنوعی بررسی و به منظور پیدا کردن جواب بهینه از Lingo استفاده شد. نتایج همان‌طور که در نمودار شکل ۲ نیز نشان داده شده، حاکی از پیچیدگی بالای مسأله مورد بررسی است. از این‌رو، در ادامه تحقیقات، بررسی‌ها به منظور دستیابی به جواب نزدیک بهینه و مناسب صورت گرفت. برای این منظور، از الگوریتم ارائه شده بر پایه ژنتیک استفاده شده است. بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی در مثال‌های طراحی شده، هم از نظر زمان حل و هم از نظر اختلاف با جواب بهینه صورت گرفته است. همان‌طور که شکل (۵) نیز نشان می‌دهد، عملکرد الگوریتم طراحی شده مناسب است.

سفارش‌های موجود در جدول ۴ که زمان تکمیل فرایندهای کوره قوس الکتریکی، کوره پاتیلی و ریخته‌گری و نورد سنگین آنها مشخص نشده، نیز صادق است.

#### ۷- نتیجه‌گیری

این مقاله در راستای تحقیق در زمینه برنامه‌ریزی سفارش‌ها، برنامه‌ریزی موجودی و زمانبندی تولید در صنعت فولاد تدوین یافته است. هدف اصلی در این مقاله، بهبود در سیستم برنامه‌ریزی تولید صنعت فولاد از طریق پاسخگویی سریع به مشتریان، کاهش موجودی و استفاده حداکثری از منابع، با به دست آوردن برنامه‌ریزی ریاضی و مدل کردن این مسأله است.

تحقیقات صورت گرفته در این مقاله بر اساس ارتباط مستقیم با این صنعت، مرور ادبیات و گرفتن مشاوره از متخصصان این صنعت حاصل گردیده است. یکی از مهم‌ترین نوآوری‌های این تحقیق، ارائه مدل برنامه‌ریزی سفارش‌ها- موجودی است. این مدل باید سفارش‌های مناسب‌تر را از میان سفارش‌های ارائه



## منابع

- As'ad Rami, Demirli Kudret. (2010). "Production scheduling in steel rolling mills with demand substitution: Rolling horizon implementation and approximations", *International Journal of Production Economics*, 126, 361-369.
- Atighehchian Arezoo, Bijari Mehdi, Tarkesh Hamed. (2009). "A novel hybrid algorithm for scheduling steel-making continuous casting production", *Computers & Operations Research*, 36, 2450- 2461.
- Bao-lin Zhu, Hai- bin Yu, Xia-yuan Huang. (2006). "research approaches on integrated planning for iron and steel enterprises" *IEEE international conference on Systems, Man and Cybernetics*.
- Carlson Susan E. (1995). "A general method for handling constraints in genetic algorithms" in *proceeding of the second annual joint conference on information science*, 663- 667.
- Chun-yue Yu, Rong-xia Qu. (2008). "Multi-objective Order Planning Model and Algorithm for Integrated Steel Production" *International Conference on Management Science & Engineering (15th) September 10-12, Long Beach, USA*.
- Cowling Peter. (2003). "A flexible decision support system for steel hot rolling mill scheduling", *Computers & Industrial Engineering*, 45, 307-321.
- Cowling Peter I., Ouelhadj Djamila, Petrovice Sanja. (2003). "A multi agent architecture for dynamic scheduling of steel hot rolling", *Journal of intelligent manufacturing*, 14, 457- 470.
- Craig I.K., Camisani-Calzolari F.R., Pistorius P.C. (2001). "A contemplative stance on the automation of continuous casting in steel processing", *Control Engineering Practice*, 9, 1013-1020.
- Erel E., Ghosh J.B.(2007). "Customer order scheduling on a single machine with family setup times: Complexity and algorithms" *Applied Mathematics and Computation*, 185, 11-18.

نتایج حاصل از این تحقیق از کاربرد بالایی در صنعت فولاد آلیاژی برخوردار است. در حال حاضر، چالش بسیاری از صنایع فولاد برنامه‌ریزی تولید مناسب است که بخشی از آن سفارش‌ها، بخشی از آن موجودی است. بدون شک، استفاده از نتایج به دست آمده از این تحقیق، بهبود در صنعت فولاد را از طریق کاهش تاخیرات در تحویل سفارش‌ها، استفاده مناسب از ظرفیت و نگهداری موجودی مناسب، امکان‌پذیر می‌سازد. همچنین، نتایج به دست آمده در این تحقیق، قابلیت استفاده در صنایع مشابه و صناعی که بر پایه سفارش‌ها بنا نهاده شده‌اند، را نیز داراست. شایان ذکر است که خروجی مدل ارائه شده برنامه هفتگی هر کدام از کارگاه‌های فولادسازی و نورد را تعیین می‌کند. زمانبندی هر کدام از این کارگاه‌ها بر پایه برنامه هفتگی استخراج شده، کاری است که در ادامه تحقیقات باید بدان پرداخته شود. در حقیقت، هر کدام از واحدهای فولادسازی، نورد سنگین و نورد سبک برنامه هفتگی خود را از طریق مدل استخراج شده در این مقاله به دست خواهند آورد. لازمه محقق شدن این برنامه، استخراج مدلی مناسب برای زمانبندی هر یک از این کارگاه‌ها، متناسب با مشخصه‌های موجود در این واحدهاست.

از دیگر تحقیقات جذاب، بررسی و استخراج مدلی به منظور جایگزینی سفارش‌های مشتریان با سفارش‌های با کمترین تفاوت، با در نظر گرفتن هزینه و منافع آن است. همچنین، بررسی برنامه‌ریزی سفارش‌ها موجودی با در نظر گرفتن توابع هدف دیگر و استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری بامعیارهای چندگانه از دیگر مباحثی است که در ادامه تحقیقات می‌توان بدان پرداخت.

- Tang Lixin, Liu Guoli. (2007). "A mathematical programming model and solution for scheduling production orders in Shanghai Baoshan Iron and Steel Complex", *European Journal of Operational Research*, 182, 1453–1468.
- Tang Lixin, Liu Jiying, Rong Aiying, Yang Zihou. (2000). "A multiple traveling salesman problem model for hot rolling scheduling in Shanghai Baoshan Iron & Steel Complex", *European Journal of Operational Research*, 124, 267- 282.
- Tang Lixin, Luh Peter B., Liu Jiyn, Fang Lei. (2002). "Steel-making process scheduling using Lagrangian relaxation", *international journal of production research*, 40, 1, 55-70.
- Tang Lixin, Wang Xianpeng, Liu Jiying. (2008). "Color-Coating Production Scheduling for Coils in Inventory in Steel Industry", *IEEE Transactions on automation science and engineering*, 5, 3-10.
- Vanhoucke M., Debels D. (2009). "A finite-capacity production scheduling procedure for a Belgian steel company", *International Journal of Production Research*, 47, 561-584.
- Zanoni Simone, Zavanella Lucio. (2005). "Model and analysis of integrated production–inventory system: The case of steel production", *International Journal of Production Economics*, 93–94, 197–205.
- Zhao Jun, Wang Wei, Liu Quanli, Wang Zhigang, Shi Peng. (2009). "A two-stage scheduling method for hot rolling and its application" *Control Engineering Practice*, 17, 629 –641.
- Zhang T., Zhang Y.J., Liu S.X. (2008). "A Mixed Integer Programming Model and Improved Genetic Algorithm for Order Planning of Iron-Steel Plants" *Information and Management Sciences*, 19, 3, 413- 435.
- Zhang Tao, Zhang Yue-Jie, Wang Meng-Guang. (2005). "Research on 3MO- based genetic algorithm for solving order planning" *Proceedings of the Fourth International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, Guangzhou, 18-21.
- Fazel Zarandi M.H., Ahmadpour P. (2009). "Fuzzy agent-based expert system for steel making process", *Expert Systems with Applications*, 36, 9539–9547.
- Huegler PA, Vasko F J. (2007). "Meta heuristics for melt shop scheduling in the steel industry", *Journal of the Operational Research Society*, 58, 791–796.
- Kerkanen Annastiina. (2007). "Determining semi-finished products to be stocked when changing the MTS-MTO policy: Case of a steel mill", *International Journal of Production Economics*, 108, 111– 118.
- Lin B.M.T., Kononov A.V. (2007). "Customer order scheduling to minimize the number of late jobs" *European Journal of Operational Research*, 183, 944-948.
- Liu Shixin, Tang Jiafu, Song Jianhai. (2006). "Order-planning model and algorithm for manufacturing steel sheets", *Int. J. Production Economics*, 100, 30–43.
- Lopez Leo, Carter Michael W., Gendreau Michel. (1998). "The hot strip mill production schedulig problem:a tabu search approach" *European journal of operational research*, 106, 317-335.
- Mathirajan M. , Chandru V., Sivakumar A. I. (2007). "Heuristic algorithms for scheduling heat-treatment furnaces of steel casting industries", *Sadhana*, 32, Part 5, 479–500.
- Pan Changchun, Yang G.K. (2009). "A method of solving a large-scale rolling batch scheduling problem in steel production using a variant of column generation", *Computers & Industrial Engineering*, 56, 165–178.
- Rong Aiying, Lahdelma Risto. (2008). "Fuzzy chance constrained linear programming model for optimizing the scrap charge in steel production", *European Journal of Operational Research*, 186, 953–964.
- Singh Kumar Ashutosh, Srinivas, Tiwari M.K. (2004). "Modelling the slab stack shuffling problem in developing steel rolling schedules and its solution using improved Parallel Genetic Algorithms" *International Journal of Production Economics*, 91, 135-147.

## پانوشتها

---

1. Lagrangian relaxation
2. PCTSP: Prize collecting traveling salesman problem
3. Shanghai Baoshan
4. Column generation
5. MTO: make to order
6. MTS: make to stock
7. CODP: customer order decoupling point
8. OPP: order penetration point
9. MZONLP: Mixed Zero One None Linear Programming
10. MZOLP: Mixed Zero One Linear Programming

