هشتمین کنفرانس بین المللی مهندسی صنایع و سیستم‌ها
۱۶ و ۱۷ شهریور ۱۴۰۱ • دانشگاه فردوسی مشهد
8th International Conference on Industrial and Systems Engineering
7 & 8 Sep. 2022 • Ferdowsi University of Mashhad
ICISE 2022

حل مسأله زمان‌بندی اصلی تولید با کارگران دائم و موقت چندمهارته با استفاده از الگوریتم VNS موازی

صدیقه صادقی[۱]، رضا قنبری[۲]، خاطره قربانی مقدم[۳]

[۱] دانشجوی دکتری دانشکده علوم ریاضی، دانشگاه فردوسی مشهد؛ se.sadeghi88@gmail.com

[۲] عضو هیئت علمی دانشکده علوم ریاضی، دانشگاه فردوسی مشهد؛ rghanbari@um.ac.ir

[۳] عضو هیئت علمی موسسه تحقیقات ریاضی دکتر غلامحسین مصاحب، دانشگاه خوارزمی؛ khatere.moghadam67@gmail.com

* نویسنده مسئول: صدیقه صادقی

چکیده

برنامه‌ریزی تولید یکی از مهمترین وظایف مدیریت تولید و عملیات است و درباره تعیین مقدار بهینه تولید، نیروی کار و سطح موجودی برای هر دوره زمانی، با در نظر گرفتن منابع و محدودیت‌ها تصمیم‌گیری می‌کند. در حال حاضر، مدیران تولید سعی در استفاده از روش‌های مختلف در بهینه‌سازی سیستم‌های تولیدی دارند. یکی از ابعاد مهم در بهینه‌سازی، تعیین، تخصیص و استفاده بهینه از نیروی انسانی در بخش تولید است. امروزه مبحث نیروی انسانی اهمیت زیادی پیدا کرده است و نقش بسزایی در بهره‌وری سیستم تولیدی دارد. برنامه‌ریزی نیروی انسانی با تخمین تعداد و نوع کارکنان مورد نیاز برای جذب، گزینش و آموزش باعث می‌شود تا افراد در زمان مناسب به سازمان اضافه شوند. از جمله راهکارهای ارائه شده در این مبحث، آموزش نیروی انسانی است که در آن، مهارت‌های مورد نیاز برای تولید محصولات مختلف در هر یک از خطوط تولید به کارگران آموزش داده می‌شود. در این مقاله، یک مدل جدید برای اختصاص کارگران دائم و موقت با سطوح مختلف مهارت به ایستگاه‌های کاری توسعه یافته است. افزون بر این، زمان آموزش را به منظور افزایش سطح مهارت در نظر می‌گیریم. با توجه به تعداد متغیرها و محدودیت‌ها، زمان اجرا بیش از حد طولانی است و CPLEX نمی‌تواند به مقدار بهینه برای مسائل واقعی برسد. بنابراین ما یک الگوریتم VNS موازی به منظور کاهش زمان محاسبات برای مسائل واقعی پیشنهاد می‌دهیم.

کلمات کلیدی: برنامه‌ریزی تولید، کارگران موقت، الگوریتم VNS موازی.

Parallel VNS algorithms for solving the main production scheduling problem with multi-skilled permanent and temporary workers

Sedigheh Sadeghi[1], Reza Ghanbari[2], Khatere Ghorbani-Moghadam[3]

[1] Faculty of Mathematical Sciences, Department of Applied Mathematics, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran; se.sadeghi88@gmail.com

[2] Faculty of Mathematical Sciences, Department of Applied Mathematics, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran; rghanbari@um.ac.ir

[3]Mosaheb Institute of Mathematics, Kharazmi University, Tehran, Iran; khatere.moghadam67@gmail.com

* Corresponding author: Sedigheh Sadeghi

ABSTRACT

Production planning is used to have efficient, effective and economical operation in a manufacturing. In many models that developed in the literature of the production planning, the main task is reducing costs. Here, a new model has been developed for assigning permanent and temporary workers with different skill levels to the workstations. Moreover, we consider the training time to increase their skill levels. Due to number of variables and constraints, the run time is too long and CPLEX cannot reach the optimum value for real-world problems. Therefore, we propose a parallel VNS algorithm to decrease the computation time for real problems.

Keywords: Production planning, Temporary workers, Parallel VNS algorithm.

۱- مقدمه

امروزه با توجه به رقابتی شدن شرایط بازار، سازمان‌ها برای حفظ و بقا، به دنبال افزایش کارایی و بهینه‌سازی عملیات تولیدی خود هستند. از این رو، باید عوامل متفاوتی را در بحث بهینه‌سازی برنامه تولید مد نظر قرار دهند. عواملی نظیر نیروی انسانی، ماشین آلات و تجهیزات لازم، مقادیر موجودی مواد اولیه، قطعات و...، بستگی به مقادیر تولید محصول در این کارخانه دارد. مسأله برنامه‌ریزی نیروی کار که زیرشاخه‌ایی از برنامه‌ریزی تولید است، به دلیل تخصیص منابع در هر دوره زمانی با توجه به محدودیت‌ها و نیازهای سیستم و با هدف کمینه کردن هزینه‌ها، از اهمیت بالایی برخوردار است. فرآیند برنامه‌ریزی تولید از پیش‌بینی و دریافت سفارشات مشتری شروع شده، چگونگی برآورد تقاضا، برنامه‌ریزی مواد مورد نیاز و برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت، مراحل بعدی تولید یک محصول محسوب می‌شوند. تعیین برنامه تولید در هر سازمان تولیدی نقش مهم و موثری دارد. زیرا زمان‌بندی تولید باعث جلوگیری از انباشت سرمایه، کاهش ضایعات، کاهش و یا حذف بیکاری ماشین آلات و تلاش برای استفاده بهتر از آنها، پاسخگوئی به موقع به سفارش‌های مشتریان و تامین مواد اولیه و قطعات مورد نیاز در موقع مناسب می‌شود. برنامه‌ریزی تولید برای موفقیت یک شرکت بسیار مهم است. این برنامه‌ها با تولید محصولات به تعداد کافی و در زمان مناسب، باعث کاهش زمان تولید و هزینه‌های آن می‌شوند. در برنامه‌ریزی تولید میزان محصولاتی که برای پاسخگویی به تقاضا در دوره بعد نیاز است، مشخص می‌شود. همچنین میزان موجودی و تعداد نیروی کاری و سایر منابعی که مورد نیاز است، نیز تعیین می‌شود. تصمیم‌گیری در سیستم برنامه‌ریزی تولید با توجه به نوع فعالیت تغییر می‌کند. اگر در برنامه ریزی تولید مسئله موجودی خالص مطرح باشد، مسائل عمده تصمیم گیری محدود می‌شود به این که چه اقلامی باید سفارش شود، چه زمانی سفارش داده شود، چه مقدار سفارش شود و از کجا این سفارش تامین گردد. در تولید مسائل مطرح شده عبارتند از این که چه اقلامی ساخته شود، چه تعداد و چه وقت این تولید انجام پذیرد، و روش تولید برای این اقلام چیست. لذا ملاحظه می‌شود که در حیطه فعالیت‌های مختلف، مسائل تصمیم‌گیری متفاوت لازم است [۲].

برنامه‌ریزی نیروی کار در سازمان فرآیندی است که به وسیله آن، سازمان معین می‌کند که برای رسیدن به اهداف خود به چه تعداد کارمند با چه تخصص و مهارت‌هایی، برای چه مشاغلی و در چه زمانی نیاز دارد. طیف وسیعی از مسائل مربوط به برنامه‌ریزی کارمندان و کارگران کارخانجات و شرکت‌های خدماتی به برنامه‌ریزی نیروی انسانی اختصاص دارد. هدف از این کار، استفاده از حداقل نیروی کاری مورد نیاز به منظور کامل‌کردن اهداف تولیدی از پیش تعیین‌شده است. عواملی هم‌چون ایام تعطیل، نوع تخصص، استخدام و اخراج کارگران موقت، گردش شغلی، درجه مهارت، سطح تجربه کارکنان یا تمایل آن‌ها برای خدمت در یک شیفت خاص نقش موثری در زمان‌بندی نیروی انسانی ایفا می‌کنند. بنابراین، ارائه مدلی جامع و کارآمد که بتواند همه مولفه‌های برنامه‌ریزی نیروی انسانی را به طور هماهنگ پوشش دهد، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. بروکر[1] وهمکاران [۴] موارد استخدام و اخراج کارگران موقت، آموزش، یادگیری و فراموشی، استعفای داوطلبانه نیروی کار و استخدام داوطلبان نیروی کار را برای انعطاف‌پذیری نیروی کار بیان می‌کنند. برنامه‌ریزی نیروی انسانی با تخمین تعداد و نوع کارکنان مورد نیاز برای جذب، گزینش و آموزش باعث می‌شود تا افراد در زمان مناسب به سازمان اضافه شوند. از جمله راهکارهای ارائه شده در این مبحث، آموزش نیروی انسانی است که در آن، مهارت‌های مورد نیاز برای تولید محصولات مختلف در هر یک از خطوط تولید به کارگران آموزش داده می‌شود. آموزش نیروی انسانی سبب می‌شود تا کارگران بتوانند به راحتی بین ایستگاه‌های کاری مختلف جابه‌جا شوند و انعطاف‌پذیری سیستم تولید را افزایش دهند. استفاده از نیروی کاری چندمهارته عامل دیگری برای افزایش بهره‌وری یک سیستم تولیدی است. بدیهی است در کارخانه‌ای که از نیروی کاری چندمهارته استفاده می‌کند، تعداد کارگران کمتری در فعالیت هستند. زیرا کارگرانی که فقط قادر به انجام فعالیت در یک ایستگاه کاری هستند، ممکن است یک فاصله زمانی را منتظر بماند. در صورتی که یک نیروی کاری چندمهارته که دانش و مهارت‌هایی در بیشتر از یک ایستگاه کاری دارد، به جای انتظار برای کار تخصصی مربوطه می‌تواند در ایستگاه‌های کاری دیگر مشغول به کار شود. این امر موجب کاهش ساعات بیکاری و به تبع آن باعث کاهش هزینه‌ها خواهد شد. افشار نجفی [۸] در مقاله مروری که در مورد برنامه‌ریزی نیروی کار چندمهارته است، اشاره می‌کند علی‌رغم تحقیقات زیاد در این حوزه، مقالات کمی به معایب نیروی کار چندمهارته پرداخته‌اند. از جمله این معایب هزینه آموزش است که در این پژوهش به آن پرداخته‌شده‌است. در این مقاله مدلی جدید برای تخصیص کارگران به ایستگاه‌های کاری ارائه می‌دهد و سطح مهارت و آموزش مورد نیاز کارگران برای پاسخگویی به تقاضا را مشخص می‌کند. تعداد کارگران دائم و موقت در هر ایستگاه کاری نیز مشخص می‌شود. وضعیت استخدام و اخراج کارگران در

[1] Bruecker

هر دوره بررسی می‌شود. ساعات موظفی و اضافه‌کاری از دیگر مواردی است که این مدل، مقادیر عددی آن را تعیین می‌کند. تابع هدف مدل به مینیمم‌سازی هزینه‌هایی شامل میانگین درآمد کارگران دائم و موقت، اضافه‌کاری، استخدام و اخراج کارگران موقت، نگهداری موجودی، سفارشات عقب افتاده و هزینه آموزش می‌پردازد. اهداف این مقاله، ارائه مدل جدید برنامه‌ریزی نیروی انسانی و بهبود فرآیند برنامه‌ریزی تولید، ارائه الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر برای حل مسأله و موازی‌سازی الگوریتم فوق به کمک کتابخانه MPI، به منظور کاهش زمان محاسبات و افزایش کیفیت جواب.

۲- ارائه مدلی جدید برای مسأله زمان‌بندی اصلی تولید با کارگران دائم و موقت چندمهارته

در این پژوهش، مسأله زمان‌بندی اصلی تولید به صورت یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح مختلط مدل‌سازی می‌شود که هدف آن کمینه‌سازی هزینه کل تولید با توجه به محدودیت‌های مختلف است. تکاوبین وانگ و همکاران در مدل‌سازی مسأله زمان‌بندی اصلی تولید، هزینه‌های استخدام، اخراج، اضافه‌کاری، سفارش عقب افتاده و انبارداری را کمینه می‌کنند. در مدل پیشنهادی این پژوهش، افزون بر موارد فوق، کمینه‌سازی هزینه آموزش کارگران چندمهارته نیز در نظر گرفته شده است. تخصیص کارگران به ایستگاه‌های کاری، چندمهارته شدن کارگران، در نظر گرفتن سطح مهارت و آموزش کارگران کمک می‌کنند تا مدل جدید زیر را ارائه کنیم [۵].

۲-۱ فرضیات مدل

فرضیات مدل پیشنهادی به صورت زیر است:

- این مدل دارای کارگران چندمهارته با سطح مهارت‌های مختلف است.
- هر ایستگاه کاری متناظر با یک مهارت است.
- فقط کارگران موقت می‌توانند استخدام و یا اخراج شوند. استخدام و اخراج کارگران در ابتدای هر دوره انجام می‌شود.
- فقط کارگران دائم می‌توانند برای بالا بردن سطح مهارت‌شان آموزش ببینند.
- هر ایستگاه کاری باید مینیمم نسبتی از کارگران خود را از میان کارگران دائم انتخاب کند.
- تعداد ساعات اضافه‌کاری برای هر کارگر محدود است.
- ظرفیت تولید هر ایستگاه کاری با افزایش تعداد کارگران، افزایش می‌یابد.
- زمان پردازش هر واحد محصول روی هر ایستگاه کاری مشخص است.
- هر ایستگاه کاری مینیمم سطح مهارتی را می‌طلبد. در صورتی که کارگران فاقد این سطح مهارت باشند، به این ایستگاه کاری تخصیص داده نمی‌شوند.
- هر کارگر در هر دوره تنها در یک ایستگاه کاری می‌تواند کار کند.
- کارگران با سطح مهارت بالاتر حقوق بیشتری دریافت می‌کنند.

مدل پیشنهادی ما در [۱] وجود دارد.

۳- الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر موازی

روش‌ها و الگوریتم‌های بهینه‌سازی به دو دسته الگوریتم‌های دقیق و الگوریتم های تقریبی تقسیم‌بندی می‌شوند. الگوریتم‌های دقیق قادر به یافتن جواب بهینه به صورت دقیق هستند اما در مورد مسائل بهینه‌سازی سخت کارایی کافی ندارند و زمان اجرای آن‌ها متناسب با ابعاد مسائل به صورت نمایی افزایش می‌یابد. الگوریتم‌های تقریبی قادر به یافتن جواب‌های خوب (نزدیک به بهینه و یا حتی بهینه ولی بدون تضمین بهینگی) در زمان حل کوتاه برای مسائل بهینه‌سازی سخت هستند. الگوریتم‌های تقریبی نیز به دو دسته الگوریتم‌های ابتکاری و فرابتکاری و فرابتکار بخش‌بندی می‌شوند. دو مشکل اصلی الگوریتم‌های ابتکاری گیر افتادن آن‌ها در نقاط بهینه محلی و همگرایی زودرس به این نقاط است. الگوریتم‌های فرابتکاری برای حل این مشکلات الگوریتم‌های ابتکاری ارائه شده‌اند. در واقع الگوریتم‌های فرابتکاری یکی

از انواع الگوریتم‌های بهینه‌سازی تقریبی هستند که دارای راهکارهای برون‌رفت از نقاط بهینه محلی هستند و قابلیت کاربرد در طیف گسترده‌ای از مسائل را دارند [۳]. رده‌های گوناگونی از این نوع الگوریتم در دهه‌های اخیر توسعه یافته است. الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر یکی از روش‌های فراابتکاری ساده و موثر است که در بسیاری از مسائل بهینه‌سازی ترکیبیاتی به کار می‌رود. در این فصل به ارائه یک الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر برای مسأله‌ای که در فصل دو بیان شد، می‌پردازیم. با توجه به این که پردازش موازی باعث افزایش کیفیت جواب می‌شود، روش‌های موازی‌سازی برای این الگوریتم را بررسی کرده و یکی از این روش‌ها را برای مسأله مذکور به کار می‌بریم.

۳-۱-۱- الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر

جستجوی محلی یک الگوریتم ابتکاری است. در این روش جستجو در آغاز یک جواب ابتدایی در نظر گرفته می‌شود. سپس با اعمال اصلاحات محلی متوالی تلاش می‌شود تابع هدف را تا رسیدن به بهینه محلی بهبود بخشد. در سال‌های اخیر، الگوریتم‌های فراابتکاری زیادی ارائه شدند که هر کدام به نوعی توسعه یافته جستجوی محلی هستند. یکی از این الگوریتم‌های فراابتکاری جستجوی همسایگی متغیر است که به اختصار VNS[2] نامیده می‌شود. جستجوی همسایگی متغیر یکی از پرکاربردترین الگوریتم‌های فراابتکاری در حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبیاتی است. این الگوریتم توسط هنسن[3] و ملادنویچ[4] [۶] در سال ۱۹۹۷ ارائه شد. ایده اصلی این الگوریتم فراابتکاری، تغییر همسایگی در طول جستجو است. بر خلاف سایر الگوریتم‌های فراابتکاری توسعه یافته از جستجوی محلی، جستجوی همسایگی متغیر مسیر منحنی‌واری را طی نمی‌کند، بلکه دائماً همسایگی بزرگتری را جستجو می‌کند. اگر در طی این جستجو جواب بهتری بیابد، جستجو حول جواب جدید از ابتدا آغاز می‌شود. در جستجوی همسایگی متغیر سه قانون زیر برقرار است:

(۱) ممکن است یک کمینه محلی برای یک همسایگی برای همسایگی دیگر کمینه نباشد.

(۲) کمینه عمومی نسبت به تمام همسایگی‌ها کمینه محلی نیز است.

(۳) در بسیاری از مسائل کمینه محلی در یک یا چند همسایگی نسبتاً به هم نزدیک هستند.

شبه کد الگوریتم VNS اصلی در [۶] آمده است.

در این بخش به معرفی پارامترهای الگوریتم VNS برای مدل ارائه شده در فصل قبل می‌پردازیم.

۳-۱-۲-ساختن یک جواب شدنی

الگوریتم ساخت یک جواب شدنی به این صورت است که ابتدا تعداد کارگرانی که سطح مهارت لازم در هر ایستگاه کاری را دارند، شمرده می‌شوند و تخصیص به ایستگاه‌های کاری را از ایستگاهی شروع می‌کنیم که به ترتیب کمترین تعداد نیروی کاری را در آن ایستگاه داشته‌ایم. با توجه به اینکه کارگران دائمی را نمی‌توانیم اخراج کنیم، ابتدا کارگران دائمی را به ایستگاه‌های کاری اختصاص می‌دهیم. در صورت لزوم از ساعات اضافه‌کاری کارگران دائمی استفاده می‌کنیم. در صورت کمبود نیروی دائمی، کارگران موقت را استخدام می‌کنیم. به الگوریتم ۱ نگاه کنید.

الگوریتم ۱ ساخت جواب شدنی

۱: تعداد کل کارگران، تعداد کارگران دائمی، ساعات موظفی و ساعات اضافه‌کاری را دریافت کنید.

۲: تعداد کارگرانی که سطح مهارت لازم در هر ایستگاه کاری را دارند محاسبه کنید.

۳: حلقه زیر را برای هر دوره زمانی تکرار کنید.

۳-۱ حلقه زیر را برای هر ایستگاه کاری تکرار کنید.

۳-۱-۱ از ایستگاه کاری که کمترین تعداد نیروی متخصص را دارد شروع کنید و آن را j بنامید. تعداد ساعات کاری لازم برای این ایستگاه را محاسبه کنید و H بنامید.

۳-۱-۲ قرار دهید $i \leftarrow ۱$

۳-۱-۳ تا زمانی که $H > ۰$ و i در مجموعه اندیس کارگران دائم قرار دارد، مراحل زیر را تکرار کنید.

[2] Variable Neighborhood Search
[3] Hansen
[4] Mladenovic

آ. اگر کارگر دائم i سطح مهارت لازم در ایستگاه کاری j را دارد، تخصیص را انجام دهید و قرار دهید

۴۰. $H \leftarrow H - 40$

ب. $i \leftarrow i + 1$

۳-۱-۴ قرار دهید $i = 1$

۳-۱-۵ تا زمانی که $H > 0$ و i در مجموعه اندیس کارگران دائم قرار دارد، مراحل زیر را تکرار کنید.

آ. اگر کارگر دائم i سطح مهارت لازم در ایستگاه کاری j را دارد، تخصیص را انجام دهید و قرار دهید

۱۰. $O \leftarrow O - 10$

ب. $i \leftarrow i + 1$

۳-۱-۶ قرار دهید $i \leftarrow \text{per workers} + 1$

۳-۱-۷ تا زمانی که $H > 0$ و i در مجموعه اندیس کارگران موقت قرار دارد، مراحل زیر را تکرار کنید.

آ. اگر کارگر موقت i سطح مهارت لازم در ایستگاه کاری j را دارد، تخصیص را انجام دهید و قرار دهید

۴۰. $H \leftarrow H - 40$

ب. $i \leftarrow i + 1$

۳-۱-۸ قرار دهید $i \leftarrow \text{per workers} + 1$

۳-۱-۹ تا زمانی که $H > 0$ و i در مجموعه اندیس کارگران موقت قرار دارد، مراحل زیر را تکرار کنید.

آ. اگر کارگر موقت i سطح مهارت لازم در ایستگاه کاری j را دارد، تخصیص را انجام دهید و قرار دهید

۱۰. $O \leftarrow O - 10$

ب. $i \leftarrow i + 1$

ج. اگر شرط توقف برقرار است از حلقه خارج شوید. در غیر اینصورت چاپ کنید جواب نشدنی است.

۴-روش‌های موازی‌سازی الگوریتم VNS

نویسندگان [۷] جز اولین نفراتی بودند که الگوریتم VNS را به صورت موازی پیاده‌سازی کردند. آن‌ها سه روش موازی‌سازی برای الگوریتم VNS ارائه کردند و به پیاده‌سازی این سه روش بر روی مسأله p-میانه پرداختند. اولین روش آن‌ها موازی سازی جستجوی محلی بود. دومین روش اجرای همزمان چند VNS به طور مستقل است، که در آن بهترین جواب هر VNS در انتهای برنامه ازپردازنده‌ها جمع‌آوری می‌شود. سومین روش، اجرای سری یک VNS است، که در آن گام‌های اصلی الگوریتم (لرزاندن و جستجوی محلی) به صورت موازی اجرا می‌شوند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهند که دو روش آخر معمولاً جواب‌های بهتری به دست می‌دهند. در این روش، تولید جواب‌ها در الگوریتم جستجوی محلی برای مقایسه با بهترین جواب، توسط پردازنده‌های مختلف انجام می‌شود.

۱-در این روش، تولید جواب‌ها در الگوریتم جستجوی محلی برای مقایسه با بهترین جواب، توسط پردازنده‌های مختلف انجام می‌شود.

۲-ایده اصلی در این روش، پیدا کردن همسایگی‌های مختلف به صورت موازی است که در آن گام‌های اصلی الگوریتم (SH+LS)، توسط پردازنده‌های مختلف اجرا می‌شوند. ذخیره بهترین جواب و اجرای بقیه مراحل الگوریتم توسط پردازنده اصلی انجام می‌شود. به طور دقیق‌تر پردازنده اصلی و پردازنده‌های کارگر به ترتیب الگوریتم‌های ۲و ۳ را اجرا می‌کنند.

۳-با تغییر پارامترهای VNS مانند: تعداد همسایگی‌ها، لرزاندن، جستجوی محلی و...،VNS های متفاوتی تولید می‌شوند که می‌توان آن‌ها

را روی پردازنده‌های مختلف اجرا کرد. در این روش هیچ ارتباطی بین پردازنده‌ها صورت نمی‌گیرد تا زمانی که شرط توقف برای تمام پردازنده‌ها برقرار شود. سپس جواب‌های به دست آمده جمع‌آوری می‌شوند و بهترین جواب انتخاب می‌شود. اجرای مستقل چند VNS روی پردازنده‌های مختلف را جستجوی همسایگی متغیر مشارکتی می‌نامند.

الگوریتم ۲ پردازنده اصلی

۱: جواب اولیه را تولید کنید.

۲: جواب اولیه را به کمک جستجوی محلی بهبود دهید و به عنوان جواب جاری بهینه قرار دهید.

۳: جواب جاری بهینه و اندیس متناظر با همسایگی را به تمام پردازنده‌های کارگر بفرستید.

۴: حلقه تکرار زیر را اجرا کنید.

آ. جواب x' را از پردازنده کارگر دریافت کنید.

ب. اگر بهینه محلی x'' از x بهتر بود، حرکت کنید ($x \leftarrow x''$) و جستجو را با N_1 ($k \leftarrow 1$) ادامه دهید، در غیر اینصورت $k \leftarrow k+1$

ج. اگر شرط توقف برقرار است، پیام توقف را به همه پردازنده‌ها ارسال کنید و از حلقه خارج شوید. در غیر اینصورت x_{best} و همسایگی k را به پردازنده کارگر ارسال کنید.

۵: زمان اندازه‌گیری شده توسط هر پردازنده کارگر را جمع‌آوری و در خروجی چاپ کنید.

الگوریتم ۳ پردازنده کارگر

۱: x_{best} و k را از پردازنده اصلی دریافت کنید.

۲: حلقه تکرار زیر را اجرا کنید.

آ. جواب x_{best} در $k-$امین همسایگی را با لرزاندن تغییر دهید تا جواب جدید x' به دست آید.

ب. بهینه محلی را برای جواب x' به کار ببرید تا جواب x'' به دست آید.

ج. x'' را به پردازنده اصلی ارسال کنید.

د. یک پیام از پردازنده اصلی دریافت کنید.

ه. اگر شرط توقف برقرار است از حلقه خارج شوید. در غیر اینصورت x_{best} و k را بخوانید.

۳: زمان اندازه‌گیری شده را به پردازنده اصلی ارسال کنید.

۴-۱- نتایج عددی:

خروجی حاصل از اجرای مدل توسط OPL شامل تخصیص کارگران به ایستگاه‌های کاری، تعداد محصولات تولیدی در هر دوره، میزان سفارشات عقب افتاده و موجودی انبار است. مسأله‌ای که توسط الگوریتم حل می‌شود، به این صورت است که افزون بر پارامترهای مسأله، میزان محصولات تولیدی، سفارشات عقب افتاده و موجودی را که به کمک OPL به دست آورده‌ایم، به عنوان ورودی دریافت کرده و تخصیص کارگران به ایستگاه‌های کاری را انجام می‌دهد. مقایسه نتایج حاصل را به کمک سه نمونه ۴۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ تایی کارگران بررسی کردیم. نرم‌افزار OPL قادر به حل بهینه مسأله نمی‌باشد و پس از مدتی پیغام کمبود حافظه می‌دهد. الگوریتم VNS در نمونه ۴۰ تایی با وجود حل سریع مسأله، در به دست آوردن جوابی نزدیک به جواب بهینه موثر نیست. اما در نمونه ۱۰۰ و ۱۵۰ تایی در مدت زمان کم به جوابی نزدیک به جواب OPL می‌رسد. نمونه ۲۰۰ تایی نیز برای این مسأله در نظر گرفته شد که در آن OPL به جواب شدنی نرسید.

همان‌طوردر جدول زیر ملاحظه می‌کنید، با افزایش تعداد پردازنده‌ها، کیفیت جواب افزایش پیدا می‌کند و به جواب بهینه نزدیک‌تر می‌شود. همچنین می‌توان با تغییر پارامترهای الگوریتم جستجوی محلی و افزایش تعداد تکرارهای حلقه به جواب بهتری رسید، اما با افزایش زمان اجرای الگوریتم نیز روبرو می‌شویم. بنابراین متناسب با اولویت کاربر در خصوص سرعت حل مسأله و یا افزایش کیفیت جواب، می‌توان پارامترهای الگوریتم را تغییر داد.

نتایج حاصل از پیاده‌سازی الگوریتم موازی VNS

تعداد پردازنده	۴۰		۱۰۰		۱۵۰	
	مقدار جواب	زمان	مقدار جواب	زمان	مقدار جواب	زمان
VNS(1)	۱۱۵,۹۴۲	۵/۶۵s	۳۱۰,۹۸۰	۵/۶۵	۳۹۹,۸۶۸	۵/۷۸s
VNS(2)	۱۱۵,۸۴۲	۴/۹۵s	۳۰۷,۶۸۰	۱۰/۱۲	۳۹۶,۸۶۸	۸/۶۱s
VNS(4)	۱۱۵,۳۴۲	۹/۰۶s	۳۰۱,۸۰۰	۱۰.۶۳	۳۹۶,۷۶۸	۱۱s
VNS(8)	۱۱۴,۳۸۲	۵۲/۰۸s	۳۰۱,۴۳۰	۸۸/۲۴s	۳۹۳,۶۱۸	۱۲۶s

۴- نتیجه و جمع بندی

در این مقاله، یک مدل جدید برای اختصاص کارگران دائم و موقت با سطوح مختلف مهارت به ایستگاه‌های کاری توسعه یافته، بیان کردیم. افزون بر این، زمان آموزش را به منظور افزایش سطح مهارت در نظر گرفتیم. با توجه به تعداد متغیرها و محدودیت‌ها، زمان اجرا بیش از حد طولانی است و CPLEX نمی‌تواند به مقدار بهینه برای مسائل واقعی برسد. بنابراین ما یک الگوریتم VNSموازی به منظور کاهش زمان محاسبات برای مسائل واقعی پیشنهاد دادیم.

تقدیر و تشکر

نویسنده اول و دوم از دانشکده علوم ریاضی و آزمایشگاه بهینه‌سازی دانشگاه فردوسی مشهد و نویسنده سوم از موسسه تحقیقات ریاضی دکتر غلامحسین مصاحب دانشگاه خوارزمی به خاطر حمایت از این کار تشکر و قدردانی می‌نمایند.

مراجع

[1] ص. صادقی، ارایه یک الگوریتم فراابتکاری موازی برای مساله زمان‌بندی اصلی تولید. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم ریاضی دانشگاه فردوسی مشهد، زمستان ۱۳۹۵.

[2] م .ت. فاطمی قمی، برنامه‌ریزی و کنترل تولید و موجودی‌ها، انتشارات امیر کبیر، ۱۳۸۹.

[3] م. یقینی و م. ر. کاظمی اخوان، الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری، جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیر کبیر.

[4] P. De Bruecker, J. Van den Bergh, J. Beliën, and E. Demeulemeester, Workforce planning incorporating skills: State of the art. European Journal of Operational Research 243, 1 (2015), 1–16.

[5] A. Techawiboonwong, P. Yenradee, and S. K. Das, A master scheduling model with skilled and unskilled temporary workers. International Journal of Production Economics 103, 2 (2006), 798–809.

[6] N. Mladenovic and P. Hansen, Variable neighborhood search. Computers and Operations Research, 24 (1997), 1097-1100.

[7] F. García-López, B. Melián-Batista, J. A. Moreno-Pérez, and J. M. Moreno-Vega, The parallel variable neighborhood search for the p-median problem. Journal of Heuristics 8, 3 (2002), 375–388.

[8] B. Afshar-Nadjafi, Multi-skilling in scheduling problems: A review on models, methods and applications. Computers & Industrial Engineering 151 (2021): 107004.