

Vertical Balancing in Multi-sided Assembly Lines Using Simulated Annealing Algorithm

Khodakaram Salimifard^{1*}, Rahim Ghasemiyeh², Smaeel Pasban³

¹ Assistant Professor of Management Science, Department of Industrial Management, Persian Gulf University of Bushehr, Iran

² Assistant Professor of Production Management, Department of Industrial Management, Persian Gulf University of Bushehr, Iran

³ MSc in Industrial Management, Department of Industrial Management, Persian Gulf University of Bushehr, Iran

Abstract:

Multi-sided assembly line is a typical production line in factories, where tasks are performed parallel in different sides of the assembly line. This type of line is normally found in producing large products such as cars. It is very important for the production line to be balanced in order to improve the production productivity. This paper presents a new approach based on simulated annealing algorithm to vertical balancing of multi-sided assembly lines. Zoning constraints, cycle time, working time and precedence relationships are considered as hard constraints while positional constraints are considered as soft constraints. To show the applicability of the proposed approach, it is applied on a real sample assembly line. In order to find the most suitable values for the parameters of the algorithm, different scenarios have been run on the sample assembly line. Findings indicate that the proposed approach is highly capable to achieve the predetermined goals of the line balancing problem.

Keywords: Cycle time; Multi-sided assembly line; Simulated annealing algorithm; Smoothing station loads; Soft constraint; Vertical assembly line balancing

بالانس عمودی خطوط مونتاژ چندسویه با الگوریتم شبیه‌سازی تبرید

خداکرم سلیمی فرد^{۱*}، رحیم قاسمیه^۲، اسماعیل پاسبان^۳

۱- استادیار گروه مدیریت صنعتی، دانشگاه خلیج فارس- بوشهر- ایران

۲- استادیار گروه مدیریت صنعتی، دانشگاه خلیج فارس- بوشهر- ایران

۳- کارشناس ارشد مدیریت صنعتی، دانشگاه خلیج فارس- بوشهر- ایران

چکیده: خط مونتاژ چندسویه یک خط تولید معمول در کارخانه‌هایی است که وظیفه‌ها به صورت موازی در چند سوی خط انجام می‌شوند. این نوع خط در تولید کالاهای بزرگ مانند خودرو به کار می‌رود. متوازن بودن خط، برای بهبود بهره‌وری در خط مونتاژ دوسویه بسیار مهم است. این مقاله رویکردی نوین براساس الگوریتم شبیه‌سازی تبرید برای متوازن‌سازی خط مونتاژ چندسویه ارائه می‌دهد. محدودیت‌های ناحیه‌ای، زمان چرخه، زمان کاری و رابطه‌های پیش‌نیازی به‌عنوان محدودیت‌های سخت و محدودیت‌های وضعیتی به‌عنوان محدودیت نرم در نظر گرفته شده‌اند. برای نشان‌دادن توانایی کاربرد، رویکرد پیشنهادی بر یک خط مونتاژ واقعی نمونه به کار برده شده است. برای یافتن مقدار مناسب پارامترهای الگوریتم، سناریوهای گوناگونی بر خط مونتاژ نمونه اجرا شد. یافته‌ها نشان می‌دهد که رویکرد پیشنهادی در دستیابی به هدف‌های از پیش تعیین‌شده مسئله بالانس خط، توانمند است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، بالانس عمودی خط مونتاژ، خط مونتاژ چندسویه، زمان چرخه، محدودیت نرم، همبارسازی ایستگاه‌ها.

۱- مقدمه

یک خط تولید (مونتاژ)، چینش منظمی از ایستگاه‌های کاری است که به صورت پیاپی و منظم در کنار هم چیدمان شده‌اند و مواد (کالا) به شیوهٔ یکنواخت و از یک مسیر منطقی در آن ایستگاه‌ها جریان دارند (مرعشی، ۱۳۸۵)؛ به دیگر سخن، در یک سیستم تولیدی، خط مونتاژ بر جریان مواد استوار است و در آن قطعات کاری هنگامی که با نوعی سیستم حمل‌ونقل مانند نوار نقاله در امتداد خط مونتاژ حرکت می‌کنند، از ایستگاه‌های کاری دیدار می‌کنند (بویسن و همکاران^۱، ۲۰۰۷). در هر ایستگاه کاری و براساس زمان چرخه^۲ (بیشترین زمان در دسترس در هر چرخهٔ کاری)، بارها و بارها عملیات خاصی بر قطعات مختلف انجام می‌گیرد (شول و بویسن^۳، ۲۰۰۹) و هنگام خروج از ایستگاه نهایی، محصول کامل است. معمولاً برای ساده سازی موضوع، زمان فعالیت‌ها (عناصر کاری) قطعی در نظر گرفته می‌شود. مرعشی (۱۳۸۵) سه اصل مهم از اصول مرتبط با خط تولید را موارد زیر می‌داند: ۱. اصل جریان ثابت (بدین معنی که مواد باید به صورت پیوسته و با نرخ ثابت جریان داشته باشند)؛ ۲. اصل تقسیم کار میان کارکنان خط (گردش و تقسیم کار میان افراد) و ۳. اصل هم‌زمانی عملیات (در یک خط تولید، در ابتدا، انتها و تمام نقاط خط، همه باید مشغول به کار باشند). برای افزایش کارایی، افزایش سرعت، کاهش هزینهٔ هر واحد کالا و نیز آسانی ساخت و کنترل سیستم‌های تولید انبوه، خطوط مونتاژ به گونه‌ای گسترده در این سیستم‌ها به کار برده می‌شود (کلینکسی و بیجان^۴، ۲۰۰۶).

در همهٔ انواع خطوط مونتاژ، چگونگی تخصیص کارها به ایستگاه‌های کاری، پرسش یکسانی است که

باید پاسخ داده شود. این پرسش در واقع، مسئلهٔ بالانس خط نامیده می‌شود. مسئلهٔ بالانس خط، سازماندهی فعالیت‌های مونتاژی و تولیدی انفرادی در ایستگاه‌های کاری، به گونه‌ای است که زمان کل موردنیاز در همهٔ ایستگاه‌ها تقریباً یکسان باشد. اگر عناصر کاری به گونه‌ای گروه‌بندی شوند که همهٔ زمان‌های ایستگاهی کاملاً برابر شوند، آنگاه خط دارای بالانس کامل (بی نقص) است و جریان تولید یکنواخت خواهد بود. البته، در دنیای واقعی دستیابی به بالانس بی نقص بسیار سخت است. هنگامی که زمان‌های ایستگاه‌های کاری نابرابر است، کندترین ایستگاه نرخ تولید کل خط را تعیین می‌کند (کلینکسی و بیجان، ۲۰۰۶). در ارتباط با ضرورت حل مسئلهٔ بالانس خط مونتاژ می‌توان عنوان کرد که چینش یک خط مونتاژ، یک تصمیم بلندمدت و معمولاً نیازمند سرمایه‌گذاری شگرف است؛ بنابراین، مهم است که چنین سیستمی به گونه‌ای طراحی و بالانس شود که تا حد ممکن کارا عمل کند؛ افزون بر این، برای بالانس کردن یک سیستم جدید، این سیستم باید به طور دوره‌ای یا پس از تغییر در فرایند تولید یا تغییر در برنامه تولید، از نو باید بالانس شود (بکر و شول^۵، ۲۰۰۶)؛ همچنین، بالانس صحیح خط مونتاژ استفاده بهتر از تسهیلات و تولید شمار کافی محصول را برای برآوردن سفارش مشتری برای شرکت ممکن می‌سازد. از آنجا که این مسئله از نوع مسائل بهینه‌سازی ترکیبی NP-hard است، استفاده از روش‌ها و الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری برای حل آن اجتناب‌ناپذیر است (سیواسنکاران و شهاب‌الدین^۶، ۲۰۱۴).

صنعت خودرو به عنوان صنعتی پراشتغال که سهم شگرفی از میزان سرمایه‌گذاری داخلی را به خود اختصاص می‌دهد، یکی از مهم‌ترین صنایع در کشور

دارد. در این نوع خط، شمار کارگرانی که می‌توانند به هر ایستگاه اختصاص داده شوند به حداکثر تراکم موجه کارگران محدود می‌شود. این تراکم از پیش توسط طراح سیستم و با توجه به اندازه محصول، در دسترس‌پذیری ابزارها، طراحی ایستگاه‌کاری و غیره تعیین می‌شود. این نوع از مسائل بالانس، به‌عنوان نمونه، در صنایعی با محصولات بزرگ و حجم زیاد تولید مانند صنعت خودروسازی رخ می‌دهد که در آنها اندازه محصول به‌منظور استفاده از پیکربندی خط مونتاژ با ایستگاه‌های چنداُپراتوره، به اندازه کافی بزرگ است (فتاحی و همکاران^{۱۰}؛ ۲۰۱۱). خط مونتاژ با ایستگاه‌های چنداُپراتوره نسبت به خط مونتاژ ساده مزایای شگرفی مانند کاهش طول خط مونتاژ، کاهش زمان تولید، کاهش هزینه ابزار و تجهیزات، کاهش در حمل مواد، کاستن از جابه‌جایی کارگران، و کاستن از هزینه راه‌اندازی دارد. این مزایا استفاده از این نوع خط مونتاژ در تولید محصولات بزرگ را توجیه می‌کند. خطوط مونتاژ چندسویه نوع خاصی از خطوط مونتاژ با ایستگاه‌های چنداُپراتوره هستند که در آنها محدودیت‌های وضعیتی علاوه بر محدودیت‌های پایه‌ای مسئله بالانس خط مونتاژ در نظر گرفته شده است (روشنی و روشنی، ۱۳۸۹). در این پژوهش یک راه‌کار تحقیق در عملیاتی برای مسئله همبارسازی ایستگاه‌های خط مونتاژ چندسویه ارائه می‌شود. حل این‌گونه مسائل، در پی دستیابی به توزیع متوازن بارکاری در طول خط تولید است. در اصطلاح به این‌گونه مسائل، بالانس عمودی نیز می‌گویند (بکر و شول، ۲۰۰۶). برای این کار، یک رویکرد حل با استفاده از الگوریتم فراابتکاری شبیه‌سازی تبرید پیشنهاد شده است.

به شمار می‌رود. در این صنعت و بسیاری از صنایع تولیدی و مونتاژی دیگر، دستیابی به راه‌کاری برای بالانس‌سازی خط تولید یا مونتاژ از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در بسیاری از شرکت‌های داخلی، بالانس‌کردن خط به‌صورت آزمایش و خطا و دستی به‌وسیله متخصصان و مهندسان انجام می‌پذیرد که در بسیاری از موارد کند (زمانبر) است و توانایی تغییر سریع در برابر تغییرهای بازار و نرخ تقاضای مشتری را ندارد. از سوی دیگر، این عمل با خطاهای انسانی زیادی انجام می‌پذیرد؛ بنابراین، یافتن راه‌کاری برای سرعت‌دادن و خطای کمتر در بالانس خط، بایسته به نظر می‌رسد.

براساس دیدگاه بایبارز^۷ (۱۹۸۶)، مسائل بالانس خط مونتاژ می‌توانند به دو گروه کلی مسائل ساده (SALBP)^۸ و مسائل تعمیم یافته (GALBP)^۹ دسته‌بندی شوند. مسئله بالانس خط مونتاژ ساده فرضیات محدودکننده‌ای دارد؛ بنابراین با سیستم‌های مونتاژ دنیای واقعی بسیار متفاوت است. مسئله بالانس خط مونتاژ در شکل ساده و پایه‌ای خود، یک خط مونتاژ یک سویه به‌همراه دو محدودیت روابط پیش‌نیازی و زمان چرخه است (اوزبکیر و تاپکن^{۱۱}؛ ۲۰۱۱). مسائل تعمیم‌یافته، گسترش مسئله بالانس خط مونتاژ ساده و همراه با مشخصه‌های افزوده شده مختلفی مانند توابع هزینه، تولید مدل مختلط^{۱۲}، موازی‌سازی^{۱۳}، انتخاب تجهیزات، چیدمان خط U شکل و بسیاری دیگر است (جیو و تانگ، ۲۰۱۱) (فتاحی و همکاران، ۲۰۱۱). مسئله بالانس خطوط مونتاژ با ایستگاه‌های چنداُپراتوره^{۱۴} (MALBP)، نوع نوینی از مسائل بالانس خط مونتاژ تعمیم یافته است که در آن با توجه به ویژگی‌های محصول، امکان تخصیص بیش از یک اپراتور به هر ایستگاه وجود

وجود ایستگاه‌های کاری چندپراتوره، مسئله بالانس خط مونتاژ را پیچیده‌تر می‌کند. در واقع، در این حالت مسئله دارای دو جنبه است. هنگامی که زمان چرخه معلوم است، برای کمینه‌سازی شمار کل کارگران به‌کارگرفته‌شده، هم چگونگی تخصیص کارها و هم شمار کارگران در ایستگاه‌ها باید محاسبه شود (کیان و فان^{۱۶}، ۲۰۱۱). با وجود آنکه فراوانی به‌کارگیری سیستم‌های مونتاژی با ایستگاه‌های چندپراتوره در سیستم‌های تولیدی جهان زیاد است، در پژوهش‌های پیشین توجه کمی به حل مسئله بالانس این خطوط شده است. براساس آنچه نویسندگان این مقاله از پیشینه پژوهش یافته‌اند، نخستین بار دیمتریادیس^{۱۷} (۲۰۰۶) خطوط مونتاژ با ایستگاه‌های چندپراتوره را مورد توجه قرار داد. وی یک الگوریتم ابتکاری دومرحله‌ای را برای حل مسئله بالانس خطوط مونتاژی با ایستگاه‌های چندپراتوره با هدف کمینه‌سازی شمار ایستگاه‌های کاری با نگهداشت بهینگی شمار اپراتورها، ارائه کرده است (روشنی و روشنی، ۱۳۸۹). فتاحی و همکاران (۲۰۱۱) یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط ارائه و در آن دو هدف کمینه‌سازی شمار کل کارگران خط (به‌عنوان هدف نخست) و کمینه‌سازی شمار کل ایستگاه‌های کاری چندپراتوره (به‌عنوان هدف دوم) را مد نظر قرار دادند. همچنین، آنان برای حل این مسئله در مقیاس‌های متوسط و بزرگ، یک رویکرد بهینه‌سازی کولونی مورچگان ارائه دادند. کیان و فان (۲۰۱۱) نیز در پژوهش خود با تعمیم مسائل بالانس خط مونتاژ ساده به مسائل بالانس خط مونتاژ با ایستگاه‌های چندپراتوره و با ارائه یک الگوریتم ژنتیک آمیخته ابتکاری^{۱۸} سعی در کمینه‌سازی تعداد کل کارگران به‌کارگرفته‌شده کردند.

چانگ و چانگ^۹ (۲۰۱۰) مسئله بالانس خطوط مونتاژ مختلط با ایستگاه‌های چندپراتوره را بررسی کردند و یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح برای حل مسئله تولید هم‌زمان و با هدف تعیین شمار بهینه ایستگاه‌های کاری ارائه کردند. با کمک این مدل پیشنهادی و با استفاده از شبیه‌سازی، شمار ایستگاه‌های کاری و شمار کارگران هر یک از ایستگاه‌های چندپراتوره قابل تعیین است. سویکان و همکاران^{۱۰} (۲۰۰۹) یک مدل ریاضی برای ایجاد تیم‌های مونتاژی (ایستگاه‌های چندپراتوره) در خط مونتاژ مختلط و نیز بالانس آن و همچنین یک الگوریتم ابتکاری زمان‌بندی برای حل آن ارائه دادند. کلگوز و توکلو^{۱۱} (۲۰۱۲) در پژوهش خود، مسئله بالانس خطوط مونتاژ با ایستگاه‌های چندپراتوره را با هدف کمینه‌سازی شمار کل کارگران موردنیاز بررسی کردند. آنان برای حل این مسئله، یک الگوریتم شاخه و کران پیشنهادی ارائه کردند و آن را با الگوریتم دیگری که مبتنی بر الگوریتم شاخه و کران است، مقایسه کردند.

گاهی سازمان در پی تولید با کمیت بهینه با استفاده از شمار ثابتی از ایستگاه‌های کاری چندپراتوره و بدون افزودن امکانات جدید است. در این مواقع مسئله موردنظر با هدف به‌حداقل‌رساندن زمان چرخه برای شمار مشخصی از ایستگاه‌های کاری تعریف می‌شود. روشنی و روشنی (۲۰۱۲) با ارائه یک الگوریتم فراابتکاری برپایه الگوریتم کلونی مورچگان این مسئله را بررسی کردند. روشنی و همکاران (۲۰۱۳) نیز با پیشنهاد روشی مبتنی بر الگوریتم شبیه‌سازی تبرید و با انتخاب هم‌زمان شاخص‌های کارایی خط، طول خط و شاخص هم‌بارسازی به‌عنوان معیارهای ارزیابی، سعی در حل مسئله بالانس خطوط مونتاژ با

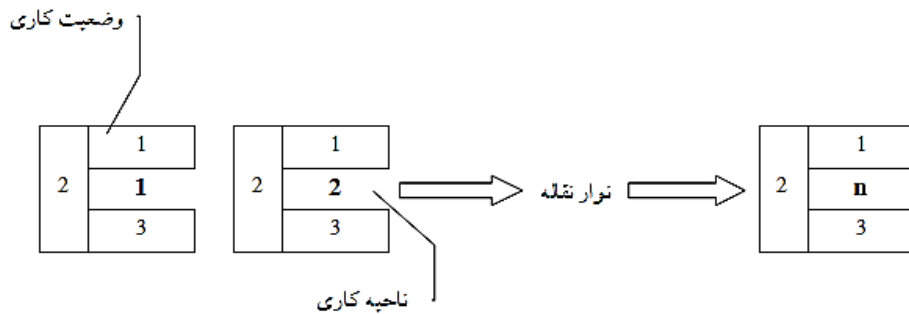
چنداپراتوره می‌توانند استفاده شوند (کلگوز و توکلو، ۲۰۱۲).

روش‌نی و روش‌نی (۱۳۸۹) خطوط مونتاژ با ایستگاه‌های چنداپراتوره را همراه با محدودیت‌های وضعیتی^۶ با عنوان خطوط مونتاژ چندسویه بررسی کردند. آنان نشان دادند که این مسئله از نوع NP-Hard است. تفاوت خطوط مونتاژ دوسویه که بارتولد^۷ (۱۹۹۳) معرفی کرده است با خطوط مونتاژ با ایستگاه‌های چنداپراتوره که در کار روشنی و روشنی (۱۳۸۹) معرفی شده است در این است که در خطوط مونتاژ دوسویه بیشترین شمار اپراتورهای قابل تخصیص به هر ایستگاه کاری برابر با دو اپراتور است؛ در حالی که امکان تخصیص بیش از دو اپراتور به هر ایستگاه کاری چنداپراتوره وجود دارد. از سوی دیگر، تخصیص عملیات به ایستگاه‌های خط مونتاژ چنداپراتوره به محدودیت‌های وضعیتی سمت راستی و سمت چپی خط مونتاژ بستگی دارد. این پژوهشگران در کار خود هر وضعیت را به‌عنوان یک ایستگاه در نظر گرفته‌اند و مسئله را با کمینه‌کردن طول خط مونتاژ (شمار ایستگاه‌های کاری چنداپراتوره) به‌عنوان نخستین هدف و شمار کل ایستگاه‌های کاری منفرد به‌عنوان دومین هدف، بررسی کرده‌اند. در این پژوهش این نوع خطوط مونتاژ که خطوط مونتاژ چندسویه نامیده می‌شوند، با در نظر گرفتن هر اپراتور به‌عنوان یک ایستگاه کاری، در نظر گرفتن محدودیت‌های ناحیه‌ای^۸ و با هدف همبارسازی ایستگاه‌ها یا بالانس عمودی بررسی می‌شود. هر یک از ایستگاه‌های کاری چنداپراتوره، یک ناحیه^۹ نامیده می‌شوند. شکل ۱ نمونه‌ای از پیکربندی این نوع خط مونتاژ را نشان می‌دهد.

ایستگاه‌های چنداپراتوره کردند. آنان عملکرد مناسب الگوریتم خود را با ارائه یک مسئله نمونه و استفاده از مسائل استاندارد نشان دادند.

معمولاً در ادبیات نظری مسائل بالانس خطوط مونتاژ با ایستگاه‌های چنداپراتوره، زمان عناصر کاری قطعی و مستقل از عوامل دیگر فرض شده است؛ در حالی که در خطوط مونتاژ دنیای واقعی، با افزایش تعداد کارگران در یک ایستگاه کاری، افزایش زمان‌های کاری را نیز باید در نظر گرفت. سپاهی و جلالی (۲۰۱۴) با در نظر گرفتن این موضوع در پژوهش خود، یک مدل ریاضی با هدف کمینه‌سازی شمار ایستگاه‌ها ارائه کردند که تعمیمی بر مدل دیمتریادیس (۲۰۰۶) بود. همچنین، آنان برای حل این مسئله چهار روش ابتکاری مبتنی بر قواعد اولویتی پیشنهاد کردند و عملکرد هر یک را بررسی کردند.

خطوط مونتاژ می‌توانند به خطوط یک‌سویه^۲ و دوسویه^۳ دسته‌بندی شوند (اوزبکی و تاپکن، ۲۰۱۱). خط یک‌سویه خطی است که تنها از یک سوی آن استفاده می‌شود در حالی که در خط دوسویه از هر دو سوی خط به‌طور هم‌زمان استفاده می‌شود. در صورتی که محصولات پیچیده و بزرگ که شامل تعداد زیادی از کارهای مونتاژی با زمان‌های کاری طولانی هستند، در خطوط مونتاژ تک‌سویه یا دوسویه تولید شوند، ایستگاه‌های کاری بسیار زیادی مورد نیاز خواهد بود. زمان طولانی جریان تولید، فضای بزرگ برای استقرار خط، بودجه بالا برای سرمایه‌گذاری در تجهیزات و ابزارهای ایستگاهی و در نهایت، تعداد زیاد کار در جریان ساخت^۵ نیز برای این نوع از محصولات مورد نیاز است. به‌منظور دوری از این معایب، خطوط مونتاژ با ایستگاه‌های کاری



شکل ۱. نمونه‌ای از پیکره‌بندی خط مونتاژ چندسویه

مسئول انجام عملیاتی از فرایند مونتاژ در ایستگاه‌های کاری چندپراتوره مربوط به خود شوند که به جابه‌جایی‌های پی‌درپی آنها در اطراف واحدهای کاری بینجامد؛ حال آنکه در برخی از شرکت‌های تولیدی بزرگ، این جابه‌جایی‌ها از دیدگاه اقتصادی زیان‌آور است؛ از این رو معمولاً در چنین واحدهایی، طراح خط مونتاژ، به‌گونه‌ای عملیات را به اپراتورهای هر ایستگاه کاری چندپراتوره اختصاص می‌دهد که هر اپراتور مسئول انجام عملیات بر واحدهای کاری شود که نیازمند وضعیت خاصی از واحد کاری برای مثال سوی راست یا چپ آن است (روشنی و روشنی، ۱۳۸۹).

در این مقاله، افزون بر محدودیت‌های وضعیتی که در بند پیشین توضیح داده شد، محدودیت‌های ناحیه‌ای نیز در نظر گرفته شده‌اند. این نوع محدودیت نشان می‌دهد که برخی کارها باید به ایستگاه کاری خاصی

تجهیزات یکسان و ویژه‌ای نیاز دارند. محدودیت ناحیه‌ای منفی هنگامی رخ می‌دهد که به‌علت اختصاص این کارها به ایستگاه یکسان، یک نارسایی ایستگاهی^۲ پدید آید (اوزبکی و تاپکن، ۲۰۱۱). با

تفاوت خط مونتاژ با ایستگاه‌های چندپراتوره (چندسویه) با خط دارای اپراتورهای موازی در این است که در ایستگاه‌های چندپراتوره در هر ناحیه، مجموعه‌ای از اپراتورها عملیات متفاوتی از یک واحد کاری مشترک را هم‌زمان انجام می‌دهند؛ اما اپراتورهای موازی مجموعه‌ای از عملیات همانند را بر واحدهای کاری گوناگون انجام می‌دهند. علت این امر را می‌توان در آن دانست که خطوط مونتاژ با ایستگاه‌های چندپراتوره برای ساخت محصولات پیچیده و بزرگ و با نرخ تولید پایین به کار برده می‌شوند، در حالی که اپراتورهای موازی در تولید با نرخ‌های بالا و وجود شمار بالای قطعات کاری همانند در نظر گرفته می‌شوند.

اگر تخصیص عملیات به ایستگاه‌های کاری تنها محدود به روابط پیش‌نیازی و زمان چرخه باشد، شاید برخی از اپراتورها در پایان فرایند بالانس‌سازی،

اختصاص یابند (محدودیت ناحیه‌ای مثبت) و یا اینکه نباید به ایستگاه کاری خاص اختصاص یابند (محدودیت ناحیه‌ای منفی). یک محدودیت ناحیه‌ای مثبت هنگامی رخ می‌دهد که کارها به ابزار یا

۲- مدل ریاضی

در مدل‌سازی مسئله، نمادهای پیشنهادی بایبارز (۱۹۸۶) و روشنی و روشنی (۱۳۸۹)، به کار گرفته شده است که در زیر می‌آید:

$I = \{1, 2, \dots, i, \dots, m\}$	مجموعه وظیفه‌ها
$J = \{1, 2, \dots, j, \dots, n\}$	مجموعه ایستگاه‌ها
$k = \{1, 2, 3\}$	شناسه وضعیت سوی (طرف) خط ۱: راست، ۲: چپ، ۳: پایین
(i, k)	یک ایستگاه j و سوی عملیات k آن
A_L	مجموعه وظیفه‌هایی که باید در سوی چپ انجام شود؛ $A_L \subset I$
A_R	مجموعه وظیفه‌هایی که باید در سوی راست انجام شود؛ $A_R \subset I$
A_U	مجموعه وظیفه‌هایی که باید در سوی زیر انجام شود؛ $A_U \subset I$
A_E	مجموعه وظیفه‌هایی که می‌تواند در سوی راست یا چپ انجام شود؛ $A_E \subset I$
$P(i)$	مجموعه وظیفه‌های پیش‌نیاز مستقیم وظیفه i
$P_a(i)$	مجموعه همه وظیفه‌های پیش از وظیفه i
$S(i)$	مجموعه وظیفه‌های پس‌نیاز مستقیم وظیفه i
$S_a(i)$	مجموعه همه وظیفه‌های پس از وظیفه i
$P_0 = \{i \in I P(i) = \emptyset\}$	مجموعه وظیفه‌هایی که هیچ پیش‌نیازی ندارند
t_i	مدت زمان پردازش وظیفه i
μ	یک عدد مثبت بسیار بزرگ
$C(i) = \begin{cases} A_L & \text{if } i \in A_R \\ A_R & \text{if } i \in A_L \\ \emptyset & \text{if } i \in A_{EUAU} \end{cases}$	مجموعه وظیفه‌هایی که سوی عملیات آنها مخالف سوی عملیات وظیفه i است
$K(i) = \begin{cases} \{1\} & \text{if } i \in A_R \\ \{2\} & \text{if } i \in A_L \\ \{1, 2\} & \text{if } i \in A_{EUAU} \end{cases}$	مجموعه‌ای که بیانگر سوی ترجیحی برای انجام وظیفه i است

توجه به اینکه خط مونتاژ چندسویه در این مقاله برای مونتاژ خودروهای سواری به کار برده می‌شود، محدودیت‌های زمان کاری، محدودیت ناحیه‌ای و محدودیت‌های پیش‌نیازی به‌عنوان محدودیت‌های سخت مسئله و محدودیت‌های وضعیتی به‌عنوان محدودیت نرم، در نظر گرفته شده است. یک محدودیت سخت، محدودیتی است که برای رسیدن به یک حل قابل قبول باید به‌گونه‌ای کامل برآورده شود و برآورده‌نشدن هر یک از محدودیت‌های سخت به معنی ناشدنی بودن جواب است. یک محدودیت نرم محدودیتی است که برآورده‌شدن آن تا جای ممکن مورد نظر است. به دیگر سخن، اگر یک محدودیت نرم، برآورده نشود باعث ناشدنی بودن جواب نخواهد شد. در این مقاله، وجود یک محدودیت نرم در کنار

چند محدودیت سخت و همچنین مکانیزم منحصر به فرد دستیابی به پارامترهای مناسب الگوریتم، دیدگاهی نو در مسئله بالانس خطوط مونتاژ با ایستگاه‌های چنداُپراتوره هستند. در ادامه، نخست در بخش بعد، مدل ریاضی مسئله آورده می‌شود؛ سپس، گام‌های الگوریتم شبیه‌سازی تبرید و سپس جزئیات و عوامل مهم پیاده‌سازی آن در مسئله بالانس خط مونتاژ با ایستگاه‌های چنداُپراتوره بیان خواهد شد. مسئله نمونه با یکصد عنصر کاری معرفی و سناریوهای گوناگونی با الگوریتم پیشنهادی اجرا می‌شود و یافته‌های این سناریوها ارائه می‌شود و مورد بحث قرار می‌گیرد. مقاله با نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها در بخش ۵ به پایان می‌رسد.

$$t_i^f - t_h^f + \left| 1 - \sum_{k \in K(h)} x_{hjk} \right| + \left| 1 - \sum_{k \in K(i)} x_{hjk} \right| \geq t_i \quad \text{for all } i \in I, h \in P(i), j \in J \quad (8)$$

$$t_i^f - t_h^f + (1 - x_{pjk}) + (1 - x_{ijk}) + (1 - z_{ip}) \geq t_p \quad (9)$$

$$p \in \{r \mid r \in I - (P_a(i) \cup S_a(i) \cap C(i)) \text{ \& } i < r\}, j \in J, k \in K(i) \cap K(P) \quad (10)$$

$$t_i^f - t_p^f + \mu(1 - x_{pjk}) + (1 - x_{ijk}) + (1 - z_{ip}) \geq t_i \quad (11)$$

$$p \in \{r \mid r \in I - (P_a(i) \cup S_a(i) \cap C(i)) \text{ \& } i < r\}, j \in J, k \in K(i) \cap K(P) \quad (12)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ijk} - m \cdot U_{jk} \leq 0, \quad \text{for all } j \in J, k \in K(i) \quad (13)$$

$$\sum_{k \in K} U_{jk} - F_j \leq 0, \quad \text{for all } j \in J \quad (14)$$

$$F_j \geq F_{j+1} \quad \text{for all } j \in J \quad (15)$$

$$t_i^f \geq t_i, \quad \text{for all } i \in I \quad (16)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \quad z_{ip} \in \{0, 1\}, \quad U_{jk} \in \{0, 1\}, \quad F_j \in \{0, 1\} \quad (17)$$

در مدل ریاضی، محدودیت (۵) تضمین‌کننده این است که هر کار تنها به یک ایستگاه تخصیص می‌یابد. محدودیت‌های پیش‌نیازی و نیز مدت‌زمان چرخه نیز در محدودیت‌های شماره (۶) و (۷) تعریف شده است. زمان‌های پایان عملیات وابسته به توالی در محدودیت‌های شماره (۸)، (۹) و (۱۰) کنترل می‌شود. محدودیت (۱۱) بررسی می‌کند که اگر ایستگاه (i, k) به کار گرفته شده است. این بدان معنی است که دست کم یک بار عملیات به این ایستگاه یاد شده تخصیص داده شده باشد. اگر دست کم یکی از ایستگاه‌های

در مدل‌سازی ریاضی این مسئله، متغیر تصمیم به شیوه زیر تعریف می‌شود:

اگر وظیفه i به ایستگاه (j, k)

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \quad (1)$$

گمارده شود در غیر این صورت

اگر k امین سوی ایستگاه j به کار

گرفته شود

$$U_{jk} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \quad (2)$$

در غیر این صورت

اگر وظیفه i زودتر از وظیفه p در

همان ایستگاه تخصیص داده شده

باشد

$$Z_{ip} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \quad (3)$$

اگر وظیفه p زودتر از وظیفه i در

همان ایستگاه تخصیص داده شده

باشد

اگر وضعیت j به کار گرفته شود

$$Z_{ip} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \quad (4)$$

در غیر این صورت

بنابراین، مدل ریاضی مسئله همانند زیر خواهد بود:

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K(i)} x_{ijk} = 1 \quad \text{for all } i \in I \quad (5)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K(i)} g \cdot x_{hgk} \leq \sum_{j \in J} \sum_{k \in K(i)} j \cdot x_{ijk} \quad \text{for all } i \in I, h \in P(i) \quad (6)$$

$$t_i^f \leq ct \quad \text{for all } i \in I \quad (7)$$

حرکت به سمت بهینه یک تابع ریاضی وجود دارد. از آنجا که با به‌آهستگی سرد شدن یک فلز جامد، ذرات آن تمایل دارند در پایین‌ترین سطح انرژی قرار بگیرند، تابع سرمایه‌ش استخراج‌شده از این پدیده می‌تواند به‌منظور کمینه‌سازی یا بیشینه‌سازی جواب یک تابع ریاضی به کار رود (کلاهان و بهروزفر، ۱۳۸۶).

الگوریتم شبیه‌سازی تبرید به‌دلیل سادگی و همچنین کارایی بالا در حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی، جایگاه ویژه‌ای در میان تکنیک‌های جستجو و ابتکاری در دهه ۱۹۸۰ به دست آورد (فتاحی، ۱۳۸۸). اصول کار این الگوریتم همانند الگوریتم‌هایی همچون جستجوی ممنوع، ژنتیک و کولونی مورچگان ایجاد و ارزیابی مرحله‌ای شمار کمی از پاسخ‌های قابل قبول، برای رسیدن به پاسخ بهینه در زمان‌های قابل قبول است (کلاهان و رفیعی ثانی، ۱۳۸۳). این الگوریتم همچون توپ جهنده‌ای که میان کوه‌ها از دره‌ای به دره دیگر می‌جهد، می‌تواند مقدار کمینه (بیشینه) یک مسئله را بیابد. فرایند حل با دمایی بالا آغاز می‌شود؛ با این دما توپ می‌تواند جهش‌های بزرگی انجام دهد و از روی هر قله‌ای بپرد. به‌آهستگی و با کاهش دما توپ، دیگر نمی‌تواند جهش‌های بلند داشته باشد و حتی شاید در دره‌های همسایگی خود گرفتار شود. ثابت شده است (کلاهان و همکاران، ۱۳۸۷) که با کنترل دقیق و مناسب دما، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید می‌تواند نقاط فرین را به دست آورد. این توانمندی مهم الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، احتمال گرفتار شدن آن در دام‌های بهینه محلی را کمینه می‌سازد. شکل ۲ گام‌های الگوریتم شبیه‌سازی تبرید را نشان می‌دهد.

مربوط به وضعیت کاری Z خط تولید راه‌اندازی شود، مقدار متغیر وضعیت Fz در محدودیت (۱۲) مقدار یک می‌گیرد. توالی میان وضعیت‌های راه‌اندازی خط در محدودیت (۱۳) کنترل می‌شود. محدودیت (۱۴) زمان پایان هر عملیات را کنترل می‌کند. مجموعه محدودیت‌های (۱۵) نیز تضمین می‌کند که متغیرهای مسئله از نوع دودویی است.

۳- روش‌شناسی پژوهش

مسائل بهینه‌سازی صنعتی در ابعاد واقعی در بیشتر مواقع، پیچیده و بزرگ می‌شوند؛ بنابراین، روش‌های سنتی و استاندارد حل، کارایی لازم را ندارد و معمولاً نیازمند زمان‌های طولانی برای محاسبات هستند (کلاهان و دوست پرست، ۱۳۸۴). خوشبختانه، با پیشرفت در فناوری رایانه و افزایش توان محاسباتی، امروزه به‌کارگیری روش‌های ابتکاری و جستجوگرهای هوشمند همچون الگوریتم شبیه‌سازی تبرید کاملاً متداول شده است.

۳-۱- الگوریتم شبیه‌سازی تبرید

مقایسه ساختار پیچیده پیکربندی فضای جواب مسائل بهینه‌سازی سخت، با برخی از پدیده‌های فیزیکی توسط کرک پاتریک^۱ و همکارانش منجر به ارائه پیشنهاد یک روش جدید تکراری شد که توانایی خروج از بهینه محلی را داشت. همچنین اثر مشابهی را در همان زمان سرنی^۲ در سال ۱۹۸۵ منتشر کرد. آن‌ها از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید (SA) برای افزایش پیکربندی گراف‌ها استفاده کردند (فتاحی، ۱۳۸۸). کرک پاتریک دریافت که ارتباط جالبی میان الگوی کاهش آهسته انرژی گرمایی یک جسم جامد و

۲-۳- الگوریتم پیشنهادی برای مسئله بالانس

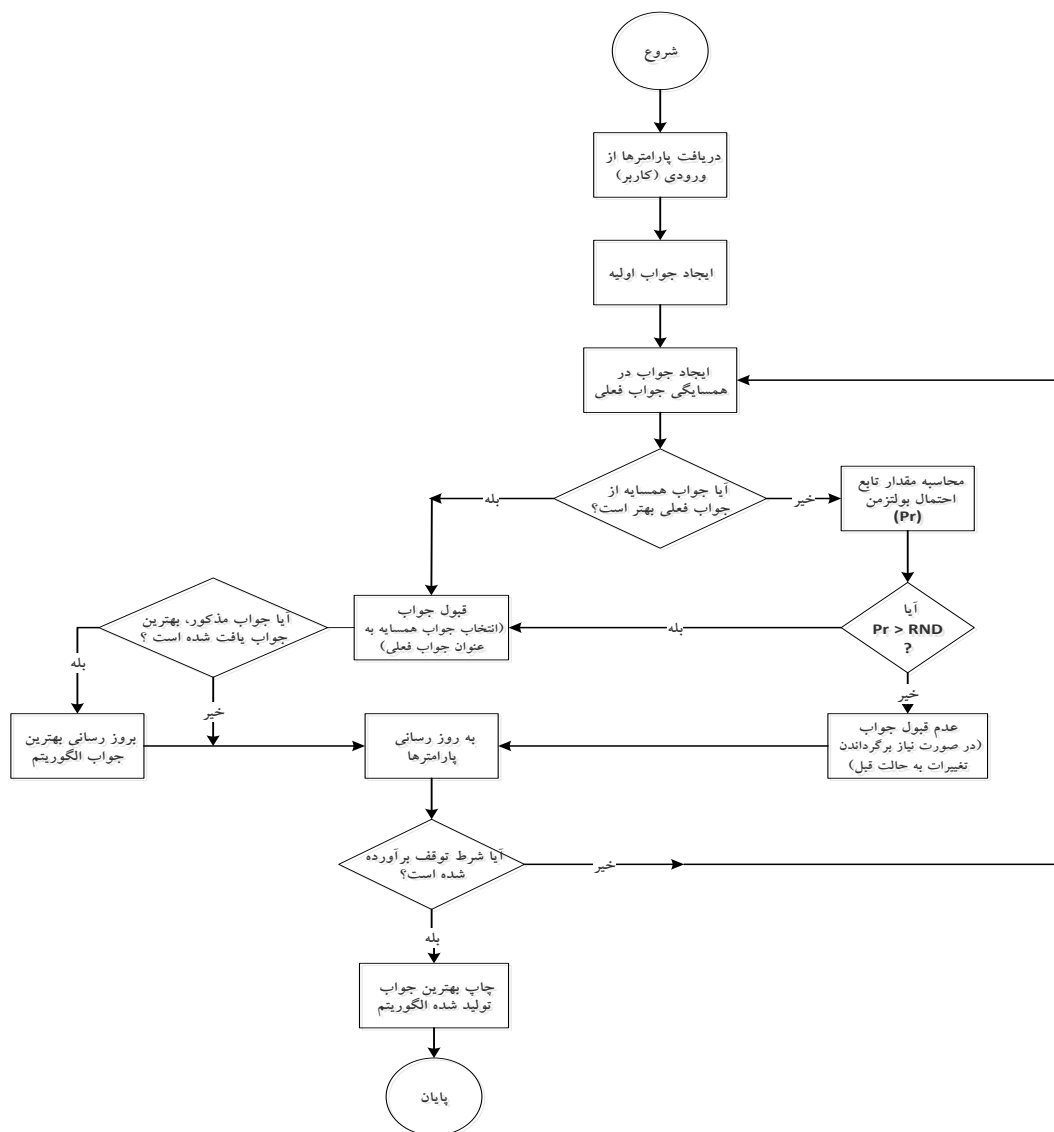
عمودی خطوط مونتاژ چندسویه

براساس آنچه که پیش‌تر گفته شد و نیز گام‌های الگوریتم شبیه‌سازی تبرید در شکل ۲ چهار عامل مهم و تعیین‌کننده برای پیاده‌سازی این الگوریتم در مسئله همبارسازی ایستگاه‌های خط مونتاژ چندسویه با مشخصات و محدودیت‌های گفته شده، مکانیزم ایجاد همسایگی، تابع هدف، برنامه انجماد و شرط توقف هستند که در ادامه شرح داده می‌شوند.

مکانیزم ایجاد هم‌سایگی: در هر تکرار، به ترتیب یک عنصر کاری انتخاب می‌شود و شماره عقب‌ترین و جلوترین ناحیه‌ای که آن عنصر می‌تواند در آن انجام شود محاسبه می‌شود. همسایگی تصادفی زمانی تعریف و ایجاد می‌شود که عنصر گفته‌شده به‌طور تصادفی به اپراتور فعال دیگری در همان ناحیه و یا ناحیه دیگر (به‌طور تصادفی میان عقب‌ترین و جلوترین ناحیه ممکن) اختصاص یابد. واضح است که همسایگی جدید باید تمام محدودیت‌های در نظر گرفته‌شده را برآورده کند. این محدودیت‌ها شامل: محدودیت‌های سخت (زمان کاری، محدودیت ناحیه‌ای، محدودیت‌های پیش‌نیازی) و محدودیت نرم (وضعیت‌های کاری) می‌باشد.

در شکل ۲ مقدار تابع احتمال بولتزمن (Pr) از رابطه $e^{\frac{-\Delta E}{T_C}}$ به دست می‌آید که در آن ΔE مقدار اختلاف انرژی (تابع هدف) دو جواب فعلی و جدید است و T_C نیز دمای فعلی الگوریتم است. مقدار Pr با یک عدد تصادفی در بازه (۰ و ۱) که با تابع $RND()$ تولید می‌شود، مقایسه می‌شود (فتاحی، ۱۳۸۸). اگر مقدار Pr بزرگ‌تر از مقدار برگشتی تابع $RND()$ باشد، جواب کنونی پذیرفته می‌شود.

چگونگی سردسازی تأثیر زیادی بر همگرایی الگوریتم دارد. برنامه انجماد چگونگی کنترل دمای الگوریتم را مشخص می‌کند. در یک برنامه انجماد، باید چهار عامل دمای آغازین، طول زنجیره مارکف، قاعده کاهش دما، و قاعده توقف تعیین شود. طول زنجیره مارکوف مربوط به زمانی است که برای رسیدن به یک وضعیت پایدار، بیش از یک همسایگی در هر دما، ایجاد و ارزیابی شود. به دلیل کمبود نتایج نظری در زمینه طراحی پارامترهای یاد شده، این پارامترها باید با توجه به مسئله موردبررسی، تنظیم شوند. در این تنظیم، کیفیت نتایج و زمان محاسباتی الگوریتم مد نظر قرار می‌گیرند. طراحی مناسب این پارامترها تأثیر شگرفی بر الگوریتم دارد (فتاحی، ۱۳۸۸).



شکل ۲. گام‌های الگوریتم شبیه‌سازی تبرید

مورد از مهم‌ترین سنجه‌های کیفیت نتایج نهایی بالانس خط مونتاژ را می‌توان راندمان خط (LE)، شاخص یکنواختی یا همبارسازی (SI) و زمان خط (LT) دانست (گرزچکا^۳، ۲۰۱۱). کارایی یا راندمان خط درصد سودمندی خط را نشان می‌دهد. شاخص یکنواختی بیانگر یکنواختی نسبی برای بالانس خط مونتاژ است؛ بر این اساس، بالانس کامل با شاخص

به دیگر سخن، همسایه ایجاد شده باید شدنی باشد، در غیر این صورت همسایه موردنظر کنار گذاشته می‌شود و همسایگی دیگری ایجاد خواهد شد.

تابع هدف: کمینه‌سازی شمار ایستگاه‌های کاری یا زمان چرخه، هدف اصلی مسائل بالانس خط مونتاژ است (بایکاس و غلو^{۳۳}، ۲۰۰۶)؛ با این حال اغلب مواقع، بهینه‌سازی بیش از یک سنجه مد نظر است. سه

شرط توقف: با توجه به ساختار مسئله مورد بررسی، قواعد توقف مختلفی را برای الگوریتم شبیه‌سازی تبرید می‌توان انتخاب کرد. رسیدن دمای الگوریتم به یک دمای انتهایی (دمای انجماد T_f) پرکاربردترین قاعده توقف است (فتاحی، ۱۳۸۸). رسیدن شمار حرکت‌های بدون بهبود در بهترین جواب به یک حد بالایی از پیش تعیین شده (در این حالت، هرگاه مقدار بهترین جوابی که توسط الگوریتم یافته شده است بهبود پیدا کند، شمارنده مربوط صفر می‌شود)، شمار کل تکرارها یا جواب‌های به‌دست‌آمده، مدت‌زمان پردازش و میزان بهبود مشخص در جواب اولیه، از جمله دیگر شرط‌های توقف هستند. در این مقاله، تعداد کل جواب‌های به‌دست‌آمده به‌عنوان شرط توقف الگوریتم انتخاب شده است.

قاعده کاهش دما: به‌طور کلی، بین کیفیت نتایج و سرعت انجماد، رابطه قوی وجود دارد. مقدار دما همواره مقدار مثبت است و زمانی که تعداد تکرارها به سمت بی‌نهایت میل می‌کند، مقدار دما نیز به سمت صفر میل می‌کند. در زیر معادله‌های شماره (۱۷)، (۱۸) و (۱۹)، سه قاعده پرهوادار برای کاهش دما را نشان می‌دهند.

قواعد مختلفی علاوه بر موارد فوق برای کاهش دما وجود دارد که قاعده کاهش خیلی آهسته، قاعده غیریکنواخت، قاعده پویا و قاعده هندسی وابسته به دما از انواع آن هستند (فتاحی، ۱۳۸۸). در مقاله حاضر، کاربر توانایی انتخاب بین دو قاعده هندسی و لگاریتمی را دارد.

یکنواختی صفر نشان داده می‌شود. زمان خط نیز مدت‌زمانی است که برای یک کالا موردنیاز است تا بر روی خط مونتاژ کامل شود (بکر و شول، ۲۰۰۶). در این مقاله برپایه گفتگو با مهندس سان خط مونتاژ شرکت خودروسازی نمونه و براساس اولویت‌های اعلام شده از سوی آنان شاخص یکنواختی به‌عنوان تابع هدف مسئله در نظر گرفته شده است. در اصطلاح به این تابع هدف، بالانس عمودی نیز گفته می‌شود. با این تابع هدف، عناصر کاری به‌گونه‌ای به ایستگاه‌ها اختصاص می‌یابند که حداکثر همگنی بین مجموع زمان‌های ایستگاه‌های مختلف به دست آید (گرژچکا، ۲۰۱۱). مقدار تابع هدف با محاسبه مجموع اختلاف میان زمان‌های کاری ایستگاه‌ها به دست می‌آید که در حالت ایده آل به صفر می‌رسد و نشان‌دهنده تقسیم مساوی بیکاری‌های (کارهای) موجود بین ایستگاه‌ها است. دستیابی به این امر، افزون بر کاهش زمان چرخه و افزایش خروجی سیستم، موجب می‌شود تا کارها از لحاظ زمان اجرا به‌صورت عادلانه‌ای بین کارگران تقسیم شود. معادله (۱۶) چگونگی تعریف تابع هدف را نشان می‌دهد.

$$Z = \sum_{i=1}^{w-1} \sum_{j=i+1}^w |t_i - t_j| \quad (16)$$

در معادله (۱۶)، Z بیانگر مقدار تابع هدف، w شمار کل اپراتورهای موجود در خط و t_i زمان کاری اپراتور فعال i ام است؛ بنابراین، واضح است که اگر الگوریتم بتواند هنگام جستجو، یک اپراتور فعال را حذف کند و کار او را به دیگران واگذار کند، مقدار تابع هدف به‌گونه‌ای شگرف بهبود می‌یابد.

اولیه، قاعده انجماد، شیب تابع سرمایه‌ش در حالت هندسی، شمار کل تکرارها (به‌عنوان شرط توقف)، زمان چرخه و شمار ناحیه‌های کاری توسط کاربر قابل انتخاب هستند. خروجی برنامه از یک سو شمار اپراتورهای موردنیاز در هر ناحیه نام از خط مونتاژ را تعیین می‌کند و از سوی دیگر برای توزیع یکنواخت بار کاری میان اپراتورهای هر ایستگاه کاری چنداپراتوره، تعیین می‌کند که هر اپراتور کدام عناصر کاری را انجام دهد. یک مسئله بالانس عمودی خط مونتاژ چندسویه با یکصد عنصر کاری و با مشخصاتی که در جدول ۱ نشان داده شده، حل شده است. در این مسئله، براساس آنچه در شرکت خودروسازی نمونه از پیش در نظر گرفته شده است، ۶ وضعیت کاری برای محصول تعریف شده و تخصیص عناصر کاری به اپراتورها با توجه به اولویت مربوط به وضعیت‌های همسایه صورت گرفته است؛ مثلاً اگر بخشی از خودرو که موتور در آن جای دارد وضعیت پایه در نظر گرفته شود، آنگاه دو بخش همسایه آن، سوی راست (سوی راننده) و سوی چپ خودرو، وضعیت‌های همسایه برای وضعیت پایه خواهند بود. بر این اساس، اپراتوری که عناصر کاری با وضعیت پایه را انجام می‌دهد در صورت بیکارشدن (هنگامی که زمان کاری او کمتر از زمان چرخه است) می‌تواند عناصر کاری با وضعیت‌های همسایه را نیز انجام دهد.

طراحی خطوط مونتاژ و وجود ابزارهای خاص در ایستگاه‌های معین، باعث به‌وجود آمدن محدودیت‌های ناحیه‌ای در مسئله بالانس خط مونتاژ با ایستگاه‌های چنداپراتوره می‌شود؛ به عبارت دیگر، در بین عناصر

قاعده خطی: فرمول زیر رابطه کاهش دما به صورت خطی را بیان می‌کند که در آن T_0 دمای اولیه، i شماره مرحله کاهش دما و β ضریب ثابتی بین صفر و یک است.

$$T_i = T_0 - i \times \beta \quad (17)$$

قاعده هندسی: یکی از قواعد مشهور کاهش دما است که به دلیل سادگی، در خیلی از موارد مورد استفاده قرار گرفته است و به صورت مقابل بیان می‌شود؛ به طوری که $0 < \alpha < 1$ ، ضریب ثابتی است.

$$T_{K+1} = \alpha \times T_K \quad (18)$$

قاعده لگاریتمی: این قاعده نسبت به دو قاعده دیگر، سرعت کاهش دمای آن آرام‌تر است و همگرایی بیشتری را به سمت بهینه سراسری موجب می‌شود.

$$T_i = \frac{T_0}{1 + \text{Log}(i)} \quad (19)$$

۳- یافته‌ها و بحث

الگوریتم شبیه‌سازی تبرید بالا با زبان برنامه‌نویسی VBA کدنویسی و برای مسئله نمونه‌ای که در ادامه شرح داده می‌شود، پیاده‌سازی شده است. کدنویسی به‌گونه‌ای انجام گرفته است که پارامترهایی چون دمای

باید در ناحیه خاصی که دستگاه موردنظر در آن نصب شده است، انجام شود. عناصر کاری که دارای محدودیت ناحیه‌ای هستند، در جدول ۲ آورده شده‌اند. همچنین روابط پیش‌نیازی میان عناصر کاری نیز براساس جدول ۳ تعریف شده است.

کاری، مواردی وجود دارد که باید در یک یا چند ناحیه خاص انجام شوند. مثلاً دستگاه ویژه تزریق روغن ترمز که در ناحیه‌ای از خط مونتاژ ثابت (نصب) شده است، نمونه‌ای از وجود این محدودیت است. بدین معنا که عنصر کاری مربوط به تزریق روغن ترمز

جدول (۱): زمان پردازش و وضعیت عناصر کاری

عنصر کاری	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰
زمان اجرا	۰/۰	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۱/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰
وضعیت	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۱	۲	۳	۶	۱	۲	۳	۴	۵	۱	۲	۶	۴	۵
عنصر کاری	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۲۵	۲۶	۲۷	۲۸	۲۹	۳۰	۳۱	۳۲	۳۳	۳۴	۳۵	۳۶	۳۷	۳۸	۳۹	۴۰
زمان اجرا	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱
وضعیت	۱	۲	۳	۴	۵	۱	۲	۶	۴	۵	۲	۳	۴	۵	۶	۱	۲	۳	۴	۵
عنصر کاری	۴۱	۴۲	۴۳	۴۴	۴۵	۴۶	۴۷	۴۸	۴۹	۵۰	۵۱	۵۲	۵۳	۵۴	۵۵	۵۶	۵۷	۵۸	۵۹	۶۰
زمان اجرا	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱
وضعیت	۶	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۱
عنصر کاری	۶۱	۶۲	۶۳	۶۴	۶۵	۶۶	۶۷	۶۸	۶۹	۷۰	۷۱	۷۲	۷۳	۷۴	۷۵	۷۶	۷۷	۷۸	۷۹	۸۰
زمان اجرا	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱
وضعیت	۲	۳	۴	۵	۶	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۱	۲	۳
عنصر کاری	۸۱	۸۲	۸۳	۸۴	۸۵	۸۶	۸۷	۸۸	۸۹	۹۰	۹۱	۹۲	۹۳	۹۴	۹۵	۹۶	۹۷	۹۸	۹۹	۱۰۰
زمان اجرا	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱
وضعیت	۴	۵	۶	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۱	۲	۳	۴	۵

جدول (۲): محدودیت‌های ناحیه‌ای

عنصر کاری	ناحیه‌های غیراجرایی	عنصر کاری	ناحیه‌های غیراجرایی	عنصر کاری	ناحیه‌های غیراجرایی
۵	۱	۱۹	۷، ۶، ۵، ۳، ۲، ۱	۷۵	۷، ۶، ۵، ۳، ۲، ۱
۶	۴، ۳	۲۰	۳، ۱	۷۶	۴
۱۱	۳، ۲، ۱	۲۲	۴، ۱	۷۷	۷، ۵
۱۳	۱	۳۳	۵، ۲	۸۵	۷، ۵
۱۵	۵، ۴، ۳	۳۵	۷، ۶، ۵، ۴، ۲، ۱	۹۷	۷، ۵، ۴، ۳، ۲، ۱
۱۷	۲، ۱	۵۰	۴، ۲	۹۹	۶، ۵، ۳، ۲

جدول (۳): روابط پیش‌نیازی

عنصر کاری ۳: پیش‌نیازها: ۱	عنصر کاری ۵۴: پیش‌نیازها: ۵۱، ۱۳، ۱۱
عنصر کاری ۴: پیش‌نیازها: ۲	عنصر کاری ۵۵: پیش‌نیازها: ۵۱، ۴۱، ۴۰
عنصر کاری ۶: پیش‌نیازها: ۳	عنصر کاری ۵۶: پیش‌نیازها: ۴۷، ۳۹، ۱۹، ۱۵، ۱۳
عنصر کاری ۸: پیش‌نیازها: ۴	عنصر کاری ۵۷: پیش‌نیازها: ۵۰، ۴۸، ۴۶، ۴۴، ۴۰، ۲۱، ۷
عنصر کاری ۹: پیش‌نیازها: ۷	عنصر کاری ۵۸: پیش‌نیازها: ۵۱، ۴۷، ۴۳، ۱۳، ۳۹، ۴۱، ۶، ۲
عنصر کاری ۱۰: پیش‌نیازها: ۸، ۵، ۱	عنصر کاری ۵۹: پیش‌نیازها: ۵۷، ۵۶، ۴۹، ۴۵، ۳۶، ۳۰، ۲۰، ۱۱، ۶
عنصر کاری ۱۱: پیش‌نیازها: ۸، ۳	عنصر کاری ۶۰: پیش‌نیازها: ۵۲، ۵۰، ۴۸، ۳۷، ۲۵
عنصر کاری ۱۲: پیش‌نیازها: ۱۰، ۴	عنصر کاری ۶۱: پیش‌نیازها: ۵۶، ۵۴، ۴۶، ۴۳، ۳۸، ۲۹، ۲۵
عنصر کاری ۱۴: پیش‌نیازها: ۴، ۱	عنصر کاری ۶۲: پیش‌نیازها: ۵۷، ۵۵، ۳۸، ۳۲، ۳۰، ۲۶، ۱۲
عنصر کاری ۱۵: پیش‌نیازها: ۴	عنصر کاری ۶۳: پیش‌نیازها: ۵۰، ۴۷، ۴۵، ۳۹
عنصر کاری ۱۶: پیش‌نیازها: ۵، ۳	عنصر کاری ۶۴: پیش‌نیازها: ۵۴، ۳۹
عنصر کاری ۱۷: پیش‌نیازها: ۱۲، ۶	عنصر کاری ۶۵: پیش‌نیازها: ۸، ۲۲، ۳۱، ۴۰، ۴۴، ۴۶، ۵۹، ۶۰
عنصر کاری ۱۸: پیش‌نیازها: ۹، ۴، ۱	عنصر کاری ۶۶: پیش‌نیازها: ۵۸، ۵۵، ۴۸، ۳۷، ۳۴، ۳۲، ۲۶، ۱۹
عنصر کاری ۱۹: پیش‌نیازها: ۱۸، ۱۴، ۷، ۵، ۳، ۲	عنصر کاری ۶۷: پیش‌نیازها: ۵۷، ۵۴، ۳۰، ۱۸
عنصر کاری ۲۰: پیش‌نیازها: ۱۸، ۱۰	عنصر کاری ۶۸: پیش‌نیازها: ۶۰، ۵۴، ۵۳، ۴۷، ۴۳، ۲۱، ۱
عنصر کاری ۲۱: پیش‌نیازها: ۱۴، ۱۲، ۶، ۵	عنصر کاری ۶۹: پیش‌نیازها: ۵۹، ۲۶، ۳۷، ۳۹، ۴۸، ۵۲، ۵۳
عنصر کاری ۲۲: پیش‌نیازها: ۱۵، ۹، ۱	عنصر کاری ۷۰: پیش‌نیازها: ۶۵، ۱۳، ۱۹، ۲۵، ۵۳، ۵۷، ۶۴
عنصر کاری ۲۳: پیش‌نیازها: ۲۱، ۲، ۱	عنصر کاری ۷۱: پیش‌نیازها: ۶۳، ۶۰، ۵۸، ۵۴، ۴۴، ۳۸، ۳۱، ۲۰
عنصر کاری ۲۴: پیش‌نیازها: ۲۰، ۱۴، ۳	عنصر کاری ۷۲: پیش‌نیازها: ۶۴، ۶۲، ۵۹، ۴۳، ۲۷، ۱۶
عنصر کاری ۲۵: پیش‌نیازها: ۲۰، ۹، ۶، ۵، ۲	عنصر کاری ۷۳: پیش‌نیازها: ۶۵، ۱۵، ۱۹، ۲۸، ۳۸، ۴۱، ۶۳
عنصر کاری ۲۶: پیش‌نیازها: ۲۲، ۱۶، ۷، ۴	عنصر کاری ۷۴: پیش‌نیازها: ۲، ۱۳، ۲۷، ۴۷، ۴۹، ۵۱، ۵۲، ۵۳
عنصر کاری ۲۷: پیش‌نیازها: ۳، ۱۰، ۱۵، ۱۷، ۱۸	عنصر کاری ۷۵: پیش‌نیازها: ۵۰، ۴۳، ۴۰، ۳۹، ۳۱، ۲۵، ۱۱
عنصر کاری ۲۸: پیش‌نیازها: ۲۵، ۲۳، ۱۶	عنصر کاری ۷۶: پیش‌نیازها: ۵۴، ۴۸، ۴۷، ۴۳، ۳۸، ۲۶، ۲۴، ۲۱، ۱۹

ادامه جدول (۳): روابط پیش‌نیازی

عنصر کاری ۲۹	پیش‌نیازها: ۲۴، ۲۱، ۱۳، ۹	عنصر کاری ۷۷	پیش‌نیازها: ۷۰، ۵۱، ۴۷، ۳۹، ۱۵
عنصر کاری ۳۰	پیش‌نیازها: ۲۹، ۲۷، ۷، ۲	عنصر کاری ۷۸	پیش‌نیازها: ۶۶، ۵۷، ۵۶، ۱۸، ۱۱، ۲
عنصر کاری ۳۱	پیش‌نیازها: ۲۸، ۹، ۵، ۳، ۲	عنصر کاری ۷۹	پیش‌نیازها: ۶۹، ۶۷، ۶۵، ۶۳، ۵۸، ۳۳، ۱۴، ۱۲، ۳
عنصر کاری ۳۲	پیش‌نیازها: ۲۱	عنصر کاری ۸۰	پیش‌نیازها: ۶۶، ۵۹، ۵۳، ۴۶، ۱
عنصر کاری ۳۳	پیش‌نیازها: ۳۱، ۲۹، ۲۷، ۲۶، ۸	عنصر کاری ۸۱	پیش‌نیازها: ۷۰، ۶۳، ۳۱، ۲۹، ۲۶، ۲۳
عنصر کاری ۳۴	پیش‌نیازها: ۳، ۷، ۸، ۱۷، ۲۲، ۲۵	عنصر کاری ۸۲	پیش‌نیازها: ۶۹، ۶۷، ۶۵، ۶۳، ۵۸، ۵۵، ۳۲، ۱۴، ۳
عنصر کاری ۳۵	پیش‌نیازها: ۲۶، ۲۴، ۱۷، ۲۱	عنصر کاری ۸۳	پیش‌نیازها: ۷۳، ۷۲، ۵۵، ۵۲، ۴۹، ۴۷، ۳۱، ۱۸
عنصر کاری ۳۶	پیش‌نیازها: ۴، ۱۳، ۲۱، ۲۵، ۲۷	عنصر کاری ۸۴	پیش‌نیازها: ۷۱، ۵۷، ۱۹
عنصر کاری ۳۷	پیش‌نیازها: ۲۹، ۱۶، ۱۵، ۱۴، ۱۲، ۷، ۶	عنصر کاری ۸۵	پیش‌نیازها: ۷۲، ۴۸، ۴۶، ۴۵، ۳۲، ۲۶، ۱۹
عنصر کاری ۳۸	پیش‌نیازها: ۳۵، ۳۴، ۲۷، ۱۳، ۲	عنصر کاری ۸۶	پیش‌نیازها: ۷۵، ۷۳، ۷۱، ۵۶، ۴۹، ۲۴، ۲۲، ۱۶
عنصر کاری ۳۹	پیش‌نیازها: ۱۰، ۱۷، ۲۸، ۳۰، ۳۳	عنصر کاری ۸۷	پیش‌نیازها: ۷۰، ۶۸، ۶۲، ۶۱، ۵۰، ۲۸، ۲۷، ۶
عنصر کاری ۴۰	پیش‌نیازها: ۳۴، ۳۲، ۲۹، ۲۶، ۱۴، ۱۲، ۶	عنصر کاری ۸۸	پیش‌نیازها: ۷۱، ۶۹، ۶۵، ۵۵، ۵۰، ۴۵، ۳۳
عنصر کاری ۴۱	پیش‌نیازها: ۳۵، ۳۳، ۲۳	عنصر کاری ۸۹	پیش‌نیازها: ۷۵، ۷۰، ۶۷، ۶۱، ۴۹، ۱۵، ۲
عنصر کاری ۴۲	پیش‌نیازها: ۲۹، ۲۳، ۱۸	عنصر کاری ۹۰	پیش‌نیازها: ۶۶، ۶۱، ۱۵، ۱۲، ۱۱، ۹
عنصر کاری ۴۳	پیش‌نیازها: ۳۶، ۳۳، ۲۸	عنصر کاری ۹۱	پیش‌نیازها: ۶۲، ۵۳، ۵۲، ۲۷
عنصر کاری ۴۴	پیش‌نیازها: ۴۲، ۴۱، ۳۴، ۲۸، ۲۴	عنصر کاری ۹۲	پیش‌نیازها: ۸۲، ۸۰، ۷۷، ۷۲، ۶۱، ۳۷، ۱۷
عنصر کاری ۴۵	پیش‌نیازها: ۴۰، ۳۷، ۳۵، ۸	عنصر کاری ۹۳	پیش‌نیازها: ۸۳، ۸۱، ۷۷، ۴۵
عنصر کاری ۴۶	پیش‌نیازها: ۴۱، ۳۹، ۳۶، ۱۸، ۱۶، ۱۲	عنصر کاری ۹۴	پیش‌نیازها: ۸۷، ۸۲، ۷۹، ۷۳، ۶۶، ۶۰، ۵۹، ۴۶، ۴۳، ۱۳
عنصر کاری ۴۷	پیش‌نیازها: ۴۲، ۴۰، ۳۶، ۳۳، ۲۲	عنصر کاری ۹۵	پیش‌نیازها: ۸۸، ۸۲، ۷۹، ۷۸، ۷۶، ۷۴، ۷۲، ۶۱، ۴۲
عنصر کاری ۴۸	پیش‌نیازها: ۳۰، ۲۳، ۱۷، ۱۴، ۹، ۵	عنصر کاری ۹۶	پیش‌نیازها: ۸۸، ۸۳، ۷۷، ۶۸، ۴۱، ۲۵، ۱۲، ۸
عنصر کاری ۴۹	پیش‌نیازها: ۳۸، ۳۳، ۲۳، ۱۲، ۵	عنصر کاری ۹۷	پیش‌نیازها: ۸۴، ۷۵، ۷۴، ۷۲، ۶۷، ۴۸، ۳۷، ۳۶، ۲۶، ۲۴
عنصر کاری ۵۰	پیش‌نیازها: ۳۴، ۲۴، ۱۰	عنصر کاری ۹۸	پیش‌نیازها: ۸۷، ۸۵، ۸۳، ۸۱، ۷۸، ۷۶، ۵۱، ۳۰، ۲۵
عنصر کاری ۵۱	پیش‌نیازها: ۴۵، ۳۶، ۳۳، ۲۰	عنصر کاری ۹۹	پیش‌نیازها: ۹۳، ۸۴، ۷۴، ۷۳، ۶۹، ۶۷، ۵۶، ۲۲
عنصر کاری ۵۲	پیش‌نیازها: ۴۶، ۴۴، ۱۹، ۹، ۱	عنصر کاری ۱۰۰	پیش‌نیازها: ۹۸، ۹۷، ۹۵، ۹۱، ۷۷، ۷۳، ۶۶، ۵۷
عنصر کاری ۵۳	پیش‌نیازها: ۵۰، ۴۵، ۳۸، ۳۲، ۳۱، ۲۳، ۱۶		

شمار ناحیه‌های کاری (ایستگاه‌های چندآپراتوره) طول خط مونتاژ را در طراحی اولیه سیستم تولیدی مشخص می‌کند؛ همچنین زمان چرخه، نرخ تولید محصول و به دنبال آن میزان نیاز به منابع انسانی و تجهیزات و تسهیلات تولیدی را تعیین می‌کند. بر این اساس، در این پژوهش مطابق با سیستم تولید شرکت

خودروسازی نمونه زمان چرخه برابر با ۱۰ و شمار ناحیه‌های کاری برابر با ۷ انتخاب شده است. جدول یک جواب اولیه شدنی برای این مسئله را نمایش می‌دهد. این جواب با کمک الگوریتم پیشنهادی در مرجع (سلیمی فرد و همکاران، ۱۳۹۳) به دست آمده است. به‌ازای این جواب مقدار تابع هدف برابر با

۵۰۳/۶۴۸ است. یادآور می‌شود که زمان کاری هر اپراتور از جمع زمان‌های عناصر کاری اختصاص داده شده به آن به دست می‌آید. همچنین درصد راندمان کاری هر اپراتور نیز از تقسیم زمان کاری اپراتور بر زمان چرخه محاسبه شده است.

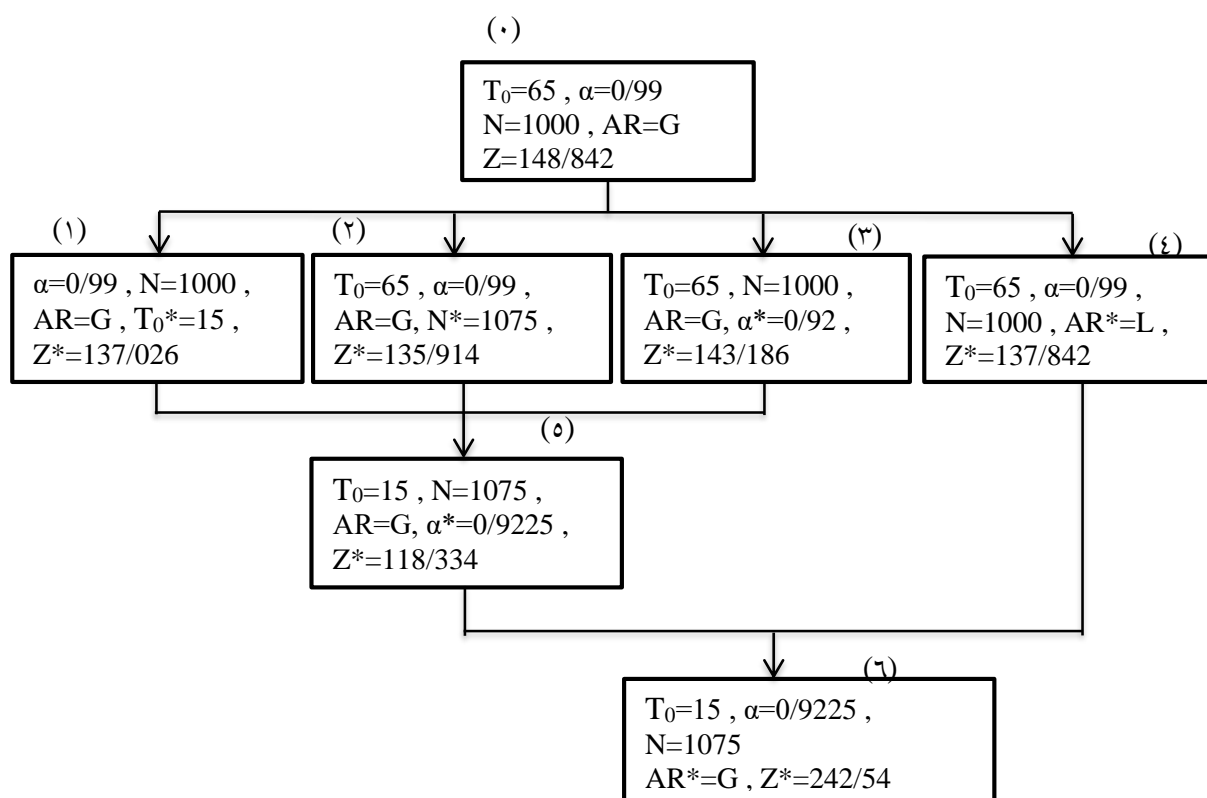
۴-۱- نتایج محاسبات

برای یافتن مقدار مناسب پارامترهای الگوریتم شبیه‌سازی تبرید در حل چنین مسائلی، با انتخاب تابع هدف به‌عنوان معیار قضاوت، مسئله بالا در گام نخست چندین بار در حالت‌های مختلف بررسی شد که در این میان خانه شماره صفر در شکل بهترین

جواب را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن خانه شماره صفر به‌عنوان حالت پایه، خانه‌های شماره ۱، ۲، ۳ و ۴ بهترین سناریوهای به دست آمده از اجرای پیاپی برنامه با تغییر در تنها یک پارامتر الگوریتم را نشان می‌دهند. **AR** قاعده کاهش دما، **G** قاعده هندسی، **L** قاعده لگاریتمی، **N** شمار تکرارها و α شیب تابع هندسی را نشان می‌دهند. با توجه به نتایج به دست آمده، بهترین مقدار تابع هدف در این گام مربوط به خانه‌های ۱ و ۲ است؛ بنابراین انتظار می‌رود با در نظر گرفتن مقادیر جدید دمای اولیه (T_0) و تعداد تکرارها (N)، مقادیر بهتر و صحیح‌تری از دو پارامتر دیگر به دست آید.

جدول (۴): جواب اولیه

اپراتور ۴			اپراتور ۳			اپراتور ۲			اپراتور ۱			ناحیه
راندمان	زمان کاری	عناصر کاری	راندمان	زمان کاری	عناصر کاری	راندمان	زمان کاری	عناصر کاری	راندمان	زمان کاری	عناصر کاری	
٪۴۶/۶	۴/۶۶	۱۸	٪۶۶/۹	۶/۶۹	۱۵.۶	٪۹۸/۵	۹/۸۵	۱۴.۹.۸.۳	٪۸۷/۱	۸/۷۱	۷.۴.۲.۱	ناحیه ۱
٪۳۳/۷	۳/۳۷	۴۲	٪۹۸/۹	۹/۸۹	۲۹.۲۸.۲۴ ۳۷.۳۱	٪۹۶/۵	۹/۶۵	۲۳.۲۱.۱۶ ۳۲.۲۶	٪۹۷/۱	۹/۷۱	۱۳.۱۲.۱۰.۵ ۲۵.۲۲.۲۰	ناحیه ۲
٪۹۷/۹	۹/۷۹	۳۹.۴۱.۴۶.۴۷	٪۸۸/۱	۸/۸۱	۵۱.۳۳.۳۸.۵۰	٪۹۸/۷	۹/۸۷	۴۰.۳۶.۳۴ ۴۸.۴۵	٪۹۵/۴	۹/۵۴	۳۵.۳۰.۲۷.۱۷	ناحیه ۳
			٪۹۱	۹/۱	۵۶.۴۴.۴۹.۵۵	٪۹۲/۴	۹/۲۴	۷۵.۵۳.۴۳	٪۹۸/۵	۹/۸۵	۵۴.۱۹.۱۱ ۶۴.۶۳	ناحیه ۴
٪۹۶/۶	۹/۶۶	۷۱.۷۰.۶۹ ۸۹.۸۴	٪۹۶/۲	۹/۶۲	۶۶.۶۵.۶۰ ۷۸.۷۲	٪۸۸/۳	۸/۸۳	۵۲.۵۸.۵۹.۷۶	٪۹۵/۳	۹/۵۳	۶۷.۶۲.۶۱.۵۷	ناحیه ۵
			٪۹۳/۸	۹/۳۸	۹۷.۷۴.۸۰.۹۱	٪۹۸/۸	۹/۸۸	۷۹.۷۳.۶۸ ۸۲.۸۱	٪۹۹/۲	۹/۹۲	۹۰.۸۸.۸۵.۷۷	ناحیه ۶
			٪۵۳/۷	۵/۳۷	۹۹.۹۶.۹۳	٪۹۸/۳	۹/۸۳	۹۸.۸۶.۸۳ ۱۰۰	۷۵/۱	۷/۵۱	۹۵.۹۴.۹۲.۸۷	ناحیه ۷



شکل ۳. نتایج تحلیل پارامترهای الگوریتم شبیه‌سازی تبرید برای مسئله نمونه

به‌دست‌آمده برای مسئله نمونه همان‌گونه که شکل نیز نشان می‌دهد، خانه شماره ۵ با تابع هدف ۱۱۸/۳۳۴ بهترین سناریو است که در آن مقدار پارامتر دمای اولیه برابر با ۱۵، شرط توقف برابر با ۱۰۷۵ تکرار، قاعده کاهش دما از نوع هندسی و با شیب ۱۰/۹۲۲۵ است. این جواب شدنی که از پیاده‌سازی الگوریتم شبیه‌سازی تبرید به دست آمده است با حل ارائه شده در جدول سازگار است.

خانه شماره ۵ با در نظر گرفتن این مقادیر جدید، بهترین سناریو حاصل از تغییرات شیب تابع هندسی (α) را نشان می‌دهد. در نهایت برای انتخاب قاعده مناسب کاهش دما از میان دو قاعده هندسی و لگاریتمی، خانه شماره ۶ با در نظر گرفتن بهترین مقادیر دیگر پارامترها تا گام پیش، بهترین وضعیت به دست آمده از مقایسه این دو قاعده را نشان می‌دهد. پس از اجرای پیاپی الگوریتم شبیه‌سازی تبرید با پارامترهای مختلف و با تجزیه و تحلیل حل‌های

جدول (۵): جواب به‌دست‌آمده از پیاده‌سازی الگوریتم شبیه‌سازی تبرید

اپراتور ۴			اپراتور ۳			اپراتور ۲			اپراتور ۱			ناحیه
راندمان	زمان کاری	عناصر کاری	راندمان	زمان کاری	عناصر کاری	راندمان	زمان کاری	عناصر کاری	راندمان	زمان کاری	عناصر کاری	
			٪۹۰/۷	۹/۰۷	۱۸،۷،۳	٪۸۶/۶	۸/۶۶	۱۵،۴،۱	٪۹۰/۵	۹/۰۵	۱۴،۹،۸،۲	ناحیه ۱
٪۸۶	۸/۶	۴۲،۶،۵	٪۹۲/۷	۹/۲۷	۲۵،۳۱،۲۳،۱۲،۱۶	٪۸۳/۲	۸/۳۲	۲۰،۲۱،۲۲،۲۴	٪۹۱/۱۶	۹/۱۱	۲۸،۱۳،۱۰، ۳۷،۳۲،۲۹	ناحیه ۲
٪۹۳/۳	۹/۳۳	۱۷،۳۹،۴۱،۵۰	٪۸۹/۵	۸/۹۵	۲۶،۳۳،۳۴،۳۸،۴۹	٪۸۴/۸	۸/۴۸	۳۶،۴۰،۴۵،۵۱	٪۹۴/۵	۹/۴۵	۴۷،۳۵،۳۰،۲۷	ناحیه ۳
			٪۹۰/۸	۹/۰۸	۱۱،۴۴،۴۶،۵۳،۵۵	٪۹۴/۶	۹/۴۶	۷۵،۵۲،۴۳	٪۹۶/۴	۹/۶۴	۷۴،۶۳،۴۸،۱۹	ناحیه ۴
٪۹۵/۹	۹/۵۹	۶۶،۶۴،۶۱، ۷۰،۶۷	٪۹۲/۶	۹/۲۶	۷۲،۶۹،۶۲،۶۰	٪۸۷/۵	۸/۷۵	۵۷،۵۸،۷۱،۸۹	٪۹۵/۴	۹/۵۴	۵۹،۵۶،۵۴، ۸۸،۶۵	ناحیه ۵
			٪۸۴/۵	۸/۴۵	۹۷،۸۰،۷۶،۶۸	٪۹۲/۱	۹/۲۱	۷۸،۸۱،۸۴،۹۱	٪۹۰/۹	۹/۰۹	۹۰،۸۵،۷۷	ناحیه ۶
			٪۹۲/۷	۹/۲۷	۷۹،۸۷،۹۶،۹۹،۱۰۰	٪۹۴	۹/۴	۹۳،۷۳،۸۲، ۹۸،۹۴	٪۹۲/۳	۹/۲۳	۹۵،۹۲،۸۶،۸۳	ناحیه ۷

۴-۲- بحث و تجزیه و تحلیل یافته‌ها

در این مقاله تابع هدف به عنوان معیار تمامی قضاوت‌ها انتخاب شده است. مکانیزم بررسی و یافتن مقدار مناسب پارامترهای الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، فرایندی بی‌پایان است؛ به‌گونه‌ای که در هر سطح با انتخاب بهترین پارامترهای به‌دست‌آمده در سطح پیش و با تغییر تنها یک پارامتر می‌توان با توجه به مقادیر تابع هدف، مقدار جدیدی برای آن پارامتر به دست آورد؛ بنابراین با توجه به ابعاد مسئله، سطح پیشروی مکانیزم و تجزیه و تحلیل توسط نگارندگان مقاله تا

سه سطح پس از حالت پایه انتخاب شده است و در این حالت بهترین سناریو ارائه شده است. با توجه به جواب به‌دست‌آمده از پیاده‌سازی الگوریتم شبیه‌سازی تبرید در جدول همان‌گونه که پیش‌تر نیز گفته شد، در این حالت الگوریتم در فرایند جستجو موفق به حذف یک ایستگاه کاری (اپراتور چهارم ناحیه نخست) شده است؛ بنابراین شمار مقایسه‌های دوه‌دو کاهش یافته و در نتیجه مقدار تابع هدف نیز بهبود شگرفی یافته است. شاخص راندمان خط (LE) که با معادله ۲۰ محاسبه می‌شود، درصد سودمندی خط را نشان می‌دهد.

$$LE = \frac{\sum_{i=1}^k ST_i}{c \cdot K} \quad (20)$$

که در آن K تعداد کل ایستگاه‌های کاری و ST_i زمان ایستگاهی ایستگاه i است (گرژچکا، ۲۰۱۱). آشکار است که وقتی در مسئله‌ای زمان چرخه (C) و مجموع زمان‌های ایستگاهی مقداری ثابت هستند، بیشینه‌سازی LE معادل کمینه‌سازی شمار ایستگاه‌ها (K) خواهد بود (بایکاس اوغلو، ۲۰۰۶)؛ بنابراین، با توجه به جواب نهایی در جدول مقدار این شاخص نیز همراه با شاخص همبار سازی بهبود می‌یابد. در حالت ایده آل با تقسیم مساوی کارها میان اپراتورهای خط که بیانگر تقسیم مساوی بیکاری‌ها نیز هست، مقدار تابع هدف که از مجموع اختلافات دو به‌دوی زمان‌های کاری ایستگاه‌ها به دست می‌آید، برابر با صفر خواهد شد. در مسئله نمونه مطرح‌شده، بزرگ‌بودن برخی زمان‌های کاری نسبت به زمان چرخه، یکی از عوامل مؤثر و پیشگیرانه برای صفر شدن تابع هدف است. همچنین، حضور پررنگ محدودیت‌های وضعیتی و ناحیه‌ای و روابط پیش‌نیازی پیچیده در این مسئله، علاوه بر افزایش مقدار نهایی تابع هدف، در فرایند الگوریتم پیشنهادی باعث سختی کار در گام ایجاد یک حل قابل قبول در هم‌سایگی جواب فعلی می‌شود. آشکار است که با حذف یا کاهش موارد یادشده، مقادیر بهتری برای تابع هدف به دست خواهد آمد.

در این پژوهش، مسئله بالانس عمودی خطوط مونتاژ چند سویه با در نظر گرفتن محدودیت‌های زمان عناصر کاری، روابط پیش‌نیازی، زمان چرخه و محدودیت‌های ناحیه‌ای به‌عنوان محدودیت‌های سخت مسئله و

محدودیت‌های وضعیتی به‌عنوان محدودیت‌های نرم مسئله، بررسی شده است. همچنین، سناریوهای مختلفی از مسئله نمونه با کمک الگوریتم شبیه‌سازی تیرید اجرا شده و بهترین آنها به‌همراه مقادیر پیشنهادی پارامترهای الگوریتم ارائه شده است. در همانندترین پژوهش‌ها، روشنی و روشنی (۱۳۸۹) این مسئله را با در نظر گرفتن محدودیت‌های وضعیتی به‌عنوان محدودیت سخت و بدون در نظر گرفتن محدودیت‌های ناحیه‌ای بررسی کرده‌اند؛ علاوه بر این، آنان با هدف کمینه‌کردن طول خط مونتاژ و تعداد کل ایستگاه‌ها، یک الگوریتم ابتکاری بر پایه رویکرد فراابتکاری کولونی مورچگان ارائه کردند. فتاحی و همکاران (۲۰۱۱) مسئله بالانس خطوط مونتاژ با ایستگاه‌های چنداپراتوره را بدون محدودیت‌های وضعیتی و ناحیه‌ای در قالب یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط مدل‌سازی کردند و در آن دو هدف کمینه‌سازی شمار کل کارگران خط و کمینه‌سازی شمار کل ایستگاه‌های کاری چنداپراتوره را مد نظر قرار دادند. کیان و فان (۲۰۱۱) نیز در پژوهش خود با تعمیم مسائل بالانس خط مونتاژ ساده به مسائل بالانس خط مونتاژ با ایستگاه‌های چنداپراتوره و با ارائه یک الگوریتم ژنتیک آمیخته ابتکاری سعی در کمینه‌سازی شمار کل کارگران به‌کارگرفته شده کردند؛ بنابراین در مقام مقایسه می‌توان بیان کرد که این مقاله با در نظر گرفتن محدودیت‌های بیشتر نسبت به کارهای دیگر پژوهشگران، سازگاری بیشتری با شرایط واقعی دارد. تابع هدف (بالانس عمودی) در کنار الگوریتم حل پیشنهادی، اجرای سناریوهای مختلف و مکانیزم

دارد. خطوط مونتاژ با ایستگاه‌های چنداُپراتوره را معمولاً می‌توان در واحدهای تولیدی محصولاتی در اندازه‌های بزرگ مانند کامیون و اتوبوس یافت. در این مقاله پس از بیان مسئله بالانس خطوط مونتاژ چندسویه، با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید سعی در بهینه‌سازی شاخص یکنواختی (SI) یا به دیگر سخن، بالانس عمودی شده است. در این راستا، با این فرض که خط مونتاژ چندسویه به‌منظور مونتاژ خودروهای سواری استفاده می‌شود، محدودیت‌های زمان عناصر کاری، زمان چرخه، محدودیت‌های ناحیه‌ای و محدودیت‌های پیش‌نیازی به‌عنوان محدودیت‌های سخت مسئله و محدودیت‌های وضعیتی به‌عنوان محدودیت نرم در نظر گرفته شده‌اند. الگوریتم برای یک مسئله نمونه با زبان برنامه‌نویسی VBA کدنویسی و اجرا شد. نتایج حاصل از اجرا نشان‌دهنده کارایی بالای الگوریتم شبیه‌سازی تبرید در دستیابی به هدف یادشده است. باید یادآور شد که پارامترهای الگوریتم شبیه‌سازی تبرید نقش تعیین‌کننده‌ای در هدایت فرایند جستجو دارند؛ بنابراین، انتخاب مقادیر صحیح این پارامترها و پیشگیری از دام بهینگی محلی، شانس یافتن جواب بهینه واقعی مسئله را به مراتب بالا خواهد برد. در این مقاله، سناریوهای مختلفی از مسئله نمونه اجرا شده است و در نهایت با انتخاب تابع هدف به‌عنوان معیار قضاوت، بهترین سناریو به‌همراه مقادیر پیشنهادی پارامترهای الگوریتم ارائه شده است.

براساس آنچه پیش‌تر گفته شد، می‌توان بیان کرد که در این پژوهش برای نخستین بار از الگوریتم استاندارد

یافتن پارامترهای مناسب الگوریتم، بیانگر رویکردی نو در این مقاله هستند.

۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در بسیاری از صنایع تولیدی و مونتاژی، بالانس خط مونتاژ از اهمیت بالایی در افزایش بهره‌وری و کیفیت کالای تولیدی برخوردار است. با وجود کارهایی که در زمینه طراحی و بالانس خطوط مونتاژ انجام شده است، الگوریتم‌های علمی به اندازه کافی توسط شرکت‌های صنعتی استفاده نمی‌شوند. این موضوع به این دلیل است که با وجود اثربخشی و آسانی استفاده از این الگوریتم‌ها، آنها از داده‌های کمی استفاده می‌کنند و اجازه می‌دهند که مقادیر شگرفی از اطلاعات از دست بروند. روش‌های کارا در بالانس خط مونتاژ و برنامه‌ریزی منابع باید بتواند هدف‌های ناسازگار یا اولویت‌های کاربران را در نظر بگیرند. آنها باید به اندازه کافی سریع باشند تا به طراح اجازه دهند که گزینه‌های بسیاری را آزمون کند (رکبیک و همکاران، ۲۰۰۳). در ایران گاهی عمل بالانس خط به‌صورت سعی و خطا و به‌شکل دستی توسط متخصصان و مهندسان انجام می‌پذیرد. این شیوه در بسیاری از موارد کند (زمانبر) است و قابلیت تغییر سریع در مقابل تغییرات بازار و نرخ تقاضای مشتری را ندارد. از سوی دیگر این عمل با خطاهای انسانی زیادی انجام می‌پذیرد.

مسئله بالانس خط مونتاژ با ایستگاه‌های چنداُپراتوره، نوع جدیدی از مسائل بالانس خط مونتاژ تعمیم‌یافته است که در آن با توجه به ویژگی‌های محصول، امکان تخصیص بیش از یک اپراتور به هر ایستگاه وجود

شبیه سازی تبرید در راستای بهینه سازی یک مسئله بالانس خطوط مونتاژ با ایستگاه های چندپراتوره استفاده شد. وجود محدودیت نرم در کنار محدودیت های سخت مسئله، تعریف (فرمول بندی) جدیدی از تابع هدف (بالانس عمودی) و نیز مکانیزم پیشنهادی برای یافتن پارامترهای مناسب الگوریتم، بیانگر رویکردی نو و متفاوت نسبت به پژوهش های همانند است. همچنین، ابعاد واقعی مسئله نمونه، ترکیب خاص محدودیت های مسئله، انطباق بهتر تابع هدف با تعریف علمی مسئله بالانس عمودی را می توان ویژگی های بارز این پژوهش در راستای سازگاری بیشتر مسایل آکادمیک با شرایط واقعی دانست. برای کارهای آینده، مقایسه الگوریتم شبیه سازی تبرید با دیگر الگوریتم های فراابتکاری، تغییر تابع هدف به تابع چندهدفه که دربرگیرنده راندمان خط نیز باشد، تغییر معیار قضاوت در انتخاب بهترین سناریو از تابع هدف به فراوانی جواب های مناسب، تغییر تابع هدف با در نظر گرفتن جریمه برای نقض محدودیت های وضعیتی (محدودیت نرم مسئله)، در نظر گرفتن محدودیت کارهای چندپراتوره، محدودیت کارهای ناسازگار، محدودیت کارهای دارای وضعیت نامشخص و ادامه پیشروی مکانیزم بررسی پارامترهای الگوریتم به سطوح بعد پیشنهاد می شود.

منابع

روشنی، ع.، روشنی، ع. (۱۳۸۹). در نظر گرفتن محدودیت های وضعیتی در حل مسائل بالانس خطوط مونتاژ با ایستگاه های

چندپراتوره: خطوط مونتاژ چندطرفه. هفتمین کنفرانس بین المللی مهندسی صنایع. اصفهان.

سلیمی فرد، خ.، قاسمی، ر.، پاسبان، ا. (۱۳۹۳). ارائه روشی ابتکاری برای حل مسئله بالانس خطوط مونتاژ با ایستگاه های چندپراتوره. دوازدهمین کنفرانس بین المللی مدیریت. تهران.

فتاحی، پ. (۱۳۸۸). الگوریتم های فراابتکاری. همدان: انتشارات دانشگاه بوعلی سینا.

کلاهان، ف.، بهروزفر، ع. (۱۳۸۶). تخصیص اجزای مازاد در سیستم های سری - موازی با استفاده از الگوریتم شبیه سازی تبرید. هفتمین همایش سالانه (بین المللی) انجمن هوا فضای ایران. تهران: دانشگاه صنعتی شریف.

کلاهان، ف.، دوست پرست، م. (۱۳۸۴). کاربرد الگوریتم شبیه سازی تبرید در برنامه ریزی بهینه نت پیشگیرانه. سومین کنفرانس ملی نگهداری و تعمیرات. تهران: سیولیکا.

کلاهان، ف.، رفیعی ثانی، ع. (۱۳۸۳). برنامه ریزی تولید خطوط مونتاژ چندمدله خودرو به کمک الگوریتم ابتکاری Tabu-SA

کلاهان، ف.، سعادتیان، س.، بیرون روه، م.، حمیدی نژاد، م. (۱۳۸۷). تعیین سطوح بهینه پارامترهای تنظیمی در جوشکاری با الکتروود تنگستن (TIG) به کمک مدل سازی ریاضی و الگوریتم شبیه سازی تبرید. نهمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران. بیرجند.

مرعشی، ن. (۱۳۸۵). ارزیابی کار و زمان (چاپ پنجم). تهران: کارآفرینان بصیر.

Bartholdi, J. (1993). "Balancing two-sided assembly lines: a case study". *International Journal of Production Research*, 31, 2447-2461.

- Kilincci, O., & Bayhan, G. (2006). "A Petri net approach for simple assembly line balancing problems". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (30), 1165-1173.
- Özbakır, L., & Tapkan, P. (2011). "Bee colony intelligence in zone constrained two-sided assembly line balancing problem". *Expert Systems with Applications*, 38, 11947–11957.
- Qian, X., & Fan, Q. (2011). "Solving Multi-manned Assembly Line Balancing Problem by a Heuristic-mixed Genetic Algorithm". International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering (pp. 320-323). IEEE.
- Rekiek, B., Doigui, A., Delchambre, A., & Bratcu, A. (2002). "State of art of optimaization methods for assembly line design". *Annual Reviews in Control*, 26, 163-174.
- Roshani, A., & Roshani, A. (2012). "Multi-manned Assembly Line Balancing Problem: Minimizing Cycle Time". Proceedings of the IIE Asian Conference, (pp. 612-620).
- Roshani, A., Roshani, A., Roshani, A., Salehi, M., & Esfandyari, A. (2013). "A simulated annealing algorithm for multi-manned assembly line balancing problem." *Journal of Manufacturing Systems*, 32, 238– 247.
- Scholl, A., & Boysen, N. (2009). "Designing parallel assembly lines with split workplaces: Model and optimization procedure". *International Journal of Production Economics*, 119, 90-100.
- Sepahi, A., & Jalali Naini, S. (2014). "Multi-manned Assembly Line Balancing Problem with Variable Task Times". *European Journal of Academic Essays*, 1(4), 68-75.
- Sivasankaran, P., & Shahabudeen, P. (2014). "Literature review of assembly line balancing problems". *Int J Adv Manuf Technol*, 73(9-12), 1665-1694.
- Baybars, I. (1986). "A survey of exact algorithms for the simple assembly line balancing problem". *Management Science*, 32(8), 909-932.
- Baykasoğlu, A. (2006). "Multi-rule multi-objective simulated annealing algorithm for straight and U type assembly line balancing problems". *Journal of Intelligent Manufacturing*, 17, 217–232.
- Becker, C., & Scholl, A. (2006). "A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing". *European Journal of Operational Research*, 168, 694 – 715.
- Boysen, N., Fliedner, M., & Scholl, A. (2007). "A classification of assembly line balancing problems". *European Journal of Operational Research* (183), 674-693.
- Cevikcan, E., Durmusoglu, M., & Unal, M. (2009). "A team-oriented design methodology for mixed model assembly systems". *Computers & Industrial Engineering*, 56, 576–599.
- Chang, H.-J., & Chang, T.-M. (2010). "Simultaneous Perspective-Based Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem". *Tamkang Journal of Science and Engineering*, 13(3), 327-336.
- Dimitriadis, S. (2006). "Assembly line balancing and group working: A heuristic procedure for workers' groups operating on the same product and workstation". *Computers & Operations Research*, 33, 2757-2774.
- Fattahi, P., Roshani, A., & Roshani, A. (2011). "A mathematical model and ant colony algorithm for multi-manned assembly line balancing problem". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 53, 363–378.
- Grzechca, W. (2011). "Cycle Time in Assembly Line Balancing Problem". 21st International Conference on Systems Engineering (171-174). IEEE.
- Guo, Q., & Tang, L. (2009). "A scatter search based heuristic for the balancing of parallel assembly lines". Joint 48th IEEE Conference on Decision and Control and 28th Chinese Control Conference (pp. 6256-6261). Shanghai, P.R. China: IEEE.
- Kelleoguz, T., & Toklu, B. (2012). "An efficient branch and bound algorithm for assembly line balancing problems with parallel multi-manned workstations". *Computers & Operations Research*, 39, 3344 – 3360.

پی نوشت:

- ¹ (Boysen, Fliedner, & Scholl, 2007)
- ² Cycle Time
- ³ (Scholl & Boysen, 2009)
- ⁴ (Kilinceci & Bayhan, 2006)
- ⁵ (Becker & Scholl, 2006)
- ⁶ (Sivasankaran & Shahabudeen, 2014)
- ⁷ Baybars
- ⁸ simple assembly line balancing problem
- ⁹ generalized assembly line balancing problem
- ¹⁰ (Özbakır & Tapkan, 2011)
- ¹¹ mixed-model
- ¹² paralleling
- ¹³ Multi-manned assembly line balancing problem
- ¹⁴ feasible worker concentration
- ¹⁵ (Fattahi, Roshani, & Roshani, 2011)
- ¹⁶ (Qian & Fan, 2011)
- ¹⁷ (Dimitriadis, 2006)
- ¹⁸ Heuristic-mixed Genetic Algorithm
- ¹⁹ (Chang & Chang, 2010)
- ²⁰ (Cevikcan, Durmusoglu, & Unal, 2009)
- ²¹ (Kelleoglu & Toklu, 2012)
- ²² One-sided
- ²³ Two-sided
- ²⁴ Long product flow time
- ²⁵ several work-in-process
- ²⁶ positional constraints
- ²⁷ Bartholdi
- ²⁸ Zoning constraints
- ²⁹ zone
- ³⁰ Insufficiency of station area
- ³¹ Kirk Patrick
- ³² Cerny
- ³³ (Baykasoğlu, 2006)
- ³⁴ (Grzechca, 2011)
- ³⁵ Heuristic-mixed Genetic Algorithm
- ³⁶ (Rekiek, Doigui, Delchambre, & Bratcu, 2002)