International Journal of Industrial Engineering & Production Management (2015)
September 2015, Volume 26, Number 3
pp. 355-370

http://IJIEPM.iust.ac.ir/

MULTI-MANNED ASSEMBLY LINE BALANCING USING TABU SEARCH ALGORITHM

Khodakaram Salimifard*, Rahim Ghasemiyeh & Smaeel Pasban

Khodakaram Salimifard, *Assistant Professor of Management Science, Department of Industrial Management, Persian Gulf University, Bushehr 75168, Iran*
Rahim Ghasemiyeh, *Assistant Professor of Production Management, Department of Industrial Management, Persian Gulf University, Bushehr 75168, Iran*
Smaeel Pasban, *Master Student, Department of Industrial Management, Persian Gulf University, Bushehr 75168, Iran*

Keywords

Multi-manned workstation,
Assembly line balancing,
Tabu search algorithm,
Hard constraint

ABSTRACT

Assembly line balancing is an effective strategy for reducing costs and increasing efficiency in car manufacturing industry. It is, in fact, assigning tasks to workstations in such a way as to minimize assembly costs, demand are met, and assembly constraints are satisfied. Multi-manned assembly line, to the extent, is used in modern assembly systems. These lines characteristics contribute to the increasing complexity of the assembly line, comparing to simple assembly lines. In this paper, using Tabu Search heuristics, a new approach to multi-manned assembly line balancing is proposed. Hard constraints include zone constraints, element process times, cycle time constraints, and precedence constraints. Positions constraints are considered as soft constraints. Using real data from an Iranian car manufacturing company, the capability of the proposed approach was evaluated. In order to find suitable parameters for the algorithm, different scenarios were run on the case data and the most suitable parameters were proposed. Results show that the proposed approach is very powerful in achieving the goals of multi-manned line balancing problem.

© 2015 IUST Publication, IJIEPM. Vol. 26, No. 3, All Rights Reserved

نشـــریه بین المللـــی مهنـــدسی صنـــایع و مدیـــریت تولیـــد

شمـــاره ۳، جلـــد ۲۶، پاییز ۱۳۹۴

صفحـــه ۳۷۰-۳۵۶

ISSN: 2008-4870

http://IJIEPM.iust.ac.ir/

بالانس خطوط مونتاژ با ایستگاه‌های چند اپراتوره با الگوریتم جستجوی ممنوع

خداکرم سلیمی‌فرد*، رحیم قاسمیه و اسماعیل پاسبان

کلمات کلیدی

ایستگاه‌های چند اپراتوره، بالانس خط مونتاژ، الگوریتم جستجوی ممنوع، محدودیت سخت

چکیده:

بالانس خط مونتاژ یک استراتژی اثربخش برای کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری در صنعت خودروسازی است. در واقع این مسئله تخصیص کارهای مختلف به ایستگاه‌های کاری است به گونه‌ای که هزینه‌های مونتاژ کمینه، تقاضاها تامین، و محدودیت‌های فرآیند مونتاژ برآورده شوند. خطوط مونتاژ با ایستگاه‌های چند اپراتوره، به گستردگی در سیستم‌های مونتاژی نوین بکار گرفته می‌شود. مشخصه‌های این خطوط باعث افزایش پیچیدگی آن‌ها نسبت به خطوط مونتاژ ساده می‌گردد. در این مقاله، با بکارگیری هیوریستیک الگوریتم جستجوی ممنوع و ارایه یک الگوریتم پیشنهادی برای ایجاد همسایگی، رویکردی نو برای بالانس خطوط مونتاژ چند اپراتوره پیشنهاد می‌گردد. محدودیت‌های سخت دربرگیرنده محدودیت‌های ناحیه‌ای، زمان عناصر کاری، زمان چرخه و محدودیت‌های پیشنیازی است. محدودیت‌های وضعیتی نیز محدودیت نرم می‌باشند. با بکارگیری داده‌های واقعی خط مونتاژ یک شرکت خودروسازی ایرانی، توانمندی رویکرد پیشنهادی بررسی گردید. برای یافتن مقدار مناسب پارامترهای الگوریتم، سناریوهای گوناگونی بر روی خط مونتاژ مطالعه موردی اجرا شد و بهترین سناریو و مقادیر پارامترهای الگوریتم پیشنهاد گردیده است. یافته‌ها نشان می‌دهد که رویکرد پیشنهادی در دستیابی به هدف‌های مساله بالانس خط، بسیار توانمند می‌باشد.

۱. مقدمه

در فرایند مونتاژ قطعات و اجزای ساخته شده (سازنده) و زیرمونتاژی برای تولید یک محصول نهایی، بر روی یکدیگر نصب می‌شوند [۱]. یک خط مونتاژ مجموعه‌ای از ایستگاه‌های پی در پی است که به واسطه یک سیستم حمل مواد مانند نوار نقاله، به یکدیگر متصل هستند. در این خط، اجزای سازنده محصول، یکی پس از دیگری، مونتاژ می‌شوند و از یک ایستگاه به ایستگاه بعدی جابجا می‌شوند تا در ایستگاه آخر، به محصول نهایی تبدیل گردند [۲]. خطوط مونتاژ در شمار زیادی از صنایع، برای تولید حجم بالایی از محصولات استاندارد همگن بکار گرفته می‌شوند. امروزه، این خطوط، حتی در تولید محصولات سفارشی با شمار کم نیز اهمیت یافته‌اند.

در برنامه‌ریزی یک سیستم خط مونتاژ، کل حجم کار تا جایی به عناصر کاری[۱] تقسیم می‌شود که تقسیم بیشتر کار موجب ایجاد خرده‌کارها[۲] (عناصر کاری زاید) و افزایش در حجم کاری کل گردد. به هر ایستگاه کاری مجموعه‌ای از این عناصر کاری اختصاص داده می‌شود که عملیات یا بار کاری ایستگاه نامیده می‌شود [۳-۴]. مساله گروه‌بندی و تخصیص عناصر کاری به ایستگاه‌ها به گونه‌ای که یک یا چند هدف در ارتباط با محدودیت‌های خاصی بهینه شوند، مساله بالانس خط مونتاژ (ALBP[۳]) شناخته می‌شود [۵]. افزون بر این، در پژوهش‌های پیشین، مساله همبارسازی خط مونتاژ (بالانس عمودی) که در پی دستیابی به توزیع متوازن بارکاری در طول خط تولید است [۶]، با مساله بالانس خط مونتاژ

تاریخ وصول: ۹۱/۰۶/۲۹

تاریخ تصویب: ۹۲/۱۰/۱۱

رحیم قاسمیه، استادیار گروه مدیریت صنعتی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ghasemiyeh@pgu.ac.ir.

اسماعیل پاسبان، دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت صنعتی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، smaeel.pasban@gmail.com

***نویسنده مسئول مقاله: دکتر خداکرم سلیمی‌فرد**، استادیار گروه مدیریت صنعتی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، salimifard@pgu.ac.ir

مترادف خوانده شده است درحالی‌که شاخص همبارسازی یکی از شاخص‌های سنجش کیفیت نتایج نهایی مساله بالانس است و به عنوان هدف اصلی مطرح نیست [۷]، با این حال این تعاریف نیز مغایرتی با تعریف کلی ارایه شده در بالا ندارند. مساله بالانس خط مونتاژ مهم‌ترین کار در برنامه‌ریزی تولید میان‌مدت است [۶] . هنگام بالانس خط مونتاژ، سه محدودیت پایه‌ای زیر باید در نظر گرفته شوند [۵و۸]:

۱) محدودیت روابط پیشنیازی: برخی کارها تنها زمانی می‌توانند آغاز شوند که برخی کارهای دیگر به پایان رسیده باشند.
۲) محدودیت تخصیص: هر کار باید تنها به یک ایستگاه اختصاص داده شود. شمار ایستگاه‌های کاری نمی‌تواند بیش از شمار کارها باشد و کمترین شمار ایستگاه‌های کاری یک است.
۳) محدودیت زمان چرخه: زمان چرخه، بازه زمانی میان پایان کار دو قطعه کار یا بیشترین زمان در دسترس برای تولید هر قطعه کار در هر ایستگاه‌کاری است. از آن جا که در هر دوره زمانی به اندازه c، یک واحد محصول جدید وارد ایستگاه می‌شود، مدت زمان عملیات هر ایستگاه محدود به زمان چرخه c خواهد بود [۹]. زمان چرخه باید بزرگتر و یا مساوی با بیشینه زمان همه ایستگاه‌ها و بیشینه زمان همه کارها باشد. به دیگر سخن، زمان ایستگاه (برابر با مجموع زمان پردازش همه کارهای انجام شده در آن ایستگاه) نباید از زمان چرخه بیشتر شود.

خط مونتاژ همراه با تولید انبوه خودرو، فراگیر شد [۹]. با افزایش بکارگیری خطوط مونتاژ، بالانس نمودن خط مونتاژ به عنوان یک مساله پژوهش عملیاتی را نخستین بار برایتون تعریف نمود. وی اندازه ایستگاه‌های کاری را ثابت، زمان‌های ایستگاهی را برای همه ایستگاه‌ها، برابر و وظایف کاری را در قالب حرکت در میان ایستگاه‌های کاری فرض کرد [۸]. سالوسن نخستین بار مساله بالانس خط مونتاژ را به عنوان یک مساله بهینه‌سازی ترکیبی مطرح کرد. از آن پس، این مساله یک موضوع جالب برای پژوهشگران شده است [۹-۱۰]. مسایل بالانس خطوط مونتاژ به دو گروه مسایل ساده (SALBP[۴]) و مسایل تعمیم یافته (GALBP[۵]) دسته‌بندی می‌گردد [۱۱]. مساله بالانس خط مونتاژ ساده به دلیل فرضیات محدود کننده‌ای که دارد، با سیستم‌های مونتاژ دنیای واقعی بسیار متفاوت است. در حالیکه مسایل تعمیم یافته بالانس خط مونتاژ ویژگی‌هایی مانند توابع هزینه، تولید مدل مختلط[۶]، موازی‌سازی، انتخاب تجهیزات، چیدمان خط U شکل و بسیاری دیگر را نیز در نظر می‌گیرد [۱۲-۱۳].

مساله بالانس خطوط مونتاژ با ایستگاه‌های چند اپراتوره (MALBP[۷])، نوع جدیدی از مسایل بالانس خط مونتاژ تعمیم‌یافته است که در آن با توجه به ویژگی‌های محصول، امکان تخصیص بیش از یک اپراتور به هر ایستگاه وجود دارد [۱۳]. در این نوع خط، در هر ایستگاه گروهی از کارگران به طور همزمان عملیات مختلفی را بر روی یک محصول انجام می‌دهند. شمار کارگرانی که می‌توانند در هر ایستگاه چند اپراتوره گمارده شوند به حداکثر تراکم موجه کارگران محدود می‌شود. این تراکم را طراح سیستم با توجه به اندازه و ساختار محصول، در دسترس‌پذیری ابزارها، طراحی ایستگاه‌کاری، الگوی جریان مواد و مانند اینها تعیین می‌کند [۱-۱۳].

خطوط مونتاژ با ایستگاه‌های چند اپراتوره نسبت به خطوط مونتاژ ساده دارای چندین سودمندی است. بهبود بالقوه راندمان خط، دستیابی به نرخ‌های بالای تولید (و دستیابی به زمان کوتاهتر چرخه) هنگامیکه برخی از زمان‌های کاری بیش از زمان چرخه می‌باشند، افزایش قابلیت اطمینان به دلیل چند اپراتوره بودن ایستگاه کاری [۱۴]، و طول کمتر خط مونتاژ از سودمندی‌های خط مونتاژ چند اپراتوره است [۱]. افزون بر این، کاستن از جابجایی کارگران و نیز کاستن از هزینه راه‌اندازی نیز از سودمندی‌های این گونه خط مونتاژ است [۱۳].

علی‌رغم فراوانی بکارگیری ایستگاه‌های چند اپراتوره در سیستم‌های مونتاژی جهان، توجه کمی به حل مساله بالانس این خطوط شده است. نخستین بار دیمتریادیس [۱] خطوط مونتاژ با ایستگاه‌های چند اپراتوره را مورد توجه قرار داد. وی یک الگوریتم ابتکاری دو مرحله‌ای را برای حل مساله بالانس خطوط مونتاژی با ایستگاه‌های چند اپراتوره با هدف کمینه سازی شمار ایستگاه‌های کاری با نگهداشت بهینگی شمار اپراتورها، ارایه نموده است [۱۵].

باکچین و مشین [۱۶]، بالانس خط مونتاژ را یک نوع مساله طراحی مهم می‌دانند. آنان یک روش‌شناسی طراحی برای خطوط مونتاژ با ایستگاه‌های چند اپراتوره (با عنوان سیستم‌های مونتاژ تیم‌گرا) ارایه نمودند که مبتنی بر تخصیص عناصر کاری به تیم‌ها بر طبق ساختار لیست مواد محصول است. تصمیمات این مساله طراحی چند هدفه شامل شمار مورد نیاز تیم‌ها، روابط میان آن‌ها، اندازه تیم و محتوای کاری هر تیم است. آنان همچنین یک رویه سریع حل ابتکاری مبتنی بر الگوریتم شاخه و کران پسرو را پیشنهاد دادند. سویکان و همکاران [۱۷]، یک مدل ریاضی برای ایجاد تیم‌های مونتاژی (ایستگاه‌های چند اپراتوره) در خط مونتاژ مختلط و نیز بالانس آن، و نیز یک الگوریتم ابتکاری زمان‌بندی برای حل آن ارایه دادند.

روشنی و روشنی [۱۵] خطوط مونتاژ با ایستگاه‌های چند اپراتوره همراه با محدودیت‌های وضعیتی را با عنوان خطوط مونتاژ چند سویه مد نظر قرار دادند. این پژوهشگران در کار خود هر وضعیت را به عنوان یک ایستگاه در نظر گرفته‌اند و با ارایه یک الگوریتم ابتکاری بر پایه رویکرد فراابتکاری کولونی مورچگان، مساله را با کمینه کردن طول خط مونتاژ (شمار ایستگاه‌های کاری چند اپراتوره) به عنوان نخستین هدف و شمار کل ایستگاه‌های کاری منفرد به عنوان دومین هدف، بررسی کرده‌اند. چانگ و چانگ [۱۸]، مساله بالانس خطوط مونتاژ مختلط با ایستگاه‌های چند اپراتوره را بررسی کردند و یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح

برای حل مساله تولید همزمان[8] و با هدف تعیین شمار بهینه ایستگاه‌های کاری ارایه نمودند. با کمک این مدل پیشنهادی و از طریق انجام شبیه‌سازی، شمار ایستگاه‌های کاری و شمار کارگران هر یک از ایستگاه‌های چند اپراتوره قابل تعیین است. یزدان‌پرست و حاجی‌حسینی [۲] زمان پردازش عناصر کاری را وابسته به تراکم کارگران در هر ایستگاه چند اپراتوره (مساله بالانس خطوط مونتاژ با ایستگاه‌های چند اپراتوره تعمیم یافته[9]) را بررسی نمودند. از دیدگاه آنان تراکم شدید کارگران در یک ایستگاه، زمان پردازش کار را افزایش می‌دهد و از اینرو یک مدل ریاضی برای حل مساله کمینه‌سازی شمار کارگران و نیز کمینه‌سازی شمار ایستگاه‌های کاری پیشنهاد دادند.

فتاحی و همکاران [۱۳] معتقدند که هدف اصلی در پیکربندی خطوط مونتاژ با ایستگاه‌های چند اپراتوره، کاهش طول خط مونتاژ ساده است بطوری که اثربخشی کل خط، بهینه باقی بماند. آنان یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط ارایه و در آن دو هدف کمینه‌سازی شمار کل کارگران خط (به عنوان هدف نخست) و کمینه‌سازی شمار کل ایستگاه‌های کاری چند اپراتوره (به عنوان هدف دوم) را مد نظر قرار دادند. همچنین، آنان برای حل این مساله در مقیاس‌های متوسط و بزرگ، یک رویکرد بهینه‌سازی کولونی مورچگان ارایه دادند. کیان و فان [۱۴] نیز در پژوهش خود با تعمیم مسایل بالانس خط مونتاژ ساده به مسایل بالانس خط مونتاژ با ایستگاه‌های چند اپراتوره و با ارایه یک الگوریتم ابتکاری ژنتیک آمیخته[10] سعی در کمینه‌سازی شمار کل کارگران بکار گرفته شده نمودند. کلگوز و توکلو [۱۹] در پژوهش خود، مساله بالانس خطوط مونتاژ با ایستگاه‌های چند اپراتوره را با هدف کمینه‌سازی شمار کل کارگران مورد نیاز مورد بررسی قرار دادند. آنان برای حل این مساله، یک الگوریتم شاخه و کران پیشنهادی ارایه نمودند و آن را با الگوریتم دیگری در ادبیات موضوعی که مبتنی بر الگوریتم شاخه و کران است، مقایسه نمودند.

اگر تخصیص عملیات به ایستگاه‌های کاری تنها محدود به روابط پیشنیازی و زمان چرخه باشد، شاید برخی از اپراتورها در پایان فرایند بالانس‌سازی، مسئول انجام عملیاتی از فرایند مونتاژ در ایستگاه‌های کاری چند اپراتوره مربوط به خود گردند که به جابجایی‌های پی در پی آن‌ها در اطراف واحدهای کاری بیانجامد. حال آنکه، در برخی از شرکت‌های تولیدی که اندازه محصول آن‌ها بزرگ است، این جابجایی‌ها از دیدگاه اقتصادی زیان‌آور است. از این رو معمولا در چنین واحدهایی، طراح خط با در نظر گرفتن محدودیت‌های وضعیتی، به گونه‌ای عملیات را به اپراتورهای هر ایستگاه کاری چند اپراتوره اختصاص می‌دهد که هر اپراتور مسئول انجام عملیات بر روی واحدهای کاری گردد که نیازمند وضعیت خاصی از واحد کاری برای مثال سوی راست یا چپ آن می‌باشد [۱۵].

در این پژوهش، افزون بر محدودیت‌های وضعیتی، محدودیت‌های ناحیه‌ای[11] نیز در نظر گرفته شده‌اند. این نوع محدودیت بیانگر این است که کارها باید به ایستگاه کاری واحدی اختصاص یابند (محدودیت ناحیه‌ای مثبت) یا اینکه کارها نباید به ایستگاه کاری واحدی اختصاص یابند (محدودیت ناحیه‌ای منفی). یک محدودیت ناحیه‌ای مثبت هنگامی رخ می‌دهد که برخی‌کارها به ابزار یا تجهیزات یکسانی نیاز دارند. محدودیت ناحیه‌ای منفی هنگامی رخ می‌دهد که به علت اختصاص این کارها به ایستگاه یکسان، یک نارسایی ایستگاهی[12] پدید آید [۲۰]. با توجه به این که خط مونتاژ در این مقاله برای مونتاژ خودروهای سواری بکار برده می‌شود، محدودیت‌های زمان کاری، محدودیت ناحیه‌ای و محدودیت‌های پیشنیازی به عنوان محدودیت‌های سخت مساله و محدودیت‌های وضعیتی به عنوان محدودیت نرم در نظر گرفته شده است. دراین راستا، یک رویکرد حل با استفاده از الگوریتم فراابتکاری جستجوی ممنوع پیشنهاد و بر روی یک مساله با داده‌های واقعی پیاده‌سازی می‌گردد. شایان توجه است که در این مقاله، وجود یک محدودیت نرم مساله در کنار چند محدودیت سخت و همچنین مکانیزم منحصر به فرد دستیابی به پارامترهای مناسب الگوریتم، بیانگر سخنی نو در زمینه بالانس خطوط مونتاژ با ایستگاه‌های چند اپراتوره می‌باشند. در ادامه، هر اپراتور به عنوان یک ایستگاه‌کاری و هر ایستگاه چند اپراتوره، با نام یک ناحیه کاری[13] مورد بررسی قرار می‌گیرد.

مساله بالانس خطوط مونتاژ با ایستگاه‌های چند اپراتوره همانند سایر مسایل ALB در کلاس NP-Hard مسایل بهینه‌سازی ترکیبی قرار دارد [۱۳-۲۰]. در این مسایل، اگر m عنصر کاری و r محدودیت مرتب‌سازی در دست باشد، آنگاه به شمار $\frac{m!}{2^r}$ توالی کاری ممکن وجود خواهد داشت. با چنین فضای جستجوی گسترده، یافتن جواب بهینه با استفاده از الگوریتم‌های قطعی، تقریباً ناشدنی است [۱۰]. بر این اساس، در ادبیات نظری روش‌های ابتکاری و فراابتکاری بسیاری برای حل مسایل بالانس خطوط مونتاژ پیشنهاد شده‌اند. الگوریتم جستجوی ممنوع نیز به عنوان یک الگوریتم فراابتکاری توانمند در مسایل مختلف و به شکل‌های مختلف بکار گرفته شده است. لاپیر و همکاران [۲۱] در پژوهش خود شکل جدیدی از الگوریتم جستجوی ممنوع را ارایه نموده و عملکرد آن را در حل مساله بالانس خطوط مونتاژ ساده (نوع یک) بررسی کردند. همچنین آنها الگوریتم پیشنهادی خود را بر روی مجموعه‌ای از داده‌های واقعی با ۱۶۲ عنصر کاری آزمایش نمودند و توانمندی و انعطاف‌پذیری آن را به اثبات رساندند.

سوانارونگسرای و پیونجدونریون [۲۲] الگوریتم جستجوی ممنوع را برای حل مساله بالانس خط مونتاژ U شکل پیشنهاد کردند. آنان سه مساله از مسایل موجود در ادبیات موضوعی را انتخاب و مورد آزمون قرار دادند و با کمک این روش پیشنهادی توانستند علاوه بر تعیین تعداد کارهای اختصاص داده شده به هر ایستگاه کاری، توالی کارها برای هر ایستگاه را نیز بر اساس محدودیت‌های پیشنیازی مشخص کنند. همچنین این دو پژوهشگر در مقاله‌ای دیگر [۲۳] یک رویکرد آمیخته هوشمند برای حل مسایل بالانس

خط مونتاژ ارایه نموده‌اند. در این رویکرد پیشنهادی، الگوریتم جستجوی ممنوع برای تعیین کارهای اختصاص داده شده به هر ایستگاه کاری، و تکنیک جایگشت تصادفی جزیی[۱۴] برای تعیین توالی کارها در هر ایستگاه مورد استفاده قرار گرفته است.

پاستور و همکاران [۲۴] نیز در پژوهش خود به حل یک مساله بالانس خط مونتاژ تعمیم یافته واقعی با ۴۰۰ عنصر کاری پرداختند. مساله مورد بررسی توسط آنان از نوع چند هدفه و چند محصولی بوده که برای حل آن از یک رویکرد آمیخته، شامل ۴ روش ابتکاری در ادبیات موضوعی و ۲ رویکرد جستجوی ممنوع استفاده گردیده است. در این پژوهش، الگوریتم جستجوی ممنوع به منظور کمینه‌سازی زمان چرخه و افزایش یکنواختی کارهای انجام شده در هر یک از ایستگاه‌های کاری بکار گرفته شده است. اوزکان و توکلو [۲۵] نیز پژوهشگرانی هستند که از الگوریتم جستجوی ممنوع برای بالانس خطوط مونتاژ دو سویه[۱۵] استفاده نموده‌اند. آنان در پژوهش خود در راستای بهبود دو شاخص کارایی و یکنواختی تلاش کردند و عملکرد الگوریتم پیشنهادی خود را در بر روی مجموعه‌ای از مسایل آزمایشی موجود در ادبیات نظری مورد آزمون قرار دادند. نتایج محاسباتی این پژوهش نشان داد که در مقایسه با رویکردهای موجود، الگوریتم پیشنهادی توانمند است.

بطور کلی، الگوریتم جستجوی ممنوع را می‌توان به عنوان یک استراتژی جستجوی محلی در نظر گرفت که از یک پاسخ آغازین شروع کرده و در اطراف آن پاسخ (نقطه) به جستجوی همسایگی می‌پردازد. در میان همسایه‌ها، بهترین را انتخاب و به آن حرکت می‌نماید. این جستجو را تا زمانی ادامه می‌دهد که یک معیار توقف برآورده گردد. در پایان جستجو نیز پاسخ بهینه گزارش می‌شود [۲۶]. در این پژوهش سعی شده است که از این الگوریتم کارآمد در راستای حل مساله بالانس خطوط مونتاژ با ایستگاه‌های چند اپراتوره استفاده گردد. در ادامه، نخست الگوریتم فراابتکاری جستجوی ممنوع شرح داده می‌شود. سپس بر اساس گام‌های این الگوریتم، روش پیشنهادی برای مساله بالانس خط مونتاژ با ایستگاه‌های چند اپراتوره ارایه خواهد شد. در بخش بعد، مساله اصلی پژوهش در قالب یک مساله نمونه با ۷۹۲ عنصر کاری مطرح و نتایج پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی، پس از اجرای سناریوهای گوناگون مورد بحث قرار می‌گیرد. مقاله با نتیجه‌گیری و ارایه پیشنهادها در بخش ۴ به پایان می‌رسد.

۲. روش‌شناسی پژوهش

به دلیل وجود پیچیدگی‌های فراوان در بیشتر مسایل دنیای واقعی، به ویژه مسایل بهینه‌سازی صنعتی، روش‌های سنتی و استاندارد حل، کارایی لازم را نداشته و محاسبات مورد نیاز با این روش‌ها چنان زیاد است که حتی با رایانه‌های پیشرفته امروزی نیز ممکن است زمان خیلی زیادی برای دستیابی به حل لازم باشد. امروزه بکارگیری الگوریتم‌های فراابتکاری به عنوان ابزارهایی توانمند برای حل مسایل مختلف کاملا متداول گردیده است. برای مسایل بهینه‌سازی پیچیده، این الگوریتم‌ها جواب‌هایی با کیفیت بالا را در مدت زمان کوتاهی تولید می‌کنند. هر چند ضمانتی برای دستیابی به جواب بهینه با استفاده از این الگوریتم‌ها وجود ندارد، ولی توانایی بالای آن‌ها در دستیابی به جواب‌های نزدیک به بهینه در زمان کوتاه، به نام‌آوری آن‌ها رهنمون شده است [۲۶و۲۷].

۲-۱. الگوریتم فرا ابتکاری جستجوی ممنوع

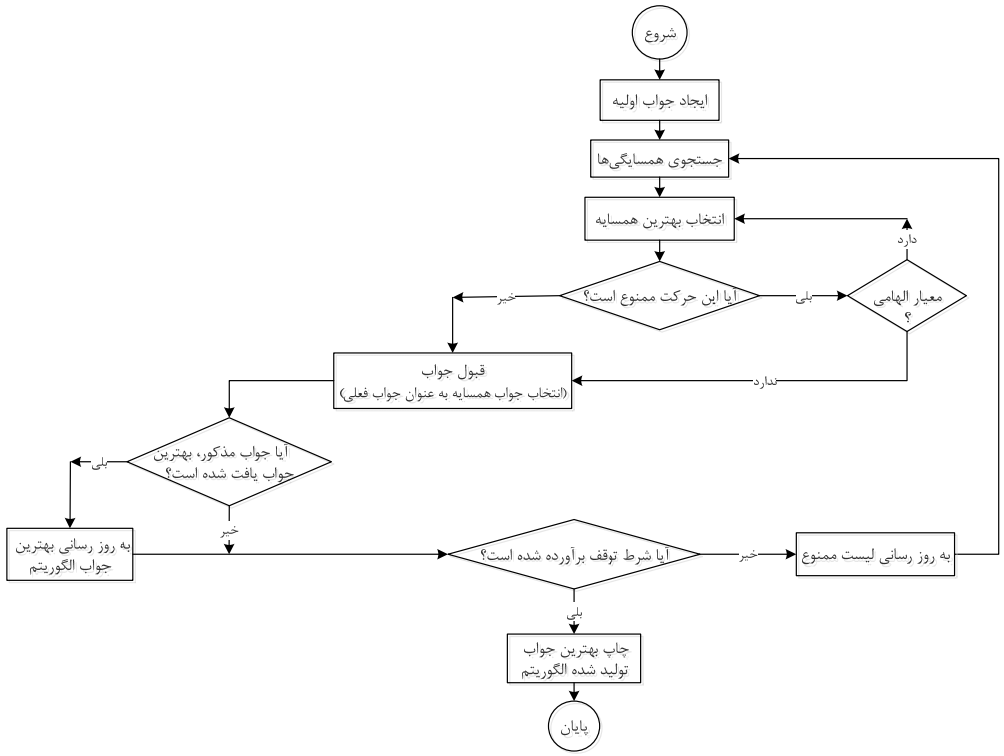
الگوریتم جستجوی ممنوع (TS[۱۶]) را گلوور [۲۸] معرفی نمود. پس از آن در دو مقاله [۲۹] و [۳۰] بسیاری از کاربردهای آن را معرفی کرد. پژوهشگرانی همچون ورا[۱۷] و همکاران نیز در نام‌آوری این تکنیک نقش بسزایی داشتند. در رقابت با روش گرمکاری شبیه‌سازی شده[۱۸]، روش‌های ابتکاری مبتنی بر جستجوی ممنوع نتایج بهتری را به دست آوردند که این خود به افزایش نام‌آوری جستجوی ممنوع کمک کرد. از آن پس، این الگوریتم جایگاه خاصی برای خود به وجود آورده و برای حل انواع مختلف مسایل بهینه‌سازی ترکیبی استفاده شده است [۲۶-۳۱].

الگوریتم جستجوی ممنوع، یک روش ابتکاری سطح بالا و یک تکنیک جستجوی قطعی است [۳۲- ۳۴]. این الگوریتم به عنوان رویکردی بسیار موثر در حل مسایل غیر خطی و ترکیبی، مبتنی بر رویکرد تکراری جستجوی همسایگی‌ها است. به گونه‌ای که از یک جواب پذیرفتنی شروع و پس از تولید و ارزیابی جواب‌های پذیرفتنی در همسایگی جواب کنونی به بهترین آن‌ها حرکت می‌کند. این حرکت، گام به گام جستجوگر را به سمت جواب بهینه یا نزدیک به بهینه راهبری می‌نماید [۳۵]. الگوریتم در جستجوی همسایگی، باید یک نقطه را از میان همسایگان انتخاب کند و به آن نقطه حرکت نماید، حتی اگر کیفیت آن نقطه پایین‌تر از نقطه کنونی باشد. هنگام حرکت از یک نقطه به نقطه دیگر ممکن است الگوریتم به دام بهینگی محلی بیافتد. در این حالت الگوریتم در یک دور افتاده و از آن خارج نمی‌شود [۲۶].

الگوریتم جستجوی ممنوع، برای هدایت جستجوگر به یک مسیر جدید و پیشگیری از دام بهینگی محلی از ابزار لیست ممنوع (حافظه کوتاه مدت) استفاده می‌کند. به گونه‌ای که حرکت (جواب) انتخاب شده در یک تکرار در لیست ممنوع قرار می‌گیرد و در تکرارهای پس از آن اجازه برگشت به آن داده نمی‌شود. این لیست ممنوع اندازه معینی دارد و هنگامی‌که رشته جواب‌های ممنوع به آن اندازه برسد و یک جواب جدید وارد لیست شود، آنگاه نخستین (قدیمی‌ترین) جواب وارد شده به لیست ممنوع از حالت ممنوع بودن خارج می‌شود و فرآیند حل ادامه می‌یابد. به دیگر سخن، لیست ممنوع پویا است و در اجرای الگوریتم به هنگام می‌گردد [۲۶-۳۶]. لیست ممنوع با وجود سودمند بودن، محدودیت‌هایی را برای الگوریتم ایجاد می‌کند. در طول جستجوی الگوریتم، ممکن است یک حرکت ممنوع باشد، ولی انجام حرکت با وجود ممنوع بودن تاثیر بالایی را در بهبود جهت حرکت الگوریتم داشته باشد. از اینرو، از معیار الهامی[۱۹] استفاده

می‌شود [۲۶]. این معیار، به جستجوگر اجازه می‌دهد که وضعیت ممنوع یک جواب را لغو کند و شرایط برگشت به جوابی که تاکنون ممنوع بوده است را فراهم می‌کند [۳۷].

با وجود لیست ممنوع و معیار الهامی، ممکن وضعیتی است رخ دهد که در آن همه حرکت‌های ممکن، ممنوع باشند و هیچ یک از آنها شرط الهامی را برآورده نکند. در این شرایط می‌توان از قدیمی‌ترین حرکت ممنوع یا انتخاب تصادفی یکی از حرکت‌های ممنوع استفاده نمود. نتایج تجربی نشان داده است که استراتژی دوم یعنی انتخاب تصادفی یک حرکت از میان حرکت‌های ممنوع، بهتر است [۳۸]. شکل ۱ روال استاندارد اجرایی الگوریتم جستجوی ممنوع را نشان می‌دهد.



شکل ۱. روال اجرایی الگوریتم جستجوی ممنوع

ویژگی بارز الگوریتم جستجوی ممنوع، توانایی آن در گریز از جواب‌های بهینه محلی است [۳۵-۳۷]. همچنین، این الگوریتم با دو مشخصه معیار الهامی و تنوع تواناتر می‌شود. معیار الهامی، جستجوگر را از قرار گرفتن در تله‌ای که به واسطه یک جواب محاصره شده با همسایه‌های ممنوع ایجاد شده است، باز می‌دارد. بنابراین، در بررسی شرایط برای قبول جواب کمک می‌کند. تنوع نیز برای کشف حوزه‌های از منطقه موجه مساله استفاده می‌شود که ممکن است در دسترس قرار نگیرند. بنابراین، دوباره و با یک جواب آغازین متفاوت، جستجو راهبری می‌شود [۳۷].

۲-۲. الگوریتم پیشنهادی برای حل مساله بالانس خطوط مونتاژ با ایستگاه‌های چند اپراتوره

ساختار ساده الگوریتم جستجوی ممنوع، در هنگام استفاده برای حل مساله بالانس خطوط مونتاژ با ایستگاه‌های چند اپراتوره، نیاز به تعیین عوامل و پارامترهای مهمی دارد. در صورتی که این عوامل به خوبی تعیین گردند، الگوریتم دارای کیفیت بالا خواهد بود و در صورتی که این تنظیمات به خوبی صورت نگیرد، کیفیت الگوریتم به شدت کاهش می‌یابد. در این پژوهش، در راستای ارایه مقادیر مناسب این پارامترها تلاش گردیده است. در ادامه به بررسی برخی از مهم‌ترین این عوامل و پارامترها می‌پردازیم.

۲-۲-۱. کد گذاری

معمولاً، الگوریتم‌های فراابتکاری محاسبات زیادی را به همراه داشته و بایستی با استفاده از رایانه حل گردند. یکی از پارامترهای الگوریتم جستجوی ممنوع نیز چگونگی کد کردن جواب یا راه حل‌ها می‌باشد. کد باید به گونه‌ای طراحی گردد که قابل برنامه‌نویسی با رایانه بوده و در صورت استفاده در الگوریتم، کارایی خوبی هم داشته باشد. همچنین، یک خاصیت مهم کد، رابطه آن با فضای جواب می‌باشد. ساختار کد مناسب باید تنها جواب‌های امکان‌پذیر را معرفی کرده و از دیگر سو رابطه یک به یک با فضای جواب داشته باشد [۲۶]. در این پژوهش، یک جواب قابل قبول مساله در قالب یک آرایه سه بعدی تعریف می‌شود. در بعد نخست

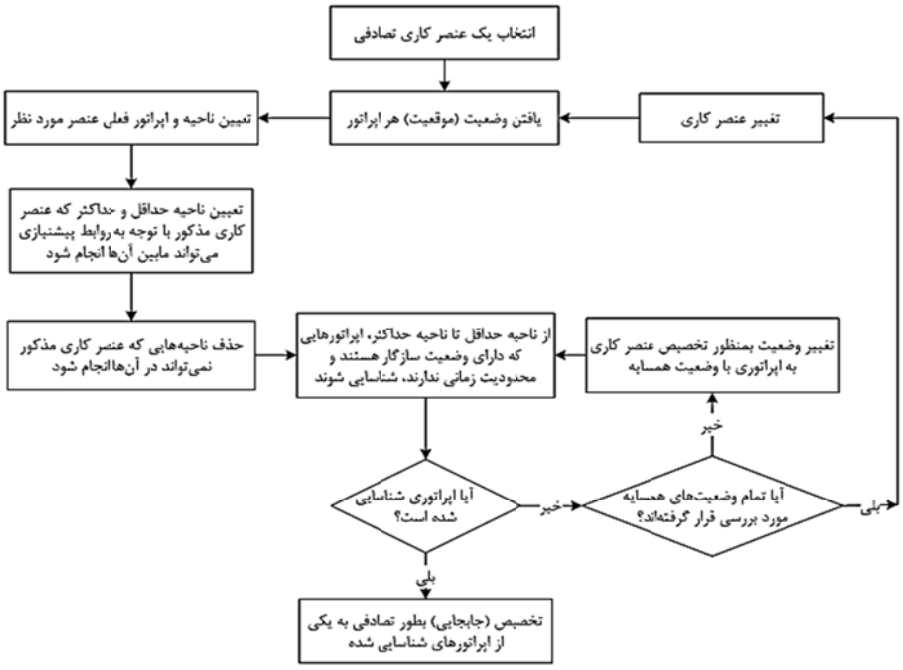
شمار نواحی کاری، در بعد دوم شمار اپراتورها در هر ناحیه و در بعد سوم نیز عناصر کاری متعلق به هر اپراتور تعریف می‌گردد. آشکار است که دیگر اجزای الگوریتم مانند جواب آغازین، لیست ممنوع و معیار الهامی، ساختاری همانند با این آرایه دارند.

۲-۲-۲. جواب آغازین

بررسی‌های تجربی نشان داده است که چگونگی ایجاد جواب آغازین بر کیفیت جواب حاصل از الگوریتم‌های فراابتکاری تاثیر می‌گذارد، به گونه‌ای که جواب آغازین بهتر می‌تواند نتایج بهتری را تولید کند [۳۸]. الگوریتم جستجوی ممنوع نیز، به دلیل برخورداری از لیست ممنوع و معیار الهامی، می‌تواند با احتمال خوبی، جواب بهینه مساله را بیابد. اما از آنجا که این جستجوگر، جستجوی خود را از یک نقطه آغاز می‌کند، سرعت همگرایی و کیفیت جواب نهایی آن به نقطه آغازین وابسته می‌باشد [۳۹]. در خیلی از مواقع، راه‌حل آغازین به صورت تصادفی انتخاب می‌شود. اما در خیلی از مسایل به دلیل پیچیدگی فضای جواب و چگونگی کد گذاری آن، ایجاد یک جواب آغازین امکان‌پذیر به صورت تصادفی، کار ساده‌ای نیست. در بعضی از مواقع نیز، الگوریتم یا مراحلی طراحی می‌گردد تا به تولید یک جواب آغازین با کیفیت نسبتاً خوب منجر گردد [۲۶]. از آنجا که جواب‌های ابتکاری نسبت به جواب‌های تصادفی، به جواب بهینه نزدیک‌تر هستند، برای کاهش زمان پردازش معمولاً جواب آغازین ابتکاری ترجیح داده می‌شود [۳۲]. در این مقاله به دلیل انطباق ویژگی‌های مورد بررسی، برای ایجاد یک جواب آغازین مناسب از الگوریتم پیشنهادی در مرجع [۴۰] استفاده شده است.

۲-۲-۳. ساختار همسایگی

ساختار همسایگی، مکانیزمی است که می‌تواند مجموعه جدیدی از جواب‌های همسایه را با بکارگیری یک تغییر کوچک در یک جواب معین تولید نماید. به گونه‌ای که هر جواب همسایه با یک حرکت از جواب مفروض و بدون واسطه، قابل دستیابی است [۲۶]. طراحی یک ساختار مناسب همسایگی، تاثیر بالایی بر کیفیت الگوریتم جستجوی ممنوع دارد. این ساختار، چگونگی به‌دست آوردن همسایه‌ها و شمار آن‌ها را برای هر راه حل مشخص می‌نماید. ساختار همسایگی باید به گونه‌ای طراحی گردد، که فضای خیلی کوچکی را نسبت به کل فضا معرفی نموده و نیز مجموعه معرفی شده خصوصیات نزدیکی به نقطه‌ای که همسایگی برای آن به دست آمده است داشته باشند [۲۶-۳۸]. ساختار همسایگی و حرکت باید دارای این خاصیت باشد که قابلیت جستجو در کل فضا را داشته باشد. به دیگر سخن، با استفاده از ساختار همسایگی و حرکت، هر نقطه‌ای از فضای جواب باید قابل دسترسی باشد و یا احتمال رسیدن به آن وجود داشته باشد. در صورتی که این شرط برقرار نباشد، ساختار همسایگی و حرکت، ناقص بوده و کیفیت الگوریتم را کاهش می‌دهد [۲۶].



شکل ۲. الگوریتم پیشنهادی ایجاد همسایگی

بر اساس گام‌های الگوریتم پیشنهادی در شکل ۲، برای ایجاد یک جواب قابل قبول در همسایگی جواب کنونی، نخست باید وضعیت غالب را برای هر اپراتور یافت. این وضعیت، از طریق یافتن وضعیتی از کارها با بیشترین فراوانی در میان کارهای اختصاص داده شده به

اپراتور مربوط قابل محاسبه است. در گام بعد، از میان همه کارهای موجود، یک عنصر کاری به‌طور تصادفی انتخاب می‌گردد و ناحیه و اپراتوری که در حال حاضر آن را به عهده دارد، مشخص می‌شود. با استفاده از این اطلاعات در گام بعد، شماره عقب‌ترین و جلوترین ناحیه‌ای که آن عنصر می‌تواند با توجه به روابط پیشنیازی، در آن‌ها انجام شود محاسبه می‌گردد. پس از این گام، با توجه به محدودیت-های ناحیه‌ای مطرح شده در مساله، ناحیه‌هایی که آن عنصر کاری نمی‌تواند در آن‌ها انجام شود باید از این بازه ناحیه‌ای حذف گردند. در بازه بدست آمده تا این گام، دو محدودیت سخت مساله یعنی روابط پیشنیازی و محدودیت‌های ناحیه‌ای برآورده شده است. در گام بعد، محدودیت نرم وضعیت‌های کاری و محدودیت سخت زمان‌های کاری عناصر، به‌طور همزمان بررسی می‌گردند. اگر در بازه بدست آمده تا گام پیش، حداقل یک اپراتور دارای شرایط محدودیت‌های جدید باشد، عنصر کاری مورد نظر به طور تصادفی به یکی از آن‌ها اختصاص می‌یابد و فرآیند ایجاد همسایگی به پایان می‌رسد. در غیر این صورت، با کنار گذاشتن محدودیت نرم (تغییر وضعیت)، الگوریتم در پی اپراتورهایی با وضعیت همسایه که دارای زمان لازم برای اجرای عنصر کاری مورد بررسی هستند، خواهد بود. اگر همه همسایه‌ها مورد بررسی قرار گرفتند و هیچ اپراتوری دارای زمان لازم برای اجرای کار نبود، الگوریتم با تغییر عنصر کاری مورد بررسی به آغاز فرآیند باز خواهد گشت.

۲-۲-۴. تابع هدف

در همه الگوریتم‌های فرابتکاری، انتخاب یک تابع هدف مناسب برای ارزیابی جواب‌های ایجاد شده، ضروری است. مهم‌ترین سنجه‌های کیفیت نتایج نهایی بالانس خط مونتاژ را می‌توان راندمان خط (LE)، شاخص یکنواختی یا همبارسازی (SI) و زمان خط (LT) دانست [۷]. در این پژوهش، بر پایه جلسات مذاکره با مهندسان خط مونتاژ شرکت خودروسازی نمونه و بر اساس اولویت‌های اعلام شده از سوی آنان، بگونه‌ای تجربی، شاخص یکنواختی با ضریب اهمیت ۳۰٪ و شاخص راندمان خط با ضریب اهمیت ۷۰٪ توسط نگارندگان به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است. بر اساس معادله (۱) کارایی یا راندمان خط (LE) در قالب نسبت زمان ایستگاهی کل به زمان چرخه ضربدر شمار ایستگاه‌ها محاسبه می‌شود. به طوری‌که K شمار کل ایستگاه‌های کاری و ST_i زمان ایستگاهی ایستگاه i است [۷]. آشکار است هنگامی که در مساله‌ای زمان چرخه c و مجموع زمان‌های ایستگاهی مقداری ثابت هستند، بیشینه‌سازی LE، برابر با کمینه‌سازی شمار ایستگاه‌ها K خواهد بود [۴۱].

$$LE = \frac{\sum_{i=1}^{k} ST_i}{c.K} \qquad (۱)$$

شاخص یکنواختی برابر با مجموع اختلافات میان زمان‌های کاری ایستگاه‌ها (اپراتورها) می‌باشد که در حالت ایده‌آل مقدار آن به صفر می‌رسد و نشان‌دهنده‌ی تقسیم مساوی بیکاری‌های (کارهای) موجود میان ایستگاه‌ها است. این تابع به شکل معادله (۲) تعریف می‌شود که در آن SI مقدار تابع هدف حاصل از این شاخص، w شمار کل اپراتورهای موجود در خط و t_i زمان کاری اپراتور فعال i ام است.

$$SI = \sum_{i=1}^{w-1} \sum_{j=i+1}^{w} |t_i - t_j| \qquad (۲)$$

شایان توجه است که شاخص راندمان خط، یک شاخص بیشینه‌سازی است درحالی که شاخص یکنواختی دارای ماهیت کمینه‌سازی می‌باشد. از سویی دیگر، مقدار حاصل از شاخص اول عددی در بازه (۱ و ۰) است در حالی که این موضوع در شاخص دوم صحت ندارد. در این پژوهش، برای حل اشکالات اخیر، نخست مقدار حاصل از شاخص یکنواختی، با استفاده از رابطه (۳) به عددی در بازه (۱۰۰ و ۰) تبدیل می‌شود. سپس با ضرب مقدار حاصل از شاخص راندمان خط در عدد ۱۰۰، این مقدار نیز به عددی در بازه (۱۰۰ و ۰) تبدیل می‌شود. اکنون، صورت نهایی تابع هدف، به شکل معادله (۴) پیشنهاد می‌گردد. با توجه به همسو بودن دو شاخص در این تابع، آشکار است که اگر الگوریتم پیشنهادی بتواند هنگام جستجو، اپراتور فعالی را حذف و کار او را به دیگران واگذار نماید، مقدار تابع هدف به‌طور قابل توجهی بهبود می‌یابد.

$$\%SI = SI \div (C \times \text{شمار مقایسات}) \times 100 \qquad (۳)$$

$$Z = [70 * (100 - \%LE)] + (30 * \%SI) \qquad (۴)$$

۲-۲-۵. لیست کاندیدا

در یک الگوریتم جستجوی محلی، ضروری نیست که در یک تکرار، همه همسایه‌های اطراف یک نقطه جستجو گردد. بلکه می‌توان زیر مجموعه‌ای از آن را جستجو نمود. این زیر مجموعه، لیست کاندیدا نام دارد. استراتژی لیست کاندیدا موجب می‌گردد که زمان اجرای الگوریتم کاهش یابد و می‌تواند به طور قابل توجهی روی کیفیت و سرعت الگوریتم موثر باشد. همچنین، این استراتژی می‌تواند به هدف جهت‌دهی به روند جستجو که یکی از اهداف الگوریتم جستجوی ممنوع است، کمک کند. روش‌های متعددی برای طراحی لیست کاندیدا وجود دارد و برای تعیین اندازه آن، باید موازنه‌ای میان کیفیت جواب و عملکرد الگوریتم صورت گیرد. البته زمانی که شمار کل همسایه‌ها کم باشد و ارزیابی آن‌ها خیلی زمان‌بر نباشد، می‌توان همه همسایه‌ها را در لیست کاندیدا در نظر گرفت [۲۶و۴۲]. در این پژوهش برای طراحی لیست کاندیدا، از نمونه‌گیری تصادفی استفاده است که در آن، به تصادف زیر مجموعه‌ای از همسایه‌ها انتخاب و تنها این زیر مجموعه ارزیابی می‌گردد. افزون براین، اندازه لیست کاندیدا در قالب یک پارامتر قابل تغییر در نظر گرفته شده است تا مقدار مناسب آن با اجرای سناریوهای مختلف برنامه بدست آید.

قابل تغییر در نظر گرفته شده است تا مقدار مناسب آن با اجرای سناریوهای مختلف برنامه بدست آید.

۲-۲-۶. قاعده توقف

قاعده توقف، پایان جستجوی الگوریتم را تعیین می‌کند. با توجه به ساختار مساله مورد بررسی، قواعد توقف مختلفی برای الگوریتم جستجوی ممنوع قابل انتخاب است. 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 می‌گردد)، زمان محاسباتی پردازنده و میزان بهبود مشخص در جواب آغازین، از شروط توقف هستند. همچنین، یک قاعده توقف ساده می‌تواند به صورت محدودیتی برای کل شمار حرکت‌ها باشد. به دیگر سخن، وقتی شمار حرکت‌ها به یک حد از پیش تعیین شده رسید، الگوریتم متوقف می‌گردد [۲۶]. در این پژوهش، این شرط توقف به گونه‌ای در نظر گرفته شده است که حد بالایی به عنوان یک پارامتر، قابل تغییر است و مقدار مناسب آن برای مساله مورد بررسی ارایه می‌گردد.

۲-۲-۷. لیست ممنوع

نقش اصلی لیست ممنوع پیشگیری از بازگشت فرآیند جستجو به جواب‌های مشاهده شده در گام‌های پیشین و گریز از دام بهینگی محلی است [۳۸-۳۹]. با وجود این لیست، جستجوگر به نواحی جدیدی از فضای جواب راهبری می‌گردد [۳۲]. چگونگی طراحی لیست ممنوع، یکی دیگر از پارامترهای مهم الگوریتم جستجوی ممنوع است که تاثیر بالایی در کیفیت الگوریتم دارد [۲۶]. اما در این زمینه، هیچ قاعده کلی پیشنهادی وجود ندارد [۴۳]. دوره شرط ممنوع یا به دیگر سخن طول لیست ممنوع، بر روی مسیر جستجو تاثیر بسیار مهمی دارد. اگر دوره شرط ممنوع خیلی کوتاه باشد، الگوریتم نقاط کمی را جستجو کرده و در نتیجه نمی‌تواند از چرخه دوری کند و در نخستین بهینه محلی گیر خواهد کرد. در صورتی که دوره شرط ممنوع خیلی بزرگ باشد، به علت محدودیت زیاد در حرکت و کمبود حرکت‌های قابل انجام، الگوریتم محدوده زیادی را جستجو نخواهد کرد و احتمال افتادن در بهینه محلی زیاد می‌شود. در نتیجه، بر اساس مساله مورد مطالعه، ساختار همسایگی، اندازه مساله، شمار کل تکرارها و مانند اینها باید دوره شرط ممنوع را با دقت بالایی انتخاب کرد. با این حال، برای هر گونه مساله بهینه‌سازی معین، یافتن مقداری که از دور زدن جلوگیری کند و نیز جستجوگر را بیش از اندازه محدود نکند، کاری سخت یا شاید ناشدنی است [۲۶-۳۸-۴۳]. در این پژوهش، اندازه لیست ممنوع پارامتری متغیر در نظر گرفته شده است که مقدار پیشنهادی آن برای مساله نمونه ارایه می‌شود.

۲-۲-۸. معیار الهامی

در الگوریتم جستجوی ممنوع، معیار الهامی به جستجوگر اجازه می‌دهد که وضعیت ممنوع یک راه حل را لغو کند. بنابراین، این معیار امکان برگشت به جواب‌های پیشین که می‌توانند منجر به مسیر جدیدی به سوی جواب بهتر شوند، را فراهم می‌کند. هدف معیار الهامی، افزایش انعطاف‌پذیری الگوریتم در کنار حفظ مشخصات پایه‌ای است که به الگوریتم اجازه می‌دهد تا از بهینگی محلی بگریزد و از رفتار چرخه‌ای دوری کند. این معیار در نهایت، موجب بهبود دقت می‌شود [۳۲و۳۹]. در این پژوهش، شرط بهبود بهترین جواب به عنوان معیار الهامی در نظر گرفته شده است.

۳. یافته‌ها و بحث

در این پژوهش، مساله بالانس خطوط مونتاژ با ایستگاه‌های چند اپراتوره با محدودیت‌های پایه‌ای و غیر پایه‌ای، با کمک الگوریتم فراابتکاری جستجوی ممنوع و کدنویسی با زبان VBA حل و نتایج آن ارایه گردیده است. شمار ناحیه‌های کاری و زمان چرخه توسط طراح سیستم قابل تنظیم می‌باشند. افزون بر این، اندازه لیست کاندیدا، طول لیست ممنوع و شمار تکرارهای (شرط توقف) الگوریتم جستجوی ممنوع، برای یافتن جواب‌هایی مناسب، پارامترهایی قابل تغییر در نظر گرفته شده‌اند؛ به گونه‌ای که در پایان، مقادیر پیشنهادی آن‌ها برای مساله مورد بررسی ارایه می‌شود. تعیین شمار اپراتورهای مورد نیاز در هر ناحیه کاری، تعیین عناصر کاری تخصیص یافته به هر اپراتور، تعیین زمان کاری هر اپراتور و تعیین راندمان اپراتورهای خط مونتاژ مهمترین خروجی‌های برنامه طراحی شده، می‌باشند.

بر اساس محصول تولیدی در شرکت مطالعه موردی، مساله نمونه دارای ۷۹۲ عنصر کاری است. جدول ۱ زمان پردازش برخی از عناصر و شماره وضعیتی از محصول که کار یاد شده به آن تعلق دارد را نشان می‌دهد. در این پژوهش، ۴ وضعیت کاری برای محصول تعریف شده و تخصیص عناصر کاری به اپراتورها با توجه به اولویت مربوط به وضعیت‌های همسایه صورت گرفته است. به دیگر سخن، تلاش می‌شود که عناصر کاری تا حد امکان به گونه‌ای اختصاص یابند که هر اپراتور فقط روی یکی از این وضعیت‌ها و در صورت لزوم یکی از وضعیت‌های همسایه آن کار کند تا جابجایی وی در اطراف محصول بزرگ کمینه شود. در راستای متعادل‌سازی خطوط تولید و مونتاژ، از زمان استاندارد عناصر کاری استفاده می شود. زمانسنجی با روش‌های متفاوتی چون استاپواچ[۲۰]، بیسیک-موست[۲۱] و انواع دیگر سیستم‌های زمانسنجی انجام می‌گیرد که در این میان روش نخست رایج‌تر است [۴۴].

جدول ۱. زمان پردازش و وضعیت عناصر کاری

عنصر کاری	۱	۲۴	۴۹	۷۳	۹۷	۱۲۱	۱۴۷	۱۷۰	۱۹۵	۲۲۰	۲۴۶	۲۷۴	۲۹۲	۳۲۰	۳۴۹	۳۷۶
زمان پردازش	۰/۸۸۴	۰/۸۰۲	۱/۲۵۴	۱/۰۷	۳/۷۵	۲/۵۳۶	۶/۷۸۱	۰/۴۲۸	۱/۲۵۷	۱/۴۳۶	۱/۳۲۷	۰/۵۷	۰/۸۷۸	۱/۳۴	۰/۳۵۱	۱/۰۹۴
وضعیت	۲	۴	۲	۳	۱	۴	۲	۲	۴	۱	۲	۳	۳	۲	۴	۱
عنصر کاری	۴۰۵	۴۳۱	۴۵۴	۴۹۳	۵۱۶	۵۴۹	۵۸۵	۶۱۲	۶۴۴	۶۸۲	۷۱۷	۷۳۳	۷۵۸	۷۷۱	۷۸۴	۷۹۲
زمان پردازش	۱/۷۶۹	۰/۵۴۱	۰/۵۷	۱/۶۳	۲/۳۳۳	۱/۵۲۱	۲/۶۷	۰/۸۴۵	۰/۶۴۷	۰/۲۹۴	۱/۹۸	۲/۱۷۲	۰/۳۶۵	۲/۴۱۹	۰/۹۱	۲/۴۸
وضعیت	۳	۳	۲	۱	۴	۴	۱	۱	۲	۴	۱	۲	۳	۲	۴	۳

طراحی خطوط مونتاژ و وجود ابزارهای خاص در ایستگاه‌های معین، باعث بوجود آمدن محدودیت‌های ناحیه‌ای در مساله بالانس خط مونتاژ می‌شود. محدودیت‌های ناحیه‌ای مساله نمونه در جدول ۲ نشان داده شده‌اند. علاوه بر این موارد، در برخی نواحی (نواحی ۱۵ و ۱۶)، خودرو برای انجام عناصر کاری زیرین در ارتفاع قرار می‌گیرد، بنابراین دیگر عناصر کاری در این نواحی قابل انجام نخواهند بود. یکی از محدودیت‌های پایه‌ای و مهم مسایل بالانس خطوط مونتاژ، روابط پیشنیازی میان عناصر کاری است. بخشی از روابط پیشنیازی میان عناصر کاری در مساله نمونه، در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۲. محدودیت‌های ناحیه‌ای

عنصر کاری	ناحیه اجرایی	عنصر کاری	ناحیه اجرایی	عنصر کاری	ناحیه اجرایی
۱ – ۵	۱	۴۲۴ – ۴۲۹	۱۳	۶۸۷ – ۷۰۱	۱۵ – ۱۶
۱۱۶ – ۱۲۱	۳	۵۲۲ – ۵۲۷	۱۳	۷۷۵ – ۷۸۰	۱۷
۲۱۳ – ۲۲۰	۳	۵۹۷ – ۶۶۷	۱۵ – ۱۶	۷۸۹ – ۷۹۲	۱۸
۳۰۱ – ۳۱۰	۶	۶۷۳ – ۶۷۸	۱۵ – ۱۶		

جدول ۳. روابط پیشنیازی

عنصر کاری	پیشنیازها	عنصر کاری	پیشنیازها	عنصر کاری	پیشنیازها	عنصر کاری	پیشنیازها	عنصر کاری	پیشنیازها
۳	۱	۱۱۷	۱۰۶، ۱۱۲	۷۰۵	۷۰۳، ۷۰۴	۲۸۳	۲۷۲، ۲۷۳، ۲۸۲	۶۴۸	۶۴۰، ۶۴۲، ۶۴۷
۲۵۷	۲۵۶	۱۸۱	۱۷۰، ۱۷۹	۷۸۹	۷۷۹، ۷۸۸	۳۴۱	۳۳۳، ۳۳۵، ۳۴۰	۶۷۵	۶۶۱، ۶۶۵، ۶۷۴
۳۱۳	-	۴۲۵	۴۱۷، ۴۲۰	۸۹	۷۰، ۷۵، ۸۸	۳۷۰	۳۶۴، ۳۶۵، ۳۶۹	۷۶۱	۷۵۵، ۷۵۶، ۷۶۰
۵۰۹	-	۵۳۷	۵۳۱، ۵۳۶	۱۴۴	۱۳۴، ۱۴۱، ۱۴۲	۳۹۶	۳۸۳، ۳۸۸، ۳۹۵	۳۳	۲۶، ۲۷، ۲۹، ۳۱
۷۳۳	-	۵۶۴	۵۵۹، ۵۶۳	۲۰۰	۱۹۱، ۱۹۷، ۱۹۸	۴۵۲	۴۳۵، ۴۴۳، ۴۵۱	۴۸۲	۴۶۷، ۴۶۹، ۴۷۱، ۴۸۱
۶۱	۵۴، ۵۶	۶۲۲	۶۱۸، ۶۲۱	۲۲۹	۲۲۱، ۲۲۴، ۲۲۸	۵۹۶	۵۸۷، ۵۹۳، ۵۹۴	۷۹۲	۷۷۹، ۷۸۴، ۷۸۹، ۷۹۱

تولید جواب آغازین قابل قبول از الگوریتم پیشنهادی در مرجع [۴۰] استفاده شده است. با انتخاب زمان چرخه برابر با ۱۵ دقیقه و شمار ناحیه‌های کاری برابر با ۱۸، جواب شدنی حاصل از این الگوریتم همانند

جدول ۴ است. به ازای این جواب مقدار تابع هدف برابر با ۲۷۱/۸۷۲۷ می‌باشد. یادآور می‌گردد که زمان کاری هر اپراتور از جمع زمان‌های عناصر کاری اختصاص داده شده به وی به دست می‌آید. همچنین، راندمان کاری هر اپراتور نیز از تقسیم زمان کاری اپراتور بر زمان چرخه محاسبه شده است.

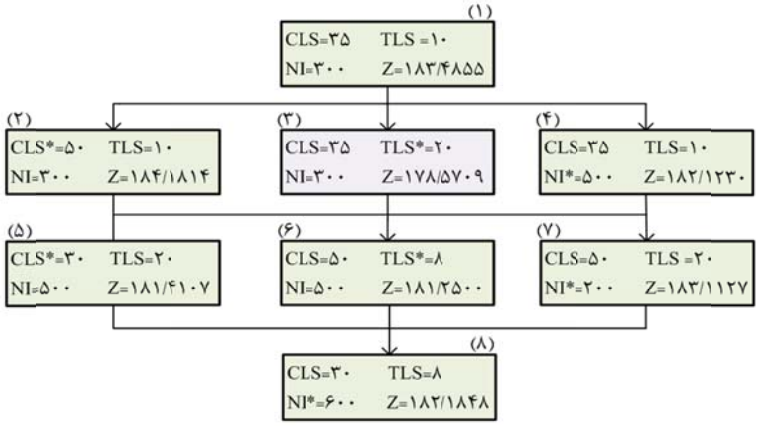
۳-۱. نتایج محاسباتی

برای یافتن مقدار مناسب و پیشنهادی پارامترهای الگوریتم جستجوی ممنوع در حل چنین مسایلی، با انتخاب تابع هدف به عنوان معیار قضاوت، مساله بالا در گام نخست چندین بار در حالت‌های مختلف بررسی گردید که در این میان خانه شماره ۱ در شکل ۳ بهترین جواب را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن خانه شماره ۱ به عنوان حالت پایه، خانه‌های شماره ۲، ۳ و ۴ بهترین

سناریوهای به دست آمده از اجرای پیاپی برنامه با تغییر در تنها یک پارامتر الگوریتم را نشان می‌دهند. CLS اندازه لیست کاندیدا، TLS طول لیست ممنوع و NI شمار کل تکرارها را نشان می‌دهند.

جدول ۴. جواب آغازین مساله نمونه

ناحیه کاری	<------	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
اپراتور ۱	زمان کاری	۱۴/۹۶۴	۱۴/۹۵۸	۱۴/۹۸۷	۱۴/۹۹۷	۱۴/۹۵۵	۱۴/۹۹۱	۱۴/۹۶۲	۱۴/۸۹۱	۱۴/۷۳۶
	راندمان ٪	۹۹/۷۶۰	۹۹/۷۱۹	۹۹/۹۱۶	۹۹/۹۷۹	۹۹/۷۰۰	۹۹/۹۳۸	۹۹/۷۴۷	۹۹/۲۷۵	۹۸/۲۳۷
اپراتور ۲	زمان کاری	۱۴/۹۲۲	۱۴/۹۷۴	۱۴/۹۱۰	۱۴/۸۱۵	۱۴/۸۳۱	۱۴/۸۵۴	۱۴/۹۲۵	۱۴/۹۸۴	۱۴/۷۷۱
	راندمان ٪	۹۹/۴۷۷	۹۹/۸۲۶	۹۹/۴۰۱	۹۸/۷۷۰	۹۸/۸۷۰	۹۹/۰۲۴	۹۹/۵۰۱	۹۹/۸۹۵	۹۸/۴۷۳
اپراتور ۳	زمان کاری	۱۴/۹۸۶	۱۴/۹۶۳	۱۴/۹۴۷	۱۴/۸۷۹	۱۴/۸۷۸	۱۴/۹۸۸	۱۴/۹۰۳	۱۴/۸۷۷	۱۴/۷۱۷
	راندمان ٪	۹۹/۹۰۸	۹۹/۷۵۶	۹۹/۶۴۸	۹۹/۱۹۶	۹۹/۱۸۷	۹۹/۹۱۷	۹۹/۳۵۵	۹۹/۱۸۱	۹۸/۱۱۴
اپراتور ۴	زمان کاری	۱۴/۸۸۵	۱۴/۸۸۳	۱۴/۹۹۹	۱۴/۹۸۳	۱۴/۹۵۲	۱۴/۸۹۵	۱۴/۹۸۴	۱۴/۷۸۹	۱۴/۶۲۷
	راندمان ٪	۹۹/۲۳۲	۹۹/۲۱۸	۹۹/۹۹۴	۹۹/۸۸۵	۹۹/۶۸۰	۹۹/۳۰۲	۹۹/۸۹۴	۹۸/۵۹۶	۹۷/۵۱۵
ناحیه کاری	<------	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸
اپراتور ۱	زمان کاری	۱۴/۵۸۰	۱۴/۸۳۱	۱۴/۵۷۰	۱۴/۷۲۳	۱۴/۹۸۱	۱۴/۹۵۳	۱۳/۵۴۲	۱۴/۹۶۷	۱۴/۷۲۰
	راندمان ٪	۹۷/۱۹۹	۹۸/۸۷۰	۹۷/۱۳۴	۹۸/۱۵۶	۹۹/۸۷۴	۹۹/۶۸۸	۹۰/۲۸۰	۹۹/۷۷۸	۹۸/۱۳۱
اپراتور ۲	زمان کاری	۱۴/۸۶۰	۱۴/۹۱۴	۱۴/۷۹۶	۱۴/۸۹۲	۱۴/۸۹۱	۱۴/۹۱۱	۱۴/۹۸۰	۱۴/۸۶۲	۱۴/۲۳۹
	راندمان ٪	۹۹/۰۶۴	۹۹/۴۲۵	۹۸/۶۳۹	۹۹/۲۷۷	۹۹/۲۷۱	۹۹/۴۰۴	۹۹/۸۶۴	۹۹/۰۸۱	۹۴/۹۲۶
اپراتور ۳	زمان کاری	۱۴/۵۹۷	۱۴/۸۹۲	۱۴.۹۵۴	۱۴/۸۳۶	۱۴/۳۶۵	۱۴/۷۸۳	۱۴/۶۵۶	۱۴/۰۴۳	۳/۳۳۱
	راندمان ٪	۹۷/۳۱۰	۹۹/۲۷۷	۹۹/۶۹۶	۹۸/۹۰۷	۹۵/۷۶۷	۹۸/۵۵۷	۹۷/۷۰۴	۹۳/۶۱۹	۲۲/۲۰۷
اپراتور ۴	زمان کاری	۱۴/۷۰۱	۱۴/۷۰۸	۱۴/۶۴۰	۱۴/۹۰۸	۱۴/۸۲۲	–	–	۱۴/۶۳۱	–
	راندمان ٪	۹۸/۰۰۶	۹۸/۰۵۲	۹۷/۵۹۹	۹۹/۳۸۷	۹۸/۸۱۰	–	–	۹۷/۵۴۳	–



شکل ۳. نتایج تحلیل پارامترهای الگوریتم جستجوی ممنوع برای مساله نمونه

براساس نتایج بدست آمده از نخستین سطح پس از حالت پایه، در سطح بعد (خانه‌های ۵، ۶ و ۷) تلاش شده است که با انتخاب مقادیر جدید ۲ پارامتر، تغییرات پارامتر سوم بررسی شود. بهترین مقدار تابع هدف در این گام مربوط به خانه‌های ۵ و ۶ است. بنابراین، انتظار می‌رود با در نظر گرفتن مقادیر جدید اندازه لیست کاندیدا (CLS) و طول لیست ممنوع (TLS)، مقادیر بهتر و صحیح‌تری از پارامتر سوم به دست آید. خانه شماره ۸ با در نظر گرفتن این مقادیر جدید، بهترین سناریو حاصل از تغییرات شمار کل تکرارها (NI) را نشان می‌دهد.

پس از اجرای پیاپی الگوریتم جستجوی ممنوع با پارامترهای مختلف، و با تجزیه و تحلیل حل‌های به دست آمده برای مساله نمونه، همانگونه که شکل ۳ نیز نشان می‌دهد، خانه شماره ۳ با تابع هدف ۱۷۸/۵۷۰۹ بهترین سناریو است که در آن اندازه لیست کاندیدا برابر با ۳۵، اندازه لیست ممنوع برابر با ۲۰ و شرط توقف

برابر با ۳۰۰ تکرار می‌باشد. این جواب شدنی که از پیاده‌سازی الگوریتم جستجوی ممنوع به دست آمده است، با حل ارایه شده در جدول ۵ سازگار است.

جدول ۵. جواب به دست آمده از پیاده‌سازی الگوریتم جستجوی ممنوع

ناحیه کاری		۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
اپراتور ۱	زمان کاری	۱۴/۶۳۳	۱۴/۶۳۸	۱۴/۵۴۳	۱۴/۶۰۶	۱۴/۷۱۲	۱۴/۶۶۷	۱۴/۶۸۸	۱۴/۷۴۱	۱۴/۷۳۶
	راندمان ٪	۹۷/۵۵۷	۹۷/۵۸۶	۹۶/۹۵۵	۹۷/۳۷۱	۹۸/۰۷۹	۹۷/۷۸۳	۹۷/۹۱۷	۹۸/۲۷۰	۹۸/۲۳۷
اپراتور ۲	زمان کاری	۱۴/۶۷۵	۱۴/۶۴۷	۱۴/۶۱۰	۱۴/۶۷۲	۱۴/۵۸۸	۱۴/۵۱۸	۱۴/۶۲۱	۱۴/۷۹۹	۱۴/۷۷۱
	راندمان ٪	۹۷/۸۳۴	۹۷/۶۴۸	۹۷/۴۰۰	۹۷/۸۱۱	۹۷/۲۵۶	۹۶/۷۸۵	۹۷/۴۷۴	۹۸/۶۶۱	۹۸/۴۷۳
اپراتور ۳	زمان کاری	۱۴/۵۹۴	۱۴/۵۵۹	۱۴/۵۵۲	۱۴/۶۳۴	۱۴/۵۷۴	۱۴/۶۵۴	۱۴/۶۲۱	۱۴/۶۰۱	۱۴/۷۱۷
	راندمان ٪	۹۷/۲۹۴	۹۷/۰۵۷	۹۷/۰۱۶	۹۷/۵۶۳	۹۷/۱۶۰	۹۷/۶۹۴	۹۷/۴۷۰	۹۷/۳۳۸	۹۸/۱۱۴
اپراتور ۴	زمان کاری	۱۴/۷۱۱	۱۴/۶۶۴	۱۴/۵۸۰	۱۴/۶۷۰	۱۴/۵۴۳	۱۴/۵۶۵	۱۴/۶۱۲	۱۴/۶۴۲	۱۴/۶۲۷
	راندمان ٪	۹۸/۰۷۷	۹۷/۷۶۰	۹۷/۲۰۲	۹۷/۸۰۲	۹۶/۹۵۶	۹۷/۰۹۸	۹۷/۴۱۱	۹۷/۶۱۲	۹۷/۵۱۵
ناحیه کاری		۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸
اپراتور ۱	زمان کاری	۱۴/۵۸۰	۱۴/۶۶۰	۱۴/۵۹۳	۱۴/۶۹۲	۱۴/۷۲۱	۱۴/۶۲۴	۱۴/۶۳۷	۱۴/۷۱۱	۱۴/۷۲۰
	راندمان ٪	۹۷/۱۹۹	۹۷/۷۳۵	۹۷/۲۸۷	۹۷/۹۴۸	۹۸/۱۴۲	۹۷/۴۹۳	۹۷/۵۸۱	۹۸/۰۷۳	۹۸/۱۳۱
اپراتور ۲	زمان کاری	۱۴/۸۶۰	۱۴/۵۷۹	۱۴/۶۰۳	۱۴/۶۰۱	۱۴/۷۰۳	۱۴/۶۵۷	۱۴/۶۶۳	۱۴/۷۱۲	۱۴/۶۷۲
	راندمان ٪	۹۹/۰۶۴	۹۷/۱۹۶	۹۷/۳۵۴	۹۷/۳۴۰	۹۸/۰۲۳	۹۷/۷۱۱	۹۷/۷۵۰	۹۸/۰۷۸	۹۷/۸۱۳
اپراتور ۳	زمان کاری	۱۴/۵۹۷	۱۴/۶۵۲	۱۴/۶۳۵	۱۴/۷۱۳	۱۴/۶۱۵	۱۴/۵۸۹	۱۴/۶۵۶	۱۴/۶۴۳	۱۴/۶۲۴
	راندمان ٪	۹۷/۳۱۰	۹۷/۶۷۷	۹۷/۵۶۵	۹۸/۰۸۸	۹۷/۴۳۱	۹۷/۲۵۷	۹۷/۷۰۴	۹۷/۶۲۳	۹۷/۴۹۶
اپراتور ۴	زمان کاری	۱۴/۷۰۱	۱۴/۶۷۷	۱۴/۶۴۰	۱۴/۶۴۹	۱۴/۶۴۴	-	-	۱۴/۶۳۱	-
	راندمان ٪	۹۸/۰۰۶	۹۷/۸۴۹	۹۷/۵۹۹	۹۷/۶۵۸	۹۷/۶۲۷	-	-	۹۷/۵۴۳	-

۳-۲. بحث و تجزیه و تحلیل یافته‌ها

در این پژوهش ، یک مساله واقعی بالانس خطوط مونتاژ با ایستگاه‌های چند اپراتوره با کمک الگوریتم فراابتکاری جستجوی ممنوع حل شده است. همچنین، سناریوهای مختلفی از مساله نمونه با کمک الگوریتم جستجوی ممنوع اجرا شد و بهترین آن‌ها به همراه مقادیر پیشنهادی پارامترهای الگوریتم ارایه گردیده است. به دلیل سازگاری ویژگی‌ها و محدودیت‌های مورد بررسی در این مقاله با مرجع [۴۰]، جواب آغازین قابل قبول و مورد نیاز الگوریتم جستجوی ممنوع با کمک الگوریتم پیشنهادی در آن مرجع بدست آمده است. بر اساس آنچه در

جدول ۴ آورده شده است، اختصاص عناصر کاری به حداقل شمار اپراتورهای لازم توسط این الگوریتم، کمک شایانی به الگوریتم پیشنهادی در این مقاله در راستای کمینه‌سازی تابع هدف نموده است. بنابراین، با توجه به معادله (۴)، بخش وسیعی از بهبود مقدار تابع هدف از جواب آغازین به جواب نهایی توسط الگوریتم جستجوی ممنوع، مربوط به بعد دوم این تابع یعنی شاخص یکنواختی است. با این حال، شاخص راندمان خط، تلاش برای کمینه‌سازی شمار ایستگاه‌های کاری در جواب نهایی را تضمین می‌نماید.

آن‌گونه که پیش‌تر نیز بیان گردید، در نواحی ۱۵ و ۱۶ خط مونتاژ شرکت خودروسازی نمونه، محصول در ارتفاع قرار می‌گیرد و این دو ناحیه مخصوص انجام عناصر کاری زیرین خودرو می‌باشند. از سویی، محدود بودن شمار این عناصر کاری و قطعی بودن زمان پردازش آنها و از سوی دیگر، عدم امکان انجام سایر عناصر کاری در این دو ناحیه، سبب مستقل و متفاوت بودن چگونگی چینش و شمار اپراتورهای این دو ناحیه نسبت به سایر نواحی خط مونتاژ شده است. البته، همانند بودن شمار اپراتورهای ناحیه ۱۸ با نواحی ۱۵ و ۱۶، به دلیل بی‌نیازی به اپراتور چهارم در این ناحیه و اختصاص همه عناصر کاری به حداقل اپراتور مورد نیاز در خط مونتاژ است.

در راستای دستیابی به نتایج، تابع هدف به عنوان معیار همه قضاوت‌ها انتخاب شده است. مکانیزم بررسی و یافتن مقدار مناسب پارامترهای الگوریتم جستجوی ممنوع، فرآیندی بی‌پایان می‌باشد، به گونه‌ای که در هر سطح با انتخاب بهترین پارامترهای بدست آمده در سطح پیش و با تغییر تنها یک پارامتر می‌توان با توجه به مقادیر تابع هدف، مقدار جدیدی برای آن پارامتر بدست آورد. بنابراین، با توجه به ابعاد مساله، سطح پیشروی مکانیزم و تجزیه و تحلیل توسط نگارندگان مقاله تا سه سطح پس از حالت پایه انتخاب گردیده است و در این حالت بهترین سناریو ارایه گردیده است. شایان توجه است

که معیارهای قضاوت دیگر مانند همگرایی الگوریتم در دستیابی به جواب بهینه و فراوانی جواب‌های مناسب در یک بار اجرای الگوریتم، می‌توانند جایگزین معیار قضاوت این پژوهش شوند.

در حالت ایده‌آل، مقدار تابع هدف که از مجموع دو شاخص راندمان خط و شاخص یکنواختی بدست می‌آید، برابر با صفر خواهد شد. در مساله شرکت مطالعه موردی، کوچک بودن زمان پردازش شمار زیادی از عناصر کاری نسبت به زمان چرخه، عامل مثبتی در بیشینه‌سازی راندمان و کمینه‌سازی شاخص یکنواختی است. اما از سوی دیگر، وجود محدودیت‌های وضعیتی، ناحیه‌ای و روابط پیشنیازی از شکل‌گیری حالت ایده‌آل پیشگیری می‌کند. وجود پر رنگ این موانع، به ویژه محدودیت‌های ناحیه‌ای در این مساله، افزون بر افزایش مقدار نهایی تابع هدف، در فرآیند الگوریتم پیشنهادی باعث سختی کار در گام ایجاد یک حل قابل قبول در همسایگی جواب کنونی می‌شود. آشکار است که با حذف یا کاهش موارد یاد شده، در زمان‌های کوتاهتر مقادیر بهتری برای تابع هدف به دست خواهد آمد.

پراکندگی مقادیر بدست آمده برای پارامتر شمار تکرارها (شرط توقف) در خانه‌های ۱، ۴، ۷ و ۸ در شکل ۳ و همچنین تغییرات کم مقدار تابع هدف در تکرارهای بالا، بیانگر مستقل بودن همگرایی الگوریتم نسبت به این پارامتر است. اما با توجه به اینکه معیار قضاوت در این پژوهش، مقدار تابع هدف در نظر گرفته شده است، در هر خانه مقداری از این پارامتر که بهترین مقدار تابع هدف بر اساس آن بدست آمده است، گزارش گردیده است.

در این پژوهش، محدودیت‌های زمان عناصر کاری، زمان چرخه، روابط پیشنیازی و محدودیت‌های ناحیه‌ای به عنوان محدودیت‌های سخت و محدودیت‌های وضعیتی به عنوان محدودیت‌های نرم مساله، بررسی گردید. بر اساس آنچه پیشتر گفته شد، در مقایسه می‌توان گفت که چنین ترکیبی از محدودیت‌های سخت و نرم مساله همراه با الگوریتم پیشنهادی حل، الگوریتم پیشنهادی ایجاد همسایگی، تابع هدف و شاخص‌های آن و نیز مکانیزم یافتن پارامترهای مناسب الگوریتم، بیانگر رویکردی نو در زمینه بالانس خطوط مونتاژ با ایستگاه‌های چند اپراتوره است.

۴. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

به طور کلی می‌توان بیان نمود که خطوط مونتاژ برای اجزای سازنده و انجام هر عملیات مرتبط و ضروری برای تولید محصول نهایی طراحی می‌شوند . این خطوط به گونه‌ای گسترده در سیستم‌های تولید انبوه برای افزایش کارایی و سرعت سیستم، کاهش هزینه هر واحد کالا و آسانی ساخت و کنترل استفاده می‌شوند [۴۵]. مساله بالانس خط مونتاژ، مساله چینش فعالیت‌های مونتاژی و تولیدی در ایستگاه‌های کاری است. این مساله از نوع NP-Hard است و حل شایسته آن به عنوان مهمترین کار در برنامه‌ریزی تولید میان مدت سیستم‌های مونتاژی، نیازمند شناخت نوع خط، ویژگی‌های بارز خط و هدف اصلی انجام فرآیند بالانس است. تعیین نوع خط می‌تواند در استفاده از آخرین تلاش‌های انجام شده و تکنیک‌های شایسته برای بالانس آن خط، اثرگذار باشد. شناخت ویژگی‌های بارز خط باعث تعیین صحیح محدودیت-های تخصیص عناصر کاری در فرآیند بالانس و در نتیجه بالانس کارآمدتر خط مونتاژ می‌شود. همچنین، تعیین هدف اصلی بالانس توسط تحلیلگر می‌تواند او را در جلب رضایت مشتری و افزایش کیفیت عمل بالانس کمک نماید.

در صنعت خودرو دستیابی به راهکاری برای بالانس‌سازی خط تولید یا مونتاژ از اهمیت ویژه‌ای در افزایش بهره‌وری و کیفیت کالای تولیدی برخوردار است. اگر چه عمل بالانس خط به صورت سعی و خطا و به شکل دستی نیز انجام می‌پذیرد اما، 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. بنابراین، یافتن راهکاری برای سرعت دادن و کاهش خطا در بالانس خط، بایسته به نظر می‌رسد.

مساله بالانس خط مونتاژ با ایستگاه‌های چند اپراتوره، نوع نوینی از مسایل بالانس خط مونتاژ تعمیم یافته است. در این خطوط، گروهی از کارگران، همزمان عملیات مونتاژی متفاوتی را در یک ایستگاه یکسان بر روی یک محصول یکسان انجام می‌دهند. این وضعیت نیازمند محصولاتی به اندازه کافی بزرگ، مانند خودرو است تا کارگران در طی فرآیند مونتاژ، مانع کار یکدیگر نشوند [۱]. علی‌رغم فراوانی بسیار در بکارگیری سیستم‌های مونتاژی با ایستگاه‌های چند اپراتوره در سیستم‌های تولیدی، در پژوهش‌های پیشین به حل مساله بالانس این گونه خط مونتاژ توجه کمی شده است. در این مقاله پس از بیان مساله بالانس خطوط مونتاژ با ایستگاه‌های چند اپراتوره، با پیشنهاد شیوه‌ای نوین در بکارگیری الگوریتم جستجوی ممنوع در بهینه‌سازی همزمان دو شاخص راندمان خط و یکنواختی بار کاری ایستگاه‌ها در یک مساله واقعی با ۷۹۲ عنصر کاری تلاش شده است. در این راستا، با توجه به این که خط مونتاژ در شرکت مطالعه موردی برای مونتاژ خودروهای سواری استفاده می‌شود، محدودیت‌های زمان عناصر کاری، زمان چرخه، محدودیت‌های ناحیه‌ای و محدودیت‌های پیشنیازی به عنوان محدودیت‌های سخت مساله و محدودیت‌های وضعیتی به عنوان محدودیت نرم در نظر گرفته شده‌اند. الگوریتم پیشنهادی با زبان برنامه‌نویسی VBA کدنویسی و اجرا شد. مناسب بودن شمار، چینش و راندمان اپراتورها از سویی و سازگاری نتایج حاصل از اجرای الگوریتم با محدودیت‌های مساله بالانس خطوط مونتاژ با ایستگاه‌های چند اپراتوره از سوی دیگر، نشان‌دهنده کارایی بالای الگوریتم پیشنهادی در حل این دسته از مسایل بالانس خطوط مونتاژ است. باید یادآور شد که پارامترهای الگوریتم جستجوی ممنوع نقش تعیین کننده‌ای در هدایت فرایند جستجو دارند. بنابراین، انتخاب مقادیر شایسته برای این پارامترها و پیشگیری از دام

بهینگی محلی، شانس یافتن جواب بهینه واقعی مساله را افزایش می‌دهد. در این مقاله، سناریوهای مختلفی از مساله نمونه مورد اجرا قرار گرفته و در نهایت با انتخاب تابع هدف به عنوان معیار قضاوت، بهترین سناریو به همراه مقادیر پیشنهادی پارامترهای الگوریتم ارایه گردیده است. مقادیر نه چندان بزرگ پارامترها نسبت به ابعاد مساله، نیز نشان‌دهنده کارایی (سرعت) بالای الگوریتم جستجوی ممنوع در دستیابی به هدف یاد شده است.

بطور کلی می‌توان بیان نمود که در این پژوهش، برای اولین بار از الگوریتم استاندارد جستجوی ممنوع در راستای بهینه‌سازی یک مساله بالانس خطوط مونتاژ با ایستگاه‌های چند اپراتوره استفاده گردید. حضور محدودیت نرم در کنار محدودیت‌های سخت مساله در این پژوهش، الگوریتم پیشنهادی ایجاد همسایگی و نیز مکانیزم منحصر به فرد یافتن پارامترهای مناسب الگوریتم، بیانگر رویکردی نو و متفاوت نسبت به پژوهش‌های همانند است. همچنین، ابعاد واقعی مساله نمونه را می‌توان ویژگی بارز این پژوهش در راستای سازگاری بیشتر مسایل آکادمیک با شرایط واقعی دانست. تغییر تابع هدف با در نظر گرفتن جریمه برای نقض محدودیت‌های وضعیتی (محدودیت نرم مساله)، مقایسه الگوریتم جستجوی ممنوع با دیگر الگوریتم‌های فراابتکاری، تغییر معیار قضاوت در انتخاب بهترین سناریو از تابع هدف به همگرایی و یا فراوانی جواب‌های مناسب، بکارگیری تکنیک‌های مناسب تصمیم‌گیری به منظور وزن‌دهی به اجزای مختلف تابع هدف، در نظر گرفتن محدودیت کارهای چند اپراتوره، محدودیت کارهای ناسازگار، محدودیت کارهای دارای وضعیت نامشخص و ادامه پیشروی مکانیزم بررسی پارامترهای الگوریتم به سطوح بعد، به عنوان زمینه‌هایی برای کارهای آینده پیشنهاد می‌شود.

پی‌نوشت

1. Work elements
2. Micro-tasks
3. Assembly line balancing problem
4. Simple assembly line balancing problem
5. Generalized assembly line balancing problem
6. Mixed-model
7. Multi-manned assembly line balancing problem
8. Simultaneous production
9. Generalized multi-manned assembly line balancing problem
10. Heuristic-mixed Genetic Algorithm
11. Zoning constraints
12. Insufficiency of station area
13. Zone
14. The partial random permutation (PRP)
15. Two-sided
16. Tabu Search
17. Werra
18. Simulated annealing
19. Aspiration criterion
20. Stopwatch
21. Basic most

مراجع

[1] Dimitriadis S. Assembly line balancing and group working: A heuristic procedure for workers' groups operating on the same product and workstation, Computers & Operations Research, (2006), Vol. 33, pp. 2757-2774.

[2] Yazdanparast V, Hajihosseini H. Multi-manned production lines with labor concentration, Australian Journal of Basic and Applied Sciences, (2011), Vol. 5, No. 6, pp. 839-846.

[3] Amen M. Heuristic methods for cost-oriented assembly line balancing: A survey, International Journal Production Economics, (2000), Vol. 68, pp. 1-14.

[4] Amen M. An exact method for cost-oriented assembly line balancing, International Journal Production Economics, (2000), Vol. 64, pp. 187-195.

[5] Ozcan U, Toklu B. Multiple-criteria decision-making in two-sided assembly line balancing: A goal programming and a fuzzy goal programming models, Computers & Operations Research, (2009), Vol. 36, pp. 1955-1965.

[6] Becker C, Scholl A. A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing, European Journal of Operational Research, (2006), Vol. 168, pp. 694-715.

[7] Grzechca W. Cycle time in assembly line balancing problem, 21st International Conference on Systems Engineering, IEEE, (2011), pp. 171-174.

[8] Hailemariam D. Mixed model assembly line balancing using simulation techniques a case study in ambassador garment and trade PLC, Addis Ababa University, School of Graduate Studies, Faculty of Technology, Mechanical Engineering Department, Ethiopia, AAU, (2009).

[9] Amen M. Cost-oriented assembly line balancing: Model formulations, solution difficulty, upper and lower bounds, European Journal of Operational Research, (2006), Vol. 168, pp. 747–770.

[10] Baykasoğlu A, Özbakır L. Stochastic U-line balancing using genetic algorithms, Int J Adv Manuf Technol, (2007), Vol. 32, pp. 139-147.

[11] Bautista J, Suarez R, Mateo M, Companys R. Local search heuristics for the assembly line

balancing problem with incompatibilities between tasks, International Conference on Robotics & Automation, San Francisco, (2000), CA, IEEE, pp. 2404-2409.

[12] Guo Q, Tang L. 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, Shanghai, P.R. China, IEEE, (2009), pp. 6256-6261.

[13] Fattahi P, Roshani A, Roshani A. A mathematical model and ant colony algorithm for multi-manned assembly line balancing problem, Int J Adv Manuf Technol, (2011), Vol. 53, pp. 363-378.

[14] Qian X, Fan Q. Solving multi-manned assembly line balancing problem by a heuristic-mixed genetic algorithm, International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering, IEEE, (2011), pp. 320-323.

[۱۵] روشنی، ع. در نظر گرفتن محدودیت‌های وضعیتی در حل مسایل بالانس خطوط مونتاژ با ایستگاه‌های چند اپراتوره: خطوط مونتاژ چند طرفه، هفتمین کنفرانس بین المللی مهندسی صنایع، اصفهان، (۱۳۸۹).

[16] Bukchin J, Masin M. Multi-objective design of team oriented assembly systems, European Journal of Operational Research, (2004), Vol. 156, pp. 326-352.

[17] Cevikcan E, Durmusoglu M, Unal M. A team - oriented design methodology for mixed model assembly systems, Computers & Industrial Engineering, (2009), Vol. 56, pp. 576-599.

[18] Chang HJ, Chang TM. Simultaneous perspective-based mixed-model assembly line balancing problem, Tamkang Journal of Science and Engineering, (2010), Vol. 13, No. 3, pp. 327-336.

[19] Kellegoz T, Toklu B. An efficient branch and bound algorithm for assembly line balancing problems with parallel multi-manned workstations, Computers & Operations Research, (2012), Vol. 39, pp. 3344-3360.

[20] Özbakır L, Tapkan P. Bee colony intelligence in zone constrained two-sided assembly line balancing problem, Expert Systems with Applications, (2011), Vol. 38, pp. 11947–11957.

[21] Lapierre SD, Ruiz A, Soriano P. Balancing assembly lines with tabu search, European Journal of Operational Research, (2006), Vol. 168, pp. 826-837.

[22] Suwannarongsri S, Puangdownreong D. Balancing of U-shape assembly lines using tabu search method", Proceedings of ECTI-CON krabi, IEEE, (2008), pp. 609-612.

[23] Suwannarongsri S, Puangdownreong D. Multi-objective assembly line balancing via adaptive tabu search method with partial random permutation technique, Industrial Engineering and Engineering Management, Singapor, IEEE, (2008), pp. 312-316.

[24] Pastor, et al. Tabu search algorithms for an industrial multi-product and multi-objective assembly line balancing problem, with reduction of the task dispersion, Journal of the Operational Research Society, (2002), Vol. 53, pp. 1317-1323.

[25] Özcan U, Toklu B. A tabu search algorithm for two-sided assembly line balancing, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, (2009), Vol. 43, No. 7-8, pp. 822-829.

[۲۶] فتاحی، پ. الگوریتم‌های فرا ابتکاری، انتشارات دانشگاه بوعلی سینا، همدان، (۱۳۸۸).

[۲۷] کلاهان، ف؛ دوستپرست، م. کاربرد الگوریتم گرمکاری شبیه‌سازی شده در برنامه ریزی بهینه نت پیشگیرانه، سومین کنفرانس ملی نگهداری و تعمیرات، تهران، (۱۳۸۴).

[28] Glover F. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence, Computers & Operations Research, (1986), Vol. 13, No. 5, pp. 533-549.

[29] Glover F. Tabu search – part i, Operations Research Society of America (ORSA), Journal on Computing, (1989), Vol. 1, No. 3, pp. 190-206.

[30] Glover F. Tabu search – part ii, Operations Research Society of America (ORSA), Journal on Computing, (1990), Vol. 2, No. 1, pp. 4-32.

[31] McKendall Jr A. Improved Tabu search heuristics for the dynamic space allocation problem, Computers & Operations Research, (2008), Vol. 35, pp. 3347-3359.

[32] Altiparmak F, Karaoglan I. An Adaptive tabu-simulated annealing for concave cost transportation problems, The Journal of the Operational Research Society, (2008), Vol. 59, No. 3, pp. 331-341.

[۳۳] زارع مهرجردی ی؛ رسایی ح. مقایسه روش‌های فراابتکاری برای بهینه‌سازی پورتفولیو تحت معیار ریسک نیمه واریانس با استفاده از آزمون آماری t، نشریه بین‌المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، (۱۳۹۲)، ۲۴ (۲)، صص. ۱۴۱-۱۵۳.

[۳۴] فصیحی، م؛ جولای، ف؛ توکلی مقدم، ر. کمینه‌سازی حداکثر دیرکرد کارها در مسأله زمانبندی جریان کارگاهی جایگشتی دوباره وارد شونده چند ماشینه. نشریه بین‌المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، ۱۳۸۹، ۲۱ (۴)، صص. ۱۷۹-۱۹۰. نشریه بین‌المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، (۱۳۹۲)، ۲۴ (۲)، صص. ۱۴۱-۱۵۳.

[۳۵] کلاهان، ف؛ رفیعی ثانی، ع. برنامه‌ریزی تولید خطوط مونتاژ چندمدله خودرو به کمک الگوریتم ابتکاری Tabu-SA، کنفرانس بین‌المللی مهندسی صنایع، تهران، (۱۳۸۳).

[36] Ke Q, Jiang T, Ma SD. A tabu search method for geometric primitive extraction, Pattern Recognition Letters, (1997), Vol. 18, pp. 1443-1451.

[37] Mishra N., Prakash T., M, Shankar R, Chan F. Hybrid tabu-simulated annealing based approach to solve multi-constraint product mix decision problem, Expert Systems with Applications, (2005), Vol. 29, pp. 446-454.

[38] Zhang CY, Li PG, Rao YQ, Guan ZL. A very fast TS/SA algorithm for the job shop scheduling problem, Computers & Operations Research, (2008), Vol. 35, pp. 282-294.

[39] Liu Y, Liu M, Gao G. Optimal Reactive Power Planning Using GA/SA/TS Hybrid Approach and Decomposition and Coordination Theory, IEEE, (2008), pp. 1-4.

[۴۰] سلیمی فرد، خ؛ قاسمیه، ر؛ پاسبان، ا. ارایه روشی ابتکاری برای حل مسایل بالانس خطوط مونتاژ با ایستگاه‌های چند اپراتوره، ارسال شده به یازدهمین کنفرانس بین المللی مدیریت، تهران، (۱۳۹۲).

[41] Baykasoğlu A. Multi-rule multi-objective simulated annealing algorithm for straight and U type assembly line balancing problems, J Intell Manuf, (2006), Vol. 17, pp. 217-232.

[42] Youssef H, Sait S, Adiche H. Evolutionary algorithms, simulated annealing and tabu search: a comparative study, Engineering Applications of Artificial Intelligence, (2001), Vol. 14, pp. 167-181.

[43] Wang JC. Solving quadratic assignment problems by a tabu based simulated annealing algorithm, International Conference On Intelligent and Advanced Systems, IEEE, (2007), pp. 75-80.

[۴۴] مرعشی، ن. ارزیابی کار و زمان، انتشارات کارآفرینان بصیر، تهران، (۱۳۸۵).

[45] Kilincci O, Bayhan G. A Petri net approach for simple assembly line balancing problems, Int J Adv Manuf Technol, (2006), Vol. 30, pp. 1165-1173.