

Paper Type: Original Article



Multi-Objective Optimization of the U-Shaped Assembly Line Balancing and Worker Assignment Considering Setup-Times and Workers' Skill

Ali Husseinzadeh Kashan^{1,*} , Saeed Afkhani¹, Parisa Maroofkhani¹

¹Department of Industrial and Systems Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran; a.kashan@modares.ac.ir; afkhani.saeid.73@gmail.com; pmaroofkhani1992@yahoo.com.

Citation:



Husseinzadeh Kashan, A., Afkhani, S., & Maroofkhani, P. (2023). Multi-objective optimization of the U-shaped assembly line balancing and worker assignment considering setup-times and workers' skill. *Journal of decisions and operations research*, 8(2), 283-306.

Received: 17/04/2021

Reviewed: 20/05/2021

Revised: 11/06/2021

Accepted: 22/08/2021

Abstract

Purpose: In this research due to the importance of the U-shaped assembly line balancing and, on the other hand, the importance of human factors and setup times, we want to develop a bi-objective mathematical model minimize the cycle time and the total cost.

Methodology: Since the research problem is shown to be NP-hard, NSGA-II, which is a population-based algorithm, and also SPEA-II are used to solve the problem.

Findings: A mathematical model for the problem on hand is developed. We solve the problem using NSGA-II and SPEA-II. We use four criteria for analyzing the results of the mathematical model and evaluating the performance of the multi-objective evolutionary algorithms. The experimental results demonstrate that NSGA-II is superior to SPEA-II.

Originality/Value: A bi-objective mathematical model for the U-shaped assembly line balancing problem considering setup-times and workers' skill is developed, and the problem is solved using two algorithms.

Keywords: U-shaped assembly line balancing, Setup time, Workers' skill, NSGA-II, SPEA-II.

Corresponding Author: a.kashan@modares.ac.ir

 <http://dorl.net/dor/20.1001.1.25385097.1402.8.2.1.5>



Licensee. **Journal of Decisions and Operations Research**. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



بهینه‌سازی چندهدفه مساله بالانس خط مونتاژ U شکل و تخصیص کارگران با در نظر گرفتن زمان‌های آماده‌سازی و مهارت کارگران

علی حسین‌زاده کاشان^{۱*}، سعید افخمی^۱، پریسا معروفخانی^۱

گروه مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

چکیده

هدف: در این مطالعه با توجه به اهمیت مساله بالانس خطوط مونتاژ U شکل و از سوی دیگر اهمیت فاکتورهای انسانی و زمان‌های آماده‌سازی، یک مدل ریاضی دوهدفه با اهداف کاهش زمان چرخه و کاهش مجموع هزینه‌های کارگران تخصیص داده شده به ایستگاه‌های کاری توسعه داده شده است.

روش‌شناسی پژوهش: از آن‌جاکه مساله مورد نظر از لحاظ پیچیدگی جزو مسایل *Np-hard* می‌باشد لذا از الگوریتم‌های فرا ابتکاری ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب *II* که الگوریتمی مبتنی بر جمعیت می‌باشد و هم‌چنین از نسخه دوم الگوریتم تکاملی مبتنی بر قوت پارتو برای حل مدل استفاده کرده‌ایم.

یافته‌ها: یک مدل ریاضی برای مساله تحت بررسی توسعه داده شده است. مساله مورد نظر با استفاده از الگوریتم‌های *NSGA-II* و *SPEA-II* حل شده است. در انتها نیز به منظور تحلیل نتایج مدل دوهدفه و ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه از چهار معیار تعداد جواب‌های پارتو، میانگین فاصله از نقطه ایده‌آل، شاخص گوناگونی و شاخص کیفیت استفاده نمودیم. نتایج محاسباتی نشان از برتری الگوریتم *NSGA-II* بر *SPEA-II* دارد.

اصالت/ارزش‌افزوده علمی: یک مدل ریاضی دوهدفه برای مساله بالانس خط مونتاژ U شکل با در نظر گرفتن زمان‌های آماده‌سازی و مهارت کارگران توسعه داده شده و مساله مورد بررسی با دو الگوریتم حل شده است.

کلیدواژه‌ها: بالانس خط مونتاژ U شکل، زمان‌های آماده‌سازی، مهارت کارگران، الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب *II*، نسخه دوم الگوریتم تکاملی مبتنی بر قوت پارتو.

۱- مقدمه

در دنیای امروز بیش‌تر محصولات محصلاتی که به دست مشتریان می‌رسد، محصولات مونتاژ شده می‌باشند. خطوط مونتاژ، سیستم‌های تولیدی با جریان خطی هستند که طراحی و پیاده‌سازی آن‌ها اهمیت زیادی در تولید صنعتی کالاها دارد. هنگامی که سطح تولید یک محصول خاص به مقدار کافی بالا است، استفاده از یک خط مونتاژ^۱ برای این محصول خاص مفید خواهد بود. یک خط مونتاژ شامل ایستگاه‌های کاری

^۱ Assembly line

* نویسنده مسئول





است که قطعه کاری با عبور از تک‌تک این ایستگاه‌ها و انجام عملیات روی آن تبدیل به محصول نهایی می‌شود. جانمایی خطوط مونتاژ براساس جهت جریان مواد مشخص می‌شود. چندین حالت مختلف برای جانمایی وجود دارد که در تحقیق حاضر خطوط مونتاژ به صورت U شکل لحاظ شده است. در این نوع خطوط مونتاژ، دو سمت خط مونتاژ بسیار به هم نزدیک و به شکل U (نعل اسب) می‌باشد. در این خطوط ایستگاه‌ها ممکن است در هر دو طرف خط فعالیت انجام دهند، هم‌چنین ایستگاه‌ها به یکدیگر نزدیک‌تر بوده و قابلیت دید کل فرآیند تولید و ارتباطات بین اپراتورها بهبود می‌یابد که این امر موجب چندمهارته شدن اپراتورها، ایجاد انگیزه در کارکنان و افزایش کیفیت محصول می‌شود [1].

در هر فرآیند تولید، تعداد ماشین‌آلات و تجهیزات و هم‌چنین میزان نسبتاً ثابتی از نیروی انسانی موجود است که جهت انجام عملیات تولید از آن‌ها استفاده می‌شود. در بسیاری از موارد با مشاهده نحوه کار یک فرآیند می‌توان دید که تعدادی از ماشین‌آلات، مشغول کار نیستند ولی تعداد دیگری از تجهیزات، به‌طور مداوم در حال کار بوده و در مقابل تعدادی از کارگران به‌شدت در حال انجام کار می‌باشند و حجم قابل توجهی از کار انجام‌نشده در کنار آن‌ها انباشته گردیده است. وجود زمان‌های بیکاری و یا وجود کار بیش‌ازحد، یعنی عدم بالانس و تعادل در فرآیند تولید که موجب مشکلاتی برای مدیریت سیستم می‌شود. برای رفع این معضلات مدیر ناچار به ارایه راهکارهایی جهت بهبود وضع موجود است. یکی از راهکارهایی که مدیر می‌تواند برای رفع مشکل عدم بالانس و تعادل در فرآیند تولید استفاده کند، بحث بالانس و یا متعادل‌سازی خط تولید یا مونتاژ است [2]. بالانس خط، تکنیکی است که مدیریت با تکیه بر آن می‌تواند توازن بین ظرفیت‌های ماشین‌آلات، تسهیلات و غیره به‌وجود آورد. هدف از بالانس خطوط مونتاژ، دست یافتن به راهکارهایی موثر و بهره‌ور در تولید محصول و نیز افزایش سطح تولید می‌باشد. هم‌چنین عدم بالانس خطوط مونتاژ باعث افزایش زمان چرخه، زمان‌های بیکاری و در نتیجه کاهش نرخ تولید و افزایش هزینه‌های سیستم می‌شود که این عوامل در نهایت باعث بهره‌وری پایین در سازمان می‌گردد. این مساله باعث شده است که پژوهشگران و شاغلین در زمینه تولید و عملیات، توجه ویژه‌ای به مساله بالانس خط مونتاژ داشته باشند [3].

در مطالعاتی که تاکنون در خصوص مساله بالانس خطوط مونتاژ U شکل انجام گرفته است، تابع هدف مختلفی هم‌چون حداقل‌سازی زمان چرخه، حداقل‌سازی هزینه، حداقل‌سازی تعداد ایستگاه‌های کاری در نظر گرفته شده است. با وجود این‌که یکی از راه‌ها جهت کاهش زمان چرخه استفاده از کارگران ماهرتر می‌باشد و این خود مستلزم افزایش هزینه است، اما هیچ‌یک از مطالعات انجام‌شده به بررسی این مساله با دو تابع هدف حداقل‌سازی زمان چرخه و حداقل‌سازی هزینه نپرداخته‌اند. بدین منظور در مطالعه انجام‌شده برای هر کارگر در انجام هر کار یک ضریب عملکرد در نظر گرفته و ضمن انجام بالانس خط مونتاژ، تخصیص کارگران به ایستگاه را نیز در نظر می‌گیریم. هم‌چنین به‌منظور شباهت هر چه بیشتر با دنیای واقعی، زمان‌های آماده‌سازی روبه‌جلو و روبه‌عقب نیز مدنظر قرار داده شده است. زمان‌های آماده‌سازی وابسته به‌توالی به این معنا هستند که قبل از آن‌که فعالیتی^۱ (قسمتی از کل کار موردنیاز فرآیند مونتاژ است که غیرقابل تقسیم باشد) در یک ایستگاه انجام شود، لازم است زمانی برای آماده‌سازی در نظر گرفته شود که مقدارش به فعالیت‌های مجاور آن فعالیت بستگی دارد. زمان روبه‌جلو زمانی است که یک اپراتور دو کار همسایه را روی یک محصول در یک منطقه ایستگاهی انجام می‌دهد، درحالی‌که زمان روبه‌عقب به دو صورت در نظر گرفته می‌شود. حالت اول زمانی است که فعالیت بعدی مربوط به سر دیگر ایستگاه است. در واقع اپراتور در حال تعویض مناطق ایستگاهی می‌باشد و از سر ورودی ایستگاه به سر خروجی آن رفته و بالعکس و حالت دوم زمانی است که به سر خروجی ایستگاه فعالیتی تخصیص نداده و فعالیت بعدی اولین فعالیت محصول بعدی می‌باشد.

در دنیای امروز بیش‌تر محصولات می‌رسند، محصولات مونتاژ شده می‌باشند. بالانس خط مونتاژ گامی اساسی در برنامه‌ریزی سیستم‌های تولیدی به‌شمار می‌آید، به‌نحوی که دستیابی به وضعیت متعادل در این سیستم می‌تواند در سوددهی یک واحد تولیدی موثر باشد. در این مقاله تلاش شده است که مفروضات واقعی نظیر در نظر گرفتن مهارت کارکنان و در نظر گرفتن زمان‌های آماده‌سازی وابسته به‌توالی روبه‌جلو و روبه‌عقب به مدل ریاضی مساله بالانس خط مونتاژ U شکل افزوده شود. هم‌چنین مساله مذکور با دو الگوریتم فرا ابتکاری چندهدفه به‌منظور کاهش توامان زمان چرخه و هزینه کارکنان حل شده است. لذا می‌توان از نتایج مقاله مذکور در کلیه صنایعی که در تولید محصول نهایی خود از خطوط مونتاژ استفاده می‌کنند نظیر صنایع خودروسازی، واحدهای تولیدی لوازم‌خانگی و ... بهره برد.

¹ Task

ساختار ادامه مقاله به این صورت است که در بخش دوم پیشینه پژوهش‌های انجام گرفته در این زمینه ذکر می‌شود. در بخش سوم مدل ریاضی ارائه شده برای مساله تحقیق بیان می‌گردد. در ادامه مساله تحقیق با استفاده از الگوریتم‌های *NSGA-II* و *SPEA-II* حل شده و نتایج محاسباتی ارائه خواهند شد. در نهایت و در بخش پنجم نتیجه‌گیری مقاله بحث خواهد شد.

۲- پیشینه پژوهش

در این بخش مبانی نظری و نیز پیشینه پژوهش انجام شده مورد بررسی قرار خواهد گرفت. بخش حاضر در سه زیر بخش تهیه و تنظیم شده است. نخست و در زیربخش ۲-۱ بر مبانی نظری پژوهش انجام شده مروری خواهیم داشت و تعاریف، اصطلاحات و دسته‌بندی‌های موجود در ادبیات مساله حاضر را بررسی خواهیم نمود. در زیربخش‌های ۲-۲ و ۲-۳ تحقیقات انجام شده در ادبیات موضوع، مورد بررسی قرار خواهد گرفت. به سبب دسته‌بندی بهتر، نخست به شرح مسایل بالانس خط مونتاژ U شکل موجود در ادبیات پرداخته می‌شود و سپس بر تحقیقاتی که فاکتورهای انسانی را در بالانس خط مونتاژ مدنظر قرار داده‌اند مروری خواهیم داشت.

۲-۱- مروری مبانی نظری پژوهش

در این قسمت مروری بر مبانی نظری پژوهش خواهیم داشت.

۲-۱-۱- خط مونتاژ

یک سیستم مونتاژ شامل مجموعه‌ای از عناصر کاری غیر قابل تقسیم و مجزا (فعالیت)، برای مونتاژ یک محصول (محصولات) و دارای تعدادی ایستگاه کاری^۱ مرتبط با یکدیگر، یک سیستم انتقال مواد بین ایستگاه‌ها مانند تسمه نقاله و یک دستورالعمل برای چگونگی مونتاژ محصول از یک ایستگاه به ایستگاه دیگر است [4]. خطوط مونتاژ به دو دسته دستی و خودکار تقسیم می‌شوند. در مونتاژ، ویژگی متمایزکننده نسبت به سایر عملیات تولیدی این است که دو یا چند قطعه مجزا به یکدیگر متصل می‌شوند. مثال‌های این گروه عبارت‌اند از عملیات چفت و بست مکانیکی با استفاده از پیچ‌ها، مهره‌ها، پرچ‌ها و ... همان‌گونه که ذکر شد، هر خط مونتاژ از تعدادی ایستگاه کاری تشکیل می‌شود. ایستگاه کاری قسمتی از خط مونتاژ است که مقدار معینی از کار (تعدادی از فعالیت‌ها) را انجام می‌دهد. هر ایستگاه با ماشین‌آلات و ابزارآلات مورد نیاز برای انجام فعالیت مشخص می‌شود. زمان لازم برای انجام فعالیت‌های تخصیص یافته به ایستگاه، زمان ایستگاه نامیده می‌شود [5].

۲-۱-۲- انواع خطوط مونتاژ براساس چیدمان ایستگاه‌ها

جانمایی خطوط مونتاژ براساس جهت جریان مواد مشخص می‌شود. حالت‌های مختلف برای جانمایی عبارت‌اند از تکی، دوطرفه، U شکل و موازی. در خطوط مونتاژ تکی، ایستگاه‌ها به صورت منفرد و در یک خط مستقیم در امتداد یک سیستم انتقال (نوار نقاله) مرتب شده‌اند. هر ایستگاه یک یا چند فعالیت را بر روی محصول نیمه تمام انجام می‌دهد [6]. در مواردی ممکن است استفاده از چند خط موازی برای تولید یک یا چند محصول مفید باشد که به آن خط مونتاژ موازی گویند. این نوع از خطوط مونتاژ باعث افزایش انعطاف و کاهش حساسیت خرابی سیستم می‌شود؛ زیرا با تغییر میزان تقاضا تعداد خطوط می‌تواند تغییر کند و هم چنین ریسک توقف تولید به خاطر خرابی ماشین‌آلات پایین می‌آید [7]. خطوط مونتاژ دوطرفه، نوع خاصی از خطوط مونتاژ موازی می‌باشند. در مواردی که قطعات کار سنگین هستند (مثل مونتاژ کامیون)، خطوط دوطرفه مورد استفاده قرار می‌گیرند. این نوع خطوط متشکل از دو خط مونتاژ مستقیم به شکل موازی می‌باشند. ایستگاه‌ها در دو سوی خط هستند و اپراتورها در دو سمت ماشین‌ها به طور موازی کار می‌کنند و کار به طور هم‌زمان در دو سوی قطعه کار انجام می‌شود [8].

خطوط مستقیم معمولی مشکلات زیادی دارند. به‌عنوان مثال کار یکنواخت و کسل‌کننده باعث ایجاد سطح پایینی از مهارت شده و هم چنین انعطاف‌ناپذیری سیستم تولید باعث ایجاد تغییر در نرخ تولید می‌شود. به خاطر برطرف کردن این مضرات در سیستم‌های تولید جدید، شاخه‌های جدیدی در مساله خط مونتاژ ایجاد شده است. این خطوط مونتاژ مدرن اغلب به صورت خطوط U شکل نشان داده

¹ Work station





می‌شوند که در آن‌ها دو سمت خط به هم بسیار نزدیک و به شکل U (نعل اسب) می‌باشد. در این نوع خطوط، ایستگاه‌ها به یکدیگر نزدیک‌ترند؛ بنابراین، قابلیت دید کل فرآیند تولید و ارتباطات بین اپراتورها بهبود می‌یابد. هم‌چنین کمک کارگران به یکدیگر در حالت اشتراک ظرفیت ماشین‌آلات ساده‌تر می‌شود و مهارت کارگران در انجام وظایف مختلف افزایش می‌یابد [1]. در مقاله حاضر این نوع خطوط مدنظر قرار داده شده است.

۳-۱-۲- سایر تقسیم‌بندی‌های مساله بالانس خط مونتاژ

مساله بالانس خط مونتاژ را می‌توان به سه دسته تک‌محصولی، مختلط و چندمحصولی تقسیم نمود. خط مونتاژ تک‌محصولی فقط برای تولید یک نوع محصول مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدل مختلط مجموعه‌ای از محصولات متفاوت که کارکرد اصلی آن‌ها مشابه است را در نظر می‌گیرد؛ مانند خانواده‌ای از خودروها با ویژگی‌های متفاوت که برخی از آن‌ها مجهز به سان‌روف و برخی مجهز به سیستم ای‌بی‌اس هستند. خط تولید گروهی در حالت محصولات متفاوت و متعدد یا خانواده‌ای از محصولات که تفاوت‌های نسبتاً زیادی در فرآیندهای تولید دارند استفاده می‌شود [6]. به‌علاوه، فعالیت‌ها می‌توانند دارای زمان‌های قطعی یا تصادفی باشند. نوع دیگری از تقسیم‌بندی این مساله براساس تابع هدف است. در صورتی که زمان چرخه داده شده باشد و هدف حداقل نمودن تعداد ایستگاه‌های کاری باشد، به آن مساله بالانس خط مونتاژ نوع اول^۱ گویند. مسایل نوع دوم^۲، به دنبال تخصیص فعالیت‌ها به ایستگاه‌های کاری است، به‌گونه‌ای که تعداد ایستگاه‌ها مشخص بوده و هدف، دستیابی به کم‌ترین میزان زمان سیکل تولید و بیشینه نمودن نرخ تولید است. در مسایل نوع سوم^۳، هدف یافتن تخصیص بهینه‌ای است که منجر به استفاده حداکثر از زمان چرخه در تمامی ایستگاه‌ها باشد. با بررسی مسایل موجود در ادبیات، درمی‌یابیم که مقالات محدودی در خصوص مساله بالانس خط مونتاژ U شکل به چاپ رسیده‌اند که اغلب آن‌ها از نوع اول بوده و نیز زمان‌ها را به‌صورت قطعی در نظر گرفته‌اند. مقالاتی که مسایل نوع دوم و سوم را چه به‌صورت تک‌محصولی، چه به‌صورت مختلط یا چندمحصولی در نظر گرفته باشند کم‌تر یافت می‌شود. در ادامه، به شرح مسایل بالانس خط مونتاژ U شکل موجود در ادبیات و هم‌چنین تحقیقاتی که فاکتورهای انسانی را در بالانس خط مونتاژ مدنظر قرار داده‌اند پرداخته می‌شود.

۲-۲- مروری بر مطالعات انجام‌شده در خصوص مساله بالانس خط مونتاژ U شکل

مساله بالانس خط مونتاژ U شکل برای اولین بار توسط میلنبرگ و وینگارد [9] مورد مطالعه قرار گرفت. آن‌ها یک فرمول برنامه‌ریزی پویا به‌منظور حل مسایل کوچک تا حداکثر یازده فعالیت ارائه نمودند. بعدها میلنبرگ و اسپارلینگ [1] سه الگوریتم دقیق از جمله یک الگوریتم برنامه‌ریزی پویا و یک الگوریتم شاخه و کران، برای بالانس خط مونتاژ U شکل پیشنهاد نمودند. تولیدکنندگان در حال تغییر خطوط تولید تک‌محصولی به خطوط تولید مدل مختلط می‌باشند که به تولیدکنندگان این امکان را می‌دهد که محصولات متنوع و به‌موقع و مقرون‌به‌صرفه را برای مشتریان فراهم کنند. اسپارلینگ و میلنبرگ [1] برای اولین بار مساله بالانس خط مونتاژ U شکل مدل مختلط با هدف کمینه‌سازی تعداد ایستگاه‌های کاری را مورد مطالعه قرار دادند و یک الگوریتم چهار مرحله‌ای برای حل پیشنهاد دادند. هم‌چنین آن‌ها نشان دادند که خطوط مونتاژ U شکل برای تولید محصولات مختلط بسیار مناسب می‌باشد و مزایای بی‌شماری در مقایسه با خطوط مستقیم سنتی دارد.

در تعدادی از مقالات، نویسندگان به ارائه روش‌های حل دقیق برای مساله بالانس خط مونتاژ U شکل پرداختند. شول و کلین [10] انواع مختلف مسایل بالانس خط مونتاژ U شکل را بررسی کرده و روش‌های حل مختلفی را ارائه کرده‌اند. نتایج محاسباتی نشان می‌دهد که روش‌های حل پیشنهادشده برای مسایل نوع اول (با هدف حداقل نمودن تعداد ایستگاه‌های کاری) و نوع دوم (با هدف دستیابی به کم‌ترین میزان زمان سیکل تولید) نتایج بسیار خوبی در زمان محاسباتی محدود ارائه می‌کند. آن‌ها هم‌چنین با در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری فرآیند تولید، انگیزه کارکنان و کیفیت محصولات تولیدشده نشان دادند خطوط U شکل نسبت به خطوط مونتاژ سنتی در سیستم‌های تولید به‌هنگام انتخاب بهتری می‌باشد. فتاحی و همکاران [11] یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح جدید به همراه سه منطق برش برای مساله بالانس خط مونتاژ U شکل نوع اول ارائه نمودند و سپس به مقایسه کار خود با سایر مقالات پرداختند.

¹ UALBP-1

² UALBP-2

³ UALBP-E



در بسیاری از مطالعات این حوزه، نویسندگان از الگوریتم‌های ابتکاری و فرا ابتکاری به منظور حل مسایل با ابعاد بزرگ‌تر بهره بردند. آندرس و همکاران [12] نوع خاصی از مساله بالانس خط مونتاژ که در آن زمان آماده‌سازی هر فعالیت به این‌که چه فعالیتی قبل از آن انجام شود بستگی دارد را در نظر گرفتند. آن‌ها مساله را به منظور بالانس خط مونتاژ و زمان‌بندی فعالیت‌های تخصیص داده شده به هر ایستگاه کاری مدل‌سازی نموده و سپس آن را با استفاده از الگوریتم *GRASP* حل نمودند. ربانی و همکاران [13] یک مدل ریاضی برای مساله بالانس خط مونتاژ *U* شکل مدل مختلط با هدف کاهش زمان چرخه و هزینه‌های موجودی ارائه کردند. در این مدل آن‌ها زمان آماده‌سازی بین هر دو فعالیت متوالی و هم‌چنین دوره‌های زمانی پویا که در آن هر دوره زمانی روی دوره زمانی بعد تاثیرگذار است را در نظر گرفتند. آن‌ها هم‌چنین از الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب *II* برای حل این مدل استفاده نمودند. دلیس و همکاران [14] مساله متوازن‌سازی خط مونتاژ *U* شکل دوطرفه را در نظر گرفته و یک الگوریتم مبتنی بر ازدحام ذرات را برای حل آن معرفی کرده‌اند. هدف، حداقل‌سازی تعداد ایستگاه‌ها در وهله نخست و حداقل‌سازی تعداد موقعیت‌ها به‌عنوان هدف ثانویه بوده است. به منظور ارزیابی کارایی الگوریتم معرفی شده، از نمونه مسایل موجود در ادبیات موضوع استفاده شده است. جایی‌که نتایج نشان از عملکرد مطلوب روش معرفی شده دارند. ساهین و کلگنز [15] خطوط مونتاژ *U* شکل را با در نظر گرفتن زمان‌های آماده‌سازی روبه‌جلو و روبه‌عقب با هدف کاهش زمان چرخه مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها هم‌چنین متغیری به نام *RST*^۱ که بیانگر زمان شروع نسبی فعالیت‌ها می‌باشد را تعریف نمودند. *RST* هر ایستگاه برابر است با حاصل‌ضرب تعداد مناطق ایستگاهی قبل از ایستگاه در زمان چرخه. آن‌ها از یک الگوریتم هیوریستیک بر مبنای الگوریتم‌های ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید برای حل این مساله استفاده کردند. مظفری و همکاران [16] مساله بالانس خط مونتاژ مختلط را با هدف کاهش هزینه‌های نیروی انسانی و نیز کاهش تعداد ایستگاه‌های کاری در نظر گرفتند. آن‌ها الگوریتمی جدید بر مبنای الگوریتم‌های کلونی زنبور مصنوعی و ازدحام ذرات برای حل این مساله ارائه نمودند. لی و همکاران [17] یک الگوریتم هیوریستیک جستجوی شعاعی بهبودیافته را به منظور حل مساله بالانس خط مونتاژ *U* شکل نوع اول و دوم ارائه نمودند. آن‌ها آزمایش‌ها محاسباتی فراوانی را به منظور اثبات کارایی روش ارائه شده به انجام رساندند.

اکثر مطالعات روی خطوط مونتاژ *U* در محیط‌های قطعی بوده و عدم قطعیت را در زمان اجرای عملیات نادیده می‌گیرند. هزیر و دولگوی [18] خطوط مونتاژ *U* شکل را در شرایط عدم قطعیت بررسی کرده و یک مدل بهینه‌سازی استوار که زمان‌های عملیاتی را به صورت بازه‌ای در نظر گرفته، توسعه داده‌اند که هدف آن کاهش زمان چرخه می‌باشد. آن‌ها هم‌چنین یک الگوریتم تقریبی تکرارشونده را برای حل آن پیشنهاد کرده‌اند. لی و همکاران [19] از نظریه عدم قطعیت به منظور مدل‌سازی مساله بالانس خط مونتاژ *U* شکل نوع یک با زمان‌های عملیاتی نامشخص استفاده نمودند. آن‌ها هم‌چنین یک الگوریتم بر مبنای روش شاخه و کران به منظور حل مساله مورد بررسی توسعه دادند. جهت نزدیکی هر چه بیش‌تر به شرایط واقعی، قندی و کریمی [20] از یک روش بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی به منظور حل مساله بالانس خط مونتاژ دوطرفه مختلط در شرایط تصادفی بودن زمان انجام کارها استفاده نمودند.

۲-۳- مروری بر مطالعات انجام‌شده روی بالانس خط مونتاژ با در نظر گرفتن فاکتورهای انسانی

در این بخش تعدادی از مطالعات انجام‌گرفته روی بالانس خط مونتاژ که فاکتورهای انسانی نظیر عملکرد کارگر، اثر یادگیری و کارگران موقتی را در نظر گرفته‌اند، آورده شده‌اند. ناکادا و اونو [21] کارگران چند عملکردی را در خطوط مونتاژ *U* شکل در نظر گرفتند و الگوریتمی را برای یافتن تخصیص بهینه کارگران به منظور کمینه کردن زمان چرخه ارائه نمودند. آن‌ها هم‌چنین حداقل تعداد کارگران را به‌عنوان محدودیت در نظر گرفتند. به صورت مشابه ناکادا و اونو [22] کارگران چند عملکردی را در مساله بالانس خطوط مونتاژ *U* شکل در نظر گرفتند. آن‌ها دو نوع تخصیص جداگانه و چرخشی کارگران به ماشین‌ها را در نظر گرفتند و هم‌چنین فرض نمودند تمام کارگران دارای یک توزیع زمان عملکرد می‌باشند و زمان انجام فعالیت‌ها به مهارت کارگران بستگی ندارند. کورومیناس و همکاران [23] یک مطالعه برای بالانس مجدد خط در واحد مونتاژ موتورسیکلت با در نظر گرفتن کارگران ماهر و غیر ماهر انجام داده و یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح باینری را ارائه نمودند (آن‌ها عملکردها و شایستگی‌های متفاوت کارگران را در نظر نگرفته‌اند). هم‌چنین اکسوز و سات‌اقلو [24] یک روش ابتکاری برای مساله بالانس خط مونتاژ *U* شکل تک‌محصولی با در نظر گرفتن چهار سطح از شایستگی در انجام هر فعالیت برای کارگران ارائه نمودند.

¹ Relative Starting Time (RST)



توکساری و همکاران [25] رویکردی را برای خطوط مستقیم و U شکل با هدف کمینه کردن تعداد ایستگاه‌ها و تعداد کارگران به صورت هم‌زمان با در نظر گرفتن اثرات یادگیری یکسان برای تمام کارگران ارائه نمودند. هم‌چنین اوتو و اوتو [26] یک روش دقیق و یک روش ابتکاری برای مساله خط مونتاژ ساده ارائه داده و آزمایش‌ها جامعی با در نظر گرفتن پدیده یادگیری برای کارگران به صورتی که هر کارگر منحنی یادگیری مختص به خودش را در هر فعالیت داشت در نظر گرفتند. اسدی زنوز و همکاران [27] یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی برای مساله بالانس خط مونتاژ مختلط با در نظر گرفتن ایستگاه‌های موازی، محدودیت‌های ناحیه‌بندی، زمان‌های آماده‌سازی وابسته به توالی و اثر یادگیری ارائه نمودند. آن‌ها مساله مورد بررسی خود را با استفاده از نوع خاصی از الگوریتم جستجوی ناخودآگاه حل کرده و نتایج حاصله را با الگوریتم ژنتیک مقایسه نمودند.

$ALWABP^1$ مساله‌ای است که زمان اجرای هر فعالیت متفاوت بوده و به کارگری که آن فعالیت را انجام می‌دهد بستگی دارد. در این‌گونه مسایل هر کارگر قابلیت انجام همه فعالیت‌ها را ندارد. مسایل $ALWABP$ متشکل از ارائه راه‌حلی به منظور تخصیص فعالیت‌ها به ایستگاه‌ها و هم‌چنین تخصیص کارگران موجود به ایستگاه‌ها به صورت هم‌زمان می‌باشد. این مساله اولین بار توسط میرالس و همکاران [28] ارائه شد. آن‌ها مراکز کاری معلولین را مورد بررسی قرار دادند. در بسیاری از کشورها افراد معلول می‌توانند شغلی شبیه به هر شخص دیگری را دریافت کنند. در این مراکز استفاده از خطوط مونتاژ سنتی و یافتن فعالیت‌های متناسب با هر کارگر و تخصیص مناسب کارگران به ایستگاه‌ها حایز اهمیت است. تخصیص درست وظایف می‌تواند برخی از ناتوانی‌های افراد معلول را بی‌اثر کند. میرالس و همکاران [28] مدلی را برای مساله تخصیص و تعادل خطوط مونتاژ با توجه به ویژگی‌های این مراکز ارائه دادند. آن‌ها زمان‌های فعالیت‌ها را به صورت متفاوت در نظر گرفتند و برای هر کارگر ضریب عملکردی را در نظر گرفتند. زمان هر فعالیت برای هر کارگر با ضرب کردن ضریب عملکرد مربوط به آن کارگر در زمان استاندارد آن فعالیت محاسبه می‌شود. آن‌ها هم‌چنین یک الگوریتم ابتکاری مبتنی بر شاخه و کران ارائه نمودند. آزمایش‌های انجام شده مبین کارایی الگوریتم ارائه شده بوده است. میرالس و همکاران [29] یک مدل ریاضی و یک روش شاخه و کران برای مساله $ALWABP-2$ ارائه کردند و بعد از آن‌ها، ویلا و پریرا [30] یک روش شاخه و کران برای همین مساله، در حالتی که تعداد اپراتورها و ایستگاه‌ها یکی باشد، ارائه نمودند. بوربا و ریت [31] یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط و هم‌چنین یک روش ابتکاری بر مبنای جستجوی پرتو محلی و یک الگوریتم شاخه و کران مبتنی بر فعالیت‌ها برای این مساله ارائه نمودند. هم‌چنین پولات و همکاران [32] یک الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر دوفازی را برای این مساله پیشنهاد داده و آن را برای نمونه مساله‌هایی تست نمودند. در فاز اول الگوریتم آن‌ها به کمینه کردن زمان چرخه پرداخته و در فاز دوم تخصیص کارگرها به ایستگاه‌ها را مدنظر قرار می‌دهد. اوکسوز و همکاران [33] یک مدل ریاضی برای بالانس خط مونتاژ U شکل با در نظر گرفتن سطوح عملکردی متفاوت کارگران برای هر فعالیت با هدف افزایش کارایی خط مونتاژ ارائه نمودند. آن‌ها هم‌چنین برای حل مدل خود از دو الگوریتم فرا ابتکاری ژنتیک و کلونی زنبور مصنوعی^۲ استفاده کرده‌اند. جاناردنهان و همکاران [34] مساله بالانس خط مونتاژ به همراه تخصیص کارگر در یک خط مونتاژ دوطرفه با هدف کاهش زمان چرخه را در نظر گرفتند. آن‌ها یک مدل عدد صحیح مختلط و یک الگوریتم مهاجرت پرندگان برای مساله مورد مطالعه خود ارائه نمودند.

موریرا و همکاران [35] یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح و روش ابتکاری برای مساله بالانس خطوط مونتاژ که متشکل از کارگران معلول و عادی است را در نظر گرفتند. در این مطالعه آن‌ها ابتدا به بالانس خطوط مونتاژ پرداختند و سپس به تخصیص کارگران به ایستگاه‌ها، به منظور کاهش تعداد ایستگاه‌های کاری اضافی مورد نیاز پرداختند. به صورت مشابه موریرا [36] دو مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط و نیز یک روش ابتکاری برای بالانس خط مونتاژ در شرایطی که کارگرها با یکدیگر متفاوت بوده و زمان فعالیت‌ها وابسته به کارگر، غیرقطعی و به صورت بازه‌ای باشد، پیشنهاد نمودند. ناکاده و همکاران [37] یک مدل ریاضی برای مساله بالانس خط مونتاژ مستقیم و دوطرفه U شکل با در نظر گرفتن کارگران دایمی و موقتی و با هدف کاهش زمان چرخه ارائه کردند. در خطوط مونتاژ، کارگران موقتی به منظور مواجهه با نوسان تقاضا استفاده می‌شوند. برای دستیابی به تخصیص بهینه وظایف و کارکنان یک الگوریتم ارائه شده است. نتایج به دست آمده حاکی از این است که خط مونتاژ U شکل کارگران موقتی کم‌تری نسبت به خط مونتاژ مستقیم دارد. هم‌چنین زمانی که تقاضا بالا باشد استفاده از دو خط مونتاژ U شکل در برخی موارد اثربخش‌تر از استفاده از یک خط مونتاژ U شکل است. زین و همکاران [38] یک روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات صفر و یک برای بالانس میزان بار کاری ایستگاه‌ها و کمینه کردن هزینه‌های نیروی انسانی در مونتاژ صنایع هوایی، جایی که کارگران به سه دسته مبتدی، متوسط و ماهر تقسیم‌بندی می‌شوند پیشنهاد دادند. پس از آن ناکاده [39] تاثیر توالی کارگرها بر زمان چرخه

¹ Assembly Line Worker Assignment Balancing Problem (ALWABP)

² Artificial Bee Colony (ABC)



در خطوط مونتاژ U شکل تحلیل کرد. صالحی و همکاران [40] یک مساله بالانس خط مونتاژ چندهدفه را با اهدافی چون حداقل‌سازی تعداد ایستگاه‌ها، هزینه‌های خرید تجهیزات، حقوق و دستمزد وابسته به زمان کارگر و سطح عدم کیفیت وابسته به کارکنان در ایستگاه‌ها را به طور هم‌زمان مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها این مساله را در محیط فازی فرموله کرده و برای حل آن از یک رویکرد تعاملی فازی جدید ترکیبی دو مرحله‌ای استفاده کردند. برای ارزیابی رویکرد پیشنهادی، آن را روی دو نمونه مساله و یک مطالعه موردی (صنایع پوشاک) مورد ارزیابی قرار داده و نتایج حاکی از برتری رویکرد پیشنهادی نسبت به سایر رویکردهای شناخته‌شده در ادبیات می‌باشد.

با توجه به مرور ادبیات درمی‌یابیم که غالب مقالات موجود در خصوص مساله بالانس خط مونتاژ و تخصیص کارگر نوع خط را به صورت تکی فرض نموده‌اند و شمار مقالاتی که این مساله را با در نظرگیری خط مونتاژ به صورت U شکل در نظر گرفته‌اند، بسیار محدود بوده است. با وجود تلاش‌هایی که در این حوزه صورت گرفته، هنوز شکاف‌های عریضی بین مطالعات دانشگاهی و کاربردهای عملی به دلیل استفاده از فرضیات ساده‌کننده که با دنیای واقعی هم‌خوانی ندارند وجود دارد. در این مطالعه سعی بر پر نمودن این شکاف‌ها خواهیم داشت. بدین منظور، برای نخستین بار زمان‌های آماده‌سازی روبه‌جلو و روبه‌عقب را به این مساله می‌افزاییم. فرض این‌که کارگرها می‌توانند تمام فعالیت‌ها را در یک سطح عملکردی برابر انجام دهند فرضی غیرواقع‌بینانه می‌باشد. در این مطالعه برای هر کارگر و در انجام هر کار یک ضریب عملکرد در نظر می‌گیریم. هم‌چنین با وجود این‌که غالب تصمیم‌گیری‌ها در دنیای واقعی با اهدافی چندگانه می‌باشند، اغلب مقالات مساله بالانس خط مونتاژ و تخصیص کارگر را به صورت تک‌هدفه در نظر گرفته‌اند. در مقاله حاضر، جهت هر چه نزدیک شدن به دنیای واقعی، برای نخستین بار این مساله را به صورت دو هدفه در نظر گرفته و سعی در کاهش توامان زمان چرخه و هزینه‌های نیروی انسانی با استفاده از الگوریتم‌های $NSGA-II$ و $SPEA-II$ خواهیم داشت.

تفاوت کار مقاله حاضر با تعدادی از مهم‌ترین مطالعات پیشین، در ادامه در جدول ۱ آورده شده است.

۳- مدل ریاضی

در این بخش مدل ریاضی مساله بالانس خط مونتاژ U شکل و تخصیص کارگر با در نظر گرفتن زمان‌های آماده‌سازی روبه‌جلو و روبه‌عقب توسعه داده شده است. این مدل‌سازی بر اساس مدل آندرس و همکاران [12] که برای بالانس خطوط مونتاژ مستقیم و با هدف کاهش تعداد ایستگاه‌های کاری بوده، به انجام رسیده است. در این مدل خطوط مونتاژ را به صورت U شکل در نظر گرفته و زمان‌های آماده‌سازی وابسته به توالی روبه‌جلو و روبه‌عقب را به مدل آندرس افزوده‌ایم. زمان‌های آماده‌سازی وابسته به توالی به این معنا هستند که قبل از آن‌که فعالیتی در یک ایستگاه انجام شود زمانی آماده‌سازی لازم است در نظر گرفته شود که مقدارش به فعالیت‌های مجاور آن فعالیت بستگی دارد. به منظور نزدیک شدن هر چه بیشتر به دنیای واقعی، در این مقاله دو نوع مختلف زمان آماده‌سازی با نام‌های روبه‌جلو و روبه‌عقب در نظر گرفته شده است. زمان آماده‌سازی روبه‌جلو زمانی است که یک اپراتور دو کار همسایه را روی یک محصول در یک منطقه ایستگاهی انجام می‌دهد. زمان آماده‌سازی روبه‌عقب در دو حالت در نظر گرفته می‌شود؛ حالت اول زمانی است که فعالیت بعدی مربوط به سر دیگر ایستگاه است. در این حالت در واقع اپراتور در حال تعویض مناطق ایستگاهی می‌باشد و از سر ورودی ایستگاه به سر خروجی آن رفته و بالعکس. حالت دوم زمانی است که به سر خروجی ایستگاه فعالیت تخصیص داده نشده و فعالیت بعدی اولین فعالیت محصول بعدی می‌باشد. هم‌چنین در این مدل‌سازی به مهارت کارگران در انجام کارها توجه شده است. بدین صورت که برای هر کارگر و در انجام هر کار یک ضریب عملکرد در نظر گرفته‌ایم. تفاوت دیگر مدل ارائه‌شده با مدل آندرس در نظر گرفتن توامان دو تابع هدف کاهش زمان چرخه و کاهش هزینه نیروی انسانی می‌باشد. در واقع سعی داریم که بالانس خط مونتاژ و تخصیص کارگران به ایستگاه‌ها را به نحوی انجام دهیم که میزان زمان چرخه و از سویی دیگر میزان هزینه نیروی انسانی حداقل شوند.

جدول ۱- مقایسه مقالات مرور شده و کار حاضر.

Table 1- Comparison of the reviewed papers and our work.

منابع	نوع خط		تنوع محصولات		زمان آماده‌سازی		مهارت کارکنان		عدم قطعیت		تابع هدف		چندهدفه		روش حل
	تکی	دوطرفه	موازی	تک‌محصولی	مختلط	وابسته به‌توالی	روبه‌جلو و عقب	یادگیری کارکنان	تخصیص کارگر	حداقل ایستگاه	حداقل زمان چرخه	حداکثر سود یا بهره‌وری	حداقل هزینه نیروی انسانی	حداقل سازی هزینه موجودی	
فتاحی و همکاران [11]			✓							✓					Cplex
آندرس و همکاران [12]	✓			✓		✓				✓					GRASP
ربانی و همکاران [13]			✓		✓					✓			✓	✓	NSGA-II
دلپس و همکاران [14]			✓		✓					✓					PSO
مظفری و همکاران [16]			✓		✓					✓		✓			ABC-PSO
لی و همکاران [17]			✓							✓	✓				Beam Search
هزیر و دولگویی [18]			✓						✓	✓					تجزیه بندرز
لی و همکاران [19]			✓						✓	✓					B & B
قندی و کریمی [20]		✓			✓				✓	✓					بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی هیوریستیک
اکسوز و سات‌افلو [24]			✓					✓			✓				هیوریستیک
اوتو و اوتو [26]								✓		✓					دقیق و هیوریستیک
اسدی زنوز و همکاران [27]			✓		✓			✓		✓					جستجوی ناخودآگاه
ویلا و پیرا [30]	✓			✓				✓			✓				B & B



۱. تولید به صورت تک محصولی می باشد.
۲. طرح خط مونتاژ به صورت U شکل می باشد.
۳. هر فعالیت توسط یک کارگر انجام می شود.
۴. مجموع تعداد ایستگاهها ثابت است.
۵. فعالیتها غیر قابل تقسیم می باشند و هر کارگری فقط می تواند یک فعالیت را در هر زمان انجام دهد.
۶. به هر ایستگاه تنها یک کارگر تخصیص می یابد.
۷. هر فعالیت را تنها می توان به یک ایستگاه تخصیص داد.
۸. تمام تجهیزات در تمام ایستگاهها وجود دارد و می توان هر فعالیت را به هر ایستگاهی تخصیص داد.
۹. هیچ محدودیت تخصیصی به جز محدودیت های پیش نیازی وجود ندارد.
۱۰. تخصیص روبه جلو و روبه عقب فعالیتها امکان پذیر می باشد.
۱۱. زمان استاندارد فعالیتها قبل از آغاز برنامه ریزی قطعی و مشخص می باشند.
۱۲. زمانهای آماده سازی روبه جلو و روبه عقب در این مدل در نظر گرفته شده است.
۱۳. زمان تکمیل هر فعالیت وابسته به کارگری است که آن فعالیت را انجام می دهد.
۱۴. زمانهای آماده سازی ثابت بوده و وابسته به کارگری که فعالیتها را انجام می دهد نیست.

۲-۳- پارامترها

n : تعداد فعالیتها.

m : تعداد ایستگاهها.

t_i : زمان استاندارد انجام فعالیت i .

$\tau_{ij}(\mu_{ij})$: زمان آماده سازی روبه جلو (روبه عقب) از فعالیت i به فعالیت j .

$P_i(P_i^*)$: مجموعه پیش نیازی های مستقیم فعالیت i (مجموعه تمام پیش نیازی های فعالیت i).

$F_i(F_i^*)$: مجموعه پس نیازی های مستقیم فعالیت i (مجموعه تمام پس نیازی های فعالیت i).

P_{iw} : ضریب عملکرد کارگر w در فعالیت i .

a_w : هزینه استخدام کارگر w .

E_i : زودترین منطقه ایستگاهی که می توان فعالیت i را به آن تخصیص داد.

L_i : دیرترین منطقه ایستگاهی که می توان فعالیت i را به آن تخصیص داد.

M_i : حداکثر تعداد فعالیتی که می توان به هر منطقه ایستگاهی تخصیص داد.

G_k : مجموعه فعالیت هایی که می توان در منطقه ایستگاهی k انجام داد $G_k = \{i | E(i) < k < L(i)\}$.

- مجموعه فعالیت‌ها $i, i \in V = (1, 2, \dots, n)$
- مجموعه ایستگاه‌ها $j \in S = (1, 2, \dots, m)$
- مجموعه مناطق ایستگاهی $k, k' \in Z = (1, 2, \dots, 2m)$
- مجموعه موقعیت‌ها $s \in R = (1, 2, \dots, s)$
- مجموعه کارگرها $w \in W = (1, 2, \dots, Tw)$

۳-۴- متغیرها

X_{iks} : اگر فعالیت i به منطقه ایستگاهی k در موقعیت s تخصیص یابد مقدار یک و در غیر این صورت مقدار صفر اتخاذ می‌کند.

$Y_{ii'k}$: اگر فعالیت i' بلافاصله بعد از فعالیت i در منطقه ایستگاهی k انجام شود (روبه جلو) مقدار یک و در غیر این صورت مقدار صفر اتخاذ می‌کند.

$W_{ii'k}$: اگر فعالیت i' بلافاصله بعد از فعالیت i در منطقه ایستگاهی k انجام شود (روبه عقب) مقدار یک و در غیر این صورت مقدار صفر اتخاذ می‌کند.

σ_{ik} : اگر فعالیت i آخرین فعالیت در منطقه ایستگاهی k باشد مقدار یک و در غیر این صورت مقدار صفر اتخاذ می‌کند.

δ_k : اگر منطقه ایستگاهی k باز شود مقدار یک و در غیر این صورت مقدار صفر اتخاذ می‌کند.

A_{kw} : اگر کارگر w به ایستگاه k تخصیص یابد مقدار یک و در غیر این صورت مقدار صفر اتخاذ می‌کند.

CT : زمان چرخه.

۳-۵- تابع هدف مدل

$$\text{Min } CT, \tag{1}$$

$$\text{Min } \sum_w \sum_k A_{kw} \cdot \alpha_w, \tag{2}$$

$$\sum_{k=E(i)}^{L(i)} \sum_s X_{iks} = 1 \text{ for all } i, \tag{3}$$

$$\sum_{i \in G_k} X_{iks} \leq 1 \text{ for all } k, s, \tag{4}$$

$$\sum_{i \in G_k} X_{ik(s+1)} \leq \sum_{i \in G_k} X_{iks} \text{ for all } j, s, \tag{5}$$

$$\sum_{k=E(i)}^{L(i)} \sum_s [M_1 \cdot (k-1) + s] X_{iks} \leq \sum_{k=E(i')}^{L(i')} \sum_s [M_1 \cdot (k-1) + s] X_{i'ks} \text{ for all } (i, i') \in P, \tag{6}$$

$$\sum_{i \in G_k} \sum_s t_{i'w} X_{iks} A_{kw} + \sum_{i \in G_{k'}} \sum_s t_{i'w} X_{i'ks} A_{kw} + \sum_{\substack{i \neq i' \\ i' \notin P_i \\ i' \in F(i) - F(i)}} \tau_{ii'} Y_{ii'k} + \sum_{\substack{i \neq i' \\ i' \notin P_i \\ i' \in F(i) - F(i)}} \tau_{ii'} Y_{ii'k'} \tag{7}$$

$$+ \sum_i \sum_{i'} \mu_{ii'} W_{ii'k} + \sum_i \sum_{i'} \mu_{ii'} W_{ii'k'} \leq CT \text{ for all } k \leq m, k' = 2m - k + 1 \text{ for all } w \in W, \tag{8}$$

$$X_{iks} + X_{i'k(s+1)} \leq 1 + Y_{ii'k} \text{ for all } i, i', k, s, i \neq i', i' \notin P_i, \tag{8}$$

$$X_{iks} - \sum_{i'} X_{ik(s+1)} \leq \sigma_{ik} \text{ for all } i, k, s, E(i) \leq k \leq L(i), \tag{9}$$

$$\sigma_{ik} + X_{i'k'1} + \delta_{k'} \leq 2 + W_{ii'k} \text{ for all } i, i', k, k' = 2m - k + 1, E(i) \leq k \leq L(i), E(i') \leq k' \leq L(i'), \tag{10}$$





$$\sigma_{ik} + X_{i'k'} + (1 - \delta_{k'}) \leq 2 + W_{ii'k} \text{ for all } i, i', k, k' = 2m - k + 1, \quad (11)$$

$$E(i) \leq k \leq L(i), E(i') \leq k' \leq L(i'),$$

$$\delta_k \leq \sum_i \sum_s X_{iks} \text{ for all } k, \quad (12)$$

$$\sum_i \sum_s X_{iks} \leq M\delta_k \text{ for all } k, \quad (13)$$

$$\sum_{k=1}^m A_{kw} \leq 1 \text{ for all } w, \quad (14)$$

$$\sum_{k=1}^{T_w} A_{kw} \leq 1 \text{ for all } k, \quad (15)$$

$$\frac{\delta_k + \delta_{k'}}{2} \leq \sum_w A_{kw} \text{ for all } k, k' = 2m - k + 1, \quad (16)$$

$$\sum_w A_{kw} \leq \delta_k + \delta_{k'} \text{ for all } k, k' = 2m - k + 1, \quad (17)$$

$$X_{iks}, Y_{ii'k'}, W_{ii'k}, \sigma_{ik}, \delta_{ik}, A_{kw} \in \{0, 1\}. \quad (18)$$

تابع هدف (۱) زمان چرخه و تابع هدف (۲) هزینه‌ها را حداقل می‌کند. محدودیت (۳) تضمین می‌کند هر فعالیت دقیقاً به یک منطقه ایستگاهی و یک موقعیت درون آن منطقه ایستگاهی تخصیص یابد. محدودیت (۴) بیان می‌کند به هر منطقه ایستگاهی و هر موقعیت حداکثر یک فعالیت تخصیص یابد. محدودیت (۵) بیان می‌کند اگر به موقعیت s در منطقه ایستگاهی k فعالیت تخصیص نیافت، به موقعیت $s+1$ در همان منطقه ایستگاهی نیز نباید فعالیت تخصیص داده شود. محدودیت (۶) نشان می‌دهد اگر فعالیت i پیش‌نیاز i' باشد، فعالیت i' نمی‌تواند به منطقه ایستگاهی قبل از i تخصیص یابد. اگر هر دو به یک منطقه ایستگاهی تخصیص یابند فعالیت i' نمی‌تواند به موقعیت قبل از i تخصیص یابد. محدودیت (۷) بیان می‌کند زمان کاری هر ایستگاه (شامل زمان فعالیت‌ها در منطقه ایستگاهی ورودی و خروجی آن ایستگاه) باید از زمان چرخه کوچک‌تر باشد. محدودیت (۸) بیانگر ارتباط بین متغیر X و Y می‌باشد؛ اگر فعالیت i به منطقه ایستگاهی k و موقعیت s تخصیص یافت و فعالیت i' به منطقه ایستگاهی k و موقعیت $s+1$ تخصیص یافت، آن‌گاه $Y_{ii'k}$ در منطقه ایستگاهی k باید برابر یک شود. محدودیت (۹) بیان می‌کند اگر فعالیت i به موقعیت بعد از فعالیت i' تخصیص نیافت، متغیر σ را برابر یک قرار دهیم. محدودیت (۱۰) نشانگر این است که اگر هر دو منطقه ایستگاهی k و k' باز شوند و فعالیت i را به‌عنوان آخرین فعالیت منطقه ایستگاهی k و فعالیت i' را به‌عنوان اولین فعالیت منطقه ایستگاهی k' تخصیص دهیم در این صورت i' بعد از i در فرآیند روبه‌عقب قرار می‌گیرد. محدودیت (۱۱) بیان می‌کند اگر i آخرین فعالیت ایستگاه k باشد و فعالیت i' اولین فعالیت ایستگاه k باشد و منطقه ایستگاهی مقابل k باز نشده باشد، آن‌گاه $W_{ii'k} = 1$ می‌باشد. محدودیت (۱۲) بیانگر این است که اگر هیچ فعالیتی به منطقه ایستگاهی تخصیص ندهیم، نباید منطقه ایستگاهی را باز کنیم. محدودیت (۱۳) دلالت بر این موضوع دارد که اگر در موقعیتی از منطقه ایستگاهی k فعالیتی تخصیص داده باشیم، باید آن منطقه ایستگاهی را باز کنیم. محدودیت (۱۴) تضمین می‌کند هر کارگر را به بیش از یک ایستگاه تخصیص ندهیم. محدودیت (۱۵) بیان می‌کند به هر ایستگاه نباید بیش‌تر از یک کارگر تخصیص بدهیم. محدودیت (۱۶) بیان می‌کند اگر یکی از مناطق ایستگاهی k و k' که مقابل یکدیگرند باز شوند، در آن صورت حتماً یک کارگر به آن منطقه ایستگاهی تخصیص می‌دهیم. محدودیت (۱۷) بیان می‌کند اگر کارگری به منطقه ایستگاهی تخصیص دهیم، در آن صورت حتماً باید حداقل یکی از مناطق ایستگاهی باز شود.

۳-۶- خطی‌سازی

محدودیت (۷) حاوی ضرب دو متغیر صفر و یک است. جهت خطی‌سازی این محدودیت تغییر متغیرهای محدودیت (۱۹) و محدودیت (۲۰) را در نظر می‌گیریم.

$$\rho_{iksw} = X_{iks} \cdot A_{kw}. \quad (19)$$

$$\rho_{ik'sw} = X_{ik's} \cdot A_{kw}. \quad (20)$$

با توجه به این‌که $\rho_{ik'sw}$ و ρ_{iksw} از ضرب دو متغیر صفر و یک تشکیل شده‌اند، خود نیز متغیری صفر و یک می‌باشند و محدودیت‌های (۲۱) و (۲۲) جهت خطی‌سازی محدودیت (۱۹) و محدودیت‌های (۲۳) و (۲۴) جهت خطی‌سازی محدودیت (۲۰) به مدل افزوده می‌شوند.



$$2.\rho_{iksw} \leq X_{iks} + A_{kw} \tag{۲۱}$$

$$X_{iks} + A_{kw} \leq 1 + \rho_{iksw} \tag{۲۲}$$

$$2.\rho_{ik'sw} \leq X_{ik's} + A_{kw} \tag{۲۳}$$

$$X_{ik's} + A_{kw} \leq 1 + \rho_{ik'sw} \tag{۲۴}$$

۴- پیاده‌سازی و ارزیابی

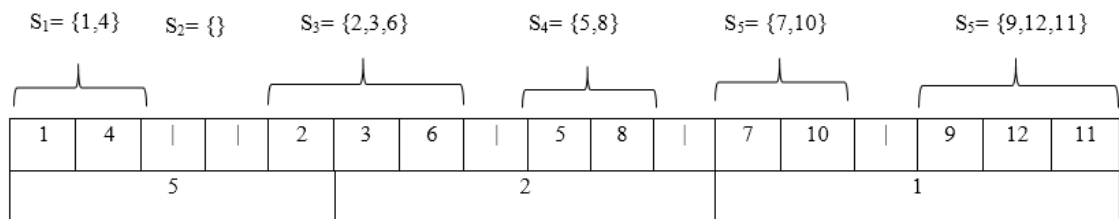
در این قسمت به منظور حل و اعتبارسنجی مدل ارائه شده، از روش‌های حل متناسب با حجم و پیچیدگی مساله استفاده می‌شود. در حل مسایل چندهدفه برخلاف مسایل تک‌هدفه، به جای جستجوی یک جواب بهینه به دنبال مجموعه‌ای از پاسخ‌های نامغلوب که جبهه پارتو نامیده می‌شود، هستیم. در واقع ساختار این جبهه به شکلی است که با در نظر گرفتن هم‌زمان تمامی تابع هدف هیچ پاسخی پیدا نخواهد شد که در فضای شدنی نسبت به جبهه پارتو برتری داشته باشد. در ادامه، به معرفی دو الگوریتم *NSGA-II* و *SPEA-II* که برای حل مسایل چندهدفه در این پژوهش مورد استفاده قرار داده‌ایم می‌پردازیم. محبوبیت زیاد و اثبات کارآمدی این الگوریتم‌ها علت استفاده از آن‌ها در این پژوهش می‌باشد. سپس به منظور بالا بردن کارایی الگوریتم‌های پیشنهادی، پارامترهای ورودی آن‌ها را متناسب با مساله این پژوهش تنظیم می‌کنیم. به منظور اطمینان از صحت مدل‌های ارائه شده و هم‌چنین سنجش الگوریتم‌های فرا ابتکاری، آن‌ها را روی مسایل نمونه پیاده‌سازی کرده و در نهایت در بخش انتهایی این فصل، نتایج حاصل از حل مدل‌ها ارائه شده و با استفاده از چهار شاخص ارزیابی عملکردی، نتایج با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

۴-۱- الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب

۴-۱-۱- نحوه نمایش جواب

در این پژوهش نحوه نمایش جواب دوبخشی است. بخش اول به صورت نمایش TOR^1 می‌باشد که بیانگر توالی و موقعیت فعالیت‌ها در ایستگاه‌ها است. نمایش TOR به صورت جایگشتی از تعداد فعالیت‌ها می‌باشد که با استفاده از یک جداکننده^۲ نشان می‌دهد فعالیت‌ها به چه ترتیبی در مناطق ایستگاهی تخصیص پیدا کرده‌اند. در این بخش از نمایش جواب طول کروموزوم از فرمول $n+2m-1$ محاسبه می‌شود که n برابر تعداد فعالیت‌ها و m برابر تعداد ایستگاه‌ها می‌باشد.

بخش دوم طرح نمایش، کروموزومی است که تعداد آرایه‌های آن به تعداد ایستگاه‌ها است و مشخص می‌کند به هر ایستگاه کدام کارگر تخصیص می‌یابد. به عنوان مسایل طرح نمایش شکل ۱ معرف جوابی است که در آن ۱۲ کار به شش منطقه ایستگاهی تخصیص داده شده است. هم‌چنین کارگر پنجم به ایستگاه اول، کارگر دوم به ایستگاه دوم و کارگر اول به ایستگاه سوم تخصیص داده شده است.



شکل ۱- یک جواب نمونه طرح نمایش مربوط به آن.

Figure 1- A sample solution and its corresponding representation.

۴-۱-۲- ایجاد جمعیت اولیه

گام ۱- یک توالی شدنی از فعالیت‌ها ایجاد می‌کنیم (f_p).

¹ Task Oriented Representation (TOR)

² Separator



گام ۲- آرایه خالی به طول $n+2m-1$ می‌سازیم.

گام ۳- قرار می‌دهیم $k=1, t_{assigned}=0, St_{mean}=\lfloor \frac{sum}{2,m} \rfloor$.

گام ۴- تا وقتی که f_p خالی نشده باشد، در صورتی که $k.St_{mean} \leq t_{assigned}$ باشد $k=k+1$ قرار می‌دهیم و یک جداکننده به اولین موقعیت خالی کروموزوم اضافه می‌کنیم. در غیر این صورت، اولین فعالیت f_p را به اولین موقعیت خالی کروموزوم منتقل می‌کنیم، این فعالیت را از لیست f_p حذف کرده و زمان این فعالیت را به $t_{assigned}$ اضافه می‌کنیم.

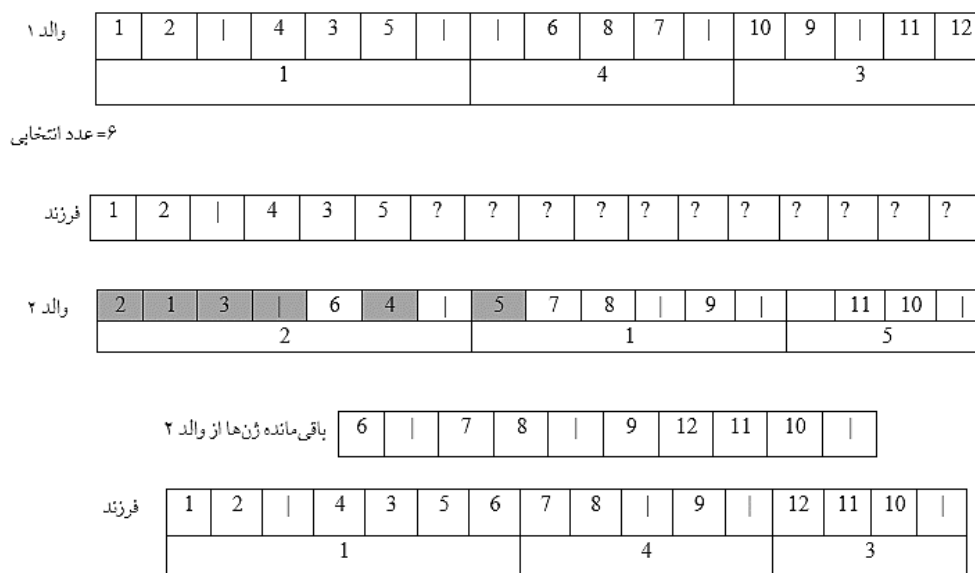
گام ۵- به تعداد لازم جداکننده قرار داده تا بخش اول کروموزوم کامل شود.

گام ۶- یک جایگشت به طول تعداد کارگران انتخاب می‌کنیم.

گام ۷- به تعداد ایستگاه‌ها از ابتدای جایگشت جدا می‌کنیم. با انجام این کار بخش دوم کروموزوم نیز تکمیل می‌شود.

۳-۱-۴- عملگر ترکیب

ابتدا به طور تصادفی دو والد انتخاب می‌شود. برای تولید فرزند اول فعالیتی به تصادف از کروموزوم به طول $n+2m-1$ از والد اول انتخاب می‌شود. برای فرزند اول، تمام فعالیت‌ها تا فعالیت انتخاب شده از والد اول کپی می‌شود و سپس فعالیت‌های کپی شده را از والد دوم خط زده و فعالیت‌های باقی مانده از والد دوم را به ترتیب در کروموزوم فرزند اول قرار می‌دهیم. هم‌چنین برای تولید فرزند دوم فعالیتی به تصادف از کروموزوم به طول $n+2m-1$ از والد دوم انتخاب می‌شود. تمام فعالیت‌ها تا فعالیت انتخاب شده از والد دوم کپی می‌شود و سپس فعالیت‌های کپی شده را از والد اول خط زده و فعالیت‌های باقی مانده از والد اول را به ترتیب در کروموزوم فرزند دوم قرار می‌دهیم. با عملگر ترکیب از دو والد، دو فرزند تولید می‌شود که فرزند اول تعداد کارگرها را از والد اول و فرزند دوم تعداد کارگرها را از والد دوم به ارث می‌برد. شکل ۲ رویه انجام عملگر ترکیب در این مساله را نشان می‌دهد.



شکل ۲- رویه انجام عملگر ترکیب.

Figure 2- Procedure of the crossover operator.

۴-۱-۴- عملگر جهش

دو مکانیزم برای تولید جواب همسایه وجود دارد:



۱. حذف و انتقال: یک فعالیت را به تصادف از کروموزوم والد انتخاب کرده، سپس زودترین موقعیت و دیرترین موقعیت در کروموزوم را برای آن فعالیت محاسبه می‌کنیم، یک عدد تصادفی بین زودترین موقعیت و دیرترین موقعیت انتخاب کرده و فعالیت را در موقعیتی که عدد تصادفی نشان می‌دهد و متفاوت از موقعیت کنونی‌اش می‌باشد قرار می‌دهیم. در واقع این مکانیزم، فعالیت را به یک موقعیت شدنی (موقعیتی شدنی است که هیچ کدام از پیش‌نیازی‌های فعالیت بعد از موقعیت نباشند و هیچ کدام از پس‌نیازی‌های فعالیت نیز قبل از موقعیت نباشند) تخصیص می‌دهد.

۲. تعویض: این مکانیزم دو فعالیت را به تصادف از کروموزوم والد انتخاب می‌کند و موقعیت آن‌ها را با یکدیگر جابه‌جا می‌کند. فقط باید دقت شود بین دو فعالیتی که تعویض می‌شوند فعالیت‌هایی که پیش‌نیاز فعالیت دوم و پس‌نیاز فعالیت اول می‌باشند، وجود نداشته باشند و هم‌چنین بین این دو فعالیت نباید رابطه پیش‌نیازی وجود داشته باشد.

تخصیص هر فعالیتی به هر ایستگاهی امکان‌پذیر بوده و تاثیر آن نه بر روی شدنی بودن جواب، بلکه روی زمان چرخه می‌باشد. تنها حالت امکان‌پذیر برای تولید جواب نشدنی، رعایت نکردن پیش‌نیازی‌هاست. با توجه به این‌که مکانیزم عملگر ترکیب و جهش به‌صورتی است که در آن پیش‌نیازی‌ها کاملاً رعایت می‌شوند؛ بنابراین، امکان تولید جواب نشدنی وجود ندارد.

۵-۱-۴- تابع برازش

با توجه به دو هدفه بودن مدل ارایه‌شده در قسمت قبل، نمی‌توان یک پاسخ را به‌عنوان جواب بهینه مشخص نمود و در عوض، مجموعه جواب‌های بهینه تحت عنوان جبهه پارتو به‌عنوان پاسخ‌های نامغلوب مساله وجود دارند. بدین ترتیب مطابق با روش ارایه‌شده توسط دب و همکاران [46] پاسخ‌ها با استفاده از معیارهای مرتب‌سازی نامغلوب^۱ و فاصله ازدحامی^۲ مقایسه می‌شوند.

۶-۱-۴- استراتژی انتخاب

هدف این استراتژی انتخاب دو کروموزوم والد جهت تولید فرزند (جواب جدید) است. اصل اساسی این استراتژی این است که "افراد بهتر شانس بیشتری جهت انتخاب برای والدین شدن دارند". این رویکرد باعث تشکیل جمعیتی از جواب‌های بهتر می‌شود. استراتژی انتخاب تعیین می‌کند که چه افرادی از جمعیت برای انجام مراحل بعدی الگوریتم (عملگر ترکیب و جهش) انتخاب می‌شوند. روش‌های مختلفی برای انتخاب والدین وجود دارد که در این مقاله از استراتژی چرخ رولت که توسط گلدبرگ [47] معرفی شده و در طی سالیان به‌کرات توسط محققین مورد استفاده قرار گرفته، استفاده می‌کنیم.

۷-۱-۴- ایجاد نسل جدید

جهت ایجاد نسل جدید در هر مرحله از الگوریتم، نخست جمعیت اولیه موجود، جمعیت حاصل از ترکیب و نیز جمعیت حاصل از جهش در یک جمعیت واحد یکپارچه می‌شوند. سپس، نخبه‌ترین اعضای این جمعیت جدید انتخاب شده و به‌عنوان نسل جدید به مرحله بعد منتقل می‌شوند. این عمل شایستگی هر نسل را حداقل به میزان نسل قبل تضمین می‌کند. مزیت به‌کارگیری نخبه‌گرایی، سرعت دادن به هم‌گرایی الگوریتم است.

۸-۱-۴- شرط توقف

برای الگوریتم‌های تکاملی شرایط توقف مختلفی نظیر رسیدن به تعداد تکرار مشخص و یا عدم بهبود از نسلی به نسل دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این پژوهش شرط توقف الگوریتم رسیدن به تعداد تکرار مشخص تعریف شده است.

¹ Non-dominated Sorting (NS) algorithm

² Crowded distance



نسخه دوم الگوریتم تکاملی مبتنی بر قوت پارتو یا به اختصار SPEA-II، یکی از معروف‌ترین پرکاربردترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی چندهدفه است. این الگوریتم، ایده‌های بسیار مهمی را مطرح نموده است و یک مثال بسیار مناسب از همه ویژگی‌هایی است که باید یک الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه داشته باشد.

الگوریتم SPEA-II از یک جمعیت عادی و یک آرشیو^۱ (مجموعه خارجی) استفاده می‌کند. با یک جمعیت اولیه و یک آرشیو خالی شروع می‌کند و گام‌های به‌کار برده شده برای هر تکرار را دنبال می‌کند. اگرچه SPEA به‌خوبی در مطالعات مختلفی به‌کار برده شده است؛ اما مشکلات محاسبه مقادیر قوت و برازندگی برای این الگوریتم وجود دارد. هم‌چنین اگرچه تکنیک دسته‌بندی استفاده‌شده در SPEA بدون تخریب کردن ویژگی‌های یک مجموعه، قادر به کاهش آن مجموعه غیر مغلوب می‌باشد، با این حال ممکن است راه‌حل‌های خارجی از بین بروند؛ بنابراین، این راه‌حل‌ها باید در آرشیو به‌منظور به‌دست‌آوردن یک گستره خوب از راه‌حل‌های نامغلوب نگه داشته شوند. از این رو زیتزلرو همکاران [48] نسخه دوم این الگوریتم یعنی SPEA-II را به‌منظور رفع ضعف‌های اشاره‌شده معرفی نمودند.

در ادامه گام‌های این الگوریتم به ترتیب مرور می‌شوند.

ورودی‌ها: N (اندازه جمعیت)، \bar{N} (اندازه آرشیو)، T (حداکثر تعداد تولید نسل).

خروجی: A مجموعه غیر مغلوب.

گام ۱- تعریف جمعیت: ایجاد یک جمعیت اولیه P_0 و ایجاد یک آرشیو خالی (مجموعه خارجی) $\bar{P}_0 = \emptyset$. $t = 0$ تنظیم می‌شود.

گام ۲- تخصیص برازندگی: محاسبه مقادیر برازندگی افراد (پاسخ‌ها) در P_t و \bar{P}_t .

گام ۳- انتخاب محیطی: در ابتدا تمام پاسخ‌های نامغلوب، یعنی آن‌هایی که برازندگی کم‌تر از یک دارند از P_t و \bar{P}_t به آرشیو نسل بعد کپی می‌شوند. سپس مقدار \bar{P}_{t+1} با استفاده از معادله (۲۵) محاسبه می‌شود. اگر جبهه نامغلوب دقیقاً به اندازه آرشیو باشد ($|\bar{P}_{t+1}| = \bar{N}$) انتخاب محیطی تکمیل شده است. در غیر این صورت دو حالت ممکن است رخ دهد: ۱- اگر $(|\bar{P}_{t+1}| < \bar{N})$ ، به تعداد $\bar{N} - |\bar{P}_{t+1}|$ از بین بهترین جواب‌های مغلوب در آرشیو \bar{P}_t و جمعیت قبلی P_t براساس تابع برازندگی، به آرشیو جدید کپی می‌کنیم، ۲- اگر $(|\bar{P}_{t+1}| > \bar{N})$ فرآیند برش آرشیو با استفاده از یک روش ابتکاری، پاسخ‌ها را با توجه به معیار σ_i^k حذف می‌کند تا زمانی که $(|\bar{P}_{t+1}| = \bar{N})$ شود. در هر گام پاسخ‌هایی که حداقل فاصله را از دیگر پاسخ‌ها دارند حذف می‌شوند. با این حال اگر چند پاسخ با حداقل فاصله وجود داشته باشد، حذف پاسخ‌ها از طریق دومین و نزدیک‌ترین فاصله صورت می‌گیرد و به همین شکل تا آن‌جا که نهایتاً پاسخ‌های اضافی حذف گردند. این معیار باعث می‌شود که پاسخ‌های مشابه یا نزدیک به هم که اهمیتی در تراکم پاسخ‌ها ایجاد نمی‌کنند، حذف گردند.

$$\bar{P}_{t+1} = \left\{ i \mid i \in P_t + \bar{P}_t \wedge F(i) < I \right\}. \quad (25)$$

گام ۴- خاتمه: اگر $t \geq T$ یا معیار توقف دیگری برقرار شده باشد، مجموعه A به‌عنوان مجموعه بردارهای تصمیم ارایه شده و به‌وسیله پاسخ‌های نامغلوب در \bar{P}_{t+1} متوقف می‌شود.

گام ۵- انتخاب جهش: با اجرای روش رقابت دودویی والدین را از مجموعه \bar{P}_{t+1} به‌منظور انجام جهش انتخاب می‌کنیم.

گام ۶- تغییرات: عملگرهای بازترکیب و جهش را بر روی والدین به‌کار برده و به تعداد N فرزند تولید می‌کنیم. سپس فرزندان را به مجموعه \bar{P}_{t+1} منتقل می‌کنیم و به مقدار شمارنده یک واحد اضافه می‌کنیم ($t = t + 1$) و به گام ۲ برمی‌گردیم.

¹ Archive

به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه و مقایسه پاسخ‌های پارتو این دو الگوریتم از چهار معیار که در ادامه به معرفی آن‌ها می‌پردازیم، بهره گرفته‌ایم.

۱. تعداد جواب‌های پارتو^۱: این شاخص بیانگر تعداد جواب‌های نامغلوب در مجموعه پارتو می‌باشد که هرچه تعداد آن‌ها بیشتر باشد، الگوریتم از کارایی بالاتری برخوردار است.
۲. میانگین فاصله از نقطه ایده‌آل^۲: با کمک این شاخص می‌توان میانگین فاصله جواب‌های پارتو از مبدا مختصات را محاسبه نمود و در واقع، فاصله جبهه‌ها را از بهترین مقدار جمعیت می‌سنجد. می‌توان گفت میانگین فاصله از نقطه ایده‌آل تنها شاخص از میان شاخص‌های ارزیابی عملکرد مورد بررسی است که مقدار کمینه آن مطلوب‌تر است.
۳. شاخص گوناگونی^۳: برای نمایش وسعت جواب‌های پارتو یک الگوریتم از شاخص گوناگونی استفاده می‌شود. هرچه این شاخص بیشتر باشد، عملکرد الگوریتم مطلوب‌تر است.
۴. شاخص کیفیت^۴: همانند شاخص گوناگونی و تعداد جواب‌های پارتو، مقادیر بیشتر شاخص کیفیت مطلوب‌تر شمرده می‌شود. در این شاخص، ابتدا تمامی جواب‌های پارتو از الگوریتم‌های مختلف به دست آمده و سپس بر روی آن‌ها ناچیرگی اعمال می‌شود. در نهایت، سهم جواب‌های پارتوی جدید هر الگوریتم، کیفیت آن را نمایش می‌دهد.

در تنظیم پارامترها با استفاده از روش تاگوچی [49] برای هر یک از شاخص‌های مذکور با توجه به اهمیت آن‌ها وزنی تعیین می‌کنیم. سپس با استفاده از روش تجمیع وزنی به محاسبه شاخص نهایی می‌پردازیم که بر مبنای این شاخص تحلیل تاگوچی [49] بر روی آزمایش‌های مختلف انجام می‌شود و مشخص می‌شود کدام مقادیر پارامترها موجب عملکرد بهینه الگوریتم می‌شود.

۴-۴- تنظیم پارامترها با استفاده از تاگوچی

مقدار پارامترهای یک الگوریتم روی عملکرد و نرخ هم‌گرایی آن تاثیر به‌سزایی دارد. برای تولید جواب‌های باکیفیت ضروری است که مقادیر مناسبی را برای پارامترهای الگوریتم انتخاب کنیم. بدین منظور، یک تحلیل آماری بر پایه روش تاگوچی [49] پیاده‌سازی شده است. برخلاف آزمایش‌های عملی کامل^۵ [50] روش تاگوچی [49] آزمایش‌های بسیار کم‌تری را اجرا کرده و سعی در افزایش استواری^۶ سیستم با حداقل‌سازی تغییرات نتایج دارد. پارامترهای الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب همراه با سطوح آن در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲- سطوح مختلف پارامترهای الگوریتم NSGA-II.

Table 2- Levels of the NSGA-II parameters.

شماره	پارامتر	مقادیر
1	اندازه جمعیت	200 100 50
2	تعداد تکرار	200 100 50
3	احتمال ترکیب	0.8 0.6 0.4
4	احتمال جهش	0.4 0.2 0.1

طرح سه سطحی L_9 برای اجرای آزمایش‌ها و تنظیم پارامترها، مورد استفاده قرار گرفته است. ۹ ترکیب مختلف از پارامترهای الگوریتم مطابق جدول ۳ می‌باشد.

¹ Number of Pareto Solution (NPS)

² Mean Ideal Distance (MID)

³ Diversification Metric (DM)

⁴ Quality Metric (QM)

⁵ Full factorial experiment

⁶ Robustness





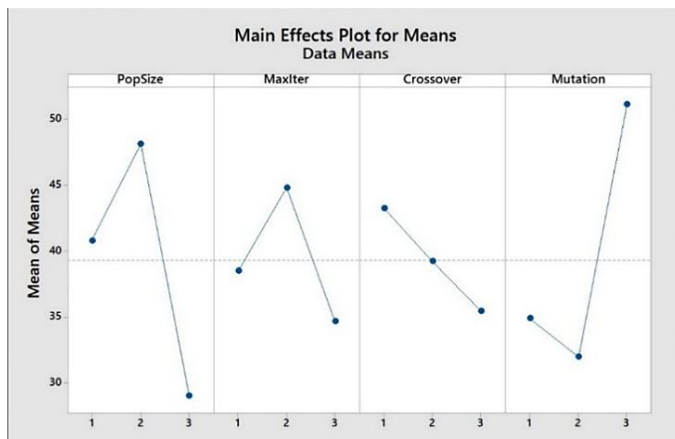
یک مساله سایز متوسط در نظر گرفته شده و برای هر سطح از سطوح آزمایش سه بار حل شده است. میانگین مقدار تابع هدف سه آزمایش حل شده درون هر سطح به عنوان متغیر پاسخ آن سطح در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از طرح تاگوچی در ادامه در شکل ۳ و شکل ۴ آورده شده است.

جدول ۳- ترکیبات پارامترها برای هر آزمایش.

Table 3- Parameters combinations for each experiment.

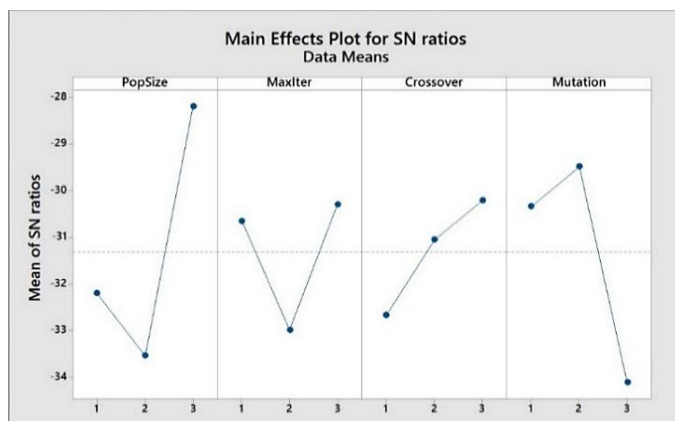
آزمایش	اندازه جمعیت	تعداد تکرار	احتمال ترکیب	احتمال جهش
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

هرچه نسبت سیگنال به نویز بزرگ‌تر و میانگین میانگین‌ها کوچک‌تر باشد میزان تغییرات مقادیر تابع هدف در اجراهای مختلف الگوریتمی کم‌تر بوده و استواری الگوریتم بیش‌تر خواهد بود. با توجه به شکل ۳ و شکل ۴ بهترین مقادیر برای فاکتورهای اندازه جمعیت و تعداد تکرار در سطح سه، برای فاکتور احتمال ترکیب در سطح سه و برای پارامتر احتمال جهش سطح دوم در نظر گرفته می‌شود که در جدول ۴ آورده شده است.



شکل ۳- نمودار میانگین میانگین‌ها برای الگوریتم NSGA-II.

Figure 3- Mean of means graphs for NSGA-II.



شکل ۴- نمودار سیگنال به نویز برای الگوریتم NSGA-II.

Figure 4- S/N ratio graphs for NSGA-II.

¹ Response variable

جدول ۴- پارامترهای تنظیم شده الگوریتم NSGA-II.
Table 4- Tuned parameter values for NSGA-II.

مقدار	پارامتر
200	اندازه جمعیت
200	تعداد تکرار
0.8	احتمال ترکیب
0.2	احتمال جهش

هم چنین پس از طی مراحل مشابه الگوریتم ژنتیک مرتب سازی نامغلوب II، پارامترهای الگوریتم نسخه دوم تکاملی مبتنی بر قوت پارتو به صورت جدول ۵ تنظیم شده است.

جدول ۵- پارامترهای تنظیم شده الگوریتم SPEA-II.
Table 5- Tuned parameter values for SPEA-II.

مقدار	پارامتر
200	اندازه جمعیت
200	تعداد تکرار
0.8	احتمال ترکیب
0.2	احتمال جهش

۴-۵- نتایج محاسباتی

در ابتدا و به منظور اطمینان از صحت مدل، مسایلی با سایز کوچک را در نظر گرفته و به حل آن با نرم افزار بهینه سازی GAMS می پردازیم. با توجه به چندهدفه بودن مدل، در این مرحله و صرفاً به منظور سنجش مدل، تنها تابع هدف اول، یعنی حداقل سازی زمان چرخه برای اجرا توسط نرم افزار GAMS، حداکثر زمان اجرای برنامه برای هر مساله را ۳۶۰۰ ثانیه در نظر گرفته ایم و بعد از این زمان، برنامه متوقف می شود. جهت مقایسه جواب به دست آمده از مدل، از یک الگوریتم ژنتیک تک هدفه، با اپراتورهایی مشابه الگوریتم ژنتیک مرتب سازی نامغلوب شرح داده شده در بالا استفاده می نماییم. نتایج حاصله در جدول ۶ آورده شده است. در این جدول ستون های اول و دوم به ترتیب معرف شماره و نام مساله مورد بررسی است. ستون های سوم و چهارم به ترتیب تعداد فعالیت ها و تعداد ایستگاه ها را در مساله مورد نظر نشان می دهند. ستون های پنجم و ششم جواب به دست آمده برای تابع هدف توسط نرم افزار GAMS و زمان رسیدن به این جواب را نشان می دهند. جواب به دست آمده از الگوریتم ژنتیک در ستون هفتم آورده شده است.

به منظور مقایسه پاسخ های به دست آمده از روش حل های دقیق و ژنتیک، از معیار درصد نسبی که مقدار آن با استفاده از رابطه $RPD = (method\ sol - best\ sol \times 100) / (best\ sol)$ به دست می آید، استفاده می شود. مقدار این معیار در ستون آخر نشان داده شده است. مساله نهم در زمان اشاره شده قابل حل توسط GAMS نبوده که این خود معرف سختی مساله است. در بین مسایل ۱ تا ۸، در چهار مورد مقدار درصد نسبی برابر صفر و در چهار مورد دیگر نیز مقدار مثبتی نزدیک به صفر شده است که نشان دهنده صحت جواب به دست آمده از مدل ریاضی می باشد.

جدول ۶- مقایسه نتایج به دست آمده از الگوریتم ژنتیک و نرم افزار GAMS برای مسایل با تابع هدف حداقل سازی زمان چرخه.
Table 6- Comparison between the result of GAMS and GA for the cycle time minimization problems.

ردیف	نمونه مساله	تعداد فعالیت ها	تعداد ایستگاه ها	جواب مدل	زمان حل مدل	جواب ژنتیک	RPD
1	Mertens1	7	5	6.1	143	6.1	0
2	Mertens2	7	6	5.4	188	5.4	0
3	Bowman	8	5	15.4	296	15.6	0.013
4	Jaeschke1	9	3	10.3	112	10.5	0.019
5	Jaeschke2	9	6	7.4	128	7.4	0
6	Jackson1	11	5	6.8	848	7	0.029
7	Jackson2	11	8	9.7	1260	9.7	0
8	Mitchell1	21	3	25.9	2015	27.6	0.065
9	Mitchell2	21	8	-	-	10.6	-

به منظور مقایسه نتایج حل دو الگوریتم چندهدفه ارائه شده، ۹ مساله در ابعاد متوسط و بزرگ در نظر گرفته شده است. تمامی این مسایل





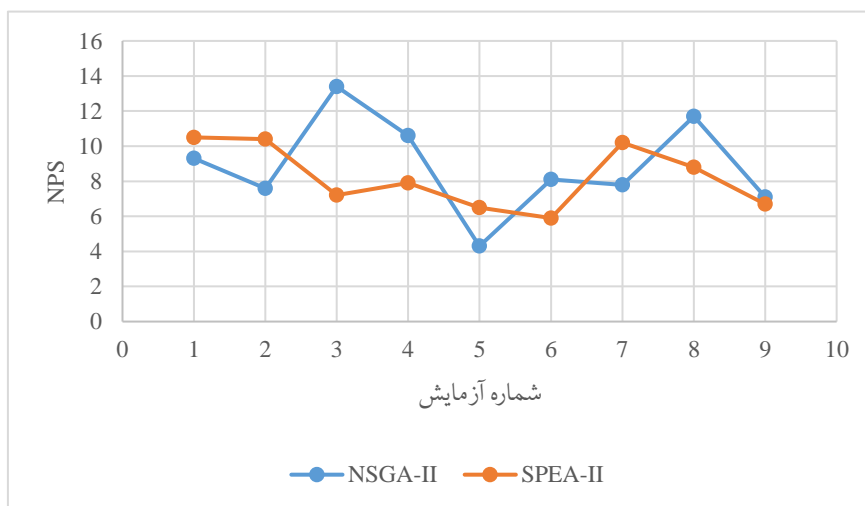
ده مرتبه توسط هر یک الگوریتم‌های *NSGA-II* و *SPEA-II* حل شده‌اند. نتایج محاسباتی حل مسایل نمونه با استفاده از الگوریتم‌های ذکر شده در جدول ۷ آورده شده است. در این جدول عنوان مساله، تعداد فعالیت‌ها و تعداد ایستگاه‌ها به ترتیب در ستون‌های اول، دوم و سوم آمده است. ستون‌های چهارم و پنجم تعداد پاسخ‌های پارتو به دست آمده توسط هر یک از الگوریتم‌ها در حل مسایل مختلف را نشان می‌دهند. ستون‌های ششم و هفتم دو الگوریتم را بر اساس معیار میانگین فاصله از نقطه ایده‌آل مقایسه می‌نمایند. امتیاز کسب شده توسط هر یک از دو الگوریتم در معیار گوناگونی در ستون‌های هشتم و نهم و در معیار کیفیت در ستون‌های دهم و یازدهم آورده شده‌اند. ستون‌های دوازدهم و سیزدهم به مقایسه دو الگوریتم از نظر زمان حل می‌پردازند. لازم به ذکر است که هر یک از اعداد ارایه شده در ستون‌های چهارم تا سیزدهم میانگین نتایج حاصل از ده مرتبه اجرا می‌باشند.

جدول ۷- نتایج محاسباتی الگوریتم‌ها.

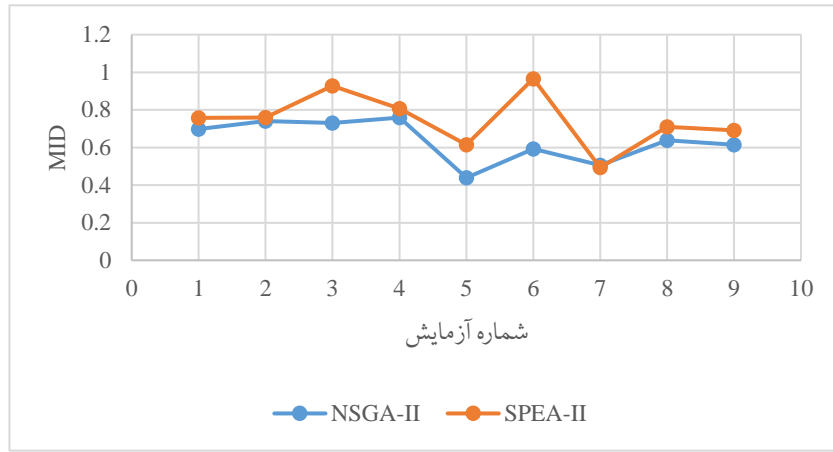
Table 7- Computational results of the algorithms.

CPU time		QM		DM		MID		NPS		تعداد ایستگاه	تعداد فعالیت	نمونه مساله
SPEA	NSGA	SPEA	NSGA	SPEA	NSGA	SPEA	NSGA	SPEA	NSGA			
21.3	20.5	0.3	0.7	1.317	1.414	0.758	0.698	10.5	9.3	3	21	Mitchell1
25.3	22.1	0.5	0.5	1.340	1.012	0.759	0.741	10.4	7.6	5	21	Mitchell2
23.9	21.8	0.273	0.727	1.034	1.414	0.927	0.731	7.2	13.4	8	21	Mitchell3
21.7	17.8	0.455	0.545	1.187	1.373	0.807	0.759	7.9	10.6	4	28	Heskia1
21.9	17.1	0.2	0.8	1.348	0.762	0.614	0.439	6.5	4.3	5	28	Heskia2
21.1	18.2	0.444	0.556	1.076	1.216	0.966	0.593	5.9	8.1	5	28	Heskia3
27.3	23.6	0.25	0.75	1.401	0.999	0.493	0.506	10.2	7.8	23	89	Lutz1
30.6	30.5	0.375	0.643	1.295	1.273	0.710	0.639	8.8	11.7	27	89	Lutz2
29.5	30.4	0.667	0.333	1.398	1.032	0.691	0.614	6.7	7.1	30	89	Lutz2

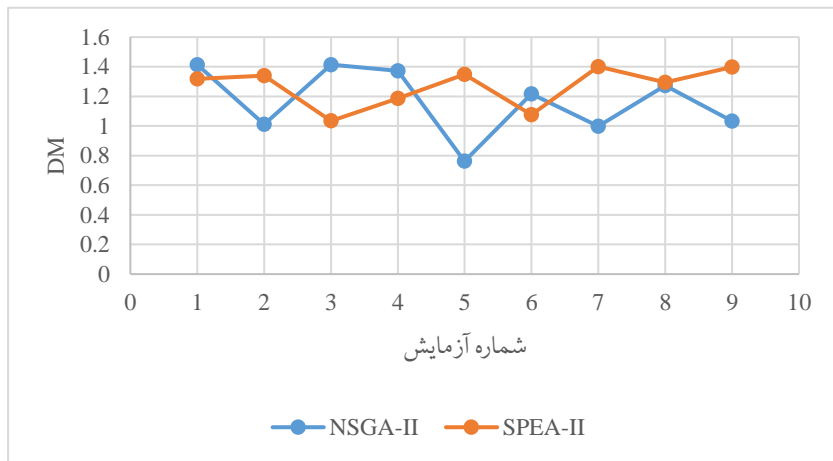
مقایسه الگوریتم‌ها بر اساس معیارهای مختلف ارایه شده در جدول ۷ در اشکال ۵ تا ۹ به نمایش در آمده است. با توجه به شاخص‌های ارزیابی عملکرد، مشاهده می‌شود در شاخص‌های *QM*، *MID* و زمان حل، الگوریتم *NSGA-II* عملکرد کاملاً بهتری در مقایسه با الگوریتم فرا ابتکاری *SPEA-II* داشته است. در شاخص *MID* الگوریتم *NSGA-II* در ۸ مساله از ۹ مساله مورد بررسی عملکرد بهتری نسبت به *SPEA-II* داشته است. تنها در مساله هفتم عملکرد *SPEA-II* اندکی بهتر بوده است. در شاخص *QM* عملکرد الگوریتم *NSGA-II* در تمامی مسایل، به جز مساله نهم به شکل محسوسی بهتر از *SPEA-II* بوده است. در مسایل اول تا هشتم عملکرد الگوریتم *NSGA-II* به لحاظ زمان حل کاملاً بهتر از الگوریتم *SPEA-II* بوده است. تنها در مساله نهم زمان حل *SPEA-II* اندکی بهتر از *NSGA-II* است. در شاخص *NPS* عملکرد الگوریتم *NSGA-II* نسبت به عملکرد الگوریتم *SPEA-II* نسبتاً بهتر بوده است. در پنج مساله از مجموع ۹ مساله موجود، *NSGA-II* تعداد جواب‌های پارتو بیشتری تولید کرده است. هم‌چنین در شاخص *DM* این دو الگوریتم عملکرد نسبتاً مشابهی داشته‌اند؛ بنابراین، در کل می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم *NSGA-II* نتایج بهتری برای حل این مساله از خود نشان داده است.



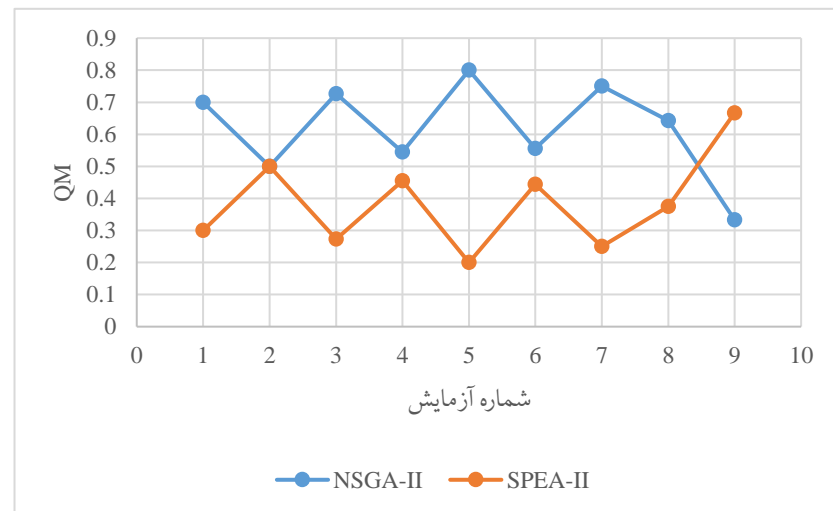
شکل ۵- تعداد پاسخ‌های پارتو مربوط به هر الگوریتم.
Figure 5- NPS related to each algorithm.



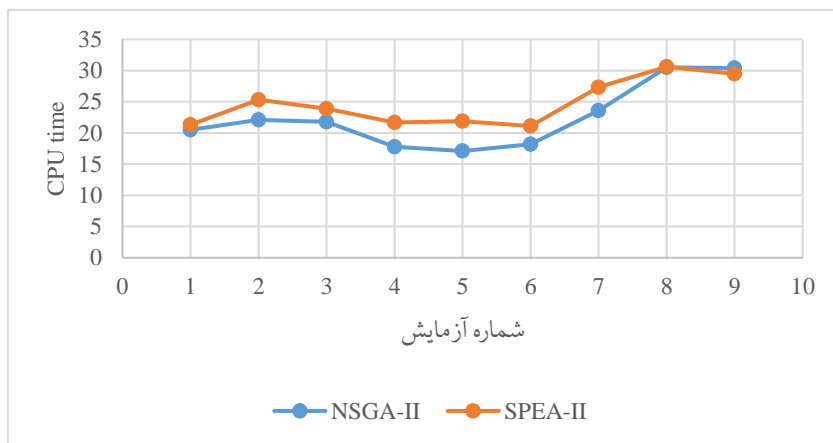
شکل ۶- میانگین فاصله از نقطه ایده‌آل مربوط به هر الگوریتم.
Figure 6- MID related to each algorithm.



شکل ۷- معیار گوناگونی مربوط به هر الگوریتم.
Figure 7- DM related to each algorithm.



شکل ۸- معیار کیفیت مربوط به هر الگوریتم.
Figure 8- QM related to each algorithm.



شکل ۹- زمان محاسباتی مربوط به هر الگوریتم.
Figure 9- CPU time related to each algorithm.

۵- بحث و نتیجه گیری

مساله بالانس خط مونتاژ U شکل در گذشته و به کرات در مقالات مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. از آنجایی که اغلب خطوط مونتاژ U شکل درگیر با عملیات مونتاژ دستی هستند، مهارت کارگران دارای نقش مهمی در این نوع خطوط می باشد. تخصص، استعداد و مهارت کارگران با یکدیگر متفاوت بوده و هم چنین یک کارگر قادر به انجام همه وظایف در یک سطح عملکردی نیست. با این وجود، اغلب مطالعات گذشته این موضوع را نادیده گرفته و زمان انجام کار را مستقل از کارگر انجام دهنده آن کار فرض می کنند. در این مطالعه برای هر کارگر در انجام هر کار یک ضریب عملکرد در نظر گرفته شده و مساله بالانس خط مونتاژ U شکل و تخصیص کارگر به طور هم زمان در نظر گرفته شده است.

از طرف دیگر اغلب مقالات گذشته، یا زمان های آماده سازی را نادیده می انگارند و یا آن را مقداری ثابت فرض می کنند. در این مقاله، برای نخستین بار زمان های آماده سازی وابسته به توالی را به مساله بالانس خط مونتاژ U شکل و تخصیص کارگر افزوده ایم. زمان های آماده سازی وابسته به توالی به این معنا هستند که قبل از آن که فعالیتی در یک ایستگاه انجام شود زمانی برای آماده سازی لازم است در نظر گرفته شود که مقدارش به فعالیت های مجاور آن فعالیت بستگی دارد. به منظور نزدیک شدن هر چه بیشتر به دنیای واقعی، در این مقاله دو نوع مختلف زمان آماده سازی با نام های روبه جلو و روبه عقب در نظر گرفته شده است.

در ادامه یک مدل ریاضی برای این مساله توسعه داده شد. با وجود این که غالب تصمیم گیری ها در دنیای واقعی با اهدافی چندگانه می باشند، اغلب مقالات مساله بالانس خط مونتاژ و تخصیص کارگر را به صورت تک هدفه در نظر گرفته اند. در مقاله حاضر، جهت هر چه نزدیک شدن به دنیای واقعی، برای نخستین بار، مساله بالانس خط مونتاژ U شکل و تخصیص کارگر را به صورت دوهدفه در مدل سازی نموده و سعی در کاهش زمان چرخه و کاهش هزینه نیروی انسانی به صورت توامان داشته است. به منظور اثباتی بر درستی مدل ارائه شده، ابتدا مساله را با هدف کاهش زمان چرخه در نظر گرفته و جواب های حاصل از حل مدل را با الگوریتم ژنتیک مقایسه نمودیم که نتایج به دست آمده حکایت از درستی مدل ارائه شده داشته است.

با توجه به این که حل دقیق برای این مساله بسیار زمان بر خواهد بود، در این پژوهش از الگوریتم های فرا ابتکاری که عملکرد مطلوبشان اثبات شده و می توانند با یک بار اجرا تقریبی از پاسخ های نامغلوب بهینه پارتو را به دست آورند، استفاده گردید. از این رو دو الگوریتم، ژنتیک چندهدفه با مرتب سازی نامغلوب II و نسخه دوم الگوریتم تکاملی مبتنی بر قوت پارتو پیاده سازی گردید. به منظور مقایسه الگوریتم های چندهدفه از چهار شاخص ارزیابی عملکرد استفاده شد که در نهایت به این نتیجه رسیدیم که الگوریتم $NSGA-II$ می تواند بر اساس معیارهای مورد نظر پاسخ های مطلوب تری را برای این مساله ارائه کند.

برای تحقیقات آتی می توان موارد زیر را پیشنهاد نمود: ۱- افزودن سایر اهداف موجود در ادبیات از جمله حداقل کردن مجموع زمان بیکاری در مدل های توسعه داده شده، ۲- توسعه الگوریتم های فرا ابتکاری مختلف مانند GES جهت رسیدن به نتیجه بهتر برای این مساله خاص و

مقایسه روش‌ها، ۳- در نظر گرفتن عدم قطعیت در برخی از پارامترهای مدل و ۴- بهینه‌سازی چندهدفه بالانس خطوط مونتاژ مختلف مانند خطوط مونتاژ موازی و دوطرفه با در نظر گرفتن زمان‌های آماده‌سازی.

منابع

- [1] Sparling, D., & Miltenburg, J. (1998). The mixed-model U-line balancing problem. *International journal of production research*, 36(2), 485–501.
- [2] Faqih, N., & Montazeri, M. M. (2009). Genetic algorithms for assembly line balancing problem. *Journal of industrial management*, 1(1), 107–124.
- [3] Boysen, N., Flidner, M., & Scholl, A. (2007). A classification of assembly line balancing problems. *European journal of operational research*, 183(2), 674–693.
- [4] Lusa, A. (2008). A survey of the literature on the multiple or parallel assembly line balancing problem. *European journal of industrial engineering*, 2(1), 50–72.
- [5] Emde, S., Boysen, N., & Scholl, A. (2009). Balancing mixed-model assembly lines: a computational evaluation of objectives to smoothen workload. *International journal of production research*, 48(11), 3173–3191. DOI: 10.1080/00207540902810577
- [6] Rekiek, B., & Delchambre, A. (2006). *Assembly line design: the balancing of mixed-model hybrid assembly lines with genetic algorithms*. Springer Science & Business Media.
- [7] Gökçen, H., Ağpak, K., & Benzer, R. (2006). Balancing of parallel assembly lines. *International journal of production economics*, 103(2), 600–609.
- [8] Chutima, P., & Naruemitwong, W. (2014). A Pareto biogeography-based optimisation for multi-objective two-sided assembly line sequencing problems with a learning effect. *Computers & industrial engineering*, 69, 89–104.
- [9] Miltenburg, G. J., & Wijngaard, J. (1994). The U-line line balancing problem. *Management science*, 40(10), 1378–1388.
- [10] Scholl, A., & Klein, R. (1999). ULINO: optimally balancing U-shaped JIT assembly lines. *International journal of production research*, 37(4), 721–736.
- [11] Fattahi, A., Elaoud, S., Sadeqi Azer, E., & Turkay, M. (2014). A novel integer programming formulation with logic cuts for the U-shaped assembly line balancing problem. *International journal of production research*, 52(5), 1318–1333.
- [12] Andres, C., Miralles, C., & Pastor, R. (2008). Balancing and scheduling tasks in assembly lines with sequence-dependent setup times. *European journal of operational research*, 187(3), 1212–1223.
- [13] Rabbania, M., Siadatiana, R., & Manavizadeh, N. (2017). Balancing and sequencing U-shaped mixed model assembly line problem considering setup times between tasks and demand ratio-base in dynamic environments. *13th international conference on industrial engineering (IIEC 2017)*. Mazandaran University of Science Technology. (In Persian). <https://www.sid.ir/FileServer/SE/502e201713234.pdf>
- [14] Delice, Y., Aydougan, E. K., Özcan, U., & Ilkay, M. S. (2017). Balancing two-sided U-type assembly lines using modified particle swarm optimization algorithm. *4or*, 15(1), 37–66. DOI: 10.1007%2Fs10288-016-0320-4
- [15] Sahin, M., & Kellegöz, T. (2017). Increasing production rate in U-type assembly lines with sequence-dependent set-up times. *Engineering optimization*, 49(8), 1401–1419. DOI: 10.1080/0305215X.2016.1256394
- [16] Mozafari, N., Mehrmanesh, H., & Mohammadi, M. (2020). Presenting a new MILP mathematical model for the optimization of mixed assembly lines with the meta-heuristic approach of the ABC-PSO method. *Quarterly magazine of strategic management in industrial systems (former industrial management)*, 14(50), 88–100.
- [17] Li, Z., Janardhanan, M. N., & Rahman, H. F. (2021). Enhanced beam search heuristic for U-shaped assembly line balancing problems. *Engineering optimization*, 53(4), 594–608. DOI: 10.1080/0305215X.2020.1741569
- [18] Hazır, Ö., & Dolgui, A. (2015). A decomposition based solution algorithm for U-type assembly line balancing with interval data. *Computers & operations research*, 59(1), 126–131. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2015.01.010>
- [19] Li, Y., Hu, X., Tang, X., & Kucukkoc, I. (2019). Type-1 U-shaped assembly line balancing under uncertain task time. *IFAC-papers online*, 52(13), 992–997.
- [20] Ghandi Bidgoli, S., & Karimi, F. (2020). A simulation-based optimization approach for mixed model two-sided assembly line balancing with stochastic task times (case study: Beh Afarinan Datis Tiva company). *Journal of industrial engineering research in production systems*, 8(16), 199–213.
- [21] Nakade, K., & Ohno, K. (1999). An optimal worker allocation problem for a U-shaped production line. *International journal of production economics*, 60, 353–358.
- [22] Nakade, K., & Ohno, K. (2003). Separate and carousel type allocations of workers in a U-shaped production line. *European journal of operational research*, 145(2), 403–424.
- [23] Corominas, A., Pastor, R., & Plans, J. (2008). Balancing assembly line with skilled and unskilled workers. *Omega*, 36(6), 1126–1132.
- [24] Öksüz, M. K., & Satouglu, C. (2014). *Balancing u-shaped assembly lines by considering human factors* [presentation]. Proceedings of the global conference on engineering and technology management (pp. 23–26).





- [25] Toksari, M. D., Icsleyen, S. K., Güner, E., & Baykoç, Ö. F. (2008). Simple and U-type assembly line balancing problems with a learning effect. *Applied mathematical modelling*, 32(12), 2954–2961.
- [26] Otto, C., & Otto, A. (2014). Extending assembly line balancing problem by incorporating learning effects. *International journal of production research*, 52(24), 7193–7208.
- [27] Asadi-Zonouz, M., Khalili, M., & Tayebi, H. (2020). A hybrid unconscious search algorithm for mixed-model assembly line balancing problem with SDST, parallel workstation and learning effect. *Journal of optimization in industrial engineering*, 13(2), 123–140.
- [28] Miralles, C., Garcia-Sabater, J. P., Andres, C., & Cardos, M. (2007). Advantages of assembly lines in sheltered work centres for disabled. A case study. *International journal of production economics*, 110(1–2), 187–197.
- [29] Miralles, C., Garcia-Sabater, J. P., Andrés, C., & Cardós, M. (2008). Branch and bound procedures for solving the assembly line worker assignment and balancing problem: application to sheltered work centres for disabled. *Discrete applied mathematics*, 156(3), 352–367.
- [30] Vila, M., & Pereira, J. (2014). A branch-and-bound algorithm for assembly line worker assignment and balancing problems. *Computers & operations research*, 44, 105–114.
- [31] Borba, L., & Ritt, M. (2014). A heuristic and a branch-and-bound algorithm for the assembly line worker assignment and balancing problem. *Computers & operations research*, 45, 87–96.
- [32] Polat, O., Kalayci, C. B., Mutlu, Ö., & Gupta, S. M. (2016). A two-phase variable neighbourhood search algorithm for assembly line worker assignment and balancing problem type-II: an industrial case study. *International journal of production research*, 54(3), 722–741.
- [33] Oksuz, M. K., Buyukozkan, K., & Satoglu, S. I. (2017). U-shaped assembly line worker assignment and balancing problem: a mathematical model and two meta-heuristics. *Computers & industrial engineering*, 112, 246–263.
- [34] Janardhanan, M. N., Li, Z., & Nielsen, P. (2019). Model and migrating birds optimization algorithm for two-sided assembly line worker assignment and balancing problem. *Soft computing*, 23, 11263–11276.
- [35] Moreira, M. C. O., Cordeau, J. F., Costa, A. M., & Laporte, G. (2015). Robust assembly line balancing with heterogeneous workers. *Computers & industrial engineering*, 88, 254–263.
- [36] Moreira, M. C. O., Miralles, C., & Costa, A. M. (2015). Model and heuristics for the assembly line worker integration and balancing problem. *Computers & operations research*, 54, 64–73.
- [37] Nakade, K., Ito, A., & Ali, S. M. (2015). U-shaped assembly line balancing with temporary workers. *International journal of industrial engineering: theory, applications and practice*, 22(1). DOI: 10.23055/ijietap.2015.22.1.1211
- [38] Xin, B., Li, Y., Yu, J., & Zhang, J. (2015). An adaptive BPSO algorithm for multi-skilled workers assignment problem in aircraft assembly lines. *Assembly automation*, 35(4), 317–328.
- [39] Nakade, K. (2017). Effect of worker sequence on cycle time in a U-shaped line with chase mode. *International journal of production research*, 55(10), 2752–2763.
- [40] Salehi, M., Maleki, H. R., & Niroomand, S. (2018). A multi-objective assembly line balancing problem with worker's skill and qualification considerations in fuzzy environment. *Applied intelligence*, 48, 2137–2156.
- [41] Mirabedini, S. N., Mina, H., Iranmanesh, S. H., & Saleckpay, B. (2013). Optimization of a single model u-slab with stochastic duration with integration of genetic algorithm and computer simulation. *Research journal of applied sciences, engineering and technology*, 6(15), 2846–2858.
- [42] Delice, Y., Aydougan, E. K., Söylemez, I., & Özcan, U. (2018). An ant colony optimisation algorithm for balancing two-sided U-type assembly lines with sequence-dependent set-up times. *Sādhanā*, 43, 1–15. DOI: doi.org/10.1007/s12046-018-0969-9
- [43] Yolmeh, A., & Salehi, N. (2017). A branch, price and remember algorithm for the U shaped assembly line balancing problem. DOI: 10.48550/arXiv.1708.04127
- [44] Özcan, U., & Toklu, B. (2010). Balancing two-sided assembly lines with sequence-dependent setup times. *International journal of production research*, 48(18), 5363–5383.
- [45] Ayazi, S., Hajizadeh, A., Nooshabadi, M., & Jalaie, H. (2011). Multi-objective assembly line balancing using genetic algorithm. *International journal of industrial engineering computations*, 2(4), 863–872.
- [46] Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A., & Meyarivan, T. (2000). A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II. *Lecture notes in computer science (including subseries lecture notes in artificial intelligence and lecture notes in bioinformatics)*, 1917, 849–858. DOI: 10.1007/3-540-45356-3_83/COVER
- [47] DE, G. (1989). *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc.
- [48] Zitzler, E., Laumanns, M., & Thiele, L. (2001). *SPEA2: improving the strength pareto evolutionary algorithm* (No. 103). <https://doi.org/10.3929/ethz-a-004284029>
- [49] Taguchi, G. (1986). *Introduction to quality engineering: designing quality into products and processes*. Quality Resources.
- [50] Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments*. John Wiley & Sons.