Industrial Management Studies
Vol. 21, No.70, Fall 2023; P 227-260
jims.atu.ac.ir
DOI: 10.22054/jims.2023.73390.2860

Original Research
Received: 22/04/2022
Accepted: 30/09/2023
eISSN: 2476-602X
ISSN: 2251/8029

Customer Demand Management in the Optimal Assignment of Tasks to Work Stations According to Priority Orders

Fahimeh Tanhaie *

Assistant Professor, Industrial Engineering Department, Faculty of basic science and Engineering, Kosar university of Bojnord.

Abstract

The mix model assembly line has attracted the attention of many industrial manufacturers due to its special features and the ability to adapt to market changes. This article has discussed and investigated a new approach in relation with customers, the results of which indicate the proper management of demand. The proposed model pays more attention to priority customers, and a parallel production line is defined that is faster than the main line and has workers with special skills. According to the rapid process of environmental changes, one of the things that can be considered to increase flexibility in the make to order environment is to set the conditions for rebalancing the line. In this article, the rebalancing of the line is also considered and included in the modeling, and the minimization of its costs is considered as another goal. Therefore, in this article, a multi-objective line balancing problem is proposed by examining rebalancing and vertical balancing problems. Benders decomposition algorithm is used to solve this problem. The results show that exact methods do not have the ability to solve large-sized problems in a reasonable time, but the solution time for Bander's decomposition method, considering the size of the problem, shows the appropriate efficiency of this algorithm

Introduction

Mix model assembly lines, known for their ability to adapt to changing market demands with minimal adjustments, are currently employed in active industries worldwide. The findings of this article also hold potential for reducing assembly line waste in the country's manufacturing sector. Drawing from the principles of lean production and the theories of Scholl and Becker,

* Corresponding Author: fahimeh.tanhaie@kub.ac.ir
How to Cite: Tanhaie, F. (2023). Customer Demand Management in the Optimal Assignment of Tasks to Work Stations According to Priority Orders, *Industrial Management Studies, 21(70),* 227-260.

achieving an optimal production line balance can lead to the reduction of at least five out of the ten types of waste. While the topic of line balancing is crucial in itself, this research sheds light on a significant aspect often overlooked in most studies on planning mixed model assembly lines: the order-based environment. Many previous studies have focused solely on the 'make-to-order' environment and its assumptions, often neglecting balance issues. Given the paramount importance of customer roles in industries, it is imperative to introduce a framework for managing customer orders within line balancing problem models. The aim of this article is to enhance cost management and productivity in mixed assembly lines across various industries, ensuring that demands are met and assembly process constraints are addressed. To achieve this, we first develop the necessary mathematical models for each component and subsequently devise algorithms for their solutions.

Materials and Methods

An express line is defined in parallel and faster than the main line, as well as having workers with special skills. Considering the rapid process of environmental changes, another thing that can be considered to increase flexibility in the base order environment is to create conditions for rebalancing the line so that both the workload and the cost can be balanced at the same time. This reduced the reassignment of duties. From this point of view, in the proposed model in this part, rebalancing of the line is also desired and it is included in the modeling, and the minimization of its costs is considered as another goal of this model. Also, the goal of balancing the assembly line, which is to distribute the total workload between the stations as smoothly as possible, is also included in the proposed model of this part, which is also called vertical balance, so that each station has a balanced amount of work. Be in a work shift. Therefore, in this model, a multi-objective problem of determining the balance is designed by examining the problems of rebalancing and vertical balance. The orders coming into the organization are prioritized first, because in the order-based production environment, the delivery time of orders is very important, especially for high-priority orders, because customers expect an appropriate response in a short period of time. This prioritization can be done by any method, the output of which determines regular customers and priority customers. After determining the priority of the orders and paying attention to the main line and the designated vanguard, priority orders can be entered into the Parallel line, which operates faster and has multi-purpose operatorsβ

Discussion and Results

In order to validate the model and ensure the correct performance of the

combined benders algorithm with the LP metric method, first the mathematical model in a small size is solved and a comparison between the results and the proposed algorithm is done. Finally we used the proposed algorithm in the large size that the gams software is not able to determine the answer. The L-P metric method obtains the optimal solution in small sizes, but in large sizes, when we give 3600 to 10800 seconds to the solver, it cannot obtain the optimal solution and requires another method to solve. The results of the comparisons show that the LP-metric method does not have the ability to solve large-sized problems in a reasonable time, but the solution time for the benders decomposition method, considering the size of the problem and the obtained answers, shows the appropriate efficiency of this algorithm.

Conclusions

Flexibility in the production lines is very important and it should be able to respond to the demand when customer orders change. Therefore, the definition of a mix model line provides flexibility in responding to customer demand and reducing the delivery time for priority orders. When we are faced with a large volume of orders, it can be useful to do things in parallel line. This issue, which is rarely seen in research, is presented in the balance model of this article in the form of two parallel lines. This issue is especially effective in industries such as automobile manufacturing.

Keywords: Mix Model Assembly Lines, Make to Order Environment, Line Balancing, Parallel Production Lines.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

مقاله پژوهشی

تاریخ ارسال: ۱۴۰۲/۲/۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۷/۸

ISSN: 2251/8029

eISSN: 2476-602X

مطالعات مدیریت صنعتی

سال بیست و یکم، شماره ۷۰، پاییز ۱۴۰۲، ص ۲۲۷ تا ۲۶۰

jims.atu.ac.ir

DOI: 10.22054/jims.2023.73390.2860

مدیریت تقاضای مشتری در تخصیص بهینه فعالیت های کاری به ایستگاه با توجه به سفارشات اولویت‌دار

فهیمه تنهایی * استادیار گروه مهندسی صنایع دانشگاه کوثر بجنورد، بجنورد، ایران

چکیده

خط مونتاژ ترکیبی به دلیل ویژگی‌های خاص و انعطاف نسبت به تغییرات ناگهانی تقاضاها، مورد استقبال بسیاری از تولیدکنندگان صنعتی قرار گرفته است. این مقاله، رویکردی نوین در بحث ارتباط با مشتریان را موردبحث و بررسی قرار داده است که نتایج آن نشان‌دهنده مدیریت مناسب تقاضا است. مدل پیشنهادی، به سفارش‌های اولویت‌دار توجه بیشتری در رقابت با دیگر تولیدکنندگان دارد و یک خط پیشتاز تولیدی به‌صورت موازی و با سرعت بیشتر نسبت به خط اصلی تعریف می‌نماید. با توجه به روند سریع تغییرات محیطی، یکی دیگر از مواردی که می‌توان برای افزایش انعطاف‌پذیری در محیط سفارش مبنا در نظر گرفت ایجاد شرایطی برای بالانس مجدد خط هست به‌طوری‌که بتوان به‌صورت هم‌زمان هم بارکاری را متعادل نمود و هم هزینه‌های تخصیص را کاهش داد. در این مقاله، بالانس مجدد خط نیز موردنظر بوده و در مدل‌سازی وارد می‌گردد و کمینه کردن هزینه‌های آن به‌عنوان هدف دیگری موردبررسی قرار می‌گیرد؛ بنابراین در این مقاله یک مسئله چندهدفه بالانس خط با بررسی مسائل بالانس مجدد و بالانس عمودی پیشنهاد می‌شود. در این مسئله برای حل از الگوریتم تجزیه بندرز استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد روش‌های دقیق توانایی حل مسائل سایز بزرگ در زمان منطقی را ندارد اما زمان حل برای روش تجزیه بندرز، با توجه به سایز مسئله نشان‌دهنده کارایی مناسب این الگوریتم است.

کلیدواژه‌ها: خطوط مونتاژ، محیط سفارش مبنا، بالانس خط، خطوط موازی تولیدی.

* نویسنده مسئول: fahimeh.tanhaie@kub.ac.ir

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر با پیشرفت تکنولوژی و با توجه به روند تغییرات محیطی و افزایش رقابت جهانی بین تولیدکنندگان و تنوع خواست‌های مشتریان، مشکلاتی شرکت‌های صنعتی و تولیدی را درگیر نموده است. ازجمله این مشکلات افزایش تنوع محصولات می‌باشد که در چنین شرایطی، رویکردهای سنتی تولید در پاسخگویی به تقاضای مشتریان از اثربخشی کافی برخوردار نیست. بنابراین، شرکت‌ها جهت برآورده کردن تقاضای متنوع مشتریان، نیازمند به‌کارگیری سیستم‌های نوین تولید هستند تا هم‌زمان با افزایش کیفیت محصولات تولیدی خود، هزینه تولید و درنتیجه قیمت محصولات تولیدی خود را نیز کاهش دهند. یکی از این سیستم‌های نوین تولیدی، خط مونتاژ ترکیبی است (Boysen و همکاران، ۲۰۰۸). لذا، بالانس این نوع خطوط که امکان مونتاژ هم‌زمان چندین نوع محصول را دارند و در محیط‌های صنعتی نیز موردتوجه هستند موضوع این پژوهش قرار گرفته‌اند. خطوط ترکیبی که توانایی برآورده کردن تقاضای متغیر بازار را با متحمل شدن کمترین تغییرات دارند، درحال حاضر در صنایع فعال در سطح جهان به چشم می‌خورند. نتایج این مقاله می‌تواند در کاهش اتلافات خطوط مونتاژ صنایع تولیدی کشور نیز مورداستفاده قرار گیرد، زیرا بر اساس مفاهیم تولید ناب و نظریه‌های شول و بیکر (Scholl and Becker، ۲۰۱۱) بالانس مناسب خط تولید منجر به کاهش حداقل پنج نوع از اتلافات دهگانه در سیستم‌های صنعتی می‌گردد.

گذشته از این‌که مسئله بالانس خط به‌خودی‌خود دارای اهمیت است یکی از مهم‌ترین نکات این تحقیق که کار روی آن را ضروری می‌نماید در نظر گرفتن محیط سفارش مبناست که در اکثر تحقیقات برنامه‌ریزی تولید خطوط مونتاژ ترکیبی نادیده گرفته شده است. البته تحقیقات زیادی هستند که فقط وارد محیط سفارش مبنا و مفروضات این محیط شده‌اند و مسائلی مانند بالانس را نادیده گرفته‌اند. با توجه به این‌که نقش مشتری در صنایع اهمیت زیادی دارد، واردکردن چارچوبی برای مدیریت سفارش‌های مشتری در مدل‌های مسائل بالانس خطوط دارای اهمیت است. هدف این مقاله مدیریت بهتر هزینه‌ها

و افزایش بهره‌وری در خطوط مونتاژ ترکیبی صنایع مختلف است به‌طوری‌که تقاضاها تأمین و محدودیت‌های فرآیند مونتاژ برآورده شوند. بدین منظور ابتدا مدل ریاضی موردنیاز در هر قسمت توسعه‌یافته و سپس الگوریتم‌های حل آن بیان شده است.

پیشینه پژوهش

همیت موضوع تحقیق روی مسائل بالانس در خطوط مونتاژ ترکیبی از دو جنبه قابل‌توجه است. ابتدا با توجه به پیچیدگی خاص مسئله، ارائه مدل‌های مختلف و الگوریتم‌های حل، از جنبه آکادمیک موردتوجه خیلی از محققین می‌باشد (Zhang و همکاران، ۲۰۱۹) (Mosadegh و همکاران، ۲۰۲۰). همچنین گسترش تحقیقات در سال‌های اخیر روی این مسئله و در نظر گرفتن فرضیات مختلف نشان‌دهنده درک اهمیت این خطوط و تأثیرگذاری آن‌ها در صنعت می‌باشد به‌طوری‌که بیان شده است که تعیین بالانس مناسب این خطوط می‌تواند بسیاری از ناکارآمدی‌های سیستم‌های تولیدی را کاهش دهد (Zhang و همکاران، ۲۰۲۰). مطالعات اولیه بالانس بر روی مسائل تک محصولی بود که موردتوجه تعداد زیادی از دانشمندان قرار گرفت و فرضیات این حوزه توسعه یافتند و مدل‌های چمد محصولی با روش‌های متفاوتی مورد توسعه قرار گرفتند. طراحی خط مونتاژ برای تک‌محصول مناسب نیست و به همین دلیل سازندگان به سمت تولید مجموعه‌ای از محصولات بر روی یک خط و یا همان خطوط مونتاژ ترکیبی رفتند (Akpınar and Bayhan، ۲۰۱۱) و محققان نیز بیشتر بر روی این موضوعات تحقیق نمودند (Razali و همکاران، ۲۰۱۱). در مقاله‌ای هدف کمینه کردن تعداد ایستگاه‌ها در مسائل بالانس نوع اول موردبررسی قرار گرفت و با روش هیوریستیک پیشنهادی مسئله حل شد (Baskar and Xavior, 2020). بعضی نویسندگان به کمینه کردن زمان بیکاری و زمان تکمیل محصول در خطوط مونتاژ ترکیبی پرداختند و با استفاده از تصمیم‌گیری چند معیاره و ترکیب آن با روش هوریستیک پیشنهادی مسئله را حل نمودند (Rauf و همکاران، ۲۰۲۰). بعضی تحقیقات نیز بالانس را در محیط سفارش مبنا و سیستم‌های کنترل کششی در نظر گرفتند. برای مثال، (Bukchin و همکاران، ۲۰۰۲) به بررسی مسئله بالانس در یک محیط با سیاست

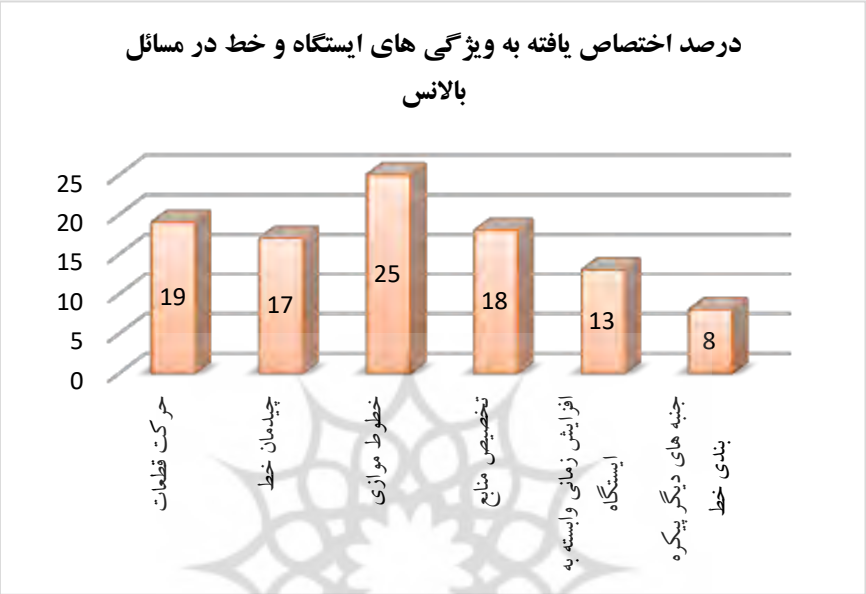
تولیدی ساخت بر اساس سفارش پرداختند و بعد از کامل سازی مدل، این مسئله را با سیاست تولیدی ساخت برای انبار مقایسه نمودند. در این محیط، ورودی محصولات بر اساس سفارش‌ها است که در این مقاله آن را به‌صورت تصادفی وارد مدل نمودند. معنوی زاده و همکاران نیز به بررسی مسئله بالانس در یک محیط سفارش‌مبنا پرداختند و با الگوریتم‌های تکاملی چند هدفه مسئله را حل نمودند (Manavizadeh و همکاران، ۲۰۱۲). در مقاله‌ای، خط مونتاژ ترکیبی در محیط سفارش مبنا در حالی در نظر گرفت که بین ایستگاه‌ها بافر وجود داشته باشد و خروجی را بیشینه کردند (Lopes و همکاران، ۲۰۲۰).

(Kim و همکاران، ۲۰۰۶) در ادامه کار قبلی خود، رویکرد تکاملی دیگری برای حل مسائل بالانس مدل ترکیبی خط مونتاژ ارائه کردند که با توجه به اهمیت استفاده از خطوط یو شکل در سیستم تولیدی بهنگام، این پارامتر را نیز در مسئله در نظر گرفتند.. Yadav و همکاران، ۲۰۲۰). خط مونتاژ دو طرفه را در نظر گرفتند و با کمینه کردن تعداد ایستگاه‌ها و افزایش بارکاری دو طرف خط مونتاژ، به مسئله بالانس پرداختند. روش شاخه و کلان برای حل مدل در نظر گرفته‌شده بود. (Lopes و همکاران، ۲۰۱۷) نیز به مسئله بالانس با در نظر گرفتن بافر بین ایستگاه‌ها پرداختند که نتایج نشان‌دهنده تأثیر مثبت بافر برای از بین بردن اختلاف‌زمان فرایند بین ایستگاه‌های مختلف است. ربانی و همکاران، خط مونتاژ ترکیبی دو طرفه را برای مسائل توالی در نظر گرفتند و سفارش‌ها را اولویت‌بندی کردند (Rabbani و همکاران، ۲۰۱۹). دزیکی و کرینچی مسئله بالانس خطوط مونتاژ ترکیبی و مسئله تخصیص وظایف را با هم در نظر گرفتند و چندین متاهیوریستیک را برای حل به کار بردند (2019,Dziki and Krenczyk). راپرات و همکاران در مسئله بالانس، زمان‌های حل را به‌صورت غیرقطعی در نظر گرفتند که مدل ریاضی را به دنیای واقعی نزدیک نمود. در این مقاله با استفاده از یک روش هیوریستیک پیشنهادی و کنترل زمان سیکل، کارایی خط افزایش داده شد (Ruppert و همکاران، ۲۰۲۰).

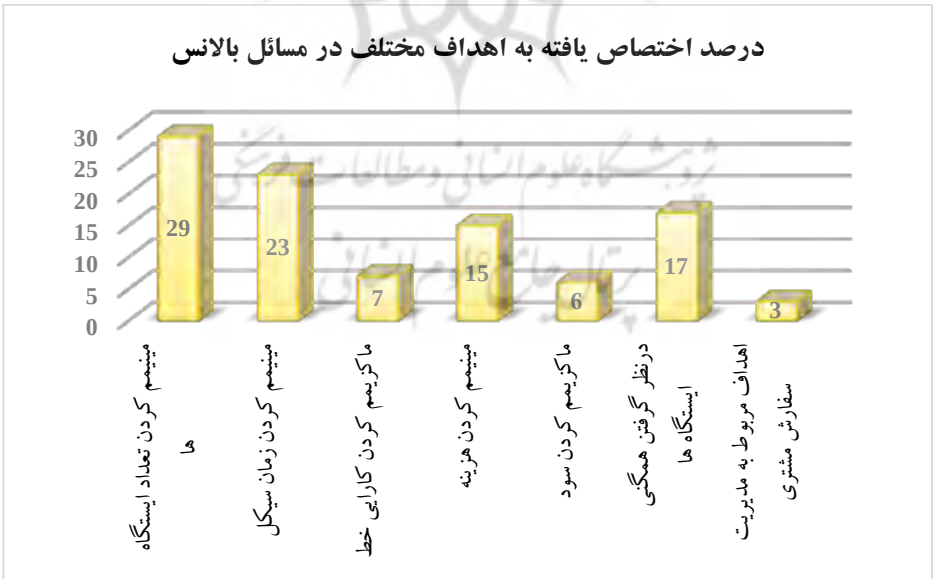
با مرور ادبیات انجام‌شده، فراوانی مفروضات و اهداف مختلف در مسائل بالانس

به‌دست‌آمده است که نتایج آن در نمودارهای ۱ و ۲ قابل‌مشاهده است.

شکل ۱. درصدهای اختصاص‌یافته به مفروضات ایستگاه و خط در مطالعات مسائل بالانس



شکل ۲. درصدهای اختصاص‌یافته به اهداف مختلف در مسائل بالانس



همان‌طور که از نمودارهای آماری مشخص است مفروضات و روش‌های حل در مسائل بالانس توسعه روزافزون داشته‌اند، بااین‌حال بررسی دقیق نشان می‌دهد که شکاف‌های تحقیقاتی که در ادامه آورده شده است می‌تواند زمینه جدیدی برای مطالعات باشد.

محیط تولیدی سفارش مبنا و مدیریت سفارش‌های مشتری در مسائل بالانس

- استفاده از خطوط مونتاژ با چیدمان‌های مختلف مانند دوطرفه، یو شکل، یو شکل موازی و دوطرفه موازی که جای تحقیقات زیادی بر روی این چیدمان‌ها وجود دارد.
- توسعه مفاهیم بالانس افقی و عمودی و بالانس مجدد خط در کنار مسئله اصلی بالانس

موارد تحقیقاتی که ذکر گردیدند به تحقیق و بررسی بیشتری نیاز دارد که در این مقاله، با توجه به زمان به چند مورد پرداخته می‌شود. جدول ۱ خلاصه بعضی از ویژگی‌های مهم مقالات مختلف و تفاوت آن با تحقیق فعلی ازنظر مفروضات اصلی مدل، سفارش‌های مشتریان و نوع محیط تولیدی می‌باشد.

جدول ۱. ویژگی‌های مهم در مرور ادبیات مقالات بالانس

مقالات	تابع هدف	محیط تولیدی		مدیریت سفارش‌های مشتریان		الگوریتم دقیق	
		MTO	MTS	بله	خیر	بله	خیر
kk pnrrr and Bayhan	کمینه کردن تعداد ایستگاه‌ها		*		*		*
Razali و همکاران	کمینه کردن زمان سیکل		*		*		*
Baskar and Xavior,	کمینه کردن تعداد ایستگاه‌ها		*		*		*
Rauf و همکاران	کمینه کردن زمان بیکاری و زمان تکمیل محصول		*		*	*	
Bukchinو همکاران	کمینه کردن زمان سیکل	*			*		*

مقالات	تابع هدف	محیط تولیدی		مدیریت سفارش‌های مشتریان		الگوریتم دقیق	
Manavizadehو همکاران	کمینه کردن زمان سیکل	*			*		*
Lopesو همکاران	بیشینه کردن خروجی	*		*			*
Kimو همکاران	کمینه کردن تعداد ایستگاه‌ها	*		*		*	
Yadavو همکاران	کمینه کردن تعداد ایستگاه‌ها با افزایش بارکاری دو طرف خط مونتاژ		*	*		*	
Ruppert و همکاران	کنترل زمان سیکل و افزایش کارایی		*	*		*	
تحقیق فعلی	کمینه کردن زمان سیکل و هزینه‌های بالانس مجدد دو خط	*			*	*	

روش

در این بخش، مدلی را در نظر می‌گیریم که بتوانیم به مشتریان اولویت‌دار بهای بیشتری در رقابت با دیگر تولیدکنندگان بدهیم. با توجه به این هدف یک خط پیشتاز تولیدی به‌صورت موازی و با سرعت بیشتر نسبت به خط اصلی و همچنین دارا بودن کارگرانی با مهارت‌های خاص تعریف می‌گردد. با توجه به روند سریع تغییرات محیطی، یکی دیگر از مواردی که می‌توان برای افزایش انعطاف‌پذیری در محیط سفارش مبنا در نظر گرفت ایجاد شرایطی برای بالانس مجدد خط هست به‌طوری‌که بتوان به‌صورت هم‌زمان هم‌بار کاری را متعادل نمود و هم هزینه‌های این تخصیص وظایف مجدد را کاهش داد.

ازاین‌جهت، در مدل پیشنهادی در این قسمت بالانس مجدد خط نیز موردنظر بوده و در مدل‌سازی وارد می‌گردد و کمینه کردن هزینه‌های آن به‌عنوان هدف دیگری از این مدل موردبررسی قرار می‌گیرد. همچنین هدف متعادل کردن خط مونتاژ که توزیع هر چه هموارتر مجموع بارکاری بین ایستگاه‌ها می‌باشد نیز به‌گونه‌ای در مدل پیشنهادی این قسمت گنجانده شده است که به آن بالانس عمودی نیز گفته می‌شود به‌طوری‌که هر

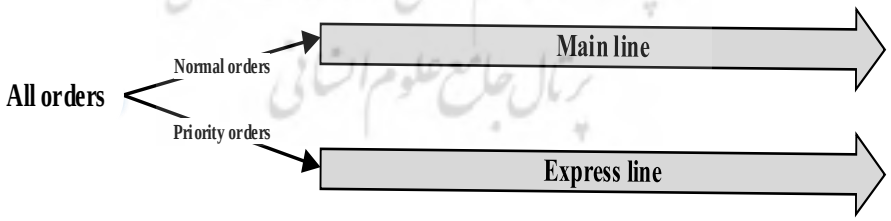
ایستگاه دارای میزان متعادلی از کار در یک شیفت کاری باشد؛ بنابراین در این مدل یک مسئله چندهدفه تعیین بالانس با بررسی مسائل بالانس مجدد و بالانس عمودی با اهداف زیر طراحی می‌گردد:

- کمینه کردن زمان سیکل دو خط موازی و هزینه‌های توزیع هر چه هموارتر مجموع بارکاری بین ایستگاه‌ها
- کمینه کردن هزینه‌های بالانس مجدد

تعریف مسئله

در این مدل ابتدا اولویت‌بندی سفارش‌های وارده به سازمان صورت می‌گیرد زیرا در محیط تولیدی سفارش مبنا، زمان تحویل سفارش‌های به‌خصوص برای سفارش‌هایی با اولویت بالا بسیار اهمیت دارد، زیرا مشتریان انتظار دارند که در یک مدت‌زمان کوتاه، پاسخ مناسبی در مورد محصول خودشان دریافت نمایند. این اولویت‌بندی می‌تواند با هر روشی صورت گیرد که خروجی آن تعیین‌کننده مشتریان معمولی و مشتریان اولویت‌دار است. پس از مشخص شدن اولویت سفارش‌ها و توجه به خط اصلی و پیشتاز تعیین‌شده، می‌توان سفارش‌های با اولویت را به خط پیشتاز که سریع‌تر عمل می‌نماید و دارای اپراتورهای چندمنظوره‌ای است وارد نمود و سایر سفارش‌ها را که دارای اولویت نرمال هستند به خط اصلی فرستاد. در شکل ۳ ورود سفارش‌ها برای تولید نشان داده شده است.

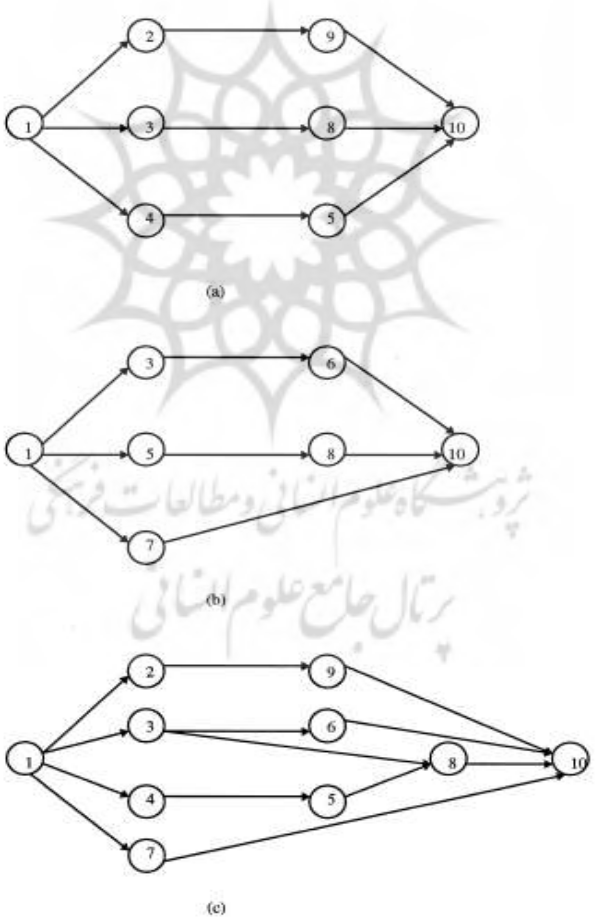
شکل ۳. نحوه ورود سفارش‌ها به خطوط تولیدی



فرض بر این است که سفارش رد شده نداریم و سفارش‌های مشتریان در یکی از این دودسته تقسیم می‌گردد. این طراحی کمک می‌نماید تا تأخیرات در رسیدن محصولات به مشتریان با اولویت بالاتر کاهش یابد که یکی از اهداف محیط‌های سفارش مبنا می‌باشد.

همان‌طور که ذکر گردید مسئله یک مدل چند هدفه است که علاوه بر در نظر گرفتن خط پیشتاز، شامل مسئله بالانس مجدد و بالانس عمودی نیز می‌شود که در نظر گرفتن این دو مسئله نیز برای افزایش انعطاف‌پذیری با توجه به محیط سفارش مبنا می‌باشد. بالانس عمودی نیز با هدف متعادل کردن خط مونتاژ که توزیع هر چه هموارتر مجموع بارکاری بین ایستگاه‌های مختلف می‌باشد در مدل‌سازی مطرح می‌گردد. در پایان قابل‌ذکر است که در نمودارهای تقدم و تأخری این مدل پیشنهادی فرض گردیده است که انواع مدل‌ها می‌توانند در یک نمودار ترکیبی در نظر گرفته شوند که مثالی از آن در شکل ۴ نشان داده شده است.

شکل ٤. نمودار تقدم تأخری دو مدل به‌صورت جدا و ترکیبی



در شکل ۴ با فرض در نظر گرفتن یک خط با دو نوع محصول، ابتدا روابط تقدم و تأخری بین کارهای مدل a و مدل b به‌صورت جداگانه نشان داده شده است و بعد با توجه به فرض در نظر گرفته‌شده در این مدل گراف ترکیبی آنان نیز نشان داده شده است.

فرضیات مدل پیشنهادی برای تعیین بالانس با ویژگی‌های ذکرشده در محیط تولیدی سفارش مبنا به شرح زیر است:

فرضیات مسئله

- هر کار دقیقاً به یک ایستگاه تخصیص می‌یابد.
- سفارش‌های مشتریان به دو دسته نرمال و با اولویت تقسیم می‌گردند و سفارش رد شده نخواهیم داشت.
- تمام‌کارهای قبل از یک کار باید قبل از تخصیص آن کار به ایستگاه تخصیص داده شوند.
- کل زمان انجام کارهای تخصیص‌یافته از زمان سیکل تعریف‌شده اولیه که حد بالای تعریف‌شده زمان سیکل است کمتر است.
- زمان سیکل تعریف‌شده اولیه برای بالانس اولیه مورداستفاده قرار می‌گیرد.
- امکان تخصیص کارهای مشابه به ایستگاه‌های متفاوت وجود ندارد.

با توجه به مفروضات و تعریف مسئله وارد مدل‌سازی می‌گردیم که در آن ابتدا علائم و پارامترها به شرح زیر تعریف می‌گردند.

علائم و پارامترها

M تعداد مدل‌های محصولات مختلف که باید مونتاژ شوند

$j, u \in \{1, 2, .., M\}$ اندیس مدل‌های مختلف محصولات

N تعداد کل کارهای مونتاژی مختلف

$i, g, s \in \{1, 2, .., N\}$ اندیس کارهای مختلف

$l \in \{1,2\}$	دو خط تعریف‌شده اصلی و مونتاژ ($l=1$ خط اصلی و $l=2$ خط پیشتاز)
N	تعداد کل ایستگاه‌ها (بیشینه تعداد ایستگاه‌ها)
$k,h \in \{1,2,..,\mathrm{N}\}$	اندیس ایستگاه
N	تعداد کل اپراتورهای کاندید برای تخصیص اولیه
$w \in \{1,2,..,\mathrm{N}\}$	اندیس اپراتورهای کاندید
n	تعداد ایستگاه‌ها (اپراتورها) در حل بالانس اولیه
Q	مجموعه کارهایی که بین مدل‌های مختلف مشترک‌اند
CT_l^{ub}	حد بالای تعریف‌شده برای زمان سیکل در خط l (ثانیه)
d_j	نسبت تقاضای مدل j از کل تقاضا
$bigM$	یک عدد خیلی بزرگ
α	درصد سفارش‌های مشتریان با اولویت معمولی
β	درصد سفارش‌های مشتریان با اولویت بالا
P_{il}	مجموعه پیش‌نیازهای کار i در خط l
F_{il}	مجموعه کارهای لازم بعد از کار i در خط l
IP_{il}	مجموعه پیش‌نیازهای دقیقاً قبل از کار i در خط l
IB_{ijwl}	این پارامتر برابر یک است اگر کار i از مدل j به ایستگاه w از خط l در بالانس اولیه تخصیص یابد یا به عبارتی اپراتور w در کار i از مدل j در خط l دارای مهارت باشد
T_{kl}	زمان صرف شده در ایستگاه k از خط l
$\overline{T_l}$	متوسط زمان صرف شده هر ایستگاه در خط l
C_{ijklw}	هزینه آموزش مجدد برای اپراتور w زمانی که کار i از مدل j به ایستگاه k از خط l تخصیص داده شود
CT_l	زمان سیکل در خط l (ثانیه)

t_{ijkl}	زمان فرایند کار i از مدل j در ایستگاه k از خط l (ثانیه)
Ea_{ijl}	زودترین ایستگاه ممکن برای تخصیص کار i از مدل j به خط l
La_{ijl}	دیرترین ایستگاه ممکن برای تخصیص کار i از مدل j به خط l
S_{jkl}	مجموعه کارهایی از مدل j که می‌توانند به ایستگاه k از خط l تخصیص یابند
$\|S_{jkl}\|$	تعداد کارهایی از مدل j که می‌توانند به ایستگاه k از خط l تخصیص یابند
x_{ijkl}	متغیر باینری: برابر یک است اگر کار i از مدل j به ایستگاه k از خط l تخصیص یابد
x'_{klw}	متغیر باینری: برابر یک است اگر اپراتور w به ایستگاه k از خط l تخصیص یابد
y_{jkl}	متغیر باینری: برابر یک است اگر ایستگاه k برای مدل j در خط l بازگردد
y'_{kl}	متغیر باینری: برابر یک است اگر ایستگاه k در خط l بازگردد
z_{kl}	متغیر باینری: برابر یک است اگر ایستگاه k توسط تمامی مدل‌ها در خط l بازگردد

پس از تعریف علائم، پارامترها و متغیرها وارد مدل‌سازی مسئله به‌صورت زیر می‌گردیم.

مدل‌سازی مسئله

همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد در این قسمت از رساله یک مسئله چندهدفه تعیین بالانس در خط مونتاژ ترکیبی بررسی می‌شود که دارای یک خط پیشتاز موازی با خط اصلی است، همچنین مسائل بالانس مجدد و بالانس عمودی با اهداف زیر طراحی می‌گردد:

- کمینه کردن زمان سیکل دو خط موازی اصلی و پیشتاز و کمینه کردن هزینه‌های

بالانس عمودی

- کمینه کردن هزینه‌های بالانس مجدد

قبل از مدل‌سازی بهتر است به تعریف مفاهیمی مانند زودترین و دیرترین ایستگاه که برای مدل‌سازی استفاده شده‌اند و توسعه‌ای از مقاله (Gökee eeel، ۱۹۹۷) است پرداخته شود. این دو مفهوم به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$Ea_{ijl} = \left\lceil \frac{t_{ijl} + \sum_{s \in P_{il}} \sum_{k=1}^{N} t_{sjkl}}{CT_l} \right\rceil \quad \forall i, j, l \qquad (۱)$$

این فرمول زودترین ایستگاه ممکن برای تخصیص کار i از مدل j به خط l را نشان می‌دهند.

$$La_{ijl} = N + 1 - \left\lceil \frac{t_{ijl} + \sum_{s \in F_{il}} \sum_{k=1}^{N} t_{sjkl}}{CT_l} \right\rceil \quad \forall i, j, l \qquad (۲)$$

فرمول بالا نیز دیرترین ایستگاه ممکن برای تخصیص کار i از مدل j به خط l را نشان می‌دهند.

در قسمت بالانس مجدد مدل نیز از فرمول زیر استفاده می گردد.

$$C_{ijklw} = t_{ijkl} * \max(x_{ijkl} - IB_{ijwl}, 0) \quad \forall i, j, k, l, w \qquad (۳)$$

این فرمول که هزینه آموزش مجدد اپراتورها در مونتاژ است با یک تبدیل خطی به‌صورت زیر در مدل پیشنهادی استفاده خواهد شد. در این قسمت مدل دو هدفه زیر، موردتوجه قرار گرفته است که ترکیب آن با اهداف و فرضیات موردنظر مدلی جدید محسوب می گردد.

$$Z_1 = \min\left\{\left(order_l \times CT_l\right) + \left(\sum_{l=1}^{2}\sum_{k=1}^{N}\left|T_{kl} - \overline{T}_l\right|\right)\right\} \quad (۴)$$

$$Z_2 = \min\left\{\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{M}\sum_{k=1}^{N}\sum_{l=1}^{2}\sum_{w=1}^{N} C_{ijklw} * x'_{klw}\right\} \quad (۵)$$

$$\sum_{k=Ea_{ijl}}^{La_{ijl}} x_{ijkl} = 1 \qquad \forall i, j, l \quad (۶)$$

$$\sum_{i \in S_{jkl}} t_{ijkl} * x_{ijkl} \le CT_l \qquad \forall j, k, l \quad (۷$$

$$T_{kl} = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} d_j * t_{ijkl} * x_{ijkl} \qquad \forall k, l \quad (۸)$$

$$\overline{T}_l = \frac{1}{N} * \sum_{k=1}^{N} T_{kl} \qquad \forall l \quad (۹)$$

$$\sum_{i \in S_{jkl}} x_{ijkl} - \left\|S_{jkl}\right\| * y_{jkl} \le 0 \qquad \forall j, k, l \quad (۱۰)$$

$$\sum_{j=1}^{M} y_{jkl} - M * z_{kl} = 0 \qquad \forall k, l \quad (۱۱)$$

$$x'_{klw} \le y'_{kl} \qquad \forall k, l, w \quad (۱۲)$$

$$C_{ijklw} = t_{ijkl} * \max(x_{ijkl} - IB_{ijwl}, 0) \qquad \forall i, j, k, l, w \quad (۱۳)$$

$$bigM * (1 - x_{gjkl}) - \sum_{u=1}^{M}\sum_{h \ne k} x_{guhl} \ge 0 \qquad \forall g \in Q, \forall j, k, l \quad (۱۴)$$

$$0 \le CT_l \le CT_l^{ub} \qquad \forall l \quad (۱۵)$$

$$\sum_{k=1}^{N} x'_{klw} = 1 \qquad \forall w, l \quad (۱۶)$$

$$z_{kl} \le y'_{kl} \qquad \forall k, l \quad (۱۷)$$

$$x_{ijkl} \in \{0,1\} \qquad i = 1,2,..,N, j = 1,2,..,M, k = 1,2,..,N, l = 1,2 \quad (۱۸)$$

$$x'_{klw} \in \{0,1\} \qquad k = 1,2,..,N, l = 1,2, w = 1,2,..,N \quad (۱۹)$$

$$y_{jkl} \in \{0,1\} \qquad j = 1,2,..,M, k = 1,2,..,N, l = 1,2 \quad (۲۰)$$

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

$$y'_{kl} \in \{0,1\} \qquad \mathrm{k} = 1,2,..,\mathrm{N}, l = 1,2 \tag{۲۱}$$

$$z_{kl} \in \{0,1\} \qquad \mathrm{k} = 1,2,..,\mathrm{N}, l = 1,2 \tag{۲۲}$$

$$T_{kl} \geq 0 \tag{۲۳}$$

$$\bar{T}_l \geq 0 \tag{۲۴}$$

$$CT_l \geq 0 \tag{۲۵}$$

همان‌طور که قبلاً ذکر شد در این مدل ابتدا اولویت‌بندی سفارش‌های وارده به سازمان صورت می‌گیرد زیرا زمان تحویل سفارش‌های به‌خصوص برای سفارش‌هایی با اولویت بالا بسیار اهمیت دارد. در این مدل فرض می‌گردد که اولویت‌بندی سفارش‌های انجام‌شده است و جایگاه هر مشتری در یکی از این دو طبقه سفارش‌های معمولی و با اولویت مشخص گردیده است. پس از مشخص شدن اولویت‌ها، سفارش‌های با اولویت به خط پیشتاز که سریع‌تر عمل می‌نماید وارد می‌شود و سایر سفارش‌هایی که دارای اولویت نرمال هستند به خط اصلی فرستاده می‌شوند. تابع هدف اول به کمینه کردن زمان سیکل تولیدی دو خط و هموار کردن مجموع بار کاری بین ایستگاه‌ها که همان بالانس عمودی است می‌پردازد. تابع هدف دوم به کمینه کردن کل هزینه‌های بالانس مجدد برای آموزش مجدد کلیه اپراتوران در دو خط اصلی و پیشتاز می‌پردازد. محدودیت (۶) تضمین می‌نماید که هر کار حداکثر به یک ایستگاه در هر خط تخصیص یابد. محدودیت (۷) مربوط به زمان سیکل است و تضمین می‌نماید که زمان هر ایستگاه در هر خط باید از حد بالای تعریف‌شده برای زمان سیکل کمتر باشد. قابل‌ذکر است که این حد بالای تعریف‌شده برای زمان سیکل برای تخصیص اولیه می‌باشد. محدودیت‌های (۸) و (۹) برای کمینه کردن هزینه‌های توزیع هر چه هموارتر مجموع بار می‌باشند که به ترتیب نمایانگر زمان صرف شده در هر ایستگاه از هر خط و همچنین متوسط زمان صرف شده در هر ایستگاه از هر خط می‌باشند که برای محاسبات در بالانس عمودی مورداستفاده قرار می‌گیرند.

محدودیت‌های (۱۰) و (۱۱) ضمانت می‌کنند که تعداد ایستگاه‌ها برای تمامی مدل‌ها یکسان باشد. محدودیت (۱۲) نیز تضمین می‌نماید که اپراتور به ایستگاهی تخصیص یابد که باز شده است و به عبارتی کار و یا کارهایی به آن تخصیص داده شده است. محدودیت

(۱۳) برای هزینه آموزش مجدد اپراتوران گرفته‌شده‌اند و حدود این هزینه را مشخص می‌نمایند. محدودیت (۱۴) مربوط به تخصیص کارها به ایستگاه‌های مختلف است و بیان می‌نماید که امکان تخصیص کارهای مشابه به ایستگاه‌های متفاوت وجود ندارد و باید در یک ایستگاه فعالیت روی آنان صورت بگیرد. محدودیت (۱۵) تضمین می‌نماید که سیکل زمانی به‌دست‌آمده برای هر دو خط اصلی و پیشتاز باید بین حد بالای تعریف‌شده سیکل زمانی و صفر قرار بگیرند. محدودیت (۱۶) نیز تضمین می‌نماید که هر اپراتور به یک ایستگاه تخصیص یابد. محدودیت (۱۷) رابطه بین دو متغیر را نشان می‌دهد و در انتها محدودیت‌های (۱۸) تا (۲۵) نیز متغیرهای تصمیم را تعریف می‌نمایند.

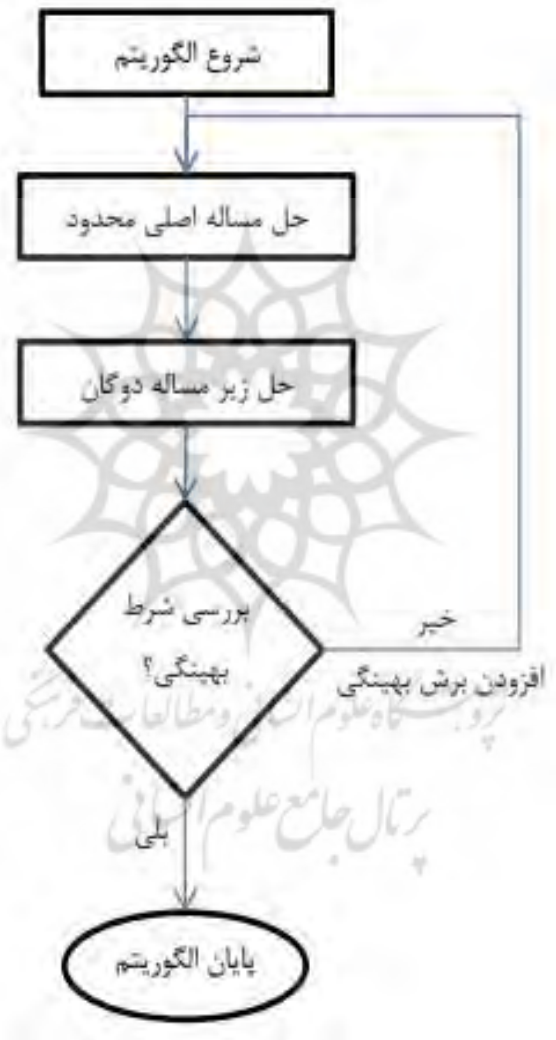
یافته‌ها

گیجار و نیمهاسار اثبات کردند که مسئله بالانس حتی با در نظر گرفتن فرضیات ساده نیز جز مسائل سخت محسوب می‌شود (Kirkpatrick و همکاران، ۱۹۸۳). در این مسئله برای حل از الگوریتم تجزیه بندرز استفاده شده است علت این انتخاب در ساختار تعدادی از محدودیت‌های مدل است که ساختار بلوکی محدودیت‌ها را به‌هم‌ریخته و سبب پیچیدگی حل مدل گردیده است. بر اساس بررسی صورت گرفته از مدل ریاضی تعریف‌شده، مدل دارای محدودیت‌های گسسته و پیوسته‌ای است که می‌توان آن را طبق الگوریتم تجزیه بندرز، به دو مسئله تقسیم‌بندی نمود و حل مدل در ابعاد بزرگ‌تر را امکان‌پذیر ساخت.

الگوریتم تجزیه بندرز اولین بار توسط جی اف بندرز (Benders, 2005) ابداع شد. این روش اغلب برای حل مسائلی به کار می‌رود که شامل متغیرهای پیوسته و گسسته هستند. نادری و همکاران یک الگوریتم تجزیه بندرز برای مسئله بالانس در یک خط تولید اتومبیل به کار گرفتند که برای حل مدل دو نوع متفاوت از زیر مسئله را ارائه دادند. ایده کلی الگوریتم بنابر تقسیم مسئله به دو قسمت است: یک زیر مسئله خطی که تنها شامل متغیرهای پیوسته است و یک مسئله اصلی که شامل متغیرهای گسسته پیچیده است. زیر مسئله خطی حاصل به‌راحتی توسط روش برنامه‌ریزی خطی قابل‌حل است. درواقع استراتژی الگوریتم بندرز بنابر ثابت کردن متغیرهای گسسته و حل دوگان زیر مسئله خطی حاصل است. سپس الگوریتم با استفاده از جواب حاصل از دوگان زیر مسئله خطی،

تعدادی برش (محدودیت)، برای افزودن به مسئله اصلی تولید می‌کند. این روند تا جایی ادامه می‌یابد که مسئله اصلی دارای تعداد کافی برش برای رسیدن به جواب بهینه باشد. به‌طورکلی ساختار این الگوریتم در شکل ۵ دیده می‌شود.

شکل ۵. الگوریتم تجزیه بندرز



با توجه به این‌که مدل ریاضی مطرح در این قسمت دارای دو هدف می‌باشد الگوریتم

تجزیه بندرز با استفاده از روش ال-پی متریک[1] وزنی ابتدا دو تابع هدف را تبدیل به یک تابع هدف می‌نماید که در زیر روش ال-پی متریک وزنی را برای تابع هدف مشاهده می‌نمایید.

$$Z_{LP_metric} = \left(\left(\frac{Z_1 - Z_1^*}{Z_1^*}\right) \times w_1 + \left(\frac{Z_2 - Z_2^*}{Z_2^*}\right) \times w_2 \right) \quad (۲۶)$$

$$w_1 + w_2 = 1 \quad (۲۷)$$

Z1 و Z2 تابع هدف اول و دوم هستند،w1 و w2 وزن‌های توابع هدفمند که توسط تصمیم‌گیرنده تعیین‌شده‌اند و مسئله را تبدیل به یک مسئله تک هدفه نموده‌اند.

به‌کارگیری الگوریتم تجزیه بندرز برای مدل ریاضی پیشنهادی

برای حل مدل با الگوریتم ترکیبی تجزیه بندرز و روش ال-پی متریک، بعد از تک هدفه نمودن مدل طبق رویه بندرز باید مسئله اورجینال به دو مسئله اصلی و زیرمسئله تبدیل گردد که این رویه در زیر مشاهده می‌گردد.

مسئله اصلی منتج از الگوریتم تجزیه بندرز

$$\min \left(\left\{ \frac{\left(\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{M}\sum_{k=1}^{N}\sum_{l=1}^{2}\sum_{w=1}^{N} C_{ijklw} * x'_{klw} - Z_2^* \right)}{Z_2^*} \right\} \times w_2 \right) \quad (۲۸)$$

St. (۶)-(۸), (۱۰)-(۱۴), (۱۶)-(۲۲) (۲۹)

زیرمسئله منتج از الگوریتم تجزیه بندرز

1. LP-matric

$$Z_{SP} = \min\left(\left(\frac{\left\{\sum_{l=1}^{2}\left(order_l \times CT_l\right)+\left(\sum_{l=1}^{2}\sum_{k=1}^{N} TT_{kl}\right)\right\}-Z_1^*}{Z_1^*}\right)\times w_1\right) \quad (۳۰)$$

St. ۹, ۱۵, (۲۳)-(۲۵) (۳۱)

بعد از حل کردن مسئله اصلی، مقادیر متغیرهای صحیح ثابت می‌گردند و در دوگان[1] زیرمسئله مورداستفاده قرا می‌گیرند؛ بنابراین ابتدا باید دوگان زیرمسئله را مطابق زیر به دست آوریم که در آن متغیرهای دوگان با $\{u^r \quad r=1,2,...,6\}$ نشان داده شده‌اند.

دوگان زیرمسئله

قبل از نوشتن دوگان زیرمسئله، با تبدیل خطی زیر، قدر مطلق تابع هدف زیرمسئله را حذف و با اضافه کردن متغیر TT_{kl} و دو محدودیت (۳۳) و (۳۴) مدل را خطی می‌نماییم.

$$\min\left\{\sum_{l=1}^{2}\sum_{k=1}^{N} TT_{kl}\right\} \quad (۳۲)$$

$$TT_{kl} - \bar{T}_l + T_{kl} \geq 0 \quad \forall k,l \quad (۳۳)$$

$$TT_{kl} - T_{kl} + \bar{T}_l \geq 0 \quad \forall k,l \quad (۳۴)$$

حالا دوگان زیرمسئله را به صورت زیر می‌نویسیم:

$$Z_{DSP} = \max\left\{\left(\sum_{l=1}^{2}\sum_{k=1}^{N}\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} d_j \times t_{ijkl} \times x_{ijkl} \times {u_{kl}}^1\right)-\left(\sum_{l=}^{2} CT_l^{ub} \times {u_l}^4\right)\right\} \quad (۳۵)$$

$${u_{kl}}^1 - (1/\mathrm{N}) \times {u_l}^2 - {u_{kl}}^5 + {u_{kl}}^6 \leq 0 \quad \forall k,l \quad ۳۶)$$

1. Dual sub problem (DSP)

$$u_l^{\,2} + u_{kl}^{\,5} - u_{kl}^{\,6} \le 0 \qquad \forall k,l \tag{۳۷}$$

$$u_l^{\,3} - u_l^{\,4} \le \left(\frac{order_l \times w_1}{z_1^*} \right) \qquad \forall l \tag{۳۸}$$

$$u_{kl}^{\,5} + u_{kl}^{\,6} \le \left(\frac{w_1}{z_1^*} \right) \qquad \forall k,l \tag{۳۹}$$

$$u_l^{\,1}, u_l^{\,2} \qquad free \tag{۴۰}$$

$$u_l^{\,3} \ge 0, u_l^{\,4} \ge 0, u_l^{\,5} \ge 0, u_l^{\,6} \ge 0 \tag{۴۱}$$

با حل مسئله اصلی شروع به کار می‌نماییم و با توجه به جواب‌های به‌دست‌آمده از آن یک راه‌حل برای دوگان زیرمسئله تولید می‌نماییم. در هر تکرار الگوریتم باید یک برش ایجاد شود که این برش با توجه به جواب به‌دست‌آمده برش شدنی[1] و یا برش بهینگی[2] می‌باشد که مطابق فرمول‌های (۴۲) و (۴۳) ایجاد می‌شود.

optimality cut: (۴۲)

$$Z_{MP} \ge \left(\sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{M} \sum_{k=1}^{N} \sum_{l=1}^{2} \sum_{w=1}^{N} C_{ijklw} \times \left(x'_{klw} \cdot fix \right) \right) \times w_2 + \left(\sum_{l=1}^{2} \sum_{k=1}^{N} \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} d_j \times t_{ijkl} \times \left(x_{ijkl} \cdot fix \right) \times u^1_{kl(\text{O_iter})} \right) - \left(\sum_{l=}^{2} CT_l^{ub} \times u^4_{l(\text{O_iter})} \right)$$

feasibility cut: (۴۳)

$$\left(\sum_{l=1}^{2} \sum_{k=1}^{N} \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} d_j \times t_{ijkl} \times \left(x_{ijkl} \cdot fix \right) \times u^1_{kl(\text{F_iter})} \right) - \left(\sum_{l=}^{2} CT_l^{ub} \times u^4_{l(\text{F_iter})} \right) \le 0$$

$$(\text{O_iter}) + (\text{F_iter}) = S$$

در فرمول ذکرشده $^{(\text{O_iter})}$، تعداد برش‌های بهینگی در S امین تکرار و $^{\text{F_iter})}$ تعداد برش‌های شدنی در S امین تکرار است. اگر جواب به‌دست‌آمده از DSP یک جواب

1. Feasibility cut
2. Optimality cut

شدنی باشد، برش بهینگی به مسئله اصلی اضافه می‌شود و در غیر این صورت برش شدنی به مسئله اصلی اضافه می‌شود و این رویه ادامه پیدا می‌کند تا زمانی که حد بالا و پایین نزدیک به هم یا برابر گردند و یا ممکن است شرط دیگری برای خاتمه الگوریتم قرار داده شود.

تکنیک‌های شتاب‌دهنده[1]

استفاده از الگوریتم تجزیه بندرز بدون تکنیک‌های شتاب‌دهنده باعث کندی مسئله و دیر همگرا شدن مسئله می‌شود. در این قسمت از حل، برای افزایش کیفیت برش‌ها و تسریع همگرایی از تسریع دهنده زیر که در (Magnanti and Wong، ۱۹۸۱) و (Alshamsi and Diabat، ۲۰۱۸) آمده است استفاده می‌نماییم.

برش بهینه پارتو[2]:

زمانی که دوگان زیرمسئله دارای جواب‌های بهینه چندگانه باشد، جواب‌های دوگان متفاوت می‌توانند برش‌های متفاوتی با اثرگذاری‌های متفاوتی ایجاد نمایند. درصورتی‌که بتوانیم از بین این برش‌ها، قوی‌ترین برش را انتخاب نماییم زمان حل را کاهش داده‌ایم و همگرایی را سریع‌تر کرده‌ایم. این برش به‌عنوان برش بهینه پارتو شناخته می‌شود و طبق فرمول (۴۴) به دست می‌آید.

$$\max\left\{\left(\sum_{l=1}^{2}\sum_{k=1}^{N}\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} d_j \times t_{ijkl} \times x_{ijkl}^{corepo\,\mathrm{int}} \times u_{kl}^{\,1}\right)-\left(\sum_{l=}^{2} CT_l^{ub} \times u_l^{\,4}\right)\right\} \qquad (۴۴)$$

St. constraints (۳۶)-(۴۱) and

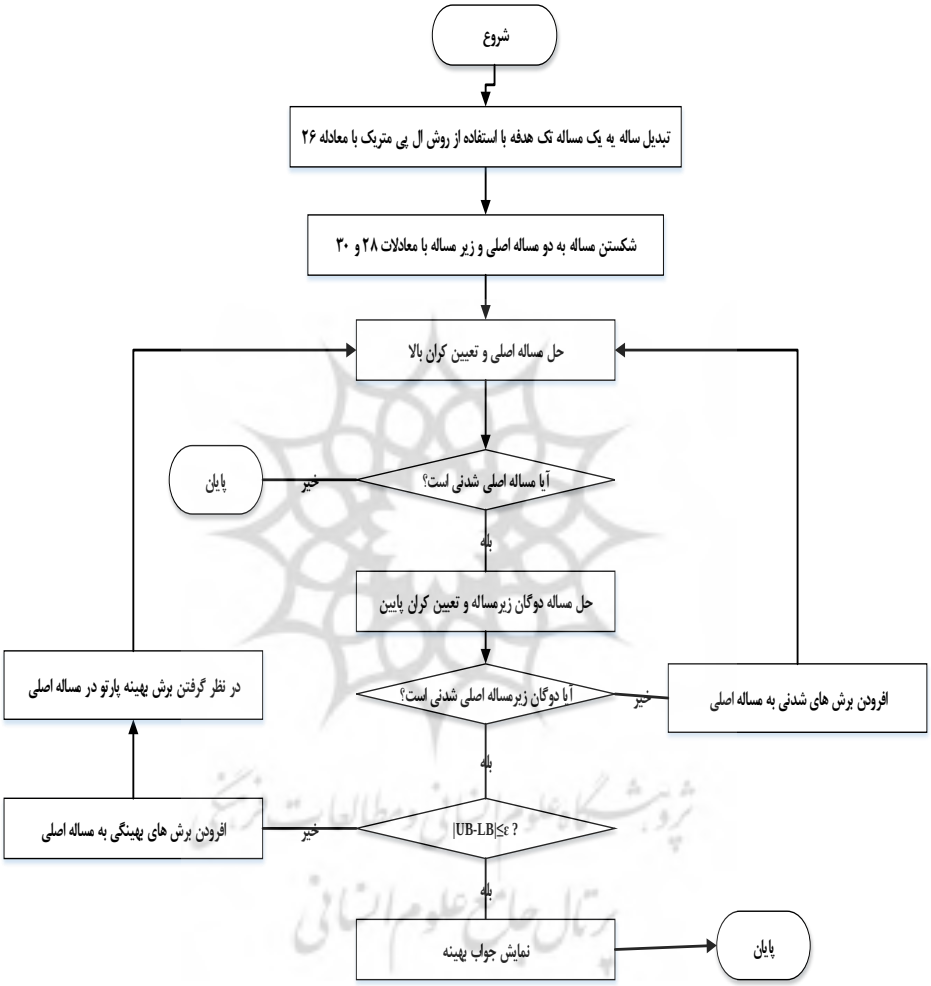
$$\left(\sum_{l=1}^{2}\sum_{k=1}^{N}\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} d_j \times t_{ijkl} \times (x.fix)_{ijkl} \times u_{kl}^{\,1}\right)-\left(\sum_{l=}^{2} CT_l^{ub} \times u_l^{\,4}\right) = Z_{DSP}^{*} \qquad (۴۵)$$

در این فرمول $x_{ijkl}^{corepo\,\mathrm{int}}$ یک نقطه هسته‌ای و Z_{DSP}^{*} تابع هدف بهینه است.. مراحل

1. Accelerating methods
2. Pareto-optimal cuts (POC)

استفاده از الگوریتم بندرز پیشنهادی ترکیبی در شکل ۶ دیده می‌شود.

شکل ٦. الگوریتم بندرز پیشنهادی ترکیبی



با توجه به مدل بندرز به‌دست‌آمده در فصل بعدی نتایج حل حاصل از این روش و تحلیل‌های لازم آورده می‌شود.

نتایج محاسباتی و اعتبارسنجی مدل

جهت اعتبارسنجی مدل و اطمینان از عملکرد صحیح الگوریتم تجزیه بندرز ترکیبی با روش ال-پی متریک، ابتدا مدل ریاضی در سایز کوچک به‌صورت دقیق با نرم‌افزار گمز و با سالور سیپلکس توسط روش ال-پی متریک حل می‌گردد و مقایسه‌ای بین جواب‌های آن و الگوریتم پیشنهادی تجزیه بندرز ترکیبی صورت می‌پذیرد و درنهایت در سایز بزرگ که نرم‌افزار گمز قادر به تعیین جواب نمی‌باشد از الگوریتم پیشنهادی استفاده نمودیم. مسئله‌های سایز کوچک مطرح‌شده توسط روش ال-پی متریک و الگوریتم تجزیه بندرز ترکیبی پیشنهادی حل گردیدند و نتایج در جدول ۲ قابل‌مشاهده است.

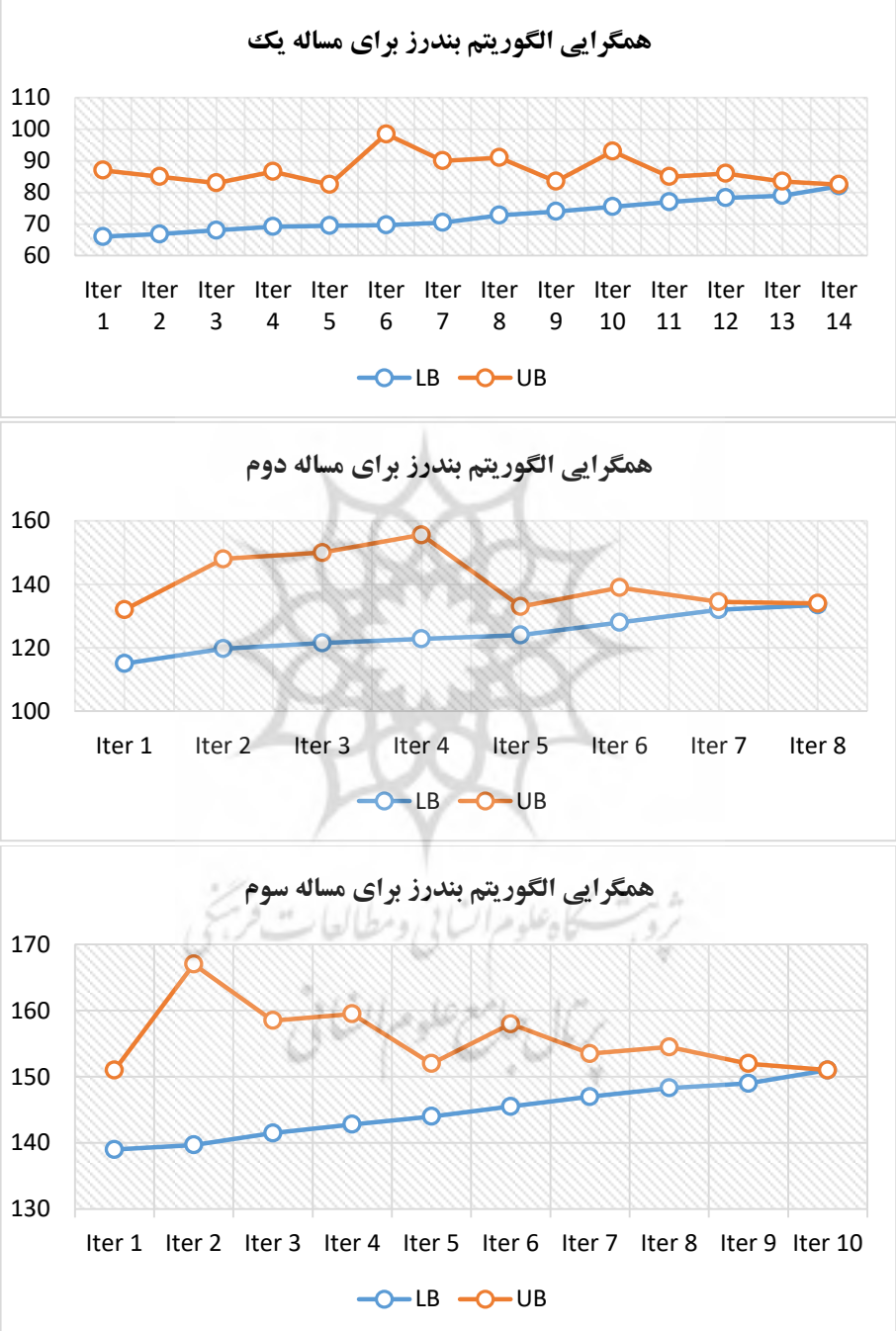
جدول ۲. مقایسه جواب سالور سیپلکس با الگوریتم تجزیه بندرز ترکیبی در مسائل سایز کوچک

مسئله	تعداد وظایف	رویکرد حل	زمان حل (ثانیه)	هدف اول	هدف دوم
1	۹	تجزیه بندرز ترکیبی	4.372	21	124
		سیپلکس	3.940	21	124
2	۱۲	تجزیه بندرز ترکیبی	37.816	39	178
		سیپلکس	25.307	39	178
3	۱۵	تجزیه بندرز ترکیبی	54.845	64	253
		سیپلکس	60.397	64	253

نتایج به‌دست‌آمده از مقایسه جواب نرم‌افزار گمز (سیپلکس) با الگوریتم تجزیه بندرز ترکیبی نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی دارای کارایی مناسبی می‌باشد و بنابراین در مسائل سایز بزرگ برای حل مدل ریاضی مورداستفاده می‌گردد. رویه همگرایی[1] کران بالا و کران پایین مسائل سایز کوچک در شکل ۷ رسم شده است.

1. convergence

شکل ۷. همگرایی کران بالا و کران پایین برای مسائل سایز کوچک



مسائل سایز بزرگ

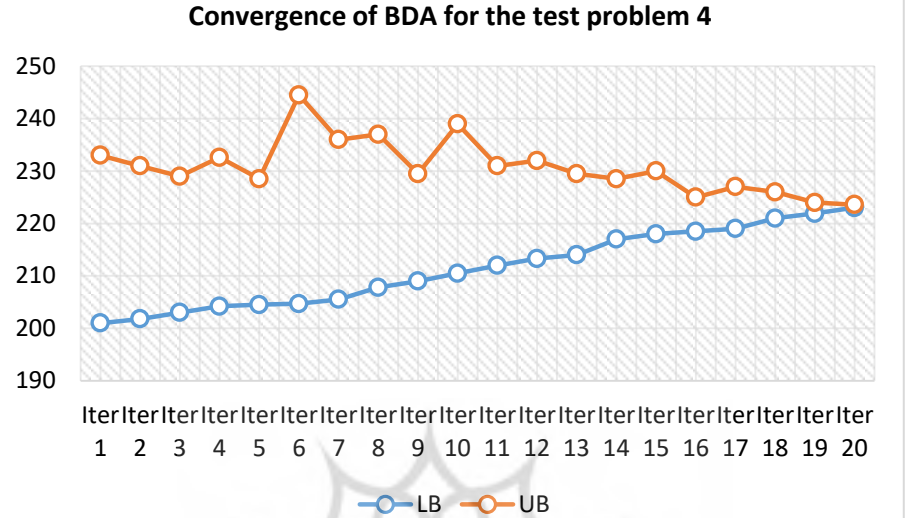
در این قسمت برای مسائل سایز بزرگ که نرم‌افزار گمز قادر به تعیین جواب نمی‌باشد از الگوریتم ترکیبی پیشنهادی استفاده نمودیم. همان‌طور که جدول ۲ نشان می‌دهد، روش ال-پی متریک در سایز کوچک جواب بهینه را به دست می‌آورد اما در سایزهای بزرگ زمانی که ۳۶۰۰ تا ۱۰۸۰۰ ثانیه زمان به سالور سیپلکس می‌دهیم نمی‌تواند جواب بهینه را به دست آورد و نیازمند روش دیگری برای حل می‌باشد. قابل‌ذکر است نتایج جدول ۳ برای یکی از نقاط پارتو مسائل می‌باشد.

جدول ۳. مقایسه جواب مسائل با روش‌های مختلف (تعداد وظایف:NT ، شماره مسئله:TP)

مسئله	تعداد وظایف	زمان حل روش ال-پی متریک (S)	زمان حل روش تجزیه بندرز ترکیبی (S)	کران پایین بندرز	کران بالا بندرز	هدف اول	هدف دوم
4	۱۹	>3600s	115.315	۲۲۲	۲۲۲	86	294
5	۲۵	>3600s	426.390	۲۱۱	۲۱۳	۱۰۵	۳۶۰
6	۲۸	>3600s	823.47	۳۱۷	۳۱۷	۱۴۷	۴۱۲
7	۳۵	>7200	1174.004	۲۸۶	۲۸۹	۱۶۹	۴۶۱
8	۴۷	>7200s	1530.561	۴۰۶	۴۰۶	۱۸۸	۵۰۳
9	۵۳	>10800s	2019.503	۳۷۲	۳۷۷	۲۳۰	۵۷۹
10	۶۰	>10800s	3491.875	۵۱۹	۵۲۸	۲۷۳	۶۳۸

اولین مسئله‌ای که روش ال-پی متریک در زمان داده‌شده به آن نمی‌تواند به جواب برسد مسئله چهارم است که برای حل آن از روش تجزیه بندرز ترکیبی پیشنهادی استفاده می‌نماییم. نحوه همگرایی این مسئله به جواب بهینه در شکل ۸ نشان داده شده است.

شکل ۸. همگرایی کران بالا و کران پایین مسئله چهارم



نتایج مقایسات نشان می‌دهد روش ال-پی متریک توانایی حل مسائل سایز بزرگ در زمان منطقی را ندارد اما زمان حل برای روش تجزیه بندرز، با توجه به سایز مسئله و جواب‌های به‌دست‌آمده نشان‌دهنده کارایی مناسب این الگوریتم است. قابل‌ذکر است زمانی که مسئله بزرگ می‌شود و تعداد وظایف برای تخصیص افزایش می‌یابند، کران پایین و بالا بر یکدیگر منطبق نمی‌شوند و اندکی گپ اپتیمالیتی در جواب وجود دارد.

تحلیل حساسیت

به‌منظور بررسی چگونگی تغییرپذیری مقدار تابع هدف و هزینه آموزش مجدد کارگران، تحلیل حساسیت نسبت به پارامتری که بر روی تابع هدف تأثیرگذار است انجام شده است. پارامتر انتخاب‌شده موجود در مسئله در بازه کاهش ۲۰ درصدی تا افزایش ۲۰ درصدی تغییر داده می‌شود تا میزان حساسیت مسئله نسبت به آن بررسی گردد که در جدول ۴ مشاهده می‌گردد. قابل‌ذکر است که این پارامتر تأثیر چندانی روی تابع هدف دوم نداشته است. در این مدل پارامتر $\|S_{jkl}\|$ که برابر مجموعه کارهایی است که می‌توانند به یک

ایستگاه تخصیص یابند را مورد تحلیل حساسیت قرار می‌دهیم، زیرا این پارامتر نشان‌دهنده میزان انعطاف‌پذیری تجهیزات یک ایستگاه است و می‌تواند در تخصیص فعالیت‌ها به ایستگاه‌ها در مسئله بالانس تأثیرگذار باشد.

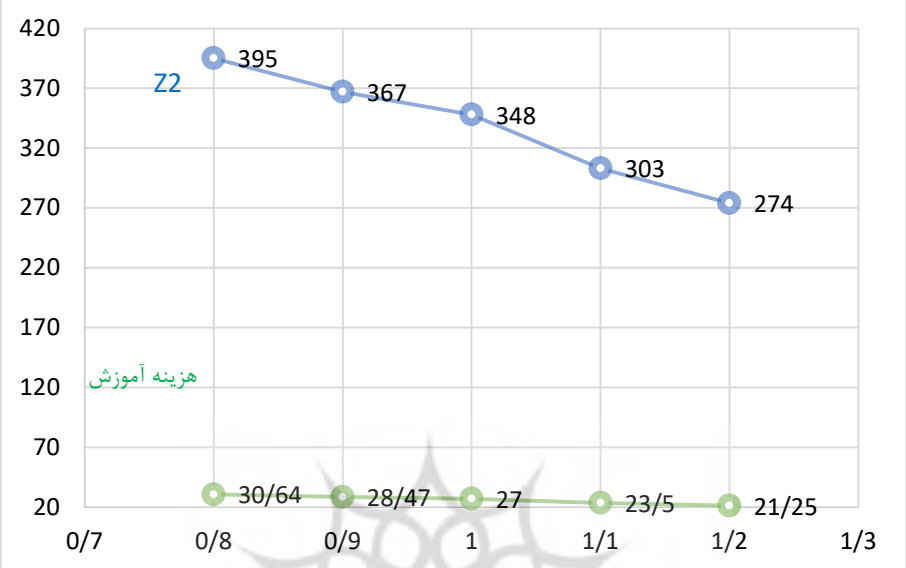
جدول ٤. میزان تغییرات تابع هدف و هزینه آموزش مجدد کارگران

دفعات تغییر پارامتر	ضریب تغییرات نسبت به پارامتر	تابع هدف Z_1	مقدار هزینه آموزش مجدد
۱	۰,۸	395	۳۰,۶۴
۲	۰,۹	367	۲۸,۴۷
۳	۱	348	۲۷
۴	۱,۱	303	۲۳,۵
۵	۱,۲	274	۲۱,۲۵

اگر مجموعه کارهایی که می‌توانند به یک ایستگاه تخصیص یابند بیشتر شوند و یا به عبارتی در ایستگاه‌ها تجهیزات منعطفی قرار داشته باشند که بتوانند روی وظایف مختلفی از مدل‌ها کار انجام دهند، هزینه آموزش مجدد کاهش می‌یابد، زیرا در این حالت اپراتورهایی که در بالانس مجدد به ایستگاه‌ها تخصیص می‌یابند با احتمال بیشتری قبلاً این وظایف ایستگاه را انجام داده‌اند و از هزینه آموزش آنان کاسته می‌شود و نیازی به یادگیری مجدد انجام عملیات روی این وظایف ندارند. این کاهش هزینه موجب کاهش تابع هدف دوم می‌گردد که هر دو در نمودار در شکل ۹ قابل‌مشاهده می‌باشد.

پرتال جامع علوم انسانی

شکل ۹. تغییرات تابع هدف و هزینه آموزش مجدد نسبت به پارامتر



بنابراین هرچند می‌توان با بالابردن انعطاف‌پذیری تجهیزات ایستگاه‌ها، هزینه‌های مدل را کاهش داد اما باید در نظر داشت که این بالا بردن سطح تجهیزات هزینه‌زاست که باید مدیریت برآیند کاهش هزینه بالانس مجدد خط و افزایش هزینه ناشی از تجهیزات را نیز در نظر بگیرد. قابل‌ذکر است که افزایش و یا کاهش بیش‌ازحد این پارامتر، فضای حل مسئله را نشدنی می‌نماید که این مقدار برای هر مسئله متفاوت است.

بحث و نتیجه‌گیری

پروسه مدیریت سفارش‌ها اهمیت زیادی دارد زیرا امروزه سازمان‌ها روی ابعاد مختلف خدمات خود در برابر مشتری مانند ایجاد تعهد در برابر مشتریان و نیز تأمین سفارش‌ها به رقابت جدی می‌پردازند. انعطاف‌پذیری در سیستم سفارش مبنا دارای اهمیت زیادی است و باید بتوان در هنگام تغییرات سفارش‌های مشتری، پاسخگوی تقاضا بود؛ بنابراین تعریف یک خط پیشتاز تولیدی باعث انعطاف در پاسخگویی به تقاضای مشتریان و کاهش زمان تحویل به سفارش‌ها با اولویت می‌گردد. در زمانی که با حجم انبوهی از سفارش‌ها روبرو

باشیم، انجام کارها به‌صورت موازی می‌تواند مفید باشد، این مسئله که در تحقیقات به‌ندرت به چشم می‌خورد در مدل بالانس این مقاله به‌صورت دو خط موازی آمده است. این مسئله به‌ویژه در مورد صنایعی مانند اتومبیل‌سازی بسیار تأثیرگذار است.

در تحقیقات آتی، می‌توان با توجه به شیوه اولویت‌بندی سفارش‌ها در این مقاله، تمرکز بیشتری بر روی مشتریان انجام داد و معیارهای مختلف دیگری مانند نسبت بحرانی هر سفارش را موردبررسی قرار داد. همان‌طور که از یک خط پیشتاز موازی با خط اصلی استفاده شده است، می‌توان ساختارهای مختلفی مانند استفاده از خطوط تغذیه یا چیدمان یو شکل را برای این خطوط ارائه داد و مدل‌های سفارش مبنا را برای آن ارائه داد که باعث کاربردی‌تر شدن مدل‌ها می‌گردد. با توجه به سخت بودن مدل‌های ریاضی مطرح‌شده در حوزه بالانس خطوط مونتاژ ترکیبی، توسعه روش‌های متاهیوریستیک و ترکیبی از آن‌ها که بتوانند گپ اپتیمالیتی را کاهش دهند می‌توانند تأثیرگذار باشند.

تعارض منافع

نویسنده /گان هیچ‌گونه تعارض منافعی ندارند»

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از همه افرادی که نویسنده را در طی تحقیق حمایت کرده‌اند، کمال تشکر و قدردانی را دارم. این پژوهش از طرف دانشگاه کوثر بجنورد با شماره قرارداد ۰۲۰۱۲۷۱۹۰۱ حمایت شده است.

ORCID

Fahimeh tanhaie **https://orcid.org/0000-0002-1388-9289**

منابع

1. Alshamsi, A., & Diabat, A. (2018). Large-scale reverse supply chain network design: An accelerated Benders decomposition algorithm. *Computers &* Industrial Engineering, 124, 545-559.
2. Akıı rrr & Byy ())))))))A yyrr i gettt i algrr itmm frr mixed model assembly line balancing problem with parallel workstations and zoning constraints. *Engineering Applications of Artificial Intelligence, 24*(3), 449-457.
3. Aydemir, E., & Karagul, K. (2020). Solving a periodic capacitated vehicle routing problem using simulated annealing algorithm for a manufacturing company. *Brazilian Journal of Operations & Production Management, 17*(1), 1-13.
4. Baskar A, Xavior MA. (2020). Heuristics based on Slope Indices for Simple Type I Assembly Line Balancing Problems and Analyzing for a Few Performance Measures. *Materials Today: Proceedings*. 22, 3171-3180.
5. Benders, J. F. (2005). Partitioning procedures for solving mixed-variables programming problems. *Computational Management Science, 2*(1), 3-19.
6. Boysen, N., Fliedner, M., & Scholl, A. (2008). Assembly line balancing: Which model to use when?. *International journal of production economics, 111*(2), 509-528.
7. Bukchin, J., Dar-El, E. M., & Rubinovitz, J. (2002). Mixed model assembly line design in a make-to-order environment. *Computers & Industrial Engineering, 41*(4), 405-421.
8. Dziki K, Krenczyk D, (2019). Mixed-model assembly line balancing problem with tasks assignment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering;* IOP Publishing.
9. Gkkee H & eeel (1)))) Birrr y intggrr frr mll ati for middd-model assembly line balancing problem. *Computers & industrial engineering, 34*(2), 451-461.
10. Kim, Y. K., Kim, J. Y., & Kim, Y. (2006). An endosymbiotic evolutionary algorithm for the integration of balancing and sequencing in mixed-model U-lines. *European Journal of Operational Research, 168*(3), 838-852.
11. Lopes, T. C., Michels, A. S., Lüders, R., & Magatão, L. (2020). A simheuristic approach for throughput maximization of asynchronous buffered stochastic mixed-model assembly lines. *Computers & Operations Research, 115*, 104863.
12. Magnanti, T. L., & Wong, R. T. (1981). Accelerating Benders decomposition: Algorithmic enhancement and model selection criteria. *Operations research, 29*(3), 464-484.
13. Manavizadeh, N., Rabbani, M., Moshtaghi, D., & Jolai, F. (2012).

Mixed-model assembly line balancing in the make-to-order and stochastic environment using multi-objective evolutionary algorithms. *Expert Systems with Applications*, *39*(15), 12026-12031.

14. Mosadegh H, Ghomi SF, Süer G. (2020). Stochastic mixed-model assembly line sequencing problem: Mathematical modeling and Q-learning based simulated annealing hyper-heuristics. *European Journal of Operational Research*. 282(2):530-44.
15. Rabbani, M., Aliabadi, L., & Farrokhi-Asl, H. (2019). A Multi-Objective Mixed Model Two-Sided Assembly Line Sequencing Problem in a Make–to-Order Environment with Customer Order Prioritization. *Journal of Optimization in Industrial Engineering*, *12*(2), 1-20.
16. Rauf M, Guan Z, Sarfraz S, Mumtaz J, Shehab E, Jahanzaib M. (2020). A smart algorithm for multi-criteria optimization of model sequencing problem in assembly lines. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 61, 830-844.
17. Razali, M. M., Kamarudin, N. H., Rashid, M. F. F. A., & Rose, A. N. M. (2019). Recent trend in mixed-model assembly line balancing optimization using soft computing approaches. *Engineering Computations*, *36*(2), 622-645.
18. Ruppert T, Dorgo G, Abonyi J. (2020). Fuzzy activity time-based model predictive control of open-station assembly lines. Journal of Manufacturing Systems. 54, 12-23.
19. Scholl, A., & Becker, C. (2006). State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, *168*(3), 666-693.
20. Yadav A, Verma P, Agrawal S. (2020). Mixed model two sided assembly line balancing problem: an exact solution approach. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 1-14.
21. Zhang B, Xu L, Zhang J. (2020). A multi-objective cellular genetic algorithm for energy-oriented balancing and sequencing problem of mixed-model assembly line. *Journal of Cleaner Production*. 244:118845.
22. Zhang J-H, Li A-P, Liu X-M. (2019). Hybrid genetic algorithm for a type-II robust mixed-model assembly line balancing problem with interval task times. *Advances in Manufacturing*. 7(2):117-32.

استناد به این مقاله: تنهایی، فهیمه. (۱۴۰۲). مدیریت تقاضای مشتری در تخصیص بهینه فعالیت‌های کاری به ایستگاه‌ها با توجه به سفارشات اولویت‌دار، *مطالعات مدیریت صنعتی*، *۲۱(۷۰)*، ۲۲۷-۲۶۰.

DOI: 10.22054/jims.2023.73390.2860

Industrial Management Studies is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.