

# رویکرد یکپارچه جهت تعیین اندازه تولید ترکیبی، بالانس خط مونتاژ دوطرفه و تخصیص اپراتورها با در نظر گرفتن گلوگاه‌های سیستم

پرویز فتاحی<sup>۱\*</sup>، پروانه سموئی<sup>۲</sup>، مصطفی زندیه<sup>۳</sup>

۱. دانشیار گروه مهندسی صنایع دانشکده مهندسی، دانشگاه الزهراء

۲. استادیار گروه مهندسی صنایع دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا

۳. دانشیار گروه مدیریت صنعتی دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه شهید بهشتی

(تاریخ دریافت: ۹۴/۱۱/۱۴، تاریخ دریافت اصلاح‌شده: ۹۵/۰۳/۱۰، تاریخ تصویب: ۹۵/۰۸/۱۵)

## چکیده

در این پژوهش، یک روش هیوریستیک یکپارچه برای تخصیص نیروی انسانی، بالانس خط مونتاژ دوطرفه و تعیین ترکیب تولید ارائه شده است. با استفاده از این روش، علاوه بر تخصیص مناسب فعالیت‌ها و نیروهای انسانی به ایستگاه‌ها، میزان تولید هر محصول به‌گونه‌ای مشخص می‌شود که علاوه بر داشتن یک خط بالانس شده با زمان سیکل حداقل، گلوگاه‌های سیستم نیز برطرف شود و خط روانی به‌دست آید. همچنین، در این مطالعه علاوه بر توسعه چند کران پایین برای زمان سیکل، دو قانون نیز برای تخصیص نیروهای انسانی با مهارت‌های مختلف به ایستگاه‌ها به کمک مثال‌های عددی با شرایط متعدد ارزیابی و تجزیه و تحلیل شده است. نتایج نشان‌دهنده کارایی و سرعت حل این الگوریتم است.

**واژه‌های کلیدی:** بالانس خطوط مونتاژ دوطرفه، تخصیص نیروی انسانی، تولید ترکیبی، تئوری محدودیت‌ها، روش هیوریستیک، مدل‌های ترکیبی.

## مقدمه

دسته‌بندی‌های مختلفی برای خطوط مونتاژ مشاهده می‌شود؛ برای مثال، برحسب نوع مدل‌های محصول، می‌توان خط را به مدل‌های تکی، ترکیبی و چندگانه تقسیم کرد. در مدل‌های تکی، فقط یک نوع محصول مونتاژ می‌شود، درحالی‌که در مدل‌های ترکیبی، مدل‌های مختلفی از یک نوع محصول و در مدل‌های چندگانه نیز چندین نوع محصول در دسته‌های مختلف تولید می‌شوند. در این بین، خطوط مونتاژ مدل‌های ترکیبی به‌دلیل مزایایی مانند کاهش موجودی‌ها، تنوع نسبت به مدل‌های تکی و همچنین عدم برنامه‌ریزی برای تعیین اندازه دسته و هزینه‌های کمتر تجهیزات نسبت به مدل‌های چندگانه موجب شده است بسیاری از کارخانه‌ها از این خطوط مونتاژ استفاده کنند. همچنین، بر مبنای ویژگی‌های فنی، عملی و نیازهای عملیاتی محصول و همچنین سمت‌هایی از خط که قابل استفاده است، ساختار خط ممکن است یک‌طرفه یا دوطرفه باشد؛ برای مثال، برای محصولاتی با ابعاد بزرگ استفاده از طرفین خط به‌دلیل کاهش طول خط و همچنین

در بسیاری از صنایع و کارخانه‌ها قسمت مونتاژ یکی از عمده‌ترین بخش‌هاست که در آن قطعات مختلف روی یک محصول پایه قرار می‌گیرند و آماده استفاده برای بخش‌های بعدی یا مشتریان نهایی می‌شوند. در این بخش‌ها، عملیات ایستگاه‌ها با توجه به سطح فناوری کارخانه و همچنین نیازمندی‌های فنی و عملیاتی ممکن است به کمک ربات‌ها یا نیروهای انسانی صورت پذیرند.

از مهم‌ترین دغدغه‌های مدیران و مهندسان تولید برای بخش مونتاژ، نحوه تخصیص افراد به ایستگاه‌ها و همچنین تخصیص فعالیت‌ها به ایستگاه‌ها (بالانس) است. اولین پژوهش مرتبط با بالانس خطوط مونتاژ [۱] در سال ۱۹۵۵ ارائه شد. سپس این مسئله در پژوهش‌های مختلف توسعه یافت که خوانندگان محترم برای آشنایی با برخی از آن‌ها می‌توانند به تحقیقات مروری این حوزه [۲]، [۳] و [۴] مراجعه کنند.

هزینه‌های ابزارآلات، وسایل انتقال‌دهنده و... مناسب‌تر از خطوط یک‌طرفه است. یک دسته‌بندی برای بالانس خط مونتاژ براساس نوع تابع هدف صورت گرفته است؛ برای مثال، مسئله نوع ۱، حداقل‌سازی تعداد ایستگاه‌ها به‌ازای یک زمان سیکل معین است. درحالی‌که مسئله نوع ۲ به حداقل کردن زمان سیکل به‌ازای تعداد مشخصی ایستگاه توجه دارد.

بررسی‌ها نشان می‌دهند در بیشتر تحقیقات زمان پردازش فعالیت‌ها قطعی فرض شده‌اند و به سطح مهارت کارگران وابسته نیستند، درحالی‌که این پیش‌فرض زمانی صحیح است که یا عملیات به‌صورت خودکار و توسط ربات‌ها انجام گیرد یا اپراتورها در یک سطح باشند و هیچ نوسانی میان زمان انجام‌دادن عملیات توسط افراد مختلف وجود نداشته باشد. با توجه به شرایط دنیای واقعی، چنین پیش‌فرضی همواره صحیح نیست، به‌گونه‌ای که به‌وضوح دیده می‌شود فردی که مهارت بالاتری دارد، سریع‌تر و در زمان کوتاه‌تری می‌تواند عملیات را به اتمام رساند. همچنین، از آنجاکه ممکن است زمان عملیات به‌طور مستقیم بر زمان سیکل و نحوه تخصیص فعالیت‌ها به ایستگاه‌ها تأثیر بگذارد، باید در بالانس خطوط مونتاژ به این موضوع نیز توجه کرد و اپراتورها را به‌گونه‌ای به ایستگاه‌ها تخصیص داد تا در بهترین و مفیدترین موقعیت خود قرار گیرند؛ بنابراین، در چندین پژوهش تخصیص نیروی انسانی در مسائل بالانس خطوط مونتاژ ساده بررسی شده است؛ برای مثال، منصور (۱۹۶۸) یک الگوریتم ابتکاری را برای بالانس خطوط مونتاژ در هنگام متفاوت بودن قابلیت‌های اپراتورها ارائه داد. میرالس و همکاران [۵] با استفاده از نرم‌افزار CPLEX 9.0 مسئله تخصیص نیروی انسانی و بالانس خطوط مونتاژ یک‌طرفه مدل‌های تکی را حل کردند. همچنین، در پژوهش دیگری بلوم و میرالس [۶] از روش جست‌وجوی پرتو به‌منظور حداقل‌سازی زمان سیکل استفاده کردند. به‌علاوه، در پژوهش‌های زمان و همکاران [۷]، ژنگ و همکاران [۸] و موتلو و همکاران [۹] می‌توان روش‌هایی را بر مبنای الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله بالانس خط مونتاژ یک‌طرفه تک‌مدلی و تخصیص نیروی انسانی یافت. ویلا و پرییرا [۱۰] نیز یک الگوریتم شاخه و کران با حافظه برای بالانس یک‌طرفه و تک‌مدلی و تخصیص اپراتورها توسعه دادند.

براساس مطالعات، تاکنون پژوهشی در زمینه بررسی بالانس خطوط مونتاژ دوطرفه و تخصیص نیروی انسانی برای مدل‌های تکی و ترکیبی صورت نگرفته است. همچنین، در پژوهش‌های اندکی [۱۱] گلوگاه و بالانس خط مونتاژ بررسی شده است، درحالی‌که وجود گلوگاه می‌تواند در اغلب موارد علاوه بر هدررفت منابع و سرمایه، باعث عدم تأمین تقاضای محصولات نیز گردد. در نتیجه، در پژوهش پیش رو علاوه بر بررسی هم‌زمان بالانس خطوط مونتاژ دوطرفه، تجزیه و تحلیل گلوگاه و تعیین ترکیب تولید صورت می‌گیرد. به‌علاوه، دو کران پایین برای زمان سیکل و یک الگوریتم جدید سیکلی-سلسله‌مراتبی با چند قانون مختلف برای تخصیص فعالیت‌ها و نیروی انسانی و همچنین تئوری محدودیت‌ها برای حل مسئله ارائه می‌شود. در ادامه، به تعریف مسئله، مفروضات و مدل ریاضی اشاره می‌شود. سپس الگوریتم پیشنهادی مطرح می‌شود. همچنین، مثال‌های عددی مختلف و تجزیه و تحلیل الگوریتم ارائه می‌شود. در نهایت به نتایج و رویکردهایی برای تحقیقات آتی اشاره می‌شود.

### تعریف مسئله

خطوط مونتاژ دوطرفه مدل‌های ترکیبی اغلب در کارخانه‌هایی مشاهده می‌شوند که ضمن تنوع در مدل‌های محصول مونتاژشده، ابعاد محصولات نیز بزرگ باشند. علاوه‌براین، در بسیاری از این خطوط نقش اپراتورها و مهارتشان به‌وضوح مشاهده می‌شود، به‌گونه‌ای که یک اپراتور با مهارت بالا می‌تواند همان عملیات را سریع‌تر از یک اپراتور نیمه‌ماهر یا مبتدی انجام دهد. در نتیجه، چنین موضوعی مدیریت را بر آن می‌دارد که درصد تخصیص مناسب و به‌جای نیروهای انسانی خود برآید تا ضمن داشتن یک خط مونتاژ بالانس‌شده، بهترین کارایی را از اپراتورها به‌منظور جلوگیری از هدررفت زمان، سرمایه و انرژی به‌دست آورد. با این حال، در کنار تخصیص درست اپراتورها و فعالیت‌ها به ایستگاه‌ها، باید به گلوگاه‌های سیستم نیز توجه داشت تا علاوه بر داشتن یک خط روان، از انباشته‌شدن محصولات نیمه‌ساخته در خط جلوگیری شود؛ بنابراین، در پژوهش پیش رو این مسئله بررسی شده و

تعداد کل ایستگاه‌ها یا اپراتورها	$NS$	راهکاری برای حل مسئله بر مبنای مفروضات زیر ارائه شده است.
تعداد مدل‌ها	$M$	
تعداد کل مهارت‌ها (مهارت بالا، متوسط و کم)	$L$	۱. مدل‌های مختلفی از یک محصول با روابط
تعداد مهارت $l$ ( $\sum_{i=1}^L O_i = NS$ )	$O_l$	پیش‌نیازی مشخص روی یک خط دوطرفه مونتاژ می‌شوند.
تعداد فعالیت‌ها	$n$	۲. هر کار باید یک‌بار و فقط در یک ایستگاه انجام
مجموعه فعالیت‌هایی که باید در سمت چپ خط	$S_L$	گیرد. علاوه بر این، امکان انجام دادن چند کار توسط یک
مونتاژ انجام گیرند.		اپراتور در یک لحظه از زمان امکان‌پذیر نیست.
مجموعه فعالیت‌هایی که باید در سمت راست	$S_R$	۳. اپراتورهایی با مهارت‌های مختلف وجود دارند و
خط مونتاژ انجام گیرند.		زمان‌های عملیات به سطح مهارت اپراتور وابسته است.
مجموعه فعالیت‌هایی که در سمت چپ یا راست	$S_E$	۴. هر اپراتور به یک ایستگاه تخصیص می‌یابد و هر
خط مونتاژ انجام می‌گیرند.		ایستگاه نیز فقط یک اپراتور دارد.
مجموعه پیش‌نیازهای بلافاصله فعالیت $i$	$P(i)$	۵. حداکثر تقاضای پیش‌بینی شده سود محصولات و
مجموعه تمام پیش‌نیازهای فعالیت $i$	$P_a(i)$	تقاضای هر ایستگاه مشخص است.
مجموعه پس‌نیازهای بلافاصله فعالیت $i$	$S(i)$	۶. حداکثر تعداد ایستگاه‌ها (اپراتورها) مشخص هستند.
مجموعه تمام پس‌نیازهای فعالیت $i$	$S_a(i)$	
مجموعه فعالیت‌های بدون پیش‌نیاز	$P_0$	
یک عدد مثبت خیلی بزرگ	$\Psi$	
مجموعه فعالیت‌هایی که جهت عملیاتشان خلاف	$N(i)$	
جهت فعالیت $i$ است		
<b>مدل ریاضی</b>		
در این پژوهش، یک مدل برنامه ریاضی دوسطحی برای		
بالانس خطوط مونتاژ دوطرفه نوع ۲ (حداقل سازی زمان		
سیکل)، تخصیص نیروی انسانی و ترکیب تولید توسعه داده		
شده است. این مدل بر پایه مدل ازکان و توکلو [۱۲] است.		
مدل آن‌ها مدلی تک‌سطحی و چندهدفه است که		
حداقل سازی تعداد ایستگاه‌های زوجی و فردی را بررسی		
می‌کند و هیچ توجهی به حداقل سازی زمان سیکل،		
تخصیص‌های نیروی انسانی، گلوگاه‌های سیستم و تعیین		
تولید ترکیبی ندارد؛ بنابراین، مدل ریاضی ارائه شده در این		
پژوهش با پارامترها و متغیرهای زیر این موارد را دربردارد.		
اندیس‌ها	$C$	
$i, h, p$ فعالیت	$t_{iml}$	زمان تکمیل فعالیت $i$ برای مدل $m$ و مهارت $l$
$j, g$ ایستگاه زوجی	$z_{ip}$	متغیر صفر و یک، ۱ اگر فعالیت $i$ قبل از $p$ در
$l, q$ مهارت	$x_{ijkl}$	همان ایستگاه انجام گیرد، در غیر این صورت ۰
مدل محصول		متغیر صفر و یک، ۱ اگر فعالیت $i$ به ایستگاه
$k$ سمت خط مونتاژ (۱: سمت چپ، ۲: سمت		زوجی $j$ و در سمت $k$ و با مهارت $l$ تخصیص یابد،
راست)	$t_{iml}$	در غیر این صورت ۰
پارامترها و متغیرها	$y_{jkl}$	زمان فعالیت $i$ برای مدل $m$ و مهارت $l$
$I$ مجموعه فعالیت‌ها در دیگرام روابط پیش‌نیازی		متغیر صفر و یک، ۱ اگر اپراتوری با سطح مهارت
ترکیب شده	$Pr_m$	$l$ به ایستگاه زوجی $j$ و در سمت $k$ تخصیص یابد،
$NM$ تعداد ایستگاه‌های زوجی	$Q_m$	در غیر این صورت ۰
		سود محصول نوع $m$
		تعداد تولید محصول $m$

$$1, \dots, n; p \in \left\{ r \left| r \in I - (P_a(i) \cup S_a(i) \cup N(i)) \right. \right. \\ \left. \left. \text{and } i < r \right. \right\} \quad (17)$$

$$y_{jkl} \in \{0,1\} \quad \forall j = 1, \dots, NM; \quad k = 1,2, \quad l = 1, \dots, L \quad (18)$$

در این مدل عبارت ۱ نشان‌دهندهٔ ماکزیمم سود حاصل از فروش محصولات است. نامعادلات ۲ و ۳ نیز بیان می‌کنند تعداد تولید از هر محصول باید حداکثر برابر با تقاضای پیش‌بینی‌شده برای محصول باشد و همچنین زمان صرف‌شده در هر ایستگاه نباید از ظرفیت آن ایستگاه تجاوز کند. رابطهٔ ۴ نیز نشان می‌دهد متغیر  $Q_m$  در دامنهٔ اعداد صحیح مثبت قرار می‌گیرد. تابع هدف ۵ حداقل‌سازی زمان سیکل را نشان می‌دهد. محدودیت ۶ نیز بیان می‌کند هر فعالیت می‌تواند فقط به یک سمت از ایستگاه زوجی که دارای اپراتوری برای انجام عملیات است، تخصیص یابد. عبارت ۷ تضمین می‌کند دقیقاً  $O_l$  اپراتور با سطح  $l$  برای تخصیص در ایستگاه‌ها وجود دارد. محدودیت ۸ نیز نشان می‌دهد هر ایستگاه می‌تواند فقط یک اپراتور داشته باشد. رابطهٔ ۹ نیز روابط پیش‌نیازی میان فعالیت‌های مختلف را تضمین می‌کند. عبارت ۱۰ نیز نشان می‌دهد تخصیص فعالیت‌ها به ایستگاه‌ها به تخصیص اپراتورها وابسته است. محدودیت‌های ۱۱ و ۱۲ نیز تشریح می‌کند که زمان تکمیل عملیات بین مدت انجام‌دادن عملیات و زمان سیکل است. رابطهٔ ۱۳ نیز برای دو فعالیت  $i$  و  $h$  به‌کار می‌رود که فعالیت  $i$  پس‌نیاز بلافاصلهٔ فعالیت  $h$  است و این دو فعالیت نیز در یک ایستگاه زوجی انجام می‌گیرند، درحالی‌که اگر هیچ رابطهٔ پیش‌نیازی میان این فعالیت‌ها برقرار نباشد، محدودیت‌های ۱۴ یا ۱۵ فعال می‌شوند، به‌طوری‌که اگر فعالیت  $i$  قبل از  $p$  تخصیص یابد، محدودیت ۱۴ و در غیر این صورت محدودیت ۱۵ برقرار می‌شود. روابط ۱۶ تا ۱۸ نیز بیانگر متغیرهای صفر و یک مدل هستند.

### الگوریتم حل

در این بخش، علاوه‌بر ارائهٔ الگوریتم هیوریستیک پیشنهادی، کران‌های پایینی برای زمان سیکل ارائه شده است که از آن‌ها در الگوریتم نیز استفاده می‌شود.

$D_m$  تقاضای محصول  $m$   
 $cap_{jkl}$  ظرفیت ایستگاه زوجی  $j$  در سمت  $k$  و با مهارت  $l$

$$Max \sum_{m=1}^M Pr_m Q_m \quad (1)$$

S.to:

$$Q_m \leq D_m \quad (2)$$

$$\sum_{j \in I} \sum_{k \in K(i)} x_{ijkl} \cdot t_{iml} \cdot Q_m \leq cap_{jkl} \quad \forall m = 1, \dots, M; \quad l = 1, \dots, L \quad (3)$$

$$Q_m \geq 0 \text{ \& integer} \quad (4)$$

$$Min C \quad (5)$$

S.to:

$$\sum_{k \in K(i)} \sum_{j=1}^{NM} \sum_{l=1}^L x_{ijkl} = 1 \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^{NM} \sum_{k=1}^2 y_{jkl} = O_l \quad \forall l = 1, \dots, L \quad (7)$$

$$\sum_{l=1}^L y_{jkl} = 1 \quad \forall j = 1, \dots, NM, k \in \{1,2\} \quad (8)$$

$$\sum_{k \in K(h)} \sum_{g=1}^{NM} \sum_{l=1}^L g \cdot x_{hgkl} - \sum_{k \in K(i)} \sum_{j=1}^{NM} \sum_{q=1}^L j \cdot x_{ijkq} \leq 0 \quad \forall i \in I - P_0, h \in P(i) \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ijkl} \leq \psi y_{jkl} \quad \forall j = 1, \dots, NM; \quad l = 1, \dots, L; \quad k \in K(i) \quad (10)$$

$$t_{iml}^f \leq C \quad \forall i = 1, \dots, n; \quad m = 1, \dots, M; \quad l = 1, \dots, L \quad (11)$$

$$t_{iml}^f \geq t_{iml} \quad \forall i = 1, \dots, n; \quad m = 1, \dots, M; \quad l = 1, \dots, L \quad (12)$$

$$t_{imq}^f - t_{hml}^f + \psi(1 - \sum_{k \in K(h)} x_{hjkl}) + \psi(1 - \sum_{k \in K(i)} x_{ijkq}) \geq t_{imq}, \quad \forall i \in I - P_0; \quad h \in P(i); \quad j = 1, \dots, NM; \quad m = 1, \dots, M; \quad l = 1, \dots, L; \quad q = 1, \dots, L \quad (13)$$

$$t_{pml}^f - t_{imq}^f + \psi(1 - x_{pjkl}) + \psi(1 - x_{ijkq}) + \psi(1 - z_{ip}) \geq t_{pml} \quad \forall i \in I, m = 1, \dots, M; \quad j = 1, \dots, NM; \quad k \in K(i) \cap K(p); \quad l = 1, \dots, L; \quad p \in \left\{ r \left| r \in I - (P_a(i) \cup S_a(i) \cup N(i)) \right. \right. \\ \left. \left. \text{and } i < r \right. \right\} \quad (14)$$

$$t_{iml}^f - t_{pml}^f + \psi(1 - x_{pjkl}) + \psi(1 - x_{ijkq}) + \psi \cdot z_{ip} \geq t_{imq} \quad \forall i \in I, m = 1, \dots, M; \quad j = 1, \dots, NM; \quad k \in K(i) \cap K(p); \quad l = 1, \dots, L; \quad p \in \left\{ r \left| r \in I - (P_a(i) \cup S_a(i) \cup N(i)) \right. \right. \\ \left. \left. \text{and } i < r \right. \right\} \quad (15)$$

$$x_{ijkl} \in \{0,1\} \quad \forall i = 1, \dots, n; \quad j = 1, \dots, NM; \quad l = 1, \dots, L; \quad k \in K(i) \quad (16)$$

$$z_{ip} \in \{0,1\} \quad \forall i =$$

$$\left\{ \frac{P}{\sum_m D_m} \right\} \quad \forall i = 1, \dots, n; \forall m = 1, \dots, M \quad (23)$$

در رابطه ۲۳، دوره افق برنامه‌ریزی،  $D_m$  تقاضای پیش‌بینی شده برای مدل‌های مختلف و  $t_{im1}$  زمان پردازش عملیات  $i$  برای مدل  $m$  با یک اپراتور ماهر است.

### ساختار الگوریتم پیشنهادی

در این قسمت، الگوریتم پیشنهادی برای حل مسئله هم‌زمان بالانس خطوط مونتاژ دوطرفه مدل‌های ترکیبی و تخصیص نیروی انسانی با در نظر گرفتن گلوگاه‌های سیستم ارائه می‌شود. در این الگوریتم که یک ساختار دو فازی سلسله‌مراتبی-سیکلی دارد، در فاز اول به بالانس خط مونتاژ و تخصیص نیروی انسانی به منظور حداقل‌سازی سیکل اشاره می‌شود و در فاز دوم که از نتایج فاز ۱ شروع به حل می‌کند، اندازه تولید ترکیبی و رفع گلوگاه‌ها تعیین می‌شود. اگر شرط توقف برقرار باشد، می‌توان پاسخ نهایی را ارائه داد، در غیر این صورت، با خروجی‌های حاصل از فاز ۲، مجدداً مسئله از فاز ۱ شروع به حل می‌شود. برای روند حل در فاز اول یک الگوریتم هیوریستیک اپراتور-ایستگاه گرا پیشنهاد می‌شود و در فاز دوم از تئوری محدودیت‌ها برای تعیین ترکیب تولید و رفع گلوگاه‌ها کمک گرفته می‌شود. ساختار کلی این الگوریتم در شکل ۱ مشاهده می‌شود.

### کران‌های پایین زمان سیکل

در این قسمت، دو کران پایین برای زمان سیکل خطوط مونتاژ دوطرفه مدل‌های ترکیبی توسعه داده شده‌اند.

#### • کران پایین ۱

این کران بر مبنای کران پایینی است که پورنومو و همکاران [۱۳] برای تولید مدل‌های تکی در خطوط مونتاژ دوطرفه ارائه شده است. این کران برای بالانس خطوط مونتاژ دوطرفه مدل‌های ترکیبی و تخصیص نیروی انسانی به شکل زیر توسعه داده شده است.

$$LC_{1left} = \sum_{i=1}^n \max_m \left\{ \frac{t_{im1}}{NS} \right\} \quad \forall i \in S_L \quad (19)$$

$$LC_{1right} = \sum_{i=1}^n \max_m \left\{ \frac{t_{im1}}{NS} \right\} \quad \forall i \in S_R \quad (20)$$

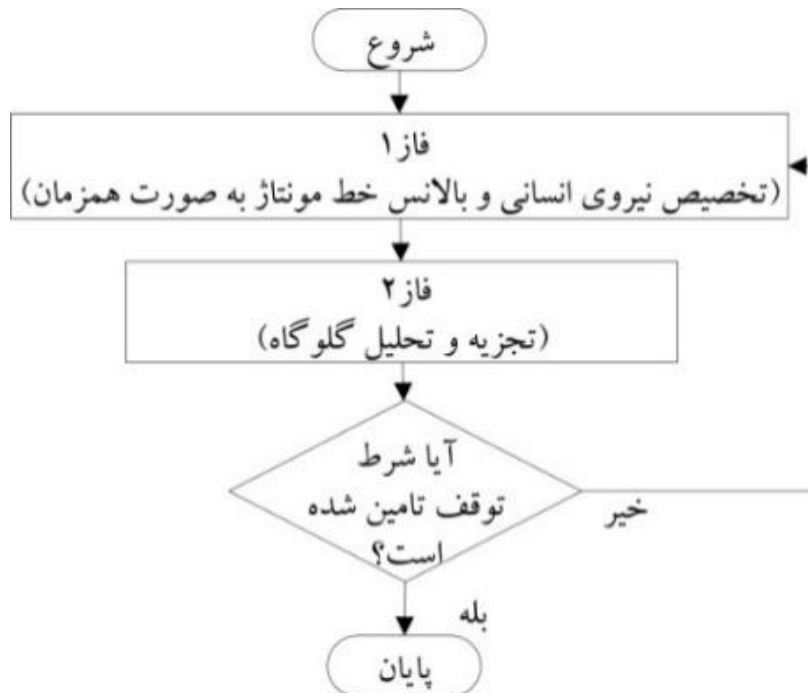
$$LC_{1either} = \sum_{i=1}^n \max_m \left\{ \frac{t_{im1}}{NS} \right\} \quad \forall i \in S_E \quad (21)$$

$$LC_1 = \left[ \max(LC_{1right}, LC_{1left}) + \max(0, LC_{1either} - \frac{LC_{1right} - LC_{1left}}{NS}) \right] \quad (22)$$

#### • کران پایین ۲

کران دیگری که در این پژوهش از آن استفاده شده است، ماکزیمم روابط زیر است. هر یک از عبارات زیر می‌تواند به‌عنوان یک کران پایین جداگانه برای زمان سیکل استفاده شود.

$$LC_2 = \left[ \max \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n \max_m \{t_{im1}\}}{NS}, \max_m \{t_{im1}\} \right\}, \right]$$



شکل ۱. ساختار کلی الگوریتم پیشنهادی

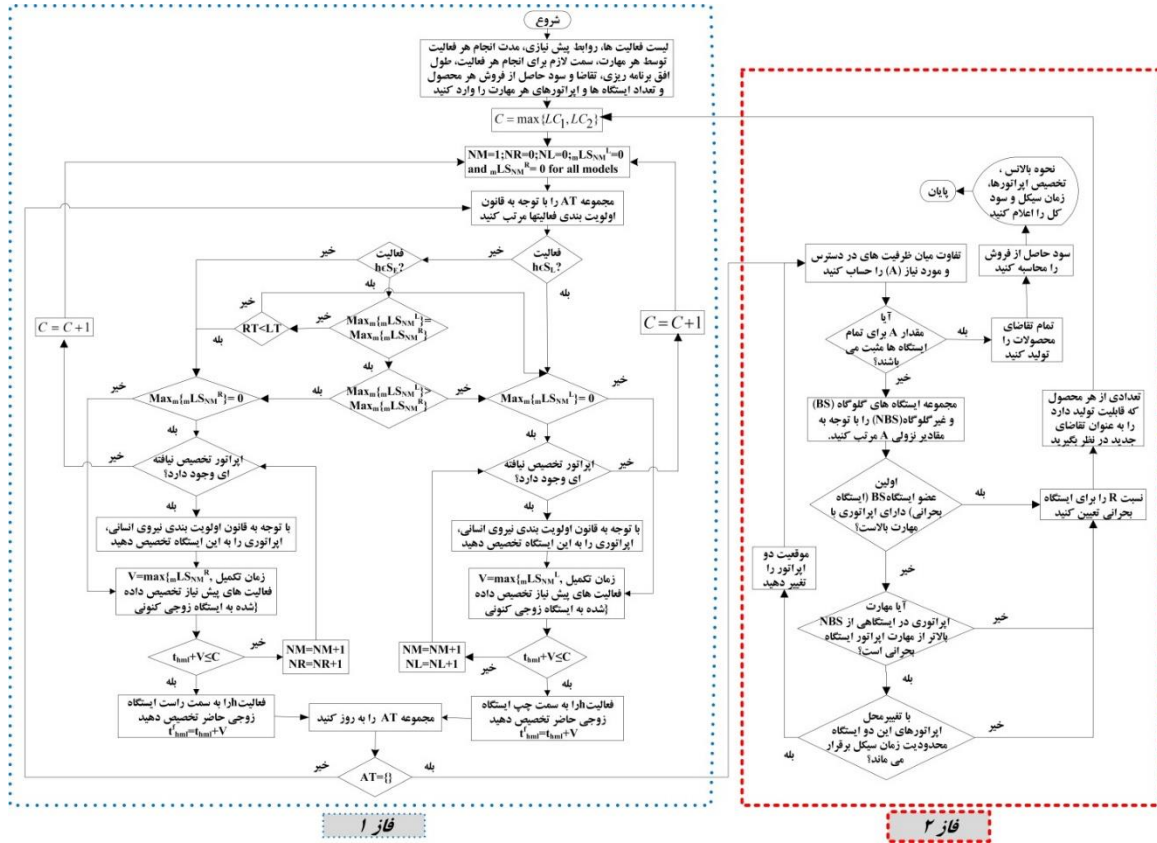
این روند ادامه می‌یابد تا تمام کارها تخصیص یابند. اگر در این بین متوجه شویم زمان سیکل آزمایشی نمی‌تواند حداکثر تعداد ایستگاه‌ها را حفظ کند، آن‌گاه زمان سیکل ۱ واحد افزایش می‌یابد و تخصیص مجدد فعالیت‌ها و اپراتورها انجام می‌گیرد.

در مرحله بعد، باید تجزیه و تحلیل گلوگاه انجام گیرد تا اگر ممکن باشد با تغییر جایگاه اپراتورهای موجود گلوگاه را برطرف کرد و اگر چنین چیزی ممکن نیست با تغییر در میزان تولید پیش‌بینی شده (تعیین تولید ترکیبی) این مشکل را رفع کرد. در این فاز از تئوری محدودیت‌ها استفاده می‌شود، اما از آنجاکه تغییر در تعداد تولید بر زمان سیکل اثر می‌گذارد، باید این موضوع بررسی شود که آیا نیاز به بالانس و تخصیص مجدد اپراتورها وجود دارد یا خیر؟ در کل، شرایط توقف الگوریتم به شرح زیر است:

۱. گلوگاهی در سیستم وجود نداشته باشد؛
۲. زمان سیکل نسبت به مرحله قبل خود تغییر نکرده باشد.

فلوچارت این الگوریتم در شکل ۲ آورده می‌شود:

در این الگوریتم، ابتدا با بازکردن یک ایستگاه و با توجه به سمت فعالیتی که در اولویت تخصیص قرار دارد، اپراتوری به آن ایستگاه تخصیص می‌یابد. برای اولویت‌دهی فعالیت‌ها، ابتدا تعداد روابط پس‌نیازهای بلافاصله، سپس کمترین زمان اجرا و درنهایت کمترین زمان متوسط انجام‌دادن کارها برای تخصیص استفاده شده‌اند، به‌گونه‌ای که اگر دو فعالیت تعداد پس‌نیازهای بلافاصله یکسان داشتند، کمترین زمان انجام کارشان و پس از آن کمترین زمان متوسطشان مبنای قرار می‌گیرد. برای اپراتورها نیز دو قانون تخصیص جداگانه استفاده شده‌اند. تخصیص اولویت را به کسانی می‌دهد که مهارت بالاتری دارند و در تخصیص ۲ اولویت با افراد با سطح مهارت پایین است. باید تا حد امکان به ایستگاه زوجی حاضر فعالیت‌هایی تخصیص یابند (این کار موجب کوتاه‌تر شدن طول خط می‌شود). به‌این‌منظور، باید به حداکثر تعداد ایستگاه‌های مجاز و همچنین زمان سیکل آزمایشی که در ابتدا برابر با ماکزیمم کران‌های پایین توسعه داده شده است، توجه کرد. پس از تکمیل شدن بارگذاری، ایستگاه زوجی جدیدی باز می‌شود و

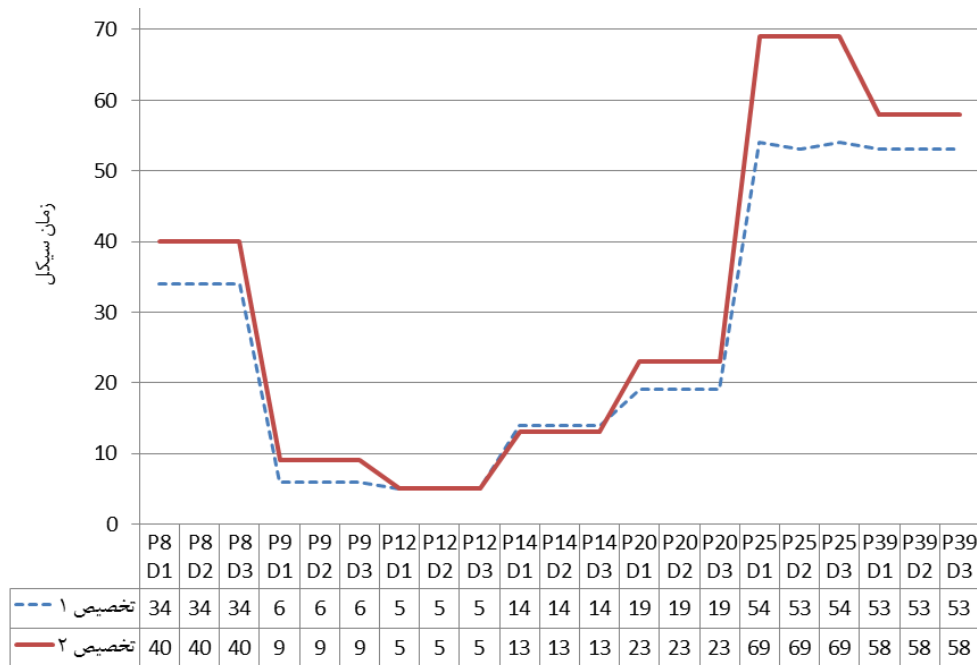


شکل ۲. فلوچارت الگوریتم پیشنهادی



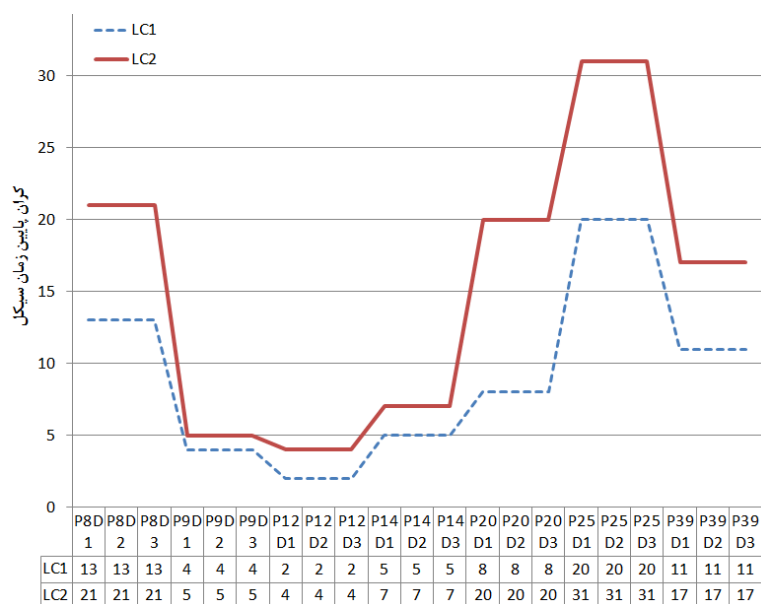
جدول ۲. نتایج الگوریتم با دو قانون مختلف تخصیص اپراتورها

	TP(1)	TP(2)	NM(1)	NM(2)	NS(1)	NS(2)	زمان حل (۱)	زمان حل (۲)	درصد گلوگاه (۱)	درصد گلوگاه (۲)	مقدار تولید (۱)	مقدار تولید (۲)
P8D1	۵۲۲۰	۵۲۲۰	۲	۲	۳	۳	۰/۷۳	۰/۶۷	۵۰	۶۶	(۵۸, ۰)	(۵۸, ۰)
P8D2	۵۲۲۰	۵۲۲۰	۲	۲	۳	۳	۰/۶۸	۰/۰۳	۵۰	۶۶	(۵۸, ۰)	(۵۸, ۰)
P8D3	۳۶۵۰	۳۶۵۰	۲	۲	۳	۳	۰/۶۳	۰/۶۸	۲۵	۶۶	(۳۰, ۱۹)	(۳۰, ۱۹)
P9D1	۱۰۰۰۰	۷۹۴۰	۲	۲	۳	۴	۰/۶۳	۰/۰۱	۲۵	۵۰	(۱۰۰, ۲۰)	(۶۶, ۴۰)
P9D2	۷۶۰۰	۴۷۰۰	۲	۲	۳	۴	۰/۵۴	۰/۵۸	۲۵	۵۰	(۴۰, ۸۰)	(۴۰, ۲۲)
P9D3	۸۸۰۰	۵۴۰۰	۲	۲	۳	۴	۰/۰۱	۰/۰۱	۲۵	۵۰	(۷۰, ۵۰)	(۶۰, ۰)
P12D1	۹۶۰۰	۸۴۰۰	۲	۳	۴	۵	۰/۵۴	۰/۵۸	۵۰	۶۰	(۹۰, ۳۰)	(۹۰, ۶)
P12D2	۷۸۰۰	۶۶۰۰	۲	۳	۴	۵	۰/۵۹	۰/۵۸	۲۵	۴۰	(۴۵, ۷۵)	(۴۵, ۵۱)
P12D3	۸۶۰۰	۷۴۰۰	۲	۳	۴	۵	۰/۷۶	۰/۷۷	۲۵	۴۰	(۶۵, ۵۵)	(۶۵, ۳۱)
P14D1	۲۸۷۰	۲۵۵۰	۳	۳	۵	۵	۰/۶۱	۰/۰۲	۸۰	۸۰	(۴۱, ۰)	(۲۰, ۲۳)
P14D2	۲۶۰۰	۳۳۰۰	۳	۳	۵	۵	۰/۰۲	۰/۵۵	۸۰	۸۰	(۳۰, ۱۰)	(۳۰, ۲۴)
P14D3	۲۸۷۰	۲۷۰۰	۳	۳	۵	۵	۰/۶۱	۰/۸۳	۸۰	۸۰	(۴۱, ۰)	(۱۰, ۴۰)
P20D1	۵۴۰۰	۳۸۷۰	۴	۳	۷	۶	۰/۵۶	۰/۶۷	۷۱	۸۳	(۶۰, ۰)	(۴۳, ۰)
P20D2	۴۴۰۰	۳۸۵۰	۴	۳	۷	۶	۰/۷۴	۰/۵۸	۷۱	۶۷	(۳۰, ۳۴)	(۳۰, ۲۳)
P20D3	۵۰۵۰	۴۶۵۰	۴	۳	۷	۶	۰/۵۹	۰/۶۰	۷۱	۶۷	(۵۰, ۱۱)	(۵۰, ۳)
P25D1	۱۲۶۰	۱۱۹۰	۳	۳	۶	۶	۰/۰۹	۰/۵۹	۸۳	۶۷	(۱۸, ۰)	(۱۷, ۰)
P25D2	۱۲۰۰	۱۱۰۰	۳	۳	۶	۶	۰/۵۴	۰/۶۱	۸۳	۶۷	(۱۰, ۱۰)	(۰, ۲۲)
P25D3	۱۲۶۰	۱۱۹۰	۳	۳	۶	۶	۰/۵۴	۰/۶۲	۸۳	۶۷	(۱۸, ۰)	(۱۷, ۰)
P39D1	۱۴۰۰	۱۶۱۰	۳	۳	۶	۶	۰/۶۵	۰/۶۱	۶۷	۶۷	(۲۰, ۰)	(۲۳, ۰)
P39D2	۱۴۰۰	۱۶۱۰	۳	۳	۶	۶	۰/۱۸	۰/۲۰	۶۷	۶۷	(۲۰, ۰)	(۲۳, ۰)
P39D3	۱۴۰۰	۱۶۱۰	۳	۳	۶	۶	۰/۶۲	۰/۸۸	۶۷	۶۷	(۲۰, ۰)	(۲۳, ۰)



شکل ۳. ارزیابی زمان‌های سیکل حاصل از دو روش





شکل ۴. ارزیابی کران‌های پایین ارائه‌شده زمان‌های سیکل

سلسله‌مراتبی-سیکلی پیشنهاد شده است که ضمن تخصیص فعالیت‌ها و اپراتورها به آنالیز گلوگاه‌ها نیز می‌پردازد. برای بررسی الگوریتم مثال‌های عددی مختلف به همراه دو قاعده تخصیص اپراتور ارزیابی شده است. نتایج نشان می‌دهد در اکثر موارد با فرض ثابت بودن بقیه عوامل قاعده ۱ بهتر جواب می‌دهد. این الگوریتم می‌تواند برای حل سایزهای بزرگ مسئله توسط الگوریتم‌های فرا ابتکاری به عنوان یک جواب شروع خوب به حساب آید. علاوه بر این، استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در انتخاب قواعد تخصیص فعالیت‌ها و همچنین اپراتورها برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود.

در این شکل به وضوح دیده می‌شود که کران پایین ۲ بهتر از کران پایین ۱ عمل می‌کند.

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش، علاوه بر توسعه دو کران پایین برای زمان سیکل، رویکردی یکپارچه برای بالانس خطوط مونتاژ دوطرفه مدل‌های ترکیبی، تخصیص اپراتورها و تعیین ترکیب تولید ارائه شده است. در این مطالعه، زمان عملیات وابسته به سطح مهارت اپراتورهاست و حداکثر تعداد ایستگاه‌ها و اپراتورها معین هستند. بدین منظور، علاوه بر ارائه یک مدل ریاضی، یک الگوریتم هیوریستیک

## مراجع

- Salveson, M. E. (1955). "The assembly line balancing problem", *Journal of Industrial Engineering*, Vol. 6, No. 3, PP. 18–25.
- Amen, M. (2000). "Heuristic methods for cost-oriented assembly line balancing: A survey", *International Journal of Production Economics*, Vol. 68, No. 1, PP. 1-14.
- Becker, C. and Scholl, A. (2006). "A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing", *European Journal of Operational Research*, Vol. 168, No. 3, PP. 694–715.
- Battaia, O. and Dolgui, A. (2013). "A taxonomy of line balancing problems and their solution approaches", *International Journal of Production Economics*, Vol. 142, No. 2, PP. 259–277.
- Miralles, C., Garía-Sabater, J. P., Andrés, C. and 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*, Vol. 156, No. 3, PP. 352- 367.
6. Blum, C. and Miralles, C., (2011). "On solving the assembly line worker assignment and balancing problem via beam search", *Computers & Operations Research*, Vol. 38, No. 1, PP. 328– 339.
  7. Zaman, T., Paul, S. K. and Azeem, A. (2012). "Sustainable operator assignment in an assembly line using genetic algorithm", *International Journal of Production Research*, Vol. 50, No. 18, PP. 5077– 5084.
  8. Zhang, W., Gen, M. and Lin, L. (2008). "A Multi-objective genetic algorithm for assembly line balancing problem with worker allocation", *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*.
  9. Mutlu, Ö., Polat, O. and Supciller, A. A. (2013). "An iterative genetic algorithm for the assembly line worker assignment and balancing problem of type-II", *Computers & Operations Research*, Vol. 40, No. 1, PP. 418– 426.
  10. Vilà, M. and Pereira, J. (2014). "A branch-and-bound algorithm for assembly line worker assignment and balancing problems", *Computers & Operations Research*, Vol. 44, PP. 105– 114.
  11. Pastor, R. (2011). "LB-ALBP: The lexicographic bottleneck assembly line balancing problem", *International Journal of Production Research*, Vol. 49, No. 8, PP. 2425- 2442.
  12. Özcan, U. and Toklu, B., (2009). "Balancing of mixed-model two-sided assembly lines", *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 57, No. 1, PP. 217– 227.
  13. Purnomo, H. D., Wee, H. M. and Rau, H., (2013). "Two-sided assembly lines balancing with assignment restrictions", *Mathematical and Computer Modelling*, Vol. 57, No. 1-2, PP. 189– 199.
-