

## **A Multi-objective Simulated Annealing for Simultaneous Two-Sided Assembly Line Balancing and Operators Assignment**

**Parviz Fattahi<sup>1\*</sup>, Parvaneh Samouei<sup>2</sup>, Mostafa Zandiyeh<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Associate Professor, Dept. of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

<sup>2</sup> Assistant Professor, Dept. of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

<sup>3</sup> Associate Professor, Faculty of Management and Accounting, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

### **Abstract:**

This paper presents a multi-objective simulated annealing algorithm for mixed-model two-sided assembly line balancing with multi skilled operators. The objectives of the proposed model are minimizing the number of mated-stations, the number of total stations and total human cost for a given cycle time. Also, maximizing the weighted line efficiency and minimizing the weighted smoothness index are considered for the problem. An example is solved with the proposed approach in detail and the performance of this algorithm is tested on a set of test problems and changing neighborhood solution rules. The results show the proposed algorithm can be used as a good algorithm to solve the problem.

**Keywords:** Two-sided assembly line balancing; Multi-objective optimization; Multi skilled operators; Simulated Annealing (SA); Mixed-model

مدیریت تولید و عملیات، دوره ۸، پیاپی (۱۴)، شماره (۱)، بهار و تابستان ۱۳۹۶  
دریافت: ۱۳/۰۹/۱۳۹۲ پذیرش: ۲۲/۱۰/۱۳۹۵  
صص: ۲۰-۱

## الگوریتم انجاماد تدریجی چندهدفه جهت مسئله هم‌زمان بالانس خطوط مونتاژ دوطرفه و تخصیص نیروی انسانی

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

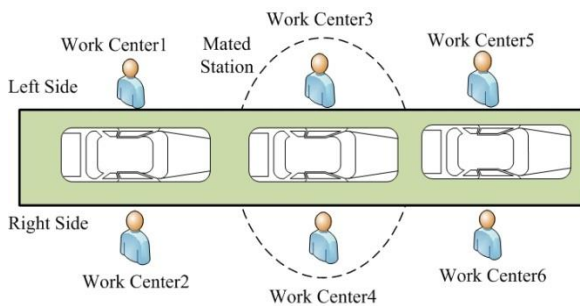
- ۱- دانشیار، گروه مهندسی صنایع - دانشکده مهندسی - دانشگاه بوعلی سینا - همدان - ایران.
- ۲- استادیار، گروه مهندسی صنایع - دانشکده مهندسی - دانشگاه بوعلی سینا - همدان - ایران.
- ۳- دانشیار، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

**چکیده:** این مقاله به ارائه یک الگوریتم انجاماد تدریجی چندهدفه برای مسائل هم‌زمان بالانس خطوط مونتاژ دوطرفه مدل‌های ترکیبی و همچنین تخصیص نیروی انسانی با مهارت‌های مختلف می‌پردازد. اهداف مدل پیشنهادی حداقل‌سازی تعداد ایستگاه‌های زوجی و انفرادی همچنین حداقل‌کردن هزینه‌های کل نیروی انسانی به‌ازای یک زمان سیکل مشخص است. همچنین دو شاخص حداکثرسازی اثربخشی موزون خط و همچنین حداقل‌سازی شاخص هموارسازی مورد توجه قرار گرفته‌اند و یک مثال نیز با جزئیات کامل به‌کمک رویکرد پیشنهادی حل شده است؛ علاوه بر این، کارایی این الگوریتم به‌کمک مجموعه مثال‌های مختلف و همچنین قوانین جستجوی همسایگی متفاوتی ارزیابی شده است. نتایج نشان می‌دهد، این الگوریتم می‌تواند به‌منزله یک الگوریتم مناسب برای حل این دسته از مسائل استفاده شود.

**واژه‌های کلیدی:** بالانس خطوط مونتاژ دوطرفه، بهینه‌سازی چندهدفه، الگوریتم انجاماد تدریجی، مدل‌های ترکیبی.

## ۱- مقدمه

علاوه بر این، خطوط مونتاژ به دو دسته خطوط مونتاژ یک طرفه و دوطرفه نیز تقسیم می‌شوند. در خطوط مونتاژ یک طرفه تنها یک سمت (راست یا چپ) و در خطوط مونتاژ دوطرفه، دو سمت خط می‌تواند استفاده شود و عملیات بر یک محصول به‌طور هم‌زمان انجام گیرد. شکل ۱ نمونه‌ای از خطوط مونتاژ دوطرفه را نشان می‌دهد.



شکل ۱. یک خط مونتاژ دوطرفه

طراحی خطوط مونتاژ یک طرفه و یا دوطرفه به ویژگی‌های فنی، ساختاری و عملیاتی لازم برای مونتاژ محصول مورد نظر بستگی دارد؛ به‌طور مثال برای محصولات بزرگی نظیر خودرو، کامیون و واگن خطوط مونتاژ دوطرفه مناسب‌تر از خطوط یک طرفه هستند؛ زیرا استفاده از این خطوط باعث کاهش طول خط، کاهش زمان تحویل و همچنین کاهش هزینه‌های خرید تجهیزات، ابزارها و وسایل انتقال‌دهنده می‌شود. در خطوط مونتاژ دوطرفه، دو ایستگاه که روبه‌روی هم قرار گرفته‌اند و ایستگاه‌های زوجی نامیده می‌شوند (لی و همکاران<sup>۱</sup>(۲۰۰۱)) و دو اپراتور که هر یک در سمتی از این ایستگاه قرار گرفته‌اند، تجهیز شده‌اند. آنها به‌طور موازی عملیات متفاوتی را بر یک محصول انجام می‌دهند، بدون آنکه عملیات یکی تداخلی در عملیات فرد دیگر داشته باشد (چوتیما و چیمکلا<sup>۲</sup>(۲۰۱۲)). در مسائل بالانس خطوط مونتاژ دوطرفه، اغلب دو هدف عمده در نظر گرفته می‌شود که یکی

یکی از مهم‌ترین بخش‌هایی که در بسیاری از کارخانه‌ها مشاهده می‌شود، بخش مونتاژ است. خط مونتاژ، خطی است که در آن محصولات نیمه‌کامل، طی یک توالی از ایستگاه‌هایی که با یکدیگر به‌وسیله سیستم‌های انتقال مواد متصل شده‌اند، حرکت می‌کنند و در طی هر ایستگاه، عملیاتی جهت تکمیل محصول انجام می‌گیرد. از مهم‌ترین عواملی که در عملکرد خطوط مونتاژ مؤثرند، می‌توان به بالانس آنها اشاره کرد که در آن مشخص می‌شود فعالیت‌ها با توجه به روابط پیش‌نیازی که میانشان وجود دارد به چه شکل به ایستگاه‌ها تخصیص می‌یابند.

اولین مقاله علمی در مسئله بالانس خطوط مونتاژ در دهه ۱۹۵۰ میلادی منتشر شد؛ ولی پس از آن به دلیل رشد صنایع و همچنین اهمیت موضوع بالانس خطوط مونتاژ، مقالات و کتب مختلفی در این حوزه به چاپ رسید که هر یک اهداف، شرایط و محدودیت‌های متفاوتی را مد نظر قرار داده بودند. بایبارس<sup>۱</sup>(۱۹۸۴)، قوش و گانون<sup>۲</sup>(۱۹۸۹)، بویسن و همکاران<sup>۳</sup>(۱۹۸۶)، بکر و اسکول<sup>۴</sup>(۲۰۰۸، ۲۰۰۷) و باتایا و دولگوی<sup>۵</sup>(۲۰۱۳) مقالات مروری بسیار خوب و مفیدی در این حوزه منتشر کرده‌اند.

دسته‌بندی‌های مختلفی در زمینه بالانس خطوط مونتاژ مشاهده می‌شود؛ به‌طور مثال براساس تعداد مدل‌های مختلف محصول، این مسئله می‌تواند به مدل‌های تکی، ترکیبی و چندگانه تقسیم شوند. در مدل‌های تکی، تنها یک نوع محصول، در مدل‌های ترکیبی، مدل‌های مختلفی از یک نوع محصول و در مدل‌های چندگانه محصولات متنوعی در دسته‌هایی با اندازه‌های مختلف مونتاژ می‌شوند.

محدودیت‌های منطقه‌ای<sup>۱۶</sup> توسط الگوریتم کلونی زنبور عسل اقدام کردند.

جدول (۱): برخی روش‌های حل مسائل بالانس خطوط مونتاژ دوطرفه

مقاله	روش	رویکرد
Wu et al. (2008); Xiaofeng et al. (2010)	شاخه و کران	قطعی
Hu et al. (2008); Xiaofeng et al. (2008)	شمارش	
Bartholdi (1993)		ابتکاری
Özcan & Toklu(2009); Özcan(2010)	انجماد تدریجی (SA)	فرا ابتکاری
Kim et al. (2000); Kim et al. (2009); Taha et al. (2011); Purnomo et al. (2013)	الگوریتم ژنتیک (GA)	
Simaria & Vilarinho (2009); Baykasoglu& Dereli (2008)	کلونی مورچگان (ACO)	
Özcan et al. (2010)	جستجوی ممنوعه (TS)	
Chutima & Chimklai (2012)	بهینه‌سازی توده ذرات (PSO)	
Özbakir & Tapkan (2011); Tapkan et al. (2012)	کلونی زنبور عسل	

در بیشتر مقالاتی که در حوزه بالانس خطوط مونتاژ منتشر شده‌اند، فرض شده است که زمان انجام عملیات قطعی است و به مهارت اپراتور اصلاً وابسته نیست. این در حالی است که در دنیای واقعی عملاً مشاهده می‌شود که مهارت فرد کاملاً می‌تواند در مدت‌زمان انجام عملیات تأثیرگذار باشد؛ مثلاً فردی با مهارت بیشتر، در زمان کوتاه‌تری می‌تواند همان کار را نسبت به فردی با مهارت کم انجام دهد. علاوه بر این، تصمیم درست در به‌کارگیری افراد با مهارت‌های لازم برای

حداقل‌سازی تعداد ایستگاه‌های زوجی برای یک زمان سیکل مشخص (نوع ۱) و دیگری حداقل‌سازی زمان سیکل به‌ازای تعداد معینی ایستگاه زوجی است که به مسائل نوع دوم شهرت گرفته‌اند.

اولین مقاله‌ای که به بالانس خطوط مونتاژ دوطرفه پرداخت، متعلق به بارسولدی<sup>۱۷</sup> است که در سال ۱۹۹۳ منتشر شد.

براساس تعداد اهدافی که در مسئله بالانس خطوط مونتاژ دوطرفه مشاهده می‌شود، این مسائل می‌توانند در دو شاخه تک‌هدفه و چندهدفه تقسیم شوند. به‌طور مثال زیائوفنگ و همکاران<sup>۱۸</sup> (۲۰۱۰) و اُزبکر و تاپکان<sup>۱۹</sup> (۲۰۱۱) از یک هدف و سیماریا و ویلارینهو<sup>۲۰</sup> (۲۰۰۹) و اُزکان و توکلو<sup>۲۱</sup> (۲۰۰۹) از بیش از یک هدف در پژوهش‌های خود استفاده کرده‌اند.

با مرور مقالاتی که در حوزه بالانس خطوط مونتاژ انجام شده، مشاهده می‌شود که روش‌های دقیق، ابتکاری و فرا ابتکاری مختلفی برای بالانس خطوط مونتاژ یک‌طرفه انجام شده است؛ اما با این حال، توجه کمتری به خطوط مونتاژ دوطرفه شده است. دلیل آن نیز می‌تواند پیچیدگی بیشتری باشد که در ماهیت این دسته از مسائل وجود دارد؛ چرا که در این خطوط علاوه بر تخصیص کارها به ایستگاه‌ها توالی آنها نیز باید منظور شود (تاپکان و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۱۲)). جدول ۱ تعدادی از روش‌هایی را نشان می‌دهد که برای حل مسائل بالانس خطوط مونتاژ دوطرفه منتشر شده است. به‌طور مثال سیماریا و ویلارینهو<sup>۴</sup> (۲۰۰۹) به ارائه یک مدل ریاضی برای مسئله بالانس خطوط مونتاژ دوطرفه پرداختند و یک الگوریتم کلونی مورچگان نیز برای حل آن ارائه کردند. در سال ۲۰۱۱ نیز اُزبکر و تاپکان<sup>۱۵</sup> نیز به حل مسئله بالانس خطوط مونتاژ دوطرفه با

توکلو برای شرایط مسئله توسعه داده شود و نتایج برای مسائل مختلف ارزیابی گردد.

باقیمانده بخش‌های این مقاله به شرح زیر است:

بخش ۲ به ارائه مفروضات و الگوریتم پیشنهادی اشاره دارد. یک مثال با جزئیات حل کامل در بخش ۳ آورده شده است و در بخش ۴ مثال‌های متفاوتی جهت بررسی کارایی الگوریتم ذکر شده است. در نهایت در بخش ۵ نیز به بیان نتایج و همچنین پژوهش‌های آتی اشاره دارد.

## ۲- بیان مسئله

به دلیل شرایط رقابتی بازار، بسیاری از کارخانه‌ها تنها به تولید یک نوع محصول بسنده نمی‌کنند؛ بلکه سعی می‌کنند تنوعی در محصولات خود ایجاد کنند تا توانایی حفظ و گسترش بازار خود را داشته باشند. این تنوع باعث می‌شود که برنامه‌ریزی دقیق‌تری برای سیستم تعیین کرد که یکی از این برنامه‌ها به بالانس خطوط مونتاژ این نوع محصولات مربوط می‌شود؛ همچنین عوامل فنی، ساختاری و یا وجود محدودیت‌هایی نظیر کمبود فضا باعث می‌شود که کارخانه‌ها از خطوط مونتاژ دوطرفه استفاده کنند. استفاده از این خطوط اگرچه ممکن است برخی از مشکلات را حل کند، باعث می‌شود به دلیل مجبور شدن به رعایت سمت‌های لازم برای انجام عملیات و همچنین تقدم، تأخر و توالی عملیات، پیچیدگی بالانس این دسته از خطوط به شدت افزایش یابد. در این بین هرچه تعداد ایستگاه‌های زوجی و یا کل ایستگاه‌ها کمتر باشد، علاوه بر کوتاه‌تر شدن طول خط، سرمایه‌گذاری کمتر و بالانس ساده‌تری به دست می‌آید؛ بنابراین حداقل کردن تعداد ایستگاه‌ها برای این دسته از مسائل هم از نظر کاربردی و هم تئوریک مهم است. از سوی دیگر بسیاری از عملیات مونتاژ در

سیستم، این قابلیت را فراهم می‌سازد که بتوان در هزینه‌های نیروی انسانی نیز صرفه‌جویی کرد؛ بنابراین مهارت فرد هم از نظر عملیاتی و هم اقتصادی عاملی نیست که بتوان راحت از آن چشم‌پوشی کرد.

علاوه بر این، با توجه به طیف گسترده‌ای از صنایع خودرو و موارد مشابه که به تولید مدل‌های مختلفی از یک نوع محصول می‌پردازند، لزوم بررسی بالانس خطوط مونتاژ دوطرفه مدل‌های ترکیبی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ اما با این حال مقالات کمی نظیر آزکان و توکلو (۲۰۰۹) و چوتیما و چیمکلای<sup>۱۷</sup> (۲۰۱۲) هستند که به این موضوع پرداخته باشند. مقالات انگشت‌شماری نظیر ناکد و نیشیواکی<sup>۱۸</sup> (۲۰۰۸) و کرومیناس و همکاران<sup>۹</sup> (۲۰۰۸) هستند که به بررسی اثر مهارت کارگران در بالانس خطوط مونتاژ پرداخته‌اند. ناکد و نیشیواکی (۲۰۰۸) به توسعه الگوریتمی جهت حل خطوط تولید U شکل با مهارت‌های مختلف کارگران پرداخته‌اند. آنها فرض کردند که زمان عملیات و زمان حرکت اپراتورها قطعی است؛ اما برای اپراتورهای مختلف متفاوت است.

مرور پژوهش‌ها نشان می‌دهد که تاکنون هیچ مقاله‌ای به بررسی اثر وجود تفاوت در سطح مهارت کارگران در بالانس خطوط مونتاژ مدل‌های ترکیبی نپرداخته است؛ بنابراین در این مقاله سعی می‌شود به این موضوع پرداخته شود و اثر وابستگی مدت‌زمان عملیات به سطح مهارت کارگران در این نوع خطوط مطالعه شود. بدین منظور ۳ تابع هدف با حداقل کردن تعداد ایستگاه‌های زوجی، تعداد ایستگاه‌ها و همچنین هزینه‌های دستمزد با دو شاخص اثربخشی موزون خط و همچنین هموارسازی خط برای یک زمان سیکل معین لحاظ می‌شوند؛ علاوه بر این، سعی می‌شود یک الگوریتم انجماد تدریجی بر مبنای الگوریتم آزکان و

دوطرفه مدل‌های ترکیبی و تخصیص نیروی انسانی با استفاده از پارامترها، اندیس‌ها و متغیرهای زیر ارائه می‌شود (شایان ذکر است که در الگوریتم پیشنهادی نیز برخی از آنها استفاده شده‌اند):

#### اندیس‌ها:

فعالیت	i, h
ایستگاه زوجی	p, r
مدل‌های محصول	J, g
مهارت	m
ایستگاه زوجی j و سمت k (اگر k=1 باشد، سمت راست را نشان می‌دهد)	l, q
	(j, k)

#### پارامترها و متغیرها:

مجموعه ایستگاه‌های زوجی	J
مجموعه سطح مهارت‌ها (پایین، متوسط، بالا و...)	L
مجموعه فعالیت‌ها در دیاگرام روابط پیش‌نیازی ترکیبی	I
مجموعه مدل‌های محصول	M
مجموعه فعالیت‌هایی که باید در سمت چپ انجام گیرند. $A_L \subset I$	$A_L$
مجموعه فعالیت‌هایی که باید در سمت راست انجام گیرند. $A_R \subset I$	$A_R$
مجموعه فعالیت‌هایی که می‌توانند در سمت چپ و یا راست انجام گیرند. $A_E \subset I$	$A_E$
زمان عملیات فعالیت i برای مدل m توسط کارگری با مهارت l	$t_{iml}$
هزینه نیروی انسانی با سطح مهارت l	$HC_l$
زمان سیکل	C

کارخانه‌ها را کارگرانی انجام می‌دهند که از نظر سطح مهارت متفاوت‌اند. این سطح اختلاف اگر به درستی لحاظ شود، می‌تواند اختلاف در ساعات بیکاری و همچنین هزینه‌های نیروی انسانی را کاهش دهد. همچنین این موضوع، به‌طور مستقیم بر عملکرد بالانس اثرگذار است؛ چرا که تفاوت در سطح مهارت کارگران باعث می‌شود زمان‌های عملیات نیز متفاوت شوند؛ بنابراین در نظر گرفتن مسئله بالانس و تخصیص نیروی انسانی به‌طور هم‌زمان می‌تواند باعث افزایش کارایی و بهره‌وری سیستم شود. به همین منظور در مقاله حاضر به این موضوع با مفروضات زیر پرداخته شده است:

#### ۱-۲- مفروضات مسئله

- ۱- عملیات روی یک خط مونتاژ دوطرفه انجام می‌پذیرند.
- ۲- مدل‌های مختلفی از یک نوع محصول مونتاژ می‌شوند.
- ۳- برخی از عملیات نیازمند یک سمت مشخصی از خط مونتاژ هستند؛ در حالی که برخی دیگر می‌توانند در هر یک از طرفین انجام شوند.
- ۴- نمودار روابط پیش‌نیازی فعالیت‌ها مشخص هستند.
- ۵- کارگرانی با سطوح مهارتی متفاوت وجود دارند و زمان انجام عملیات نیز وابسته به سطح مهارت هر کارگر است.
- ۶- عملیات باید تنها یک بار انجام شوند.
- ۷- زمان تکمیل عملیات در مدل‌های مختلف می‌تواند متفاوت باشد.
- ۸- موجودی در جریان ساخت مجاز نیست.

#### ۲-۲- مدل ریاضی مسئله

در این بخش، با توجه به مفروضات فوق، مدل ریاضی چندهدفه برای مسئله هم‌زمان بالانس خطوط مونتاژ

مجموعهٔ پس‌نیازهای بلافاصله فعالیت $i$	$Sa(i)$	زمان تکمیل فعالیت $i$ برای مدل $m$	$t_{iml}^f$
مجموعهٔ فعالیت‌هایی که پیش‌نیاز ندارند.	$P_0$	توسط کارگری با مهارت 1	
یک عدد مثبت خیلی بزرگ	$\psi$	اگر فعالیت $i$ به ایستگاه $(j, k)$ با مهارت 1 تخصیص یابد، 1 و در غیر این صورت 0	$X_{ijkl}$
مجموعهٔ فعالیت‌هایی که جهت انجام عملیاتشان مخالف فعالیت $i$ است.	$C(i)$	تعداد کارگر با مهارت 1	$S_i$
مجموعهٔ جهت‌های لازم برای انجام فعالیت $i$	$C(i) = \begin{cases} A_L & \text{if } i \in A_R \\ A_R & \text{if } i \in A_L \\ \emptyset & \text{if } i \in A_E \end{cases}$	تعداد ایستگاه‌های زوجی	NM
		تعداد ایستگاه سمت چپ	NL
		تعداد ایستگاه سمت راست	NR
		تعداد کل ایستگاه‌ها	NS
متغیرها	$K(i) = \begin{cases} \{1\} & \text{if } i \in A_R \\ \{2\} & \text{if } i \in A_L \\ \{1,2\} & \text{if } i \in A_E \end{cases}$	مجموعهٔ فعالیت‌های قابل تخصیص	SAT
		میزان بار ایستگاه‌ها شامل بیکاری‌های غیرقابل اجتناب در سمت چپ ایستگاه	$mWL_{NM}^1$
		زوجی جاری برای تمام $m \in M$	
اگر ایستگاه زوجی ز استفاده شود 1 و در غیر این صورت 0	$F_j$	میزان بار ایستگاه‌ها شامل بیکاری‌های غیرقابل اجتناب در سمت راست ایستگاه زوجی جاری برای تمام $m \in M$	$mWL_{NM}^2$
اگر ایستگاه $(j, k)$ با اپراتوری با سطح مهارت 1 به بهره‌برداری برسد 1 و در غیر این صورت 0	$G_{jkl}$	مجموعهٔ فعالیت‌هایی که به سمت چپ ایستگاه زوجی حاضر تخصیص یافته است.	$TL_{NM}^1$
اگر فعالیت $i$ قبل از فعالیت $p$ و در همان ایستگاه انجام گیرد 1 و اگر فعالیت $p$ قبل از فعالیت $i$ و در همان ایستگاه انجام گیرد 0	$Z_{ip}$	مجموعهٔ فعالیت‌هایی که به سمت راست ایستگاه زوجی حاضر تخصیص یافته است.	$TL_{NM}^2$
$\text{Min } \sum_{j \in J} F_j$	(۱)		
$\text{Min } \sum_{j \in J} \sum_{k=1,2} \sum_{l \in L} G_{jkl}$	(۲)	مجموعهٔ پیش‌نیازهای بلافاصله فعالیت $i$	$P(i)$
$\text{Min } \sum_{j \in J} \sum_{k=1,2} \sum_{l \in L} HC_l \cdot G_{jkl} \quad \forall i \in I$	(۳)	مجموعهٔ تمام پیش‌نیازهای بلافاصله فعالیت $i$	$Pa(i)$
S.to:			
$\sum_{k \in K(i)} \sum_{j \in J} \sum_{l=1}^L X_{ijkl} = 1 \quad \forall i = 1, \dots, n$	(۴)		
$\sum_{k \in K(h)} \sum_{g \in J} \sum_{l=1}^L g \cdot X_{hgkl} - \sum_{k \in K(i)} \sum_{j \in J} \sum_{q=1}^L j \cdot X_{ijkq} \leq 0 \quad \forall i \in I - P_0, h \in P(i)$			(۵)
$t_{iml}^f \leq C \quad \forall i \in I, m \in M, l \in L$			(۶)
$t_{iml}^f \geq t_{iml} \quad \forall i \in I, m \in M, l \in L$			(۷)

$$t_{iml}^f - t_{hml}^f + \psi(1 - \sum_{k \in K(h)} x_{hijkl}) + \psi(1 - \sum_{k \in K(i)} x_{ijkl}) \geq t_{iml}, \forall i \in I - P_0, h \in P(i), j \in J, m \in M, l \in L \quad (8)$$

$$t_{iml}^f - t_{pml}^f + \psi \cdot (1 - x_{pjkl}) + \psi \cdot (1 - x_{ijkl}) + \psi \cdot z_{ip} \geq t_{iml} \quad \forall i \in I, m \in M, j \in J, k \in K(i) \cap k(p), l \in L \\ l \in \{r | r \in I - (P_a(i) \cup S_a(i) \cup C(i)) \text{ and } i < r\} \quad (9)$$

$$t_{pml}^f - t_{iml}^f + \psi \cdot (1 - x_{pjkl}) + \psi \cdot (1 - x_{ijkl}) + \psi \cdot (1 - z_{ip}) \geq t_{pml} \quad \forall i \in I, m \in M, k \in K(i) \cap k(p), l \in L \\ p \in \{r | r \in I - (P_a(i) \cup S_a(i) \cup C(i)) \text{ and } i < r\}, j \in J \quad (10)$$

در نهایت نیز محدودیت‌های (۱۴) تا (۱۷) نیز صفر و یک بودن متغیرها را بیان می‌کند.

$$\sum_{i \in I} x_{ijkl} \leq \psi G_{jkl} \quad \forall j \in J; l \in L; k \in K(i) \quad (11)$$

### ۳- الگوریتم پیشنهادی

$$\sum_{j \in J} \sum_{k=1,2} \sum_{l \in L} G_{jkl} \leq 2 \sum_{j \in J} F_j \quad (12)$$

قبل از آنکه به بیان الگوریتم پیشنهادی پرداخته شود، لازم است توضیح مختصری درباره الگوریتم انجماد تدریجی ارائه شود:

$$\sum_{l \in L} G_{jkl} \leq 1 \quad \forall j \in J, k = \{1,2\} \quad (13)$$

#### ۳-۱- الگوریتم انجماد تدریجی استاندارد

$$x_{ijkl} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K(i), l \in L \quad (14)$$

این الگوریتم بر مبنای جستجوی تصادفی فضای حل است که از ساختار انجماد فیزیکی مواد مذاب نشئت گرفته است. راه حل ابتدایی ایجاد شده در این مسئله در مرحله اول به‌عنوان راه حل جاری منظور می‌شود. پس از آن با پارامتر کنترلی دما، مقدار دما براساس یک ساختار سیستماتیک کاهش می‌یابد و در هر دما نیز تعداد دفعاتی الگوریتم با این شرایط اجرا می‌شوند که به آن طول زنجیره مارکوف گفته می‌شود. در هر مرحله نیز، با کاهش دما همسایه راه حل جاری در نظر گرفته می‌شود و اگر مقدار تابع هدف همسایه بهتر از تابع هدف مقدار جاری باشد، جواب همسایه به‌عنوان جواب جاری انتخاب می‌شود؛ با این حال، اگر مقدار تابع هدف همسایه بدتر از جواب جاری باشد، باز هم امکان پذیرفتن آن به‌عنوان جواب جاری با یک احتمال فراهم می‌شود. در این مراحل اگر راه حل جاری از بهترین پاسخ بهتر بود، مقدار کنونی به‌عنوان بهترین جواب تا آن مرحله گزارش می‌شود. این فرایند تا جایی ادامه می‌یابد که دمای نهایی حاصل شده باشد.

$$z_{ip} \in \{0,1\}, \quad \forall i \in I, \\ p \in \{r | r \in I - (P_a(i) \cup S_a(i) \cup C(i)) \text{ and } i < r\} \quad (15)$$

$$F_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (16)$$

$$G_{jkl} \in \{0,1\} \quad \forall j \in J, k \in K(i) \quad (17)$$

توابع هدف (۱) تا (۳) به ترتیب تعداد ایستگاه‌های زوجی، تعداد کل ایستگاه‌ها و هزینه‌های نیروی انسانی را حداقل می‌سازد. محدودیت (۴) نشان می‌دهد هر کار دقیقاً باید به یک ایستگاه تخصیص یابد. عبارت (۵) روابط پیش‌نیازی میان فعالیت‌ها را نشان می‌دهد. محدودیت (۶) و (۷) نیز بیان می‌کند که زمان تکمیل کارها بین زمان سیکل و مدت زمان هر عملیات می‌باشد. محدودیت‌های (۸) تا (۱۰) نیز توالی وابسته به زمان تکمیل کارها را نشان می‌دهد. محدودیت (۱۱) نیز تضمین می‌کند برای انجام یک کار حتماً باید اپراتوری در آن مشغول باشد. محدودیت (۱۲) نیز رابطه میان تعداد ایستگاه‌های زوجی و کل ایستگاه‌ها را نشان می‌دهد. محدودیت (۱۳) نیز بیان می‌کند به یک ایستگاه نهایتاً می‌تواند ۱ نفر تخصیص یابد.

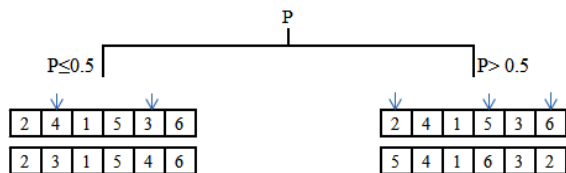
#### ۳-۲- الگوریتم انجماد تدریجی پیشنهادی



شایان ذکر است برای بار اول که باید به یک ایستگاه فعالیتی تخصیص یابد، ابتدا باید کارگری با سطح مهارت تصادفی به آن ایستگاه تخصیص یافته باشد تا بتوان عملیات را در آن ایستگاه به انجام رساند.

### ۳-۴- ایجاد همسایگی

در الگوریتم پیشنهادی، همسایه جدید به کمک تغییرات تصادفی ۲ و یا ۳ عنصر تصادفی با احتمال ۰/۵ در لیست اولویت ایجاد می‌شود. اگر عدد تصادفی ایجاد شده کوچک‌تر و یا مساوی ۰/۵ باشد جابه‌جایی تصادفی دو عنصر و در غیر این صورت جابه‌جایی تصادفی ۳ عنصر انجام می‌گیرد.



شکل ۲. ایجاد همسایگی

### ۳-۵- ایجاد یک راه حل شدنی

برای ایجاد یک راه حل شدنی از عبارات اختصاری زیر استفاده می‌شود:

رویکرد ایجاد یک جواب مطابق زیر است:

۱. مقادیر زیر را برای تمام  $m \in M$  قرار دهید:

$$NM = 1, NL = 0, NR = 0, mWL_1^1 = 0 \text{ and } mWL_1^2 = 0 \text{ for all } m \in M, S_i = 0 \text{ for all } i \in L$$

۲. مجموعه SAT را تعیین کنید. این مجموعه شامل تمام فعالیت‌هایی است که یا پیش‌نیازشان رعایت شده و یا پیش‌نیازی ندارند. اگر  $SAT = \emptyset$  باشد، به مرحله ۶ بروید.

۳. فعالیت‌های موجود در SAT را با توجه به ترتیب صعودی لیست اولویت (PL) مرتب کنید.

۴. اولین فعالیت  $h$  در SAT را به شکل زیر تخصیص دهید:

۴.۱. اگر فعالیت  $h \in A_L$  است، آنگاه:

از آنجا که در منبع کارپ (۱۹۷۲) ثابت شده است که مسئله بالانس خطوط مونتاژ در کلاس NP-Hard قرار می‌گیرند، می‌توان از الگوریتم‌های فرا ابتکاری نظیر SA برای حل آن کمک گرفت.

در الگوریتم پیشنهادی سعی شده است که دمای ابتدایی بالاتری جهت جستجوی بیشتر فضا استفاده شود؛ علاوه بر این، طول زنجیره مارکوف برابر با تعداد عملیات لحاظ شده است؛ همچنین روند کاهش دما به شکل هندسی است که به صورت زیر معرفی می‌شود:

$$T_{C+1} = r \cdot T_C$$

که در آن  $T_C$  دمای جاری،  $T_{C+1}$  دما در تکرار بعد و  $r$  نرخ سردسازی است.

### ۳-۳- ایجاد راه حل ابتدایی

هر راه حل در الگوریتم پیشنهادی به کمک رشته‌ای از اعداد صحیح نشان داده می‌شود. این راه حل در لیستی که لیست اولویت (PL) نامیده می‌شود و طول آن برابر با تعداد فعالیت‌ها است قرار می‌گیرد. مقادیر این اعداد و جایگاهشان به ترتیب نشان‌دهنده شماره فعالیت و اولویتشان است؛ مثلاً در یک مسئله با ۶ فعالیت، اولین لیست اولویت که ممکن است به صورت تصادفی ایجاد شود، می‌تواند به شکل زیر باشد:

$$PL = \{2, 1, 4, 5, 3, 6\}$$

این مجموعه نشان می‌دهد که بالاترین اولویت به کار ۲ و کمترین اولویت به کار ۶ تعلق دارد.

برای ایجاد یک جواب شدنی، فعالیت‌های قابل تخصیص که محدودیت‌های پیش‌نیازی را تأمین می‌کنند با توجه به اولییتی که در لیست PL دارند به سمتی از ایستگاه زوجی که لازم است تخصیص می‌یابند. پس از آن فعالیت‌های قابل تخصیص به روز می‌شوند و این فرایند آنقدر ادامه می‌یابد تا تمام فعالیت‌ها تخصیص یابند.

۵. اگر هیچ‌یک از فعالیت‌های موجود در SAT نتوانند به سمت چپ یا راست ایستگاه زوجی حاضر اختصاص یابند، ایستگاه زوجی جدیدی باز کنید. اگر  $TL_{NM}^1 \neq \emptyset$ ، آنگاه  $NL = NL + 1$ . اگر  $TL_{NM}^2 \neq \emptyset$  آنگاه  $NR = NR + 1$ . علاوه بر این  $NM = NM + 1$ . همچنین برای تمام مدل‌ها مقادیر  $mWL_{NM}^1$  و  $mWL_{NM}^2$  را برابر صفر قرار دهید و به مرحله ۲ بروید.

۶. توقف کنید و مقادیر تابع هدف را محاسبه نمایید. تعداد ایستگاه‌های زوجی برابر  $NM$  و تعداد ایستگاه‌ها نیز برابر  $NS$  است که با مجموع مقادیر  $NL$  و  $NS$  برابر است.

فلوچارت این الگوریتم در شکل ۳ آمده است:

### ۳-۶- شاخص‌های به‌کارگرفته‌شده

توابع هدف و شاخص‌هایی که برای حل مسئله بالانس خطوط مونتاژ دوطرفه و همچنین تخصیص نیروی انسانی با مهارت‌های مختلف به‌ازای یک زمان سیکل مشخص، در نظر گرفته شده است به شرح زیر است:

۱. حداکثرسازی اثربخشی موزون خط: با استفاده از این شاخص، می‌توان حداقل تعداد اپراتورها و طول خط را نیز به دست آورد. با توجه به ماهیت مدل‌های ترکیبی محصول و همچنین مهارت‌های مختلف کارگران مقدار این هدف (WLE) به‌صورت زیر قابل محاسبه است.

$$WLE = \left( \frac{\sum_{m \in M} q_m (\sum_{i \in I} t_{iml})}{C \cdot NS} \right) \cdot 100 \quad (17)$$

در این رابطه  $q_m$  نسبت کل تعداد محصولات مدل  $m$  است که با توجه به تقاضای مدل  $m$  و مجموع تقاضاهای محصولات مختلف، به‌شکل زیر قابل تعیین است.

$$q_m = \frac{D_m}{\sum_{m \in M} D_m} \quad (18)$$

۱،۱،۴. اگر  $mWL_{NM}^1 = 0$  است، یک کارگر با مهارت تصادفی به سمت چپ ایستگاه زوجی کنونی اختصاص دهید و به تعداد کارگران دارای این مهارت در خط مونتاژ، یک واحد اضافه کنید.

۲،۱،۴. اگر  $t_{hml} + mWL_{NM}^1 \leq C$  و  $t_{hml} + t_{rml} \leq C$  برابر با حداکثر  $t_{pml}^f$  هایی است که تا کنون برای تمام مدل‌های محصول به سمت راست ایستگاه زوجی حاضر اختصاص یافته است، آنگاه فعالیت  $h$  را به سمت چپ ایستگاه تخصیص دهید و  $TL_{NM}^1 = TL_{NM}^1 + \{h\}$ . همچنین برای تمام مدل‌ها  $t_{hml}^f = \max\{t_{hml} + mWL_{NM}^1, (t_{hml} + t_{rml}^f)\}$  و  $mWL_{NM}^1 = t_{hml}^f$  را مشخص کنید و به مرحله ۲ بروید.

در غیر این صورت به مرحله ۵ بروید.

۲،۴. اگر فعالیت  $h \in A_R$  است، آنگاه:

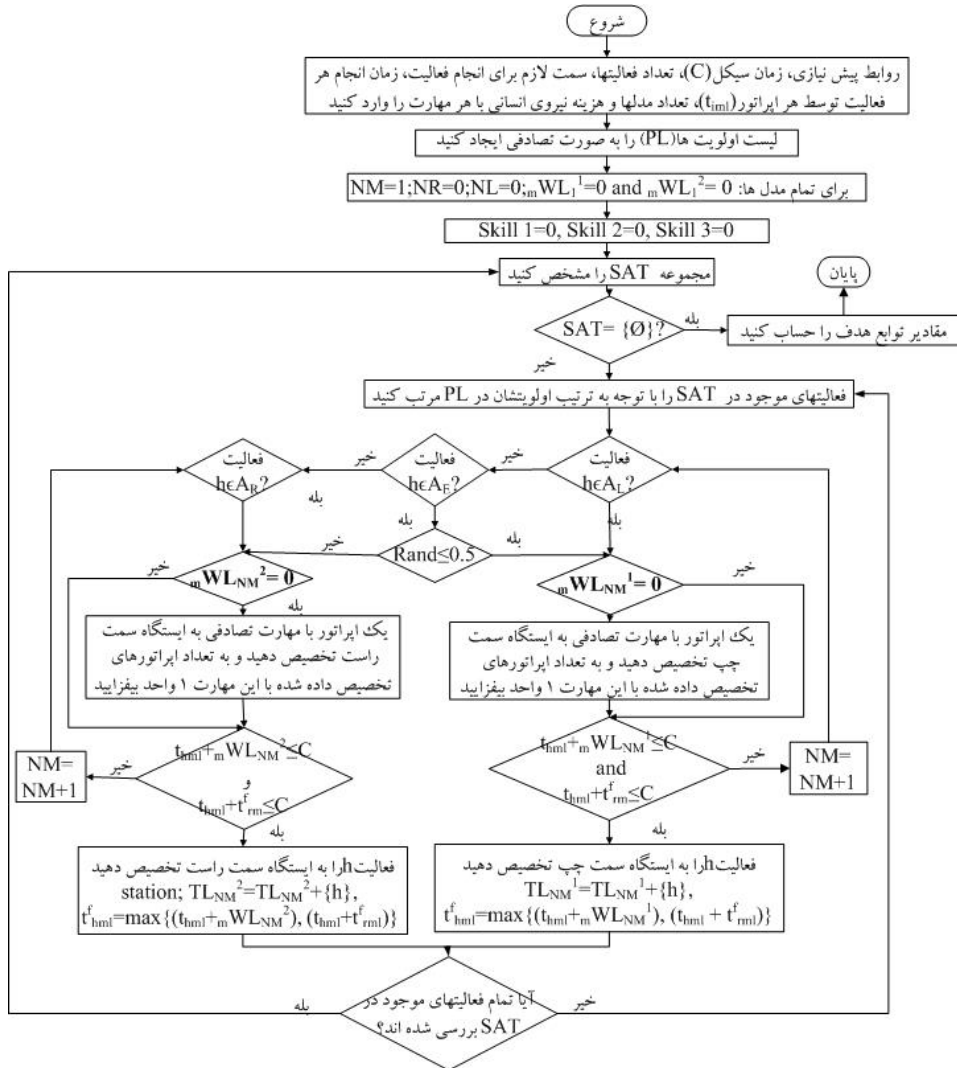
۱،۲،۴. اگر  $mWL_{NM}^2 = 0$  است، آنگاه یک کارگر با مهارت تصادفی به سمت راست ایستگاه زوجی کنونی اختصاص دهید و به تعداد کارگران دارای این مهارت در خط مونتاژ، یک واحد اضافه کنید.

۲،۲،۴. اگر  $t_{hml} + mWL_{NM}^2 \leq C$  و  $t_{hml} + t_{rml} \leq C$  برابر با حداکثر  $t_{pml}^f$  هایی است که تاکنون برای تمام مدل‌های محصول به سمت چپ ایستگاه زوجی حاضر اختصاص یافته است، آنگاه فعالیت  $h$  را به سمت راست ایستگاه تخصیص دهید و  $TL_{NM}^2 = TL_{NM}^2 + \{h\}$ . همچنین برای تمام مدل‌ها  $t_{hml}^f = \max\{t_{hml} + mWL_{NM}^2, (t_{hml} + t_{rml}^f)\}$  و  $mWL_{NM}^2 = t_{hml}^f$  را مشخص کنید و به مرحله ۲ بروید.

در غیر این صورت به مرحله ۵ بروید.

۱،۳،۴. اگر فعالیت  $h \in A_E$  است، آنگاه:

۱،۳،۴. عدد تصادفی  $p_2$  را در بازه  $[0, 1]$  انتخاب کنید. اگر  $p_2 \leq 0.5$  آنگاه به مرحله 4.1.1 بروید. در غیر این صورت به مرحله 4.2.1 بروید.



شکل ۳. فلوچارت الگوریتم پیشنهادی

با توجه به روش مجموع موزون برای حل مسائل برنامه‌ریزی چندهدفه دب<sup>۲</sup> (۲۰۰۱) تابع هدف زیر می‌تواند به دست آید:

$$\text{Minimize } E = W_1 \left( \frac{WLE0}{WLE} \right) + W_2 \left( \frac{WSI}{WSI0} \right) + W_3 \left( \frac{HC}{HC_0} \right) \quad (21)$$

در این رابطه WLE0، WSI0، و HC0 مقادیر به‌دست‌آمده از هر هدف در اولین تکرار است و W<sub>1</sub>، W<sub>2</sub> و W<sub>3</sub> وزن‌هایی هستند که در این روش نشان‌دهنده اولویت هر هدف است. اگر W<sub>1</sub>=W<sub>2</sub>=W<sub>3</sub>= $\frac{1}{3}$  فرض شود، حداکثرسازی اثربخشی موزون خط، حداکثرسازی شاخص هموارسازی و

حداقل‌سازی شاخص هموارسازی موزون<sup>۲۱</sup> با استفاده از این شاخص سعی بر آن است که میزان تفاوت در بارگذاری‌های میان ایستگاه‌ها به حداقل ممکن برسد. این شاخص می‌تواند به شکل زیر تعریف شود:

$$WSI = \sqrt{\frac{\sum_{m \in M} q_m \cdot (\sum_{j \in J} \sum_{k=1,2} (mWL_j^k - WL_{max})^2)}{NS}} \quad (19)$$

که در آن WL<sub>max</sub> حداکثر زمان ایستگاه‌ها است.

حداقل‌سازی هزینه‌های نیروی انسانی کل سیستم که می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$HC = \sum_{j \in J} \sum_{k=1,2} \sum_{l \in L} HC_l \cdot G_{jkl} \quad \forall i \in I \quad (20)$$

حداقل کردن هزینه‌های نیروی انسانی با درجه اولویت یکسان حاصل می‌شود.

### ۳-۷- کران پایین

ازکان و توکلوا<sup>(۲۰۰۹)</sup> یک کران پایین برای تعداد ایستگاه‌ها در بالانس خطوط مونتاژ دوطرفه مدل‌های ترکیبی ارائه کردند؛ اما کران پایین آن مقاله برای شرایطی که زمان‌های انجام عملیات وابسته به فرد انجام‌دهنده است، تغییر کرد. در این کران از  $t_{im1}$

استفاده شد که زمان پردازش را توسط فردی که دارای بالاترین مهارت است نشان می‌دهد. در واقع با استفاده از این پارامتر، این موضوع مد نظر قرار می‌گیرد که اگر تمام ایستگاه‌ها هم کارگرانی با مهارت بالا داشته باشند، حداقل چه تعداد ایستگاه می‌تواند در نظر گرفته شود. این کران به شکل زیر قابل محاسبه است:

$$Max = \max \left\{ \left[ \frac{\sum_{m \in M} \sum_{i \in A_L} q_m t_{im1}}{C} \right], \left[ \frac{\sum_{m \in M} \sum_{i \in A_R} q_m t_{im1}}{C} \right] \right\} \quad (22)$$

LB

= 2. Max

$$+ \max \left\{ 0, \left[ \frac{\sum_{m \in M} \sum_{i \in A_E} q_m t_{im1} - (\text{Max. C} - \sum_{m \in M} \sum_{i \in A_L} q_m t_{im1}) - (\text{Max. C} - \sum_{m \in M} \sum_{i \in A_R} q_m t_{im1})}{C} \right] \right\} \quad (23)$$

توسط افراد مختلف و همچنین سایر داده‌های مسئله در جدول ۲ آورده شده است. زمان سیکل در این مسئله ۶ در نظر گرفته شده است. علاوه بر این هزینه‌های استخدام کارگران با مهارت‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب ۹۰، ۶۰ و ۴۰ دلار در افق برنامه‌ریزی منظور شده است.

یک راه حل تصادفی اولیه (لیست اولویت) می‌تواند به شکل  $PL = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$  باشد. روش ایجاد یک بالانس خط ابتدایی در جدول ۳ آورده شده است. همان‌طور که جدول ۳ نشان می‌دهد که در ابتدا لیست فعالیت‌های قابل تخصیص فعالیت‌های ۱، ۲ و ۳ هستند و با توجه به ترتیب فعالیت‌ها در لیست PL مشخص می‌شود که ابتدا باید فعالیت ۱ تخصیص یابد.

عبارت (۲۲) نشان می‌دهد حداقل تعداد ایستگاه‌های زوجی برابر با تعداد ایستگاه‌هایی است که باید به فعالیت‌های سمت راست و یا چپ تخصیص یابند. این مقدار از آنجا حداقل مقدار است که فعالیت‌های نوع E که در واقع می‌توانند به هر یک از این دو سمت تخصیص یابند در نظر گرفته نشده‌اند؛ علاوه بر این روابط پیش‌نیازی میان فعالیت‌ها نیز نادیده لحاظ شده است. رابطه (۲۳) که در واقع کران پایینی برای تعداد ایستگاه‌ها است، بیان می‌کند که تعداد کل ایستگاه‌ها، حداقل دو برابر کران پایین تعداد ایستگاه‌های زوجی است، از سویی این مقدار با در نظر گرفتن تعداد ایستگاه‌هایی که فعالیت‌های نوع E می‌توانند به آنها اختصاص یابند، به مقدار بهتر و بالاتری ارتقا یافته است.

### ۴- مثال عددی

در این بخش، الگوریتم پیشنهادی به کمک یک مسئله با ۹ فعالیت تشریح شده است. زمان انجام فعالیت‌ها

جدول (۲): داده‌های مثال عدد

فعالیت	پیش‌نیاز بلافاصله	سمت	مدل A ( $q_A=0/5$ )			مدل B ( $q_B=0/5$ )		
			مهارت ۱	مهارت ۲	مهارت ۳	مهارت ۱	مهارت ۲	مهارت ۳
1	—	L	1/5	2	3	0	0	0
2	—	R	2	3	4	0/5	1/5	2/5
3	—	E	0	0	0	1	2/5	3/5
4	1	L	2	3	4	0	0	0
5	2	R	1	3	4	1/5	3	4
6	2/3	E	1	2	3	1	2	3
7	4/5	E	1/5	3	4	2	3	4
8	5	L	0	0	0	3	3/5	4
9	6	E	1	3	4	0/5	1	1/5

جدول (۳): ایجاد بالانس خط ابتدایی

مرحله ۱	مرحله ۲ SAT	مرحله ۳ PL	مرحله ۴	مرحله ۵	مرحله ۶
NM=1; NL=0, NR=0, ${}^A W L_1^1=0$ , ${}^B W L_1^1=0$ , ${}^A W L_1^2=0, {}^B W L_1^2=0$	{1,2,3}	{1,2,3}	فعالیت ۱ را انتخاب کنید. $P(1) = \{\emptyset\}$ . $1 \in A_L$ ${}^A W L_1^1=0, {}^B W L_1^1=0$ مهارت تصادفی، مهارت ۱ است. $1.5+0 \leq 6; 0+0 \leq 6; T L_1^1 = T L_1^1 + \{1\};$ $t_{1A}^f=1.5, t_{1B}^f=0, {}^A W L_1^1=1.5, {}^B W L_1^1=0$ .		
	{2,3,4}	{2,3,4}	فعالیت ۲ را انتخاب کنید. $P(2) = \emptyset$ . $2 \in A_R$ ${}^A W L_1^2=0, {}^B W L_1^2=0$ . مهارت تصادفی، مهارت ۳ است. $4+0 \leq 6, 2.5+0 \leq 6, T L_1^2 = T L_1^2 + \{2\}; t_{2A}^f=4,$ $t_{2B}^f=2.5, {}^A W L_1^2=4, {}^B W L_1^2=2.5$ .		
	{3,4,5}	{3,4,5}	فعالیت ۳ را انتخاب کنید. $P(3) = \emptyset$ و $3 \in A_E$ $P_2 > 0.5$ $0+4 \leq 6, 3.5+2.5 \leq 6, T L_1^2 =$ $T L_1^2 + \{3\}, t_{3A}^f=4, t_{3B}^f=6, {}^A W L_1^2=4,$ ${}^B W L_1^2=6$ .		
	{4,5,6}	{4,5,6}	فعالیت ۴ را انتخاب کنید. $P(4) = \{1\}$ . $4 \in A_L$ $2+1.5 \leq 6; 0+0 \leq 6; T L_1^1 = T L_1^1 + \{4\};$ $t_{4A}^f=3.5, t_{4B}^f=0, {}^A W L_1^1=3.5, {}^B W L_1^1=0$ .		
	{5,6}	{5,6}	فعالیت ۵ را انتخاب کنید. $P(5) = \{2\}$ . $5 \in A_R$ $4+4 > 6; 4+6 > 6$ . به مرحله ۵ بروید.	فعالیت ۵ انتخاب نمی‌شود.	

$NM=2, {}_A W L_1^1=0,$ ${}_B W L_1^1=0,$ ${}_A W L_1^2=0,$ ${}_B W L_1^2=0$	{5,6}	{5,6}	فعالیت ۵ را انتخاب کنید. $P(5) = \{2\}$ $5 \in A_R$ ${}_A W L_2^2=0, {}_B W L_2^2=0.$ مهارت تصادفی، مهارت ۲ است. $3+0 \leq 6, 3+0 \leq 6, T L_2^2 = T L_2^1 + \{5\}, t_{5A}^f=3,$ $t_{5B}^f=3, {}_A W L_2^2=3, {}_B W L_2^2=3.$		
	{6,7,8}	{6,7,8}	فعالیت ۶ را انتخاب کنید. $P(6) = \{2,3\}$ $P_2 \leq 0.5$ و $6 \in A_E$ ${}_A W L_2^1=0, {}_B W L_2^1=0$ مهارت تصادفی، مهارت ۱ است $1+0 \leq 6; 1+0 \leq 6; T L_2^1 = T L_2^1 + \{6\}, t_{6A}^f=1,$ $t_{6B}^f=1, {}_A W L_2^1=1, {}_B W L_2^1=1.$		
	{7,8,9}	{7,8,9}	فعالیت ۷ را انتخاب کنید. $P(7) = \{4,5\}$ $P_2 \leq 0.5$ و $7 \in A_E$ $1.5+1 \leq 6; 2+1 \leq 6; T L_2^1 = T L_2^1 + \{7\};$ $t_{7A}^f=2.5, t_{7B}^f=3, {}_A W L_2^1=2.5, {}_B W L_2^1=3$		
	{8,9}	{8,9}	فعالیت ۸ را انتخاب کنید. $P(8) = \{5\}$ $8 \in A_L$ $0+2.5 \leq 6; 3+3 \leq 6; T L_2^1 = T L_2^1 + \{8\};$ $t_{8A}^f=2.5, t_{8B}^f=6, {}_A W L_2^1=2.5, {}_B W L_2^1=6.$		
	{9}	{9}	فعالیت ۹ را انتخاب کنید. $P(9) = \{6\}$ $9 \in A_E$ است و $P_2 > 0.5$ $3+3 \leq 6; 1+3 \leq 6 T L_2^2 = T L_2^2 + \{9\}, t_{9A}^f=6,$ $t_{9B}^f=4, {}_A W L_2^2=6, {}_B W L_2^2=4.$		
	$\emptyset$				توقف

حاضر بسته می‌شود و یک ایستگاه جدید باز می‌شود و مجدداً اپراتوری تصادفی به ایستگاهی که فعالیت باید بدان اختصاص یابد، تخصیص می‌یابد. زمانی که برای تمام فعالیت‌ها این کار انجام گرفت، یک بالانس ابتدایی به دست خواهد آمد.

تخصیص اولیه فعالیت‌ها و مهارت‌های مختلف به ایستگاه‌ها برای این مسئله در جدول ۴ نشان داده شده است. این جدول مشخص می‌کند که دو ایستگاه زوجی و ۴ ایستگاه در مجموع وجود دارد. علاوه بر این مقادیر توابع هدف  $WLE, WSI, HC$  و همچنین  $E$  برای این نوع تخصیص‌ها به ترتیب ۶۷/۶۷٪، ۲/۷۹۵، ۲۸۰ و ۱ می‌شود. همچنین در سمت چپ هر

از آنجا که سمت چپ سمت لازم برای انجام این فعالیت است و تاکنون اپراتوری به هیچ‌یک از ایستگاه‌ها تخصیص نیافته است، اپراتوری به‌طور تصادفی انتخاب می‌شود. از آنجا که در این مثال مهارت تصادفی، مهارت ۱ است، بنابراین زمان انجام این فعالیت به زمان این ایستگاه اضافه می‌شود که در این مرحله باید این محدودیت که زمان فعالیت‌های تخصیص داده‌شده از زمان سیکل بیشتر نشود، مورد بررسی قرار می‌گیرد. پس از این مرحله مجدداً لیست فعالیت‌های قابل تخصیص به‌روز می‌شود و مجدداً این کار برای بقیه فعالیت‌ها تکرار می‌شود. در این بین اگر مجموع زمان‌ها برای یک ایستگاه با تخصیص یک فعالیت دیگر از زمان سیکل تجاوز کند، ایستگاه زوجی

دو ایستگاه زوجی مهارت ۱ و در سمت‌های راست از مهارت‌های ۲ و ۳ استفاده شده است. جدول (۴): تخصیص فعالیت‌ها و مهارت‌ها به ایستگاه‌های زوجی

ایستگاه‌های زوجی ۱ و تعداد ایستگاه‌ها نیز برابر ۲ شده است. علاوه بر این مقادیر WLE، WSI و HC نیز به ترتیب ۸۱/۲٪، ۰/۷ و ۱۸۰ شده است. در این ایستگاه‌ها نیز دو کارگر با مهارت ۱ به کار گرفته شده‌اند.

بهترین مقدار تابع هدف E با استفاده از الگوریتم پیشنهادی در ۵ تکرار برابر ۰/۴ شده است. تعداد

ایستگاه زوجی ۱		ایستگاه زوجی ۲	
سمت	سمت	سمت	سمت
چپ	راست	چپ	راست
فعالیت	1, 4	2, 3	6, 7, 8
مهارت	1	3	1

این مسئله با زمان‌های سیکل مختلف و هریک ۵ بار روی کامپیوتر شخصی ۲/۲ GHz CPU و ۱ GB of RAM اجرا شد. بهترین، بدترین و میانگین پاسخ‌های به دست آمده در این اجراها و همچنین بهترین و بدترین تعداد کارگران مورد استفاده با هر مهارتی در جدول ۵ آورده شده است.

جدول (۵): بهترین، بدترین و متوسط نتایج به دست آمده طی ۵ اجرا برای زمان‌های سیکل متفاوت

	C	LB	E			WSI			HC (دلار)			WLE%			NM[NS]		(S1, S2, S3)			ET <sup>#</sup>
			W*	M**	B***	W	M	B	W	M	B	W	M	B	W	B	W	B	M	
P9	4	2	0/71	0/64	0/54	1/7	1/5	1/3	370	354	330	65/6	71/3	77/1	3[6]	2[4]	(1,4,1)	(3,1,0)	0/4	
	5	1	0/69	0/45	0/32	2/2	1/2	0/2	280	250	180	65/0	73/5	97/5	2[4]	1[2]	(2,1,1)	(2,0,0)	0/4	
	6	1	0/49	0/46	0/40	1/4	0/9	0/7	180	180	180	81/2	81/2	81/2	1[2]	1[2]	(2,0,0)	(2,0,0)	0/5	
	7	1	0/61	0/46	0/39	0/9	0/7	0/6	180	156	150	69/6	84/6	94/6	1[2]	1[2]	(2,0,0)	(1,1,0)	0/5	
	8	1	0/55	0/46	0/43	0/9	0/9	0/6	150	134	130	82/8	89/1	90/6	1[2]	1[2]	(1,1,0)	(1,0,1)	0/5	
	9	1	0/66	0/47	0/38	2/2	1/1	0/6	150	138	130	73/6	79/2	80/6	1[2]	1[2]	(1,1,0)	(1,0,1)	0/5	

W\*: بدترین نتایج، M\*\*: متوسط نتایج، B\*\*\*: بهترین نتایج، ET<sup>#</sup>: زمان اجرا (ثانیه)، S1: تعداد کارگر با مهارت ۱، S2: تعداد کارگر با مهارت ۲، S3: تعداد کارگر با مهارت ۳

به دست آمده برای تعداد ایستگاه‌های زوجی، تعداد کل ایستگاه‌ها، هزینه‌های نیروی انسانی و همچنین زمان حل با مقادیر بهینه‌ای که به ازای زمان‌های سیکل مختلف به کمک نرم‌افزار GAMS به دست آمده، قیاس شده است. نتایج این ارزیابی‌ها در جدول ۶ آمده است.

در جدول ۵ واضح است که برای این مسئله تغییرات در زمان سیکل تأثیر چندانی در زمان حل ایجاد نکرده است. علاوه بر این نتیجه‌گیری دیگری که می‌توان از جدول ۴ و ۵ کرد به شرح زیر است:

همان‌طور که از جدول ۶ واضح است، الگوریتم پیشنهادی به ازای زمان‌های سیکل ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹ توانسته است به مقدار بهینه‌ای که نرم‌افزار GAMS برای مقادیر تعداد ایستگاه‌های زوجی، کل ایستگاه‌ها و هزینه‌های نیروی انسانی گزارش داده است، دست یابد.

جدول ۴ نشان می‌دهد که در حالت ابتدایی اگر زمان سیکل برابر با ۶ در نظر گرفته شود، نیاز به ۴ اپراتور (۲ ماهر، ۱ نیمه‌ماهر و یک مبتدی) وجود دارد تا ۹ فعالیت این مسئله انجام گیرند؛ اما جدول ۵ نشان می‌دهد با جستجوی همسایگی فعالیت‌ها، تغییر در اولویت انجام کارها و به کار بردن الگوریتم برای همین مسئله و با زمان سیکل ۶ تنها به ۲ اپراتور ماهر برای انجام کارها نیاز خواهد شد. تحلیل دیگری که برای این مسئله صورت پذیرفت است آن است که بهترین پاسخ‌های

جدول (۶): مقایسه نتایج حاصل از الگوریتم پیشنهادی با نتایج حاصل از نرم‌افزار GAMS برای مسئله‌ای با ابعاد کوچک

C	HC (دلار)		NM[NS]		(S1, S2, S3)		ET#	
	SA	OP	SA	OP	SA	OP	SA	OP
5	180	180	1[2]	1[2]	(2,0,0)	(2,0,0)	0/4	1/7
6	180	180	1[2]	1[2]	(2,0,0)	(2,0,0)	0/5	7/5
7	150	150	1[2]	1[2]	(1,1,0)	(1,1,0)	0/5	2/7
8	130	130	1[2]	1[2]	(1,0,1)	(1,0,1)	0/5	6/6
9	130	130	1[2]	1[2]	(1,0,1)	(1,0,1)	0/5	2/3

ET#: زمان اجرا (ثانیه)، S1: تعداد کارگر با مهارت ۱، S2: تعداد کارگر با مهارت ۲، S3: تعداد کارگر با مهارت ۳، OP: نتایج حاصل

از GAMS

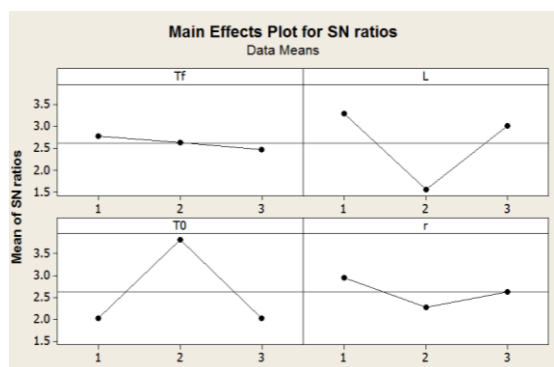
### ۵- آزمایشات عددی

برای بررسی اثربخشی الگوریتم پیشنهادی جهت حل مسئله، سه شیوه جستجوی همسایگی مختلف ارزیابی شد. این روش‌ها به جابه‌جایی دو عنصر (2-OPT)، جابه‌جایی سه عنصر (3-OPT) و جابه‌جایی تصادفی دو و یا سه عنصر تمرکز داشت. جزئیات پاسخ‌های به دست‌آمده برای مسئله P9 در جدول ۷ آورده شده است.

علاوه بر این از منظر زمان نیز، الگوریتم پیشنهادی در زمان کوتاه‌تری به این مقادیر دست یافته است. برای این مسئله با زمان سیکل ۴ تعداد ایستگاه‌های زوجی و کل ایستگاه‌ها و همچنین تعداد افراد به‌کاررفته برای هر دو روش با هم برابرند. تنها تفاوتی که وجود دارد، مقدار هزینه نیروی انسانی است که نرم‌افزار GAMS مقدار بهتری را ارائه کرده است. اما چیزی که چشم‌گیر است، زمان حل بسیار زیادی نرم‌افزار GAMS در مقایسه با الگوریتم پیشنهادی برای دستیابی به این جواب است.

جدول (۷): بررسی قوانین مختلف همسایگی برای مسئله P9 به ازای زمان‌های سیکل مختلف

C	E			WSI			HC(دلار)			WLE%			
	2-OPT	3-OPT	2&3 OPT	2-OPT	3-OPT	2&3 OPT	2-OPT	3-OPT	2&3 OPT	2-OPT	3-OPT	2&3 OPT	
p9	4	0/58	0/52	0/64	1/03	1/17	1/47	308	314	354	77/81	76/04	71/35
	5	0/59	0/60	0/45	1/20	1/45	1/25	262	252	250	74/08	78/90	73/50
	6	0/59	0/50	0/46	0/79	0/71	0/95	180	188	180	81/25	80/63	81/25
	7	0/45	0/60	0/46	0/71	0/94	0/75	150	152	156	92/50	85/71	84/64
	8	0/58	0/47	0/46	0/83	0/91	0/86	142	138	134	82/19	82/81	89/06
9	0/60	0/53	0/47	0/61	0/96	1/11	158	138	138	67/22	78/06	79/17	



شکل ۴. تنظیم پارامتر به روش تاگوچی

برای تنظیم پارامتر از روش براساس تاگوچی استفاده شد. هر یک از ۴ پارامتر Tf، T0، r و L (طول زنجیره مارکوف) در ۳ سطح زیر بررسی شدند:

Tf=(0.5, 1, 2)  
 T0=(100, 500, 1000)  
 L=(تعداد فعالیت‌ها، 3, 5)  
 r=(0.8, 0.9, 0.95)

با استفاده از نرم‌افزار Minitab خروجی زیر برای شاخص S/N به دست آمد:



## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک الگوریتم انجماد تدریجی چندهدفه برای حل مسائل بالانس خطوط مونتاژ دوطرفه مدل‌های ترکیبی ارائه شد و همچنین به تخصیص نیروی انسانی با سطوح مختلف مهارت پرداخته شد. اهداف این مدل حداقل‌سازی تعداد ایستگاه‌های زوجی و انفرادی و همچنین هزینه‌های نیروی انسانی کل سیستم به‌ازای زمان سیکل معین منظور شدند. در کنار این اهداف دو شاخص حداکثرسازی اثربخشی موزون خط و حداقل‌سازی شاخص هموارسازی موزون خط لحاظ شدند. یک مثال با جزئیات تشریح شد و کارایی این الگوریتم برای حل این مسائل در زمان معقول به‌کمک مثال‌هایی با ابعاد مختلف و همچنین زمان‌های سیکل متفاوت نشان داده شدند. علاوه بر این از ۳ قانون مختلف برای جستجوی همسایگی استفاده شد، که نشان داد رویکرد استفاده شده در این مقاله از میان سایر رویکردهای موردبررسی دارای پاسخ‌های بهتر بود. برای پژوهش‌های آتی می‌توان به توسعه این الگوریتم برای خطوط مونتاژ نوع دوم اشاره کرد. همچنین می‌توان از سایر روش‌های فرا ابتکاری جدیدتر همانند خفاش، تکامل تفاضلی، رقابت استعماری برای مقایسه بهره برد.

به کمک این روش واضح است که بهترین مقادیر این پارامترها برابرند با:

$$Tf=2, L=5, T0=100, r=0.9$$

. مسائل P65 و P47, P39, P30, P25, P20, P14, P12

هریک با جواب‌های ابتدایی تصادفی پنج بار اجرا شدند و بهترین و بدترین پاسخ‌های به‌دست‌آمده برای تعداد ایستگاه‌های زوجی، تعداد ایستگاه‌ها و کارگران با هر مهارت گزارش شده‌اند. علاوه بر این میانگین و همچنین بهترین مقادیر هر تابع هدف و کران پایین تعداد ایستگاه‌ها برای زمان‌های سیکل مختلف ارائه شده‌اند. جدول ۸ این نتایج را نشان می‌دهد. واضح است که در مرحله نخست، مقدار E برابر ۱ است و در طی فرایند اجرای الگوریتم این مقدار کاهش می‌یابد و به بهترین مقدار به‌دست‌آمده با شرایط الگوریتم دست می‌یابد.

همچنین این جدول نشان می‌دهد برای یک مسئله با تعداد فعالیت‌های یکسان، زمان اجرا به‌ازای زمان‌های سیکل متفاوت تغییر چندانی نمی‌کند. علاوه بر این با افزایش زمان سیکل برای یک مسئله هزینه‌های نیروی انسانی کاهش می‌یابد؛ اما چنین چیزی برای شاخص‌های WSI و WLE% صحت ندارد. به‌گونه‌ای که نمی‌توان نظم مشخصی را برای این شاخص‌ها تعیین کرد. علاوه بر این تعداد ایستگاه‌های زوجی و فردی نیز با افزایش زمان سیکل کاهش یافته است.

جدول (۸): جزئیات به‌دست‌آمده از الگوریتم برای مسائل و زمان‌های سیکل مختلف

	C	LB	E		WSI		HC		WLE%		NM[NS]		(S1,S2,S3)		ET <sup>#</sup>
			M <sup>**</sup>	B <sup>***</sup>	M	B	M	B	M	B	W*	B	W	B	
p 12	5	1	0/65	0/54	1/4	1/3	306	270	76/6	79/5	3[6]	2[4]	(0,5,1)	(0,3,1)	0/9
	6	1	0/52	0/34	1/0	0/1	226	180	84/7	95/4	2[4]	1[2]	(1,3,0)	(2,0,0)	0/8
	7	1	0/43	0/39	1/1	0/8	180	180	81/8	81/8	1[2]	1[2]	(2,0,0)	(2,0,0)	0/8
	8	1	0/46	0/37	0/6	0/6	156	150	90/1	94/7	1[2]	1[2]	(2,0,0)	(1,1,0)	0/8
p 14	10	2	0/71	0/55	3/5	3/2	448	430	71/4	76/6	4[8]	3[6]	(0,7,1)	(3,2,1)	1/2
	11	2	0/74	0/64	4/0	3/4	390	350	72/7	76/5	4[8]	3[6]	(0,5,3)	(1,3,2)	1/2
	12	1	0/64	0/64	3/7	3/2	350	320	74/3	79/8	3[6]	3[6]	(1,4,1)	(0,4,2)	1/1
	13	1	0/70	0/64	3/5	2/9	346	300	71/9	83/0	3[6]	2[4]	(1,4,1)	(2,2,0)	1/1
P 20	20	1	0/67	0/59	7/9	6/6	420	380	66/5	61/2	4[8]	3[6]	(1,4,3)	(2,2,2)	2/5
	22	0	0/70	0/50	7/8	5/2	398	370	68/0	59/7	4[8]	3[6]	(0,5,3)	(1,4,1)	2/6
	24	0	0/70	0/55	8/3	5/7	346	330	66/8	58/9	4[8]	2[4]	(2,2,2)	(3,1,0)	2/6
	26	0	0/69	0/58	7/7	6/2	308	280	70/7	66/2	3[6]	2[4]	(3,1,0)	(0,2,4)	2/6
P 25	35	1	0/75	0/63	13/0	9/8	488	470	72/6	68/0	5[9]	4[8]	(0,7,2)	(1,5,2)	3/6
	38	1	0/75	0/65	12/36	10/8	460	420	70/5	68/9	4[8]	4[8]	(0,5,3)	(1,6,1)	4/3
	41	1	0/73	0/58	13/92	13/2	412	360	67/5	65/8	4[8]	4[8]	(2,2,4)	(0,2,6)	4/4
	44	1	0/75	0/69	11/4	9/83	374	330	76/4	61/4	4[8]	3[6]	(1,4,3)	(1,2,3)	4/9
P 30	25	1	0/74	0/67	5/2	3/8	458	420	77/0	69/9	4[8]	3[6]	(2,4,2)	(0,5,3)	5/6
	27	1	0/74	0/65	6/0	4/4	406	380	80/2	69/3	4[8]	3[6]	(3,3,0)	(2,2,2)	6/3
	29	1	0/58	0/50	5/2	4/0	336	310	84/2	81/9	3[6]	3[6]	(1,3,2)	(1,1,4)	6/0
	31	1	0/62	0/51	6/0	5/0	284	260	83/8	81/3	3[6]	3[6]	(0,1,5)	(0,3,3)	5/3
P 39	24	1	0/72	0/61	8/5	7/7	564	540	73/0	70/2	5[10]	4[8]	(1,7,2)	(0,7,3)	13/1
	26	1	0/74	0/58	8/2	6/6	490	470	76/2	72/4	4[8]	5[9]	(2,4,2)	(1,3,5)	14/5
	28	1	0/80	0/67	8/2	7/4	460	450	73/8	71/1	4[8]	4[8]	(1,4,3)	(1,6,1)	12/9
	30	0	0/73	0/62	8/5	6/9	426	380	76/3	71/8	3[6]	4[8]	(0,3,5)	(3,3,0)	14/8
P 47	45	1	0/82	0/75	19/8	17/8	790	670	67/0	61/7	7[13]	8[15]	(3,9,2)	(1,5,7)	15/2
	50	1	0/91	0/72	23/0	17/7	686	610	70/9	65/5	7[12]	6[11]	(3,8,1)	(1,4,7)	16/6
	55	1	0/85	0/74	20/1	16/8	654	640	70/0	67/3	5[10]	6[12]	(4,2,4)	(5,2,3)	15/9
	60	1	0/82	0/70	21/6	20/4	544	530	71/1	69/0	5[10]	5[10]	(1,6,3)	(1,4,5)	13/7
P 65	300	0	0/70	0/62	108/7	100/7	694	640	69/2	67/7	6[12]	6[12]	(4,4,4)	(0,8,4)	37/5
	320	0	0/68	0/56	87/8	70/6	620	590	76/3	75/0	5[10]	5[10]	(4,3,3)	(1,7,2)	43/7
	340	0	0/75	0/55	101/1	66/0	556	500	76/2	72/6	5[10]	4[8]	(6,1,1)	(0,5,5)	34/2
	360	0	0/73	0/57	104/2	59/4	532	460	72/7	69/6	5[10]	4[8]	(4,4,0)	(0,3,7)	39/9

W\*: بدترین نتایج، M\*\*: متوسط نتایج، B\*\*\*: بهترین نتایج ET<sup>#</sup>: زمان اجرا (ثانیه)، S1: تعداد کارگر با مهارت ۱، S2: تعداد کارگر با مهارت ۲،

S3: تعداد کارگر با مهارت ۳

## منابع:

- Kim Y.K., Kim Y., Kim Y.J. (2000). "Two-sided assembly line balancing: a genetic algorithm approach." *Production Planning and Control*, 11(1): 44–53.
- Nakade K., Nishiwaki R. (2008). "optimal allocation for heterogeneous workers in a U-shaped production". *Computers and Industrial engineering*, 54(3): 432–440.
- Özbakir L., Tapkan P.(2011). "Bee colony intelligence in zone constrained two-sided assembly line balancing problem." *Expert Syst Appl*, 38: 11947–11957.
- Özcan U. (2010). "Balancing stochastic two-sided assembly lines: a chance constrained, piecewise-linear, mixed integer program and a simulated annealing algorithm." *European Journal of Operational Research*, 205: 81–97.
- Özcan U., Gokcen H., Toklu B. (2010). "Balancing parallel two-sided assembly lines". *International Journal of Production Research*, 48(16): 4767–4784.
- Özcan U., Toklu B. (2009). "Balancing of mixed-model two-sided assembly lines". *Computers & Industrial Engineering*, 57: 217–227.
- Purnomo H.D., Wee H.M., Rau H. *Two-sided assembly lines balancing with assignment restriction. Mathematical and Computer Modeling*, 57: 189–199.
- Simaria A.S., Vilarinho P.M. (2009). "2-ANTBAL: An ant colony optimization algorithm for balancing two-sided assembly lines". *Computers & Industrial Engineering*, 56: 489–506.
- Taha R.B., El-Kharbotly A.K., Sadek Y.M., Afia N.H.(2011). "A Genetic Algorithm for solving two-sided assembly line balancing problems". *Ain Shams Engineering Journal*, 2: 227–240.
- Tapkan P., Özbakir L., Baykasoglu A. (2012). "Modeling and solving constrained two-sided assembly line balancing problem via bee algorithms". *Applied Soft Computing*, 12: 3343–3355.
- Wu E.F., Jin Y., Bao J.S., Hu X.F.(2008)." A branch-and-bound algorithm for two-sided assembly line balancing". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39: 1009–1015.
- Xiaofeng H., Erfei W., Jinsong B., Ye J.(2010). "A branch-and-bound algorithm to minimize the line length of a two-sided assembly line". *European Journal of Operational Research*, 206 :703–707.
- Xiaofeng H., Erfei W., Ye J.(2008). "A station-oriented enumerative algorithm for two-sided assembly line balancing". *European Journal of Operational Research*, 186: 435–440.
- Bartholdi J.J.(1993). "Balancing two-sided assembly lines: a case study". *International Journal of Production Research*, 31 (10): 2447–2461.
- Battaia O., Dolgui A.( 2013.) "A taxonomy of line balancing problems and their solution approaches". *Int. J. Production Economics*, 142 (2): 259–277.
- Baybars I. (1984). "A Survey of Inexact Algorithms for the Simple Assembly Line Balancing Problem". Tech. Report GSIA WP-86-82-83, Carnegie-Mellon University.
- Baybars I. ( 1986). "A survey of exact algorithms for the simple assembly line balancing problem." *Management Science*, 32: 909-932.
- Baykasoglu A., Dereli T. ( 2008). "Two-sided assembly line balancing using an ant colony-based heuristic". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 36(5-6): 582–588.
- Becker C., Scholl A. (2006). "A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing". *European Journal of Operational Research*, 168(3): 694–715.
- Boysen N., Flidner M. (2007). "Scholl A. A classification of assembly line balancing problems". *European Journal of Operational Research*, 183: 674–693.
- Boysen N., Flidner M., Scholl A. (2008). "Assembly line balancing: Which model to use when?". *International Journal of Production Economics*, 111: 509–528.
- Chutima P., Chimklai P.(2012). "Multi-objective two-sided mixed-model assembly line balancing using particle swarm optimisation with negative knowledge". *Computers & Industrial Engineering*, 62: 39–55.
- Corominas A., Pastor R., Plans J. (2008). "Balancing assembly line with skilled and unskilled workers". *OMEGA*, 36(6):1126-1132.
- Deb K. (2001). "Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms". John Wiley & Sons, New York, NY, USA, Inc.; 2001.
- Ghosh S., Gagnon R.J.(1989). "A comprehensive literature review and analysis of the design, balancing and scheduling of assembly systems". *International Journal of Production Research*, 27(4): 637–670.
- Hu X., Wu E., Jin Y.(2008)."A station-oriented enumerative algorithm for two-sided assembly line balancing".*European Journal of Operational Research*, 186: 435–40.
- Karp, R.M.( 1972), "Reducibility among combinatorial problems". *Proc. of a Symp. on the Complexity of Computer Computations*, New York, 85-103

- 
- <sup>1</sup> Baybars
  - <sup>2</sup> Ghosh and Gagnon
  - <sup>3</sup> Boysen et al.
  - <sup>4</sup> Becker and Scholl
  - <sup>5</sup> Battaia and Dolgui
  - <sup>6</sup> Lee et al.
  - <sup>7</sup> Chutima& Chimklai
  - <sup>8</sup> Bartholdi
  - <sup>9</sup> Xiaofeng et al.
  - <sup>10</sup> Özbakir & Tapkan
  - <sup>11</sup> Simaria & Vilarinho
  - <sup>12</sup> Özcan & Toklu
  - <sup>13</sup> Tapkan et al.
  - <sup>14</sup> Simaria & Vilarinho
  - <sup>15</sup> Özbakir & Tapkan
  - <sup>16</sup> zoning constraints
  - <sup>17</sup> Chutima & Chimklai
  - <sup>18</sup> Naked and Nishiwaki
  - <sup>19</sup> Corominas et al.
  - <sup>20</sup> Karp
  - <sup>21</sup> The weighted smoothness index
  - <sup>22</sup> Deb
  - <sup>23</sup> Özcan & Toklu

