



Paper Type: Original Article



# Multi-model Assembly Line Balancing and Sequencing with Operators' Learning and Forgetting Effects under Uncertainty

Ahmad Faridanifar, Parvaneh Samouei\*

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran;  
ahmad.faridani@yahoo.com; p.samouei@basu.ac.ir.

Citation:



Faridanifar, A., & Samouei, P. (2022). Multi-model assembly line balancing and sequencing with operators' learning and forgetting effects under uncertainty. *Journal of decisions and operations research*, 6(4), 497-517.

Received: 04/07/2021

Reviewed: 12/03/2021

Revised: 10/09/2021

Accept: 16/10/2021

## Abstract

**Purpose:** One of the topics for manufacturers today is to discuss the diversity of customer tastes, which to manage this situation with the least change in products, requires multiple lines that have the necessary flexibility to produce these products. On the other hand, many products require assembly operations. The main purpose of this article is to balance these issues according to the conditions of the workforce and different products.

**Methodology:** This paper presents two mathematical models to minimize the number of workstations per given cycle time. In the first model, all parameters are definite. Since customer demand may not be constant and this factor can affect the cycle time, the second model uses a robust approach to this issue.

**Findings:** Analysis of various issues shows that a robust modeling approach provides a more reliable design and allows decision makers to have better assembly based on a better understanding of short-term and long-term conditions under conditions of demand uncertainty.

**Originality/Value:** In this paper, two new mathematical models for assembly line balance are presented. Multi-models in which assembly operations are performed manually by workers and for more accurate planning, the differences that workers have in terms of learning and forgetfulness effect on assembly line balance are considered.

**Keywords:** Assembly line balancing, Learning and forgetting effect, Multi-model assembly line.

Corresponding Author: p.samouei@basu.ac.ir

doi:10.22105/DMOR.2021.265665.1294



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



نوع مقاله: پژوهشی

6

## بالانس و توالی خطوط مونتاژ مدل چندگانه با در نظر گرفتن اثر یادگیری و فراموشی اپراتورها تحت شرایط عدم قطعیت

احمد فریدانی فر، پروانه سموئی\*

گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

چکیده

**هدف:** یکی از موضوعات امروزه تولیدکنندگان، بحث تنوع سلیقه‌های مشتریان است که برای مدیریت این شرایط با کمترین تغییر در محصولات تولیدی، نیاز به خطوط چندگانه است که انعطاف لازم برای تولید این محصولات را دارا باشند. از سویی خیلی از محصولات نیازمند عملیات مونتاژند. هدف اصلی مقاله بالانس این دسته از مسائل با توجه به شرایط نیروی کار و محصولات مختلف است. **روش‌شناسی پژوهش:** در این مقاله با ارائه مدل‌های ریاضی به حداقل کردن تعداد ایستگاه‌های کاری به ازای یک‌زمان سیکل معین پرداخته می‌شود. در مدل اول تمام پارامترها قطعی است. از آنجاکه ممکن است تقاضای مشتریان ثابت نباشد و این عامل می‌تواند روی زمان سیکل اثرگذار باشد در مدل دوم، از رویکرد استوار برای این مسئله استفاده می‌شود.

**یافته‌ها:** تجزیه و تحلیل روی مسائل مختلف نشان می‌دهد که رویکرد مدل‌سازی استوار طراحی مطمئن‌تری ارائه می‌دهد و به تصمیم‌گیرندگان اجازه می‌دهد تا مونتاژ بهتری بر اساس درک بهتر از شرایط کوتاه‌مدت و بلندمدت تحت شرایط عدم قطعیت تقاضا داشته باشند.

**اصالت/ارزش افزوده علمی:** در این مقاله دو مدل ریاضی جدید برای بالانس خط مونتاژ مدل‌های چندگانه ارائه می‌گردد که در آن عملیات مونتاژ توسط کارگران و به شکل دستی صورت می‌پذیرد و برای برنامه‌ریزی دقیق‌تر، تفاوت‌هایی که کارگران از منظر اثر یادگیری و فراموشی دارند، بر روی بالانس خط مونتاژ منظور گردید.

کلیدواژه‌ها: اثر یادگیری و فراموشی کارگران، بالانس خطوط مونتاژ، خط مونتاژ مدل‌های چندگانه.

### ۱- مقدمه

امروزه شرایط در بازارهای رقابتی به‌گونه‌ای است که تولید به‌موقع و مقرون‌به‌صرفه جهت پاسخگویی به نیازهای متنوع مشتریان در حال تبدیل شدن به یک موضوع مهم و حیاتی شده است. حال اینکه این امر باعث گردیده بازارهای رقابتی شرکت‌ها را مجبور کند تا با برآورده ساختن خواسته‌های متنوع مشتریان مختلف، محصولات متنوعی تولید کنند و سهم بازار خود را افزایش دهند (جعفری اصل و همکاران<sup>۱</sup>).

<sup>1</sup> Jafari Asl et al.

\* نویسنده مسئول

p.samouei@basu.ac.ir

10.22105/DMOR.2021.265665.1294



۲۰۱۹)؛ بنابراین پویا و رقابتی شدن شرایط بازارها، باعث شده است سازمان‌ها برای حفظ و بقاء به دنبال افزایش کارایی و بهینه‌سازی عملیات تولیدی خود باشند و عوامل متفاوتی را در راستای بهینه‌سازی فعالیت‌ها و پاسخگویی بهنگام به تقاضاهای مشتریان مدنظر قرار دهند (فخرزاد و علی نژاد<sup>۱</sup>، ۲۰۱۳). یکی از این عوامل طراحی خط مونتاژ است، به طوری که یکی از مسائل بسیار مهم در صنعت می‌باشد و از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. در واقع می‌توان گفت یکی از مهم‌ترین بخش‌هایی که در بسیاری از کارخانه‌ها مشاهده می‌شود، بخش مونتاژ است. حال آنکه خط مونتاژ، خطی است که در آن محصولات نیمه‌کامل، طی یک توالی از ایستگاه‌هایی که با یکدیگر به وسیله سیستم‌های انتقال مواد متصل شده‌اند، حرکت می‌کنند و در طی هر ایستگاه، فعالیتی جهت تکمیل محصول انجام می‌گیرد.

در ادامه یکی از مهم‌ترین مسائلی که در ارتباط با خط مونتاژ با توجه به زمان سیکل مطرح می‌گردد، مسئله بالانس خط مونتاژ ( $ALBP^2$ ) است که در آن مشخص می‌شود، فعالیت‌ها با توجه به روابط پیش‌نیازی‌شان به چه شکل باید به ایستگاه‌ها تخصیص یابند. برای این مسائل بر اساس تعداد مدل‌های مختلف محصول و تنوع تولید، دسته‌بندی‌های مختلفی در زمینه بالانس خطوط مونتاژ انجام گرفت که به مدل‌های تکی، مدل‌های ترکیبی و مدل‌های چندگانه تقسیم شدند. در مدل‌های تکی، خط قادر به تولید یک نوع محصول است. مدل‌های ترکیبی، مدل‌های مختلفی از یک نوع محصول را مونتاژ می‌کند و در آخر مدل‌های چندگانه که در آن محصولات متنوعی در دسته‌هایی با اندازه و زمان‌های آماده‌سازی مختلف مونتاژ می‌شوند.

تنوع سلیقه و تقاضاهای مشتریان به سرعت در حال تغییر است، به همین جهت در نظر گرفتن یک خط مونتاژ انعطاف‌پذیر و کاملاً متعادل در این گونه محیط‌ها که به سرعت نیز در حال تغییر می‌باشند، می‌تواند یکی از شاخص‌های اصلی موفقیت باشد (جعفری اصل و همکاران، ۲۰۱۹). به طوری که اهمیت و ویژگی‌های خط مونتاژ مدل‌های چندگانه باعث می‌شود، بسیاری از صنایع و کارخانه‌ها از این خطوط استفاده کنند، زیرا این خطوط قادرند تقاضای متنوع مشتریان را بدون نیاز به موجودی‌های بالا تأمین کند (موندن<sup>۳</sup>، ۱۹۹۴)، سرمایه‌گذاری جهت استفاده از خطوط اضافی را به تعویق بیندازد، سهولت سازگاری در تولید با توجه به تقاضاهای مختلف را به همراه داشته باشد، باعث کاهش هزینه تولید و ... نیز می‌شوند (باتایی و دولگونی<sup>۴</sup>، ۲۰۱۳). همچنین تفاوت بین محصولات در خطوط مونتاژ مدل‌های چندگانه فقط به گزینه‌های سفارشی یک محصول اساسی محدود نمی‌شود، زیرا این خطوط قادر به تولید کالاهایی با کاربردهای متنوع هستند. به عنوان مثال، این خطوط برای شرکت‌هایی که برای مشتریان خاص محصولاتی با عملکردهای خاص (ماشین‌آلات کشاورزی) تولید می‌کنند مناسب است (جعفری اصل و همکاران، ۲۰۱۹). ضمن اینکه خطوط مونتاژ مدل‌های چندگانه در مقایسه با مدل تکی و ترکیبی علیرغم وجود تشابه فرآیند هر مدل در خط مونتاژ، به علت تفاوت مشخصات مدل‌ها، زمان عملیات هر مدل، مشخصات قطعات و میزان مصرف آن‌ها، باعث پیچیدگی بیشتر سیستم مونتاژ می‌گردد. در واقع آنچه در خصوص این خطوط نیز باید در نظر گرفته شود و عمده‌ترین قسمت مسئله بالانس خط مونتاژ مدل‌های چندگانه را نیز تشکیل می‌دهد بحث توالی و تعیین ترتیبی است که در آن محصولات متفاوت و فعالیت‌های مختلفی برای مونتاژ وجود دارد؛ زیرا همان‌طور که گفته شد، نسبت تشابه بین محصولات تولیدشده تمایز چشمگیری بین خطوط مونتاژ مدل ترکیبی و مدل‌های چندگانه ایجاد کرده و این اختلافات توالی تولید دلخواه را در خطوط مونتاژ مدل‌های چندگانه امکان‌پذیر نمی‌کند. لذا جهت پاسخگویی به نیازهای متنوع مشتریان و باقی ماندن در عرصه رقابت شرکت‌ها مجبور به شخصی‌سازی محصولات خود شدند و برنامه‌ریزان خط مونتاژ توجه بیشتری به خط مونتاژ مدل‌های چندگانه کردند؛ بنابراین، بالانس خط مونتاژ مدل‌های چندگانه ( $MuMAB^5$ )، به عنوان یک مسئله اصلی از برنامه‌ریزی و پیکربندی خط مونتاژ، برای شرکت‌های تولیدی بسیار حیاتی است (یو و شی<sup>۶</sup>، ۲۰۱۳). حال به موازات افزایش نیاز به این سیستم‌های تولیدی جهت پاسخگویی بهنگام به تقاضاهای مشتریان، در کنار آن تغییرات فعالیت‌های انجام‌شده توسط کارگران نیز افزایش می‌یابد که این ممکن است اثر یادگیری را محدود کند. به طوری که امروزه یادگیری نیروی انسانی در چندین زمینه مورد توجه قرار می‌گیرد که یکی از آن موارد مسائل بالانس خط مونتاژ است. ضمن این که یادگیری می‌تواند روی عملکرد سیستم مونتاژ تأثیر بسزایی بگذارد (لولی و همکاران<sup>۷</sup>، ۲۰۱۷). در کنار اهمیت بسیار بالای اثرات یادگیری، معمولاً مدل‌های منحنی یادگیری که استفاده

<sup>1</sup> Fakhrzad and Alinezhad

<sup>2</sup> Assembly Line Balancing Problem

<sup>3</sup> Monden

<sup>4</sup> Battaia and Dolgui

<sup>5</sup> Multi-model Assembly Line Balancing

<sup>6</sup> Yu and Shi

<sup>7</sup> Lolli et al.



می‌شوند فرض می‌کنند که یک کار تکراری به‌طور مداوم بی‌توجه به وجود دوره‌های وقفه احتمالی بین تکرارهای متوالی انجام می‌شود. از آنجاکه این وقفه‌ها باعث فراموشی می‌شوند، عملکرد واقعی نسبت به عملکرد پیش‌بینی شده توسط مدل‌های منحنی یادگیری معمولی پایین‌تر خواهد بود که این زمینه توجه به اثر فراموشی را دوچندان می‌کند (صادقی گیوی<sup>۱</sup>، ۲۰۱۴). به همین دلیل این افزایش تنوع در فعالیت‌ها توسط کارگران زمینه‌ساز به‌کارگیری اثرات یادگیری و فراموشی برای کارگران در بالانس خط مونتاژ خواهد شد.

همچنین در دنیای واقعی، فرایندهای مونتاژ به منابع مختلف عدم قطعیت، همچون تغییرات در زمان عملیات، تقاضا و غیره بستگی دارد. این تغییرات اهداف مونتاژ را تهدید می‌کند و محافظت در برابر آن‌ها بسیار ضروری است؛ بنابراین مسئله دیگری که در این مقاله مورد توجه قرار می‌گیرد بحث تصادفی کردن و عدم قطعیت است که در اینجا این عدم قطعیت به زمان سیکل تعلق دارد. حال آنکه تقاضا به‌عنوان مهم‌ترین عامل عدم قطعیت با توجه به وجود تقاضاهای متنوع مشتریان و در نظر گرفتن مدل‌های چندگانه جهت پاسخگویی به‌عنوان مهم‌ترین عامل تلقی می‌گردد.

در واقع در این مقاله به این سؤال که بالانس خط مونتاژ دستی با در نظر گرفتن اثر یادگیری و فراموشی کارگران در شرایط عدم قطعیت چگونه لحاظ می‌گردد، پاسخ داده می‌شود.

## ۲- پیشینه پژوهش و مفاهیم لازم

### ۲-۱- پیشینه پژوهش

تاریخ شروع استفاده از خطوط مونتاژ در سال ۲۰۰ قبل از میلاد در چین است که نشان‌دهنده اهمیت بسیار بالای این خطوط است. به‌طوری‌که یکی از پیشگامان جهت استفاده از خطوط مونتاژ هنری فورد بوده است که روش‌های ابتکاری او راه استفاده از خطوط مونتاژ در سراسر جهان را تسریع کرد (تومپولوس<sup>۲</sup>، ۲۰۱۴). مسائل بالانس خط مونتاژ در ابتدا توسط هنری فورد در کارخانه‌های صنعتی فورد مطرح شد و برای اولین بار در قالب یک مدل ریاضی توسط سالوسون<sup>۳</sup> (۱۹۵۵) مطرح گردید. ضمن اینکه برای حل مسائل خطوط مونتاژ مدل تکی، تانگاولو و شتی<sup>۴</sup> (۱۹۷۱) برای بعضی مسائل راه‌حل‌های ابتکاری را ارائه دادند.

در مورد بالانس خطوط مونتاژ مدل‌های چندگانه مطالعات بسیار اندکی انجام شده که درک این مسائل به شناسایی ویژگی‌ها و مسائلی که هنوز پوشش داده نشده‌اند کمک می‌کند و خطوط جدید تحقیق را باز می‌کنند (چیانگ و همکاران<sup>۵</sup>، ۲۰۰۷). در ضمن آنچه در خصوص این خطوط حائز اهمیت است بحث توالی به دلیل وجود فعالیت‌های مختلف است، به‌طوری‌که کومار و همکاران<sup>۶</sup> (۲۰۱۹) به برنامه‌ریزی توالی بهینه برای سیستم‌های مونتاژ قابل تنظیم مجدد مدل چندگانه پرداختند. همچنین ژانگ و همکاران<sup>۷</sup> (۲۰۲۱) با استفاده از یک مدل مبتنی بر ریاضی و الگوریتم سنجاقک، به بررسی مسئله بالانس و توالی خط مونتاژ رباتیک مدل ترکیبی  $U$  شکل اشاره کردند. همچنین از آنجا خطوط چندگانه باعث عدم بالانس خطوط و ایستگاه می‌شوند. کوکران<sup>۸</sup> (۱۹۷۳) مسئله عدم بالانس ایستگاه را به دلیل نبود یادگیری توصیف می‌کند و استراتژی‌هایی را برای به حداقل رساندن آن پیشنهاد می‌کند.

ضمناً در طی فرآیند یادگیری، اگر تولید برای یک دوره زمانی متوقف شود، ممکن است پدیده فراموشی رخ دهد. این در حالی است که در مقایسه با منحنی یادگیری، مدل‌سازی فراموشی در ادبیات مورد توجه زیادی قرار نگرفته است (کر و همکاران<sup>۹</sup>، ۱۹۹۹).

<sup>1</sup> Sadeghigivi

<sup>2</sup> Thomopoulos

<sup>3</sup> Salvesson

<sup>4</sup> Thangavelu and Shetty

<sup>5</sup> Chiang et al.

<sup>6</sup> Kumar et al.

<sup>7</sup> Zhang et al.

<sup>8</sup> Cochran

<sup>9</sup> Kher et al.



در ادامه باید توجه داشت که اکثر تحقیقات بالانس خط، اطلاعات کاملی از تمام داده‌ها را فرض می‌گیرد؛ اما امروزه ادغام مکانیسم‌های حفاظت در برابر منابع عدم قطعیت، برای دستیابی به اهداف تولید، بسیار مهم است. برای این منظور می‌توانیم از بهینه‌سازی استوار استفاده کنیم که یکی از روش‌های بهینه‌سازی اساسی است که عدم قطعیت و اثرات آن را مدل می‌کند (هزیر و دولگوئی<sup>۱</sup>، ۲۰۱۳).

به همین جهت زو و شیائو<sup>۲</sup> (۲۰۱۱) برای مسئله بالانس خطوط مونتاژ مدل‌های ترکیبی، عدم قطعیت در زمان فعالیت‌ها و تقاضا را مورد بررسی قرار دادند و برای حل آن‌ها یک دستور لکسیکوگراف در سناریوی بدترین حالت  $\alpha$  و یک الگوریتم ژنتیک پیشنهاد دادند. پیرا و آلوارز میراندا<sup>۳</sup> (۲۰۱۷) نیز یک مسئله بالانس خط مونتاژ را با عدم قطعیت در زمان‌های فعالیت بررسی کردند و برای مقابله با عدم قطعیت یک فرمول‌بندی استوار برای مدیریت تغییرات در زمان عملیات را ارائه دادند و از روش شاخه و کران برای حل مسئله استفاده نمودند.

سمویی و عشایری<sup>۴</sup> (۲۰۱۹) دو مدل ریاضی جدید برای مسئله بالانس خط مونتاژ نیمه اتوماتیک مدل ترکیبی را پیشنهاد کردند. در مقاله آن‌ها خط به صورت نیمه اتوماتیک و شکل‌های مختلفی از اجرای عملیات، از اپراتور انسانی برای کمک به ربات تا راه‌حل رباتیک در نظر گرفته شد. ضمن اینکه اپراتورها ممکن است مهارت‌های متفاوتی داشته باشند و اپراتورهای ایستگاه‌های مجاور مجاز به همکاری باهم می‌باشند. در مدل اول زمان سیکل مشخص و هدف حداقل کردن هزینه‌های ثابت و متغیر مربوط به زمان‌های آماده‌سازی خط مونتاژ بود؛ اما در مدل دوم زمان سیکل متغیر بود و بین حدود بالا و پایین تغییر می‌کرد که این حدود، تغییرات تقاضای مورد انتظار آینده را نمایان می‌ساخت. هدف این مدل حداقل کردن هزینه و زمان سیکل بود و برای رسیدن به نتایج بهتر و قابل اعتماد یک راه‌حل استوار برای سطوح مختلف اطمینان  $\alpha$  ارائه گردید.

در این بخش با توجه به مطالعات انجام‌شده در خصوص خطوط مونتاژ، خطوط مونتاژ مدل‌های چندگانه، اثر یادگیری و فراموشی کارگران و خطوط مونتاژ در شرایط عدم قطعیت، می‌توان با توجه به روش‌های حل و اهداف مورد استفاده در مقالات و میزان گستردگی آن‌ها و همچنین نقاط نادیده گرفته‌شده در آن‌ها چنین نتیجه گرفت که:

در مورد خطوط چندگانه مطالعات بسیار اندکی انجام‌شده و حتی به تازگی، بسیاری از شرکت‌ها خطوط چندگانه را استفاده کرده‌اند (چیانگ و همکاران، ۲۰۰۷). همچنین ادبیات نشان می‌دهد که *ALBP* ساده (*SALBP*)<sup>۵</sup> به *NP-hard* معروف است (په و کائو<sup>۱</sup>، ۲۰۰۹)، پس بالانس خطوط مونتاژ مدل‌های چندگانه در طبقه‌بندی از بهینه‌سازی ترکیباتی *NP-hard* می‌باشند که منجر به استفاده بیشتر از روش‌های فرا ابتکاری نسبت به روش‌های دیگر در این مسائل می‌شود. در مورد توالی و بالانس خطوط مونتاژ مدل‌های ترکیبی مقالات فراوانی به چشم می‌خورد ولی در خصوص مدل‌های چندگانه این موضوع بسیار کم دیده می‌شود. ضمن اینکه تأثیر یادگیری بر روی سیستم‌های تولید مداوم مانند خطوط مونتاژ و خطوط تولید تا حد زیادی نادیده گرفته‌شده است. جالب توجه اینکه، مسئله *ALBP* تصادفی با اثرات یادگیری هنوز هم مورد بررسی قرار نگرفته است (لولی و همکاران، ۲۰۱۷). بعلاوه در مقایسه با منحنی یادگیری، مدل‌سازی فراموشی در ادبیات مورد توجه زیادی قرار نگرفته است و کمتر به آن پرداخته‌شده است (کر و همکاران، ۱۹۹۹). مسائل استوار در خصوص خطوط مدل‌های چندگانه نیز نسبت به مدل‌های ترکیبی بشدت نادیده گرفته‌شده، این در حالی است که امروزه تنوع نیازها و تقاضاهای مشتریان افزایش یافته است و باید بیشتر مورد توجه قرار بگیرد.

به طور خلاصه، تحقیقات در مورد بالانس خطوط مونتاژ مدل‌های چندگانه بسیار محدود بوده است. اگرچه برخی از مطالعات در این خصوص صورت گرفته، اما آن‌ها تأثیر یادگیری و فراموشی کارگران را در نظر نگرفتند. جالب توجه اینکه در ارتباط با عدم قطعیت تاکنون مطالعاتی در مورد بالانس خطوط مونتاژ مدل‌های چندگانه با در نظر گرفتن اثر یادگیری و فراموشی انجام نشده است. به همین جهت و با توجه به شکاف‌های تحقیقاتی اشاره‌شده، در این مقاله برای توالی و مدل استوار و قطعی بالانس خطوط مونتاژ مدل‌های چندگانه با در نظر گرفتن اثر یادگیری و فراموشی کارگران، از خطوط چندگانه به دلیل انعطاف‌پذیری بالا در پاسخ به تقاضاهای متنوع مشتریان، توالی و بالانس

<sup>10</sup> Hazir and Dolgui

<sup>1</sup> Xu and Xiao

<sup>2</sup> Pereira and Álvarez-Miranda

<sup>3</sup> Samouei and Ashayeri

<sup>4</sup> Simple Assembly Line Balancing Problem

<sup>5</sup> Yeh and Kao

به دلیل وجود فعالیت‌های مختلف در حال انجام برای کارگران، استفاده هم‌زمان از اثر یادگیری و فراموشی برای کارگران به خاطر وجود تکرار در فعالیت‌ها و وقفه در تولید و رویکردی استوار با در نظر گرفتن عدم قطعیت برای زمان سیکل با توجه به تقاضاهای متنوع مشتریان استفاده شده است.

## ۲-۲- مفاهیم اولیه

از جمله مفاهیم اولیه می‌توان به:

خط مونتاژ: خطی است که در آن محصولات نیمه‌کامل، طی یک توالی از ایستگاه‌هایی که با یکدیگر به وسیله سیستم‌های انتقال مواد متصل شده‌اند، حرکت می‌کنند و در طی هر ایستگاه، فعالیتی جهت تکمیل محصول انجام می‌گیرد.

مسئله بالانس خط مونتاژ: گرایشی است در وصول به مناسب‌ترین بالانس مابین نیروی انسانی، ماشین‌آلات و تجهیزات به نحوی که دسترسی به حجم مشخصی از تولید امکان‌پذیر گردد.

زمان سیکل: فاصله زمانی بین خروج دو محصول متوالی از انتهای خط مونتاژ را زمان سیکل گویند. به عبارتی نرخ تولید خط مونتاژ نیز است.

ایستگاه کاری: قسمتی از خط مونتاژ که در آن تعدادی فعالیت انجام می‌گیرد. از آنجاکه خط مونتاژ از چندین ایستگاه تشکیل می‌شود، در یک ایستگاه ضمن اینکه دارای محدوده مشخصی است، به آن چند فعالیت مشخص و محدود اختصاص می‌یابد.

زمان فعالیت: ساخت یک محصول در یک خط مونتاژ نیازمند تقسیم کل کار در یک مجموعه از عملیات ابتدایی به نام فعالیت است. فعالیت‌ها واحدهای جدایی‌ناپذیر کار هستند و بنابراین هر فعالیت با یک زمان پردازش که به‌عنوان زمان فعالیت گفته می‌شود همراه است (بویسن و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۰۸).

اثر یادگیری: در تحقیقات یادگیری نیروی انسانی در چندین زمینه مورد توجه قرار گرفته است که یکی از آن‌ها بالانس خط مونتاژ است (لولی و همکاران، ۲۰۱۷). مطالعه در مورد فعالیت‌های دستی نشان می‌دهد، هر قدر تمرین و تکرار در انجام یک فعالیت بیشتر باشد، زمان لازم برای انجام آن فعالیت کاهش می‌یابد؛ بنابراین وقتی کالای جدیدی تولید می‌شود مسلماً اولین، دومین، سومین و ... از محصول دارای زمان ساخت متفاوت است و خودبه‌خود محصولات اولیه زمان ساخت بیشتری را به خود اختصاص می‌دهند (حسین‌زاده و متقی<sup>۲</sup>، ۲۰۱۴). از این رو، در بسیاری از موارد عملی، عملکرد اپراتور به‌طور پیوسته با گذشت زمان بهبود و زمان پردازش کارها کاهش می‌یابد که این پدیده به‌عنوان اثر یادگیری شناخته می‌شود (فخرزاد و علی‌نژاد، ۲۰۱۳). همچنین یک منحنی یادگیری یا منحنی بهبود می‌تواند به‌عنوان یک نموداری تعریف شود که منعکس‌کننده این واقعیت است که همان‌طور که کارگران فعالیت در حال انجام خود را تکرار می‌کنند، عملکرد را نیز بهبود می‌بخشند. منحنی یادگیری در صنعت طی چند دهه گذشته توسط بسیاری از محققان مورد مطالعه قرار گرفته است. این پدیده اولین بار توسط رایت<sup>۳</sup> (۱۹۳۶) گزارش شده است که توضیح داد که با افزایش تعداد هواپیماهای تولید شده، هزینه مستقیم فعالیت برای تولید هواپیما کاهش می‌یابد. ایده منحنی یادگیری این است که پیشرفت اتفاق می‌افتد زیرا کارگران می‌آموزند که چگونه می‌توانند یک فعالیت را بهتر انجام دهند. ضمن اینکه عوامل دیگری نیز باعث بهبود عملکرد با گذشت زمان نیز می‌گردد که از جمله آن‌ها می‌توان به تجزیه و تحلیل کار و زمان، گردش شغلی و انگیزه کارگران اشاره کرد (عزیزی و همکاران<sup>۴</sup>، ۲۰۱۰). همچنین رایت نشان داد چگونه هزینه زمانی نیروی کار با افزایش مهارت در انجام آن کار کاهش می‌یابد. او بیان نمود که درصد یادگیری افراد به عوامل بسیاری از جمله میزان آموزش، استعداد، وضعیت جسمانی و روانی، نوع ابزار، سیستم حقوق و دستمزد، همگونی اجزای تشکیل‌دهنده کار و ... بستگی دارد (حسین‌زاده و متقی، ۲۰۱۴).

<sup>1</sup> Boysen et al.

<sup>2</sup> Hosseinzade and Mottaghi

<sup>3</sup> Wright

<sup>4</sup> Azizi et al.







اثر فراموشی: در طی فرآیند یادگیری، فراموشی را می‌توان از دست دادن اطلاعات آموخته‌شده به دلیل وقفه در تولید، یا خستگی و بی‌حوصلگی کارگران تعریف کرد (عزیزی و همکاران، ۲۰۱۰). در کنار اهمیت بالای اثرات یادگیری، معمولاً در مدل‌های منحنی یادگیری مورد استفاده فرض بر این است که یک کار تکراری به‌طور مداوم و بی‌توجه به وجود دوره‌های وقفه احتمالی در حال انجام است. به طوری که این وقفه‌ها باعث فراموشی می‌شوند و این فراموشی سبب می‌گردد عملکرد واقعی نسبت به عملکرد پیش‌بینی شده توسط مدل‌های منحنی یادگیری معمولی پایین‌تر باشد که در این میان لزوم توجه به اثرات فراموشی دوچندان می‌گردد.

به همین جهت صنایع مقادیر قابل توجهی هزینه برای مقابله با اثرات فراموشی جهت آموزش و بازآموزی کارگران صرف می‌کنند. منحنی یادگیری رایت که بیشترین استفاده را در بحث یادگیری دارد، فرض می‌کند که هر واحد تولیدشده از کیفیت قابل قبولی برخوردار است که متأسفانه در بسیاری از محیط‌های تولیدی این‌گونه نیست (صادقی گیوی، ۲۰۱۴). بسیاری از مطالعات گزارش داده‌اند که یک فرآیند تولید ممکن است خارج از کنترل باشد، بنابراین کالاهای معیوب و نیاز به اصلاح را تولید می‌کند (جابر<sup>۱</sup>، ۲۰۱۶). جابر و گیفریدا<sup>۲</sup> (۲۰۰۴) منحنی یادگیری رایت را با احتساب زمان دوباره‌کاری اصلاح کردند. نظر به اینکه بسیاری از مدل‌های ریاضی از زمان رایت باهدف بهبود توانایی پیش‌بینی زمان عملکرد آینده ساخته‌شده‌اند؛ اما آنچه در این میان حائز اهمیت است، عدم تأثیر وقفه‌ها یا نادیده گرفتن آن‌ها در طی فرآیند یادگیری یک فعالیت معین در یک سیستم با تولید متناوب است. در واقع برخلاف مدل‌های یادگیری که بر اساس داده‌های واقعی جمع‌آوری شده در صنعت است، همه مدل‌های مربوط به فراموشی مفهومی هستند، زیرا نظارت و تحلیل بر تأثیر وقفه‌ها دشوار است (گلوبرسون و همکاران<sup>۳</sup>، ۱۹۸۹).

رویکرد بهینه‌سازی استوار: در برنامه‌ریزی ریاضی معمولاً مسائل با پیش‌فرض قطعی بودن داده‌ها مدل‌سازی و حل می‌شوند. پیش‌فرض اصلی برنامه‌ریزی ریاضی در شرایط اطمینان، توسعه مدل بر اساس داده‌های معین و برابر با مقادیر اسمی است. در این‌گونه مدل‌ها اثر عدم اطمینان داده‌ها در کیفیت و امکان‌پذیری جواب‌ها تأثیری ندارد، در نتیجه در مسائل دنیای واقعی ممکن است با تغییر یکی از داده‌ها، تعداد زیادی از محدودیت‌ها نقض و جواب به‌دست‌آمده غیر بهینه یا حتی غیرممکن شود. از این رو، چالش اصلی در این‌گونه مسائل، رسیدن به پاسخ مسئله است که در مقابل عدم اطمینان داده‌ها استوار باشد؛ به اصطلاح این جواب‌ها را جواب‌های استوار و این دسته از مسائل بهینه‌سازی‌ها را مسائل بهینه‌سازی استوار می‌نامند. نظریه برنامه‌ریزی یا بهینه‌سازی استوار روش ریسک‌گریزی را برای مواجهه با عدم اطمینان فراهم می‌سازد.

بنابراین با توجه به اینکه در بسیاری از مسائل بهینه‌سازی، فرض بر این است که داده‌های مسئله با اطمینان شناخته می‌شوند و با این حال، این در عمل به ندرت اتفاق می‌افتد. می‌توان گفت در اغلب اوقات، داده‌های واقع‌گرایانه به دلیل ماهیت تصادفی، خطاهای اندازه‌گیری یا دلایل دیگر در معرض عدم اطمینان هستند. پس از آنجا که حل مسائل بهینه‌سازی، اغلب حساسیت بالایی را به تغییر و انحراف داده‌ها نشان می‌دهد، همان‌طور که توسط بنتال و نمیروفسکی<sup>۴</sup> (۲۰۰۰) نشان داده شده است، نادیده گرفتن عدم قطعیت داده‌ها می‌تواند به راه‌حل‌هایی که برای برنامه‌های کاربردی عملی کم و حتی غیرقابل نفوذ هستند منجر شود. لذا بهینه‌سازی استوار متعلق به یک روش مهم برای مقابله با مسائل بهینه‌سازی با عدم اطمینان داده‌ها است. در مرحله اول این نوع روش، مجموعه داده‌های قطعی در فضای غیرقطعی تعریف شده است و در مرحله دوم بهترین راه‌حل شدنی برای هرگونه تحقق عدم اطمینان داده‌ها در مجموعه داده‌شده به‌دست‌آمده است.

### ۳- تعریف مسئله

در کشور ما، روند تولید در بسیاری از صنایع هنوز بر پایه روش‌های سنتی و دستی استوار است و افزایش تولید یکی از مهم‌ترین راهکارهای بهبود وضعیت اقتصادی محسوب می‌شود؛ بنابراین در صنایع مونتاژ دستی، مطالعه علمی، شناخت صحیح و دقیق فعالیت‌ها و زمان انجام آن‌ها می‌تواند بهره‌وری را افزایش دهد (موسوی و همکاران<sup>۵</sup>، ۲۰۱۶). حال با توجه به دسته‌بندی مدل‌های مختلف محصول و در نظر گرفتن خواسته‌های متنوع مشتریان توسط بازارهای رقابتی امروزه که به‌نوعی اصل بقای آن‌ها است، در این پژوهش خطوط مونتاژ چندگانه در نظر

<sup>1</sup> Jaber

<sup>2</sup> Jaber and Guiffida

<sup>3</sup> Globerson et al.

<sup>4</sup> Ben-Tal and Nemirovski

<sup>5</sup> Musavi et al.



گرفته شد. در کنار این مزایا، تفاوت مشخصات مدل‌ها، زمان عملیات هر مدل و دیگر عواملی که در خصوص پیچیدگی این خطوط گفته شد، باعث می‌شود تغییرات فعالیت انجام‌شده توسط یک کارگر افزایش یابد که این خود نیز ممکن است اثر یادگیری را محدود کند (باتایی و دولگوئی، ۲۰۱۳). با این حال این افزایش مختلف فعالیت‌های انجام‌شده توسط کارگران زمینه‌ساز به کارگیری اثرات یادگیری و فراموشی برای کارگران در بالانس خط مونتاژ خواهد شد. ضمن اینکه از آنجاکه فعالیت‌های انجام‌شده در خطوط مونتاژ طبیعتاً تکراری است و در بالانس خطوط به دنبال کاهش زمان ازدست‌رفته یا کاهش تعداد ایستگاه‌ها و زمان بیکاری سیستم هستیم، تکنیک بالانس خط بسیار کمک‌کننده خواهد بود. به طوری که فعالیت‌های با ماهیت تکراری، فرصتی بهتر از یک فعالیت را برای دستیابی به بهره‌وری بالاتر فراهم می‌کنند، زیرا با تجربه و تمرین اضافی می‌توان میزان تولید را بهبود بخشید. فلذا یادگیری را می‌توان پدیده‌ای تعریف کرد که با افزایش تعداد تکرار، زمان و تلاش صرف شده برای انجام یک فعالیت تکراری کاهش می‌یابد (آردیتی و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۰۱). با این حال در طی فرآیند یادگیری، اگر تولید برای یک دوره زمانی متوقف شود، یا کارگران خسته و بی‌حوصله باشند ممکن است پدیده فراموشی رخ دهد (عزیزی و همکاران، ۲۰۱۰). بعلاوه همان‌طور که گفته شد در حال حاضر، شرکت‌های تولیدی به‌طور فزاینده‌ای نیاز به پاسخگویی سریع به تقاضای متنوع مشتری را احساس می‌کنند. به همین جهت سفارشی‌سازی انبوه به‌منظور تأمین نیازهای بازار ارائه شد. یک نتیجه مستقیم از تغییر در استراتژی تولید، افزایش پیچیدگی برای اپراتورهای مونتاژ دستی است. به دلیل تنوع زیاد در فعالیت‌های مونتاژ، اپراتور از نظر یادگیری به چالش کشیده می‌شود زیرا قرار نیست هر کاری را به‌طور یکنواخت مرتباً انجام دهد. این زمینه‌ساز یک مرحله یادگیری می‌شود و این باعث می‌شود که در آن زمان سیکل برای اپراتور افزایش یابد (هوت و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۱۸). پس این تغییرات، نیاز توجه به اثرات فراموشی برای کارگران و در کنار آن اثرات یادگیری را نیز دارد. در ضمن با توجه به تکامل به سمت سفارشی‌سازی انبوه، پیش‌بینی زمان سیکل از نظر زمان‌سنجی، زمان‌بر و سخت شده و در ادامه باعث پیچیده شدن بالانس مونتاژ می‌شود. این تغییر مکرر فعالیت برای یک اپراتور منجر به یک تغییر سریع بین دوره‌های یادگیری و فراموشی می‌شود، زیرا تولید یک مدل باعث یک مرحله فراموشی برای مدل دیگر می‌شود (هوت و همکاران، ۲۰۱۹)؛ بنابراین تنوع در تولید محصولات مختلف برای پاسخگویی سریع به تقاضاهای مختلف مشتریان، استفاده از خطوط مونتاژ مدل‌های چندگانه را مورد توجه قرار می‌دهد و از آنجاکه با استفاده از این خطوط نیز می‌توان محصولات مختلفی تولید کرد، بار کاری برای کارگران که به‌صورت دستی در حال فعالیت می‌باشند افزایش چشمگیری ایجاد می‌کند. در کنار همه این عوامل لزوم تغییر در شرایط محصولات تولیدی برای مطابقت با خواسته‌های مشتریان می‌تواند با وقفه در تولید همراه باشد، پس در نظر گرفتن هم‌زمان اثر یادگیری و فراموشی بیش‌ازپیش در این شرایط حائز اهمیت است.

در ادامه از جمله مسائل دیگری که در این تحقیق مورد توجه قرار می‌گیرد یکی بحث توالی، به دلیل وجود محصول متنوع و فعالیت‌های مختلف توسط کارگران متفاوت بر روی محصولات با توجه به نمودار پیش‌نیازی و دیگری تصادفی کردن و عدم قطعیت است که در اینجا این عدم قطعیت با در نظر گرفتن زمان سیکل متغیر صورت می‌گیرد. چراکه در بازار پویای فعلی، حجم تقاضا و حتی نوع محصول ممکن است تغییر کند و این تغییرات می‌تواند بر ظرفیت موردنیاز و زمان سیکل نیز تأثیرگذار باشد (سمونی و عشایری، ۲۰۱۹). برای مقایسه این نتایج، ابتدا یک مدل ریاضی در حالت قطعی برای مسئله پیشنهاد می‌دهیم که هدف از آن به حداقل رساندن تعداد ایستگاه‌ها به ازای یک‌زمان سیکل معین است. حداقل کردن تعداد ایستگاه‌ها می‌تواند علاوه بر پوشش سلاقی مختلف مشتریان، به‌طور غیرمستقیم نیز هزینه‌های احداث ایستگاه‌ها و استخدام و به‌کارگیری نیروی انسانی را نیز به حداقل رساند. در مدل اول تمام پارامترها قطعی لحاظ گردیده‌اند ولی همان‌طور که گفته شد از آنجاکه ممکن است تقاضای مشتریان ثابت نباشد و این عامل هم می‌تواند روی زمان سیکل تأثیرگذار باشد، در ادامه به‌منظور در نظر گرفتن این عدم قطعیت، یک مدل ریاضی استوار برای حل در طی سه سناریوی مختلف ارائه گردیده است.

### ۳-۱- مفروضات مدل

مفروضات و ویژگی‌های اساسی در خصوص مدل‌سازی مسئله قبل از بسط آن به شرح ذیل است:

- محصولات مختلف با روابط پیش‌نیازی مشخص روی یک خط مونتاژ می‌شوند.
- موجودی در جریان ساخت مجاز نیست.

<sup>1</sup> Arditi et al.

<sup>2</sup> Hoedt et al.





- زمان سیکل مشخص است.
- زمان سیکل بیشتر از حداکثر زمان فعالیت‌ها است.
- افق برنامه‌ریزی ثابت است.
- تقاضای هر محصول مشخص است.
- امکان انجام چند کار توسط یک اپراتور در یک لحظه از زمان امکان‌پذیر نیست.
- هر کار تنها یک‌بار در یک ایستگاه انجام می‌گیرد و دوباره‌کاری وجود ندارد.
- کارگران یا توانایی‌های متفاوتی وجود دارند و زمان فعالیت وابسته به اثرات یادگیری و فراموشی کارگران است.
- زمان آموزش متقابل، خرابی ماشین و غیبت کارگران در نظر گرفته نشده است.
- سطح مهارت اولیه از پیش تعریف شده است و از طریق یادگیری و فراموشی تغییر خواهد کرد.
- یادگیری و فراموشی تنها در اثر تکرار و یا توقف تولید آن محصول صورت می‌گیرد.
- زمان تکمیل فعالیت در مدل‌های مختلف می‌تواند متفاوت باشد.
- زمان‌های آماده‌سازی شامل تنها زمان‌های آماده‌سازی بین فعالیت‌ها است، به طوری‌که این زمان‌ها ثابت و قطعی است و اگر زمان فعالیت برای یک مدل صفر باشد، زمان آماده‌سازی برای آن فعالیت نیز صفر در نظر گرفته می‌شود.
- برنامه تولید مشخص است.
- زمان سیکل و تقاضای هر محصول در مدل استوار دارای عدم قطعیت است.

### ۲-۳- نمادگذاری

نمادهای مدل‌سازی مسئله به شرح ذیل می‌باشند:

اندیس‌ها:

- $z_i$ : فعالیت.
- $k, g$ : ایستگاه کاری.
- $m$ : محصولات (مدل) متفاوت.
- $b, b$ : کارگران.
- $u$ : واحد تولید.
- $l$ : فعالیت‌های بدون پیش‌نیازی.
- $t$ : فعالیت‌هایی که پیش‌نیاز دارند ولی پس‌نیاز ندارند.
- $u_m$ : تعداد تولید (تکرار)  $u$  و برای محصول (مدل)  $m$ .
- $m_m$ : تعداد محصولات تولیدی پس از وقفه.

مجموعه‌ها:

- $P_i$ : مجموعه فعالیت‌های پیش‌نیازی فعالیت  $i$ .
- $P_0$ : مجموعه فعالیت‌هایی که هیچ پیش‌نیازی ندارند.
- $I$ : مجموعه فعالیت‌ها در نمودار روابط پیش‌نیازی.

پارامترها:

$c$ : زمان سیکل.

$V$ : تعداد کل فعالیت‌ها در نمودار ترکیبی (combined diagram).

$M$ : تعداد انواع محصولات.

$B$ : حداکثر تعداد کارگران.

$N$ : حداکثر تعداد ایستگاه‌ها.

$m$ : حداکثر تعداد تولید (درواقع حداکثر تولیدی است که از هر محصول می‌توان داشت و برابر با ماکزیمم تقاضای محصولات مدل‌های مختلف است).

$t_{iub}$ : زمان لازم برای انجام فعالیت  $i$  برای تولید  $u$  آمین محصول  $m$  توسط کارگر  $b$ .

$s_{im}$ : زمان آماده‌سازی فعالیت  $i$  برای تولید محصول  $m$  در همان ایستگاه کاری.

$R_b$ : نرخ یادگیری کارگر  $b$ .

$f_b^f$ : نرخ فراموشی کارگر  $b$ .

$FD$ : زمان فراموشی کامل.

$h$ : یک ثابت منفی.

$\psi$ : یک مقدار مثبت بزرگ.

$t_{iub}^f$ : زمان اتمام فعالیت  $i$  برای تولید  $u$  آمین محصول  $m$  توسط کارگر  $b$ .

**متغیرها:**

$y_{bk}$ : اگر کارگر  $b$  به ایستگاه  $k$  اختصاص یابد یک، در غیر این صورت صفر.

$x_{imbk}$ : اگر فعالیت  $i$  و کارگر  $b$  به ایستگاه  $k$  برای تولید محصولات  $m$  تخصیص یابد یک، در غیر این صورت صفر.

$q_{ijm}$ : اگر فعالیت  $i$  قبل از فعالیت  $j$  برای تولید محصول  $m$  در همان ایستگاه تخصیص یابد یک، در غیر این صورت صفر.

### ۳-۳- مدل ریاضی مسئله

در این تحقیق، ما یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط جدید برای مدل چندگانه  $MuMALBP$  و تخصیص فعالیت‌ها به کارگران با سطح مهارت‌های مختلف با در نظر گرفتن هم‌زمان اثر یادگیری و فراموشی را توسعه می‌دهیم. این مدل مبتنی بر مدل‌های ریاضی از پرییرا و آلوارز میراندا (۲۰۱۷) و سمویی و عشایری (۲۰۱۹) است و تمرکز آن بر حداقل کردن تعداد ایستگاه‌ها، جهت اختصاص مناسب کارگران به ایستگاه‌ها و فعالیت کارگران ضمن تأثیر یادگیری و فراموشی بر آنان با توجه شرایط موجود است.

قبل از تشریح فرمول مدل ریاضی، تفاوت آن با مقالات استفاده‌شده در این خصوص بیان می‌گردد که آن‌ها عبارتند از:

۱. در مقاله پرییرا و آلوارز میراندا (۲۰۱۷) از مدل تکی استفاده شده است و اثر یادگیری و فراموشی در آن وجود ندارد.
۲. در مقاله چو و همکاران (۲۰۱۹) از سیستم تولید سلولی استفاده شده است، نرخ یادگیری و فراموشی دارند، مدل آن‌ها چندگانه نبوده و تابع هدف مورد استفاده در مقاله آن‌ها نیز چندهدفه است. ضمن آنکه آن‌ها در مدل خود آموزش متقاطع با اثرات یادگیری و فراموشی را اصل قرار می‌دهند.
۳. در مقاله سمویی و عشایری (۲۰۱۹) مدل آن‌ها ترکیبی است، تابع هدف چندهدفه و به دنبال حداقل کردن هزینه کل بالانس خط می‌باشند.

فرمول مدل ریاضی به شرح ذیل است:

$$\min Z = \sum_{k=1}^N \sum_{b=1}^B y_{bk}, \quad (1)$$

$$\sum_{k=1}^N \sum_{b=1}^B x_{imbk} = 1, \quad i=1, \dots, V; \quad m=1, \dots, M, \quad (2)$$





$$\sum_{b=1}^B y_{bk} \leq 1, \quad k=1, \dots, N, \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^N y_{bk} \leq 1, \quad b=1, \dots, B, \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^V x_{imbk} \leq \Psi \cdot y_{bk}, \quad m=1, \dots, M; b=1, \dots, B; k=1, \dots, N, \quad (5)$$

$$\sum_{g=1}^N \sum_{b=1}^B g \cdot x_{jmbg} \leq \sum_{k=1}^N \sum_{b=1}^B k \cdot x_{imbk}, \quad \forall i \in I-P_0; \forall j \in P_i; m=1, \dots, M, \quad (6)$$

$$x_{imbk} \leq y_{bk}, \quad i=1, \dots, V; m=1, \dots, M; b=1, \dots, B; k=1, \dots, N, \quad (7)$$

$$t_{iumb}^f \leq c, \quad i=1, \dots, V; u=1, \dots, n; m=1, \dots, M; b=1, \dots, B; k=1, \dots, N, \quad (8)$$

$$t_{iumb}^f \geq (t_{iumb} + s_{im}) \cdot x_{imbk}, \quad i=1, \dots, V; u=1, \dots, n; m=1, \dots, M; b=1, \dots, B; k=1, \dots, N, \quad (9)$$

$$t_{dumb}^f - t_{humb}^f + \Psi \cdot (1 - x_{hmbk}) + \Psi \cdot (1 - x_{dmbk}) \geq (t_{dumb} + s_{dm}) \cdot y_{bk}, \quad \forall d \in I-P_0; \forall h \in P_i; m = 1, \dots, M; b, \hat{b}=1, \dots, B; k=1, \dots, N, \quad (10)$$

$$t_{jumb}^f - t_{iumb}^f + \Psi \cdot (1 - x_{jmbk}) + \Psi \cdot (1 - x_{imbk}) + \Psi \cdot (1 - q_{ijm}) \geq t_{jumb} + s_{jm}, \quad i, j=1, \dots, V; u=1, \dots, n; m=1, \dots, M; b=1, \dots, B; k=1, \dots, N, \quad (11)$$

$$t_{iumb}^f - t_{jumb}^f + \Psi \cdot (1 - x_{imbk}) + \Psi \cdot (1 - x_{jmbk}) + \Psi \cdot (q_{ijm}) \geq t_{iumb} + s_{im}, \quad i, j=1, \dots, V; u=1, \dots, n; m=1, \dots, M; b=1, \dots, B; k=1, \dots, N, \quad (12)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{u=1}^n \sum_{i=1}^V t_{iumb} \cdot x_{imbk} \cdot (u_m + n_m)^{-(R_b + \hat{f}_b)} + \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^V s_{im} \cdot x_{imbk} \leq c \cdot y_{bk}, \quad k=1, \dots, N; b=1, \dots, B, \quad (13)$$

$$y_{bk} \in \{0, 1\}, \quad k=1, \dots, N; b=1, \dots, B, \quad (14)$$

$$x_{imbk} \in \{0, 1\}, \quad i=1, \dots, V; k=1, \dots, N; m=1, \dots, M, \quad (15)$$

$$q_{ijm} \in \{0, 1\}, \quad i, j=1, \dots, V; m=1, \dots, M, \quad (16)$$

$$R_b = 2^{\hat{h}}, \quad 0.5 < R_b < 1 \quad b=1, \dots, B, \quad (17)$$

$$\hat{h} = \frac{\ln(R_b)}{\ln(2)}, \quad b=1, \dots, B, \quad (18)$$

$$\hat{f}_b = \frac{R_b(1-R_b)\log(u_m + n_m)}{\log\left(\frac{FD}{1-R_b} + 1\right)} \quad 1.1 < \hat{f}_b < 1.3 \quad b=1, \dots, B; i=1, \dots, V; u=1, \dots, n; m=1, \dots, m. \quad (19)$$

در رابطه (۱) تعداد ایستگاه‌ها حداقل می‌شود. محدودیت (۲) نشان‌دهنده تخصیص هر فعالیت از هر مدل به یک ایستگاه است. محدودیت (۳) نشان‌دهنده این است که هر ایستگاه حداکثر می‌تواند یک اپراتور داشته باشد. محدودیت (۴) نشان می‌دهد هر اپراتور به یک ایستگاه تخصیص می‌یابد. محدودیت (۵) نشان‌دهنده این است که فعالیت‌ها را می‌توان به ایستگاه‌هایی اختصاص داد که توسط کارگران مجهز شده‌اند. محدودیت (۶) نشان‌دهنده روابط مقدماتی (پیش‌نیازی) است. محدودیت (۷) نشان می‌دهد که برای انجام فعالیت موردنظر، کارگر باید توانمندی انجام آن را داشته باشد و به آن ایستگاه تخصیص داده شود. محدودیت (۸) و (۹) نشان‌دهنده این هستند که زمان تمام هر فعالیت کمتر از زمان سیکل است و از زمان فعالیت خود بیشتر یا برابر است. محدودیت (۱۰) برای فعالیت  $d$  و  $h$  استفاده می‌شود که فعالیت  $d$  یک جانشین بلا واسطه فعالیت  $h$  است و می‌توان آن‌ها را به همان ایستگاه اختصاص داد. هنگامی که هر دو فعالیت  $i$  و  $j$  به همان ایستگاه مجهز شده توسط یک کارگر اختصاص داده می‌شوند، بدون هیچ‌گونه روابط مقدماتی از محدودیت (۱۱) یا (۱۲) استفاده می‌شود. اگر فعالیت  $i$  زودتر از فعالیت  $j$  در همان ایستگاه اختصاص داده شود محدودیت (۱۱) و در غیر این صورت، محدودیت (۱۲) استفاده می‌شود. محدودیت (۱۳) زمان انجام فعالیت‌ها و همچنین زمان‌های بارگذاری (راه‌اندازی) در هر ایستگاه را با توجه به اثرات یادگیری و فراموشی را نشان می‌دهد که نباید بیشتر از زمان سیکل شود. محدودیت (۱۴) تا (۱۶) نیز نوع و دامنه متغیرها را تعریف می‌کنند. در محدودیت (۱۳)  $R_b$  و  $\hat{f}_b$  به ترتیب معادلات مربوط به یادگیری و فراموشی می‌باشند.

در بازار پویا فعلی، حجم تقاضا و حتی نوع آن ممکن است تغییر کند؛ بنابراین، تقاضای هر محصول در معرض تغییر است. این تغییرات بر ظرفیت موردنیاز و زمان سیکل که تحت شرایط قطعی در نظر گرفته می‌شود تأثیر می‌گذارد؛ بنابراین مدل قبلی برای در نظر گرفتن زمان سیکل به‌عنوان متغیر نیاز به اصلاح دارد. با این حال به دست آوردن راه‌حلی که بتواند بدون تغییر طرح تقاضای تغییرات را برطرف کند، ضروری است.

در ادامه، با تغییر مدل قبلی، یک مدل استوار را توسعه می‌دهیم. در بسیاری از شرایط، زمان سیکل از حداکثر زمان فعالیت بیشتر است که این امر به افق برنامه‌ریزی تولید و میزان تقاضا نیز بستگی دارد. یک معادله ساده برای نشان دادن محاسبه زمان سیکل در معادله (۲۰) آورده شده است:

$$cycle\ time = \frac{PP}{\sum_m D_m} \quad (20)$$

$$c \in \{(c^0 + \hat{c} \cdot \beta) / |\beta| \leq \alpha\} \quad (21)$$

جایی که  $PP$  مدت زمان افق برنامه‌ریزی تولید است و  $D_m$  مقدار تقاضا برای نوع محصول  $m$  است. در بیشتر موارد در دنیای واقعی، ما باید مقادیر تقاضا را تخمین زده و حداقل و حداکثر مقدار تقاضا را پیش‌بینی کنیم. استفاده از برآورد تقاضای مورد انتظار به‌جای دامنه تقاضا همیشه عملی نیست زیرا احتمال وقوع آن مشخص نیست؛ بنابراین، در این تحقیق ما از تقاضای متغیر استفاده می‌کنیم که فرض می‌شود دامنه تقاضا طی یک افق زمانی تغییر می‌کند که این موضوع مستقیماً بر زمان سیکل تأثیرگذار است. اگر یک افق برنامه‌ریزی به اندازه کافی طولانی را در نظر بگیریم تا همه تغییرات تقاضا را منعکس کند، برای تقاضاهایی با مقادیر پایین، معادله (۲۰) منجر به زمان سیکل بیشتر می‌گردد، به طوری که عکس این حالت نیز صادق است. هر تصمیم گرفته‌شده در مورد انتخاب منابع، فعالیت و بالانس خط تصمیمات بلندمدت است، بنابراین ما افق چندین ساله را در نظر می‌گیریم و از معادله (۲۰) برای دامنه تقاضا در محدوده زمان سیکل استفاده می‌کنیم؛ بنابراین، ایجاد یک مدل ریاضی استوار برای این مسئله می‌تواند نگرانی‌های طولانی‌مدت در مورد عدم اطمینان در زمان سیکل را برطرف کند. برای به دست آوردن مدل ریاضی جدید، پیش‌فرض ۳ را به شکل "زمان سیکل یک متغیر مثبت است و محدودیتی برای تغییرات احتمالی آن وجود دارد تغییر می‌دهیم. جهت انجام این تغییر در مدل ریاضی معادله (۲۱) را برای زمان سیکل که شبیه به رویکرد فضا/مجموعه عدم قطعیت جعبه<sup>۱</sup> است به‌صورت ذیل معرفی می‌کنیم:

در این معادله  $c^0$  میانگین زمان سیکل عادی<sup>۲</sup> و  $\hat{c}$  حداکثر انحراف از  $c^0$  را نشان می‌دهد. به طوری که زمان سیکل می‌تواند هر مقدار بین  $(c^0 + \hat{c})$  و  $(c^0 - \hat{c})$  را اختیار کند. همچنین  $\beta$  یک انحراف نسبی از  $c$  است و  $\alpha \in (0, 1]$  نیز کرانی برای  $\beta$  از صفر ایجاد می‌کند. ضمن اینکه، با معرفی  $c$  به‌عنوان یک متغیر مثبت و اضافه کردن محدودیت‌های زیر به مدل قطعی قبلی، ما یک مدل غیرخطی را به دست می‌آوریم:

$$c \leq c^0 + \hat{c} \cdot \alpha \quad (22)$$

$$c \geq c^0 - \hat{c} \cdot \alpha \quad (23)$$

سپس تصمیم‌گیرندگان می‌توانند با انتخاب مقادیر مختلف برای  $(0 < \alpha \leq 1)$  میزان سختی همتای استوار را تغییر داده و ریسک هدف آن‌ها را تنظیم کنند (ما<sup>۳</sup>، ۲۰۱۴). در ادامه متغیر  $c$  محدودیت‌هایی را که زمان سیکل دارند به قالب غیرخطی تغییر می‌دهد (محدودیت (۱۳))، به همین خاطر جهت به دست آوردن یک فرمول خطی از محدودیت‌های (۲۲) و (۲۳) استفاده می‌شود.

<sup>1</sup> Box Uncertainty Region  
<sup>2</sup> Regular  
<sup>3</sup> Ma





بدین صورت برای این کار فرض بر این است که در محدودیت‌هایی که زمان سیکل دارند متغیر جدیدی با شاخص‌های لازم به‌عنوان  $w_{bk}$  معرفی می‌کنیم. سپس  $w_{bk} = c \cdot y_{bk}$  و از آنجا که  $c$  کران‌دار است ما آن‌ها را به‌عنوان کران پایین زمان سیکل<sup>۱</sup> و کران بالا زمان سیکل<sup>۲</sup> نامیده (در محدودیت‌های (۲۲) و (۲۳) که در آن  $c$  به دلیل نابرابری‌ها مثبت است) و به‌این‌ترتیب شکل نابرابری‌های خطی بر اساس این واقعیت که مقدار  $w_{bk}$  صفر است، به شرح زیر می‌باشد:

$$\min\{0, LLC\} \leq w_{bk} \leq ULC. \tag{24}$$

مقدار صفر است زیرا  $w_{bk}$  می‌تواند مقدار صفر را به خود اختصاص دهد؛ بنابراین، باید معادلات خطی سازی زیر را معرفی کنیم.

$$LLC \cdot y_{bk} \leq w_{bk} \leq ULC \cdot y_{bk}. \tag{25}$$

$$c - (1 - y_{bk}) \cdot ULC \leq w_{bk} \leq c - (1 - y_{bk}) \cdot LLC. \tag{26}$$

$$w_{bk} \leq c + (1 - y_{bk}) \cdot ULC. \tag{27}$$

در معادلات بالا، اگر  $y_{bk} = 0$  باشد،  $w_{bk}$  نیز باید صفر باشد. توجه داشته باشیم که این به‌طور خودکار توسط نابرابری دوم اعمال می‌شود. حال اگر  $y_{bk} = 1$  باشد،  $w_{bk}$  باید برابر  $c$  باشد، جایی که  $c$  یک متغیر کران‌دار است و این توسط نابرابری سوم نیز اعمال می‌شود. نابرابری‌های دیگر اطمینان حاصل می‌کند که مدل به‌درستی کار می‌کند. در مدل جدید، بعد از اضافه کردن محدودیت‌های فوق، محدودیت (۱۳) به محدودیت (۱۳) به شرح ذیل تغییر می‌کند:

$$\sum_{m=1}^M \sum_{u=1}^n \sum_{i=1}^V t_{iumb} \cdot x_{imbk} \cdot (u_m + n_m)^{-(R_b + f_b)} + \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^V Sim \cdot x_{imbk} \leq w_{bk} \quad k=1, \dots, N; b=1, \dots, B. \tag{13}$$

## ۵- نتایج محاسباتی

در این تحقیق از داده‌های قیدشده در جدول ۱ جهت تولید مسائل نمونه برای ارزیابی عملکرد بالانس خط مونتاژ استفاده می‌گردد. با توجه به ساختار مدل ریاضی عنوان‌شده تعداد فعالیت‌ها، نمودار روابط پیش‌نیازی و زمان‌های آماده‌سازی از سایت [www.assembly-line-balancing.de](http://www.assembly-line-balancing.de) استخراج گردیده است. همچنین متناسب با هر مسئله تعداد ایستگاه‌ها، زمان‌های پردازش هر فعالیت، تعداد کارگران، تعداد محصولات (مدل)، نرخ یادگیری و فراموشی و زمان سیکل دستخوش تغییر قرار گرفت.

جدول ۱- مسائل نمونه.

Table 1- Sample problems.

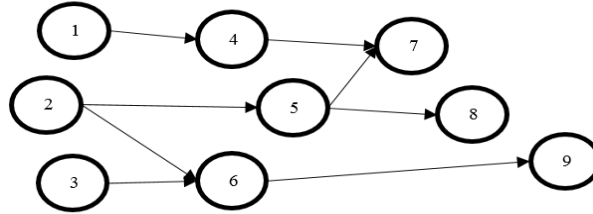
زمان سیکل در حالت قطعی	تعداد محصولات (مدل)	تعداد فعالیت	تعداد کارگران	حداکثر تعداد ایستگاه‌ها
55	3	7	4	4
40	2	9	6	6
40	2	11	6	6
60	2	21	7	7
300	2	25	7	7
300	2	35	10	10

داده‌های مسئله انتخاب‌شده جهت اعتبارسنجی و تحلیل حساسیت با توجه به مسئله (Ex.2) به شرح ذیل می‌باشند:

- تعداد فعالیت‌ها ۹.
- تعداد ایستگاه‌ها و کارگران ۶.
- تعداد محصولات (مدل) ۲.
- نمودار روابط پیش‌نیازی یا مقدماتی طبق شکل ۱.

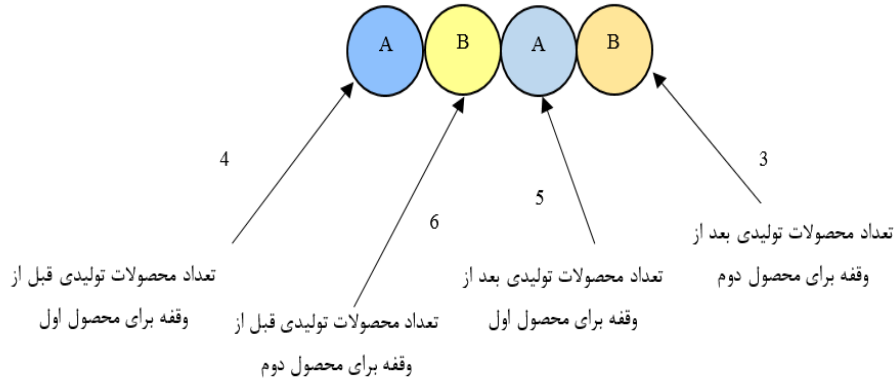
<sup>4</sup> Lower Bound of the Cycle Time (LLC)

<sup>5</sup> Upper Bound of the Cycle Time (ULC)



شکل ۱- نمودار روابط پیش‌نیازی (فتاحی و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۱۷).  
Figure 1- Diagram of precedence relations (Fattahi et al, 2017).

تعداد محصولات تولیدی قبل و بعد از وقفه طبق شکل ۲ به نمایش درآمده است.



شکل ۲- نمایش تعداد محصولات تولیدی قبل و بعد از وقفه.  
Figure 2- Showing the number of products produced before and after the break.

شکل ۲ نشان می‌دهد که وقفه در تولید بر روی عواملی چون کارگران و تعداد تولیدات تأثیرگذار است. به طوری که ضمن فراموشی کارگران، تغییرات تولید را نیز به همراه دارد. بدین جهت باید در این خصوص به تأثیر هم‌زمان اثر یادگیری و فراموشی کارگران توجه کرد.

زمان‌های آماده‌سازی برای محصول اول و دوم طبق جدول ۲ تا ۵ در نظر گرفته شده است.

جدول ۲- زمان آماده‌سازی محصول اول.

Table 2- Setup time of the first product.

شماره فعالیت	1	2	3	4	5	6	7	8	9
زمان آماده‌سازی برای محصول اول	3	2	4	3	2	3	2	0	2

جدول ۳- زمان آماده‌سازی محصول دوم.

Table 3- Setup time of the second product.

شماره فعالیت	1	2	3	4	5	6	7	8	9
زمان آماده‌سازی برای محصول دوم	2	4	0	3	2	4	2	3	2

نرخ‌های یادگیری و فراموشی در نظر گرفته شده برای کارگران نیز عبارتند از:

جدول ۴- نرخ یادگیری برای کارگران.

Table 4- Learning rates for workers.

کارگر	1	2	3	4	5	6
نرخ یادگیری	0.9	0.83	0.85	0.91	0.92	0.87

<sup>1</sup> Fattahi et al.



جدول ۵- نرخ فراموشی برای کارگران.

Table 5- Forgetting rates for workers.

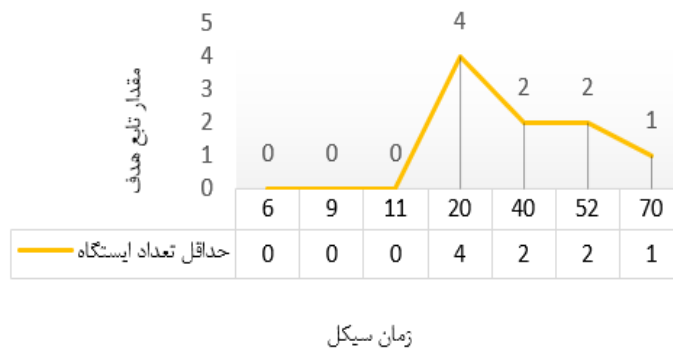
کارگر	1	2	3	4	5	6
نرخ فراموشی	1.1	1.2	1.26	1.25	1.29	1.2



### ۱-۵- تحلیل حساسیت با تغییر در نرخ یادگیری و فراموشی

تحلیل نرخ یادگیری و فراموشی، در دو مرحله صورت گرفت:

- افزایش ۱۰٪ نرخ یادگیری و در مقابل کاهش ۱۰٪ نرخ فراموشی.
- کاهش ۱۰٪ نرخ یادگیری و افزایش ۱۰٪ نرخ فراموشی.



شکل ۳- نتایج مرحله اول حاصل از تحلیل حساسیت با نرخ یادگیری و فراموشی.

Figure 3- Results of the first stage of sensitivity analysis with learning and forgetting rates.

شکل ۳ نشان می‌دهد که در مرحله اول تحلیل، زمان‌های مربوط به انجام فعالیت‌ها جهت تولید محصولات توسط کارگران که با  $t_{i.u.m.b}$  نشان داده می‌شود، افزایش می‌یابد. همچنین این تغییرات صورت گرفته، تأثیر خود را روی زمان سیکل نیز گذاشته است به طوری که مدل با زمان‌های سیکل کمتر از ۱۳، نشدنی می‌گردد.



شکل ۴- نتایج مرحله دوم حاصل از تحلیل حساسیت با نرخ یادگیری و فراموشی.

Figure 4- Results of the second stage of sensitivity analysis with learning and forgetting rates.

شکل ۴ نشان می‌دهد که در مرحله دوم تحلیل، زمان‌های مربوط به انجام فعالیت‌ها جهت تولید محصولات توسط کارگران که با  $t_{i.u.m.b}$  نشان داده می‌شود، کاهش می‌یابد. همچنین این تغییرات صورت گرفته، تأثیر خود را روی زمان سیکل نیز گذاشته است به طوری که باعث افزایش تعداد ایستگاه‌ها می‌گردد.

با توجه به توضیحات بالا چندین مسئله در نرم افزار گمز با استفاده از سولور *Cplex* حل شده اند که نتایج آن ها در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۶- نتایج حاصل از حل مسائل در حالت قطعی توسط نرم افزار گمز .

Table 6- The results of solving problems in a certain state by GAMS software.

مسائل	مقدار تابع هدف (حداقل کردن تعداد ایستگاه ها)	زمان پردازش (ثانیه)
Exa.1	2	0.499
Exa.2	2	2.461
Exa.3	3	3.191
Exa.4	4	118.073
Exa.5	2	102.126
Exa.6	-	-

با توجه به ارزیابی ها مشخص شد که نرم افزار گمز قادر به حل مسائل تنها تا ۳۵ فعالیت زیر ۱۰۰۰ ثانیه است و بیشتر از این بُعد را قادر به حل نیست. در واقع جدول ۶ نشان دهنده این است که روش های حل دقیق (قطعی) در صورتی که ابعاد مسئله بزرگ می شود، طولانی و حل از این طریق بسیار زمان بر است. ضمن اینکه هم زمان با بزرگ تر شدن ابعاد مسئله، نرم افزار گمز توانایی پاسخگویی و حل را ندارد.

در ادامه نتایج خروجی حاصل از حل مسئله (*Exa.2*) را در قالب جداول ۷ و ۸ آورده و چگونگی تخصیص کارگران و فعالیت ها را در قالب شکل ۳ نمایش می دهیم. در این مثال داده های اولیه آن به صورت زیر می باشند:

تعداد فعالیت ها ۹، تعداد کارگران و ایستگاه ۶ و زمان سیکل نیز ۱۱ در نظر گرفته شده است. همچنین شکاف یا درصد خطا نیز برای تمام مسائل صفر لحاظ گردیده است.

جدول ۷- نتایج حاصل از حل مسائل در حالت قطعی (حداقل کردن تعداد ایستگاه ها) برای محصول اول توسط نرم افزار گمز.  
Table 7- Results of certain problem solving (minimizing the number of stations) for the first product or model by GAMS.

فعالیت	کارگران	ایستگاه	زمان پردازش فعالیت ها توسط کارگران روی محصول اول	زمان آماده سازی	زمان تکمیل فعالیت توسط کارگران
3	3	1	5.131162	4	9.131
2			2.57071	2	4.571
5	5	2	2.57071	2	9.141
8			0	0	0
6	2	3	5.671947	3	8.672
1	1	4	7.625989	3	10.626
9	6	5	6.758861	2	8.759
4	4	6	3.942574	3	6.943
7	4	6	1.971287	2	11

این جدول بیانگر این است که به طور مثال برای ردیف اول جدول، فعالیت ۳ توسط کارگر ۳ به ایستگاه یک تخصیص داده شده است. جدول ۸ نیز نحوه تخصیص فعالیت ها و کارگران را به ایستگاه ها بر روی محصول دوم نشان می دهد.

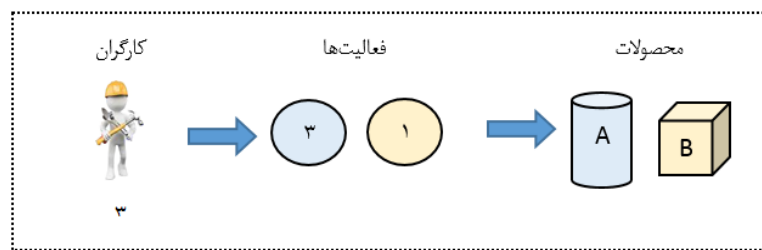


جدول ۸- نتایج حاصل از حل مسائل در حالت قطعی (حداقل کردن تعداد ایستگاه‌ها) برای محصول (مدل) دوم توسط نرم‌افزار گمز.  
Table 8- Results of certain problem solving (minimizing the number of stations) for the second model by GAMS.

فعالیت	کارگران	ایستگاه	زمان پردازش فعالیت‌ها توسط کارگران روی محصول دوم	زمان آماده‌سازی	زمان تکمیل فعالیت توسط کارگران
1	3	1	6.108526	2	8.109
2	5	2	3.985597	4	7.986
5	2	3	4.051391	2	6.051
8			1.350464	3	11
3	1	4	0	0	0
6	6	5	6.932717	4	11
4	4	6	7.509845	3	10.510
7	4	6	1.577029	2	3.577
9			3.154059	2	11



در مجموع نتایج حاصل از جدول ۷ و ۸ را برای ایستگاه شماره ۱ به صورت شماتیک به صورت شکل ۵ به نمایش درآوردیم.



شکل ۵- چگونگی نحوه تخصیص فعالیت‌ها و کارگران به ایستگاه ۱.  
Figure 5- Tasks and workers assignment to station 1.

طبق شکل ۵، تخصیص فعالیت‌ها و کارگران با زمان سیکل ۱۱ به این صورت است که؛ فعالیت ۳ بر روی مدل A و فعالیت ۱ بر روی مدل B توسط کارگر شماره ۳ در ایستگاه شماره ۱ انجام می‌گردد.

### ۵-۳- حل مسائل مختلف برای حالت عدم قطعیت

برای این امر مسئله‌های مختلفی مورد مطالعه قرار گرفته است که داده‌های آن از جدول ۱ استفاده شده است. ضمن اینکه با توجه به تعاریف و فرمول‌های ارائه شده در قسمت رویکرد استوار پیشنهادی، زمان سیکل دارای دو کران پایین و بالا طبق فرمول‌های شماره (۲۲) و (۲۳) است که از این کران‌ها به عنوان زمان سیکل متغیر در این مقاله استفاده شده است.

همچنین در همه مسائل، زمان سیکل در  $c^0(I \pm \alpha)$  متغیر است، جایی که  $c^0$  زمان سیکل متوسط است. ما از سولور CPLEX در نرم‌افزار GAMS برای به دست آوردن راه‌حل برای مدل‌های ریاضی استفاده کردیم. علاوه بر این، ما راه‌حل‌های استوار را در سه شرط مقایسه کردیم. اولین شرط (Regular) موقعیتی را نشان می‌دهد که زمان سیکل متوسط یا معمولی است. شرط دوم (Best) به عنوان "بهترین نتایج" تعریف شده است و کران بالای زمان سیکل را نشان می‌دهد. ما انتظار داشتیم که در بهترین شرایط، زمان کافی برای برآورده کردن همه تقاضاها وجود خواهد داشت. در شرط سوم (worst)، "بدترین"، زمان سیکل را به  $c^0(I - \alpha)$  ثابت کردیم که زمان سیکل در حد پایین را نشان می‌دهد.

همچنین شایان ذکر است که در تمام جداول مربوط به حالت عدم قطعیت حروف  $w$ ، همان  $worst$ ،  $b$  به معنای  $Best$  و  $\alpha$  همان ضرایب سطوح عدم اطمینان ۰/۱ تا ۰/۹ است.

جدول ۹- نتایج به دست آمده از حل مسئله شماره یک با نرم افزار GAMS برای حالت عدم قطعیت.  
Table 9- Results from solving problem number one with GAMS software for uncertainty mode.

مسئله شماره یک (Exa.1)

$\alpha$	زمان سیکل (c=55)				مقادیر تابع هدف به دست آمده (حداقل تعداد ایستگاهها)			
	Robust	Regular (w+4*c+b/6)	Best (c+c*alpha)	Worst (c-c*alpha)	Robust	Regular (w+4*c+b/6)	Best (c+c*alpha)	Worst (c-c*alpha)
0.1	55	55	60.5	49.5	2	2	2	3
0.2	55	55	66	44	2	2	2	3
0.3	55	55	71.5	38.5	2	2	2	3
0.4	55	55	77	33	2	2	2	4
0.5	55	55	82.5	27.5	2	2	2	-
0.6	55	55	88	22	2	2	2	-
0.7	55	55	93.5	16.5	2	2	2	-
0.8	55	55	99	11	2	2	2	-
0.9	55	55	104.5	5.5	2	2	2	-

جدول ۱۰- نتایج به دست آمده از حل مسئله شماره دو با نرم افزار GAMS برای حالت عدم قطعیت.  
Table 10- Results from solving problem number two with GAMS software for uncertainty mode.

مسئله شماره دو (Exa.2)

$\alpha$	زمان سیکل (c=40)				مقادیر تابع هدف به دست آمده (حداقل تعداد ایستگاهها)			
	Robust	Regular (w+4*c+b/6)	Best (c+c*alpha)	Worst (c-c*alpha)	Robust	Regular (w+4*c+b/6)	Best (c+c*alpha)	Worst (c-c*alpha)
0.1	40	40	44	36	2	2	2	2
0.2	40	40	48	32	2	2	2	2
0.3	40	40	52	28	2	2	2	2
0.4	40	40	56	24	2	2	1	3
0.5	40	40	60	20	2	2	1	3
0.6	40	40	64	16	2	2	1	4
0.7	40	40	68	12	2	2	1	6
0.8	40	40	72	8	2	2	1	-
0.9	40	40	76	4	2	2	1	-

جدول ۱۱- نتایج به دست آمده از حل مسئله شماره سه با نرم افزار GAMS برای حالت عدم قطعیت.  
Table 11- Results from solving problem number three with GAMS software for uncertainty mode.

مسئله شماره سه (Exa.3)

$\alpha$	زمان سیکل (c=40)				مقادیر تابع هدف به دست آمده (حداقل تعداد ایستگاهها)			
	Robust	Regular (w+4*c+b/6)	Best (c+c*alpha)	Worst (c-c*alpha)	Robust	Regular (w+4*c+b/6)	Best (c+c*alpha)	Worst (c-c*alpha)
0.1	40	40	44	36	3	3	2	3
0.2	40	40	48	32	3	3	2	3
0.3	40	40	52	28	3	3	2	4
0.4	40	40	56	24	3	3	2	4
0.5	40	40	60	20	3	3	2	6
0.6	40	40	64	16	3	3	2	-
0.7	40	40	68	12	3	3	2	-
0.8	40	40	72	8	3	3	2	-
0.9	40	40	76	4	3	3	2	-

جدول ۱۲- نتایج به دست آمده از حل مسئله شماره چهار با نرم افزار GAMS برای حالت عدم قطعیت.  
Table 12- Results from solving problem number four with GAMS software for uncertainty mode.

مسئله شماره چهار (Exa.4)

$\alpha$	زمان سیکل (c=60)				مقادیر تابع هدف به دست آمده (حداقل تعداد ایستگاهها)			
	Robust	Regular (w+4*c+b/6)	Best (c+c*alpha)	Worst (c-c*alpha)	Robust	Regular (w+4*c+b/6)	Best (c+c*alpha)	Worst (c-c*alpha)
0.1	60	60	66	54	4	4	4	4
0.2	60	60	72	48	4	4	3	5
0.3	60	60	78	42	4	4	3	5
0.4	60	60	84	36	4	4	3	6
0.5	60	60	90	30	4	4	3	-
0.6	60	60	96	24	4	4	3	-
0.7	60	60	102	18	4	4	3	-
0.8	60	60	108	12	4	4	3	-
0.9	60	60	114	6	4	4	3	-



جدول ۱۳- نتایج به دست آمده از حل مسئله شماره پنج با نرم افزار GAMS برای حالت عدم قطعیت.  
Table 13- Results from solving problem number five with GAMS software for uncertainty mode.

مسئله شماره پنج (Exa.5)										
$\alpha$	زمان سیکل (c=300)				مقادیر تابع هدف به دست آمده (حداقل تعداد ایستگاه‌ها)					
	Robust	Regular (w+4*c+b/6)	Best (c+c*alpha)	Worst (c-c*alpha)	Robust	Regular (w+4*c+b/6)	Best (c+c*alpha)	Worst (c-c*alpha)		
0.1	300	300	330	270	2	2	2	2		3
0.2	300	300	360	240	2	2	2	2		3
0.3	300	300	390	210	2	2	2	2		4
0.4	300	300	420	180	2	2	2	2		4
0.5	300	300	450	150	2	2	2	2		5
0.6	300	300	480	120	2	2	2	2		7
0.7	300	300	510	90	2	2	1	1		-
0.8	300	300	540	60	2	2	1	1		-
0.9	300	300	570	30	2	2	1	1		-



جدول ۱۴- نتایج به دست آمده از حل مسئله شماره شش با نرم افزار GAMS برای حالت عدم قطعیت.  
Table 14- Results from solving problem number six with GAMS software for uncertainty mode.

مسئله شماره شش (Exa.6)										
$\alpha$	زمان سیکل (c=300)				مقادیر تابع هدف به دست آمده (حداقل تعداد ایستگاه‌ها)					
	Robust	Regular (w+4*c+b/6)	Best (c+c*alpha)	Worst (c-c*alpha)	Robust	Regular (w+4*c+b/6)	Best (c+c*alpha)	Worst (c-c*alpha)		
0.1	300	300	330	270	-	-	-	-		-
0.2	300	300	360	240	-	-	-	-		-
0.3	300	300	390	210	-	-	-	-		-
0.4	300	300	420	180	-	-	-	-		-
0.5	300	300	450	150	-	-	-	-		-
0.6	300	300	480	120	-	-	-	-		-
0.7	300	300	510	90	-	-	-	-		-
0.8	300	300	540	60	-	-	-	-		-
0.9	300	300	570	30	-	-	-	-		-

بدیهی است، در بدترین حالت، امکان مونتاژ تمام محصولات در افق برنامه‌ریزی تولید امکان‌پذیر نیست. لازم به ذکر است که در سناریوی "بهترین"، کارخانه حداقل تقاضا را در طول افق برنامه‌ریزی تولید ثابت خود تجربه خواهد کرد و به همین ترتیب زمان کافی برای آن وجود خواهد داشت که مدیران تولید به راحتی اتفاقات مربوط به عدم قطعیت با تقاضای کم را کنترل کنند. به منظور ارائه بینش‌های مدیریتی در مورد تأثیر عدم اطمینان تقاضا، تجزیه و تحلیل حساسیت در سطح  $\alpha$  انجام شد. در جداول بالا زمان سیکل و تعداد ایستگاه‌های به دست آمده برای مسائل مختلف با سطح متوسط بین ۰/۱ و ۰/۹ نشان داده شده است.

نتایج حاصل از جداول ۹ تا ۱۴ به شرح ذیل می‌باشند:

- در حالت غیرقطعی نیز نرم‌افزار گمز تا ۳۵ فعالیت را در زمان عادی قادر به حل بود و بیشتر از بُعد را قادر به حل نیست.
- تعداد ایستگاه‌ها برای وضعیت عادی<sup>۱</sup> برابر با تعداد ایستگاه‌ها برای شرایط استوار<sup>۲</sup> است.
- برای بدترین موارد (*worst*)، در انواع مختلف از مسائل حل شده در جدول بالا، ما نمی‌توانیم راه‌حل‌های ممکن یا شدنی را به دست بیاوریم. به عنوان مثال، برای مسئله شماره دو با نه فعالیت (*Exa.2*) طبق جدول ۱۰، اگر  $\alpha \geq 0.8$  باشد، رسیدن به نتیجه غیرممکن خواهد بود.
- همچنین برای برخی از سطوح  $\alpha$ ، تعداد ایستگاه‌ها در بهترین نتیجه کمتر از نمونه‌های موجود در راه‌حل‌های استوار و عادی خواهد بود.

<sup>1</sup> Regular

<sup>2</sup> Robust

در این مقاله با توجه به خلأ موجود در ادبیات موضوع، مسئله را با در نظر گرفتن اثر یادگیری و فراموشی کارگران مورد بررسی قرار دادیم و به تشریح دقیق مسئله بالانس خطوط مونتاژ مدل‌های چندگانه با در نظر گرفتن اثر یادگیری و فراموشی کارگران پرداختیم. تابع هدف حداقل کردن تعداد ایستگاه‌ها بود. بعد از تخصیص فعالیت‌ها و کارگران به ایستگاه‌های کاری و همچنین تأثیر اثرات یادگیری و فراموشی کارگران بر روی زمان‌های لازم برای انجام فعالیت‌ها بر روی محصولات مختلف، توالی بین فعالیت‌ها در هر ایستگاه نیز مدنظر قرار گرفت که با توجه به توالی مشخص شده عملیات آماده‌سازی بین دو فعالیت متوالی نیز انجام گرفت. همان‌طور که گفته شد در این مقاله ابتدا یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح مختلط جدید باهدف حداقل کردن تعداد ایستگاه‌ها به ازای یک‌زمان سیکل معین برای مسئله در حالت قطعی توسعه و ارائه شد و از آنجا که با توجه به تنوع سلاقی، ممکن است تقاضای مشتریان ثابت نباشد و تغییر کند و این عامل می‌تواند روی زمان سیکل تأثیر بگذارد، از رویکرد استوار برای حل در طی سه سناریوی مختلف نیز استفاده گردید. ضمن اینکه پارامتر تقاضا و زمان سیکل را غیرقطعی در نظر گرفتیم و از رویکرد جعبه، برای مدل‌سازی هم‌تای استوار استفاده کردیم. ضمن اینکه برای ارزیابی عملکرد و کارایی مدل پیشنهادی چندین مسئله حل شد و برای درک بهتر نحوه چگونگی تخصیص فعالیت‌ها و کارگران در خطوط مونتاژ چندگانه نیز با شکل نمایش داده شد.

حل مسائل در ابعاد بزرگ با استفاده از نرم‌افزار *GAMS* در زمان حل عادی امکان‌پذیر نیست و یا مستلزم صرف زمان بسیار زیادی است، به این صورت که گمز قادر به حل مسائل تا ۳۵ فعالیت زیر ۱۰۰۰ ثانیه بوده و بیشتر از این بُعد را قادر به حل نیست و این زمینه استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری را فراهم می‌کند.

امروزه خطوط مونتاژ از مهم‌ترین اجزاء بسیاری از سیستم‌های ساخت و تولید محسوب می‌شوند و موضوع بهره‌وری خطوط مونتاژ نیز در صنایع مختلف از مباحثی است که در تمام جهان و کشور ما نیز با جدیت دنبال می‌شود، به همین جهت در این پژوهش ما خطوط مونتاژ مدل‌های چندگانه را در نظر گرفتیم. خطوطی که مدیران با استفاده از آن می‌توانند به تنوع تقاضاهای مشتریان پاسخگو باشند، بدون اینکه با تغییر خطوط تولید خود هزینه‌های سنگینی را متحمل شوند؛ زیرا این خطوط قادرند تقاضای متنوع مشتریان را بدون نیاز به موجودی‌های بالا تأمین کنند، سرمایه‌گذاری جهت استفاده از خطوط اضافی در صورت نیاز را به تعویق اندازند، سهولت در سازگاری تولید با توجه به تقاضاهای مختلف را ایجاد نمایند، کاهش هزینه تولید را همراه داشته باشند و ... پس جا دارد نسبت به استفاده از این خطوط توجه دوچندانی گردد. ضمن اینکه در خصوص خطوط مدل‌های چندگانه علیرغم وجود تشابه فرآیند هر مدل در خط مونتاژ، به علت تفاوت مشخصات مدل‌ها، زمان عملیات هر مدل، مشخصات قطعات و میزان مصرف آن‌ها، سیستم مونتاژ پیچیدگی بیشتری نسبت به خطوط مونتاژ مدل تکی و ترکیبی دارد. به طوری که این پیچیدگی باعث می‌شود تغییرات فعالیت انجام‌شده توسط یک کارگر افزایش پیدا کند که این خود نیز ممکن است اثر یادگیری را محدود کند و حال این افزایش مختلف فعالیت‌های انجام‌شده توسط کارگران منجر به استفاده از اثرات یادگیری و فراموشی برای کارگران با توجه به تعدد فعالیت‌ها و وقفه در تولید در نظر گرفته در این پژوهش گردید. در این میان با توجه به اثرات یادگیری و فراموشی استفاده‌شده، می‌توان گفت این اثرات باعث ایجاد بالانس مناسب بین نیرو و انسانی و تجهیزات گردید، به طوری که توانایی تولید حجم مشخصی از محصولات موردتقاضا را برآورده خواهد ساخت. ضمن اینکه تغییر در نرخ یادگیری و فراموشی به طور مستقیم روی زمان‌های مربوط به انجام فعالیت‌ها جهت تولید محصولات توسط کارگران و زمان سیکل تأثیر گذاشته و هدف این پژوهش که حداقل کردن تعداد ایستگاه‌ها نیز بود را به دست آوردیم.

عملکرد رویکرد مدل‌سازی استوار در مقایسه با شرایط واقعی نشان‌دهنده این است که رویکرد استوار طراحی مطمئن‌تری ارائه می‌دهد و به تصمیم‌گیرندگان اجازه می‌دهد تا مونتاژ بهتری بر اساس درک بهتر از شرایط موجود تحت شرایط عدم قطعیت تقاضا داشته باشند.

سه سناریوی مختلف در نظر گرفته‌شده بیانگر این هستند که در "بدترین" حالت، امکان مونتاژ تمام محصولات در افق برنامه‌ریزی تولید امکان‌پذیر نیست. ضمن اینکه در سناریوی "بهترین"، کارخانه حداقل تقاضا را در طول افق برنامه‌ریزی تولید ثابت خود تجربه کرده است و به همین ترتیب زمان کافی برای آن وجود داشت که مدیران تولید به راحتی اتفاقات عدم قطعیت با تقاضای کم را کنترل کنند. همچنین تعداد ایستگاه‌ها برای وضعیت "عادی یا منطقی" برابر با تعداد ایستگاه‌ها برای شرایط استوار است. حتی، برای سناریوی "بدترین" در بعضی موارد و در انواع مختلف، ما نمی‌توانیم راه‌حل‌های ممکن یا شدنی را به دست بیاوریم.







از آنجاکه نیروی انسانی مهم‌ترین بخش هر سازمانی است و همچنین امروزه تنوع و تقاضاها توسط مشتریان به سرعت در حال تغییر است و رشد چشمگیری هم داشته است، اپراتور یا نیروی انسانی باید به‌عنوان کلیدی‌ترین منبع تولیدی مورد توجه مدیران و تصمیم‌گیرندگان قرار گیرد، به همین جهت اثر یادگیری و فراموشی عنوان شده در این پژوهش بر روی کارگران و با توجه به اینکه یادگیری و فراموشی تنها در اثر تکرار و یا توقف تولید آن محصول در نظر گرفته شده و سطح یادگیری و مهارت افراد نیز متفاوت است می‌تواند، ضمن جلوگیری از تولید کالاهای معیوب و نیاز به اصلاح، از تعداد زیاد نقص در تولید محصولات بکاهد و از همه مهم‌تر باعث افزایش کارایی و بهره‌وری سیستم و بالانس خط نیز می‌گردد.

این پژوهش اولین مطالعه در زمینه توالی و مدل استوار و قطعی بالانس خطوط مونتاژ مدل‌های چندگانه با در نظر گرفتن اثر یادگیری و فراموشی است که علاوه بر اثر یادگیری و فراموشی در خصوص این خطوط، از حل استوار نیز استفاده شده است که این زمینه‌ساز و نقطه عطفی خوبی برای شروع مطالعات بعدی است که بر روی مسائل با حل استوار تمرکز دارد. ضمن اینکه برای تحقیقات آتی، می‌توان از الگوریتم‌های فرا ابتکاری (همچون بهینه‌سازی ازدحام ذرات، فاخته و غیره) با توجه به اینکه مسئله مورد نظر دارای پیچیدگی محاسباتی بالایی است که این خود نیز مزیدی بر  $NP$ -hard بودن مسئله است و با افزایش ابعاد مسئله گمز قادر به یافتن جواب در زمان محدود نخواهد بود و این امر زمینه را برای استفاده از روش‌های فرا ابتکاری جهت حل مسائل با ابعاد متوسط و بزرگ و همچنین یافتن جواب‌های نزدیک به بهینه در زمان کمتر را فراهم خواهد کرد. همچنین می‌توان از دیگر طرح‌های خطوط مونتاژ، همچون خطوط مونتاژ دوطرفه و یا عدم قطعیت در دیگر پارامترها استفاده کرد.

## تعارض با منافع

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ تضادی در منافع در مورد انتشار این نسخه وجود ندارد، همه نویسندگان، نسخه نهایی ارسال شده را مشاهده و تأیید کرده‌اند. نویسندگان تضمین می‌کنند که مقاله، اثر اصلی آنها بوده، قبلاً چاپ نشده و در حال حاضر تحت انتشار نمی‌باشد.

## منابع

- Arditi, D., Tokdemir, O. B., & Suh, K. (2001). Effect of learning on line-of-balance scheduling. *International journal of project management*, 19(5), 265-277.
- Azizi, N., Zolfaghari, S., & Liang, M. (2010). Modeling job rotation in manufacturing systems: the study of employee's boredom and skill variations. *International journal of production economics*, 123(1), 69-85.
- Battaia, O., & Dolgui, A. (2013). A taxonomy of line balancing problems and their solution approaches. *International journal of production economics*, 142(2), 259-277.
- Ben-Tal, A., & Nemirovski, A. (2000). Robust solutions of linear programming problems contaminated with uncertain data. *Mathematical programming*, 88(3), 411-424.
- Boysen, N., Fliedner, M., & Scholl, A. (2008). Assembly line balancing: which model to use when?. *International journal of production economics*, 111(2), 509-528.
- Chiang, W. C., Kouvelis, P., & Urban, T. L. (2007). Line balancing in a just-in-time production environment: balancing multiple U-lines. *IIE transactions*, 39(4), 347-359.
- Cochran, E. B. (1973). The dynamics of work standards. *Manufacturing engineering and management*, 70(2), 28-31.
- Fakhrzad, M., & Alinezhad, E. (2013). Advanced planning and scheduling with a learning effect in the flexible job shop manufacturing system. *Journal of industrial engineering research in production systems*, 1(1), 13-24. (In Persian). [https://ier.basu.ac.ir/article\\_493\\_en.html](https://ier.basu.ac.ir/article_493_en.html)
- Fattahi, P., Samouei, P., & Zandiyeh, M. (2017). A Multi-objective simulated annealing for simultaneous two-sided assembly line balancing and operators' assignment. *Journal of production and operations management*, 8(1), 1-20. (In Persian). DOI: 10.22108/JPOM.2017.21543
- Globerson, S., Levin, N., & Shtub, A. (1989). The impact of breaks on forgetting when performing a repetitive task. *IIE transactions*, 21(4), 376-381.
- Hazır, Ö., & Dolgui, A. (2013). Assembly line balancing under uncertainty: robust optimization models and exact solution method. *Computers & industrial engineering*, 65(2), 261-267.
- Hoedt, S., Claeys, A., Schamp, M., Van De Ginste, L., Aghezzaf, E. H., & Cottyn, J. (2019). The effect of job similarity on forgetting in multi-task production. *Procedia manufacturing*, 39, 983-990.
- Hoedt, S., Claeys, A., Schamp, M., Van Landeghem, H., & Cottyn, J. (2018). Countering the forgetting effect in mixed-model manual assembly. *IFAC-papersonline*, 51(11), 856-861.
- Hosseinzade, A., & Mottaghi, H. (2014). *Production and operations management*. Avae Shirin Publications. (In Persian).
- Jaber, M. Y. (2016). The lot sizing problem and the learning curve: a review. *Learning curves*, 283-310.
- Jaber, M. Y., & Guiffreda, A. L. (2004). Learning curves for processes generating defects requiring reworks. *European journal of operational research*, 159(3), 663-672.



- Jafari Asl, A., Solimanpur, M., & Shankar, R. (2019). Multi-objective multi-model assembly line balancing problem: a quantitative study in engine manufacturing industry. *OPSEARCH*, 56(3), 603-627.
- Kher, H. V., Malhotra, M. K., Philipoom, P. R., & Fry, T. D. (1999). Modeling simultaneous worker learning and forgetting in dual resource constrained systems. *European journal of operational research*, 115(1), 158-172.
- Kumar, A., Pattanaik, L. N., & Agrawal, R. (2019). Optimal sequence planning for multi-model reconfigurable assembly systems. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 100(5-8), 1719-1730.
- Lolli, F., Balugani, E., Gamberini, R., & Rimini, B. (2017). Stochastic assembly line balancing with learning effects. *IFAC-papersonline*, 50(1), 5706-5711.
- Monden, Y. (1994). *Toyota production system*. Springer US.
- Musavi, F., Saremi, M., & Alibabaei, A. (2016). The effect of assembly line redesign based on engineering techniques on productivity and ergonomics factors. *Iran occupational health*, 12(6), 1-15. (In Persian). <http://ioh.iiums.ac.ir/article-1-1508-en.html>
- Pereira, J., & Álvarez-Miranda, E. (2018). An exact approach for the robust assembly line balancing problem. *Omega*, 78, 85-98.
- Sadeghigivi, Z. (2014). *The effect of learning, forgetting, fatigue, and recovery on the performance of dual-resource constrained (DRC) systems* (PhD Desseration, Ryerson University). Retrived from <https://digital.library.ryerson.ca/islandora/object/RULA%3A3477>
- Salveson, M. E. (1955). The assembly line balancing problem. *Journal of industrial engineering*, 6, 62-69.
- Samouei, P., & Ashayeri, J. (2019). Developing optimization & robust models for a mixed-model assembly line balancing problem with semi-automated operations. *Applied mathematical modelling*, 72, 259-275.
- Thangavelu, S. R., & Shetty, C. M. (1971). Assembly line balancing by zero-one integer programming. *AIIE transactions*, 3(1), 61-68.
- Thomopoulos, N. T. (2014). *Assembly line planning and control*. Springer International Publishing.
- Wright, T. P. (1936). Factors affecting the cost of airplanes. *Journal of the aeronautical sciences*, 3(4), 122-128.
- Xu, W., & Xiao, T. (2011). Strategic robust mixed model assembly line balancing based on scenario planning. *Tsinghua science and technology*, 16(3), 308-314.
- Yeh, D. H., & Kao, H. H. (2009). A new bidirectional heuristic for the assembly line balancing problem. *Computers & industrial engineering*, 57(4), 1155-1160.
- Yu, H., & Shi, W. (2013, July). A genetic algorithm for multi-model assembly line balancing problem. *2013 IEEE international symposium on assembly and manufacturing (ISAM)* (pp. 369-371). IEEE.
- Zhang, B., Xu, L., & Zhang, J. (2021). Balancing and sequencing problem of mixed-model U-shaped robotic assembly line: mathematical model and dragonfly algorithm based approach. *Applied soft computing*, 98, 106739. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106739>