

## انتخاب جواب ارجح مسائل موازنه خط مونتاژ با کمک DEA

لیلا کشور دوست ماسوله<sup>۱</sup>، فاطمه کشاورز گیلده<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دپارتمان مهندسی کامپیوتر، دانشکده معین، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان گیلان، رشت، ایران.

<sup>۲</sup> باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران.

نام نویسنده مسئول:

فاطمه کشاورز گیلده

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۷/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۳

چکیده

هر جواب مسأله موازنه خط مونتاژ (ALB) می‌تواند به‌عنوان یک واحد تصمیم‌گیرنده در تحلیل پوششی داده‌ها (DEA) در نظر گرفته شود. از آنجایی که ALB تأثیر بسزایی بر راندمان خط مونتاژ و کاهش هزینه و زمان دارد، انتخاب جواب ارجح برای ALB یک مسئله مهم است. در مطالعات پیشین، یافتن جواب ارجح مورد توجه نبوده و مجموعه‌ای از جواب‌ها به مدیر معرفی می‌شد. این مطالعه الگوریتمی برای شناسایی جواب ارجح ALB ارائه می‌دهد. الگوریتم از مدل‌های کارایی متقاطع و ابرکارایی DEA استفاده می‌کند. الگوریتم با دو مثال کاربردی برگرفته از ادبیات تشریح می‌شود که لزوم به‌کارگیری آن برای جستجوی یک جواب با یک رتبه منحصر به فرد را مشخص می‌کند. موقعیت‌هایی که مورد تحلیل قرار می‌گیرند بدین صورت‌اند: (۱) رتبه هر تکنیک ابتکاری در حل مسائل مختلف ALB ممکن است دگرین باشد. (۲) رتبه‌های هر جواب یک مسأله ALB ممکن است در ارزیابی‌ها متفاوت باشد. الگوریتم جواب‌ها را از ارجح تا آخر مشخص می‌کند تا به مدیر مونتاژ در تصمیم‌گیری برای پاسخگویی مناسب به نیازهای شرکت کمک رساند.

**واژگان کلیدی:** تحلیل پوششی داده‌ها، کارایی، موازنه خط مونتاژ.

## مقدمه

اولین خط مونتاژ برای تولید انبوه خودرو توسط هنری فورد در سال ۱۹۱۳ تأسیس شد. نوآوری او در فرآیند تولید موجب صرفه‌جویی زیادی در زمان مونتاژ خودرو شد به طوری که این زمان را از بیش از ۱۲ ساعت به ۲ ساعت و ۳۰ دقیقه کاهش داد.

مسئله موازنه خطوط مونتاژ (ALB) یکی از مسائل مهم در صنعت است که ابزاری مؤثر برای افزایش عملکرد خطوط مونتاژ و ایجاد رقابت در بازار جهانی می‌باشد (اسکول، ۱۹۹۹). از آنجایی که اجرای هر یک از جواب‌های مسئله ALB هزینه‌بر و زمان‌بر است، وجود روشی برای انتخاب یک جواب از بین همه جواب‌ها (قبل از اجرای نهایی) برای طراحی ALB حائز اهمیت است. در خط مونتاژ، کل کار به عناصری به نام وظیفه که روابطی بین آن‌ها وجود دارد تقسیم می‌شود. مجموعه‌ای از وظایف در یک ایستگاه عملیات نام دارد که در زمان محدودی به نام زمان سیکل اجرا می‌شود. یک مسئله خط مونتاژ ساده، فقط شامل زمان سیکل و محدودیت‌های پیش‌نیازی برای مجموعه‌ای از وظایف است.

در مطالعه حاضر، توجه اصلی در مسئله ALB ارائه دادن یک تکنیک یا جواب منحصر به فرد به منظور یاری رساندن در اتخاذ تصمیم درست مدیر مونتاژ است. جواب ارجح در بین جواب‌های چندگانه ارائه می‌شوند. از آنجایی که سیستم مونتاژ برای ALB در انتخاب هر یک از این جواب‌ها هزینه و مدت زمانی را متحمل می‌شود، انتخاب یک روش مناسب حائز اهمیت است. تحقیقات پیشین ALB را تنها بر اساس انتخاب تصادفی یک جواب در بین جواب‌های مختلف حل می‌کردند. برای مثال، چندین تکنیک ابتکاری به عنوان ابزار کارا برای حل مسائل انتخاب می‌شوند. از سوی دیگر، توصیف کیفی عملکرد این راه‌حل‌ها نمی‌تواند به مدیر در تصمیم‌گیری مناسب کمک کند و راهنمایی مفید برای انتخاب یک روش منحصر به فرد برای ALB باشد. این مطالعه جوابی را با استفاده از ارجحیت‌ها، طبق تعاریف جدید، به دست می‌آورد. این رویکرد برای مسائل ALB در شرکت‌های مونتاژ می‌تواند استفاده شود.

ساختار مطالعه در ادامه به شرح زیر است: بخش ۲ پیشینه پژوهش را بررسی می‌کند. بخش ۳ شامل روش‌شناسی پژوهش است. بخش ۴ یافته‌های پژوهش را در بردارد. بخش ۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادها را ارائه می‌کند.

## پیشینه پژوهش

در مسائل ALB دو هدف در نظر گرفته می‌شود. یکی این است که در زمان سیکل معین تعداد کارگرها یا ماشین‌آلات در خط مونتاژ کمینه شود. این مسائل به موازنه خط مونتاژ ساده نوع ۱ (SALBP-I) معروف‌اند. دیگری این است که زمان سیکل کمینه شود در حالی که تعداد کارگرها یا ماشین‌آلات معین است. این مسائل را موازنه خط مونتاژ ساده نوع ۲ (SALBP-II) می‌نامند (پیرا و الوارز-میراندا، ۲۰۱۷).

مسائل ALB در کلاس مسائل (NP-hard) قرار دارند. پیچیدگی زمانی این گونه مسائل بر حسب چند جمله‌ای نمی‌باشد، لذا، تکنیک‌های ابتکاری برای یافتن جواب این مسائل به کار برده می‌شوند (تپکان، اوزباکر، بایکاسوگلو، ۲۰۱۶). تاکنون، مقالات گوناگونی برای حل مسئله ALB با ساختارهای مختلف (SALB، U شکل، دو طرفه و غیره) و اهداف متفاوت (مینیم کردن تعداد کارگران و زمان) (آبیدین و کیزیلی، ۲۰۲۰؛ سان، ونگ و پنگ، ۲۰۲۰؛ ژو و وو، ۲۰۲۰؛ لی، تنگ، ژنگ، زیا، ۲۰۱۷؛ مورا و دینی، ۲۰۱۶؛ سونگر و یاووز، ۲۰۱۵؛ موهان رسد، گنسان، سورش، ۲۰۱۳؛ تپکان، اوزباکر، بایکاسوگلو، ۲۰۱۶؛ تریکی، ملولی، مسمودی، ۲۰۱۷؛ تانگ، لی، ژانگ، ژانگ، ۲۰۱۴) منتشر شده‌اند. به دلیل آن که تمرکز مطالعه حاضر بر روی SALBP است، به مرور مختصر بعضی از مقالات در این زمینه پرداخته می‌شود. مورا و دینی (۲۰۱۶) روش الگوریتم ژنتیک را برای حل SALBP-I پیشنهاد کردند. این روش با تعیین تعداد نیروی کار ماهر مورد نیاز برای انجام صحیح عملیات با تجهیزات مونتاژ موجود مرتبط است. تریکی، ملولی، مسمودی (۲۰۱۷) مسئله تخصیص منابع و موازنه خط مونتاژ نوع II را به عنوان بسط SALBP-II مورد بررسی قرار دادند. چند تابع هدف زمان سیکل و میزان هزینه را با تعداد مشخصی کارگر یا ماشین‌آلات را در زمان طی شده کمینه می‌کند. همچنین یک نسخه جدید از الگوریتم ژنتیک چندگانه معرفی می‌شود. شنگر و یوووز (۲۰۱۵) یک مسئله جدید ALB را با ساختار سلسله مراتبی معرفی می‌کنند. در چنین ساختاری،

وظایف و کارگران بر مبنای مدارک تحصیلی شان رتبه‌بندی می‌شوند. این مسأله هزینه کل را با تخصیص بهینه کارگران و وظایف به ایستگاه‌ها کمینه می‌کند.

علاوه بر یافتن تکنیک‌هایی برای ALB، انتخاب یک تکنیک مناسب از بین همه تکنیک‌ها می‌تواند مفید واقع شود. بررسی عملکرد تکنیک‌ها می‌تواند راهی مؤثر برای انتخاب تکنیک‌ها باشد. تحلیل پوششی داده‌ها (DEA) که توسط چارلز، کوپر، رودز (۱۹۷۸) معرفی شد، به‌طور گسترده‌ای برای اندازه‌گیری عملکرد واحدهای تصمیم‌گیرنده (DMUs) استفاده می‌شود. تکنیک DEA مرزهای کارایی را با DMU های کارا می‌سازد و برای هر DMU ناکارا DMU مجازی کارای متناظر را شناسایی می‌کند. متناظر با تکنولوژی در نظر گرفته شده، DMU کارای مجازی ترکیبی (محدب، غیر منفی و غیره) از DMU های کارای مشاهده شده است که در مجموعه‌ای به‌عنوان مرجع قرار می‌گیرد. مجموعه مرجع در موضوعات بسیاری از DEA (تحلیل حساسیت و پایداری (هایبو، یی، یائو، جو، ۲۰۱۸)، رتبه‌بندی DMU های کارا (پوریه، خراسانی، لطفی، فرشچی، ۲۰۱۶) و الگویابی و هدف‌گذاری (شکرالله‌پور، حسین زاده لطفی، زندیه، ۲۰۱۶) مورد استفاده قرار می‌گیرد.

مدل‌های پایه‌ای DEA قادر به ایجاد تمایز بین همه DMU ها نیستند. در DEA، بهترین واحدها کارا نامیده می‌شوند و مقدار کارایی آن‌ها یک است. بنابراین، روش‌هایی برای ایجاد تمایز بین DMU ها توسعه داده شدند. یکی از این روش‌هایی که می‌توان در ادبیات به آن اشاره داشت استفاده از کارایی متقاطع است. در ماتریس کارایی متقاطع بررسی واحدها به صورت خود ارزیابی و هم‌پایه است (سکستون، سیلکمن، هوگان، ۱۹۸۶). به‌عنوان مثال، یاکیده، محفوظی، سعیدی لوحه سرا (۱۳۹۷) با استفاده از کارایی متقاطع، که بر اساس مدل دامنه تعدیل شده (Range Adjusted Model (RAM) است (کوپر، پارک، پاستور، ۱۹۹۹)، به رتبه‌بندی بانک‌ها پرداختند. مدل RAM یک مدل غیرشعاعی است. برخلاف مدل‌های شعاعی که ارزیابی کارایی با تغییرات متناسب ورودی‌ها یا خروجی‌ها است، در مدل‌های غیر شعاعی با حضور متغیرهای کمکی ورودی و خروجی است. اگر  $n$  تعداد DMU ها ( $j = 1, \dots, n$ ) باشد،  $x_{ij}$  ها ( $i = 1, \dots, m$ ) ورودی‌ها برای تولید خروجی‌های  $y_{rj}$  ( $r = 1, \dots, s$ )،  $(x^o, y^o)$  به‌عنوان  $DMU_0$  تحت ارزیابی و متغیرها به‌صورت  $(s_1^-, \dots, s_m^-, s_1^+, \dots, s_s^+)$  بردار متغیرهای کمکی ورودی و خروجی، و  $(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$  بردار چگالی باشند، مدل RAM (رابطه‌های ۱-۵) به‌صورت زیر است:

$$\text{Max } \frac{1}{m+s} \left( \sum_{i=1}^m \frac{s_i^-}{R_i^-} + \sum_{r=1}^s \frac{s_r^+}{R_i^+} \right) \quad \text{رابطه ۱}$$

$$\text{s.t. } \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} + s_i^- = \theta x_i^{(o)}, \quad i = 1, \dots, m \quad \text{رابطه ۲}$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} - s_r^+ = y_r^{(o)}, \quad r = 1, \dots, s \quad \text{رابطه ۳}$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1, \quad \text{رابطه ۴}$$

$$\lambda_j, s_i^-, s_r^+ \geq 0 \quad j = 1, \dots, n; i = 1, \dots, m; r = 1, \dots, s \quad \text{رابطه ۵}$$

که  $R_i^+$  و  $R_i^-$  به‌ترتیب بازه‌هایی برای ورودی و خروجی هستند:

$$R_i^- = \text{Max } (x_{ij}, j = 1, \dots, n) - \text{Min } (x_{ij}, j = 1, \dots, n); \quad i = 1, \dots, m \quad \text{رابطه ۶}$$

$$R_i^+ = \text{Max } (y_{rj}, j = 1, \dots, n) - \text{Min } (y_{rj}, j = 1, \dots, n); \quad r = 1, \dots, s \quad \text{رابطه ۷}$$

برای استفاده مجموعه وزن‌ها در کارایی متقاطع، دوگان مدل (۱-۵) به دست می‌آید که در آن بردار  $(v_1^{(o)}, \dots, v_m^{(o)}, u_1^{(o)}, \dots, u_s^{(o)})$  متغیرهای وزن ورودی و خروجی برای  $DMU_o$  هستند:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^m v_i^{(o)} x_i^{(o)} - \sum_{r=1}^s u_r^{(o)} y_r^{(o)} - w \quad \text{رابطه ۸}$$

$$s.t. \sum_{r=1}^s u_r^{(o)} y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i^{(o)} x_{ij} + w \leq 0, \quad j=1, \dots, n \quad \text{رابطه ۹}$$

$$u_r^{(o)} \geq \frac{1}{(m+s)R_r^+}, \quad r=1, \dots, s \quad \text{رابطه ۱۰}$$

$$v_i^{(o)} \geq \frac{1}{(m+s)R_i^-}, \quad i=1, \dots, m \quad \text{رابطه ۱۱}$$

که از مدل بالا کارایی متقاطع به صورت زیر است:

$$E_{jo} = 1 - \left( \sum_{i=1}^m v_i^{(o)} x_{ij} - \sum_{r=1}^s u_r^{(o)} y_{rj} - w \right) \quad \text{رابطه ۱۲}$$

روش مورد استفاده در یاکیده، محفوظی، سعیدی لوحه سرا (۱۳۹۷) در ادامه بیان می‌شود:

۱- حل مسأله دوگان مدل RAM

۲- تشکیل جدول میانگین کارایی‌های متقاطع

۳- مشخص کردن رتبه

همچنین موقعیت‌هایی در تصمیم‌گیری‌ها وجود دارند که به جای استفاده از یک معیار سنجش، ممکن است از چندین معیار سنجش استفاده گردد. از این‌رو، برای تحلیل چنین مسائلی باید روش‌های خاصی اتخاذ شود. روش وزنی جمعی ساده (Simple Additive Weighted (SAW) یکی از قدیمی‌ترین روش‌ها در تصمیم‌گیری چندشاخصه است. در روش SAW تابع مطلوبیتی برای هر شاخص تقریب زده می‌شود تا معیاری که بیشترین مطلوبیت را دارد انتخاب گردد. این روش با محاسبه وزن‌ها به ارجحیت شاخص‌ها می‌رسد. با وزن‌ها از تکنیک آنتروپی شانون حاصل می‌شوند (اصغریور، ۱۳۸۹). مراحل این روش عبارتند از:

- بی‌مقیاس‌سازی ماتریس تصمیم‌گیری با استفاده از روش نرمال‌سازی خطی (ماتریسی با درایه‌های  $\bar{E}_{ij}$ )
- محاسبه اهمیت هر گزینه با استفاده از روش میانگین موزون. وزن‌ها می‌توانند طی رابطه‌های ۱۳-۱۵ به دست آیند:

$$m_t = -k \sum_{j=1}^n \bar{E}_{ij} \ln(\bar{E}_{ij}) \quad t=1, \dots, T \quad \text{رابطه ۱۳}$$

$$d_t = 1 - m_t \quad t=1, \dots, T \quad \text{رابطه ۱۴}$$

$$w_t = \frac{d_t}{\sum_{t=1}^T d_t} \quad t=1, \dots, T \quad \text{رابطه ۱۵}$$

• رتبه‌بندی گزینه‌ها بر اساس بیشترین اهمیت مطالعاتی وجود دارند که از این روش در تصمیم‌گیری چندشاخصه استفاده می‌کنند (محمدی زنجیرانی، سلیمی‌فرد، یوسفی ده‌بیدی، ۱۳۹۳).

مقالات متعددی وجود دارند که ALB را براساس مدل‌بندی ریاضی بررسی کردند. لی، نیلاکانتان، تانگ، نیلسن (۲۰۱۸) روشی برای موازنه و توزیع خطوط مونتاژ مدل ترکیبی رباتیک ارائه می‌دهند که شامل سه زیرمسئله تخصیص وظیفه، توالی مدل و تخصیص ربات است. یک مدل برنامه‌ریزی ترکیبی مختلط به‌منظور به حداقل رساندن مدت زمان انجام کار فرمول‌بندی می‌شود. ریت و کاست (۲۰۱۵) یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح بهبود یافته برای مسئله موازنه خط مونتاژ طراحی می‌کنند. اثربخشی مدل برای حل مسائل خط مونتاژ U شکل نیز نشان داده می‌شود.

خط تولید یک دنباله‌ای از گام‌هایی است که از ورودی‌ها استفاده می‌کند تا خروجی را تکمیل کند، خط مونتاژ خط تولیدی است که مؤلفه‌ها را مونتاژ می‌کند تا محصول را تولید کند. می‌توان به مقالات زیر اشاره کرد که در بررسی خط تولید از DEA استفاده می‌کنند. ارتای و روان (۲۰۰۵) رویکرد تصمیم‌گیری مبتنی بر DEA برای و اندازه‌گیری کارایی تخصیص کار در سیستم تولید سلول ارائه می‌دهند. ورودی‌ها و خروجی‌ها از طریق شبیه‌سازی سیستم تولید سلولی تهیه می‌شوند. هدف تعیین تخصیص تعداد نیروی کار در محیط سیستم تولید سلولی است. تلوری، هوک، پینی (۱۹۹۷) روشی برای ارزیابی و بهبود عملکرد سلولی ارائه می‌دهند که در آن چند ورودی و خروجی سلولی در نظر گرفته می‌شوند. از تکنیک تجزیه و تحلیل پنجره که ضریب کارایی سلول را در طول زمان تغییر می‌دهد استفاده می‌شود. ارزیابی با در نظر گرفتن خانواده‌های محلی (تولید شده در سلول‌های تک) و قطعات ناقص (تولید شده در سلول‌های چندگانه) پردازش شده توسط یک سلول انجام می‌شود. سهم عمده این تحقیق پیشنهاد روش تجزیه و تحلیل پنجره اصلاح شده برای ارزیابی عملکرد سلول است.

رویکردهای موجود ALB بر انواع مختلف الگوریتم‌ها و روش‌های ابتکاری متمرکز هستند، اما توجه کمتری به تجزیه و تحلیل ALB با استفاده از تکنیک DEA می‌کنند. مطالعاتی که در این زمینه از DEA یاری جستند به شرح ذیل می‌باشند. زهیری، توکلی مقدم، رضایی مالک (۲۰۱۶) یک مدل موازنه دو جانبه برای خطوط مونتاژ مدل U شکل به‌منظور به حداقل رساندن هزینه‌های کل و همچنین حجم کار ایستگاه‌ها، با توجه به محدودیت‌های منطقه‌ای و تکثیر کار، ارائه می‌دهند. با ماهیت نامشخص داده‌های ورودی، یک روش برنامه‌ریزی احتمالی فازی تعاملی اعمال می‌شود. ماهیت دو هدفه مدل ارائه شده از طریق تصمیم‌گیری چند معیاره کارا مبتنی بر DEA تجزیه و تحلیل می‌شود. در نهایت، کاربرد مدل و اثربخشی آن بر روی یک مطالعه موردی واقعی صنعتی مورد آزمایش قرار می‌گیرد. در مطالعه جولای، رضایی، وظیفه (۲۰۰۹)، جواب‌های چندگانه ALB توسط نرم‌افزار<sup>۱</sup>FLB بر اساس الگوریتم<sup>۲</sup>COMSOAL به‌دست می‌آیند و برای تخصیص وظایف به ایستگاه‌های کاری استفاده می‌شوند. الگوریتم COMSOAL که توسط آرکس (۱۹۹۶) توسعه یافته یک توالی تصادفی شدنی ایجاد می‌کند که در تمام محدودیت‌ها صدق می‌کند. الگوریتم زمانی که همه وظایف تخصیص داده شدند به پایان می‌رسد. جولای، رضایی، وظیفه (۲۰۰۹) برای حل مسئله چند هدفه ALB از DEA استفاده می‌کنند. با کمک DEA کارایی همه جواب‌ها به‌دست می‌آید و همه جواب‌هایی که کارایی برابر با یک دارند انتخاب می‌شوند. بدین ترتیب، مجموعه‌ای از جواب‌ها نامزدهایی برای طراحی ALB به‌شمار می‌روند. ام سی مولن و فرازیر (۱۹۹۸) چندین تکنیک ابتکاری را برای حل چند مسئله ALB استفاده می‌کنند. جواب‌هایی که از تکنیک‌های ابتکاری به‌دست می‌آیند ورودی‌های مدل DEA هستند و شامل دو گروه‌اند: یکی تعداد کارگرهای مورد نیاز و دیگری مقدار تجهیزات. خروجی‌های مدل DEA نیز از طریق شبیه‌سازی دو اندازه عملکرد خروجی حاصل می‌شوند که شامل عملکرد زمان سیکل و درصد تکمیل در زمان مقرر در هر سلول است. ام سی مولن و فرازیر (۱۹۹۸) از DEA برای مقایسه تکنیک‌های ابتکاری برای موازنه خطوط مختلف مونتاژ استفاده می‌کنند. آن‌ها توصیف کیفی از عملکرد تکنیک‌های ابتکاری در حل مسائل مختلف ارائه می‌دهند. صفاتی مانند خوب یا ضعیف انتخاب کننده تکنیک در طراحی خط مونتاژ است که منحصر به فرد نیز نمی‌باشد و همانند روند جولای، رضایی، وظیفه (۲۰۰۹) مجموعه از طرق مختلف برای ALB را ارائه می‌دهد.

<sup>1</sup> Flexible Line Balancing<sup>2</sup> computer method of sequencing operations for assembly line

## روش‌شناسی پژوهش

رویکرد پیشنهادی بر روی دو مورد مطالعاتی از مسائل ALB اعمال می‌شود. برای مورد اول، داده‌ها از ام سی مولن و فرازیر (۱۹۹۸) گرفته شده است (برای مشاهده مقادیر ورودی و خروجی به پیوست مراجعه کنید). در این مثال، بیست و سه تکنیک ابتکاری وجود دارد و هدف این است که روش ابتکاری ارجح برای حل هفت مسئله ALB شناسایی شود. داده‌های مورد دوم از مطالعه جولای، رضایی، و وظیفه (۲۰۰۹) گرفته شده است. یک روش ابتکاری به نام COMSOAL، با استفاده از نرم افزار FLB به حل یک مسئله ALB می‌پردازد. نرم افزار FLB نوزده جواب برای حل این مسئله تولید می‌کند.

ابتدا روشی برای یافتن تکنیک ابتکاری ارجح برای حل مسائل ALB در مثال برگرفته شده از مطالعه ام سی مولن و فرازیر (۱۹۹۸) معرفی می‌شود. این مثال شامل بیست و سه تکنیک ابتکاری است. این تکنیک‌ها برای حل هفت مسئله ALB با ۱۱، ۲۱، ۲۵، ۲۹، ۴۰، ۴۵، و ۷۴ وظیفه هستند. لازم به ذکر است که این تکنیک‌ها نمونه‌ای برای بررسی الگوریتم پیشنهادی هستند و تکنیک‌های دیگری برای حل مسائل ALB نیز می‌توانند مورد استفاده باشند.

هر مسئله شامل تعدادی محصول و وظیفه، یک شبکه از روابط پیش‌نیازی، زمان سیکل، و مدت زمان وظیفه مورد انتظار است. هر مسئله دارای دو ورودی است که توسط روش‌های ابتکاری به دست می‌آید؛ تعداد کارگرها و مقدار تجهیزات. دو خروجی شامل عملکرد زمان سیکل و درصد تکمیل محصول در سلول‌ها در زمان مقرر است که با استفاده از شبیه‌سازی حاصل می‌شوند. مقادیر ورودی‌ها و خروجی‌ها برای روش‌های ۵، ۶، و ۷ یکسان هستند، بنابراین، این سه تکنیک در ارزیابی نقش یک DMU را بازی می‌کنند. با این حال، این تکنیک‌ها در مثال حفظ می‌شوند. تکنیک‌ها به‌عنوان DMUها ( $j=1, \dots, 23$ ) در DEA با دو ورودی  $X_{ij}$  ( $i=1, 2$ ) برای تولید دو خروجی  $Y_{rj}$  ( $r=1, 2$ ) ذکر شده در بالا هستند. چون هفت مسئله وجود دارد، هفت گروه از بیست و سه DMU وجود دارد.

در این چارچوب تصمیم‌گیری، یک جواب به‌عنوان نامزد برنده در میان مجموعه‌ای از جواب‌ها انتخاب می‌شود. چنین چارچوبی نامزدها را از بیشترین ارجحیت به کم‌ترین مرتب می‌کند. است. از آنجایی که تکنیکی مورد نظر است که اولین جایگاه را در میان تکنیک‌های دیگر داشته باشد باید رتبه‌بندی انجام گیرد. اما چون هر روش ممکن است برای حل هر مساله یک رتبه متفاوت دریافت کند، در نتیجه چندگانگی رتبه به دست آمده در هر تکنیک به وجود می‌آید. در این صورت باید وزن‌هایی پیدا شوند که باعث تجمیع هفت رتبه (در هفت مساله) برای هر تکنیک شوند. اگر فقط یک مساله وجود داشت، تکنیکی انتخاب می‌شد که دارای رتبه یک بود. از این‌رو، اندازه کارایی متقاطع می‌تواند معیاری مناسب برای ارزش‌دهی به هر مساله باشد. وزن هر مساله به کارایی تکنیک‌ها مرتبط می‌شود زیرا هر تکنیک ورودی‌ها و خروجی‌هایی را برای طراحی مساله مشخص می‌کند. هر تکنیک با توجه به این مقادیر ورودی و خروجی مشخص می‌شود به چه میزان در حل آن مساله کارا است. از این‌رو، میزان کارایی و جایگاه هر تکنیک در هر مساله می‌تواند معیاری برای وزن‌دهی به آن مساله باشد.

الگوریتم انتخاب جواب ارجح به‌صورت زیر است:

- گام ۱. کارایی متقاطع تکنیک‌ها برای حل هر مساله را از رابطه ۱۲ به دست آورید.
  - گام ۲. میانگین کارایی متقاطع تکنیک‌ها برای حل هر مساله را بدست آورید.
  - گام ۳. وزن میانگین کارایی متقاطع هر تکنیک در هر مساله را از رابطه‌های ۱۳-۱۵ بدست آورید.
  - گام ۴. مجموع وزن‌دار شده مقادیر هر میانگین کارایی متقاطع در حل تمام مسائل را به دست آورید. اگر مجموع‌های برابر وجود دارند به گام ۴ بروید، در غیر این صورت به گام ۵ بروید.
  - گام ۵. برای هر مجموع مساوی، جزیی از عبارت جمعی را که مربوط به کمترین مقدار کارایی متقاطع است حذف کنید و مجموع جدید را در نظر بگیرید، به مرحله ۵ بروید.
  - گام ۶. تکنیک‌ها را براساس مجموع‌های وزن دار شده رتبه‌بندی کنید.
- در مورد گام ۵ قابل ذکر است که چون وزن هر مساله به مقدار کارایی متقاطع تکنیک‌ها مرتبط شده است، پس هر چقدر مقدار کارایی کمتر باشد وزن هم مقدار کمتری می‌گیرد. با توجه به این، در هنگام برابری میانگین وزن‌دار شد، عبارتی حذف می‌شود که کمترین تأثیر را دارد.

الگوریتم بالا مشکل چندگانه بودن رتبه هر تکنیک برای حل این مسائل ALB را حل می‌کند. در جدول ۱، با استفاده از میانگین کارایی متقاطع جایگاه تکنیک ابتکاری در هر مسأله به دست می‌آید. در جدول ۲ وزن هر مسأله نمایش داده می‌شود. جدول ۳ نیز مجموع وزن دار شده کارایی متقاطع تکنیک‌های ابتکاری و رتبه آن‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۱: جایگاه هر تکنیک ابتکاری در هر مسأله

تکنیک ابتکاری / مسأله	۱۱-وظیفه	۲۱-وظیفه	۲۵-وظیفه	۲۹-وظیفه	۴۰-وظیفه	۴۵-وظیفه	۷۴-وظیفه
۱	۰/۹۴	۰/۴۵	۰/۹۸	۰/۹۶	۰/۹۰	۰/۹۲	۰/۹۸
۲	۱/۰۰	۰/۴۱	۰/۹۶	۰/۹۶	۰/۹۰	۰/۹۰	۱/۰۰
۳	۰/۹۷	۰/۴۱	۰/۹۹	۰/۹۶	۰/۸۹	۰/۹۳	۰/۸۹
۴	۰/۹۵	۰/۳۷	۰/۹۷	۰/۹۶	۰/۸۹	۱/۰۰	۰/۹۹
۵	۰/۹۸	۰/۵۲	۰/۹۸	۰/۸۰	۰/۸۹	۰/۹۰	۰/۹۵
۶	۰/۹۸	۰/۵۲	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۰	۰/۹۱	۰/۹۶
۷	۰/۹۸	۰/۵۲	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۰	۰/۹۹	۰/۹۶
۸	۰/۹۹	۰/۶۰	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۸۸	۰/۹۷	۱/۰۰
۹	۰/۹۸	۰/۹۴	۰/۶۱	۰/۵۴	۱/۰۰	۰/۷۳	۰/۴۳
۱۰	۰/۹۹	۰/۹۸	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۸۸	۰/۵۲	۰/۸۴
۱۱	۰/۹۷	۰/۷۶	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۱	۰/۸۸	۰/۹۹
۱۲	۰/۹۹	۰/۴۹	۰/۹۹	۱/۰۰	۰/۸۹	۰/۹۰	۱/۰۰
۱۳	۰/۹۸	۰/۴۱	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۰	۰/۸۷	۱/۰۰
۱۴	۰/۹۹	۰/۴۴	۱/۰۰	۰/۸۷	۰/۹۳	۰/۸۶	۰/۹۹
۱۵	۰/۹۸	۰/۸۷	۰/۹۵	۰/۹۱	۰/۹۱	۰/۸۸	۰/۹۸
۱۶	۰/۹۹	۰/۶۹	۰/۹۹	۰/۹۷	۰/۹۱	۰/۹۲	۰/۹۸
۱۷	۰/۹۶	۱/۰۰	۰/۹۹	۱/۰۰	۰/۹۱	۰/۸۴	۰/۹۸
۱۸	۱/۰۰	۰/۴۵	۰/۹۸	۰/۹۱	۰/۸۱	۰/۹۱	۰/۹۸
۱۹	۱/۰۰	۰/۷۳	۰/۹۳	۰/۹۵	۰/۸۰	۰/۹۴	۰/۸۶
۲۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۸۹	۰/۹۹
۲۱	۱/۰۰	۰/۹۹	۰/۹۹	۱/۰۰	۰/۹۹	۱/۰۰	۱/۰۰
۲۲	۱/۰۰	۰/۹۹	۰/۹۹	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰
۲۳	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۹۹	۱/۰۰	۱/۰۰

جدول ۲. وزن مسائل

مسأله	۱۱-وظیفه	۲۱-وظیفه	۲۵-وظیفه	۲۹-وظیفه	۴۰-وظیفه	۴۵-وظیفه	۷۴-وظیفه
$W_t$	۰/۱۳۹	۰/۱۵۴	۰/۱۴۰	۰/۱۴۱	۰/۱۴۲	۰/۱۴۳	۰/۱۴۱

جدول ۳. مجموع وزن دار شده کارایی متقاطع تکنیک‌های ابتکاری و رتبه آن‌ها

تکنیک ابتکاری	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
$P_j$	۰/۸۷۰۲	۰/۸۶۹۶	۰/۸۵۷۰	۰/۸۶۹۳	۰/۸۵۵۵	۰/۸۸۳۷	۰/۸۹۵۳	۰/۹۰۸۸	۰/۷۴۹۵
رتبه	۱۶	۱۷	۲۱	۱۸	۲۲	۱۴	۱۰	۹	۲۳
تکنیک ابتکاری	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸
$P_j$	۰/۸۸۷۴	۰/۹۲۰۶	۰/۸۸۸۹	۰/۸۷۱۰	۰/۸۶۲۹	۰/۹۲۴۸	۰/۹۱۸۳	۰/۹۵۴۶	۰/۸۵۷۳
رتبه	۱۲	۷	۱۱	۱۵	۱۹	۸	۷	۵	۲۰
تکنیک ابتکاری	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳				
$P_j$	۰/۸۸۴۹	۰/۹۷۱۶	۰/۹۹۵۶	۰/۹۹۷۱	۰/۹۹۸۶				
رتبه	۱۳	۴	۳	۲	۱				

در ادامه جواب ارجح تولید شده توسط FLB برای یک مسأله ALB برگرفته شده از مطالعه جولای، رضایی، وظیفه (۲۰۰۹) شناسایی می‌شود. در این مثال، تنها یک روش اکتشافی COMSOAL با استفاده از نرم افزار FLB برای حل یک مسأله ALB مدنظر است. نرم افزار FLB نوزده جواب تولید می‌کند که نقش DMUها در DEA را بازی می‌کنند. نوزده جواب با شش معیار که شامل سه ورودی و سه خروجی است ارزیابی می‌شوند. ورودی‌ها شامل  $BD^3$ ،  $SI^4$  و  $T_d^5$  است.

$BD = (1 - \frac{\sum t_i}{M \times C}) \times 100$  که در آن  $t_i$  زمان وظیفه  $i$ ام،  $C$  زمان سیکل و  $M$  تعداد ایستگاه‌ها است.  $BD$  ناکارایی خط است که هر چه کمتر باشد بهتر است. هر چه نسبت مجموع میزان زمان وظیفه به حاصلضرب زمان سیکل در تعداد ایستگاه‌ها بیشتر (که مطلوب است) باشد ناکارایی خط کمتر است (اگر این نسبت برابر باشد ناکارایی خط مونتاژ صفر است).

$SI = (\sum_{i=1}^M (C - S_j)^2)^{\frac{1}{2}}$  که در آن  $S_j$  زمان وظیفه ایستگاه  $j$ ام است.  $SI$  نشان‌دهنده شاخص همواری است که مجموع فواصل بین زمان وظیفه ایستگاه و زمان سیکل است. هر چقدر این فواصل به هم نزدیک‌تر باشند، یعنی زمان وظیفه ایستگاه به زمان سیکل نزدیک‌تر باشد، مطلوب‌تر است و اندازه این معیار کمتر است.

$T_d = (1 - 2 \frac{t_{sd}}{C}) \times 100$  که در آن  $t_{sd}$  واریانس زمان کار است،  $T_d$  توزیع زمان وظیفه است هر چقدر نسبت واریانس زمان کار به زمان سیکل نزدیک‌تر باشد مطلوب‌تر است و  $T_d$  کمتر است. خروجی‌ها شامل  $WR^6$ ،  $T_i^7$  و  $BE^8$  است.

<sup>3</sup>balance delay  
<sup>4</sup>smoothness index  
<sup>5</sup>task time distribution  
<sup>6</sup>west ratio  
<sup>7</sup>task time intensity  
<sup>8</sup>balance efficiency



WR: نسبت تعداد وظایف در هر ایستگاه است که از رابطه  $\frac{N}{M}$  بدست می‌آید که در آن  $N$  تعداد وظایف است. هر چقدر این نسبت بزرگ‌تر باشد بهتر است.

$T_i$ :  $T_i = \frac{t_{av}}{C} \times 100$  که در آن  $t_{av}$  میانگین زمان کار است. هر چقدر میانگین زمان کار از زمان سیکل بزرگ‌تر باشد مطلوب‌تر است.

BE:  $BE = (1 - \frac{\sum_{i=1}^M |S_j - S_{av}|}{M \times S_{av}})$  که در آن  $S_{av}$  میانگین زمان ایستگاه است.  $BE$  کارایی موازنه است که نشان‌دهنده توزیع کار با رضایت کارکنان در نتیجه همراه با افزایش فرصت برای خروجی بیشتر است.

انتخاب بهترین جواب در بین جواب‌های تولید شده توسط FLB با ارجحیت‌های تعریف شده سازگار است. چهار مدل استفاده می‌شوند که تنها تفاوت‌شان در مقادیر ضرایب هدف است که برای افزایش خروجی در نظر گرفته می‌شوند. از این‌رو تعیین ضرایب مختلف در مدل غیر شعاعی زیر (رابطه‌های ۵-۹) منجر به مدل‌هایی با اهداف متفاوت می‌شود (جولای، رضایی، وظیفه، ۲۰۰۹):

$$\phi^{(o)*} = \text{Max} \sum_{r=1}^3 f_r \phi_r^{(o)} \quad \text{رابطه ۱۶}$$

$$\text{s.t.} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq o}}^{19} \lambda_j x_{ij} \leq x_i^{(o)}, \quad i = 1, \dots, 3 \quad \text{رابطه ۱۷}$$

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq o}}^{19} \lambda_j y_{rj} \geq \phi_r^{(o)} y_r^{(o)}, \quad r = 1, \dots, 3 \quad \text{رابطه ۱۸}$$

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq o}}^{19} \lambda_j = 1 \quad \text{رابطه ۱۹}$$

$$\lambda_j \geq 0 \quad j = 1, \dots, 19 \quad \text{رابطه ۲۰}$$

که مجموعه رابطه‌های ۱۶-۲۰، مدلی خروجی محور تحت بازده مقیاس متغیر است و  $f_r$ ،  $r=1, \dots, 3$  ضرایبی برای افزایش

خروجی  $r$ ام است. با توجه به نظر مدیر و خبرگان بردار  $(f_1, f_2, f_3)$  برابر با  $(\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3})$  است. حال رتبه جواب‌ها از رابطه‌های ۱۶-۲۰ حاصل می‌شود و در جدول ۴ نمایش داده می‌شود.

جدول ۴. رتبه جواب‌ها

رتبه	مقدار تابع هدف (رابطه ۱۶)	جواب
۱	۰/۰۱۴۶۵	۱
۳	۰/۹۹۸۴۸	۲
۸	۱/۰۱۷۴۹	۳
۱۰	۱/۰۲۶۴۰	۴

۱۱	۱/۰۳۳۴۹	۵
۱۴	۱/۰۴۳۶۲	۶
۵	۱/۰۰۰۱۰	۷
۱۳	۱/۰۴۳۳۶	۸
۲	۰/۳۲۶۵۲	۹
۴	۰/۹۹۰۹۰	۱۰
۷	۱/۰۱۵۹۱	۱۱
	۱/۰۲۷۴۷	۱۲
۶	۱/۰۰۰۴۰	۱۳
	۱/۰۰۹۴۸	۱۴
۹	۱/۰۱۸۶۵	۱۵
۱۲	۱/۰۴۲۵۵	۱۶
۱۴	۱/۰۴۴۶۶	۱۷
	۱/۰۹۵۳۱	۱۸
	۱/۱۰۸۱۰	۱۹

### یافته‌های پژوهش

نتایج کاربرد تکنیک ابتکاری ارجح برای حل مسائل ALB را می‌توان در ادامه ارائه داد. جدول ۱ جایگاه هر تکنیک ابتکاری در هر مسأله را ارائه می‌دهد. جدول ۲ وزن‌های مسائل را نمایش می‌دهد. جدول ۳ مجموع وزن‌دار شده کارایی متقاطع تکنیک‌های ابتکاری و رتبه آن‌ها را در اختیار قرار می‌دهد.

در مطالعه ام‌سی مولن و فرازیر (۱۹۹۸)، توصیفی کیفی از عملکرد تکنیک‌ها برای ارزیابی آنها ارائه می‌شود. با این وجود، چنین تحلیلی نمی‌تواند به مدیر ALB در تصمیم‌گیری مناسب برای انتخاب تکنیک کمک کند. چنین توصیفی که از اصطلاحات خوب، عادلانه، ضعیف، مفرط و قوی استفاده می‌کند در جدول ۵ برگرفته از مطالعه ام‌سی مولن و فرازیر (۱۹۹۸) مشاهده می‌شود. به علت طولانی بودن جدول مورد نظر، فقط اطلاعات مربوط به ۵ تکنیک از بین بیست و سه تکنیک درج شده‌اند.

جدول ۵. خلاصه کارایی تکنیک‌های ابتکاری (ام‌سی مولن و فرازیر، ۱۹۹۸)

مسأله/ تکنیک ابتکاری	۱۱- وظیفه	۲۱-وظیفه	۲۵-وظیفه	۲۹- وظیفه	۴۰-وظیفه	۴۵-وظیفه	۷۴-وظیفه	نظر
۱	۰/۸۸۹ ۱/۱۸۷	۰/۹۷۹ ۱/۰۱۹	۰/۹۹۹ ۱/۱۳۷	۰/۹۲۸ ۱/۱۳۷	۱/۰۰۰ ۱/۰۰۰	۱/۰۰۰ ۱/۰۰۰	۱/۰۰۰ ۱/۰۰۰	خوب نسبتاً خوب
۲	۱/۰۰۰ ۱/۰۰۰	۰/۹۳۰ ۱/۰۹۳	۰/۸۸۲ ۱/۲۹۴	۰/۹۶۶ ۱/۱۰۱	۱/۰۱۴ ۱/۰۱۶	۰/۸۴۰ ۱/۱۲۲	۰/۸۴۰ ۱/۱۲۲	ضعیف ناکارا
۳	۰/۹۸۹ ۱/۸۴۷	۰/۹۶۲ ۱/۲۹۳	۰/۹۵۴ ۱/۰۵۶	۰/۹۴۲ ۰/۱۰۹	۰/۹۶۵ ۱/۰۴۹	۰/۸۷۳ ۰/۱۳۲	۰/۹۶۰ ۱/۱۳۸	ضعیف ناکارا
۴	۱/۰۰۰	۰/۹۸۱	۰/۸۳۴	۰/۸۱۱	۰/۸۶۶	۰/۹۲۲	۰/۸۰۸	نسبتاً خوب

	۱/۰۰۰	۱/۰۵۲	۱/۰۷۰	۱/۱۸۹	۱/۱۲۹	۱/۰۵۶	۱/۱۵۷	ناکارا
۵	۰/۸۷۹	۰/۷۸۰	۰/۸۴۴	۰/۶۸۲	۰/۷۰۶	۰/۷۳۳	۰/۶۹۳	ضعیف
	۱/۰۵۳	۰/۱۲۹	۱/۰۶۷	۱/۲۹۱	۱/۲۰۳	۱/۱۵۹	۱/۲۱۹	ناکارا

در مطالعه جولای، رضایی، و وظیفه (۲۰۰۹)، مقایسه جواب‌ها براساس دستیابی به اندازه‌گیری کارایی ورودی-محور به کمک مدل زیر (رابطه‌های ۲۱-۲۵) انجام می‌شود و نتایج حاصل از کارایی در جدول ۱۰ ثبت شده، که عدد بالای هر ستون وزن متناظر با کاهش هر ورودی است. جواب‌های ۱، ۲، ۳، ۹، ۱۰، ۱۸، و ۱۹ نامزدهای طراحی نهایی خط مونتاژ هستند.

$$\theta^{(o)*} = \text{Min} \sum_{r=1}^3 f_r \theta_i^{(o)} \quad \text{رابطه ۲۱}$$

$$s.t. \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq o}}^{19} \lambda_j x_{ij} \leq \theta_i^{(o)} x_i^{(o)}, \quad i = 1, \dots, 3 \quad \text{رابطه ۲۲}$$

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq o}}^{19} \lambda_j y_{rj} \geq y_r^{(o)}, \quad r = 1, \dots, 3 \quad \text{رابطه ۲۳}$$

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq o}}^{19} \lambda_j = 1 \quad \text{رابطه ۲۴}$$

$$\lambda_j \geq 0 \quad j = 1, \dots, 19 \quad \text{رابطه ۲۵}$$

جدول ۶. کارایی جواب‌های دگرین ALB (جولای، رضایی، و وظیفه، ۲۰۰۹)

جواب	$(\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3})$	(۰/۱، ۰/۳، ۰/۶)	(۰/۴، ۰/۲، ۰/۴)
۱	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰
۲	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰
۳	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰
۴	۰/۸۲۷	۰/۷۵۱	۰/۸۳۲
۵	۰/۵۵۹	۰/۴۲۰	۰/۶۱۳
۶	۰/۴۹۴	۰/۳۳۰	۰/۵۵۳
۷	۰/۸۴۲	۰/۷۵۱	۰/۸۳۷
۸	۰/۵۲۱	۰/۳۶۲	۰/۵۵۸
۹	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰
۱۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰
۱۱	۰/۵۷۰	۰/۴۳۵	۰/۶۱۸
۱۲	۰/۵۴۲	۰/۳۸۸	۰/۵۹۲
۱۳	۰/۸۴۶	۰/۷۷۳	۰/۸۴۸
۱۴	۰/۶۷۶	۰/۵۷۳	۰/۷۱۵
۱۵	۰/۵۵۴	۰/۴۱۶	۰/۶۱۰

۰/۶۹۲	۰/۵۴۵	۰/۷۷۴	۰/۶۴۹	۱۶
۰/۶۹۵	۰/۵۴۷	۰/۸۰۳	۰/۶۶۸	۱۷
۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱۸
۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱۹

### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

تکنیک DEA یک روش ریاضی برای اندازه‌گیری کارایی مجموعه‌ای از DMU هایی است که چند ورودی را برای تولید چند خروجی مصرف می‌کنند. این DMU ها می‌توانند جواب‌ها یا تکنیک‌هایی برای ALB باشند. طراحی ALB نقش مهمی در افزایش کارایی خط مونتاژ دارد. یک خط مونتاژ مجموعه محدودی از عناصر کار یا وظایف را شامل می‌شود، هر عضو این مجموعه زمان پردازش عملیات و مجموعه‌ای از روابط پیش‌نیازی است. از آنجایی که موازنه ناکارایی خط هزینه زمان زیادی را در بردارد، لازم است که روش‌های کارا برای موازنه خط ارائه شود. با این حال، تاکنون، هیچ یک از مطالعات ارائه شده توجه کافی به کارترین روش موازنه را نداشتند و یک طراحی منحصر به فرد را معرفی نکردند. در بعضی از مطالعات، چندین تکنیک ابتکاری به‌عنوان تکنیک کارا همراه با توصیف کیفی عملکرد، معرفی شدند. این گونه توصیفات نمی‌توانند به مدیر در تصمیم‌گیری برای انتخاب یک روش منحصر به فرد کمک کنند.

بنابراین، این مطالعه الگوریتمی پیشنهاد می‌دهد که به دنبال جواب ارجح در بین جواب‌های چندگانه برای مسأله ALB است. برای دستیابی به این هدف، الگوریتم با دو مثال کاربردی از ادبیات تشریح می‌شود. یکی از مثال‌ها شامل چندین تکنیک ابتکاری است که چند مسأله ALB را حل می‌کند و دیگری شامل جواب‌هایی است که توسط یک تکنیک ابتکاری ایجاد می‌شود. هدف در یک مثال انتخاب تکنیک ابتکاری ارجح و در مثال دیگر انتخاب جواب ارجح است. تکنیک‌های ابتکاری و جواب‌ها توسط DEA ارزیابی می‌شوند. مدل کارایی متقاطع از معیارها به‌عنوان ورودی‌ها و خروجی‌ها استفاده می‌کند و رتبه‌ای را برای تکنیک‌ها یا جواب‌ها فراهم می‌کند. در یک مثال از یک مدل کارایی متقاطع استفاده می‌شود که مقدار رتبه هر تکنیک ابتکاری متفاوت است. در مثال دیگر، از چند مسأله که تفاوتشان در ضرایب تابع هدف است استفاده می‌شود و برطبق آن جایگاه هر جواب متفاوت می‌شود. چندگانه بودن جایگاه مشکل در انتخاب ایجاد می‌کند. برای غلبه بر چنین مشکلی، الگوریتم پیشنهاد شده ارجحیت‌هایی را به کار می‌برد. وزن‌ها با مقادیر کارایی مرتبط می‌شوند. مجموع وزن‌دار شده در کمک به مدیر در تصمیم‌گیری می‌توانند مفید باشند؛ زیرا روش‌ها یا جواب‌ها را از بیشترین ارجحیت به کمترین مرتب می‌کنند. برای تحقیق در آینده، می‌توان روش را به این صورت توسعه داد که بهترین مقیاس اندازه‌گیری در نظر گرفته می‌شود. به این معنی که جواب‌های اتخاذ شده، از ابتدا تعداد کارگرها و میزان تجهیزات بهینه را به کار گیرند، همچنین، خروجی‌های موجود در بهترین مقیاس اندازه‌گیری باشند.

### پیوست

#### دادهای ورودی و خروجی مسأله ۲۱- وظیفه

روش	POT	CTR	تعداد کارگر	مقدار تجهیزات
۱	۰/۷۷۵۸	۰/۹۳۷۱	۱۷	۴۳
۲	۰/۶۹۹۶	۰/۹۳۳۱	۱۶	۵۲
۳	۰/۷۸۹۷	۰/۹۳۲۹	۱۷	۴۶
۴	۰/۶۹۴۳	۰/۹۲۹۱	۱۶	۴۶
۵	۰/۷۴۷۵	۰/۹۴۶۱	۱۶	۷۱

#### دادهای ورودی و خروجی مسأله ۱۱- وظیفه

POT	CTR	تعداد کارگر	مقدار تجهیزات
۰/۵۹۴۴	۰/۹۷۵۲	۱۰	۳۱
۰/۹۵۴۷	۰/۰۰۱۲	۱۰	۲۴
۰/۸۰۶۷	۰/۹۶۲۷	۹	۲۸
۰/۷۵۶۶	۰/۹۴۴۹	۹	۲۷
۰/۸۸۷۸	۰/۹۸۰۸	۱۰	۳۵

۶	۰/۷۴۷۵	۰/۹۴۶۱	۱۶	۷۱
۷	۰/۷۴۷۵	۰/۹۴۶۱	۱۶	۷۱
۸	۰/۸۱۰۰	۰/۹۵۳۵	۱۶	۵۱
۹	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱۶	۳۳۶
۱۰	۰/۹۶۸۶	۰/۹۹۹۵	۲۶	۲۶
۱۱	۰/۸۴۵۳	۰/۹۷۱۷	۱۸	۴۵
۱۲	۰/۸۱۸۳	۰/۹۴۲۷	۱۸	۱۷
۱۳	۰/۸۰۶۶	۰/۹۳۳۲	۱۷	۵۲
۱۴	۰/۷۹۰۷	۰/۹۳۶۹	۱۷	۴۶
۱۵	۰/۹۰۷۷	۰/۹۸۴۵	۱۸	۴۸
۱۶	۰/۹۲۷۱	۰/۹۶۳۵	۱۷	۵۹
۱۷	۰/۹۴۵۷	۰/۹۹۸۵	۱۸	۵۳
۱۸	۰/۷۶۶۲	۰/۹۳۷۲	۱۷	۴۰
۱۹	۰/۸۷۴۹	۰/۹۷۰۰	۱۶	۱۱۵
۲۰	۰/۹۹۷۰	۱/۰۰۰۵	۱۹	۱۰۸
۲۱	۰/۹۳۴۴	۱/۰۰۰۱	۱۸	۱۲۷
۲۲	۰/۹۳۴۴	۱/۰۰۰۱	۱۸	۱۲۷
۲۳	۰/۹۷۰۰	۰/۹۹۹۷	۱۹	۹۱

۰/۸۸۷۸	۰/۹۸۰۸	۱۰	۳۵
۰/۸۸۷۸	۰/۹۸۰۸	۱۰	۳۵
۰/۹۲۰۶	۰/۹۸۰۸	۱۰	۳۵
۰/۹۱۹۳	۰/۹۹۹۹	۹	۹۹
۰/۹۹۰۸	۱/۰۰۰۱	۱۴	۱۴
۰/۹۴۱۳	۱/۰۰۰۰	۱۴	۳۴
۰/۹۴۱۳	۱/۰۰۰۰	۱۰	۳۴
۰/۸۷۹۷	۱/۰۰۰۰	۱۰	۲۳
۰/۹۴۱۳	۰/۹۸۸۵	۱۰	۳۴
۰/۸۷۹۷	۱/۰۰۰۲	۱۰	۲۳
۰/۹۴۱۳	۰/۹۷۰۸	۱۰	۳۴
۰/۷۳۹۹	۱/۰۰۰۰	۱۰	۲۵
۰/۹۴۴۴	۰/۹۹۹۹	۱۰	۲۴
۰/۹۳۳۱	۱/۰۰۰۱	۱۰	۲۴
۰/۹۹۶۶	۱/۰۰۰۰	۱۱	۲۸
۰/۹۹۵۳	۱/۰۰۰۰	۱۱	۲۸
۰/۹۹۵۳	۱/۰۰۰۰	۱۱	۲۸
۰/۹۹۴۲	۱/۰۰۱۲	۱۱	۲۵

دادهای ورودی و خروجی مسأله ۲۹- وظیفه

دادهای ورودی و خروجی مسأله ۲۵- وظیفه

روش	POT	CTR	تعداد کارگر	مقدار تجهیزات	POT	CTR	تعداد کارگر	مقدار تجهیزات
۱	۰/۶۸۸۱	۰/۷۹۵۲	۲۵	۷۸	۰/۶۹۴۸	۰/۹۳۰۷	۲۰	۶۴
۲	۰/۶۶۰۸	۰/۷۷۲۰	۲۴	۷۴	۰/۵۸۰۴	۰/۹۳۴۹	۲۰	۸۳
۳	۰/۷۱۲۱	۰/۸۰۰۴	۲۵	۷۷	۰/۷۹۴۶	۰/۹۴۰۴	۲۰	۷۱
۴	۰/۶۱۸۳	۰/۸۵۳۵	۲۴	۱۰۸	۰/۸۵۸۵	۰/۹۶۲۹	۲۰	۹۸
۵	۰/۷۹۹۷	۰/۵۴۳۵	۲۵	۱۴۵	۰/۸۳۵۶	۰/۹۷۷۳	۲۰	۹۶
۶	۰/۷۷۴۰	۰/۸۸۷۶	۲۵	۱۲۳	۰/۸۳۵۶	۰/۹۷۷۳	۲۰	۹۶
۷	۰/۶۷۱۶	۰/۸۷۹۵	۲۵	۱۰۲	۰/۸۳۵۶	۰/۹۷۷۳	۲۰	۹۶
۸	۰/۷۶۸۴	۰/۸۷۹۵	۲۵	۱۱۳	۰/۷۷۵۷	۰/۹۳۳۲	۲۰	۷۳
۹	۰/۶۹۱۰	۰/۹۹۷۹	۲۳	۶۶۷	۰/۸۷۵۷	۱/۰۰۰۹	۱۹	۴۷۵
۱۰	۰/۸۸۵۳	۰/۹۴۶۸	۳۸	۳۸	۰/۹۳۸۸	۰/۹۹۹۵	۳۲	۳۲
۱۱	۰/۷۲۳۰	۰/۸۴۵۷	۲۵	۱۰۰	۰/۷۰۶۹	۰/۹۴۹۱	۲۰	۷۱
۱۲	۰/۷۲۱۹	۰/۸۱۰۸	۲۵	۹۶	۰/۷۲۵۷	۰/۹۶۶۴	۲۰	۷۵
۱۳	۰/۷۷۷۹	۰/۸۷۷۷	۲۶	۸۳	۰/۸۱۸۱	۰/۹۳۲۴	۲۰	۶۷
۱۴	۰/۶۶۰۱	۰/۵۸۳۴	۲۴	۷۳	۰/۸۸۹۰	۰/۹۵۳۱	۲۱	۶۵
۱۵	۰/۶۸۸۴	۰/۷۵۷۱	۲۷	۹۸	۰/۸۸۴۴	۰/۹۸۸۴	۲۰	۱۳۴

۱۶	۰/۷۳۹۵	۰/۷۸۷۶	۲۶	۶۴	۰/۷۹۲۸	۰/۹۴۵۳	۲۰	۶۴
۱۷	۰/۶۷۷۳	۰/۸۶۴۳	۲۵	۶۶	۰/۸۶۳۰	۰/۹۷۶۸	۲۰	۹۰
۱۸	۰/۶۸۹۳	۰/۶۴۸۴	۲۵	۶۲	۰/۶۴۹۱	۰/۹۳۰۰	۱۹	۷۱
۱۹	۰/۷۳۶۰	۰/۸۷۷۹	۲۴	۱۴۲	۰/۷۳۴۲	۰/۹۶۷۷	۱۹	۱۴۱
۲۰	۰/۹۴۹۸	۰/۹۹۹۹	۲۸	۱۶۲	۰/۹۹۳۹	۰/۹۹۹۹	۲۳	۹۶
۲۱	۰/۸۴۳۱	۱/۰۰۰۷	۲۷	۱۳۳	۰/۹۶۹۵	۰/۹۹۹۹	۲۲	۸۹
۲۲	۰/۸۴۳۱	۱/۰۰۰۷	۲۷	۱۳۳	۰/۹۶۳۷	۱/۰۰۰۴	۲۲	۹۰
۲۳	۰/۸۴۳۱	۱/۰۰۰۷	۲۷	۱۳۳	۰/۹۶۳۷	۱/۰۰۰۴	۲۱	۸۸

دادهای ورودی و خروجی مسأله ۴۵- وظیفه

دادهای ورودی و خروجی مسأله ۴۰- وظیفه

روش	POT	CTR	تعداد کارگر	مقدار تجهیزات	POT	CTR	تعداد کارگر	مقدار تجهیزات
۱	۰/۷۲۹۴	۰/۸۰۸۱	۳۵	۷۹	۰/۷۵۹۸	۰/۸۰۶۱	۳۶	۸۳
۲	۰/۶۴۷۹	۰/۸۶۶۷	۳۴	۱۳۱	۰/۶۹۹۵	۰/۸۲۰۹	۳۴	۹۲
۳	۰/۷۷۴۷	۰/۷۶۰۳	۳۵	۱۱۸	۰/۷۰۱۱	۰/۸۰۴۵	۳۴	۹۸
۴	۰/۷۳۵۱	۰/۸۲۵۷	۳۵	۱۰۴	۰/۶۶۲۳	۰/۸۲۹۷	۳۳	۱۲۹
۵	۰/۶۶۰۲	۰/۸۸۳۲	۳۴	۱۷۹	۰/۶۸۰۰	۰/۸۷۵۳	۳۵	۱۹۳
۶	۰/۶۹۸۱	۰/۸۲۸۹	۳۴	۱۸۵	۰/۷۲۲۱	۰/۸۲۸۹	۳۴	۱۲۶
۷	۰/۷۹۱۸	۰/۸۳۲۵	۳۵	۱۷۷	۰/۷۲۲۱	۰/۸۲۸۹	۳۴	۱۲۶
۸	۰/۷۵۰۸	۰/۸۷۴۸	۳۵	۱۴۷	۰/۶۸۹۳	۰/۷۹۰۰	۳۴	۱۱۲
۹	۰/۷۲۵۲	۰/۸۸۷۳	۳۲	۱۴۴	۰/۷۷۸۷	۱/۰۰۰۰	۳۲	۱۲۸
۱۰	۰/۸۹۶۷	۱/۰۰۰۱۶	۵۳	۵۳	۰/۸۶۱۲	۰/۸۲۱۲	۴۹	۴۹
۱۱	۰/۷۴۷۹	۰/۸۸۶۱	۳۶	۱۱۹	۰/۷۵۲۸	۰/۸۱۸۳	۳۵	۱۰۰
۱۲	۰/۷۱۹۹	۰/۷۷۵۹	۳۵	۱۰۰	۰/۶۷۰۳	۰/۸۱۳۹	۳۴	۱۰۵
۱۳	۰/۷۶۲۰	۰/۷۸۵۶	۳۷	۸۵	۰/۷۴۶۵	۰/۸۳۱۵	۳۶	۱۱۳
۱۴	۰/۷۳۴۴	۰/۷۸۶۰	۳۵	۱۰۸	۰/۸۰۹۷	۰/۸۶۳۹	۳۶	۱۱۹
۱۵	۰/۷۴۱۴	۰/۷۰۵۲	۳۷	۹۰	۰/۷۵۸۷	۰/۸۳۰۷	۳۵	۱۰۳
۱۶	۰/۷۶۷۸	۰/۸۰۹۲	۳۶	۱۰۹	۰/۷۴۶۶	۰/۸۳۳۷	۳۵	۱۱۴
۱۷	۰/۷۷۴۷	۰/۷۰۸۱	۳۷	۸۸	۰/۷۷۲۷	۰/۸۲۸۱	۳۵	۱۱۲
۱۸	۰/۶۵۷۲	۰/۷۹۶۸	۳۳	۹۸	۰/۶۸۴۹	۰/۶۳۴۰	۳۵	۷۹
۱۹	۰/۶۷۲۶	۰/۸۸۳۱	۳۳	۲۲۶	۰/۶۸۳۴	۰/۸۸۵۲	۳۲	۵۰۷
۲۰	۰/۸۳۳۱	۰/۹۸۰۴	۴۱	۱۶۸	۰/۹۱۷۲	۰/۹۹۹۲	۳۸	۲۵۹
۲۱	۰/۹۳۰۵	۰/۹۵۰۹	۴۰	۱۶۱	۰/۹۱۱۹	۰/۹۷۱۲	۳۸	۱۴۶
۲۲	۰/۹۱۲۹	۰/۹۱۷۳	۳۹	۱۵۷	۰/۹۲۸۷	۰/۹۹۷۲	۳۸	۱۵۰
۲۳	۰/۸۸۱۴	۰/۹۱۰۰	۳۸	۱۵۷	۰/۹۱۸۶	۰/۹۷۲۴	۳۸	۱۴۹

## دادهای ورودی و خروجی مسأله ۷۴-وظیفه

روش	POT	CTR	تعداد کارگر	مقدار تجهیزات
۱	۰/۷۳۵۵	۰/۷۲۱۵	۶۴	۱۲۸
۲	۰/۷۰۲۰	۰/۸۱۵۲	۶۱	۲۴۵
۳	۰/۷۵۶۹	۰/۶۴۱۱	۳۶۳	۳۰۲
۴	۰/۶۶۸۳	۰/۸۲۶۳	۶۰	۳۰۹
۵	۰/۷۳۲۲	۰/۷۹۳۱	۶۰	۳۹۸
۶	۰/۶۹۱۴	۰/۸۴۶۷	۶۰	۴۶۰
۷	۰/۷۸۸۶	۰/۸۷۰۰	۶۱	۴۷۶
۸	۰/۶۸۳۰	۰/۷۹۸۰	۶۰	۲۳۶
۹	۰/۶۹۳۴	۰/۵۴۱۵	۳۲	۲۳۶۸
۱۰	۰/۸۹۵۴	۰/۷۸۹۶	۹۵	۹۵
۱۱	۰/۷۴۲۶	۰/۷۸۹۶	۶۴	۱۸۶
۱۲	۰/۷۴۳۸	۰/۸۴۶۳	۶۴	۲۵۶
۱۳	۰/۷۴۳۸	۰/۸۴۶۳	۶۴	۲۵۶
۱۴	۰/۷۷۴۹	۰/۸۲۰۵	۶۵	۲۱۸
۱۵	۰/۷۳۰۲	۰/۸۰۱۹	۶۴	۲۲۸
۱۶	۰/۷۶۷۸	۰/۷۵۱۶	۶۴	۱۸۲
۱۷	۰/۷۳۰۲	۰/۸۰۱۹	۶۴	۲۲۸
۱۸	۰/۷۳۵۵	۰/۷۲۱۵	۶۴	۱۲۸
۱۹	۰/۶۹۳۰	۰/۸۳۳۹	۵۹	۷۷۶
۲۰	۰/۸۳۳۲	۰/۹۵۹۶	۷۰	۳۶۱
۲۱	۰/۸۳۳۲	۰/۹۲۱۳	۶۷	۳۱۴
۲۲	۰/۸۵۷۰	۰/۹۳۶۳	۶۸	۳۳۸
۲۳	۰/۷۸۷۱	۰/۹۱۶۸	۶۶	۳۱۸

## منابع و مراجع

- [۱] اصغریور، م.، (۱۳۸۹) تصمیم‌گیری چمد شاخصه، تهران، انتشارات دانشگاه تهران.
- [۲] یاکیده، ک.، محفوظی، غ. و سعیدی لوحه سرا، ف. (۱۳۹۷)، رتبه‌بندی بانک‌های کشور بر اساس شاخص CAMEL با استفاده از مدل RAM، مدیریت خدمات تولید، (۱)، ۷۷-۹۳.
- [۳] محمدی زنجیرانی، د.، سلیمی‌فرد، خ.، یوسفی ده‌بیدی، ش.، (۱۳۹۳)، بررسی عملکرد متداول ترین تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه با رویکرد بهینه‌یابی، مجله تحقیق در عملیات در کاربردهای آن، (۴۰): ۶۵-۸۴.
- [4] Abidin, Z. & Kizilay, D. (2020) Constraint Programming Model for Multi-Manned Assembly Line Balancing
- [5] Problem, *Computers & Operations Research*, In press.
- [6] Arcus, A.L. (1996). COMSOAL: A Computer Method of Sequencing Operations for Assembly Lines, *International Journal of Production Research*, 4 (4): 259-277.
- [7] Cooper, W. W., Park, K. S., & Pastor, J. T. (1999). RAM: A range adjusted measure of inefficiency for use
- [8] with additive models, and relations to other models and measures in DEA. *Journal of Productivity Analysis*, 11(1), 5-42.
- [9] Charnes, A., Cooper, W.W. & Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of decision making units, *European Journal of Operational Research*, 2 (6): 429-444.
- [10] Jolai, F., JahangoshaiRezaee, M. & Vazifeh, A. (2009). Multi-criteria decision making for assembly line balancing. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 20:113-121.
- [11] Haibo, Z., Yi, Y., Yao, C. & Joe, Z. (2018). Data envelopment analysis application in sustainability: The origins, development and future directions. *European Journal of Operational Research* 261 (1):1-16.
- [12] Li, Z., Janardhananc, M. N., Tang, Q. & Nielsen, P. (2018), Mathematical model and metaheuristics for simultaneous balancing and sequencing of a robotic mixed-model assembly line, *Engineering Optimization*, 50(5):877-893
- [13] Li, M., Tang, Q., Zheng, Q., Xia, X. & Floudas, C.A. (2017). Rules-based heuristic approach for the U-shaped assembly line balancing problem. *Applied Mathematical Modelling*, 48:423-439.
- [14] McMullen, P. R. & Frazier, G. V. (1998). Using Simulation and Data Envelopment Analysis to Compare Assembly Line Balancing Solutions. *Journal of Productivity Analysis*, 11(2): 149-168.
- [15] Mohan Prasad, M., Ganesan, K., & Suresh, R.K. (2013). An optimal balancing of multiple assembly line for a batch production unit. *International Journal of Lean Thinking* 4 (2): 22-32.
- [16] Mura, M. D. & Dini, G. (2016). Worker Skills and Equipment Optimization in Assembly Line Balancing by a Genetic Approach. *Procedia CIRP*, 44:102-107.
- [17] Pereira, J. & Alvarez-Miranda, E. (2017). An exact approach for the robust assembly line balancing problem. *Omega*, 50(1):2255-2259.
- [18] Pouriye, A., Khorasani, N., HosseinzadehLotfi, F. & Farshchi, P. (2016). Efficient evaluation of urban development in Yazd City, Central Iran using data envelopment analysis. *Environ Monit Assess*, 188:618-11.
- [19] Ritt, M. & Costa, A.M. (2015), Improved integer programming models for simple assembly line balancing and
- [20] related problems, *International Transactions in Operational Research*, 25(4):1345:1359.
- [21] Sexton, T. R., Silkman, R. H. & Hogan, A. J. (1986), Data envelopment analysis: critique and extensions, *New Directions for Program Evaluation*, 1986 (32): 73-105.



- [22] Scholl, A. (1999). *Balancing and sequencing assembly lines* (2nded.). Physica: Heidelberg. Shokrollahpour, E., HosseinzadehLotfi, F.& Zandieh, M. (2016). An integrated data envelopment analysis–artificial neural network approach for benchmarking of bank branches. *Journal of Industrial Engineering International*, 12 (2):137–143.
- [23] Sun, B., Wang, L.,& Peng, Z. (2020). Bound-guided hybrid estimation of distribution algorithm for energy-efficient robotic assembly line balancing. *Computers & Industrial Engineering*, 146: in press.
- [24] Sungur, B.&Yavuz, Y. (2015). Assembly line balancing with hierarchical worker assignment. *Journal of Manufacturing Systems*, 37(1):290-298.
- [25] Talluri, S., Huq, F,& Pinney, W. E. (1997). Application of data envelopment analysis for cell performance evaluation and process improvement in cellular manufacturing, *International Journal of Production research*, 35, (8): 2157-2170.
- [26] Tang, Q., Li, Z., Zhang, L.& Zhang, C. (2014). Balancing stochastic two-sided assembly line with multiple constraints using hybrid teaching-learning-based optimization algorithm. *Computers & Operations Research*, 82:102-113.
- [27] Tapkan, P., Özbakır, L.&Baykasoglu, A. (2016). Bee algorithms for parallel two-sided assembly line balancing problem with walking times. *Applied Soft Computing*, 39:275-291.
- [28] Triki, H., Mellouli, A.& Masmoudi, F. (2017). A multi-objective genetic algorithm for assembly line resource assignment and balancing problem of type 2 (ALRABP-2). *Journal of Intelligent Manufacturing*, 28 (2):371–385.
- [29] Zahiri, B., Tavakkoli-Moghaddam, R. & Rezaei-Malek, M. (2016). An MCDA-DEA approach for mixed-model assembly line balancing problem under uncertainty, *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 30( 5): 2737-2748.
- [30] Zhou, B. & Wu, Q. (2020). Decomposition-based bi-objective optimization for sustainable robotic assembly line balancing problems, *Journal of Manufacturing Systems*, 55, 30-43.