ارائه الگوریتمی با روش تاگوچی چندپاسخه به منظور متعادل‌سازی خطوط مونتاژ در صنعت خودرو (مطالعه موردی: گروه صنعتی سایپا)[1]

نیکو حکمی گیلانی*، دکتر محمدمهدی موحدی**

* دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین، دانشکده مدیریت و حسابداری، گروه مدیریت صنعتی، قزوین، ایران (نویسنده مسئول)،
پست الکترونیکی: nikoo.hakami67@yahoo.com

** استادیار، عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد فیروزکوه، گروه مدیریت صنعتی، فیروزکوه، ایران،
پست الکترونیکی: m_m_movahedi@iaufb.ac.ir

تاریخ دریافت: ۲۸/ ۱ /۱۳۹۲
تاریخ پذیرش: ۳۰/ ۲ /۱۳۹۲

چکیده

یکی از مهم‌ترین موضوع‌ها در بحث متعادل‌سازی خط مونتاژ، کنترل جریان محصول و ساخت به منظور دستیابی به جریان پیوسته مونتاژ و ساخت می‌باشد. در این مقاله، مسئله‌ی متعادل‌سازی یک خط مونتاژ خاص در شرکت خودروسازی سایپا در نظر گرفته شد. یک الگوریتم به منظور متعادل‌سازی خطوط مونتاژی که دارای مشاغل و وظایف مشابهی هستند که باید توسط چند کارگر و در یک زمان واحد انجام شوند، معرفی شد. در این روش، انتظار می‌رود که الگوریتم پیشنهادی در مواردی که کارها به طور همزمان در یک مسیر موازی تکمیل می‌شوند، موثر باشد. به منظور اندازه‌گیری اثربخشی الگوریتم پیشنهادی، معیارهای عملکرد که شامل تعداد کل ایستگاه‌های مونتاژ، تعداد کل کارگران، و بهره‌وری خط می‌باشند، در نظر گرفته شدند. در نتیجه استفاده از الگوریتم پیشنهادی با توجه به در نظر گرفتن عواملی از قبیل سیکل زمانی[2] ، تعداد مجاز کارگران در یک ایستگاه مونتاژ، و زمان بیکاری مجاز هر کارگر، راه حل‌هایی به منظور اندازه‌گیری این معیارها تعیین شدند. با این حال، این راه حل‌ها به ما هیچ اطلاعی در رابطه با به حداقل‌رساندن تعداد ایستگاه‌های مونتاژ و تعداد کل کارگران، همچنین به حداکثررساندن کارآیی خط نمی‌دهند. بنابراین، از روش تاگوچی چندپاسخه به منظور بررسی سطوحی از عواملی که به طور مستقیم تحت تاثیر معیارهای عملکرد سیستم هستند، استفاده شد.

کلمات کلیدی: متعادل‌سازی خط مونتاژ ، روش تاگوچی چند پاسخه ، آزمایش‌های شبیه سازی

1. مقاله مستخرج از پایان نامه نیکو حکمی گیلانی، دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین، دانشکده مدیریت و حسابداری، گروه مدیریت صنعتی، قزوین، ایران، می باشد

2. Cycle Time

Archive of SID
www.SID.ir

مقدمه

هدف از سرمایه‌گذاری، تولید سریع و کاهش هزینه‌های محصولات با فعالیت‌های تولیدی متمایز می‌باشد. بدین وسیله، کارها بر روی یک خط که شامل ایستگاه‌های مونتاژ مختلف می‌باشد، در حال انتقال می‌باشند و لازم است که کارها توسط کارگران انجام شوند. از آنجایی که رقابت، تنوع نیازمندی‌های مشتریان را افزایش می‌دهد، بسیاری از شرکت‌ها هدف خود را به حداکثر رساندن محصول‌های خروجی و تولیدات خطوط مونتاژ قرار داده‌اند. بنابراین، بسیاری از فعالیت‌های بهبود، عمدتاً متعادل‌سازی خط مونتاژ، به منظور بهبود نرخ بهره‌وری انجام می‌شود.

یکی از ویژگی‌های اساسی متعادل‌سازی خط مونتاژ این است که کار از یک ایستگاه به ایستگاه دیگر منتقل می‌شود. مشکل اصلی در خط مونتاژ این است که کار مورد نیاز، باید در یک ایستگاه با در نظرگرفتن محدودیت‌های سیستم تولید و پیش‌نیازهای شغل اختصاص داده شود. این یک مسئله متعادل‌سازی خط مونتاژ نامیده می‌شود. اگر یک مدل مجزا در متعادل‌سازی خط مونتاژ و مشاغل مورد نیاز وجود داشته باشند و زمان پردازش کارها مشخص و ثابت باشد، این یک مسئله متعادل‌سازی خط مونتاژ ساده[1] (SALBP) نامیده می‌شود (بای بارز[2]، ۱۹۸۶، صص ۹۳۲-۹۰۹). به منظور متعادل‌سازی این نوع خطوط مونتاژ، اطلاعات ذیل مورد نیاز است:

- نرخ تولید؛
- کارهای لازم برای تولید یک محصول و زمان پردازش استاندارد هر کار؛
- دستور کار و روابط پیش‌نیازی بین کارها؛
- محدودیت‌های سیستم تولید و محصولات.

یک خط مونتاژ را می‌توان بر طبق معیارهای مختلف از جمله نوع محصول (تک محصولی و چند محصولی)، نوع طراحی خط مونتاژ (موازی، U شکل و افقی)، و نوع زمان پردازش (قطعی و تصادفی) طبقه‌بندی کرد (بکر و شول[3]، ۲۰۰۶، صص ۷۱۵-۶۹۴). علاوه بر طبقه‌بندی فوق، نوعی از دسته‌بندی بر اساس تعداد کارگران (تک‌کارگره و چند کارگره) نیز می‌تواند در نظر گرفته شود (دیمیت ریاتیس[4]، ۲۰۰۵، صص ۲۷۷۴-۲۷۵۷).

در تحقیق حاضر، خط مونتاژ مورد مطالعه متفاوت از SALBP است، به طوری که در آن بیش از یک کارگر می‌توانند کاری یکسان را در یک ایستگاه واحد انجام دهند. پارامترهای زیر نیز باید برای این نوع از خطوط مونتاژ در نظر گرفته شوند:

- تعداد کارگرانی که می‌توانند در یک ایستگاه، کار مشابه انجام دهند؛
- حداکثر تعداد مجاز کارگران در یک ایستگاه؛
- زمان بیکاری مجاز یک کارگر.

این موارد در بخش ۴ به صورت مفصل توضیح داده شده است.

مسئله متعادل‌سازی خط چندکارگره با متعادل‌سازی خط تک‌کارگره در شرایط مفروضات و محدودیت‌ها، مشابه است. تنها تفاوت این است که در خط مونتاژ با چند کارگر، بیشتر از یک کارگر مجاز به انجام کاری یکسان به صورت موازی در یک ایستگاه مونتاژ می‌باشند. مسئله متعادل‌سازی خط کلاسیک بر پایه این فرض است که یک ایستگاه، تنها شامل یک کارگر می‌باشد. با این حال، در خط مونتاژ با چند کارگر، بیش از یک کارگر مجاز به انجام کار مشابه در یک ایستگاه می‌باشند. بدین وسیله، خط با چند کارگر می‌تواند به عنوان نوع خاصی از متعادل‌سازی خط کلاسیک در نظر گرفته شود.

در صنعت خودروسازی، یک خط مونتاژ طولانی برای حجم بالا و محصولات انبوه مورد نیاز است. این یکی از مسائل مهم برای کارخانه‌ها است که در خط طولانی نیاز به مکانی بزرگ می‌باشد. بنابراین، برای طراحی حجم بالا و تولید انبوه باید در مکان صرفه‌جویی شود. برای صرفه‌جویی در مکان، تخصیص چند کارگر به یک ایستگاه واحد پیشنهاد شده است.

در برخی موارد، چند کارگر به دلایل اجباری باید به یک ایستگاه مونتاژ اختصاص داده شوند. در مورد مونتاژ یک

1. Simple Assembly Line Balancing Problem
2. Baybars
3 . Becker, and Scholl
4 . Dimitriadis

Archive of SID

www.SID.ir

بخش خودرو در یک ایستگاه، مونتاژ بزرگی از قطعات در هر سمت وسیله نقلیه ممکن است نیاز داشته باشند تا به طور همزمان توسط چند کارگر انجام شوند. علاوه بر آن، به طور مثال، یک صندلی در اتوبوس برای نشستن چهار نفر طراحی شده است؛ این یکی از بخش‌های سنگین و بزرگ در تولید است. دو نفر قطعه را بلند می‌کنند و شخص سوم باید فرآیندها (جوشکاری، اتصال، و غیره) را انجام دهد. این «کار مشترک» نامیده می‌شود. در این مورد، فرآیند طراحی با چند کارگر در یک ایستگاه نه تنها یک معیار مهم است، بلکه حداکثر تعداد مجاز کارگران در یک ایستگاه نیز باید در نظر گرفته شود.

برای این نوع از خط مونتاژ، محصول باید از ایستگاه اول به ایستگاه آخر منتقل شود و کارهای لازم به طور همزمان توسط کارگران در یک سیکل زمانی مشخص انجام می‌شوند. کارگران نباید در عمل مانع یکدیگر شوند. پس از اتمام کار مورد نیاز، محصول باید از ایستگاه مونتاژ خارج شود. فرآیندهای مونتاژ بدون وقفه بر طبق روابط پیش‌نیازی ادامه می‌یابند. با این حال، کار یک کارگر از تأخیر کارگر دیگر در یک خط مونتاژ چندکارگره تحت تاثیر قرار می‌گیرد. بنابراین، زمان بیکاری بین کارها در ایستگاه مشابه اجتناب ناپذیر می‌باشد. بدین وسیله، نکات ذیل را باید قبل از تصمیم‌گیری برای فرض چند کارگر در یک ایستگاه در نظر گرفت.

- بدون تجاوز از حداکثر تعداد مجاز کارگران؛ چگونه چندین کارگر باید به یک ایستگاه مونتاژ اختصاص داده شوند که در آن کارگران نباید مانع یکدیگر شوند.
- کارهایی که توسط یک شخص انجام می‌گیرند، باید به کدام کارگر اختصاص داده شوند.
- کارهایی که توسط چند کارگر انجام می‌گیرند، باید به کدام کارگران اختصاص داده شوند.
- کارهایی که توسط چند کارگر انجام می‌شوند، باید به کدام ایستگاه مونتاژ اختصاص داده شوند.

در این پژوهش، الگوریتمی به منظور پیدا کردن پاسخ‌هایی برای مسائل ذکر شده معرفی شده است.

در ادبیات به ندرت می‌توان تحقیقات مفروض در مورد بیش از یک کارگر که به طور موازی در ایستگاه مونتاژ مشابه کار می‌کنند، یافت. یکی از تحقیقات قبلی توسط دیمیت ریاتیس (۲۰۰۵) انجام شده است. اگر چه دیمیت ریاتیس در تحقیق خود، چند کارگر را در یک ایستگاه در نظر گرفته بود، ولی کارگران کارهای مستقل از هم انجام می‌دادند. در مقاله حاضر، یک الگوریتم مبتنی بر چند کارگر که به طور موازی در ایستگاه مونتاژ مشابه، کار انجام می‌دهند؛ معرفی شده است. بنابراین، این الگوریتم می‌تواند به عنوان بسطی از الگوریتم دیمیت ریاتیس در نظر گرفته شود.

هدف از متعادل‌سازی خط، که با در نظر گرفتن جمع‌آوری کارهای مشابه طراحی شده است؛ دستیابی به بهترین راه حل برای معیارهای عملکرد می‌باشد. معیارهای عملکرد ممکن است اهداف متضاد داشته باشند و ارزیابی این اهداف متضاد آسان نیست. روش تاگوچی چندپاسخه، تکنیکی است که می‌تواند بیش از یک معیار عملکرد را برای ارزیابی آن‌ها با هم، مورد بررسی قرار دهد. این روش برای شناسایی سطوح فاکتورهای عملکرد از قبیل سیکل زمانی، زمان بیکاری مجاز یک کارگر، و تعداد مجاز کارگران در یک ایستگاه که معیارهای عملکرد از جمله تعداد ایستگاه‌های مونتاژ، تعداد کل کارگران، و بهره‌وری خط را عملی می‌سازند، مورد استفاده قرار گرفته است.

در واقع در این تحقیق بر آن هستیم تا به بررسی این موضوع بپردازیم که کار مشترک در خطوط مونتاژ که به صورت همزمان توسط چند کارگر انجام می‌شوند؛ در حال حاضر در تخصیص نفرات به ایستگاه‌های خط مونتاژ و کارآیی خط چه مشکلاتی را پدید آورده اند و روش تاگوچی در قالب یک الگوریتم کاربردی در خطوط مونتاژ نهایی صنایع خودرو چگونه می‌تواند نقایص فوق را رفع کند.

Archive of SID

www.SID.ir

در بخش‌های بعدی این مقاله، ادبیات مساله متعادل‌سازی خط مونتاژ در بخش ۲ ذکر شده است. روش تحقیق در بخش ۳ توضیح داده شده است. جزئیات الگوریتم پیشنهادی و دلایل استفاده از روش تاگوچی چندپاسخه و مراحل آن در بخش ۴ ذکر شده است. نتایج الگوریتم پیشنهادی و روش تاگوچی در بخش ۵ مورد بحث قرار گرفته است؛ و نتیجه‌گیری این پژوهش و پیشنهادات برای تحقیقات آتی در بخش آخر ذکر شده است.

۲- مروری بر ادبیات تحقیق

امروزه مسئله متعادل‌سازی خط مونتاژ، یک موضوع مهم در طراحی و مکان‌یابی کارخانه و ماشین‌آلات آن می‌باشد. بویسن و همکاران[1] (۲۰۰۷) یک طبقه‌بندی از مسائل متعادل‌سازی خط مونتاژ را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها یک بررسی گسترده درباره مسائل متعادل‌سازی خط مونتاژ انجام دادند. تکنیک‌های حل مختلفی مانند روش‌های تحلیلی، روش‌های شبیه‌سازی، و الگوریتم‌های ابتکاری وجود دارند.

تکنیک‌های تحلیلی برای پیدا کردن راه حل دقیق برای یک مسئله بهینه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. از آنجایی که ماهیت مسائل بهینه‌سازی به این صورت است که در بسیاری از موارد یافتن یک راه حل دقیق ممکن نیست؛ مسئله متعادل‌سازی خط مونتاژ نیز، به سبب اهداف و محدودیت‌هایش، به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است. یکی از تحقیقات قبلی در رابطه با مسئله موازنه خط (برای مثال، تخصیص کارها به ایستگاه‌ها) توسط سالوسون[2] (۱۹۵۵) به صورت برنامه‌ریزی خطی تنظیم و فرموله شد. جکسون[3] (۱۹۵۶) یک الگوریتم پویا را برای تخصیص کارها به ایستگاه‌های مونتاژ توسعه داد. همچنین یک الگوریتم برنامه‌ریزی عدد صحیح توسط بومن[4] (۱۹۶۰) تکمیل شد. با این حال، بسیاری از مسائل بهینه‌سازی از نوع NP-hard هستند؛ بنابراین، روش‌های تحلیلی نمی‌توانند برای مسائل بهینه‌سازی مناسب باشند. در عوض، روش‌های دیگری برای پیدا کردن یک راه حل معقول و منطقی به جای یک راه حل دقیق ترجیح داده می‌شوند. پاستور و فرر[5] (۲۰۰۹) یک برنامه ریاضی موثرتر از آن‌هایی که قبلاً ارائه شده بود، برای حل SALBP-1 (به حداقل رساندن تعداد ایستگاه‌های کاری، m، برای یک سیکل زمانی معین، c_t) و SALBP-2 (به حداقل رساندن c_t با m مشخص) طراحی کردند. نورمحمدی و زندیه[6] (۲۰۱۰) یک الگوریتم تکامل تفاضلی چندهدفه را برای حل مسئله متعادل‌سازی خط مونتاژ ساده چندهدفه نوع دوم پیشنهاد کردند. آنها طرح جدیدی مبتنی بر مفهوم پارتو[7] و یک طرح ارزیابی جدید مبتنی بر روش تاپسیس[8] توسعه دادند. کارا و همکاران[9] (۲۰۱۰) دو رویکرد برنامه‌ریزی آرمانی برای متعادل‌سازی خطوط مونتاژ موازی، با اهداف دقیق و فازی مطرح کردند.

برخی از روش‌های تحلیلی به منظور شناسایی سطوح موجودی بین ایستگاه‌های مونتاژ تعریف شده‌اند. در بسیاری از موارد، به دلیل ماهیت جریان پویا بین ایستگاه‌های مونتاژ، تکنیک‌های فوق برای پوشش‌دادن تمام ویژگی‌های مسائل، کافی نیستند. بنابراین، روش‌های شبیه‌سازی به منظور در نظر گرفتن ماهیت پویا برای مسائل معرفی شدند. روش‌های شبیه‌سازی ممکن است هیچ گونه تضمینی برای پیدا کردن یک راه حل دقیق برای مسائل بهینه‌سازی ندهند، اما از این طریق می‌توان یک تقریب مناسب برای حل مسائل یافت. کامپیوترهای با سرعت بالا و نرم‌افزار شبیه‌سازی نسل چهارم، برنامه‌های کاربردی زیادی برای مسائل متعادل‌سازی خط ارائه می‌دهند. موبرلی و ویمن[10] (۱۹۷۳) افزایش خروجی یک خط مونتاژ را مورد مطالعه قرار دادند. دریسکولا و عبدالشفیع[11] (۱۹۸۵) یک روش مبتنی بر شبیه‌سازی که

1. Boysen et al.
2. Salveson
3. Jackson
4. Bowman
5. Pastor, and Ferrer
6. Nourmohammadi, and Zandieh
7. Pareto
8. TOPSIS
9. Kara et al.
10. Moberly, and Wyman
11. Driscolla, and Abdel-Shafi

Archive of SID

www.SID.ir

خطوط مونتاژ را با در نظر گرفتن عملکرد سیستم تحت محدودیت‌های در حال تغییر متعادل‌سازی می‌کند، توسعه دادند .

الگوریتم‌های ابتکاری نیز می‌توانند به عنوان یک تکنیک جایگزین برای مسئله متعادل‌سازی خط مونتاژ در نظر گرفته شوند. یک راه حل تقریبی برای مسئله متعادل‌سازی خط می‌تواند با استفاده از الگوریتم‌های ابتکاری که شامل برخی از روش‌ها و مفروضات خاص است به دست آید. در ادبیات، تعدادی از الگوریتم‌های ابتکاری وجود دارند؛ یکی از آنها «بیشترین وزن رتبه‌بندی شده»[1] روش ابتکاری توسعه یافته توسط هلگسون و برنیه[2] (۱۹۶۱) بود. پس از آن، کیلبریج و وستر[3] (۱۹۶۱) یک برنامه کاربردی را با استفاده از الگوریتم ابتکاری خود در شرکت خودروسازی فورد[4] به اجرا در آوردند. روش کوتاه‌ترین مسیر برای مسئله متعادل‌سازی خط توسط کلین[5] (۱۹۶۳) برای حالت تک مدله و توسط ارل و گوکسن[6] (۱۹۹۹) برای حالت چند مدله مورد استفاده قرار گرفت. کیم و همکاران[7] (۲۰۰۰) مسئله متعادل‌سازی خط مونتاژ دو طرفه را با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای محصولات با حجم بالا (مانند، اتوبوس و کامیون) مورد مطالعه قرار دادند. ژل و همکاران[8] (۲۰۰۲) بهبود بهره‌وری در یک «خط مونتاژ متعادل‌سازی شده» را به جای حل یک مسئله متعادل‌سازی خط مورد بررسی قرار دادند.

در ادبیات، جدا از تکنیک‌های فوق، تحقیقاتی در مورد تعداد کارگرانی که در یک ایستگاه مونتاژ کار می‌کنند، وجود دارد. آکاگی و همکاران[9] (۱۹۸۳) یکی از اولین محققانی بودند که مطالعاتی را با در نظر گرفتن چند کارگر مجاز در یک ایستگاه مونتاژ واحد انجام دادند. جانسون[10] (۱۹۹۱) مسئله متعادل‌سازی خط را بر اساس کار تیمی مورد بررسی قرار داد. دیمیت ریاتیس (۲۰۰۵) یک الگوریتم ابتکاری برای حل مسئله خط مونتاژ چندکارگره که اجازه می‌دهد تا بیش از یک کارگر در یک ساختار موازی کار انجام دهند را توسعه داد. گو و همکاران[11] (۲۰۰۸) مسئله متعادل‌سازی خط مونتاژ انعطاف پذیر را با توجه به اشتراک‌گذاری کار مورد مطالعه قرار دادند. وانگ و همکاران[12] (۲۰۱۰) مسئله متعادل‌سازی خط را که در آن تغییر مکان کارگر از یک ایستگاه به ایستگاه دیگر فرض شده بود را مورد بررسی قرار دادند. بکر و شول[13] (۲۰۰۹) تعمیمی از مسئله متعادل‌سازی خط مونتاژ اساسی را به صورت محل‌های کار موازی انعطاف پذیر در صنعت خودرو و دیگر صنایع مونتاژ محصولات بزرگ مطرح کردند.

1. Ranked Positional Weighted
2. Helgeson, and Birnie
3. Kilbridge, and Wester
4. Ford
5. Klein
6. Erel, and Gokcen
7. Kim et al.
8. Gel et al.
9. Akagi et al.
10. Johnson
11. Guo et al.
12. Wang et al.
13. Becker, and Scholl

Archive of SID

www.SID.ir

علاوه بر آن، در ادبیات، مسائل متعادل‌سازی خط در صنعت خودرو نیز مورد توجه بودند. سولنون و همکاران[1] (۲۰۰۸) زمان بندی اتومبیل‌ها در طول یک خط مونتاژ با محدودیت‌های ظرفیت نرم و سخت را مورد مطالعه قرار دادند. مسئله صنعتی در نظر گرفته شده در این چالش، متفاوت از مسئله استاندارد است، چون علاوه بر اعمال محدودیت‌های ظرفیت توسط سالن مونتاژ، همچنین محدودیت‌های دسته‌بندی[2] رنگ را برای به حداقل رساندن مصرف حلال در سالن رنگ مورد توجه قرار می‌دهد. هونگ و همکاران[3] (۲۰۰۹) به کاربرد کار سنجی در مسئله متعادل‌سازی خط مونتاژ علاقه‌مند بودند. آن‌ها از یک رویکرد زمان‌سنجی برای اندازه‌گیری زمان عملیاتی تزیینات داخلی خط مونتاژ استفاده کردند، موقعیت‌های تنگنا را شناسایی کردند و مسائل جاری در خط مونتاژ را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند.

در این پژوهش، یکی از نوآوری های مقاله معرفی یک الگوریتم می‌باشدکه چندکارگر راکه می‌توانند کارهای خود را به طور موازی دریک ایستگاه انجام دهند، در نظر گرفته است.در ادبیات، فرض تخصیص چند کارگر به یک ایستگاه مونتاژ در بسیاری از تحقیقات در نظر گرفته نشده بود.

آکاگی و همکاران (۱۹۸۳)، جانسون (۱۹۹۱)، دیمیت ریاتیس (۲۰۰۵)، گو و همکاران (۲۰۰۸)، وانگ و همکاران (۲۰۱۰)، و بکر و شول (۲۰۰۹) فرض تخصیص چند کارگر به یک ایستگاه مونتاژ را در نظر گرفتند، ولی کارگران کارها را به طور مستقل انجام می‌دادند. در این تحقیق، اگر چه کارگران باید برخی از کارها (یعنی کارهای مشترک) را با هم انجام دهند، آن‌ها همچنین می‌توانند کارهایی را به طور مستقل انجام دهند، اگر پس از اتمام کارهای مشترک، زمان بیکاری داشته باشند. در مسئله ما، یک سؤال دیگر که چگونه چندین کارگر را می‌توان به یک ایستگاه تخصیص داد، وجود دارد. محدودیت‌هایی از جمله محدودیت فضا و شرایط کار راحت در میان چند کارگر می‌تواند وجود داشته باشد (در هر ایستگاه مونتاژ ممکن است تعداد مساوی کارگر جای نداشته باشند)؛ بنابراین، الگوریتم پیشنهادی حداکثر تعداد مجاز کارگران که به یک ایستگاه اختصاص داده خواهند شد را نیز در نظر می‌گیرد.

یکی دیگر از نوآوری‌های مقاله این است که مسئله متعادل‌سازی خط با استفاده از روش تاگوچی چندپاسخه حل می‌شود. در مطالعه ما، تعداد آزمایشات ترکیبی فاکتوریل[4] دقیق، بسیار زیاد خواهد بود. بنابراین، تکنیک طراحی آزمایشات تاگوچی انتخاب شد. این تکنیک، یک مجموعه آزمایش شبیه‌سازی که شامل تعداد منطقی و کمتری آزمایش است را پیشنهاد می‌کند. اگر چه این آزمایشات شبیه‌سازی، نتایج بسیار خوبی از نظر معیارهای عملکرد ایجاد می‌کنند، مسئله «تنظیم مقدار متغیرها» به دلیل معیارهای عملکرد مختلف که اهداف متناقضی دارند، وجود دارد. به علاوه، تکنیک شبیه‌سازی هیچ پاسخی در مورد پارامترهای سیستم و مقدار آن‌ها که تأثیر بیشتری بر روی سه معیار عملکرد دارند، نمی‌دهد. تکنیک طراحی تاگوچی چندپاسخه، جوابی مناسب برای این موضوع ارائه می‌دهد. همچنین وزن نیز با فرآیند تحلیل شبکه ای[5] (ANP) محاسبه شد.

بر طبق دانسته‌های ما، الگوریتم پیشنهادی در این مقاله، اولین پژوهش در داخل کشور است که فرض تخصیص چندکارگر به یک ایستگاه که کارگران کاری مشترک انجام می‌دهند را در نظر می‌گیرد. همچنین در این پژوهش، ادغام مسئله متعادل‌سازی خط، روش تاگوچی چندپاسخه، و روش ANP در نظر گرفته شده است. از دیگر نوآوری‌های مقاله این است که استفاده از الگوریتم تاگوچی در متعادل‌سازی خطوط مونتاژ به عنوان یک رویکرد هیوریستیک با این که در اکثر حوزه‌های مهندسی صنایع با رویکرد بهبود انجام شده، ولی تا کنون در گروه صنعتی خودروسازی کشور در متعادل‌سازی خط اجرا و پیاده‌سازی نشده است.

1. Solnon et al.
2. Batching
3. Hong et al.
4. Factorial
5. Analytical Network Process

Archive of SID

www.SID.ir

۳- روش تحقیق

این تحقیق از لحاظ هدف از نوع کاربردی و به صورت موردی می‌باشد، که برای اجرای آن از دو روش میدانی (پیمایشی) و اسنادی (کتابخانه‌ای) استفاده شده است. در این پژوهش بعد از انتخاب و بیان مسئله، با همکاری کارشناسان واحد برنامه‌ریزی تولید، مونتاژ و بخش مهندسی صنایع شرکت خودروسازی سایپا، فعالیت‌های زیر انجام شده است:

- جمع‌آوری اطلاعات لازم برای متعادل‌سازی یکی از خطوط مونتاژ که شامل تعداد ایستگاه‌های مونتاژ، تعداد پست کاری، نام پست کاری، تعداد کارگر مورد نیاز برای انجام هر کار، زمان‌های پردازش، و روابط پیش‌نیازی می‌باشد، که این اطلاعات از طریق مصاحبه با کارشناسان شرکت سایپا و استفاده از اسناد و مدارک سازمانی و مدارک فنی و همچنین استفاده از اینترانت شرکت و مطالعه برگ عملیات استاندارد بر مبنای تخصیص شغل جمع‌آوری شد؛
- تحلیل وضعیت موجود و انتخاب روش متعادل‌سازی با توجه به اهداف تحقیق و محدودیت‌ها؛
- متعادل‌سازی خط مونتاژ با روش تاگوچی چندپاسخه؛
- مقایسه نتایج حاصل با وضعیت موجود؛
- نتیجه‌گیری و پیشنهادها.

۴- الگوریتم پیشنهادی و روش تاگوچی چندپاسخه

در این مقاله، الگوریتمی به منظور حل مسئله متعادل سازی خط در صنعت خودروسازی تحت فرض تخصیص چندکارگر به‌یک ایستگاه مونتاژ معرفی می‌شود. متغیرهای ورودی از جمله سیکل زمانی، زمان پردازش، روابط پیش‌نیازی، تعداد کارگران، حداکثر زمان بیکاری مجاز برای یک کارگر و حداکثر تعداد مجاز کارگران در یک ایستگاه برای الگوریتم پیشنهادی مورد نیاز هستند؛ که متغیرهای خروجی مانند کل زمان بیکاری، تعداد کل کارگران، وتعداد ایستگاه‌های مونتاژ را ارائه می‌دهند.جدول (۱)علائم و نمادهای به کار رفته در مقاله را نشان می‌دهد.

جدول ۱. نمادهای به کار رفته در مقاله

نماد	شرح
P	بهره‌وری
D	تقاضا
C	سیکل زمانی
TPT	کل زمان پردازش
TIT	کل زمان بیکاری
TDWT	کل زمان کاری روزانه
TWT	کل زمان خالص کار کردن
TNWT	کل زمان غیر کاری
NJOB	تعداد کارها
t_i	زمان پردازش کار i ام
L	تعداد کارگران
tw_i	کل زمان پردازش کارهای تخصیص داده شده به کارگر i ام
UBIT	حداکثر زمان بیکاری مجاز یک کارگر
W_{max}	حداکثر تعداد مجازکارگران دریک ایستگاه

همچنین از فرمول‌های زیر استفاده شده است :

$$TWT = TDWT - TNWT \qquad (۱)$$

$$C = \frac{TWT}{D} \qquad (۲)$$

$$TIT = \sum_{j=1}^{L} (C - tw_j) \qquad (۳)$$

$$TIT = \sum_{j=1}^{NJOB} t_j \qquad (۴)$$

$$P = \frac{TPT}{TPT + TIT} \times 100 \qquad (۵)$$

بهره‌وری یکی از شاخص‌های عملکرد است که باید حداکثر شود. در یک ایستگاه، سیکل زمانی، تعداد کارگران و تعداد ایستگاه‌های مونتاژ، بهره‌وری خط مونتاژ را تحت تأثیر قرار می‌دهند. بنابراین، تعداد کل کارگران، تعداد ایستگاه‌های مونتاژ، و بهره وری باید به طور مشترک برای پیدا کردن یک راه حل منطقی در نظرگرفته شوند. مراحل الگوریتم پیشنهادی در جدول (۲) خلاصه شده است.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۲. مراحل الگوریتم پیشنهادی

مرحله	شرح
۱	تعیین متغیرهای ورودی (سیکل زمانی، حداکثر تعداد مجاز کارگران در یک ایستگاه، و حداکثر زمان بیکاری مجاز یک کارگر) (i=0)
۲	شناسایی تعداد کارگران، L=Wmax−i ، و ایستگاه‌ها؛ تعیین کارهای قابل تخصیص، رتبه بندی کارهای قابل تخصیص، و کار k ام انتخاب می‌شود (k=1)
۳	محاسبه ظرفیت کار کارگران برای ایستگاه n ام
۴	تخصیص کار k ام به کارگری که کمترین ظرفیت کار را دارد، با در نظر گرفتن کارگرانی که می‌توانند این کار را انجام دهند.
۵	اگر جمع زمان پردازش کارهای تخصیص داده شده بیشتر از سیکل زمانی بود، به مرحله ۶ بروید یا اگر نه، به مرحله ۷ بروید.
۶	واگذاری وظیفه (تخصیص کار) یک مانع است. اگر کارهای قابل تخصیص دیگری بیشتر از k وجود دارد، k=k+1، به مرحله ۴ بروید. اگر هیچ کار قابل تخصیصی وجود ندارد، به مرحله ۹ بروید.
۷	به روز رسانی لیست کارهای قابل تخصیص
۸	اگر کار قابل تخصیصی وجود دارد، به مرحله ۳ بروید. اگر نه، به مرحله بعدی بروید.
۹	محاسبه زمان بیکاری هر کارگر
۱۰	اگر زمان بیکاری یک کارگر بالاتر از حداکثر زمان بیکاری مجاز یک کارگر که به عنوان متغیر ورودی الگوریتم مشخص شد، باشد و اگر تعداد کارگران بیشتر از حداکثر تعداد مجاز کارگرانی که برای یک کار قابل تخصیص مورد نیاز است و به عنوان متغیر ورودی الگوریتم مشخص شد، باشد؛ تعداد کارگران را کاهش دهید (i=i+1) و به مرحله ۲ بروید. اگر نه، ادامه دهید و به مرحله ۱۱ بروید.
۱۱	شمردن کارهای ناتمام
۱۲	اگر هرگونه کار ناتمامی وجود دارد، به مرحله ۲ بروید. اگر نه، تخصیص را به پایان برسانید.

www.SID.ir

لگوریتم پیشنهادی تفاوت‌هایی را با تحقیقاتی که در بخش ادبیات مطرح شد، عنوان می‌کند. در نمونه ایستگاه کاری تک‌کارگره، کارگران مستقل از یکدیگر هستند و هر کارگر، کارهای خود را به صورت مستقل انجام می‌دهد. اما ممکن است که این همیشه یک مورد واقع بینانه در کاربردهای واقعی نباشد. به طور مثال، برای تکمیل پردازش مونتاژ یک صندلی در صنعت خودرو، سه کارگر مورد نیاز است و آنها باید کار خود را به طور همزمان انجام دهند. علاوه بر آن، این امکان وجود دارد که همان کارگران بتوانند کارهای مستقل دیگری را بدون دخالت کارهای موازی انجام دهند.

تفاوت دیگر با پارامتر حداکثر زمان بیکاری یک کارگر ارتباط دارد. در الگوریتم دیمیت ریاتیس (۲۰۰۵)، این پارامتر به صورت یک مقدار ثابت فرض شده بود، اما در الگوریتم پیشنهادی ما به صورت یک متغیر فرض شده است.

هنگامی که الگوریتم پیشنهادی تحت پارامترهای ورودی مختلف اجرا شد، به راحتی مشخص نبود که مقادیر ورودی، همزمان بهترین معیارهای عملکرد (به حداقل رساندن تعداد ایستگاه‌های مونتاژ و تعداد کارگران در یک خط، همچنین حداکثر سازی بهره‌وری خط) را ارائه می‌دهند یا خیر. به منظور بررسی این موضوع، آزمایشات شبیه‌سازی زیادی با مقادیر ورودی مختلف مورد نیاز بودند. به طور کلی، یک رویکرد شبیه‌سازی هیچ‌گونه ضمانتی به ارائه پاسخ بر روی عملکرد معیارهای متناقض نمی‌دهد. بنابراین، روش تاگوچی چندپاسخه به منظور شناسایی سطح مقادیر ورودی که منجر به پیدا کردن بهترین پارامترهای سیستم می‌گردد به کار برده می‌شود.طرح آزمایشی تاگوچی یک ابزار برای بررسی بهینه‌سازی فرآیند و محصول می‌باشد. عوامل فرآیندی که بر بهینه‌سازی عملکرد فرآیند اثر می‌گذارند، با استفاده از روش طراحی آزمایشات یافت می‌شوند. این تکنیک یک پاسخ فراهم می‌کند که کدام عوامل بر عملکرد فرایند اثر می‌گذارند و کدام سطوح از عوامل مؤثرتر هستند. از این نقطه نظر، عوامل قابل کنترل که تحت تاثیر عملکرد سیستم هستند، در پژوهش ما در مسئله متعادل‌سازی خط مورد بررسی قرار گرفتند. تاگوچی متوجه شد وقتی که مقدار عوامل تغییر می‌کند، عملکرد سیستم نیز تغییر می‌کند.

در یک تحلیل چندپاسخه از داده‌های به دست آمده از آزمایشات، ساختار داده‌های چندمتغیره نیاز به ملاحظه دقیق دارد. به عبارت دیگر، یک متغیر پاسخ نباید به صورت جداگانه و مستقل از بقیه مورد بررسی قرار گیرد. اگر پاسخ‌ها مستقل از یکدیگر هستند، همه آن‌ها می‌توانند با استفاده از روشی مانند یک نسبت سیگنال به نویز چندپاسخه و یک تابع مطلوبیت به یک پاسخ چندگانه تبدیل شوند. به جای ارزیابی پاسخ‌ها به صورت جداگانه، بسیار معنی‌دارتر است که آن‌ها را توسط یک پاسخ چندگانه مورد بررسی قرار دهیم.

مراحل روش تاگوچی چند پاسخه به شرح ذیل می‌باشد (تونگ و وانگ[1]، ۱۹۹۷، صص ۳۸۰-۳۶۷):

مرحله۱: محاسبه کیفیت از دست‌رفته[2]: معیارهای عملکرد مشخص شده برای هر یک از نسبت‌های سیگنال به نویز[3] (S/N) کیفیت از دست‌رفته، با کمک نسبت‌های S/N چندگانه که پس از اجرای روش تاگوچی سنتی ساخته شده‌اند، اعمال می‌شوند. به عبارت دیگر، برای هر یک از معیارهای عملکرد، کیفیت از دست‌رفته محاسبه می‌شود. کیفیت از دست‌رفته معیارهای عملکرد برای پیداکردن «هر چه کوچکتر، بهتر» و «هر چه بزرگتر، بهتر» مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$\mathbf{L_{ij}} = \mathbf{k_1}\frac{1}{\mathbf{n_i}}\sum_{\mathbf{k=1}}^{\mathbf{n_j}}\mathbf{y_{ijk}^2} \quad \text{(هر چه کوچکتر، بهتر)} \quad (۶)$$

$$\mathbf{L_{ij}} = \mathbf{k_2}\frac{1}{\mathbf{n_i}}\sum_{\mathbf{k=1}}^{\mathbf{n_i}}\frac{1}{\mathbf{y_{ijk}^2}} \quad \text{(هر چه بزرگتر، بهتر)} \quad (۷)$$

مرحله۲: تعیین نسبت سیگنال به نویز چندپاسخه[4] (MRSN): در این مرحله، کیفیت از دست‌رفته محاسبه شده برای هر آزمایش را نرمالایز می‌کنیم.

1 . Tong, and Wang
2 . Quality loss
3. Signal-to-noise
4 . Multi-response signal-to-noise

Archive of SID

www.SID.ir

$$C_{ij} = \frac{L_{ij}}{L_i^*} \quad (۸)$$

$$L_i^* = \max\{L_{i1}, L_{i2}, L_{i3}, ..., L_{ij}\} \quad (۹)$$

پس از آن، مجموع کیفیت از دست‌رفته نرمالایز شده[1] (TNQL) محاسبه می‌شود.

$$TNQL_j = \sum_{i=1}^{m} w_i C_{ij} \quad (۱۰)$$

w_i : وزن هر پاسخ

سپس برای هر آزمایش، MRSN محاسبه می‌شود.

$$MRSN_j = (-10) \times \log_{10}^{(TNQL_j)} \quad (۱۱)$$

در روش تاگوچی چندپاسخه می‌توان وزن هر پاسخ را با استفاده از تجارب کارشناسان (خبرگان) به دست آورد. ولی استفاده از این روش، نتایج متفاوتی را به بار می‌آورد. به همین دلیل، در این تحقیق، برای محاسبه وزن هر پاسخ از روش فرآیند تحلیل شبکه ای (ANP) استفاده کردیم. شرح مفصل روش ANP در کتاب ساعتی[2] (۲۰۰۳) آورده شده است.

مرحله۳: شناسایی بهترین ترکیبات سطح یا عامل: فاکتورهای قابل کنترل که اثر قابل توجهی بر روی MRSN دارند، محاسبه می‌شوند. بالاترین سطح از هر فاکتور قابل کنترل بر روی MRSN نیز شناسایی می‌شود. سپس تنظیم عوامل صورت می‌گیرد.

مرحله ۴: آزمایشات تایید کامل: آزمایش تایید نیاز به اثبات این موضوع دارد که آیا بهترین نتایج، که از آزمایش به دست آمده‌اند، بهبودی ارائه می‌دهند یا خیر. اگر نسبت S/N برای مقادیر مشاهده شده و پیش بینی شده نزدیک به هم باشند، مدل خلاصه آزمایش به عنوان یک پیش بینی خوب فرض شده است.

۵- مطالعه موردی

در این پژوهش، شرکت خودرو سازی سایپا به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است. اگر چه محصولات مختلفی در این کارخانه تولید و مونتاژ می‌شوند، ما خط مونتاژ پراید مدل X 132 – Full Option که ۷۰ درصد تقاضای همه محصولات در طول سال را پوشش می‌دهد، برای مسئله متعادل‌سازی خط انتخاب کردیم. خط مونتاژ این محصول شامل نواحی کاری تزئینات ۱ و ۲، مکانیک و نهایی می‌باشد؛ که ما مسئله خود را به ناحیه کاری تزئینات ۱ و همچنین سالن مونتاژ یک محدود کردیم.

برای این محصول ۱۲ ایستگاه مونتاژ وجود دارد و روزانه ۳۸۸ عدد پراید در این خط مونتاژ تولید می‌شوند. برای محصول انتخاب شده (پراید ۱۳۲)، ۳۵ وظیفه مختلف وجود دارد. کل زمان پردازش محصول نیز ۳۰۴۵/۶ ثانیه می‌باشد. کارهای اختصاص داده شده به ایستگاه‌های مونتاژ بر طبق روابط پیش‌نیازی انجام می‌شوند. اول از همه، ویژگی‌های این کارها از جمله تعداد کارگرانی که برای انجام کارها مورد نیاز است، زمان پردازش هر کار، و روابط پیش‌نیازی بین کارها مورد بررسی قرار گرفت. در هر ایستگاه مونتاژ، پس از تکمیل همه کارهای ضروری، محصول نیمه‌ساخته به ایستگاه مونتاژ بعدی منتقل می‌شود. انتقال بین ایستگاه‌ها به کمک کانوایر صورت می‌گیرد. زمان‌های پردازش، ایستگاه‌های مونتاژ اختصاص داده شده، روابط پیش‌نیازی بین کارها و تعداد کارگر مورد نیاز در جدول (۳) آورده شده است.

در جدول (۳) ، ستون تعداد کارگر مورد نیاز نشان می‌دهد که برای انجام بعضی از کارها به بیش از یک کارگر نیاز می‌باشد. به عنوان مثال، کار ۱ به سه کارگر نیاز دارد. بدون سه نفر، این کار نمی‌تواند تکمیل شود. این افراد کار ۱ را با هم انجام می‌دهند. اطلاعات سیستم فعلی خط مونتاژ در جدول (۴) خلاصه شده است.

1. Total normalized quality loss
2. Saaty

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۳. اطلاعات سیستم فعلی (زمان پردازش، پیش نیاز کارها، ایستگاه‌های اختصاص داده شده و تعداد کارگران)

شماره ایستگاه	شماره کار	شرح کار	زمان پردازش (ثانیه)	تعدادکارگر مورد نیاز	پیش نیاز کارها
۱	۱	نوار سقفی و پرایمر ۱	۱۴۴/۳	۳	----
	۲	نوار سقفی و پرایمر ۲	۷۱/۷	۳	۱
۲	۳	نصب موقت مجموعه لوله‌های سوخت – دیاق سپر	۷۱/۹	۲	----
	۴	مدولاتور	۴۵/۷	۱	----
	۵	خارهای دوبله گلگیر – نصب لوله سوخت	۱۲۸/۱	۳	۱و۲
۳	۶	جعبه فرمان	۱۰۱/۸	۲	----
	۷	لوله سه قلو خارهای دوبله گلگیر	۴۴/۷	۱	۱و۲و۴
	۸	سینی حرارت گیر	۴۷	۱	۱و۲و۵
۴	۹	شیشه لچکی	۱۲۸	۲	۱و۲و۵
	۱۰	سیم کشی کف	۸۳/۲	۲	۴
	۱۱	آرم صندوق	۲۸/۷	۱	----
	۱۲	گردگیرهای کف	۱۲۵	۲	۱و۲و۵و۹
۵	۱۳	نوار دور دربها سمت راست	۴۸/۲	۱	۱و۲و۵و۱۲
	۱۴	سیم کشی صندوق ۱	۳۱۴/۲	۵	۱و۲و۴و۵و۸و۱۰و۱۱و۱۲و۱۳
	۱۵	سه راهی ترمز	۶۴	۲	۱و۲و۴و۵و۸و۱۰و۱۳
	۱۶	نوار دور دربها چپ	۳۰/۷	۱	۱۳
	۱۷	اهرم برف پاک کن	۹۲/۸	۲	۸و۱۱و۱۴و۱۶
۶	۱۸	ترمز دستی	۹۱/۷	۲	۱و۲و۵و۱۴
	۱۹	سیم کشی صندوق ۲	۶۱/۳	۱	۱۴و۱۶
	۲۰	لوله باک	۱۱۵/۳	۲	۱۴
	۲۱	صافی دوقلو	۹۵/۲	۲	۱۴و۱۷و۱۸
۷	۲۲	پایه کنیستر و صافی بنزین	۸۵/۹	۲	۲۰و۲۱
	۲۳	نصب اواپراتور	۸۵/۸	۲	۷
	۲۴	سیم کشی اصلی داخلی	۵۹	۲	۱۷و۲۳
	۲۵	نمدی زیر داشبورد	۷۰/۵	۲	۲۴
۸	۲۶	نوار دور صندوق خارهای چراغ نمره	۲۵۷/۳	۴	۲۰و۲۳و۲۵
	۲۷	نصب ECU	۳۱/۷	۱	۱۴و۱۷و۱۹
	۲۸	رله فن رادیاتور	۲۶/۶	۱	۲۳و۲۵
۹	۲۹	کلید لادری سمت راست	۱۰۴/۷	۲	۲۰و۲۳و۲۶
	۳۰	کلید لادری سمت چپ	۱۲۶/۵	۲	۲۰و۲۳و۲۶
	۳۱	نصب سقف کاذب	۳۳/۹	۱	۱۰و۱۴و۱۵و۱۶و۱۷و۲۶
۱۰	۳۲	رادیاتور کولر – کندانسور	۶۷/۷	۲	۱۷و۱۸و۲۲
۱۱	۳۳	پدال ترمز و کلاچ	۵۹/۱	۲	۳۲
۱۲	۳۴	درب جلو راست	۷۷/۲	۲	۱۴و۲۲و۲۵
	۳۵	درب جلو چپ	۲۶/۲	۱	۱۴و۲۲و۲۵

www.SID.ir

جدول ۴. اطلاعات سیستم فعلی برای خط مونتاژ

شماره ایستگاه	تعداد کارگران	زمان بیکاری (ثانیه)
۱	۶	۱۷۴
۲	۶	۱۴۴/۳
۳	۴	۶۶/۵
۴	۷	۹۰/۱
۵	۱۱	۱۶۵/۱
۶	۷	۹۱/۵
۷	۸	۲۱۸/۸
۸	۶	۷۴/۴
۹	۵	۵۹/۹
۱۰	۲	۶۲/۳
۱۱	۲	۷۰/۹
۱۲	۳	۹۱/۶
جمع کل	۶۷	۱۳۰۹/۴

در جدول (۴) ، تعداد کل کارگران در هر ایستگاه با جمع زدن تعداد کارگران مورد نیاز مشاغل در هر ایستگاه محاسبه شده است. همچنین زمان‌های بیکاری نیز بر اساس رابطه (۳) محاسبه شده است.

به منظور محاسبه سیکل زمانی خط مونتاژ، میزان تقاضای روزانه و کل زمان خالص کاری در یک روز مورد نیاز می‌باشد. نرخ تقاضا توسط واحد برنامه‌ریزی تولید مشخص شد که روزانه ۳۸۸ عدد پراید می‌باشد. همه کارگران در خط موظف به ۸ ساعت کار در روز می‌باشند. زمان غیر کاری برای استراحت و صرف ناهار نیز معادل ۶۰ دقیقه می‌باشد. بنابراین زمان کاری خالص روزانه بر اساس رابطه (۱)، ۴۲۰ دقیقه و همچنین سیکل زمانی نیز بر اساس رابطه (۲)، ۶۵ ثانیه محاسبه شدند.

$\mathbf{TDWT}$: ۸ ساعت در روز

$\mathbf{TNWT}$: ۶۰ دقیقه (استراحت + ناهار)

$$\mathbf{TWT} = \mathbf{TDWT} - \mathbf{TNWT} = ۸ \times ۶۰ - ۶۰ = ۴۲۰$$

دقیقه $۴۲۰ = ۲۵۲۰۰$ ثانیه

$$\mathbf{C} = \frac{\mathbf{TWT}}{\mathbf{D}} = \frac{۲۵۲۰۰}{۳۸۸} = ۶۵ \text{ ثانیه}$$

بهره‌وری خط هم بر اساس رابطه (۵)، معادل ۶۹/۹۳ درصد به دست آمد.

$$\mathbf{P} = \frac{\mathbf{TPT}}{\mathbf{TPT} + \mathbf{TIT}} \times ۱۰۰ = \frac{۳۰۴۵/۶}{۳۰۴۵/۶ + ۱۳۰۹/۴} \times ۱۰۰ = ۶۹/۹۳\%$$

نتایج نشان می‌دهد که در وضعیت فعلی خط مونتاژ، تعداد کل کارگران و بهره‌وری خط، به ترتیب برابر با ۶۷ و ۶۹/۹۳٪ می‌باشند. به کمک نرم‌افزار متلب[1] الگوریتم معرفی شده در بخش ۴، که مراحل آن را در جدول (۲) شرح دادیم، شبیه‌سازی کردیم.

به منظور حل مسئله متعادل‌سازی خط، روابط پیش‌نیازی، حداکثر تعداد مجاز کارگران در یک ایستگاه کاری، و زمان بیکاری مجاز هر کارگر به عنوان متغیرهای ورودی الگوریتم فرض شدند. اول از همه، روابط پیش‌نیازی بین کارها در نظر گرفته شد. سپس حداکثر تعداد مجاز کارگران در یک ایستگاه مونتاژ با توافق کارشناسان خط مونتاژ، ۵ فرض شد و در نهایت، زمان بیکاری مجاز یک کارگر ۱۵ ثانیه در نظر گرفته شد. الگوریتم مربوطه با استفاده از متغیرهای وروری مذکور اجرا شد. نتایج در جدول (۵) ارائه شده است.

جدول ۵. نتایج پس از اجرای الگوریتم

شماره ایستگاه	مشاغل تخصیص داده شده به هر ایستگاه	تعداد کارگران	زمان بیکاری(ثانیه)
۱	۱۱و۶و۴و۳	۵	۷۶/۹
۲	۱۰و۱	۵	۹۷/۵
۳	۷و۲	۴	۱۴۳/۶
۴	۲۳و۵	۵	۱۱۱/۱
۵	۱۲و۹و۸	۵	۲۵
۶	۱۶و۱۵و۱۳	۳	۵۲/۱
۷	۱۴	۵	۱۰/۸
۸	۱۹	۱	۳/۷
۹	۲۸و۲۷و۲۵و۲۴و۱۷	۵	۴۴/۴
۱۰	۲۰و۱۸	۴	۵۳
۱۱	۳۵و۲۲و۲۱	۵	۱۱۷/۷
۱۲	۳۳و۳۲	۲	۳/۲
۱۳	۳۴	۲	۵۲/۸
۱۴	۲۶	۴	۲/۷
۱۵	۳۱و۳۰و۲۹	۵	۵۹/۹
جمع کل		۶۰	۸۵۴/۴

با اجرای الگوریتم، نتایج ذیل به دست آمد:

- تعداد کل کارگران از ۶۷ نفر به ۶۰ نفر کاهش یافت؛ که در نتیجه منجر به بهبود ۱۰/۴۵ درصدی در تعداد کل کارگران شد.

1. MATLAB

Archive of SID

www.SID.ir

- کل زمان بیکاری از ۱۳۰۹/۴ ثانیه به ۸۵۴/۴ ثانیه کاهش یافت؛ که منجر به بهبود ۳۴/۷۵ درصدی در کل زمان بیکاری شد.
- بهره وری خط از ۶۹/۹۳ درصد به ۷۸/۰۹۲ درصد افزایش یافت.

سیکل زمانی، زمان بیکاری هر کارگر، حداکثر تعداد مجاز کارگران، نرخ تقاضا، محدودیت‌های تکنولوژیکی و تصمیمات مدیریت، موضوع‌هایی هستند که تغییر می‌کنند. بنابراین مقادیر ورودی مختلف (سیکل زمانی، زمان بیکاری هر کارگر، و حداکثر تعداد مجاز کارگران) برای تست عملکرد سیستم انتخاب شدند (تعداد کل کارگران، بهره‌وری خط، و تعداد کل ایستگاه‌های مونتاژ).

در نمونه ما، ۱۲ ایستگاه مونتاژ و ۳۵ وظیفه مختلف وجود دارد. ابتدا ارزش متغیرهای ورودی مشخص می‌شوند و سپس معیارهای عملکرد به وسیله شبیه‌سازی با استفاده از نرم افزار متلب به دست می‌آیند. زمانی که مقادیر ورودی تغییر می‌کنند، معیارهای عملکرد متفاوت از نتایج قبلی خواهند بود. بر طبق دانسته‌های ما، این مسئله نمی‌تواند به صورت معادلات ریاضی تعریف شود. بنابراین یک تکنیک شبیه‌سازی به منظور پیداکردن معیارهای عملکرد مورد نیاز می‌باشد. از آنجایی که تعداد آزمایشات ترکیب فاکتوریل دقیق، بسیار زیاد خواهد بود؛ بنابراین تکنیک طراحی آزمایشات تاگوچی انتخاب شد. تکنیک تاگوچی یک روش ارزیابی برای حالت‌هایی که چند معیار عملکرد، مانند تعداد کل ایستگاه‌های مونتاژ، تعداد کل کارگران، و بهره‌وری خط داریم، پیشنهاد می‌کند.

هدف از این آزمایش با به کارگیری پارامترهای ورودی مختلف، حداقل کردن تعداد کل ایستگاه‌های مونتاژ و تعداد کل کارگران، همچنین به حداکثر رساندن بهره‌وری خط می‌باشد. فاکتورها و سطوح آن‌ها برای استفاده از روش تاگوچی در جدول (۶) داده شده است.

طرح آزمایش فاکتوریل کامل برای ۳ عامل فوق $4^3=64$ آزمایش یا ترکیب تیماری است. اما با توجه به هزینه و وقت، این نوع طرح آزمایشی مقرون به صرفه نیست. از طرفی از لحاظ آماری نیازی نیست که همه ترکیبات سطوح عوامل را مورد آزمایش قرار دهیم. به همین جهت از طرح‌های تکرار کسری کمک می‌گیریم. از آنجایی که تعداد عوامل قابل کنترل و سطوح آن‌ها، به ترتیب ۳ و ۴ هستند، آرایه متعامد مناسب با استفاده از نرم افزار مینی تب[1] ، L16 به دست آمد. همچنین ترکیبات مختلف این ۱۶ آزمایش نیز توسط نرم‌افزار مینی‌تب مشخص شد. در میان معیارهای عملکرد، «هر چه بزرگتر، بهتر» برای بهره‌وری و «هر چه کوچکتر، بهتر» برای تعداد کل ایستگاه‌ها و تعداد کل کارگران می‌باشد. محاسبات روش تاگوچی چندپاسخه به شرح ذیل انجام شد :

مرحله ۱: بر طبق روابط (۶) و (۷)، برای هر یک از معیارهای عملکرد، کیفیت از دست رفته با به کار گیری نسبت S/N محاسبه شد. پس از آن نسبت‌های S/N چندگانه محاسبه شدند.

مرحله ۲: بر طبق روابط (۸) و (۹)، کیفیت از دست رفته محاسبه شده برای هر آزمایش نرمال‌سازی[2] شد.

وزن تعداد کل ایستگاه‌های مونتاژ، تعداد کل کارگران و بهره‌وری خط از مدل فرآیند تحلیل شبکه‌ای به دست می‌آید. به دلیل پیچیدگی محاسبات دستی، از نرم‌افزار سوپردیسیژن[3] برای حل مدل ANP و پیداکردن اوزان استفاده شده است. وزن هر پاسخ برای تعداد کل ایستگاه‌های مونتاژ، تعداد کل کارگران و بهره‌وری خط، به ترتیب از چپ به راست (۰/۳ : ۰/۳ : ۰/۴) به دست آمد. سپس مقادیر $TNOL_j$ و $MRSN_j$ بر طبق روابط (۱۰) و (۱۱) محاسبه شدند. نتایج برای تمامی آزمایشات در جدول (۷) نشان داده شده است.

جدول ۶. فاکتورهای قابل کنترل و سطوح آن‌ها برای طراحی آزمایشات

فاکتورها	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴
A : زمان بیکاری هر کارگر (ثانیه)	۱	۵	۱۰	۱۵
B : سیکل زمانی (ثانیه)	۶۵	۷۵	۸۷	۱۰۴
C : حداکثر تعداد مجاز کارگران	۵	۶	۷	۸

1. Minitab
2. Mormalization
3. Super Decision

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۷. کیفیت از دست رفته برای تمام آزمایشات

				کیفیت از دست رفته			نرمالایز شده			مجموع کیفیت از دست رفته	
آزمایشات	A	B	C	تعداد ایستگاه (L_{1j})	تعدادکل کارگران (L_{2j})	بهره وری (L_{3j})	C_{1j}	C_{2j}	C_{3j}	۰/۳ :۰/۳ :۰/۴	$MRSN_j$
۱	۱	۶۵	۵	۱۹۶	۳۶۰۰	۰/۰۰۰۱۶۳۹۷۸	۰/۸۷۱۱۱۱	۱	۰/۷۹۷۱۹۴	۰/۸۸۷۶۰۲۶۰۸	۰/۵۱۷۸۱۴
۲	۱	۷۵	۶	۱۲۱	۳۰۲۵	۰/۰۰۰۱۸۳۴۴۲	۰/۵۳۷۷۷۸	۰/۸۴۰۲۷۸	۰/۸۹۱۸۱۸	۰/۷۳۴۷۳۹۷۱	۱/۳۳۸۶۶۵
۳	۱	۸۷	۷	۶۴	۲۱۱۶	۰/۰۰۰۱۷۲۶۶۶	۰/۲۸۴۴۴۴	۰/۵۸۷۷۷۸	۰/۸۳۹۴۳۱	۰/۵۴۱۹۴۰۳۵۴	۲/۶۶۰۴۸۵
۴	۱	۱۰۴	۸	۲۵	۱۳۶۹	۰/۰۰۰۱۵۹۶۳۲	۰/۱۱۱۱۱۱	۰/۳۸۰۲۷۸	۰/۷۷۶۰۶۳	۰/۳۹۱۳۴۶۷۷۳	۴/۰۷۴۳۸۲
۵	۵	۶۵	۶	۱۶۹	۳۶۰۰	۰/۰۰۰۱۶۳۹۷۸	۰/۷۵۱۱۱۱	۱	۰/۷۹۷۱۹۴	۰/۸۳۹۶۰۲۶۰۸	۰/۷۵۹۲۶۲
۶	۵	۷۵	۵	۲۲۵	۳۱۳۶	۰/۰۰۰۱۹۰۱۷۶	۱	۰/۸۷۱۱۱۱	۰/۹۲۴۵۵۶	۰/۹۳۸۷۰۰۱۹۷	۰/۲۷۴۷۳۱
۷	۵	۸۷	۸	۴۹	۲۱۱۶	۰/۰۰۰۱۷۲۶۶۶	۰/۲۱۷۷۷۸	۰/۵۸۷۷۷۸	۰/۸۳۹۴۳۱	۰/۵۱۵۲۷۳۶۸۷	۲/۸۷۹۶۲
۸	۵	۱۰۴	۷	۴۹	۱۶۰۰	۰/۰۰۰۱۸۶۵۶۷	۰/۲۱۷۷۷۸	۰/۴۴۴۴۴۴	۰/۹۰۷۰۱۱	۰/۴۹۲۵۴۷۷۱۳	۳/۰۷۵۵۱۷
۹	۱۰	۶۵	۷	۱۶۹	۳۶۰۰	۰/۰۰۰۱۶۳۹۷۸	۰/۷۵۱۱۱۱	۱	۰/۷۹۷۱۹۴	۰/۸۳۹۶۰۲۶۰۸	۰/۷۵۹۲۶۲
۱۰	۱۰	۷۵	۸	۱۰۰	۳۰۲۵	۰/۰۰۰۱۸۳۴۴۲	۰/۴۴۴۴۴۴	۰/۸۴۰۲۷۸	۰/۸۹۱۸۱۸	۰/۶۹۷۴۰۶۳۷۷	۱/۵۶۵۱۴۱
۱۱	۱۰	۸۷	۵	۱۴۴	۲۳۰۴	۰/۰۰۰۱۸۸۰۰۸	۰/۶۴	۰/۶۴	۰/۹۱۴۰۱۴	۰/۷۲۲۲۰۴۱۱۲	۱/۴۱۳۴
۱۲	۱۰	۱۰۴	۶	۶۴	۱۷۶۴	۰/۰۰۰۲۰۵۶۹۵	۰/۲۸۴۴۴۴	۰/۴۹	۱	۰/۵۶۰۷۷۷۷۷۸	۲/۵۱۲۰۹۲
۱۳	۱۵	۶۵	۸	۱۴۴	۳۶۰۰	۰/۰۰۰۱۶۳۹۷۸	۰/۶۴	۱	۰/۷۹۷۱۹۴	۰/۷۹۵۱۵۸۱۶۳	۰/۹۹۵۴۶۵
۱۴	۱۵	۷۵	۷	۱۹۶	۳۰۲۵	۰/۰۰۰۱۸۳۴۴۲	۰/۸۷۱۱۱۱	۰/۸۴۰۲۷۸	۰/۸۹۱۸۱۸	۰/۸۶۸۰۷۳۰۴۳	۰/۶۱۴۴۳۷
۱۵	۱۵	۸۷	۶	۱۰۰	۲۱۱۶	۰/۰۰۰۱۷۲۶۶۶	۰/۴۴۴۴۴۴	۰/۵۸۷۷۷۸	۰/۸۳۹۴۳۱	۰/۶۰۵۹۴۰۳۵۴	۲/۱۷۵۷۰۱
۱۶	۱۵	۱۰۴	۵	۱۲۱	۱۷۶۴	۰/۰۰۰۲۰۵۶۹۵	۰/۵۳۷۷۷۸	۰/۴۹	۱	۰/۶۶۲۱۱۱۱۱۱	۱/۷۹۰۶۹۱
ماکسیمم				۲۲۵	۳۶۰۰	۰/۰۰۰۲۰۵۶۹۵					

مرحله ۳: تفاوت بین حداکثر و حداقل سطح هر یک از عوامل برای پیداکردن سطح موثر عوامل محاسبه شدند. عوامل و سطوح آن‌ها در جدول (۸) نشان داده شده‌اند.

جدول ۸. سطح موثر عوامل

سطح	۱	۲	۳	۴	Max – Min	بر حسب درصد (٪)
A	۲/۱۴۷۸۳۷	۱/۷۴۷۲۸۳	۱/۵۶۲۴۷۴	۱/۳۹۴۰۷۴	۰/۷۵۳۷۶۳	۱۷/۷۸
B	۰/۷۵۷۹۵۱	۰/۹۴۸۲۴۳	۲/۲۸۲۳۰۲	۲/۸۶۳۱۷۱	۲/۱۰۵۲۲	۴۹/۶۷
C	۰/۹۹۹۱۵۹	۱/۶۹۶۴۳	۱/۷۷۷۴۲۵	۲/۳۷۸۶۵۲	۱/۳۷۹۴۹۳	۳۲/۵۵

www.SID.ir

با توجه به جدول (۸) ملاحظه می‌شود که ترکیب بهینه بر اساس روش تاگوچی، ترکیب ($A_1B_4C_4$) می‌باشد. با توجه به جدول، فاکتور B (سیکل زمانی) موثرترین عامل (۴۹/۶۷٪) بر روی معیارهای عملکرد می‌باشد. پس از آن، فاکتور C (حداکثر تعداد مجاز کارگران) و فاکتور A (زمان بیکاری هر کارگر)، به ترتیب با ۳۲/۵۵٪ و ۱۷/۷۸٪ موثر هستند. با توجه به ترکیب بهینه ($A_1B_4C_4$)، متغیرهای ورودی الگوریتم بر اساس جدول (۶) به صورت $W_{max}=8,\ C=104$ و $UBIT=1$ می‌باشند. الگوریتم با استفاده از متغیرهای ورودی مذکور اجرا شد. پس از اجرای الگوریتم با استفاده از ترکیب بهینه، تعداد کل ایستگاه‌های مونتاژ برابر ۶، تعداد کل کارگران در خط مونتاژ برابر ۳۸، کل زمان بیکاری برابر ۹۰۶/۴ ثانیه و بهره‌وری خط برابر ۷۷/۰۶٪ شد.

مرحله ۴: بعد از پیدا کردن ترکیب بهینه، آزمایش تایید انجام شد. هر سه پاسخ باید به طور جداگانه در نظر گرفته شوند. ارزش مورد انتظار و فاصله اطمینان برای تعداد کل ایستگاه‌ها، مربع حسابی و خطا برای هر یک از فاکتورها محاسبه شد. در زیر یک نمونه از محاسبات برای معیار عملکرد تعداد کل ایستگاه‌های مونتاژ آورده شده است.

مربع حسابی کل $SS_T = \sum_{i=1}^{N} y_i^2 - \frac{T^2}{N}$

$= ۱۹۳۶ - \frac{۱۷۰^2}{۱۶} = ۱۲۹/۷۵$

خطا $SS_A = \sum_{i=1}^{k_A} \frac{A_i^2}{n_{A_i}} - \frac{T^2}{N} = ۱۰/۲۵$

$SS_A = \sum_{i=1}^{k_A} \frac{A_i^2}{n_{A_i}} - \frac{T^2}{N} = ۱۰/۲۵$

$SS_B = ۷۷/۲۵$

$SS_C = ۴۰/۷۵$

$SS_e = ۱/۵۰$

$\theta_T = ۱۶ - ۱ = ۱۵$

$\theta_e = \theta_T - \theta_B - \theta_C = ۱۵ - ۳ - ۳ - ۳ = ۶$

$V_e = \frac{SS_T}{\theta_T} = ۰/۲۵$

میانگین مورد انتظار ترکیبات شناسایی شده به شرح ذیل محاسبه شد.

$\mu_{ABC_i} = A_i + B_i + C_i - 2T$

$= ۱۱/۷۵ + ۷/۷۵ + ۸/۵ - ۲\times ۱۰/۶۲۵ = ۶/۷۵$

فاصله اطمینان $V_e = \sqrt{\frac{F_{a,1,.} \times V_e}{n_{eff}}} = \sqrt{\frac{۵/۹۹ \times ۰/۲۵}{۱/۶}} =$

$= ۰/۹۶۷۴۳۸۶۳$

$$n_{eff} = \frac{N}{۱ + (۱ + ۴ + ۴)} = \frac{۱۶}{۱ + (۱ + ۴ + ۴)} = ۱/۶$$

نتایج محاسبات ارزش مورد انتظار و فاصله اطمینان برای کلیه معیارهای عملکرد در جدول (۹) آورده شده است.

جدول ۹. ارزش مورد انتظار و فاصله اطمینان معیارها

معیارهای عملکرد	ارزش مورد انتظار	فاصله اطمینان	می‌نیمم (Min)	ماکسیمم (Max)
تعداد ایستگاه‌ها	۶/۷۵	۰/۹۶۷۴۳۸۶۳	۵/۷۸۲۵۶۱	۷/۷۱۷۴۳۹
تعداد کل کارگران	۳۹/۵	۱/۸۵۲۵۰۳۹۴	۳۷/۶۴۷۵	۴۱/۳۵۲۵
بهره وری	۷۴/۲۵۵۷۵	۳/۶۰۴۹۸۸۹۷	۷۰/۶۵۰۷۶	۷۷/۸۶۰۷۴

بنابراین ملاحظه می‌کنیم که نتایج به دست آمده پس از اجرای الگوریتم با استفاده از ترکیب بهینه در داخل فاصله اطمینان ۹۵٪ برای هر کدام از معیارهای عملکرد قرار دارد و این صحت آزمایشات ما را تایید می‌کند و نشان می‌دهد که ترکیب مشخص شده به صورت (A1B4C4) صحیح می‌باشد.

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق، الگوریتمی به منظور حل مسئله متعادل‌سازی خط در صورت تخصیص چند کارگر به یک ایستگاه مونتاژ معرفی شد. ملاحظه کردیم که الگوریتم نتایج مطلوبی را برای فرض تخصیص چند کارگر به یک ایستگاه ایجاد کرد. مسئله متعادل‌سازی خط مونتاژ به اهداف مطلوب (به حداقل رساندن تعداد ایستگاه‌ها و تعداد کل کارگران و به‌حداکثررساندن بهره‌وری)رسید. ما متوجه شدیم که تغییر پارامترهای ورودی می‌تواند نتایج عملکرد مختلفی را به بار آورد. هنگامی که نتایج الگوریتم مورد ارزیابی قرار گرفت، اگرچه هیچ مجموعه راه حل خاصی که بتواند تمامی اهداف را تحقق بخشد، وجود ندارد؛ روش تاگوچی چند پاسخه توانست یکی از نزدیکترین حالات مطلوب (مقدار بهینه) را تولید کند. به علاوه، سطوح پارامتر ورودی که منجر به ارائه بهترین معیارهای عملکرد می‌شوند نیز با استفاده از این روش به دست آمدند. به طور کلی، جدول (۱۰)، خلاصه نتایج به دست آمده برای وضعیت موجود و پیشنهادی را نشان می‌دهد.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۱۰. مقایسه وضعیت موجود و وضعیت مطلوب

معیارهای عملکرد	وضعیت موجود	وضعیت مطلوب بر اساس روش تاگوچی	بهبود بر اساس روش تاگوچی (درصد)
تعداد کل ایستگاه‌های مونتاژ	۱۲	۶	٪ ۵۰
تعداد کل کارگران	۶۷	۳۸	٪ ۴۳/۲۸
کل زمان بیکاری	۱۳۰۹/۴	۹۰۶/۴	٪ ۳۰/۷۸
بهره وری خط (٪)	٪ ۶۹/۹۳	٪ ۷۷/۰۶	٪ ۱۰/۱۹

همانطور که گفته شده بود، ما در این پژوهش به دنبال حداقل کردن تعداد کل ایستگاه‌های مونتاژ و تعداد کل کارگران و همچنین حداکثر سازی بهره‌وری بودیم؛ که با اجرای الگوریتم توانستیم به نتایج مطلوبی دست یابیم و همانطور که در جدول (۱۰) ملاحظه می‌شود، اجرای الگوریتم باعث بهبود نرخ بهره‌وری شده است. به این ترتیب، به هدف تحقیق که متعادل‌سازی خطوط مونتاژ با استفاده از الگوریتم تاگوچی بود، رسیدیم؛ که این کارآیی الگوریتم پیشنهادی را نسبت به روش‌هایی که در حال حاضر در خطوط مونتاژ شرکت خودروسازی سایپا اجرا و پیاده‌سازی می‌شوند، نشان می‌دهد. تحقیق حاضر شامل محدودیت‌های زیر می‌باشد:

- در این پژوهش، اجرای الگوریتم محدود به خط مونتاژ محصول پراید ۱۳۲ شده است.
- به دلیل حجم زیاد محاسبات و محدودیت‌های شرکت سایپا در به اشتراک گذاری اطلاعات، فقط ناحیه کاری تزئینات ۱ را برای پراید ۱۳۲ مورد بررسی قرار دادیم.
- در تحقیق حاضر، فقط سه معیار عملکرد (تعداد کل ایستگاه‌های مونتاژ، تعداد کل کارگران، و بهره‌وری خط) مورد بررسی قرار گرفت.

بعضی از پیشنهادات برای تحقیقات آتی می‌توانند شامل موارد زیر باشند:

- به کارگیری طراحی پارامتر به روش تاگوچی در زمینه‌های کاربردی دیگر برای مشخصه‌های کیفی گسسته.
- به کارگیری روش تاگوچی در زمینه‌های کاربردی دیگری که نیاز به برآورد اثرات متقابل خاص در آن‌ها وجود دارد.
- استفاده از متدولوژی سطح پاسخ برای مدل‌سازی چند مشخصه کیفی و بهینه‌سازی همزمان آن‌ها در زمینه‌های کاربردی دیگر.
- مطالعه موردی در این زمینه به ویژه در خطوط مونتاژ نهایی مربوط به تولید اتوبوس و کامیون و تجهیزات سنگینی از این قبیل، زمینه خوبی برای تحقیقات است.

Archive of SID

www.SID.ir

منابع

1. Akagi, F., Osaki, H., Kikuchi, S. (1983). A method for assembly line balancing with more than one worker in each station. Int J Prod Res, 21, 755–770.
2. Baybars, I. (1986). A survey of exact algorithms for the simple assembly line balancing problem. Manage Sci, 32, 909–932.
3. Becker, C., Scholl, A. (2006). A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. Eur J Oper Res, 168, 694– 715.
4. Becker, C., Scholl, A. (2009). Balancing assembly lines with variable parallel workplaces: problem definition and effective solution procedure. Eur J Oper Res, 199, 359–374.
5. Bowman, EH. (1960). Assembly-line balancing by linear programming. Oper Res, 8, 385–389.
6. Boysen, N., Fliedner, M., Scholl, A. (2007). A classification of assembly line balancing problems. Eur J Oper Res, 183, 674–693.
7. Dimitriadis, SG. (2005). Assembly line balancing and group working: a heuristic procedure for workers' groups operating on the same product and workstation. Comput Oper Res, 33, 2757– 2774.
8. Driscolla, J., Abdel-Shafi, AA. (1985). A simulation approach to evaluating assembly line balancing solutions. Int J Prod Res, 23, 975–985.
9. Erel, E., Gokcen, H. (1999). Shortest-route formulation of mixed model assembly line balancing problem. Eur J Oper Res, 116, 194–204.
10. Gel, ES., Hopp, WJ., Van Oyen, MP. (2002). Factors affecting opportunity of worksharing as a dynamic line balancing mechanism. IIE Trans, 34, 847–863.
11. Guo, ZX., Wong, WK., Leung, YS., Fan, JT., Chan, SF. (2008). A genetic-algorithm-based optimization model for solving the flexible assembly line balancing problem with work sharing and workstation revisiting. IEEE Trans Syst Man Cybern Part C Appl Rev, 38, 218–228.
12. Helgeson, WB., Birnie, DP. (1961). Assembly line balancing using the ranked positional weight technique. J Ind Eng, 12, 394–398.
13. Hong, L., Kaihu, H., Wenli, S. (2009). Application of work study to the automobile assembling line balancing. International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering, 358–362.
14. Jackson, JR. (1956). A computing procedure for a line balancing. Manage Sci, 2, 261–271.
15. Johnson, RV. (1991). Balancing assembly lines for teams and workgroups. Int J Prod Res, 29, 1205–1214.
16. Kara, Y., Gökçen, H., Atasagun, Y. (2010). Balancing parallel assembly lines with precise and fuzzy goals. Int J Prod Res, 48, 1685–1703.
17. Kilbridge, MD., Wester, L. (1961). A heuristic method of assembly line balancing. J Ind Eng, 12, 292–298.
18. Kim, YK., Kim, Y., Kim, YJ. (2000). Two-sided assembly line balancing: a genetic algorithm approach. Prod Plann Control, 11, 44–53.
19. Klein, M. (1963). On assembly line balancing. Oper Res, 11, 274–281.
20. Moberly, LE., Wyman, FP. (1973). An application of simulation to the comparison of assembly line configurations. Decis Sci, 4, 505–516.
21. Nourmohammadi, A., Zandieh, M. (2010). Assembly line balancing by a new multi-objective differential evaluation algorithm based on TOPSIS. Int J Prod Res, 49(10), 2833–2855.
22. Pastor, R., Ferrer, L. (2009). An improved mathematical program to solve the simple assembly line balancing problem. Int J Prod Res, 47, 2943–2959.
23. Saaty, TL. (2003). Decision making in complex environments: the analytic hierarchy process (AHP) for decision making and the analytic network process (ANP) for decision making with dependence and feedback. Pittsburg, USA.
24. Salveson, ME. (1955). The assembly line balancing problem. J Ind Eng, 6, 261–271.
25. Solnon, C., Cung, VD., Nguyen, A., Artigues, C. (2008). The car sequencing problem: overview of state-of-the-art methods and industrial case-study of the ROADEF'2005 challenge problem. Eur J Oper Res, 191, 912–927.
26. Tong, LI., Su, C-T., Wang, C-H. (1997). The optimization of multi-response problems in the Taguchi method. Int J Qual Reliab Manage, 14, 367–380.

Archive of SID

www.SID.ir

27. Wang, Q., Lassalle, S., Mileham, AR., Owen, GW. (2010). Analysis of a linear walking worker line using a combination of computer simulation and mathematical modeling approaches. J Manuf Syst, 28, 64–70.

Archive of SID

www.SID.ir