مجله تحقیق در عملیات در کاربردهای آن، سال پانزدهم، شماره اول(پیاپی ۵۶)، بهار ۹۷، ص ص ۷۷-۵۷
شاپا ۷۲۸۶-۲۲۵۱

تعیین‌توالی خطوط مونتاژ مدل‌ترکیبی تحت عدم قطعیت با زمان‌های پردازش تصادفی با استفاده از الگوریتم جست‌وجوی هارمونی بهبود یافته

پرویز فتاحی*[۱]، آرزو عسکری[۲]، بهنام عسکری[۳]

۱- دانشیار، دانشگاه الزهرا، گروه مهندسی صنایع، تهران، ایران

۲- کارشناسی ارشد، دانشگاه بوعلی سینا، گروه مهندسی صنایع، همدان ، ایران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ملایر، گروه مهندسی صنایع، ملایر، ایران

رسید مقاله: ۱۰ خرداد ۱۳۹۶

پذیرش مقاله: ۳۰ آبان ۱۳۹۶

چکیده

در سال‌های اخیر با پیشرفت روزافزون تکنولوژی، تنوع‌طلبی مشتریان و افزایش رقابت جهانی سیستم‌های سنتی جوابگوی نیازهای مشتریان نیستند. شرکت‌ها برای برآوردن تقاضای مشتریان، پیشی گرفتن از رقبا و بقای هر چه طولانی‌تر در عرصه تولید نیازمند سیستم‌های نوین تولیدی هستند تا هم‌زمان با افزایش کیفیت محصولات تولیدی، هزینه تولید و قیمت محصولات تولیدی را نیز کاهش دهند. یک سیستم نوین تولیدی، خط مونتاژ مدل ترکیبی[۱] (MMAL) است. در این نوع خط مونتاژ که به‌عنوان حالت خاصی از خطوط تولید شناخته‌شده است، مدل‌های مختلف و متنوعی از یک محصول پایه مونتاژ می‌شود. در این مقاله به بررسی این نوع خطوط با هدف کمینه‌سازی هزینه کارگر کمکی و بیکاری اپراتور پرداخته‌شده در شرایطی که پارامتر زمان‌های پردازش به‌صورت تصادفی در نظر گرفته‌شده است. برای مدل‌سازی تصادفی از رویکرد محدودیت-شانس بهره برده شده است. برای اعتبارسنجی مدل نیز، در ابتدا با نرم‌افزار گمز حل‌شده و درنهایت با توجه به NP_hard بودن مساله، الگوریتم جست‌وجوی هارمونی بهبودیافته[۲] (IHS) برای حل مدل استفاده‌شده است. در انتها نیز با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، می‌توان نتیجه گرفت که جواب‌های به‌دست‌آمده از الگوریتم IHS در مقایسه با جواب دقیق حاصل از نرم‌افزار گمز از خطای محاسباتی کمی برخوردار است و جواب‌های قابل‌قبولی را ارایه می‌دهد و این نشان‌دهنده کارایی خوب الگوریتم می‌باشد.

کلمات کلیدی: تعیین توالی خطوط مونتاژ، زمان پردازش تصادفی، محدودیت شانس، الگوریتم جست‌وجوی هارمونی بهبودیافته.

* عهده دار مکاتبات

آدرس الکترونیکی p.fattahi@alzahra.ac.ir

[1] Mixed Model Assembly Line
[2] Improved Harmony Search

Archive of SID
www.SID.ir

۱ مقدمه

تعیین توالی[۳] و زمان‌بندی[۴] نوعی فرآیند تصمیم‌گیری است که نقشی حیاتی در صنایع تولیدی و خدماتی ایفا می‌کند. این فرآیند تصمیم‌گیری نقش بسیار مهمی در کاهش هزینه‌ها، افزایش بهره‌وری، افزایش رضایت مشتری و به‌طورکلی افزایش مزیت رقابتی شرکت‌ها دارد، به‌گونه‌ای که در محیط رقابتی کنونی تعیین توالی و زمان‌بندی مؤثر تبدیل به یک ضرورت برای بقا در بازار و دنیای تجارت شده است. در ابتدا تولیدکنندگان تنها قادر به تولید محصولات در یک مدل[۵] و به‌صورت انبوه بودند که با توجه به نیازهای مشتری امروزه استفاده از این نوع خط چندان به‌صرفه نخواهد بود، ازاین‌رو گرایش تولیدکنندگان به تولید محصولات متنوع برای تطابق با نیازهای مشتریان و درنتیجه استفاده از خطوط مونتاژ مدل ترکیبی[۶] (MMAL) بیش‌تر شده است. دلایل عمده استفاده از این نوع خط را می‌توان این‌گونه ذکر کرد: انعطاف‌پذیری زیاد، نرخ استفاده از قطعات و توانایی پاسخگویی سریع به تقاضاهای متنوع مشتریان بدون نیاز به نگهداری موجودی انبوه از محصولات [۱].

درواقع خط مونتاژ مدل ترکیبی، نوعی خط تولید است که مدل‌های گوناگونی از محصول‌ها روی آن مونتاژ می‌گردد. این نوع خط مونتاژ، با تولید متنوع و با واکنش سریع نسبت به تغییرات ناگهانی تقاضا، توان پاسخ‌گویی به نیازهای متغیر مشتریان را دارد. برای حل مسایل خط مونتاژ مدل ترکیبی، ابتدا باید به مسایلی همچون تعیین زمان سیکل، تعداد و توالی ایستگاه‌ها و به‌طورکلی بالانس خط[۷] مونتاژ پرداخت و سپس توالی تولید مدل‌ها در خط مونتاژ را بررسی نمود. در اینجا ما فرض می‌کنیم بالانس خط مونتاژ انجام شده و مساله موردبررسی، تعیین توالی تولید محصولات است.

از سویی دیگر، در مدل‌های سنتی زمان‌بندی فرض می‌شود که مقادیر تمام پارامترهای مربوط به کارها و ماشین‌ها ثابت بوده و از قبل معلوم هستند؛ اما بسیاری از محیط‌های تولیدی در دنیای واقعی با عدم اطمینان و حالت‌های تصادفی مواجه هستند. در اغلب مسایل تعیین توالی خطوط مونتاژ موجود نیز فرض بر این قرارگرفته است که پارامترهای هدف و یا محدودیت‌های مساله دقیق و قطعی هستند؛ بااین‌حال، در واقعیت همیشه مقداری عدم قطعیت وجود دارد. در این پژوهش پارامتر زمان انجام عملیات[۸] به‌صورت غیرقطعی در نظر گرفته‌شده است. اگر عملیات مونتاژ با دستگاه‌های پیشرفته‌تر / روبات و یا اپراتورهای متخصص و باانگیزه انجام گیرد، زمان‌های انجام کار ممکن است ثابت باشند؛ بااین‌حال در دنیای واقعی، به‌ویژه در خطوط مونتاژ دستی، وظایف ممکن است زمان‌های اجرای متفاوتی که به‌عنوان یک توزیع احتمال معرفی می‌شود، داشته باشند. تنوع در زمان‌های انجام کار ممکن است ناشی از خرابی‌های دستگاه، بی‌انگیزگی اپراتورها، فقدان آموزش، اپراتورهایی که واجد شرایط نیستند، کارهای پیچیده، محیط و غیره باشد [۲]. درنتیجه در این مقاله زمان‌های پردازش و انجام

[3] Sequencing
[4] Scheduling
[5] Single model
[6] Mixed Model Assembly Line
[7] Balancing
[8] Operation time

www.SID.ir

عملیات به‌صورت غیرقطعی و تصادفی در نظر گرفته‌شده است. روش‌های مختلف و متنوعی توسط محققین برای مقابله با پارامترهای تصادفی مطرح‌شده که در اینجا از رویکرد محدودیت-شانس[9] استفاده‌شده است.

برنامه‌ریزی با قیود احتمالی یا همان محدودیت شانس، نوعی روش بهینه‌سازی تصادفی است که اولین بار توسط چارنز و همکاران [۳]، معرفی گشت. این روش برای حل مسایل بهینه‌سازی با پارامترهای تصادفی در محدودیت‌ها و گاهی نیز در تابع هدف، مناسب است. در این روش، تضمین می‌شود که محدودیت‌ها با یک احتمال مشخص‌شده یا سطح اطمینانی که از یک توزیع تجمعی/چگالی احتمال شناخته‌شده برای متغیرهای غیرقطعی استفاده می‌کند، برآورد شود. برنامه‌ریزی محدودیت شانس برای مدل‌هایی که لازم است تصمیمات (بهینه) قبل از تحقق اثرات تصادفی گرفته شود، قابل‌اجراست [۴].

همان‌طور که ذکرشد، خطوط مونتاژ مدل ترکیبی یکی از ملزومات بازار رقابتی امروزه است. محققین زیادی از دهه‌ها قبل بر روی این نوع از خطوط، تحقیقاتی انجام داده‌اند که برخی به‌صورت تک هدفه و برخی دیگر به‌صورت چندهدفه بوده‌اند که در ادامه به تعدادی از این تحقیقات اشاره‌شده است، هم‌چنین در انتها تعدادی از تحقیقات که به‌صورت غیرقطعی هستند نیز آورده شده است.

میلتنبرگ [۵] مساله تعیین توالی خطوط مدل ترکیبی را با برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی با هدف کمینه‌سازی انحراف کل میزان تولید واقعی از میزان تولید موردنظر فرموله کرد. تحت این فرض که تمام مدل‌ها نیاز به تعداد و ترکیبی مشابه از قطعات دارند، میلتنبرگ اشاره کرد که به حداقل رساندن تنوع در میزان تولید محصولات پایانی (مساله سطح-محصول) با حداقل رساندن تنوع در نرخ استفاده از قطعات (مساله سطح-قطعه) به دست می‌آید. با توجه به پیچیدگی مساله دو هیوریستیک برای حل پیشنهاد شد و آزمایش‌های محاسباتی محدودی برای مقایسه عملکرد نسبی آن‌ها انجام شد. میلتنبرگ و همکاران [۶] نیز یک الگوریتم برنامه‌ریزی پویا برای حل مساله ارایه‌شده توسط میلتنبرگ [۵]، که برای بسیاری از مسایل تولید با تقاضای زیاد و تعداد محصولات کم عملکرد مناسبی داشت، ارایه دادند. بارد و همکاران [۷] تعدادی از مدل‌های کمینه‌سازی طول خط و زمان عملکرد[10] را در هردو ایستگاه‌های باز و بسته در خطوط مونتاژ متحرک مدل ترکیبی توسعه دادند. آن‌ها دریافتند که خط مونتاژ با ایستگاه باز می‌تواند مشارکت بیش تری در هدف کمینه‌سازی طول خط و زمان عملکرد داشته باشد. سارکر و پان [۸] مساله تعیین توالی خط مونتاژ مدل ترکیبی را برای دو حالت ایستگاه باز و بسته با تابع هدف کمینه نمودن مجموع هزینه‌های ناشی از بیکاری و اضافه‌بار کاری بررسی نمودند. دو مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای این دو حالت پیشنهادشده است. این دو مدل، پارامترهای خط ازجمله طول ایستگاه و زمان سیکل یا همان فاصله زمانی ثابت بین ورود مدل‌های مختلف به خط را به‌صورت بهینه به دست می‌آورند. نتایج نشان می‌دهد که حداقل مجموع هزینه‌ها در یک سیستم با ایستگاه باز، کم‌تر از حداقل مجموع هزینه‌ها در یک سیستم با ایستگاه بسته است. کیم و همکاران [۹]، نیز از الگوریتم ژنتیک برای حل مساله تعیین توالی خطوط مونتاژ مدل ترکیبی با ایستگاه‌های ترکیبی که در آن ایستگاه‌های باز و بسته درهم‌آمیخته و زمان راه‌اندازی وابسته به‌توالی است، بهره بردند. تابع هدف در مساله آن‌ها کمینه کردن

[9] Chance-constraint
[10] throughput time

www.SID.ir

کل طول یک خط است. عملکرد الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم‌های هیوریستیک و روش شاخه و کران مقایسه شد. نتایج نشان داد که الگوریتم ژنتیک زمان محاسباتی کم‌تری دارد و جواب بسیار نزدیک به جواب بهینه است. ژیابو و اوهنو [۱۰]، مساله تعیین توالی خط مونتاژ مدل ترکیبی را هنگامی‌که توقف نقاله جایز است موردبررسی قراردادند. آن‌ها تحقیقات خود را در بررسی کارخانه خودروسازی تویوتا قراردادند. آن‌ها در این مقاله، مساله تعیین توالی با هدف کمینه ساختن مجموع زمان توقف نوار نقاله را فرمول‌بندی نمودند. مشخصات متعددی از قبیل پیچیدگی محاسباتی مساله تعیین توالی، شرایط لازم و کافی برای توقف نوار نقاله، حد بالا و پایین تابع هدف و شرایط کافی برای بهینه بودن یک راه‌حل، تشریح شده است.

برای حل مساله نیز یک الگوریتم ابتکاری ارایه نمودند. بویسن و همکاران [۱۱]، به مساله نوسان نرخ تولید و چگونگی ارتباط آن با خطوط مونتاژ مدل ترکیبی در دنیای واقعی پرداختند. برای تسهیل تأمین مواد موردنیاز در خط اصلی مونتاژ بر اساس نگرش JIT، مساله تعیین توالی را به‌صورت "زمان‌بندی مسطح" موردبررسی قرار دادند که هدف هموار نمودن نرخ مصرف قطعات ناشی از توالی موجود در خط مونتاژ است. فتاحی و صالحی [۱۲] مساله تعیین توالی را بافاصله زمانی متغیر بین ورود محصولات در خط مونتاژ در نظر گرفتند. مساله موردنظر دو مساله بهینه‌سازی را شامل می‌شد (مساله تعیین توالی و مساله فاصله زمانی بین ورود محصولات). آن‌ها الگوریتم متاهیوریستیک ترکیبی بر اساس روش انجماد تدریجی و یک روش هیوریستیک را توسعه دادند. در نهایت نیز آزمایش های عددی برای بررسی عملکرد و کارایی الگوریتم پیشنهادی ارایه گشت که نتایج حاکی از عملکرد خوب الگوریتم تحت فرضیات ارایه شده بود. در ادامه به تعدادی از تحقیقاتی که به‌صورت چندهدفه انجام‌شده، اشاره‌شده است.

هیون و همکاران [۱۳] الگوریتم ژنتیک را برای حل مساله تعیین توالی خطوط مونتاژ مدل ترکیبی در حالت چندهدفه پیشنهاد دادند. مساله پیشنهادی آن‌ها شامل سه هدف است: ۱) کمینه‌سازی اضافه‌بار کاری، ۲) ثابت نگه‌داشتن نرخ مصرف قطعات و ۳) کمینه‌سازی هزینه راه‌اندازی کل. آن‌ها پس از مدل‌سازی مساله با اهداف پیشنهادی به صورت چندهدفه، یک الگوریتم ژنتیک برای یافتن راه‌حل بهینه پارتو یا نزدیک به پارتو برای این مساله طراحی کردند. یک مکانیسم ارزیابی و انتخاب جدید در الگوریتم ژنتیک، بنام لایه تورفتگی مکعبی پارتو[11] ارایه شد. درنهایت عملکرد الگوریتم پیشنهادی با سه الگوریتم ژنتیک موجود مقایسه شد و مشاهده گشت الگوریتم پیشنهادی عملکرد بهتری بخصوص در مسایل با ابعاد بزرگ و مسایلی با نوسان زیاد در هزینه راه‌اندازی دارد. پانام بالان و همکارانش [۱۴] به بررسی الگوریتم ژنتیک در MMAL و مقایسه هیوریستیک پیشنهادی خود با الگوریتم ژنتیک پرداختند.

آن‌ها مساله تعیین توالی خطوط مونتاژ را به صورت چندهدفه و با اهداف: (۱) کمینه نمودن میزان اضافه‌بار کاری با ثابت نگه‌داشتن نرخ مصرف قطعات،(۲) کمینه نمودن تغییرپذیری در مصرف قطعات،(۳) کمینه نمودن مجموع هزینه‌های راه‌اندازی مورد بررسی قرار دادند.

در این تحقیق آن‌ها عملکرد مکانیسم انتخاب، فضای لایه تورفتگی پارتو و مقدار تابع هدف برازندگی اسکالر را با در نظر گرفتن هر سه تابع هدف مذکور مقایسه نمودند. در نهایت نتایج حاکی از عملکرد بهتر الگوریتم ژنتیک با مکانیسم لایه

[11] Pareto stratum-niche cubicle

www.SID.ir

تورفتگی پارتو نسبت به سایر مکانیسم‌های انتخابی است. بولات و همکاران [۱۵] الگوریتم‌هایی برای تعیین توالی با زمان واقعی کارها در خطوط مونتاژ مدل ترکیبی ارایه دادند. آن‌ها اهداف کمینه‌سازی هزینه راه‌اندازی کل و هزینه اضافه‌بار کاری کل را به‌طور هم‌زمان در نظر گرفتند. سپس یک فرمول‌بندی کلی از مساله تعیین توالی ارایه دادند. یک روش شاخه و کران و دو الگوریتم هیوریستیک برای تعیین توالی که اهداف موجود را کمینه می‌کند، نیز گسترش دادند. بارد و همکارانش [۱۶]، مدلی با دو هدف را برای حل مساله تعیین توالی در خط مونتاژ مدل ترکیبی ارایه دادند که قادر به بررسی توازن میان طول خط مونتاژ و نرخ استفاده از قطعات می‌باشد. مدل حاصل یک مدل غیرخطی عدد صحیح ترکیبی است که هم با روش هیوریستیک و هم با روش شاخه و کران حل‌شده است. نتایج حاصل شامل تعداد ایستگاه‌های موجود در خط، تعداد مدل‌ها و تعداد کل قطعات لازم برای مونتاژ است. زمان محاسباتی در هیوریستیک منطقی بوده ولیکن در روش شاخه و کران به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش داشته است. مک‌مولن [۱۷]، یک الگوریتم هیوریستیک برای تعیین توالی خطوط مونتاژ مدل ترکیبی محصولات در سیستم JIT، زمانی که راه‌اندازی لازم است، ارایه داد. وی از الگوریتم جستجوی ممنوع [۱۲](TS) برای تعیین توالی با اهداف کمینه‌سازی نرخ استفاده از قطعات و حداقل کردن راه‌اندازی بهره برد. مک‌مولن و فریتزر [۱۸]، مدل استفاده‌شده توسط مک‌مولن [۱۷] را در نظر گرفتند. برای حل نیز، هیوریستیک مبتنی بر الگوریتم انجماد تدریجی را که به‌طور هم‌زمان، راه‌اندازی و نرخ استفاده از قطعات را در تعیین توالی خطوط مونتاژ مدل ترکیبی در سیستم JIT بهینه می‌کند، ارایه دادند.

مسایل زیادی با روش پیشنهادی حل شد و مقادیر تابع هدف با جواب به‌دست‌آمده با الگوریتم جستجوی ممنوع مقایسه گشت. نتایج حاکی از برتری روش انجماد تدریجی نسبت به جستجوی ممنوع بود. منصوری [۱۹]، یک الگوریتم ژنتیک چندهدفه برای حل مساله تعیین توالی خط مونتاژ مدل ترکیبی تحت سیستم JIT ارایه نمود. هدف وی بهینه‌سازی نوسان‌های نرخ تولید و تعداد راه‌اندازی‌ها به‌طور هم‌زمان بود که این دو هدف ارتباط معکوس دارند؛ بنابراین بهینه‌سازی هم‌زمان هردو تابع هدف مشکل بوده و ازاین‌رو مساله NP_hard است. الگوریتم ژنتیک چندهدفه [۱۳](MOGA) سعی در یافتن راه‌حل بهینه پارتو محلی و یا مرز غیر مؤثر محلی (مرزی که راه‌حل‌های موجود در آن منجر به کمینه ساختن هم‌زمان نوسان نرخ‌های تولید و تعداد راه‌اندازی‌ها می‌شود) دارد. عملکرد الگوریتم پیشنهادی با سه الگوریتم جستجوی دیگر با طرح شمارش کلی مقایسه شده است. هم‌چنین در مقایسه با سه الگوریتم ابتکاری دیگر ازنظر کیفیت جواب‌ها در مدت‌زمان معقولی از پردازش بهتر عمل نموده است. توکلی مقدم و رحیمی واحد [۲۰]، مدل ریاضی جدید از خطوط مونتاژ مدل ترکیبی، برای یافتن بهترین توالی مدل‌های تولیدی در سیستم JIT ارایه دادند. اهداف آن‌ها حداقل کردن کل اضافه‌بار کاری، مجموع تغییرپذیری نرخ تولید و مجموع هزینه‌های آماده‌سازی بود. با توجه به NP_hard بودن مساله از الگوریتم ممتیک برای حل استفاده کردند. برای ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، مسایل متعددی طراحی شد که نتایج حاکی از برتری این الگوریتم در کیفیت جواب و زمان محاسبات است. ربانی و رحیمی واحد [۲۱]، یک روش برنامه‌ریزی هدف فازی برای حل مساله

[12] Tabu Search
[13] Multi-Objective Genetic Algorithm

Archive of SID
www.SID.ir

خطوط مونتاژ مدل ترکیبی چندهدفه در سیستم تولید JIT ارایه نمودند. آن‌ها سه هدف را به‌طور هم‌زمان در نظر گرفتند: حداقل کردن کل اضافه‌بار کاری، مجموع تغییرپذیری نرخ تولید و مجموع هزینه‌های آماده‌سازی. ازآنجاکه اهداف موجود متضاد هستند، آن‌ها روش برنامه‌ریزی هدف فازی را پیشنهاد نمودند. این روش بر اساس درجه مطلوبیت تصمیم‌گیرنده و تلرانس مدنظر روی مقادیر هدف ساخته‌شده است. برای نشان دادن رفتار مدل پیشنهادی مثال‌هایی حل‌شده و نتایج محاسباتی گزارش‌شده است. در ادامه نمونه‌هایی از تحقیقات غیرقطعی در این زمینه آمده است.

اوزکان و همکاران [۲]، مساله بالانس و تعیین توالی خطوط مونتاژ مدل ترکیبی U شکل را با زمان انجام کار[14] احتمالی در نظر گرفتند. آن‌ها برای حل مساله از الگوریتم ژنتیک استفاده نمودند. برای ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، مطالعه‌ای بر روی هر دو نسخه قطعی و غیرقطعی زمان انجام کار انجام شد و نتایج محاسباتی حاکی از برتری الگوریتم پیشنهادی بود. همچنین از رویکرد فاصله اطمینان برای حل پارامتر تصادفی با توزیع نرمال بهره بردند.

دانگ و همکاران [۲۲]، مساله بالانس خط و مساله تعیین توالی مدل را به‌طور مشترک در خطوط U-شکل درنظرگرفتند و مدل برنامه‌ریزی احتمالی ۰-۱ را برای آن ارایه دادند. در این مدل زمان انجام کارها، متغیرهای احتمالی در نظر گرفته‌شده‌اند که دارای توزیع نرمال هستند و اهداف در این مساله کمینه ساختن زمان اضافه‌بار کاری[15] مورد انتظار برای ترکیب داده‌شده از زمان چرخه و تعداد ایستگاه‌های کاری است. برای حل مساله الگوریتم مبتنی بر انجماد تدریجی توسعه داده شد که برای کمینه ساختن انحراف مطلق از حجم کار[16] استفاده‌شده است.

اما تأکید اصلی این پژوهش، بررسی مساله توالی خطوط مونتاژ مدل ترکیبی در شرایط عدم قطعیت می‌باشد. با بررسی مطالعات انجام‌شده مشاهده شد، زمان انجام عملیات در بسیاری از مطالعات خطوط مونتاژ به‌صورت قطعی در نظر گرفته‌شده است، درصورتی‌که به علت وجود عوامل غیرقطعی فراوانی که در شرایط واقعی وجود دارد، مانند سطح توانایی اپراتورها، بی‌انگیزگی، پیچیدگی کارها، خرابی ماشین، تأخیر در تحویل مواد اولیه و غیره، برخی فرضیات مدل‌های قطعی ممکن است مصداق عینی نداشته باشند. محققین برای مقابله با این عدم قطعیت‌ها از برخی مدل‌های غیرقطعی مانند برنامه‌ریزی فازی، احتمالی و غیره استفاده کرده‌اند. رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی که از توزیع‌های احتمالی برای داده‌های غیرقطعی استفاده می‌کند، در سال‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است. هدف از این مطالعه، ارایه یک الگوریتم فرا ابتکاری برای زمان‌بندی خطوط مونتاژ مدل ترکیبی در شرایط عدم قطعیت می‌باشد.

همان‌طور که ذکر شد در این مقاله مساله تعیین توالی خطوط مونتاژ مدل ترکیبی با هدف مجموع کمینه‌سازی هزینه کارگر کمکی و هزینه بیکاری اپراتور موردنظر است؛ درحالی‌که زمان‌های پردازش به‌صورت غیرقطعی و تصادفی می‌باشد. از رویکرد محدودیت شانس برای مدل‌سازی تصادفی و از الگوریتم فرا ابتکاری جست‌وجوی هارمونی بهبودیافته برای حل استفاده‌شده است. در ادامه، در بخش ۲ شرح مساله و مدل‌سازی ریاضی در دو حالت قطعی و تصادفی آمده است. در بخش

[14] Task time
[15] work overload time
[16] Workloads

www.SID.ir

۳ الگوریتم فرا ابتکاری توضیح داده‌شده و همین‌طور بخش ۴ شامل نتایج عددی می‌باشد. در انتها نیز نتیجه‌گیری و منابع ذکرشده است.

۲ شرح مساله

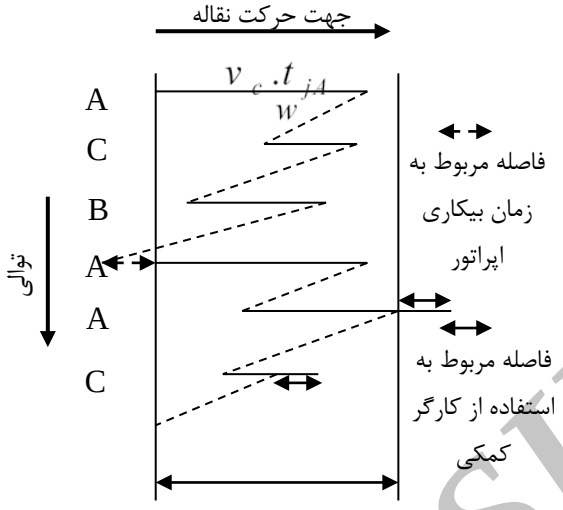
درواقع یک خط مونتاژ مدل ترکیبی (MMAL) شامل مجموعه‌ای از ایستگاه‌های کاری است که به‌صورت سریالی پشت سرهم قرارگرفته‌اند و نوار نقاله‌ای که با سرعت ثابت حرکت می‌کند [۱۲]، هم‌چنین می‌تواند مدل‌های متنوعی از محصولات مختلف را در طول یک شیفت و یا یک روز کاری مونتاژ کند. مدل‌های مختلف به‌طور متوالی بر روی نوار نقاله با طول زمان چرخه مشخص برای مونتاژ محصولات نیمه‌تمام، قرار می‌گیرند. در اینجا فرض بر این قرارگرفته که نوار نقاله با سرعت ثابت و از چپ به راست حرکت کرده و محصولات نیمه‌تمام را از طریق ایستگاه‌های کاریرای تکمیل تدریجی عملیات مونتاژ برای تولید محصول نهایی حرکت می‌دهد و هم‌چنین فرض شده که ایستگاه‌ها همه از نوع بسته هستند ایستگاه نوع بسته دارای مرز است و اپراتورها مجاز به عبور از مرزهای کاری خود نیستند. بر اساس این فرضیات نقطه شروع هر ایستگاه صفر و نقطه پایان L_j می‌باشد. ایستگاه‌های کاری قبلاً به‌طور مناسبی بالانس شده‌اند و زمان‌های پردازش نیز پارامتری تصادفی با توزیع نرمال در نظر گرفته‌شده است. فاصله زمانی بین ورود محصول‌ها ثابت می‌باشد و زمان‌های حرکت اپراتور در نظر گرفته نشده است. اپراتور به‌محض اتمام کار به ابتدای ایستگاه بازگشته و منتظر محصول بعدی می‌ماند، سرعت راه رفتن اپراتور نیز برابر سرعت نقاله است و هم‌چنین از الگوی زودترین زمان شروع استفاده شده است.

در اینجا از استراتژی MPS نیز استفاده‌شده است. استراتژی حداقل مجموعه قطعات[17] به‌طور گسترده در خطوط مونتاژ مدل ترکیبی موردپذیرش قرارگرفته است. تعداد محصول‌هایی که در یک سیکل تولید باید تعیین توالی شود، توسط برداری به نام حداقل مجموعه قطعات مشخص می‌گردد. اگر تقاضای مدل iام برابر d_i باشد و $i = ۱,...,m$ و درمجموع m مدل داشته باشیم، در این صورت بردار حداقل مجموعه قطعات به‌صورت $(d_۱,d_۲,...,d_M)=\left(\frac{D_۱}{h},\frac{D_۲}{h},...,\frac{D_M}{h}\right)$ است. h بزرگ‌ترین تقاضای مدل m است. به‌عنوان‌مثال، اگر تقاضاهای مدل‌های ترکیبی ۳۰۰ واحد از مدل A، ۵۰۰ واحد از مدل B و ۲۰۰ واحد از مدل C باشد، تعیین توالی برای قطعات کاری همه این ۱۰۰۰ مدل بسیار دشوار خواهد بود؛ بنابراین برای حل این مشکل ۳ واحد از محصول A، ۵ واحد از محصول B و ۲ واحد از محصول C در ابتدا زمان‌بندی خواهد شد. ادامه یک چنین توالی در حداقل مجموعه قطعات در ۱۰۰ تکرار تقاضای کل برای مدل‌های مختلف در همه دوره‌های کاری را ارضا خواهد کرد.

شکل۱ که در ابتدا در مقاله هیون و همکاران [۱۳]، ذکر شد، زمان‌های بیکاری و استفاده از کارگر کمکی را در خطوط مونتاژ با ایستگاه‌های بسته نشان می‌دهد. در این ایستگاه سه نوع محصول (A,B,C) مونتاژ می‌شوند و سرعت نقاله ثابت و برابر V_c در نظر گرفته‌شده و t_{mj} زمان پردازش محصول m در ایستگاه j می‌باشد [۲۳].

[17] Minimum part set(MPS)

www.SID.ir



شکل ۱. عملیات‌های انجام شده در یک ایستگاه برای مسأله مورد بررسی

در جدول ۱ نیز نمادها و پارامترهای مورد استفاده در مساله مورد بررسی ذکر شده است.

جدول ۱. معرفی متغیرها و پارامترها

اندیس‌ها	تعاریف
i	توالی محصولات، $i = \{1, 2, \ldots, I\}$
j	ایستگاه، $j \in \{1, 2, \ldots, J\}$
m	مدل، $m \in \{1, 2, \ldots, M\}$
پارامترها	**تعاریف**
J	تعداد کل ایستگاه‌ها.
M	تعداد مدل‌ها.
γ	فاصله زمانی بین ورود محصول توالی $i-1$ ام و i ام (این فاصله زمانی برای تمامی ایستگاه‌ها برابر می‌باشد).
I	تعداد کل توالی‌ها، $I = \sum_{m=1}^{M} d_m$
d_m	تقاضا برای مدل m در بردار حداقل مجموعه قطعات.
V_c	سرعت نقاله، (فوت/ دقیقه).
L_j	طول ایستگاه j ام، (فوت).
t_{mj}	زمان لازم برای انجام عملیات بر روی محصول مدل m ام در ایستگاه j ام.
μ_{mj}	مقدار میانگین پارامتر زمان پردازش t_{mj} محصول مدل m ام در ایستگاه j ام.
σ^2_{mj}	واریانس پارامتر تصادفی زمان پردازش t_{mj} محصول مدل m ام در ایستگاه j ام.
C_U	هزینه زمان لازم برای تکمیل عملیات ناتمام، (دلار/ دقیقه).
C_{ID}	هزینه زمان بیکاری، (دلار/ دقیقه).

Archive of SID

www.SID.ir

متغیرها	تعاریف
x_{im}	متغیری باینری و برابر ۱ است اگر محصول توالی i ام از نوع مدل m باشد در غیر این صورت برابر ۰ است.
Z_{ij}	موقعیت مکانی شروع به کار بر روی محصول توالی i ام در ایستگاه j ام
U_{ij}	زمان لازم برای تکمیل عملیات ناتمام ایستگاه j ام بر روی محصول توالی i ام .
ID_{ij}	زمان بیکاری اپراتور ایستگاه j ام برای توالی i ام .

۱-۲ مدل ریاضی به‌صورت قطعی

در این مقاله تابع هدف موردبررسی کمینه‌سازی مجموع هزینه کارگر کمکی و هزینه بیکاری اپراتور می‌باشد. با توجه به این‌که طبق فرضیات توقف نقاله مجاز نیست، زمانی که کارگر عادی مشغول در خط موفق نشود کار را تا انتهای خط به اتمام برساند و درواقع خط دچار اضافه‌بار کاری شود از کارگر کمکی بهره می‌گیرد که هدف اول در رابطه با این موضوع است. هیون و همکاران [۱۳] برای این منظور از معادله زیر استفاده کردند:

$$\min \quad \sum_{j=1}^{J} C_U \left(\sum_{i=1}^{I} U_{ij} + z_{(I+1)j} / v_c\right)$$

هدف دوم سعی در کمینه‌سازی بیکاری اتفاق افتاده برای هر اپراتور در هر ایستگاه کاری دارد که به‌صورت زیر فرموله شده است:

$$\min \quad \sum_{j=1}^{J} \sum_{i=1}^{I} (C_{ID} . ID_{ij})$$

مدل کلی و محدودیت‌های مساله نیز به شرح زیر می‌باشند:

$$\min \quad Z = \sum_{j=1}^{J} C_U \left(\sum_{i=1}^{I} U_{ij} + z_{(I+1)j} / v_c\right) + \sum_{j=1}^{J} \sum_{i=1}^{I} (C_{ID} . ID_{ij})$$

$$st:$$

$$\sum_{m=1}^{M} x_{im} = 1 \quad , i = 1,..,I \quad , \tag{۱}$$

$$\sum_{i=1}^{I} x_{im} = d_m \quad , m = 1,..,M \quad , \tag{۲}$$

$$z_{1,j+1} = \sum_{l=1}^{j} L_l \quad , j = 1,...,J-1 \quad , \tag{۳}$$

$$z_{i+1,j} = z_{ij} + v_c . \left(\sum_{m=1}^{M} x_{im} t_{mj} - U_{ij} - \gamma + + ID_{i+1,j}\right) \quad , i = 1,..,I-1 \quad , j = 1,..,J \quad , \quad 0 \tag{۴}$$

$$U_{ij} \geq (z_{ij} + v_c . \sum_{m=1}^{M} x_{im} t_{mj} - \sum_{l=1}^{j} L_l) / v_c \quad , i = 1,..,I-1 \quad , j = 1,..,J \quad , \tag{۵}$$

$$U_{Ij} \geq [z_{Ij} + v_c . \sum_{m=1}^{M} x_{Im} t_{mj} - (\sum_{l=1}^{j-1} L_l + v_c . \gamma)] / v_c \quad , j = 1,..,J \quad , \tag{۶}$$

Archive of SID

www.SID.ir

$$ID_{ij} \geq (\sum_{l=1}^{j-1} L_l - (z_{i-1,j} + v_c \sum_{m=1}^{M} x_{i-1,m} t_{mj} - v_c U_{i-1,j} - v_c \gamma)) / v_c \quad ID_{ij} \geq 0 \,, i = 2,..,I-1 \quad , j = 1,..,J \quad , \tag{۷}$$

$$x_{im} \in \{0,1\}; \tag{۸}$$

$$U_{ij} \geq 0, z_{1j} = 0, z_{ij} \geq 0; \quad i = 1,..,I \,, \quad j = 1,..,J \,, \quad m = 1,..,M \,, \tag{۹}$$

محدودیت (۱) اطمینان می‌دهد که تنها یک محصول به هر موقعیت مکانی در یک توالی تخصیص داده‌شده است. تقاضا برای هر مدل m برابر d_m است. برای تأمین مقدار تقاضا، تعداد d_m تا از کل توالی‌ها باید از مدل m باشد؛ لذا برای تأمین تقاضای موجود برای هر مدل محدودیت (۲) در نظر گرفته‌شده است. محدودیت (۳) بیانگر این است که کار بر اولین محصول از هر چرخه باید از مرز سمت چپ ایستگاه شروع شود. محدودیت (۴) موقعیت شروع کارگر در هر ایستگاه j برای محصول $(i+1)$ در توالی را نشان می‌دهد. محدودیت (۵) نشان‌دهنده زمان اضافه‌بار کاری iامین محصول از ایستگاه j در یک توالی است. محدودیت (۶) زمان اضافه بارکاری برای آخرین محصول I در ایستگاه و در یک توالی است. محدودیت (۷) نشان‌دهنده زمان بیکاری برای محصول i از ایستگاه j است. Z_{1j} نیز بیانگر این است که ایستگاه از نوع بسته می‌باشد.

۲-۲ استفاده از رویکرد محدودیت-شانس در مدل‌سازی تصادفی مساله

با توجه به فرضیات و در مساله پیشنهادی زمان‌های پردازش، t_{mj}، پارامتری تصادفی و مستقل در نظر گرفته‌شده که از توزیع نرمال پیروی می‌کند، با میانگین μ_{mj} و واریانس σ^2_{mj}، به‌گونه‌ای که $\left(t_{mj} \sim N\left(\mu_{mj}, \sigma^2_{mj}\right)\right)$ با سطح اطمینان $\alpha(0 \leq \alpha \leq 1)$ لازم به ذکر است که مقادیر α بستگی به نظر تصمیم‌گیرنده[18] (DM) دارد.

همان‌طور که در قسمت‌های قبل ذکر شد، برای برخورد با پارامتر تصادفی مساله و مدل کردن مساله در شرایط عدم قطعیت از رویکرد محدودیت-شانس استفاده‌شده است. قابل‌ذکر است که درروش محدودیت-شانس مقدار $\alpha=1$ معادل حالت قطعی است. در ادامه بحث، با توجه به مدل پیشنهادی و استفاده از روش محدودیت-شانس، محدودیت‌های (۷)-(۴) پس از اعمال تغییرات به شکل زیر در مدل گسترش داده‌شده‌است.

$$z_{i+1,j} = z_{ij} + v_c.(\sum_{m=1}^{M} x_{im}.\mu_{mj} + Z_{1-\alpha}\sqrt{\sum_{m=1}^{M} \sigma^2_{mj} x^2_{im}} - U_{ij} - \gamma + ID_{i+1,j}), \quad i = 1,...I-1 \quad , j = 1,...,J \quad , \tag{۱۰}$$

$$U_{ij} \geq \frac{\left(z_{ij} + v_c.(\sum_{m=1}^{M} x_{im}.\mu_{mj} + Z_{1-\alpha}\sqrt{\sum_{m=1}^{M} \sigma^2_{mj} x^2_{Im}}) - \sum_{l=1}^{j} L_l\right)}{v_c} \quad ,i = 1,..,I-1 \quad , j = 1,..,J \quad , \tag{۱۱}$$

$$U_{Ij} \geq \left(z_{Ij} + v_c.(\sum_{m=1}^{M} x_{Im}.\mu_{mj} + Z_{1-\alpha}\sqrt{\sum_{m=1}^{M} \sigma^2_{mj} x^2_{Im}}) - (\sum_{l=1}^{j-1} L_l + v_c.\gamma)\right)/v_c \quad , \quad j = 1,..,J \quad , \tag{۱۲}$$

[18] Decision maker

Archive of SID

www.SID.ir

$$ID_{ij} \geq \left(\sum_{l=1}^{j-1} L_l - \left(z_{i-1,j} + v_c \cdot \left(\sum_{m=1}^{M} x_{i-1,m} \cdot \mu_{mj} + Z_{1-\alpha} \sqrt{\sum_{m=1}^{M} \sigma_{mj}^2 \cdot x_{i-1,m}^2} \right) - v_c \cdot U_{i-1,j} - v_c \cdot \gamma \right) \right) / v_c \quad (۱۳)$$

$$, i = 2,.., I-1 \qquad , j = 1,.., J \quad ,$$

با توجه به رابطه زیر تعداد کل توالی‌های ممکن برای یک مساله مشخص از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۳]:

$$\text{تعداد توالی تولید} = \frac{\left(\sum_{m=1}^{M} d_m \right)!}{\prod_{m=1}^{M} (d_m !)} \quad (۱۴)$$

با توجه به این رابطه، به‌راحتی می‌توان دریافت که با افزایش بعد مساله، زمان موردنیاز برای به دست آوردن توالی‌های تولید بهینه به‌صورت نمایی افزایش خواهد یافت. از طرف دیگر فرض مبتنی بر غیرقطعی بودن زمان پردازش نیز بر پیچیدگی مساله می‌افزاید؛ بنابراین در مسایل با ابعاد بالا نمی‌توان از روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک استفاده کرد.

۳ الگوریتم جست‌وجوی هارمونی بهبودیافته[19]

الگوریتم جست‌وجوی هارمونی[20] (HS)، یکی از ساده‌ترین و جدیدترین روش‌های فرا ابتکاری است که در فرایند جستجوی جواب شدنی بهینه در مسایل بهینه‌سازی، از فرایند نواختن هم‌زمان گروه ارکستر موزیک الهام گرفته‌شده است. به‌عبارت‌دیگر میان پیدا کردن یک حل بهینه در مساله پیچیده و فرایند اجرای موزیک تشابه وجود دارد. این روش حل را ابتدا گیم و همکاران [۲۴] در سال ۲۰۰۱ ارایه کردند. مطابق با منطق این روش فرا ابتکاری، تلاش برای به دست آمدن هماهنگی در یک فرایند موزیک، مشابه پیدا کردن یک حل بهینه در مسایل بهینه‌سازی است. HS مانند الگوریتم ژنتیک، جزء الگوریتم‌های بهبوددهنده است. به‌عبارت‌دیگر با نسلی از بردارهای حل شروع و برای ایجاد نسل‌های جدید از فرایند انتخاب استفاده می‌شود؛ اما برخلاف الگوریتم ژنتیک (که در آن از دو کروموزوم برای تولید کروموزوم یا بردار حل جدید استفاده می‌شود) در این روش از همه بردارهای حل موجود در حافظه برای تولید[21] حل جدید استفاده می‌شود. از مزایای این الگوریتم، همگرایی سریع آن به دلیل ساختار مناسب آن است و از معایب آن افتادن در بهینه محلی به دلیل جستجو با تنوع کم در تکرارهای پایانی الگوریتم است، که راه‌حل برای رفع آن استفاده از تکنیک فاز شروع دوباره و تغییر در قواعد الگوریتم به‌خصوص در تکرارهای پایانی است. در این راستا برای بهبود الگوریتم از روش پیشنهادی مهدوی و همکاران[۲۴] استفاده‌شده است.

این الگوریتم از پنج گام تشکیل‌شده است:

۱) مقداردهی اولیه مساله بهینه‌سازی و پارامترهای اولیه

[19] Improved Harmony Search (IHS)
[20] Harmony search algorithm
[21] Improvise

Archive of SID
www.SID.ir

۲) مقداردهی حافظه هارمونی
۳) ایجاد یک هارمونی جدید بهبودیافته
۴) به‌روز کردن حافظه هارمونی
۵) معیار توقف

در ادامه توضیح گام‌های این الگوریتم آمده است:

۳-۱ مقداردهی اولیه مساله بهینه‌سازی و پارامترهای اولیه

در این مرحله، مساله بهینه‌سازی به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} &\min \quad f(x) \\ &s.t: x_i \in X_i = ۱,۲,...,N \end{aligned} \qquad (۱۵)$$

$(f(x))$ همان تابع هدف و x مجموعه‌ای از متغیرهای تصمیم‌گیری است. N تعداد متغیرهای تصمیم است. x_i مجموعه‌ای از طیف ممکن از ارزش‌ها برای هر متغیر تصمیم‌گیری است که در آن $x_i^L \le x_i \le x_i^U$ است که x_i^U و x_i^L مرزهای بالا و پایین برای هر متغیر تصمیم‌گیری است. فرض کنید k هارمونی توسط N نوازنده ساخته‌شده است، درواقع فرض شده است اندازه حافظه نوازندگان[۲۲] (HMS)، برابر k هارمونی است. پس با توجه به رابطه (۱۶) یک ماتریس با k سطر (تعداد هارمونی‌هایی که نوازندگان به خاطر می‌سپارند) و $N+۱$ ستون که در آن N تعداد نوازنده (تعداد متغیرهای تأثیرگذار در مساله) و یک ستون برای ارزش آن هارمونی $(f(x))$ در نظر گرفته‌شده است (در مسایل تک هدفه). به ماتریس حاصل حافظه هارمونی[۲۳] (HM) می‌گویند.

$$HMS \ (Harmony \ Memory \ Size) = k \qquad (۱۶)$$

در ادامه، پارامترهای کلیدی الگوریتم، اندازه حافظه هارمونی HMS، نرخ در نظر گرفتن حافظه هارمونی[۲۴] HMCR، نرخ تنظیم زیروبمی[۲۵] PAR، ماکزیمم تعداد بهبود[۲۶] NI و پهنای باند[۲۷] BW نیز مقداردهی می‌شوند [۲۵]. در شکل۲ ماتریس حافظه هارمونی آمده است.

۳-۲ مقداردهی حافظه هارمونی

حافظه هارمونی مکانی است که بردارهای جواب (مجموعه متغیرهای تصمیم)، در آن ذخیره‌شده‌اند. HM شبیه به تعداد جمعیت در دیگر الگوریتم‌های تکاملی است. ماتریس HM در ابتدا به‌عنوان راه‌حل‌های تولیدی تصادفی مشخص‌شده

[22] Harmony Memory Size
[23] Harmony Memory
[24] Harmony memory consideration rate
[25] Pitch adjusting rate
[26] Maximum improvisation
[27] Band width

Archive of SID
www.SID.ir

به‌عنوان HMS در محدوده حد بالا و پایین، پر می‌شود و هم‌چنین با مقدار تابع متناظر با هر بردار تصادفی مقدار $(f(x))$ محاسبه می‌شود.

$$\left[\begin{array}{cccc|c} x_1^1 & x_2^1 & \dots & x_n^1 & f(x^1) \\ x_1^2 & x_2^2 & \dots & x_n^2 & f(x^2) \\ . & . & . & . & . \\ x_1^{HMS} & x_2^{HMS} & \dots & x_n^{HMS} & f(x^{HMS}) \end{array}\right]$$

شکل ۲. ماتریس حافظه هامونی

۳-۳ ایجاد یک هارمونی جدید بهبودیافته

هر هارمونی جدید که تولید می‌شود، می‌تواند از تغییر در نت‌های هارمونی‌های قبلی ایجاد شود. به این معنا که نوازنده نت‌های خود را کمی تغییر می‌دهد. بردار هارمونی جدید $X' = (x_1', x_2', \dots, x_N')$ در الگوریتم بر اساس سه قاعده تولید شود: ۱) در نظر گرفتن نت‌های موجود در حافظه، ۲) انتخاب تصادفی و ۳) تنظیم زیروبمی.

منظور از در نظر گرفتن نت‌های موجود در حافظه، استفاده از نت‌های قبلی نواخته شده موجود در حافظه می‌باشد، به‌طور نمونه در شکل زیر از نت‌های نوازنده اول استفاده می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، مقدار متغیر تصمیم x_1' برای بردار جدید از هر یک از مقادیر در محدوده حافظه هارمونی مشخص‌شده $(x_1^1 - x_1^{'HMS})$، انتخاب می‌شود. مقادیر سایر متغیرها، $(x_2', x_3', \dots, x_N')$، نیز به همین ترتیب انتخاب می‌شوند. HMCR که نرخ انتخاب از مقادیر قبلی ذخیره‌شده در حافظه HM است بین ۰ و ۱ متغیر می‌باشد و (1-HMCR) نرخ انتخاب تصادفی یک مقدار از محدوده مقادیر ممکن است.

$$x_i' = \begin{cases} x_i' \in (x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^{HMS}) \rightarrow with\ probability\ of\ HMCR \\ x_i' \in X_i \qquad\qquad\quad \rightarrow with\ probability\ of\ (1\text{-}HMCR) \end{cases} \qquad (۱۷)$$

به‌عنوان مثال، HMCR با مقدار ۰/۸۵ نشان می‌دهد که الگوریتم HS، مقدار متغیر تصمیم را از مقادیر ذخیره‌شده قبلی در HM با احتمال ۸۵٪ انتخاب خواهد کرد، یا از تمامی محدوده ممکن با احتمال ٪(۱۰۰-۸۵) انتخاب می‌کند. سپس هر جزء به‌دست‌آمده با در نظر گرفتن حافظه، بررسی می‌شود که آیا نیاز به تنظیم[28] دارد یا خیر. این عملیات توسط پارامتر PAR انجام می‌شود که به شرح زیر است:

$$x_i' = \begin{cases} Yes & with\ probability\ PAR, \quad so \rightarrow x_i' = x_i' \pm rand() * bw, \\ No & with\ probability\ (1\text{-}PAR) \rightarrow (\text{the rate of doing nothing}) \end{cases} \qquad (۱۸)$$

(۱۸)

[28] pitch-adjusted

Archive of SID
www.SID.ir

که در اینجا، BW پهنای باند تصادفی است و همین‌طور منظور از ()rand مقداری تصادفی بین ۰ و ۱ است. لازم به ذکر است این عملیات برای هر متغیر از بردار هارمونی جدید انجام می‌شود.

برای بهبود عملکرد الگوریتم جست‌وجوی هارمونی و جلوگیری از افتادن در دام بهینه محلی، الگوریتم جست‌وجوی هارمونی بهبود داده‌شده[۲۹] (IHS) در اینجا مورد استفاده قرارگرفته است. در این الگوریتم روش جدیدی در ایجاد بردار حل جدید ارایه شده است که دقت و همگرایی آن نسبت به روش جست‌وجوی هارمونی ساده، بهبود می‌یابد [۲۵]. نقش پارامتر PAR در افزایش تنوع در شروع جستجوی الگوریتم در فضای حل و نقش BW در جستجوی محلی الگوریتم برای افزایش نرخ همگرایی تأثیرگذار است. IHS مشابه HS است با این تفاوت که مقادیر پارامترهایPAR و BW به‌صورت پویا در تکرار جداگانه مطابق روابط ذکرشده در زیر حاصل می‌گردند. مقادیر PAR و BW در طی هر نسل به شرح زیر تغییر می‌کنند:

$$PAR(gn) = PAR_{\min} + \frac{PAR_{\max} - PAR_{\min}}{NI} \times gn \qquad (۱۹)$$

که PAR(g) نرخ تنظیم نسل فعلی است، PAR_{min} کم ترین نرخ تنظیم و PAR_{max} بیش‌ترین نرخ تنظیم است. g تعداد نسل فعلی است و NI تعداد نواختن‌ها[۳۰] (تکرارها) است.

$$BW(gn) = BW_{\max} \exp\left(\frac{Ln(\frac{BW_{\min}}{BW_{\max}})}{NI} \times gn \right) \qquad (۲۰)$$

که BW نرخ پهنای باند نسل فعلی است، BW_{min} کم ترین نرخ پهنای باند و BW_{max} بیش ترین نرخ پهنای باند است.

در اکثر مسایل نشان داده‌شده است که عملکرد HIS به‌مراتب بهتر از عملکرد HS استاندارد است [۲۵]. از معایب روش HS استفاده از مقادیر ثابت برای پارامترهای PAR و BW است که تنظیم مناسب این پارامترها مشکل است. هم‌چنین از معایب دیگر HS این است که تعداد تکرارهایی که الگوریتم نیاز دارد تا حل بهینه را پیدا کند، مناسب نیست. اگر مقدار PAR کوچک و مقدار BW بزرگ باشد، عملکرد الگوریتم تضعیف‌شده و برای بهبود آن باید تعداد تکرارها را افزایش دهیم تا به حل بهینه دست پیدا کنیم. هرچه مقدار BW در تکرارهای ابتدایی بزرگ‌تر باشد، موجب می‌شود که الگوریتم، تنوع جست‌وجو در کل فضای حل را افزایش دهد و در تکرارهای بعدی برای جست‌وجوی محلی، مقدار کم‌تر آن مناسب است؛ بنابراین مقادیر بزرگ PAR و مقادیر کوچک BW در تکرارهای پایانی منجر به رسیدن به فضای بهینه و همگرایی به جواب بهینه می‌گردد.

[29] Improved Harmony Search
[30] Improvisation

Archive of SID
www.SID.ir

۳-۴ به‌روز کردن حافظه هارمونی

اگر بردار هارمونی جدید از بدترین بردار هارمونی موجود در حافظه بهتر باشد بر اساس ارزیابی مقدار تابع هدف، بردار هارمونی جدید در HM گنجانده می‌شود و بدترین بردار هماهنگی موجود از HM حذف می‌شود.

۳-۵ معیار توقف

آخرین گام در الگوریتم جست‌وجوی هارمونی، این است که چک کنیم که آیا الگوریتم توانسته جواب قابل قبولی که بتواند انتظارات تصمیم‌گیرنده را برآورده کند، بیابد. معیارهای توقف متفاوتی در ادبیات استفاده‌شده است: ۱) توقف بعد از تعداد مشخصی تکرار، ۲) توقف پس‌ازآنکه بهبودی در تابع هدف حاصل نشد و ۳) توقف پس از رسیدن به مقدار مشخصی از تابع هدف. در اینجا معیار توقف، رسیدن به تعداد مشخصی تکرار است. لازم به ذکر است که تعداد تکرار بستگی به نوع مساله و نظر تصمیم‌گیرنده دارد. وقتی معیار توقف ارضا شود، الگوریتم متوقف می‌شود؛ به‌عبارت‌دیگر، مراحل ۳ و ۴ تا توقف الگوریتم، تکرار می‌شوند.

۴ نتایج عددی

در ادامه، مثال‌هایی ارایه‌شده که در ابتدا توسط نرم‌افزار گمز حل‌شده است. با توجه به ماهیت NP_hard بودن مساله و پیچیدگی بالای مدل که با افزایش تعداد مدل‌ها، توالی‌ها و ایستگاه‌ها نیز به‌طور فزاینده‌ای افزایش می‌یابد و با توجه به اینکه حل مدل توسط نرم‌افزارهای حل دقیق مانند گمز مستلزم صرف زمان و برخورداری از حافظه و قدرت پردازش بالا خواهد بود؛ لذا برای غلبه بر این مشکلات از الگوریتم فرا ابتکاری جست‌وجوی هارمونی استفاده‌شده است و عملکرد این دو مورد مقایسه قرارگرفته است.

جهت کد نویسی مساله و حل توسط الگوریتم فرا ابتکاری از نرم‌افزار MATLAB R2014a در یک لپ‌تاپ با پردازنده Intel® Core™ i5-4200U CPU @ 1.60GHz 2.30 GHz و حافظه 4.00GB (2.98GB usable) و سیستم‌عامل Microsoft Windows 8.1 استفاده‌شده است.

۴-۱ نحوه تولید مسایل آزمایشی

مسایل آزمایشی برای ارزیابی و اثربخشی الگوریتم پیشنهادی در دو اندازه کوچک و بزرگ و به‌صورت تصادفی تولیدشده‌اند. این مسایل در تعداد مدل‌ها، تقاضا برای هر مدل و هم‌چنین تعداد ایستگاه‌ها باهم تفاوت دارند. زمان‌های پردازش همان‌طور که در فصول قبل توضیح داده شد از توزیع نرمال پیروی کرده و همین‌طور با توجه به منبع [۴]، می‌توان واریانس را نسبتی از میانگین دانست، به‌طوری‌که $\sigma^2_{mj} = \lambda\mu_{mj}$. در این رابطه λ عدد ثابت مثبتی است که در اینجا ۰/۵ در نظر گرفته‌شده است و هم‌چنین μ_{mj} و σ^2_{mj} به ترتیب میانگین و واریانس پارامتر تصادفی زمان پردازش مدل m از ایستگاه j هستند. در نظر گرفتن یک چنین ارتباطی بین میانگین و واریانس در توزیع نرمال غیرمعمول نبوده و [۲۶] و [۲۷] برای زمان‌های پردازش کارها با توزیع نرمال، نیز از این نسبت استفاده کرده‌اند. لازم به ذکر است مقدار α توسط تصمیم‌گیرنده

Archive of SID
www.SID.ir

مشخص می‌شود که در اینجا با بررسی مرور ادبیات و مطالعات انجام‌گرفته، مقدار ۰/۹۷۵ $(Z_\alpha = ۱/۹۶)$ قرار داده‌شده است.

در الگوریتم جست‌وجو هارمونی، هفت پارامتر مهم اندازه حافظه (HMS)، تعداد بردارهای حل در حافظه (HMCR)، مینیمم نرخ تنظیم گام (PAR)، ماکزیمم نرخ تنظیم گام (PAR)، مینیمم پهنای باند (BW)، ماکزیمم پهنای باند (BW) و حداکثر تکرار (NI) وجود دارد. برای تنظیم پارامترهای الگوریتم که موجب افزایش کارایی الگوریتم می‌شود، برای عواملی که در بالا معرفی شد سطوحی را در نظر می‌گیریم و به ازای هر سطح از پارامترها برنامه را ۵ بار در متلب اجرا کرده و میانگین اعداد هر سطر را به‌عنوان ستون مبنا در نرم‌افزار مینی‌تب جهت تجزیه‌وتحلیل و محاسبات قرار می‌دهیم. عوامل و سطوح را به شکل زیر در جدول۲ در نظر می‌گیریم:

جدول۲. بازه مورداستفاده پارامترهای الگوریتمHS

HMS	HMCR	PAR_{min}	PAR_{max}	BW_{min}	BW_{max}	NI
۱۰	۰/۸۵	۰/۱	۰/۷	۰/۵	۳	۱۰۰
۲۰	۰/۹۳	۰/۲	۰/۹۹	۰/۴۵	۰/۹	۵۰۰
۳۰	۰/۹۹	۰/۳	۲	۰/۳	۴	۱۰۰۰

بعد از اجرای برنامه در نرم‌افزار متلب با استفاده از داده‌های به‌دست‌آمده تنظیم پارامتر انجام‌شده است. در ادامه با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده و نرم‌افزار مینی‌تب با استفاده از روش فاکتوریل به تنظیم پارامتر الگوریتم پرداخته‌شده که نتایج ذیل در جدول۳ برای هر عامل حاصل‌شده است.

جدول۳. مقادیر مورداستفاده پارامترهای الگوریتمHS

HMS	HMCR	PAR_{min}	PAR_{max}	BW_{min}	BW_{max}	NI
۲۰	۰/۸۵	۰/۲	۰/۹۹	۰/۴۵	۰/۹	۱۰۰

۲-۴ سایز کوچک

برای تمام این مسایل، هزینه‌های زمان بیکاری، کارگر کمکی و انحراف از نرخ تولید برابر ۱ دلار، سرعت نقاله برابر ۱ متر بر دقیقه و نیز برابر ۱ در نظر گرفته‌شده است. میانگین پارامتر تصادفی زمان پردازش با توجه به منبع [۴] به‌صورت تصادفی با استفاده از توزیع یکنواخت در فاصله [۵, ۱۵] تولیدشده و واریانس نیز با استفاده از رابطه $\sigma_{mj}^2 = \lambda\mu_{mj}$، به‌دست‌آمده که λ نیز ۰/۵ در نظر گرفته‌شده است. در ادامه طول ایستگاه و زمان‌های پردازش در جدول۴ و سایر مشخصات مساله شامل تعداد ایستگاه، طول ایستگاه و میانگین و واریانس پارامتر تصادفی زمان پردازش در جدول۵ آمده است.

برای بررسی امکان‌پذیری مدل لازم است که ابتدا با روشی دقیق حل شود که از نرم‌افزار گمز[31] بدین‌منظور در این پژوهش استفاده شده است و همین‌طور برای ارزیابی کارایی الگوریتم فرا ابتکاری، نتایج حاصل از آن با نتیجه حاصل از

[31] GAMS software

Archive of SID
www.SID.ir

نرم‌افزار گمز مقایسه شده است. ازآنجاکه زمان نقش مهمی در بررسی عملکرد الگوریتم دارد، یکی از معیارهای مقایسه CPU time در نظر گرفته‌شده که درواقع زمان حل مساله را نشان می‌دهد. جواب‌هایی حاصل از الگوریتم IHS و گمز نیز توسط معادله (۲۱) مورد مقایسه قرارگرفته‌اند[۱]. نتایج حل مسایل در ابعاد کوچک در جدول۶ آمده است. لازم به ذکر است که به دلیل پیچیده بودن مساله، نرم‌افزار GAMS قادر به حل سایزهای بزرگ‌تر نمی‌باشد و مقایسات بین روش دقیق و الگوریتم فرا ابتکاری IHS در ابعاد کوچک موردبررسی قرارگرفته است.

$$GAP = \frac{best\ cost\ (IHS) - best\ cost\ (GAMS)}{best\ cost\ (GAMS)} \qquad (۲۱)$$

جدول ۴. طول ایستگاه و زمان‌های پردازش

	مدل			
J	۱	۲	۳	L
۱	N(۶/۳، ۳/۱۵)	N(۵/۹، ۲/۹۵)	N(۱۴/۶، ۷/۳)	۲
۲	N(۱۴/۱، ۷/۰۵)	N(۷/۸، ۳/۹)	N(۶/۸، ۳/۴)	۴
۳	N(۱۱/۳، ۵/۶۵)	N(۱۰/۵، ۵/۲۵)	N(۱۴/۷، ۷/۳۵)	۲

جدول ۵. مشخصات نمونه‌های مساله مورداستفاده در سایز کوچک

مساله	I	MPS	تعداد راه‌حل ممکن	γ
۱	۶	(۲،۲،۲)	۹۰	۶/۶
۲	۶	(۱،۲،۳)	۶۰	۶/۵
۳	۶	(۱،۱،۴)	۳۰	۶/۶
۴	۸	(۳،۲،۳)	۵۶۰	۶/۲
۵	۸	(۴،۲،۲)	۴۲۰	۶/۲
۶	۸	(۲،۳،۳)	۵۶۰	۶/۲

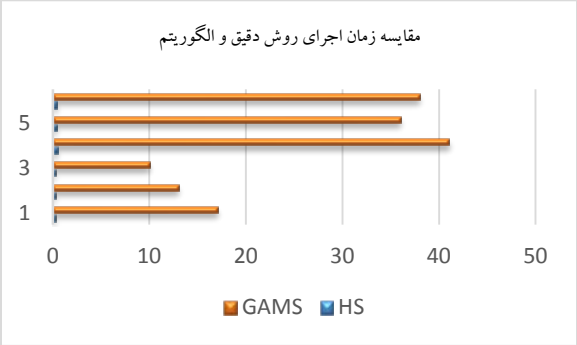
جدول۶. نتایج حل مسایل در ابعاد کوچک

مساله	RUN time (s)		Objective function		GAP
	GAMS	HIS	GAMS	HIS	
۱	۱۷	۰/۲۷	۲۴۶	۲۷۰	۰/۰۹۸
۲	۱۳	۰/۲۶	۲۵۷	۲۸۱	۰/۰۹۳
۳	۱۰	۰/۲۶	۲۷۱	۲۹۱	۰/۰۷۴
۴	۴۱	۰/۴۴	۲۶۴	۳۶۰	۰/۳۶
۵	۳۶	۰/۳۹	۲۵۴	۳۴۸	۰/۳۷
۶	۳۸	۰/۴	۲۶۸	۳۶۳	۰/۳۵

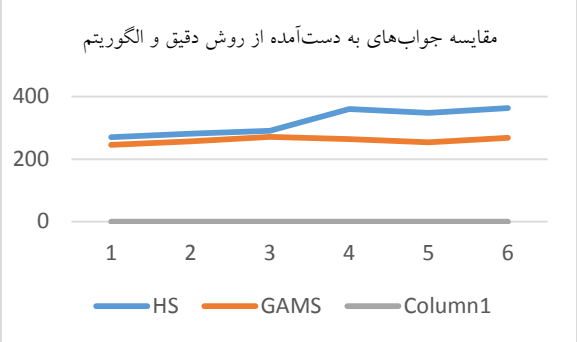
Archive of SID

www.SID.ir

در توضیح مقایسه دو روش همان‌طور که در جدول۶ و شکل۴ مشاهده می‌شود می‌توان نتیجه گرفت که جواب‌های به‌دست‌آمده از الگوریتم IHS در مقایسه با جواب دقیق حاصل از نرم‌افزار گمز از خطای محاسباتی کمی برخوردار است و جواب‌های قابل‌قبولی را نتیجه می‌دهد و این نشان‌دهنده کارایی خوب الگوریتم می‌باشد. با توجه به جدول۶ و همان‌طور که از نتایج مشخص است و شکل۳، الگوریتم جست‌وجوی هارمونی بهبودیافته در ابعاد کوچک ازلحاظ زمان اجرا از عملکرد بسیار بهتری برخوردار است.



شکل۳. مقایسه زمان اجرای روش دقیق و الگوریتم



شکل۴. مقایسه جواب‌های روش دقیق و الگوریتم

۴-۳ سایز بزرگ

هزینه زمان بیکاری بر اساس توزیع یکنواخت در بازه [۵,۱۰] و هزینه کارگر کمکی بر اساس توزیع یکنواخت در بازه [۸,۱۲] تولیدشده است. سرعت نقاله نیز یک متر بر دقیقه می‌باشد. هم‌چنین میانگین پارامتر تصادفی زمان پردازش با توجه به منبع [۴] به‌صورت تصادفی با استفاده از توزیع یکنواخت در فاصله [۵, ۱۵] تولیدشده و λ نیز ۰/۵ در نظر گرفته‌شده است. داده‌های ورودی این مساله در جدول۷ آمده است.

www.SID.ir

جدول۷. مشخصات نمونه‌های مساله مورداستفاده در سایز بزرگ

مساله	I	MPS	تعداد راه‌حل ممکن	γ
۱	۲۰	(۴،۶،۳،۲،۲،۳)	$۹/۷۸*۱۰^{۱۲}$	۱۰
۲	۲۰	(۴،۴،۲،۳،۳،۴)	$۲/۴۴*۱۰^{۱۲}$	۱۰
۳	۲۰	(۵،۵،۴،۳،۲،۱)	$۵/۷۸*۱۰^{۱۲}$	۱۰
۴	۳۰	(۴،۴،۳،۵،۵،۳،۲،۴)	$۱۸/۵۱*۱۰^{۱۲}$	۱۰
۵	۳۰	(۵،۴،۴،۴،۳،۳،۲،۵)	$۱۸/۵۱*۱۰^{۱۲}$	۱۰
۶	۳۰	(۳،۵،۵،۲،۴،۳،۴،۴)	$۱۸/۵۱*۱۰^{۱۲}$	۱۰

جدول۸. نتایج حل مسایل در ابعاد بزرگ

مساله	RUN time (s)		Objective function		GAP
	GAMS	HIS	GAMS	HIS	
۱	*	۳	*	۸۷۹۲	------
۲	*	۳	*	۸۷۶۸	------
۳	*	۲/۵	*	۸۶۵۳	------
۴	*	۵	*	۱۳۰۶۶	------
۵	*	۵	*	۱۳۱۵۵	------
۶	*	۵	*	۱۳۲۹۴	------

* در این مسایل، روش حل دقیق گمز قادر به ارایه جواب نمی‌باشد.

جدول۸ شامل نتایج حل مسایل در ابعاد بزرگ می‌باشد که نرم‌افزار گمز قادر به حل این‌گونه مسایل نبوده و تنها نتایج حاصل از حل توسط الگوریتم IHS آمده است.

۵ نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مساله تعیین‌توالی خطوط مونتاژ مدل‌ترکیبی با تابع هدف کمینه‌سازی مجموع هزینه اضافه‌بار کاری و هزینه بیکاری اپراتور در شرایطی موردمطالعه قرار گرفت که پارامتر زمان پردازش به‌صورت غیرقطعی و تصادفی در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است با توجه به بررسی مرور ادبیات، مساله موردنظر، برای اولین بار موردمطالعه قرارگرفته است. در ادامه برای مدل‌سازی تصادفی از رویکرد محدودیت-شانس استفاده‌شد و هم‌چنین الگوریتم جست‌وجوی هارمونی بهبودیافته برای حل مدل ارایه گشت. با توجه به نتایج محاسباتی مشخص شد، جواب‌های به‌دست‌آمده از الگوریتم IHS در مقایسه با جواب دقیق حاصل از نرم‌افزار گمز از خطای محاسباتی کمی برخوردار بوده و جواب‌های قابل‌قبولی را ارایه می‌دهد و این نشان‌دهنده کارایی خوب الگوریتم می‌باشد. با توجه به جدول۶ و شکل۳ ، الگوریتم جست‌وجوی هارمونی بهبودیافته در ابعاد کوچک ازلحاظ زمان اجرا از عملکرد بسیار بهتری برخوردار است. در ابعاد بزرگ نیز، الگوریتم پیشنهادی جواب‌های قابل‌قبولی را در زمان معقولی ارایه داد.

Archive of SID
www.SID.ir

استفاده از سایر روش‌های برنامه‌ریزی تصادفی، درنظرگرفتن پارامترهای کلیدی به‌صورت فازی و هم‌چنین استفاده از سایر الگوریتم‌های فرا ابتکاری و مقایسه عملکرد الگوریتم جست‌وجوی هارمونی بهبودیافته با دیگر الگوریتم‌های مطرح، برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود.

منابع

[1] Manavizadeh, N Tavakoli, L., Rabbani, M., & Jolai, F. (2013). A multi-objective mixed-model assembly line sequencing problem in order to minimize total costs in a Make-To-Order environment, considering order priority. *Journal of Manufacturing Systems*, *32*(1), 124-137.

[2] Özcan, U., Kellegöz, T., & Toklu, B. (2011). A genetic algorithm for the stochastic mixed-model U-line balancing and sequencing problem. *International Journal of Production Research*, *49*(6), 1605-1626.

[3] Charnes, A., Cooper, W. W., & Symonds, G. H. (1958). Cost horizons and certainty equivalents: an approach to stochastic programming of heating oil.*Management Science*, *4*(3), 235-263.

[4] Elyasi, A., & Salmasi, N. (2013). Stochastic scheduling with minimizing the number of tardy jobs using chance constrained programming. *Mathematical and Computer Modelling*, *57*(5), 1154-1164.

[5] Miltenburg, J. (1989). Level schedules for mixed-model assembly lines in just-in-time production systems. *Management Science*, *35*(2), 192-207.

[6] Miltenburg, J., Steiner, G., & Yeomans, S. (1990). A dynamic programming algorithm for scheduling mixed-model, just-in-time production systems. *Mathematical and Computer Modelling*, *13*(3), 57-66.

[7] Bard, J. F., DAR-ELJ, E. Z. E. Y., & SHTUB, A. (1992). An analytic framework for sequencing mixed model assembly lines. *The International Journal of Production Research*, *30*(1), 35-48.

[8] Haixu, S., & Bhaba, R. (1998). Designing a mixed-model assembly line to minimize the costs of idle and utility times. *Computers & industrial engineering*, *34*(3), 609-628.

[9] Kim, Y. K., Hyun, C. J., & Kim, Y. (1996). Sequencing in mixed model assembly lines: a genetic algorithm approach. *Computers & Operations Research*, *23*(12), 1131-1145.

[10] Xiaobo, Z., & Ohno, K. (2000). Properties of a sequencing problem for a mixed model assembly line with conveyor stoppages. *European Journal of Operational Research*, *124*(3), 560-570.

[11] Boysen, N., Fliedner, M., & Scholl, A. (2009). The product rate variation problem and its relevance in real world mixed-model assembly lines. *European Journal of Operational Research*, *197*(2), 818-824.

[12] Fattahi, P., & Salehi, M. (2009). Sequencing the mixed-model assembly line to minimize the total utility and idle costs with variable launching interval. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *45*(9-10), 987-998.

[13] Hyun, C. J., Kim, Y., & Kim, Y. K. (1998). A genetic algorithm for multiple objective sequencing problems in mixed model assembly lines. *Computers & Operations Research*, *25*(7), 675-690.

[14] Ponnambalam, S. G., Aravindan, P., & Subba Rao, M. (2003). Genetic algorithms for sequencing problems in mixed model assembly lines. *Computers & Industrial Engineering*, *45*(4), 669-690.

[15] Bolat, A., Savsar, M., & Al-Fawzan, M. A. (1994). Algorithms for real-time scheduling of jobs on mixed model assembly lines. *Computers & operations research*, *21*(5), 487-498.

[16] Bard, J. F., Shtub, A., & Joshi, S. B. (1994). Sequencing mixed-model assembly lines to level parts usage and minimize line length. *The International Journal of Production Research*, *32*(10), 2431-2454.

[17] McMullen, P. R. (1998). JIT sequencing for mixed-model assembly lines with setups using tabu search. *Production Planning & Control*, *9*(5), 504-510.

[18] McMULLEN, P. R., & Frazier, G. V. (2000). A simulated annealing approach to mixed-model sequencing with multiple objectives on a just-in-time line. *Iie Transactions*, *32*(8), 679-686.

[19] Mansouri, S. A. (2005). A multi-objective genetic algorithm for mixed-model sequencing on JIT assembly lines. *European Journal of Operational Research*, *167*(3), 696-716.

[20] Tavakkoli-Moghaddam, R., & Rahimi-Vahed, A. R. (2006). A memetic algorithm for multi-criteria sequencing problem for a mixed-model assembly line in a JIT production system. In *Evolutionary Computation, 2006. CEC 2006. IEEE Congress on* (pp. 2993-2998). IEEE.

[21] Rabbani, M., Rahimi-Vahed, A., Javadi, B., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2007). A new approach for mixed-model assembly line sequencing. In*Operations Research Proceedings 2006* (pp. 169-174). Springer Berlin Heidelberg.

www.SID.ir

[22] Dong, J., Zhang, L., Xiao, T., & Mao, H. (2014). Balancing and sequencing of stochastic mixed-model assembly U-lines to minimise the expectation of work overload time. *International Journal of Production Research*, *52*(24), 7529-7548.
[23] Tavakkoli-Moghaddam, R., & Rahimi-Vahed, A. R. (2006). Multi-criteria sequencing problem for a mixed-model assembly line in a JIT production system. *Applied Mathematics and Computation*, *181*(2), 1471-1481.
[24] Geem, Z. W., Kim, J. H., & Loganathan, G. V. (2001). A new heuristic optimization algorithm: harmony search. *Simulation*, *76*(2), 60-68.
[25] Mahdavi, M., Fesanghary, M., & Damangir, E. (2007). An improved harmony search algorithm for solving optimization problems. *Applied mathematics and computation*, *188*(2), 1567-1579.
[26] Sarin, S. C., Erel, E., & Steiner, G. (1991). Sequencing jobs on a single machine with a common due date and stochastic processing times.*European Journal of Operational Research*, *51*(2), 188-198.
[27] Cai, X., & Zhou, S. (1997). Scheduling stochastic jobs with asymmetric earliness and tardiness penalties. *Naval Research Logistics (NRL)*, *44*(6), 531-557.

Archive of SID

www.SID.ir