مهندسی صنایع و مدیریت شریف، (تابستان ۱۳۹۶)
دوره‌ی ۱-۳۳، شماره‌ی ۱/۱، ص. ۱۰۳-۱۱۱

Original Article

مدل‌سازی ریاضی و حل مسئله‌ی تعیین توالی عملیات خودرو با در نظرگرفتن اختلالات تأمین پیش‌بینی نشده

حسین رضائی بدر (دانشجوی دکتری)
گروه مهندسی صنایع، دانشگاه پیام نور
فریبرز جولای* (استاد)
دانشکده مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران
پرویز فتاحی (دانشیار)
گروه مهندسی صنایع، دانشگاه الزهرا تهران
غلامرضا اسماعیلیان (استادیار)
گروه مهندسی صنایع، دانشگاه پیام نور

در این مقاله مسئله‌ی تعیین توالی خودروها در خط مونتاژ نهایی با در نظرگرفتن رخداد پیش‌بینی نشده‌ی اختلال تأمین قطعات بررسی شده است. بدین‌منظور یک مدل پایه‌یی برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح توسعه یافته و برمبنای آن، الگوریتم حل مسئله مطابق با رویکرد واکنشی و مبتنی بر تجدید توالی عملیات، توسعه یافته است. برای ارزیابی روش پیشنهادی، از نمونه مسائل کتابخانه‌یی استفاده شده و برای شبیه‌سازی رخداد اختلال، در هریک از این نمونه مسائل به‌صورت تصادفی یکی از قطعات خاص با اختلال روبه‌رو شده است. سپس الگوریتم حل ارائه شده با روش معمول مبتنی بر ادامه‌ی توالی اولیه مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج به دست آمده بیانگر آن است که روش پیشنهادی به‌عنوان روش مبتنی بر برنامه‌ریزی ریاضی جواب بهینه‌ی مسئله را ارائه داده و به‌نحو مؤثری نسبت به روش ادامه توالی اولیه ارجحیت دارد.

واژگان کلیدی: مسئله‌ی تعیین توالی عملیات خودرو، اختلال تأمین، ثبات، رویکرد واکنشی.

ho_rezaee_b@yahoo.com
fjolai@ut.ac.ir
pfattahi@gmail.com
greiep@yahoo.com

۱. مقدمه

افزایش رقابت در بازارهای جهانی خودرو، محیط این صنعت را از منظر تعداد و میزان پیچیدگی چالش‌های پیش رو با تغییرات شگرفی روبه‌رو کرده است. شرکت‌های حاضر در این بازار برای حفظ موقعیت خود، نه‌تنها لازم است عملکرد خودروهای تولیدی خویش را بهبود داده و مشخصه‌های لازم را به آنها اضافه کنند، بلکه لازم است تا از طریق بهینه‌سازی فرایندهای تولیدی، هزینه‌های عملیاتی خود را کاهش دهند. از سوی دیگر استراتژی غالب در خودروسازان مطرح از «سیستم تولید برای انبار» به «سیستم تولید مطابق سفارش» تغییر کرده است. با پیگیری این رویکرد، از آنجاکه سفارش مشتریان تعیین‌کننده خواهد بود، طیف وسیعی از خودروهای مختلف در هر روز تولید می‌شود و بدین‌ترتیب توالی خودروهای تولیدی به‌صورت روزانه تغییر خواهد کرد. اگر خودروها در انواع مختلف‌شان به‌صورت مناسبی زمان‌بندی نشوند، ایستگاه‌های واقع در خط مونتاژ با اضافه ظرفیت روبه‌رو می‌شوند که به‌معنی کار اضافی برای کارگران است. این مطلب نیز منجر به خستگی کارگران، وقوع اشتباه در عملیات مونتاژ و نهایتاً تحمیل هزینه‌های فراوان به خودروساز می‌شود. بدین‌ترتیب هدف آن است که خودروها چنان زمان‌بندی شوند که هزینه‌ها کاهش یافته و تا حد ممکن قیود ظرفیتی ناشی از محدودیت‌های منابع رعایت شود. در چنین فضایی مسئله‌ی تعیین توالی خودروها به شکل صنعتی آن تعریف می‌شود.

درکارخانجات خودروسازی، به‌طور معمول برنامه و توالی تولید چند روز پیش از اجرای آن تعیین و به تمامی واحدهای تولیدی، از جمله تأمین‌کنندگان قطعات، اعلام می‌شود. اما در عمل، آنچه که برنامه‌ریزی شده با اختلال روبه‌رو شده و اجرای کامل آن ممکن نمی‌شود. گونه‌یی از موارد اختلال، در دسترس نبودن قطعات مورد نیاز برای تولید یک خودرو خاص در خط مونتاژ نهایی است. در چنین حالتی خودرو برنامه‌ریزی شده از لیست برنامه خارج شده و خودرو بعدی جایگزین می‌شود. این موضوع باعث نوعی آشفتگی در خط تولید و زنجیره‌ی تأمین محصول می‌شود. تغییر توالی اولیه و ایجاد توالی جدید، تحت عنوان «مسئله‌ی تعیین مجدد توالی عملیات[1]» شناخته می‌شود. در این مطالعه مسئله‌ی تعیین مجدد توالی عملیات خودروها در

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۳/۱۲/۲۴، اصلاحیه ۱۳۹۴/۴/۲، پذیرش ۱۳۹۴/۵/۷.

خط مونتاژ نهایی با هدف کمینه‌کردن نقض محدودیت‌های ظرفیتی و نیز کمینه‌کردن تغییرات توالی اولیه‌ی تولید مورد بررسی قرار می‌گیرد. مسئله‌ی تجدید توالی عملیات خودرو طی سالیان اخیر در سطح جهانی مورد توجه قرارگرفته است.[۱-۵] از دیگر سو این مسئله با توجه به شرایط روز صنعت داخلی همچون مشکلات مرتبط با تحریم و رکود اقتصادی اهمیت مضاعفی می‌یابد. وجه مشخصه‌ی این پژوهش نسبت به پژوهش‌های قبلی، در نظرگرفتن شرایط پویا برای رخداد اختلال است. بدین‌جهت شرایطی در نظرگرفته شده که به‌محض رخداد اختلال، با در پیش گرفتن رویکرد واکنشی[۲] به‌صورت برخط (آنلاین)، تصمیم‌گیری شود. در رویکرد واکنشی، هنگام تعیین توالی اولیه، عامل عدم قطعیت مورد نظر قرار نمی‌گیرد. در این حالت، وقوع یک رخداد تصادفی و پیش‌بینی نشده باعث تغییر برنامه‌ی اولیه شده و در پیش گرفتن اقدام واکنشی ضرورت می‌یابد. بنابراین، رویکرد واکنشی به دنبال آن است که بتواند در قبال اختلالات رخ‌داده بهترین واکنش ممکن را نشان دهد. این واکنش می‌تواند به شکل تغییر و بهبود توالی اولیه یا ایجاد یک توالی کاملاً جدید باشد. در این مقاله برای اولین بار در یک رویکرد واکنشی علاوه بر تابع هدف کلاسیک تعیین توالی عملیات خودرو، حفظ ثبات توالی اولیه نیز در مدل ریاضی حل مسئله وارد شده است.

در ادامه‌ی این مقاله، ابتدا ادبیات موضوع مرور خواهد شد. سپس مسئله‌ی مورد بررسی به‌صورت دقیق تشریح شده و یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح[۳] برای آن ارائه می‌شود. پس از آن یک الگوریتم حل برای مسئله ارائه می‌شود. در بخش بعدی نتایج حاصل از به‌کارگیری الگوریتم پیشنهادی برای حل مسائل واقعی ارائه و مورد ارزیابی قرارگرفته است. نهایتاً جمع‌بندی و پیشنهاد تحقیقات آتی ارائه خواهد شد.

۲. مرور ادبیات

مسئله‌ی توالی عملیات خودرو برای اولین بار توسط پارلو و همکاران در سال ۱۹۸۶ مطرح شد.[۶] پس از مقاله‌ی مذکور، تاکنون تحقیقات متعددی با محوریت موضوع «تعیین توالی عملیات خودرو در خطوط مونتاژ» انتشار یافته است. با توجه به تنوع مقالات انتشار یافته، به‌منظور ایجاد ساختار مطالعاتی مورد نیاز، مقالات نمونه در سه حوزه مورد بررسی قرار می‌گیرد:[۷و۸]

۱.۲. انواع مسائل تعیین توالی اولیه عملیات خودرو

به‌صورت کلاسیک برای فرمول‌بندی این مسئله سه رویکرد متفاوت در منابع موجود است:

۱. فاصله‌گذاری خودروهایی که به قطعات خاص نیاز دارند در خط مونتاژ: دینگ و همکاران[۹] مسئله‌ی تعیین توالی عملیات خودروها در خط مونتاژ کارخانه خودروسازی را با مسئله‌ی تعیین توالی عملیات ترکیبی[۴] تلفیق کرده و برای این مسئله یک رویه‌ی ابتکاری ارائه کرده‌اند. ایشان در رابطه با قطعات خاصی که در خط مونتاژ نهایی روی خودروها نصب می‌شود، پنج گونه هدف قائل شده‌اند: ۱. الگوی تکراری؛ ۲. اندازه دسته رنگ؛ ۳. قوانین فاصله‌گذاری (مشابه تعریف کلاسیک مسئله‌ی تعیین توالی عملیات خودرو)؛ ۴. تعیین توالی عملیات به‌گونه‌یی که خودروهای دارای یک قطعه‌ی خاص به‌صورت یکنواخت پخش شده باشند؛ ۵. تعیین نرخ مشخص به‌ازای هر قطعه‌ی خاص به‌گونه‌یی که تعداد خودروهای دارنده‌ی این قطعه‌ی خاص در هر ساعت، از این مقدار تجاوز نکند. در رویه‌ی ارائه شده، ابتدا از طریق یک روال‌سازنده‌ی بهبوددهنده، توالی اولیه ساخته می‌شود. سپس از میان تمامی اهداف پنج‌گانه، هدفی که در بدترین وضعیت قرار دارد مد نظر قرارگرفته و سعی می‌شود از طریق جابه‌جایی خودروها، توالی جدیدی ایجاد شود که نسبت به توالی اولیه، هدف مورد نظر بهبود یابد. این رویه تا هنگامی که فرصت بهبود وجود داشته باشد تکرار می‌شود. نهایتاً نیز سعی می‌شود تا با انجام یک جست‌وجوی محدود در همسایگی توالی ایجاد شده در گام قبلی، جواب بهتری ایجاد شود.

جولی و همکاران[۱۰] نسخه‌ی صنعتی مسئله‌ی تعیین توالی عملیات خودرو را مورد بررسی قرار داده‌اند. آنان در مقاله‌ی خود اهداف سالن مونتاژ و رنگ را در نظرگرفته و طی دو رویکرد تک‌هدفه و چندهدفه به حل این مسئله پرداخته‌اند. بدین‌منظور یک روش حل ابتکاری شامل یک الگوریتم پیش‌رونده‌ی سازنده و سه روش فرا‌ابتکاری شامل تاب‌کاری شبیه‌سازی شده، جست‌وجوی همسایگی متغیر و الگوریتم تکاملی ارائه و مورد مقایسه قرارگرفته است.

۲. زمان‌بندی یکنواخت: یاووز[۱۱] به حل مسئله‌ی ترکیبی تعیین توالی عملیات خودرو و زمان‌بندی یکنواخت[۵] پرداخته است. او در این مقاله کوشیده تا برنامه‌ی تولید بهینه‌یی بیابد که مدل‌های مختلف را به‌صورت یکسان در طول افق برنامه‌ریزی پخش کرده و در عین حال محدودیت‌های مرتبط با قطعات خاص را نیز رعایت کند. در این تحقیق یک الگوریتم جست‌وجوی شعاعی تکرارشونده[۶] ارائه شده که می‌توان به‌عنوان یک روش ابتکاری و نیز به‌عنوان یک روش حل دقیق از آن استفاده کرد.

۳. تعیین توالی عملیات خطوط مونتاژ ترکیبی با هدف کمینه‌سازی نیروهای پشتیبان: بویسن و همکاران[۱۲] مسئله‌ی تعیین توالی عملیات خطوط مونتاژ ترکیبی را با هدف کمینه‌سازی نیروهای پشتیبان مورد نظر قرار داده‌اند. آنها برای حل این مسئله روش‌های دقیق و ابتکاری مختلفی را مورد مقایسه قرار داده‌اند.

۲.۲. روش‌های حل مسئله‌ی تعیین توالی عملیات خودرو

بخش قابل توجهی از ادبیات موضوع مسئله‌ی تعیین توالی عملیات خودرو به انواع روش‌های حل این مسئله اختصاص یافته است. مسئله‌ی تعیین توالی عملیات خودرو به‌طور قوی NP-hard است،[۱۳و۱۴] و لذا برای حل آن روش‌های حل مختلفی شامل روش‌های دقیق، ابتکاری و ترکیبی ارائه شده است. یکی از روش‌های حل دقیق این مسئله، روش برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح است[۱۵] که از آن برای حل مسئله‌ی تعیین توالی عملیات خودرو استفاده شده است. فلایندر و بویسن[۱۶] ضمن تعیین حدود پایین و قواعد تعیین توالی غالب برای مسئله‌ی تعیین توالی عملیات خودرو، یک الگوریتم شاخه و کران پراکنده[۷] برای آن ارائه کردند. همچنین روش‌های ابتکاری و فرا‌ابتکاری متعددی نیز برای حل مسئله‌ی تعیین توالی عملیات خودرو توسعه یافته که از آن میان می‌توان به روش‌های ابتکاری‌سازنده، روش‌های جست‌وجوی محلی، الگوریتم‌های تکاملی و کولونی مورچگان اشاره کرد.[۱۷-۱۹]

۳.۲. تجدید توالی عملیات خودرو با در نظرگرفتن بافرهای میانی

از آنجا که اختلالات پیش‌بینی نشده، معمولاً باعث غیرموجه شدن توالی تولید اولیه شده یا آن را از بهینگی خارج می‌کند، لذا یک سیستم برنامه‌ریزی و کنترل تولید مؤثر باید تمهیداتی فراهم آورد که بتوان به‌واسطه‌ی آن یک توالی از پیش تعیین شده را، حتی در حین اجرا، تغییر داد. این مسئله تحت عنوان «تعیین مجدد توالی

عملیات در ادبیات موضوع» مطرح است. در این زمینه عمدتاً دو گونه اختلال می‌توان طرح کرد: اختلالات با ماهیت احتمالات، که رویکردهای معمولی بر آنها مؤثر واقع نمی‌شود و تغییرات ناگهانیِ لازم از طریق سیاست‌های انعطاف‌پذیر به این گونه تغییرات عکس‌العمل نشان می‌دهد. تعیین مجدد توالی عملیات عبارت است از بازآرایی یک توالی داده شده از اشیاء با هدف تحقق محدودیت‌های موجود با در نظرگرفتن امکان‌پذیری تغییرات مرتبط، به‌نحوی که برخی از توابع هدف بهینه شوند.[۲] بویسن و همکاران در مقاله‌ی مروری خود، مقالات انتشار یافته در زمینه‌ی مسئله‌ی تعیین مجدد توالی عملیات خطوط مونتاژ ترکیبی در مواجهه با انواع اختلالات مقطعی را مورد بررسی قرار داده‌اند. آنها چهار نوع انباره‌ی میانی[۸] متفاوت برای مدیریت اختلالات و تعیین مجدد توالی عملیات معرفی کرده و سپس مطالعات صورت گرفته در این زمینه را برحسب این مشخصه، طبقه‌بندی و تشریح کرده‌اند.

دینگ و سان،[۲۰] دو گونه‌ی مختلف تجدید توالی عملیات را با در نظرگرفتن بافرهایی از نوع بانک‌های ترکیبی مورد بررسی قرار داده‌اند. در یک حالت تجدید توالی اولیه پس از سالن رنگ مورد نظر قرار گرفته و در حالت دیگر تعیین اندازه دسته رنگ قبل از سالن رنگ مورد نظر قرار گرفته است. در هر دو این حالات، سیاست‌های ساده پر و رهاسازی برای یک محیط تجدید توالی پویا ارائه شده است. افزون بر این، برای مسئله‌ی تعیین اندازه دسته رنگ در حالت استاتیک، یک مدل عدد صحیح ـ مخلوط ارائه شده است.

بویسن و همکاران[۳] با در نظرگرفتن انباره‌های میانی خاصی تحت عنوان میزهای متحرک، مسئله‌ی کلاسیک تعیین توالی عملیات خودرو را مورد بررسی قرار دادند. ایشان برای حل این مسئله از مدل عدد صحیح و روش گراف استفاده کردند. سپس ساختار گراف فوق در الگوریتم‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین ایشان نشان داده‌اند که در شرایط دنیای واقعی وقتی بازیابی توالی اولیه مورد نیاز است و در عین حال محدودیت‌های توالی عملیات خودرو باید به‌عنوان قیود سخت مورد نظر قرار گیرد، الگوریتم حل‌شان عملکرد مطلوبی دارد. ایشان نشان داده‌اند که این الگوریتم به‌صورت کاملاً واضحی بر روش‌های سنتی متداول در شرکت‌های خودروساز آلمانی ارجحیت دارد.

طبق بررسی انجام شده در ادبیات موضوع تجدید توالی عملیات خودرو، تاکنون دو موضوع ثبات توالی اولیه و نیز اختلالات تأمین مورد بررسی قرار نگرفته، و در این مقاله برای اولین بار مدل‌سازی شده و برای آن الگوریتم حل ارائه می‌شود.

۳. تشریح مسئله و مدل‌سازی آن

۱.۳. کلیات مسئله

یک کارخانه‌ی خودروسازی شامل سه خط تولید بدنه، رنگ و مونتاژ نهایی است. خط تولید بدنه جایی است که روبات‌ها و اپراتورها پنل‌های فلزی را به یکدیگر جوش می‌دهند تا در نهایت سازه‌ی اصلی یک خودرو (بدنه) شکل بگیرد. سالن رنگ مکانی است که بدنه‌های سفید رنگ در آن به‌وسیله‌ی ربات‌های پاشش، رنگ‌آمیزی می‌شود. سرانجام در خط مونتاژ نهایی، خودرو از ایستگاه‌های کاری مختلف گذر کرده و بر آن فرایندهای مختلف انجام شده و قطعات مورد نیاز روی آن نصب می‌شود. مجموعه سالن‌های تولیدی سه‌گانه‌ی فوق به‌صورت کلاسیک، به‌عنوان محدوده مسئله‌ی تعیین توالی عملیات خودرو، بیان می‌شود.

فرایند برنامه‌ریزی در شرکت‌های خودروساز بدین‌صورت است که ابتدا روزهای کاری هفته، به مجموعه خودروهای سفارش شده مطابق موعد تحویل آنها و محدودیت‌های خط تولید اختصاص می‌یابد. مجموعه خودروهایی که در این مرحله تعریف می‌شوند به هیچ عنوان قابل تغییر نیستند. سپس باید ترتیب ورود این خودروها به خط تولید مشخص شود، به‌طوری که محدودیت‌های سالن‌های تولیدی به بهترین نحو برآورده شود. توالی تعیین شده به تمامی اعضای زنجیره‌ی تأمین اعلام می‌شود تا براساس آن قطعات مورد نیاز در زمان مقرر و به‌صورت سینکرون در خط مونتاژ تحویل شود. در این مقاله تعیین توالی عملیات تولید خودرو با توجه به محدودیت‌های سالن مونتاژ نهایی و نیز حفظ ثبات جریان مواد، مورد نظر قرار گرفته است.

۱.۱.۳. محدودیت‌های خط مونتاژ نهایی

خودروسازان جهانی این حق انتخاب را به مشتریان خود می‌دهند که بتوانند مجموعه‌یی از مشخصات خودروی خود را برحسب ارجحیت‌های شخصی‌شان تعیین کنند. بدین‌ترتیب مجموعه‌یی از انتخاب‌ها برای مشتری وجود دارد که برحسب آن خودروی مشتری شکل می‌گیرد. به‌عنوان مثال مشتری می‌تواند انتخاب کند که کدام‌یک از انواع موتور باید روی خودرو او قرار گیرد. با در نظرگرفتن چنین شرایطی لازم است به‌گونه‌یی توالی خودروها در خط مونتاژ نهایی تعیین شود که بارکاری ایستگاه‌های مختلف کاری، متعادل باشد. یعنی توالی خودروها به‌گونه‌یی نباشد که به‌دلیل پشت سر هم قرارگرفتن دو خودرویی که به عملیات یکسانی نیاز دارند، ایستگاه کاری مربوطه با اضافه بار[۹] روبه‌رو شود و نهایتاً باعث توقف خط مونتاژ شود.

تحقق هدف فوق مستلزم آن است که بارکاری در طول خط مونتاژ از طریق بالانس کردن عناصر کاری مربوط به ایستگاه‌های مختلف، هموار شود. به‌عبارت دیگر، خودروهایی که به عملیات ویژه‌یی نیاز دارند، باید به‌طور یکنواخت در طول خط مونتاژ توزیع شوند تا بدین‌طریق از ایجاد اضافه بار در این ایستگاه‌ها جلوگیری شود. فاصله‌گذاری مابین خودروهای مذکور از طریق محدودیت نسبتی N_{cp}/Q_{cp} مدل‌سازی می‌شود. هر قطعه یا مجموعه‌ی خاصی که نیازمند عملیات ویژه‌یی باشد یک محدودیت نسبتی مختص به خود دارد، بدین‌صورت که با در نظرگرفتن قطعه‌یی خاص همچون cp، در هر Q_{cp} خودروی واقع در توالی خودروهای پشت سرهم، حداکثر N_{cp} تا از این خودروها می‌توانند دارای این قطعه‌ی خاص باشند.

در شکل ۱، طی مثالی چگونگی محاسبه‌ی تعداد نقض محدودیت‌های نسبتی نشان داده شده است. در این مثال قطعه‌ی خاصی مورد نظر است که محدودیت نسبتی متناظر با آن به‌صورت ۱/۳ است. یعنی در هر سه خودرو متوالی، تنها یکی از آنها باید دارای قطعه‌ی خاص مورد نظر باشد. در این شکل خودروهای ستاره‌دار نشان‌دهنده‌ی خودروهای دارای قطعه‌ی خاص مورد نظر بوده و بدین‌ترتیب تعداد کل نقض محدودیت‌های نسبی متناظر با این قطعه برابر با ۴ مورد است.

توالی عملیات ایجاد شده فقط در صورتی کاملاً در سالن مونتاژ نهایی عملیاتی می‌شود که کلیه‌ی فرایندهای تولیدی و لجستیکی به‌صورت کامل و سر وقت اجرا شود. این در حالی است که انواع اختلالات حادث شده و اجرای کامل توالی اولیه را با مانع مواجه می‌سازند. به‌عنوان مثال، مشکلات لجستیکی یا تولیدی در مراحل اولیه‌ی تولید، می‌تواند باعث تأخیر در رسیدن بدنه‌های مورد نیاز با مشخصات

نقض محدودیت	۱	۰	۱	۱	۱	۰

شکل ۱. شمارش تعداد نقض محدودیت‌های نسبی.

مربوطه به سالن مونتاژ نهایی شده و بدین‌ترتیب تولید خودرو منطبق با توالی اولیه با تأخیر روبه‌رو می‌شود. طبقه‌ی مهمی از انواع اختلالات به زنجیره‌ی تأمین مرتبط هستند. اختلال در زنجیره‌ی تأمین این گونه تعریف می‌شود: «رخدادی که جریان مواد در زنجیره‌ی تأمین را قطع کرده و منجر به توقف ناگهانی جریان محصولات می‌شود.»[۲۱] به‌عنوان مثال اگر قطعه‌ی خاصی که در خط مونتاژ نهایی مورد نیاز است در ایستگاه مربوطه با کسری مواجه شود، در این صورت یا باید خودرویی که به آن قطعه نیاز دارد را از توالی تولید خارج، و خودروی دیگری جایگزین آن کرد، یا این که ضمن حفظ خودرو مذکور، قطعه‌ی جایگزین را برای قطعه‌ی مختل شده تعریف کرد. مسئله‌یی که در این مقاله به آن می‌پردازیم تعیین توالی خودروهای باقی‌مانده پس از رخداد اختلال است. در این مسئله دو هدف مورد نظر است: کمینه‌کردن نقض محدودیت‌های نسبی و کمینه‌کردن تغییرات توالی اولیه. به‌واسطه‌ی تحقق هدف اول محدودیت‌های عملیاتی مرتبط با سالن مونتاژ محقق می‌شود و با تحقق هدف دوم، ثبات[۱۰] جریان مواد به‌عنوان یک شاخص کلیدی در نیل به تولید بدون آشفتگی[۱۱] در طول زنجیره‌ی تأمین خودروساز محقق می‌شود.

۲.۳. مدل‌سازی مسئله

در ادامه مدل ریاضی مسئله ارائه می‌شود. این مدل بر پایه‌ی مطالعه‌ی پرانداستتر و همکاران[۲۲] توسعه یافته است. لازم به توضیح است در این مقاله برای اولین‌بار علاوه بر تابع هدف کلاسیک مسئله‌ی تعیین توالی عملیات خودرو، تابع هدف ثبات نیز در مدل ریاضی مسئله در نظرگرفته شده و در همین راستا یک محدودیت نیز به مجموعه محدودیت‌های مسئله اضافه شده است.

۱.۲.۳. پارامترهای مسئله

$NConf$: تعداد پیکربندی‌های موجود؛

$NPos$: تعداد کل خودروهایی که توالی آنها باید مشخص شود؛

N_{cp}/Q_{cp}: محدودیت نسبی برای قطعه‌ی cp. یعنی در یک توالی شامل Q_{cp} خودرو، تنها N_{cp} خودرو از آنها می‌تواند دارای قطعه‌ی cp باشد؛

δ_k: تقاضا برای خودرو با پیکربندی k؛

$AP_{cp,k}$: یک ماتریس صفر و ۱ که نشان می‌دهد آیا در پیکربندی k، قطعه‌ی cp به کار رفته است یا خیر؛

$EP_{cp,m}$: یک ماتریس صفر و ۱ که نشان می‌دهد آیا mاُمین خودرو موجود از دوره‌ی برنامه‌ریزی قبل دارای قطعه‌ی cp بوده است یا خیر؛

dcp: تعداد دفعاتی که قطعه‌ی cp مورد نیاز است.

۲.۲.۳. متغیرهای تصمیم‌گیری

$p_{k,i}$: متغیر صفر و ۱ که نشان می‌دهد آیا خودروی موجود در موقعیت i دارای پیکربندی k است یا خیر؛

$r_{cp,i}$: متغیری که میزان استفاده از قطعه‌ی cp تا موقعیت i را نشان می‌دهد؛

$g_{cp,i}$: متغیری که تعداد نقض محدودیت‌های نسبتی توسط قطعه‌ی cp در طول پنجره‌یی که در موقعیت i پایان می‌یابد را نشان می‌دهد؛

$C1_i$: زمان تکمیل خودرو iام مطابق با توالی اولیه؛

$C2_i$: زمان تکمیل خودرو iام مطابق با توالی ثانویه پس از رخداد اختلال؛

Z_1: تابع هدف اول، نقض محدودیت‌های نسبتی؛

Z_2: تابع هدف دوم، جابه‌جایی خودروها در توالی پس از اختلال نسبت به توالی اولیه.

$$\text{Minimize}(Z1) = \sum_{cp=1}^{Ncp} \sum_{i=1}^{NPos} g_{cp,i} \quad (1)$$

$$\text{Minimize}(Z2) = \sum_{i=1}^{NPos} |C2_i - C1_i| \quad (2)$$

Subject to :

$$\sum_{i=1}^{NPos} p_{k,i} = \delta_k \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^{NConf} p_{k,i} = 1 \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^{NPos} \sum_{k=1}^{NConf} AP_{cp,k} \cdot p_{k,i} = d_{cp} \quad (5)$$

$$r_{cp,i} \geq 0 \quad (6)$$

$$r_{cp,1} = \sum_{k=1}^{NConf} AP_{cp,k}.p_{k,1} \quad (7)$$

$$r_{cp,i} = r_{cp,(i-1)} + \sum_{k=1}^{NConf} AP_{cp,k}.p_{k,i} \quad (8)$$

$$g_{cp,i} \geq 0 \quad (9)$$

$$g_{cp,i} \geq r_{cp,i} + \sum_{m=1}^{Q_{cp}-1} EP_{cp,m} - N_{cp} \quad (10)$$

$$g_{cp,i} \geq r_{cp,i} - r_{cp,(i-Q_{cp})} - N_{cp} \quad (11)$$

$$C2_i = i.p_{k,i} \quad (12)$$

$$\text{Minimize}(\alpha.\frac{z_1 - z_1^*}{z_1^- - z_1^*} + (1-\alpha).\frac{z_2 - z_2^*}{z_2^- - z_2^*}) \quad (13)$$

تابع هدف ۱، تعداد نقض محدودیت‌های نسبتی را اندازه‌گیری می‌کند. تابع هدف ۲، میزان تغییرات یا جابه‌جایی ترتیب خودروها در توالی پس از رخداد اختلال را نسبت به توالی اولیه اندازه‌گیری می‌کند. تابع جابه‌جایی بنا به تعریف عبارت است از: فاصله‌ی بین موقعیت یک خودرو در توالی واقعی با موقعیت همان خودرو در توالی اولیه.[۲۳]

برای تبدیل تابع هدف دوم که به‌صورت قدر مطلق بوده و غیرخطی محسوب می‌شود به یک تابع خطی و تسهیل حل آن توسط نرم‌افزار، تابع هدف فوق را با حاصل جمع دو متغیر مجازی همیشه مثبت تحت عنوان انحراف مثبت و انحراف منفی جایگزین می‌نماییم. بدین‌ترتیب تابع هدف جدید مجموع دو متغیر فوق خواهد بود. برای تعریف این دو متغیر، در محیط نرم‌افزار GAMS دو محدودیت به مجموعه محدودیت‌های مسئله اضافه می‌شود.

محدودیت ۳ تضمین می‌کند که تعداد خودروهای دارای پیکربندی k که در توالی قرارگرفته‌اند درست برابر با مقدار δ_k باشد. محدودیت ۴ تضمین می‌کند که هر موقعیت تنها و تنها به یک پیکربندی اختصاص پیدا کند. محدودیت ۵ نیز برابری تعداد دفعات استفاده از هر قطعه با میزان مورد نیاز از آن قطعه را الزامی می‌سازد.

برای شمارش تعداد دفعات نقض محدودیت‌های نسبتی، لازم است ابتدا تعداد دفعاتی را که قطعه‌ی cp تا موقعیت i مورد استفاده قرارگرفته بشماریم. این کار

توسط معادلات ۷ و ۸ انجام می‌شود. نامساوی ۶ غیر منفی بودن متغیر $r_{cp,i}$ را الزامی می‌سازد.

میزان نقض محدودیت‌های نسبی صورت گرفته برای قطعه‌ی cp در طی پنجره زمانی منتهی به موقعیت iام به‌واسطه‌ی نامساوی‌های ۱۰ و ۱۱ تعیین می‌شود. نامساوی ۱۰ برای آن دسته از پنجره‌های زمانی به کار می‌رود که در آنها خودروهای باقی‌مانده از روز قبل به حساب می‌آیند و نامساوی ۱۱ برای سایر پنجره‌های زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. محدودیت ۹ نامنفی بودن این متغیر را تضمین می‌کند. محدودیت ۱۲ نیز زمان تکمیل واقعی عملیات مونتاژ در توالی ثانویه پس از رخداد اختلال را محاسبه می‌کند.

برای حل این مسئله‌ی چندهدفه، با استفاده از ضرایب α و $1-\alpha$ به‌ترتیب برای Z_1 و Z_2 یک مسئله‌ی تک‌هدفه به دست می‌آوریم (تابع هدف تلفیقی ۱۳). این ضرایب به‌ترتیب نمایانگر وزن تابع هدف اول و دوم در مسئله‌ی تک‌هدفه‌ی حاصل‌اند. برای جمع‌پذیر شدن، این دو تابع هدف با استفاده از رابطه‌ی $\frac{z-z^*}{z^- - z^*}$ به مقیاس[12] درآورده می‌شوند. در این رابطه z^* و z^- به‌ترتیب بهترین و بدترین مقادیر به‌دست آمده برای تابع هدف مورد نظرند.

مدل تشریح شده در فوق، در نرم‌افزار GAMS ۲۳ کدنویسی شده و در الگوریتم پیشنهادی تحت عنوان برنامه «بهینه‌ساز[13]» فراخوان می‌شود.

۴. الگوریتم حل مسئله

در ابتدا فرض می‌شود که هیچ‌گونه اختلالی وجود نداشته و کلیه قطعات مورد نیاز برای تولید خودروها مطابق برنامه‌ی تولید روزانه در دسترس است. در این صورت با فراخوان برنامه optimizer، توالی اولیه تعیین شده و مطابق آن توالی، بدنه‌ها وارد سالن مونتاژ می‌شوند. برای تعیین توالی اولیه، مسئله‌ی بهینه‌سازی تابع هدف اول (میزان نقض محدودیت‌های نسبی: z_1) در قالب برنامه‌ی optimizer که تحت نرم‌افزار GAMS توسعه یافته، حل می‌شود. لازم به توضیح است مسئله‌ی فوق مشتمل بر تابع هدف ۱ و محدودیت‌های ۳ الی ۱۱ است. خروجی این برنامه نیز عبارت است از تقدم و تأخر مجموعه‌ی خودروهایی که در افق برنامه‌ریزی باید تعیین توالی شوند؛ با این فرض که هیچ‌گونه کسری قطعه‌یی در فرایند مونتاژ آنها وجود نداشته باشد. سپس به‌صورت ناگهانی و پیش‌بینی نشده اختلال در تأمین به‌صورت کسری برخی از قطعات مورد نیاز برای انجام عملیات مونتاژ رخ می‌دهد. از آنجا که هیچ‌گونه اطلاعی از قبل در مورد رخداد اختلال وجود ندارد، بنابراین لازم است در مواجهه با اختلال، توالی خودروهای ورودی به خط تولید به‌صورت برخط به‌روزرسانی شود. در واقع رخداد کسری قطعه به‌عنوان یک رخداد تصادفی در نظر گرفته شده و پس از وقوع آن، با اتخاذ رویکرد واکنشی، توالی خودروهای باقی‌مانده مشخص می‌شود. بدین‌منظور گزینه‌های متفاوتی متصور است. به‌عنوان مثال حذف خودروی کسری‌دار از برنامه‌ی تولید و به‌تبع کاهش میزان تولید و عدم استفاده از ظرفیت‌های موجود تولیدی به‌دلیل کسری قطعات، یکی از این‌گونه اقدامات است که به دلیل نقاط ضعف آن مورد نظر قرار نمی‌گیرد. گزینه‌یی که در این مقاله به آن پرداخته شده، استفاده از قطعه‌ی جایگزین است. بدیهی است این گزینه نسبت به گزینه‌ی قبلی از منظر تداوم بهره‌برداری از ظرفیت‌های تولیدی دارای مزیت است. البته تحقق این راهکار مستلزم اجرای فعالیت‌های مهندسی با در نظرگرفتن تقاضای مشتری و امکانات تأمین‌کنندگان است. هریک از این گزینه‌ها دارای اثرات مشخصی بر توالی عملیات خودروهای تولیدی است که لازم است با در نظرگرفتن وزن عوامل مختلف تصمیم‌گیری نسبت به انتخاب گزینه‌ی بهینه اقدام شود.

در این مقاله با اتخاذ رویکرد جایگزینی قطعات مختل شده، به‌عنوان اقدام واکنشی در تعیین توالی خودروهای باقی‌مانده، دو روش ذیل مورد نظر قرار گرفته است:

۱. ادامه‌ی توالی اولیه: گزینه‌ی متداولی است که در بسیاری از کارخانجات تولیدی در مواجهه با انواع اختلالات در پیش گرفته می‌شود. در مسئله‌ی مورد بررسی نیز این گزینه قابل اجراست؛ بدین‌صورت که ابتدا توالی اولیه با لحاظ کردن بهینگی تابع هدف اول تعیین می‌شود. پس از رخداد اختلال، ضمن تعیین قطعه‌ی جایگزین برای قطعه‌ی دچار اختلال، خودروهای باقی‌مانده مطابق توالی اولیه وارد خط مونتاژ می‌شوند. با در پیش گرفتن این گزینه، میزان تغییر توالی اولیه برابر صفر است. اما میزان نقض محدودیت‌های نسبی ممکن است دیگر بهینه نباشد.

۲. تجدید توالی عملیات: از آنجا که در گزینه‌ی قبلی، پس از رخداد اختلال و جایگزینی قطعه‌ی مختل شده، تابع هدف اول از بهینگی خارج می‌شود، لذا با فراخوان برنامه‌ی optimizer پس از هربار رخداد اختلال تأمین قطعه، توالی بهینه با مد نظر قرار دادن تابع هدف میزان نقض محدودیت‌های نسبتی و نیز میزان ثبات توالی اولیه، با لحاظ کردن خودروهای باقی‌مانده و در نظر گرفتن کلیه‌ی قطعات مورد نیاز مونتاژ خودروهای مذکور شامل قطعات اصلی که دچار اختلال نشده‌اند و قطعات جایگزین قطعات دچار اختلال شده، تعیین می‌شود.

طبعاً توالی حاصل از تجدید توالی عملیات نسبت به توالی اولیه دارای تغییراتی است و از این منظر می‌تواند باعث بروز آشفتگی در طول زنجیره‌ی تأمین و مشکلات لجستیکی شود. لذا در این مقاله برای اولین بار مسئله‌ی تعیین توالی عملیات خودرو به‌صورت on line و با رویکرد واکنشی در نظرگرفته شده و در تعیین توالی خودروهای ورودی به خط مونتاژ نهایی علاوه بر معیار کلاسیک کمینه‌سازی نقض محدودیت‌های نسبی، ثبات توالی اولیه نیز در نظرگرفته شده است. الگوریتم پیشنهادی گزینه‌ی دوم مطابق شکل ۲ است. الگوریتم‌های فوق با استفاده از MATLAB R۲۰۱۳b، کدنویسی و با برنامه‌ی GAMS ۲۳ یکپارچه شده است.

۵. مثال عددی

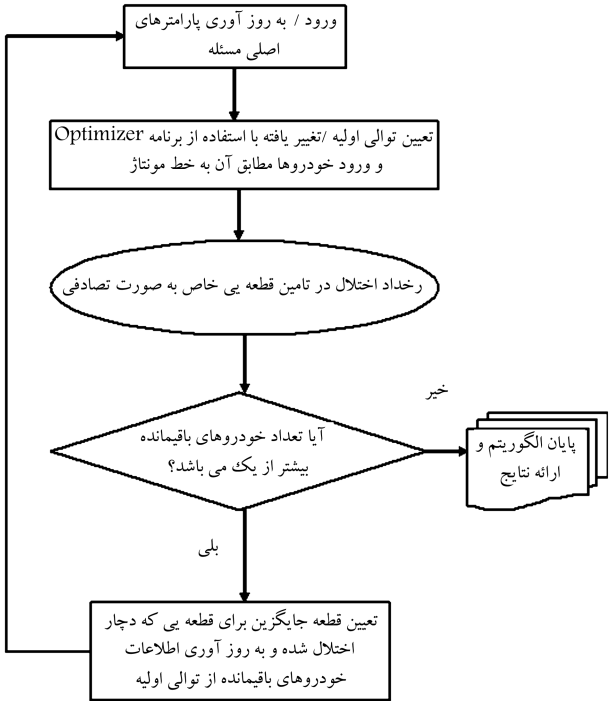
در این قسمت، برای تشریح مسئله و کاربرد روش حل پیشنهادی، ضمن ارائه‌ی یک مثال واقعی، گام‌های حل مسئله مورد پیگیری قرار خواهد گرفت. خط مونتاژ خودرویی مفروض است که در بخشی از برنامه‌ی تولید روزانه‌ی آن، تولید تعداد ۲۰ خودرو با ۵ نوع پیکربندی مختلف قرار گرفته است. تقاضای هریک از ۵ نوع پیکربندی و میزان نیازمندی آنها به قطعات خاص و همچنین محدودیت‌های نسبی مرتبط با قطعات مذکور، در جدول ۱ آورده شده است. مقدار وزن تابع هدف اول (α) از سوی مدیریت برابر با ۰/۷۵ اعلام شده است.

۱.۵. گام‌های حل مسئله

۱.۱.۵. تکرار اول

۱. ورود پارامترهای تعیین شده به برنامه‌ی optimizer؛

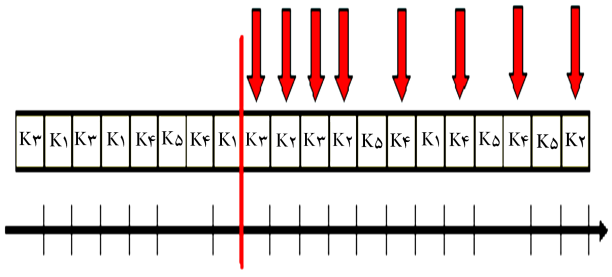
۲. اجرای برنامه‌ی optimizer برای مجموعه‌ی ۲۰ خودروی اولیه و در نظرگرفتن مجموعه اطلاعات جدول ۱ به ازای $\alpha = 1$. خروجی برنامه مذکورکه در محیط



شکل ۲. الگوریتم پیشنهادی برای حل مسئله.

جدول ۱. اطلاعات ورودی مثال عددی.

	Cp_1	Cp_2	Cp_3	Cp_4	δ_k
K_1	۱	۰	۱	۱	۴
K_2	۱	۱	۰	۱	۳
K_3	۰	۱	۱	۰	۴
K_4	۰	۱	۰	۱	۵
K_5	۱	۰	۱	۰	۴
N_{cp}	۱	۱	۱	۱	
Q_{cp}	۲	۲	۲	۲	

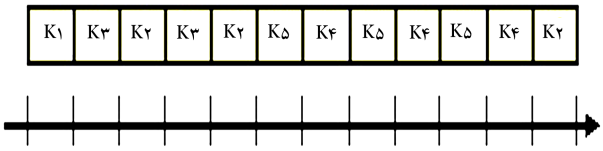


شکل ۳. توالی اولیه‌ی ۲۰ خودرو و رخداد اختلال از زمان $t = 8$ به بعد برای خودروهای دارای قطعه‌ی cp_2.

GAMS توسعه یافته است، مطابق شکل ۳ خواهد بود. این توالی تحت عنوان توالی اولیه‌ی بهینه شناخته می‌شود. در این توالی مقدار بهینه‌ی تابع هدف اول ــ مقدار مجموع نقض محدودیت‌های نسبی ــ برابر ۱۴ توسط نرم‌افزار تعیین می‌شود.

رخداد اختلال: در زمان $td = 8$، تأمین قطعه‌ی cp_2 با اختلال روبه‌رو می‌شود.

۳. با توجه به این که غیر از هشت خودرو اول تعداد $20 - 8 = 12$ خودروی



شکل ۴. تجدید توالی پس از رخداد اختلال برای کارهای باقی‌مانده.

جدول ۲. مقایسه جواب‌های حاصل از دو روش به‌ازای $\alpha = ۰/۷۵$.

	Z_1	Z_1 نرمال شده	Z_2	Z_2 نرمال شده	Z
ادامه‌ی توالی اولیه	۱۶	۱	۰	۰	۰/۷۵
روش پیشنهادی	۱۵	۰	۱۴	۱	۰/۲۵

دیگر باقی مانده است لذا برای تداوم تولید، قطعه‌ی جایگزینی برای cp_2 تعیین می‌شود. با توجه به تفاوت قطعه‌ی تأمین شده با قطعه‌ی قبلی محدودیت نسبی متناظر با قطعه‌ی جدید از ۱/۲ به ۱/۳ تغییر می‌کند.

۲.۱.۵. تکرار دوم

۱. با توجه به خودروهای ورودی به خط مونتاژ در تکرار قبل، پارامترهای اصلی مدل به‌روزرسانی می‌شود.

۲. برنامه‌ی optimizer برای مجموعه ۱۲ خودروی باقی‌مانده اجرا می‌شود. توالی حاصل مطابق شکل ۴ است. در این توالی علاوه بر تابع هدف اول، تابع هدف دوم نیز بهینه شده است. یعنی سعی شده است در توالی جدید ضمن کمینه‌سازی تابع هدف اول، کم‌ترین تغییر نسبت به توالی اولیه ایجاد شود. مقادیر توابع هدف اول و دوم برای این توالی به ترتیب برابر با ۱۵ و ۱۴ محاسبه می‌شود. توالی حاصل در تکرار دوم الگوریتم مطابق شکل ۴ است.

پایان الگوریتم: ۱۲ خودروی باقی‌مانده بدون رخداد اختلال وارد خط مونتاژ می‌شوند.

۲.۵. تحلیل و مقایسه‌ی راه حل‌های مثال عددی

برای مقایسه‌ی الگوریتم حل ارائه شده، اثربخشی آن در برابر روش ادامه‌ی توالی اولیه ــ توالی که در تکرار اول به دست آمده و پس از رخداد اختلال و جایگزینی قطعه‌ی دچار اختلال شده، بدون تغییر ادامه می‌یابد ــ مورد مقایسه قرار می‌گیرد. در این روش، باقی‌مانده‌ی خودروها مطابق توالی اولیه وارد خط مونتاژ می‌شوند، لذا مقدار تغییر نسبت به توالی اولیه برابر صفر است. اما مقدار تابع هدف در این توالی نسبت به روش پیشنهادی افزایش یافته و برابر با مقدار ۱۶ می‌شود.

مقادیر تابع هدف ترکیبی یعنی مجموع وزنی مقادیر نرمال‌سازی شده Z_1 و Z_2 حاصل از دو روش فوق در جدول ۲ آورده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود مقدار Z حاصل از روش تجدید توالی عملیات در مقدار کمینه‌ی خود است. نرمال‌سازی داده‌ها برای هریک از توابع هدف با توجه به بهترین و بدترین جواب‌های حاصله انجام شده است.

۶. آزمون‌های محاسباتی

برای انجام آزمون‌های محاسباتی از مسائل موجود در سایت www.csplib.org استفاده شده است.[۲۴] تعداد این مسائل ۷۰ مورد بوده که هریک از آنها شامل تعیین توالی عملیات ۲۰۰ خودرو با ۵ قطعه‌ی خاص و ۳۰ – ۱۷ کلاس خودرو است.

این مسائل در ۷ دسته طبقه‌بندی شده‌اند که نقطه‌ی تمایز آنها نرخ بهره‌برداری از قطعات خاص است. مثلا در گروه ۶۰، درصد خودروهایی که به یک قطعه‌ی خاص نیاز دارند نسبت به کل خودروها برابر با ۶۰ درصد است. هریک از این گروه‌ها شامل ۱۰ مسئله‌اند.

عوامل اصلی که تعیین آنها برای شبیه‌سازی رخداد اختلال ضروری است عبارت‌اند از: بازه زمانی اختلال، قطعه‌یی که دچار اختلال در تأمین می‌شود و محدودیت نسبی مرتبط با قطعه‌ی جایگزین. چگونگی تعیین مقادیر این فاکتورها عبارت است از:

- بازه زمانی اختلال: با توجه به این که مسئله در رده مسائل بسیار مشکل (NP-Hard) قرار می‌گیرد، لذا تعیین جواب بهینه‌ی مسائل با ابعاد بزرگ در زمان مناسب امکان‌پذیر نیست. بدین‌منظور، با توجه به این‌که روش حل پیشنهادی جواب بهینه را ارائه داده و به‌منظور احتراز از زمان‌های حل نامناسب، پارامتر اصلی تعیین‌کننده‌ی اندازه مسئله ــ یعنی بازه زمانی اختلال ــ بین عدد ۵ و ۳۰ در نظر گرفته شده است. برای ایجاد برآورد متوسط مقادیر تابع هدف در مسائل با سایز بزرگ و کوچک، توزیع یکنواخت روی بازه فوق مورد استفاده قرار گرفته است.
- شماره‌ی قطعه‌ی بحرانی: با بررسی ۷۰ مسئله‌ی کتابخانه‌یی موجود در سایت مرجع، مقادیر N_{cp} و Q_{cp} برای آنها به‌صورت ثابت برابر است با:

N_{cp} : ۱, ۲, ۱, ۲, ۱

Q_{cp} : ۲, ۳, ۳, ۵, ۵

با توجه به این‌که در راهکار جایگزینی قطعه‌ی بحرانی، لازم است یکی از قطعات با اختلال در تأمین مواجه شود و با در نظرگرفتن این‌که مقادیر Q_{cp} برای قطعات شماره ۴ و ۵ برابر ۵ است، و نیز از آنجا که هدف از طراحی مسائل آزمون بررسی قدرت روش حل پیشنهادی در رسیدن به جواب برای مسائل مشکل است، لذا قطعه‌ی بحرانی به‌صورت تصادفی از میان قطعات ۲، ۱ و ۳ انتخاب می‌شود.

- محدودیت نسبی مرتبط با قطعه‌ی جایگزین: به‌منظور ایجاد گوناگونی در مسائل آزمون طراحی شده، با ثابت نگاه داشتن مقادیر N_{cp} برای قطعات ۱، ۲ و ۳، مقادیر متناظر Q_{cp} به‌صورت تصادفی یکی از اعداد ۴ و ۵ انتخاب شده است.

مشخصه‌ی متغیرهای تصادفی متناظر با موارد فوق، مطابق جدول ۳ است. پس از حل ۷۰ مسئله‌ی اولیه موجود در سایت CSPLib، برای هریک از آنها با استفاده از داده‌های جدول ۳ رخداد اختلال شبیه‌سازی شده است. مشخصات مسائل حل شده، مطابق جدول ۴ است.

برای انجام آزمون‌های محاسباتی از یک دستگاه کامپیوتر Intel Core i5 با پردازشگر ۳٫۰۹ GHz و حافظه موقت ۳ GB استفاده شده است.

نتایج حل ۷۰ مسئله‌ی مذکور نشان می‌دهد که در ۳۶ مورد از کل مسائل (بیش از ۵۰ درصد نمونه)، مقدار تابع هدف تلفیقی حاصل از روش ادامه‌ی توالی اولیه به‌ازای سطوح مختلف α، حداقل ۶۷ درصد از مقدار بهینه‌ی حاصل از روش تجدید توالی عملیات بالاتر است. در سایر موارد نیز این اختلاف از صفر تا ۲۶۷ درصد است. این تحلیل بیانگر اهمیت به‌کارگیری روش تجدید توالی عملیات به‌عنوان روشی است که بهینه‌سازی همزمان هر دو تابع هدف را مد نظر قرار می‌دهد.

نمودار مقایسه‌ی مقادیر تابع هدف تلفیقی حاصل از دو روش ادامه توالی اولیه و تجدید توالی عملیات در شکل ۵ آورده شده است. همچنین میانگین نتایج کسب شده برای ۷۰ مسئله به‌ازای سطوح مختلف α در جدول ۵ آورده شده است. چنان

جدول ۳. داده‌های آزمون‌های محاسباتی.

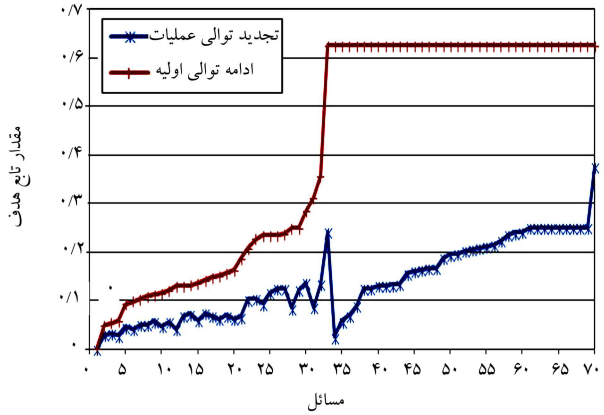
عامل	مقدار
بازه زمانی اختلال dt	Uniform (۵, ۳۰)
قطعه‌ی بحرانی	[۱, ۳]
محدودیت نسبی مرتبط با قطعه‌ی جایگزین Q'	[۴, ۵]

جدول ۴. مشخصه‌های مسائل پس از رخداد اختلال.

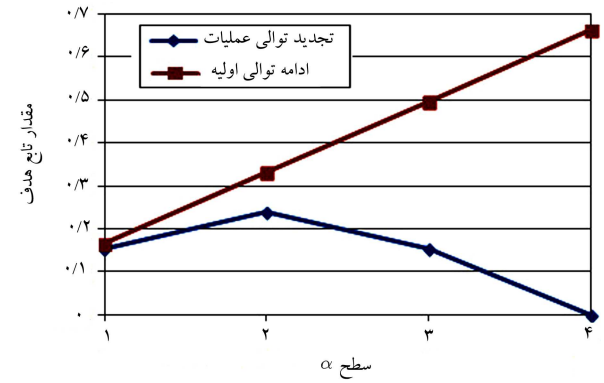
گروه	K	dt	قطعه‌ی بحرانی	Q'	گروه	K	dt	قطعه‌ی بحرانی	Q'
۶۰	۲۴	۹	۱	۵	۸۰	۲۶	۱۲	۱	۴
	۱۷	۲۳	۳	۵		۲۵	۲۹	۳	۴
	۲۴	۵	۳	۴		۲۸	۱۲	۳	۴
	۱۸	۶	۳	۴		۲۴	۳۰	۲	۴
	۲۰	۲۷	۳	۴		۲۵	۱۱	۱	۵
	۲۴	۹	۱	۵		۲۵	۱۸	۲	۴
	۲۱	۳۰	۳	۵		۲۴	۱۲	۱	۴
	۲۱	۱۳	۳	۵		۲۴	۱۳	۱	۵
	۱۹	۲۰	۱	۵		۲۵	۲۷	۳	۴
	۲۴	۷	۱	۵		۲۵	۱۰	۲	۵
۶۵	۲۶	۲۹	۳	۴	۸۵	۲۶	۲۷	۳	۴
	۲۲	۱۲	۳	۴		۲۶	۱۲	۳	۵
	۲۵	۳۰	۲	۴		۳۰	۱۶	۱	۴
	۲۱	۱۱	۱	۵		۲۶	۲۴	۱	۵
	۲۳	۲۳	۳	۵		۲۶	۱۰	۲	۵
	۲۴	۱۲	۱	۵		۲۷	۲۱	۱	۴
	۲۴	۱۳	۱	۵		۲۶	۲۳	۳	۵
	۲۱	۲۷	۳	۴		۲۶	۹	۲	۵
	۲۲	۱۳	۳	۵		۲۴	۷	۱	۵
	۲۵	۷	۱	۵		۲۷	۹	۱	۵
۷۰	۲۶	۱۲	۳	۵	۹۰	۲۷	۳۰	۳	۵
	۲۳	۱۶	۱	۴		۲۷	۹	۱	۵
	۲۷	۲۴	۱	۵		۲۶	۷	۱	۵
	۲۳	۹	۳	۴		۳۰	۲۳	۳	۵
	۲۴	۲۱	۱	۴		۲۶	۵	۳	۴
	۲۵	۱۴	۲	۴		۲۸	۶	۳	۴
	۲۴	۹	۲	۵		۲۷	۵	۳	۴
	۲۲	۹	۱	۵		۲۷	۹	۱	۵
	۲۲	۲۳	۳	۵		۲۸	۶	۳	۴
	۲۵	۲۰	۱	۵		۲۶	۲۳	۳	۵
۷۵	۲۶	۹	۱	۵	۷۵ (continue)	۲۵	۲۰	۱	۵
	۲۴	۷	۱	۵		۲۴	۱۰	۲	۵
	۲۷	۲۳	۳	۵		۲۳	۳۰	۳	۵
	۲۳	۶	۳	۴		۲۵	۱۳	۳	۵
	۲۴	۶	۳	۴		۲۵	۲۰	۱	۵

جدول ۵. مقایسه‌ی مقدار تابع هدف و زمان در دو روش.

سطح	α	تجدید توالی عملیات		ادامه توالی اولیه	
		مقدار تابع	زمان	مقدار تابع	زمان
۱	۰٫۲۵	۰٫۱۵	۱٫۲۱	۰٫۱۷	۰٫۱۹
۲	۰٫۵	۰٫۲۴	۱٫۹۵	۰٫۳۳	۰٫۲۱
۳	۰٫۷۵	۰٫۱۶	۳٫۲۰	۰٫۵۰	۰٫۲۳
۴	۱	۰٫۰۰	۴٫۳۳	۰٫۶۶	۰٫۲۲



شکل ۵. مقایسه‌ی تابع هدف پس از رخداد اختلال به‌ازای دو روش برای ۷۰ مسئله‌ی آزمون.



شکل ۶. مقایسه‌ی میانگین مقادیر تابع هدف حاصل در مسائل آزمون در سطوح مختلف α.

که مشاهده می‌شود با افزایش مقدار α، اختلاف میان جواب حاصل از روش ادامه‌ی توالی اولیه و تجدید توالی عملیات افزایش می‌یابد. این نتیجه بدان سبب است که با افزایش مقدار α در واقع وزن تابع هدف اول افزایش می‌یابد و با توجه به این که روش ادامه‌ی توالی اولیه در بهینه‌سازی این هدف هیچ‌گونه عملکردی ندارد، بنابراین با افزایش وزن آن، نقش آن در تابع هدف تلفیقی بیشتر شده و نهایتاً به‌ازای سطح $\alpha = ۱$ میزان اختلاف جواب دو روش به عدد ۰٫۶۶ می‌رسد. نمودار مقایسه‌یی این دو روش در شکل ۶ آورده شده است.

چنان که در جدول ۵ مشاهده می‌شود با افزایش سطح α، زمان مورد نیاز برای تجدید توالی عملیات افزایش می‌یابد. این موضوع ناشی از افزایش تلاش محاسباتی در راستای بهینه‌سازی مسئله است.

۷. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر مسئله‌ی تعیین توالی عملیات خودرو در حالتی که به‌صورت غیرمنتظره با پیشامد اختلال در تأمین روبه‌رو شویم و با در نظرگرفتن دو تابع هدف کمینه‌سازی نقض محدودیت‌های نسبی و کمینه‌سازی تغییر نسبت به توالی اولیه، مورد بررسی قرار گرفته است. برای ارائه‌ی حل ریاضی در این مسئله یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح با استفاده از نرم‌افزار GAMS ۲۳ توسعه یافته است. سپس یک الگوریتم حل برای به دست آوردن توالی خودروها در مواجهه با اختلالات تأمین پیش‌بینی نشده ارائه شده است. برای تشریح روش پیشنهادی، یک مثال عددی مطرح و گام‌های الگوریتم پیشنهادی پیگیری و نهایتاً توالی حاصل از روش پیشنهادی ارائه شده است.

همچنین نتایج حاصل از کاربرد روش پیشنهادی با حالتی که توالی اولیه پس از رخداد اختلال، بدون تغییر ادامه پیدا کند، مقایسه شده است. نتایج حاصله نشان می‌دهد که روش ادامه‌ی توالی اولیه از منظر بهینگی تابع هدف اول فاقد مطلوبیت بوده و در غالب موارد، فاصله‌ی زیادی با حل بهینه‌ی آن دارد. لذا کاربرد روش پیشنهادی تجدید توالی عملیات از منظر در دسترس کردن جواب‌هایی که همزمان هر دو تابع هدف را بهینه می‌کند به‌منظور برآورده‌سازی محدودیت‌های عملیاتی خطوط مونتاژ و نیز حفظ ثبات جریان مواد در طول زنجیره‌ی تأمین کارخانجات خودروسازی بسیار مؤثر است.

برای ادامه‌ی مطالعه در زمینه‌ی مسئله‌ی مورد بررسی پیشنهاد می‌شود:

- با توجه به این که زمان حل مسئله‌ی مورد بررسی با افزایش ابعاد آن افزایش می‌یابد، ارائه‌ی روش‌های فراابتکاری در افزایش کارایی رویکرد ارائه شده در این مقاله مؤثر خواهد بود.
- در نوشتار حاضر، مسئله‌ی دوهدفه از طریق تخصیص اوزان تصمیم‌گیری به یک مسئله‌ی تک‌هدفه تبدیل شده است. لذا کاربرد رویکرد چندهدفه به‌منظور تعیین مجموعه جواب‌های بهینه‌ی پارتو توصیه می‌شود.
- با توجه به این که استفاده از قطعات جایگزین باعث تغییر سطح کیفی محصول خروجی می‌شود، این موضوع به‌عنوان یک متغیر تصمیم‌گیری وارد مدل ریاضی شده و از این طریق تقابل هدف سطح کیفی حاصل از قطعات جایگزین مختلف در برابر هدف حفظ ثبات توالی اولیه مورد بررسی قرار گیرد.

پانوشت‌ها

1. resequencing
2. reactive approach
3. integer linear programming
4. mixed-model sequencing
5. level scheduling

6. iterated beam search algorithm
7. scattered branch & bound algorithm
8. buffer
9. overload
10. stability
11. turbulence
12. normalize
13. optimizer

منابع (References)

1. Franz, C., Caap Hällgren, E. and Koberstein, A. "Resequencing orders on mixed-model assembly lines: Heuristic approaches to minimise the number of overload situations", *International Journal of Production Research*, **52**(19), pp. 5823-5840 (2014).
2. Boysen, N., Scholl, A. and Wopperer, N. "Resequencing of mixed-model assembly lines: Survey and research agenda", *European Journal of Operational Research*, **216**(3), pp. 594-604 (2012).
3. Boysen, N., Golle, U. and Rothlauf, F. "The car resequencing problem with pull-off tables", *German Academic Association for Business Research (VHB)*, **4**(2), pp. 276-292 (2011).
4. Wu, Y.-Y. and Zhu, H.-P. "A hybrid heuristic for multishop car sequencing problem with a buffer", *International Asia Conference, on Industrial Engineering and Management Innovation (IEMI2013)*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 667-674 (2013).
5. Sialaetal, M. "A study of constraint programming heuristics for the car-sequencing problem", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **38**, pp. 34-44 (2015).
6. Parello, B.D., Kabat, W.C. and Wos, L. "Job-shop scheduling using automated reasoning: A case study of the car sequencing problem", *Journal of Automatic Reason*, **2**, pp. 1-42 (1986).
7. Boysen, N., Fliedner, M. and Scholl, A."Sequencing mixed-model assembly lines: Survey, classification and model critique", *European Journal of Operational Research*, **192**(2), pp. 349–373 (2009).
8. Solnon, C. "The car sequencing problem: Overview of state-of-the-art methods and industrial case-study of the ROADEF'2005 challenge problem", *European Journal of Operational Research*, **191**, pp. 912-927 (2008).
9. Ding, F.-Y. and HE, J. "A heuristic procedure for the automobile assembly-line sequencing problem considering multiple product options", *International Journal of Production Research*, **46**(20), pp. 5827-5847 (2008).
10. Joly, A. and Frein, Y. "Heuristics for an industrial car sequencing problem considering paint and assembly shop objectives", *Computers & Industrial Engineering*, **55**, pp. 295-310 (2008).
11. Yavuz, M. "Iterated beam search for the combined car sequencing and level scheduling problem", *International Journal of Production Research*, **51**(12), pp. 3698-3718 (2013).
12. Boysen, N., Kiel, M. and Scholl, A. "Sequencing mixed-model assembly lines to minimize the number of work overload situations", *International Journal of Production Research*, **49**(16), pp. 4735-4760 (2011).
13. Kis, T. "On the complexity of the car sequencing problem", *Operations Research Letters*, **32**(4), pp. 331-335 (2004).
14. Estellon, B. and Gardi, F. "Car sequencing is NP-hard: A short proof", *Journal of the Operational Research Society*, **64**, pp. 1503-1504 (2013).
15. Gravel, M., Gagne, C. and Price, W.L. "Review and comparison of three methods for the solution of the car sequencing problem", *Journal of the Operational Research Society*, **56**(11), pp. 1287-1295 (2006).
16. Fliedner, M. and Boysen, N. "Solving the car sequencing problem via branch & bound", *European Journal of Operational Research*, **191**(3), pp. 1023-1042 (2008).
17. Gottlieb, J., Puchta, M. and Solnon, C. "A study of greedy, local search and ant colony optimization approaches for car sequencing problems", in: *Applications of Evolutionary Computing LNCS*, **2611**, Springer, pp. 246-257 (2003).
18. Gagné, C., Gravel, M. and Price, W.L. "Solving real car sequencing problems with ant colony optimization", *European Journal of Operational Research*, **174**(3), pp. 1427-1448 (2006).
19. Gavranović, H. "Local search and suffix tree for car sequencing problem with colors", *European Journal of Operational Research*, **191**(3), pp. 972-980 (2007).
20. Ding, F.-Y. and Sun, H. "Sequence alteration and restoration related to sequenced parts delivery on an automobile mixed-model assembly line with multiple departments", *International Journal of Production Research*, **42**(8), pp. 525-1543 (2004).
21. Wu, T., Blackhurts, J. and Grady, P.O. "Methodology for supply chain disruption analysis", *International Journal of Production Research*, **45**, pp. 1665-1682 (2007).
22. Prandtstetter, M. and Raidl, G. "An integer linear programming approach and a hybrid variable neighborhood search for the car sequencing problem", *European Journal of Operational Research*, **191**(3), pp. 1004-1022 (2008).
23. Meissner, S. "Controlling just-in-sequence flow-production", *Logist. Res.*, **2**, pp. 45-53 (2010).
24. Gent, I.P. and Walsh, T. "CSPLIB: A benchmark library for constraints", *International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming*, pp. 480-481 (1999).