چشم‌انداز مدیریت صنعتی
شماره ۲۲ ـ تابستان ۱۳۹۵
ص‌ص ۱۴۸ – ۱۲۳

حل مسئله تعیین توالی عملیات خودرو با درنظرگرفتن اختلالات تأمین پیش‌بینی‌نشده

حسین رضائی بدر*، فریبرز جولای، غلامرضا اسماعیلیان***، پرویز فتاحی*****

چکیده

در فضای رقابتی صنعت خودروسازی، عملکرد خطوط مونتاژ ترکیبی وابسته به تعیین توالی صحیح مدل‌های مختلف خودرو است؛ اما در شرایط واقعی تولید همواره انواع اختلالات، اجرای کامل برنامه‌های از پیش تعیین‌شده را با مانع روبه‌رو می‌سازد. در این پژوهش با درنظرگرفتن چنین شرایطی، برای تجدید توالی عملیات تولید خودرو در خط مونتاژ نهایی با درپیش‌گرفتن رویکرد واکنشی، یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح توسعه یافته است. در این مدل ریاضی، برای نخستین بار علاوه بر تابع هدف کلاسیک کمینه‌سازی نقض محدودیت‌های نسبتی، حفظ ثبات توالی اولیه نیز وارد مدل ریاضی شده است. به این طریق، در جواب حاصل از حل این مدل دوهدفه، علاوه بر لحاظ‌شدن محدودیت‌های عملیاتی، آشفتگی در طول زنجیره تأمین نیز کمینه خواهد شد. با توجه به پیچیدگی محاسباتی این مسئله، یک روش فراابتکاری مبتنی بر الگوریتم جست‌وجوی همسایگی متغیر ارائه شده است. برای ارزیابی روش حل پیشنهادی از نمونه مسائل کتابخانه‌ای استفاده شده و به‌منظور شبیه‌سازی رخداد اختلال، مسائل آزمون در ابعاد بزرگ، متوسط و کوچک طراحی شده‌اند. نتایج نشان‌دهنده عملکرد بالای الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با بهترین جواب موجود در هر سه دسته مسائل آزمون است.

کلیدواژه‌ها: تعیین توالی عملیات خودرو؛ اختلال تأمین؛ ثبات؛ رویکرد واکنشی.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۱/۳۰، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۵/۲۵.

* دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، دانشگاه پیام نور تهران (نویسنده مسئول).
E-mail: ho_rezaee_b@yahoo.com

** استاد، دانشگاه تهران

*** استادیار، دانشگاه پیام نور

**** دانشیار، دانشگاه الزهراء.

۱. مقدمه

افزایش رقابت در بازارهای جهانی خودرو، محیط این صنعت را از نظر تعداد و میزان پیچیدگی چالش‌های پیش‌رو با تغییرات شگرفی روب‌رو کرده است. شرکت‌های حاضر در این بازار برای حفظ موقعیت خود، نه‌تنها باید عملکرد خودروهای تولیدی را بهبود بخشند و مشخصه‌های لازم را به آن‌ها اضافه کنند؛ بلکه لازم است از طریق بهینه‌سازی فرایندهای تولیدی، هزینه‌های عملیاتی خود را کاهش دهند[۱]؛ از سوی دیگر راهبرد غالب در خودروسازان مطرح از سیستم تولید برای انبار به سیستم تولید مطابق سفارش، تغییر کرده است[۲]. با دنبال‌کردن این رویکرد، ازآنجاکه سفارش مشتریان تعیین‌کننده خواهد بود، خودروهای مختلفی در هر روز تولید می‌شود و بدین ترتیب توالی خودروهای تولیدی به‌صورت روزانه تغییر خواهد کرد. هدف در مسئله تعیین توالی عملیات خودرو آن است که خودروها به طریقی زمان‌بندی شوند که هزینه‌ها کاهش یابد و تا حد ممکن قیود ظرفیتی ناشی از محدودیت‌های منابع رعایت شود.

پس از اتمام فاز برنامه‌ریزی و ورود به فاز اجرا، پیشامد اختلالات مختلف باعث خواهد شد که اجرای تولید مطابق برنامه و توالی از پیش تعیین‌شده با مانع روبه‌رو شود. یکی از موارد اختلال، دردسترس نبودن قطعات موردنیاز برای تولید یک خودروی خاص در خط مونتاژ نهایی است. در چنین حالتی خودروی برنامه‌شده از فهرست برنامه خارج شده و خودروی بعدی جایگزین می‌شود. این موضوع باعث نوعی آشفتگی در خط تولید و زنجیره تأمین محصول می‌شود. تغییر توالی اولیه و ایجاد توالی جدید، تحت‌عنوان مسئله تعیین مجدد توالی عملیات شناخته می‌شود. در این مقاله مسئله تعیین مجدد توالی عملیات خودروها در خط مونتاژ نهایی با هدف حداقل‌کردن نقض محدودیت‌های ظرفیتی و همچنین حداقل‌سازی تغییرات توالی اولیه تولید بررسی می‌شود.

در سال‌های اخیر، مسئله تجدید توالی عملیات خودرو در سطح جهانی موردتوجه قرار گرفته است [۶، ۷، ۸، ۱۲، ۲۹، ۳۵]. وجه مشخصه این پژوهش نسبت به پژوهش‌های قبلی، درنظرگرفتن شرایط پویا برای رخداد اختلال است. بدین منظور شرایطی در نظر گرفته شده است که به محض رخداد اختلال، با درپیش‌گرفتن رویکرد واکنشی به‌صورت برخط، تصمیم‌گیری شود. در رویکرد واکنشی، هنگام تعیین توالی اولیه، عامل عدم‌قطعیت موردنظر قرار نمی‌گیرد. در این حالت، وقوع یک رخداد تصادفی و پیش‌بینی‌نشده باعث تغییر برنامه اولیه شده و درپیش‌گرفتن اقدام واکنشی ضروری می‌شود؛ بنابراین رویکرد واکنشی به دنبال آن است که بتواند در قبال اختلالات حادث‌شده بهترین واکنش ممکن را نشان دهد. این واکنش می‌تواند به شکل تغییر و بهبود توالی اولیه یا ایجاد یک توالی به‌کلی جدید باشد. در این پژوهش برای نخستین 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 این پژوهش ابتدا مدل ریاضی حل مسئله ارائه

شده است؛ سپس با توجه به پیچیدگی محاسباتی مسائل تعیین توالی عملیات خودرو و زمانبربودن ارائه حل دقیق برای آن‌ها برای حل مسئله موردنظر یک الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر جست‌وجوی همسایگی متغیر ارائه شده است.

در بخش دوم، پس از مرور مبانی نظری موضوع اختلالات تأمین و راهکارهای مقابله با آن‌ها، پیشینه پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه تجدید توالی عملیات خودرو موردبررسی قرار می‌گیرد. در بخش سوم روش‌شناسی پژوهش و مدل ریاضی پیشنهادی به همراه یک الگوریتم فراابتکاری برای آن ارائه می‌شود. در بخش چهارم نتایج به‌کارگیری الگوریتم پیشنهادی برای حل مسائل آزمون ارائه و موردارزیابی قرار می‌گیرد. در بخش پایانی به نتایج و پیشنهادهای پژوهش پرداخته می‌شود.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

مدل‌های زمان‌بندی بر اساس سطح اطلاعات دردسترس، به سه دسته تقسیم می‌شوند. در حالت اول فرض می‌شود که اطلاعات زمان‌بندی در طول افق برنامه‌ریزی کاملاً قطعی و معین هستند و در طی زمان اجرای برنامه زمان‌بندی این اطلاعات تغییر نمی‌کنند. در این صورت معمولاً از زمان‌بندی قطعی استفاده می‌شود. در حالت دوم، اطلاعات در طی افق برنامه‌ریزی معین هستند؛ اما دچار عدم‌قطعیت می‌باشند. اطلاعات واقعی تنها در خلال اجرای برنامه، مشخص می‌شود. در این‌گونه مسائل می‌توان پارامترها و یا اختلالات تصادفی و غیرقطعی را با توابع توزیع احتمالی و یا رویکردهای سناریویی تخمین زد و از روش‌هایی مثل برنامه‌ریزی تصادفی[1] و یا بهینه‌سازی استوار[2] برای مدل‌سازی و حل مسائل زمان‌بندی استفاده کرد[۲۶]. در حالت سوم، عدم‌قطعیت در مسائل زمان‌بندی بسیار بالاتر است و انحراف از مقدار واقعی می‌تواند زیاد باشد. در این مسائل اختلالاتی به‌طور پیش‌بینی‌نشده رخ می‌دهد که به رخدادهای غیرمنتظره[3] در سیستم‌های زمان‌بندی اشاره دارند و با رویکردهای جدیدی همانند زمان‌بندی آنی[4] بررسی می‌شوند[۲۷].

برخی از اختلالاتی که به‌طور تصادفی یا به‌صورت رخدادهای کاملاً غیرمنتظره ممکن است در سیستم‌های زمان‌بندی رخ دهند عبارت‌اند از: خرابی ماشین‌آلات، تأخیر در رسیدن (یا کمبود) مواد و قطعات موردنیاز، زمان‌های غیرقطعی عملیات، پس‌گرفتن و لغو سفارش‌ها، اضافه‌شدن عملیات جدی و تغییر تقاضای مشتریان.

گان و ویرث (۲۰۰۵)، زمان‌بندی قطعی، پایدار و آنی را به‌ترتیب به‌عنوان روش‌های

1. Stochastic Programming
2. Robust Optimization
3. Unexpected events
4. Online Scheduling

پیش‌بینانه[1]، پیش‌بینانه-واکنشی و واکنشی[2] معرفی کرده‌اند. طبق شکل ۱، انتخاب طرح و روش زمان‌بندی، وابسته به سطح اطلاعات دردسترس و نوع عدم‌قطعیت است [۱۴] .

شکل ۱. ارتباط میزان اطلاعات دردسترس و تکنیک‌های زمان‌بندی[۱۴]

جدول ۱. ویژگی‌های سطوح تصمیم‌گیری و ابزار مورداستفاده برای مدیریت اختلال [۳۶]

سطوح تصمیم‌گیری	جنس خروجی‌ها و تصمیم‌ها	ویژگی‌های اثرگذار بر انتخاب ابزار	ابزار مورداستفاده
راهبردی	تعیین مکان اثرگذاری اختلال‌ها به‌صورت کلان، تعیین روابط بین اختلال‌ها در بستر اجزای اصلی زنجیره تأمین، شناسایی اجزای آسیب‌پذیر زنجیره تأمین به‌منظور تعیین سیاست‌های مقابله با اختلال	امکان شبیه‌سازی گسسته اجزای زنجیره تأمین و حوادث آن، قابلیت حساسیت به نوع حوادث، امکان مدل‌سازی کمّی	شبکه پتری
تاکتیکی	شیوه و چگونگی اثرگذاری اختلال‌ها بر هم و بر اجزای زنجیره تأمین، تعیین چگونگی اثرگذاری اختلال‌ها بر عوامل عملکردی زنجیره تأمین، تعیین روابط علّی- معلولی اختلال‌ها و اثرات آن‌ها، تعیین راهکارهای ممکن برای مقابله با اختلال	توانایی نشان‌دادن روابط علّی - معلولی، امکان ارتباط‌دادن آن به مدل‌سازی کمّی	سیستم‌های دینامیکی
عملیاتی	مدل‌سازی راهکارهای پیشنهادی به‌منظور اجرای آن به‌صورت عملیاتی، تعیین میزان اثرگذاری راهکار پیشنهادی بر عملکرد زنجیره تأمین	امکان بررسی اثرات متغیرهای مختلف تصمیم، توانایی تعیین راهکار عملیاتی برای سیاست‌های اتخاذشده در گام‌های قبل	مدل‌سازی ریاضی

ذگردی و داورزنی (۱۳۹۰)، راهکارهای مقابله با اختلال را در سه سطح استراتژیک، تاکتیکی و عملیاتی (اجرایی) مدنظر قرار داده‌اند [۳۶]. خروجی‌ها، تصمیم‌ها و ابزار مورداستفاده در هر یک

1. Proactive
2. Reactive

از این سه سطح در جدول ۱، نشان داده شده است.

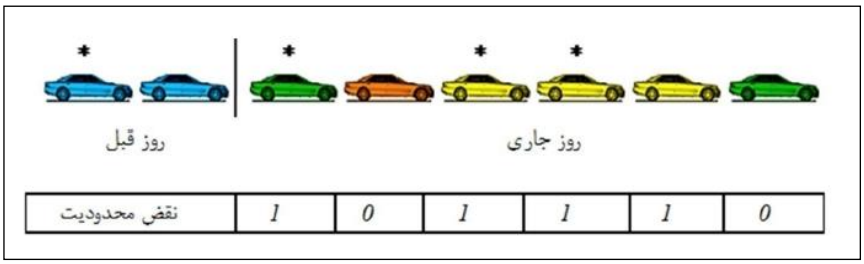
مسئله تعیین توالی عملیات خودرو برای نخستین بار توسط پارلو (۱۹۸۶) مطرح شد [۲۴]. پس از آن، تاکنون پژوهش‌های متعددی با محوریت موضوع تعیین توالی عملیات خودرو در خطوط مونتاژ انتشار یافته است. با توجه به تنوع مقالات انتشاریافته، به‌منظور ایجاد ساختار مطالعاتی موردنیاز، مرور مقالات در دو حوزه بررسی می‌شود: ۱.تعیین توالی اولیه عملیات خودرو؛ ۲. تجدید توالی عملیات خودرو. برای مطالعه بیشتر می‌توان به مقالات مروری بویسن (۲۰۰۹) و سولنون (۲۰۰۸) مراجعه کرد[۵،۳۰].

انواع رویکردهای تعیین توالی اولیه عملیات خودرو: به‌صورت کلاسیک برای فرمول‌بندی مسئله تعیین توالی عملیات خودرو سه رویکرد متفاوت ارائه شده است:

– تعیین توالی عملیات خطوط مونتاژ ترکیبی با هدف کمینه‌سازی نیروهای پشتیبان: در این رویکرد حذف/ کاهش بار کاری اضافی وابسته به توالی عملیات، مدنظر قرار می‌گیرد؛ بدین منظور اطلاعات ایستگاه‌های کاری و مدل‌های مختلف محصول به‌صورت کامل و همراه با جزئیات در نظر گرفته می‌شوند؛ به‌طوری‌که زمان‌های کاری، حرکات نیروی انسانی، مرزهای ایستگاهی و سایر مشخصه‌های عملیاتی خط به‌صورت صریح و واضح در مدل مربوطه وارد می‌شوند. بارد (۱۹۹۲)، بولات (۱۹۹۷)، سارکر (۱۹۹۸)، سامیچراست (۲۰۰۰) و کلانو (۲۰۰۴) با تأکید بر این رویکرد به مدل‌سازی و حل مسئله پرداخته‌اند[۳،۴،۲۸،۳۲،۹].

– کمینه‌سازی نقض محدودیت‌های نسبتی: ازآنجاکه پیگیری رویکرد قبلی نیازمند تلاش بسیار زیاد برای جمع‌آوری داده است، در این رویکرد تلاش می‌شود تا بار کاری اضافی وابسته به توالی به‌صورت تلویحی کمینه شود؛ بدین منظور برای هر قطعه‌ای که به ایستگاه‌های مشخص بار کاری متفاوتی تحمیل می‌کند، محدودیتی با قالب N_{cp}:Q_{cp} تعریف می‌شود. منظور از این محدودیت این است که در میان Q_{cp} موقعیت بعدی توالی تنها N_{cp} مورد از آن‌ها مجاز هستند که دارای قطعه cp باشند. در صورت نقض این محدودیت جریمه‌ای اختصاص خواهد یافت. بدین ترتیب مدل به دنبال کمینه‌کردن جریمه‌های مرتبط با نقض محدودیت‌های نسبتی است. اگر توالی عملیاتی یافته شود که این مجموعه محدودیت‌ها را نقض نکند، بار کاری اضافی به وجود نخواهد آمد.

شکل ۲، مثالی از محدودیت‌های نسبتی چگونگی تخصیص جریمه را نشان می‌دهد. در این مثال محدودیت نسبتی متناظر با قطعه موردنظر به‌صورت ۱:۳ است.



شکل ۲. شمارش تعداد نقض محدودی‌ت‌های نسبتی
** خودروهای مشخص‌شده با ستاره به قطعه خاص نیاز دارند.*

داونپورت (۱۹۹۹)، سولنون (۲۰۰۰)، گراول (۲۰۰۶) و جولی (۲۰۰۸) ازجمله پژوهشگرانی هستند که با درپیش‌گرفتن این رویکرد، با توجه به پیچیدگی محاسباتی مسئله، روش‌های حل فراابتکاری متنوعی را برای آن ارائه کرده‌اند [۱۰،۳۱،۱۶،۱۷].

– زمان‌بندی یکنواخت: دو رویکرد قبلی در پی آن هستند که تخطی از محدودیت‌های ظرفیتی را کمینه کنند و درنتیجه بار کاری ایستگاه‌ها از ظرفیت موجود بالاتر نباشد؛ اما در رویکرد سوم، فلسفه تولید درست به‌موقع در تعیین توالی عملیات ملاک عمل قرار می‌گیرد؛ بدین منظور ابتدا برای هر یک از مدل‌ها یک نرخ تولید ایده‌آل تعریف شده و سپس توالی مدل‌ها طوری تعیین می‌شود که اختلاف بین نرخ‌های واقعی و ایده‌آل کمینه شود. ماندن (۱۹۹۸)، میلتنبرگ (۲۰۰۱)، کوبیاک (۲۰۰۳)، مورنو (۲۰۰۶)، یاورز (۲۰۱۳) و ژپینگ (۲۰۱۵) این رویکرد را موردبررسی قرار داده‌اند[۲۲،۲۱،۱۹،۲۳،۳۴،۳۷].

تجدید توالی عملیات خودرو: ازآنجاکه اختلالات پیش‌بینی‌نشده، معمولاً باعث غیرموجه‌شدن توالی تولید اولیه می‌شود و یا آن را از بهینگی خارج می‌کند؛ بنابراین یک سیستم برنامه‌ریزی و کنترل تولید مؤثر باید تمهیداتی را فراهم آورد که بتوان به‌واسطه آن یک توالی از پیش تعیین‌شده را حتی در حین اجرا، تغییر داد. این مسئله باعنوان «تعیین مجدد توالی عملیات» در مبانی نظری موضوع، مطرح است [۸]. در این زمینه عمدتاً دو گونه اختلال می‌توان طرح کرد: اختلالات با ماهیت احتمالی که رویکردهای معمولی بر آن‌ها مؤثر واقع نمی‌شود و تغییرات ناگهانی که لازم است از طریق سیاست‌های انعطاف‌پذیر به این گونه تغییرات عکس‌العمل نشان داد. تعیین مجدد توالی عملیات عبارت است از: بازآرایی یک توالی مفروض از اشیا با هدف برآورده‌شدن محدودیت‌های موجود با درنظرگرفتن امکان‌پذیری تغییرات مرتبط؛ به‌نحوی‌که برخی از توابع هدف بهینه شوند. بویسن و همکاران (۲۰۱۲) در مقاله مروری خود، مقالات انتشاریافته در زمینه مسئله تعیین مجدد توالی عملیات خطوط مونتاژ ترکیبی در مواجهه با انواع

اختلالات مقطعی را بررسی کردند. آن‌ها چهار نوع انباره میانی[1] متفاوت را برای مدیریت اختلالات و تعیین مجدد توالی عملیات معرفی و سپس مطالعات صورت‌گرفته در این زمینه را بر حسب این مشخصه، طبقه‌بندی و تشریح کردند [۸].

دینگ و سان (۲۰۰۴)، دو گونه مختلف تجدید توالی عملیات را با درنظرگرفتن بافرهایی از نوع بانک‌های ترکیبی موردبررسی قرار دادند. در یک حالت تجدید یک توالی اولیه پس از سالن رنگ مدنظر قرار گرفته و در حالت دیگر تعیین اندازه دسته رنگ قبل از سالن رنگ مدنظر قرار گرفته است. در هر هر دو حالت، سیاست‌های ساده پر و رهاسازی برای یک محیط تجدید توالی پویا ارائه شده است؛ به‌علاوه برای مسئله تعیین اندازه دسته رنگ در حالت استاتیک آن، یک مدل عدد صحیح- مخلوط ارائه شده است [۱۱].

بویسن و همکاران (۲۰۱۱) با درنظرگرفتن انباره‌های میانی خاصی باعنوان «میزهای متحرک»، مسئله کلاسیک تعیین توالی عملیات خودرو را موردبررسی قرار دادند. آن‌ها برای حل این مسئله از مدل عدد صحیح و روش گراف استفاده کردند؛ سپس ساختار گراف موردنظر در الگوریتم‌های مختلف استفاده شد؛ همچنین آن‌ها نشان دادند که در شرایط دنیای واقعی وقتی که به بازیابی توالی اولیه نیاز است و درعین‌حال محدودیت‌های توالی عملیات خودرو باید به‌عنوان قیود سخت موردنظر قرار گیرند، الگوریتم حل آن‌ها عملکرد مطلوبی دارد. آن‌ها نشان دادند که این الگوریتم به‌طور واضح بر روش‌های سنتی متداول در شرکت‌های خودروساز آلمانی ارجحیت دارد [۷].

با بررسی مبانی نظری موضوع تجدید توالی عملیات خودرو مشخص شد که تاکنون موضوع ثبات توالی اولیه در مواجهه با اختلالات تأمین بررسی نشده است؛ بنابراین در این مقاله برای نخستین بار برای آن مدل ریاضی و الگوریتم فراابتکاری ارائه می‌شود.

۳. روش‌شناسی پژوهش

روش پژوهش حاضر از نوع ریاضی کاربردی است. مدل ارائه‌شده نوعی مدل ریاضی از نوع برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح است که مسئله تعیین توالی عملیات خودروها در خط مونتاژ نهایی را با درنظرگرفتن اختلال در تأمین قطعات بررسی و حل خواهد کرد.

1. Buffer

مفروضات مدل

- محدوده موردبررسی شامل خط مونتاژ نهایی خودرو است. منظور از خط مونتاژ نهایی مجموعه ایستگاه‌هایی است که در امتداد یک سیستم انتقال (کانوایر) قرار گرفته‌اند و به‌صورت پیوسته و یکنواخت محصول در جریان ساخت از هر یک از این ایستگاه‌ها عبور می‌کند.
- ترکیب مدل‌های مختلف خودروهای تولیدی در طی افق برنامه‌ریزی به‌طور قطعی مشخص است و احتمال تغییر آن وجود ندارد.
- هر یک از انواع مدل‌های تولیدی نیازمند قطعات مختص به خود است؛ به‌طوری‌که نیاز به این قطعات از یک مدل به مدل دیگر متغیر است.
- اختلال ایجادشده در تأمین قطعات خودروها، اختلالی است که در تأمین قطعات موردنیاز در سالن مونتاژ نهایی به‌صورت غیرمنتظره رخ می‌دهد و باعث خروج خودرو از چرخه تولید و بلوکه‌شدن آن می‌شود؛ بنابراین هنگام تعیین توالی اولیه، رخداد اختلال یادشده قابل‌پیش‌بینی نیست.
- رخداد اختلال در تأمین موردنظر در فاصله‌ای کمتر از دو شیفت تولیدی برطرف شده و پس از آن خودرو از حالت بلوکه خارج می‌شود.
- با توجه به مفروض‌بودن رخداد اختلال در تأمین، تعیین مجدد توالی عملیات خودروهای باقیمانده از توالی اولیه و خودروهای رفع بلوکه‌شده، در فواصل زمانی مشخص، ضروری است.
- رویکرد واکنشی که در این مقاله موردنظر است، عبارت است از اینکه پس از رفع مشکل تأمین خودروهای بلوکه‌شده، این خودروها مجدداً به چرخه تولید بازگردانده شده و موقعیت آن‌ها در توالی جدید تعیین شود.
- فرض می‌شود سایر انواع اختلالات، همچون توقف ماشین‌آلات یا تجهیزات رخ ندهد.

هدف و نتایج موردانتظار. فرایند برنامه‌ریزی در شرکت‌های خودروساز بدین صورت است که ابتدا روزهای کاری هفته، به مجموعه خودروهای سفارش‌شده طبق موعد تحویل آن‌ها و محدودیت‌های خط تولید اختصاص می‌یابد؛ سپس باید ترتیب ورود این خودروها به خط تولید مشخص شود؛ به‌طوری‌که محدودیت‌های سالن‌های تولیدی به بهترین نحو برآورده گردد.توالی تعیین‌شده به کلیه اعضا زنجیره تأمین اعلام می‌شود تا بر اساس آن قطعات موردنیاز در زمان مقرر و به‌صورت هماهنگ با یکدیگر، در خط مونتاژ تحویل شوند.

توالی عملیات ایجادشده فقط در صورتی به‌صورت کامل در سالن مونتاژ نهایی عملیاتی می‌شود که کلیه فرایندهای تولیدی و لجستیکی به‌صورت کامل و در موعد مقرر اجرا شوند؛ این در حالی است که اختلالات مختلفی روی می‌دهد و اجرای کامل توالی اولیه را با مانع مواجه

می‌سازد. برای مثال، مشکلات لجستیکی یا تولیدی در مراحل اولیه تولید، می‌توانند باعث تأخیر در رسیدن بدنه‌های موردنیاز با مشخصات مربوطه به سالن مونتاژ نهایی شوند و بدین ترتیب تولید خودرو منطبق با توالی اولیه با تأخیر روبه‌رو شود. بخش مهمی از انواع اختلالات به زنجیره تأمین مرتبط است. اختلال در زنجیره تأمین به‌صورت رخدادی که جریان مواد در زنجیره تأمین را قطع می‌کند و به توقف ناگهانی جریان محصولات منجر می‌گردد، تعریف می‌شود»[۳۳]. برای مثال، اگر قطعه خاصی که در خط مونتاژ نهایی موردنیاز است در ایستگاه مربوطه با کسری مواجه شود، در این صورت خودرو یا خودروهایی که به این قطعه نیاز دارند، بلوکه‌شده و نهایتاً به تعویق می‌افتند. پس از رسیدن قطعه دارای کسری و رفع اختلال تأمین، خودرو یا خودروهای بلوکه‌شده از این حالت خارج می‌شوند. برای این‌گونه خودروها باید موقعیت دیگری در توالی اولیه تعیین شود.

مسئله‌ای که در این پژوهش به آن پرداخته شده است، تعیین توالی خودروهای رفع بلوکه‌شده پس از رخداد اختلال و رفع مشکل تأمین است. با حل مدل ارائه‌شده در این پژوهش دو نتیجه حاصل می‌شود: ۱.حداقل‌کردن نقض محدودیت‌های نسبتی و ۲. حداقل‌کردن تغییرات توالی اولیه. به‌واسطه تحقق هدف نخست، محدودیت‌های عملیاتی مرتبط با سالن مونتاژ محقق می‌شود و با تحقق هدف دوم، ثبات[1] جریان مواد به‌عنوان یک شاخص کلیدی در نیل به تولید بدون آشفتگی[2] در طول زنجیره تأمین خودروساز محقق می‌گردد.

مدل ریاضی. مدل ریاضی پژوهش حاضر بر پایه مقاله پرانداستتر و همکاران (۲۰۰۸) توسعه یافته است [۲۵]. در این پژوهش برای نخستین بار علاوه بر تابع هدف کلاسیک مسئله تعیین توالی عملیات خودرو، تابع هدف ثبات نیز در مدل ریاضی مسئله در نظر گرفته شده و به این ترتیب یک محدودیت دیگر نیز به مجموعه محدودیت‌های مسئله اضافه‌شده است. مدل پیشنهادی شامل دو تابع هدف است که از طریق ضرایب وزنی به یک مسئله تک‌هدفه تبدیل شده است؛ همچنین برای نخستین بار در این پژوهش، رویکرد واکنشی برای مسئله تعیین توالی عملیات خودرو موردبررسی قرار گرفته است.

1. Stability
2. Turbulence

نمادها

اندیس‌ها. اندیس‌های مورداستفاده در مدل پیشنهادی عبارت‌اند از:

i: شمارنده موقعیت قرارگیری خودروها در توالی i=1,…, NPos

m: شمارنده خودروهای باقیمانده از دوره برنامه‌ریزی قبلی m=1,…, NCrP

cp: شمارنده قطعات خاص cp=1,…, NCp

k: شمارنده پیکربندی خودروها k=1,…, NConf

پارامترها. پارامترهای ضروری که باید به‌عنوان ورودی مشخص شوند، عبارت‌اند از:

NConf: تعداد پیکربندی‌های موجود.

NPos: تعداد کل خودروهایی که توالی آن‌ها باید مشخص شود.

N_{cp} / Q_{cp}: محدودیت نسبتی برای قطعه cp؛ یعنی در یک توالی شامل Q_{cp} خودرو، تنها N_{cp} خودرو از آن‌ها می‌توانند دارای قطعه cp باشند.

δ_k: تقاضا برای خودرو با پیکربندی k.

$AP_{cp,k}$: یک ماتریس صفر و یک که نشان می‌دهد آیا در پیکربندی k، قطعه cp به‌کار رفته است یا خیر؟

$EP_{cp,m}$: یک ماتریس صفر و یک که نشان می‌دهد آیا mاُمین خودرو موجود از دوره برنامه‌ریزی قبل دارای قطعه cp بوده است یا خیر؟

d_{cp}: تعداد دفعاتی که قطعه cp موردنیاز است.

متغیرهای تصمیم. متغیرهای تصمیم به‌کاررفته در مدل پیشنهادی عبارت‌اند از:

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

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

$g_{cp,i}$: متغیری که تعداد نقض محدودیت‌های نسبتی توسط قطعه cp در طول پنجره‌ای که در موقعیت i پایان می‌یابد را نشان می‌دهد.

CPR_i: زمان تکمیل پیش‌بینی‌شده خودرو iام مطابق با توالی اولیه قبل از رخداد اختلال.

CR_i: زمان تکمیل واقعی خودرو iام مطابق با توالی ثانویه پس از رخداد اختلال.

Z1: تابع هدف اول، نقض محدودیت‌های نسبتی.

Z2: تابع هدف دوم، جابه‌جایی خودروها در توالی پس از اختلال نسبت به توالی اولیه.

مدل پیشنهادی پژوهش به صورت زیر است:

$$Minimize(Z1) = \sum_{cp=1}^{Ncp} \sum_{i=1}^{NPos} g_{cp,i} \quad (۱)$$

$$Minimize(Z2) = \sum_{i=1}^{NPos} |CR_i - CPR_i| \quad (۲)$$

Subject to:

$$\sum_{i=1}^{NPos} p_{k,i} = \delta_k \qquad k=1,...,NConf \quad (۳)$$

$$\sum_{k=1}^{NConf} p_{k,i} = 1 \qquad i=1,...,NPos \quad (۴)$$

$$\sum_{i=1}^{NPos} \sum_{k=1}^{NConf} AP_{cp,k} \cdot p_{k,i} = d_{cp} \qquad cp=1,...,NCp \quad (۵)$$

$$r_{cp,i} \geq 0 \qquad cp=1,...,NCp \; ; \; i=1,...,NPos \quad (۶)$$

$$r_{cp,1} = \sum_{k=1}^{NConf} AP_{cp,k} . p_{k,1} \qquad cp=1,...,NCp \quad (۷)$$

$$r_{cp,i} = r_{cp,(i-1)} + \sum_{k=1}^{NConf} AP_{cp,k} . p_{k,i} \qquad cp=1,...,NCp \; ; \; i=2,...,NPos \quad (۸)$$

$$g_{cp,i} \geq 0 \qquad cp=1,...,NCp \; ; \; i=1,...,NPos \quad (۹)$$

$$g_{cp,i} \geq r_{cp,i} + \sum_{m=1}^{Q_{cp}-1} EP_{cp,m} - N_{cp} \qquad cp=1,...,NCp \; ; \; i=1,...,Q_{cp}-1 \quad (۱۰)$$

$$g_{cp,i} \geq r_{cp,i} - r_{cp,(i-Qcp)} - N_{cp} \qquad cp=1,...,NCp; \; i=Q_{cp},...,NPos \quad (۱۱)$$

$$CPR_i = i \qquad i=1,\ldots,NPos \qquad (۱۲)$$

$$CR_i = i.\ p_{k,i} \qquad i=1,\ldots,NPos\ ;\ k=1,\ldots,NConf \qquad (۱۳)$$

$$Minimize(\alpha.\frac{Z_1 - Z_1^*}{Z_1^- - Z_1^*} + (1-\alpha).\frac{Z_2 - Z_2^*}{Z_2^- - Z_2^*}) \qquad (۱۴)$$

در مدل پیشنهادی بالا، تابع هدف اول (۱)، تعداد نقض محدودیت‌های نسبتی را اندازه‌گیری می‌نماید. تابع هدف دوم (۲)، میزان تغییرات یا جابه‌جایی ترتیب خودروها در توالی پس از رخداد اختلال را نسبت به توالی اولیه اندازه‌گیری می‌کند. تابع جابه‌جایی این‌گونه تعریف می‌شود: فاصله بین موقعیت یک خودرو در توالی واقعی با موقعیت همان خودرو در توالی اولیه [۲۰].

برای تبدیل تابع هدف دوم که به‌صورت قدر مطلق است و غیرخطی محسوب می‌شود به یک تابع خطی و تسهیل حل آن توسط نرم‌افزار، تابع هدف بالا با حاصل‌جمع دو متغیر مجازی همیشه مثبت باعنوان «انحراف مثبت و انحراف منفی» جایگزین می‌شود. بدین ترتیب تابع هدف جدید مجموع دو متغیر بالا 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 قرار گرفته‌اند 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)، برابری تعداد دفعات استفاده از هر قطعه با میزان موردنیاز از آن قطعه را الزامی می‌سازد.

برای شمارش تعداد دفعات نقض محدودیت‌های نسبتی، لازم است ابتدا تعداد دفعاتی که قطعه cp تا موقعیت i مورداستفاده قرار گرفته است، شمارش شود. این کار توسط معادلات (۷) و (۸) انجام می‌شود. نامساوی (۶)، غیرمنفی‌بودن متغیر $r_{cp,i}$ را الزامی می‌سازد.

میزان نقض محدودیت‌های نسبتی صورت‌گرفته برای قطعه cp طی پنجره زمانی منتهی به موقعیت iام به‌واسطه نامساوی‌های (۱۰) و (۱۱) تعیین می‌شود. نامساوی (۱۰) برای آن دسته از پنجره‌های زمانی به‌کار می‌رود که در آن‌ها خودروهای باقیمانده از روز قبل به‌حساب می‌آیند و نامساوی (۱۱) برای سایر پنجره‌های زمانی مورداستفاده قرار می‌گیرد. محدودیت (۹) نامنفی‌بودن این متغیر را تضمین می‌کند. به‌وسیله رابطه (۱۲)، پس از کمینه‌سازی تابع هدف اول و تعیین توالی اولیه، پیش‌بینی زمان تکمیل عملیات مونتاژ مشخص می‌شود. محدودیت (۱۳) زمان تکمیل واقعی عملیات مونتاژ در توالی ثانویه پس از رخداد اختلال را محاسبه می‌کند.

برای حل این مسئله چندهدفه، با استفاده از ضرایب α و $1-\alpha$ به‌ترتیب برای Z1 و Z2، یک

مسئله تک‌هدفه ایجاد می‌شود (تابع هدف تلفیقی ۱۴). این ضرایب به‌ترتیب نمایانگر وزن تابع هدف اول و دوم در مسئله تک‌هدفه حاصل هستند. برای جمع‌پذیرشدن این دو تابع هدف، آن‌ها با استفاده از رابطه $\frac{z-z^*}{z^- - z^*}$ به مقیاس[1] در آورده می‌شوند. در این رابطه z^* و z^- به‌ترتیب بهترین و بدترین مقادیر به‌دست‌آمده برای تابع هدف موردنظر هستند؛ به این علت، ابتدا با ایجاد راه‌حل‌های تصادفی و محاسبه توابع هدف مرتبط، برآورد اولیه‌ای برای بهترین و بدترین مقادیر توابع هدف تعیین می‌شود؛ سپس در صورت نقض آن‌ها در فرایند حل مسئله، مقادیر بالا بهنگام می‌شوند.

با توجه به محدب‌بودن ناحیه موجه و خطی‌بودن مدل، به ازای ضرایب وزنی مفروض (α و $1-\alpha$)، جواب بهینه مطلق برای تابع هدف تلفیقی بالا وجود دارد. این جواب برای مسائل کوچک در زمان قابل‌قبول دردسترس است؛ اما در مسائل متوسط و بزرگ به‌واسطه افزایش ابعاد مسئله در زمان معقول قابل‌دسترس نیست. این روش در مبانی نظری بهینه‌سازی چندهدفه باعنوان «روش پارامتریک (وزین)» توسط پژوهشگران استفاده شده است.

مدل تشریح شده در بالا، در نرم‌افزار GAMS 23 کدنویسی شده و در روش پیشنهادی باعنوان برنامه «Optimizer» فراخوان شده است.

الگوریتم پیشنهادی. حل مسئله طرح‌شده در این پژوهش، طی دو فاز اصلی صورت می‌پذیرد. ابتدا فرض می‌شود که هیچ‌گونه اختلالی وجود ندارد و کلیه قطعات موردنیاز برای تولید خودروها مطابق برنامه تولید روزانه دردسترس هستند؛ در این صورت با فراخوان برنامه Optimizer، توالی اولیه تعیین شده و مطابق آن توالی، بدنه‌ها وارد خط مونتاژ می‌شوند. برای تعیین توالی اولیه، مسئله بهینه‌سازی تابع هدف اول (میزان نقض محدودیت‌های نسبتی: z1) در قالب برنامه optimizer که با نرم‌افزار GAMS توسعه یافته است، حل می‌شود. مسئله ذکرشده مشتمل بر تابع هدف ۱ و محدودیت‌های ۳ الی ۱۲ است. خروجی این برنامه نیز عبارت است از: تقدم و تأخر مجموعه کلیه خودروهایی که در افق برنامه‌ریزی باید تعیین توالی شوند با این فرض که هیچ‌گونه کسری قطعه‌ای در فرایند مونتاژ آن‌ها وجود نداشته باشد؛ سپس به‌صورت ناگهانی و پیش‌بینی‌نشده اختلال در تأمین به‌صورت کسری برخی از قطعات موردنیاز برای انجام عملیات مونتاژ رخ می‌دهد. ازآنجاکه از قبل اطلاعی در مورد رخداد اختلال وجود ندارد؛ بنابراین لازم است در مواجهه با اختلال، توالی خودروهای ورودی به خط تولید به‌صورت آنی و در کمترین زمان ممکن، به‌روزآوری شود؛ درواقع رخداد کسری قطعه به‌عنوان یک رخداد تصادفی در نظر گرفته شده و پس از وقوع آن، با اتخاذ رویکرد واکنشی، توالی خودروهای باقیمانده مشخص

1. Normalize

می‌شود. بدین جهت گزینه‌های متفاوتی متصور است. برای مثال، استفاده از قطعات جایگزین یکی از این موارد است. گزینه‌ای که در این مقاله به آن پرداخته شده است، بلوکه‌شدن خودروی کسری‌دار و به‌تعویق‌افتادن تولید آن تا زمان رفع مشکل تأمین است.

توالی حاصل از تجدید توالی عملیات نسبت به توالی اولیه دارای تغییراتی است و از این نظر می‌تواند باعث بروز آشفتگی در طول زنجیره تأمین و مشکلات لجستیکی شود؛ بنابراین در این مقاله برای نخستین بار مسئله تعیین توالی عملیات خودرو به‌صورت آنی و با رویکرد واکنشی در نظر گرفته شده و در تعیین توالی خودروهای ورودی به خط مونتاژ نهایی علاوه بر معیار کلاسیک کمینه‌سازی نقض محدودیت‌های نسبتی، ثبات توالی اولیه نیز در نظر گرفته شده است.

جواب بهینه نهایی مسئله که عبارت است از: توالی پس از رخداد اختلال، با استفاده از مدل ریاضی پیشنهادی شرح داده شده (روابط ۱ تا ۱۴،۱۳،۱۱)، که در محیط نرم‌افزار GAMS 23 کدنویسی شده است، به‌دست می‌آید.

لازم به توضیح است که زمان تکمیل پیش‌بینی‌شده (CPR) در فاز اول حل مسئله، پس از تعیین توالی اولیه، مشخص می‌شود. این مقدار در فاز دوم حل مسئله به‌عنوان مقدار ثابت وارد مدل می‌شود و در محاسبه تابع هدف جابه‌جایی (رابطه ۲) مورداستفاده قرار می‌گیرد.

ازآنجاکه مسئله تعیین توالی عملیات خودرو یک مسئله NP-hard است [۱۸] و یافتن جواب بهینه در زمان کوتاه برای این مسئله در ابعاد بزرگ غیرممکن است؛ بنابراین یک الگوریتم فراابتکاری برای حل مسئله مطرح‌شده ارائه می‌شود. این الگوریتم در محیط نرم‌افزار MATLAB R2013b کدنویسی شده است.

الگوریتم جست‌وجوی همسایگی متغیر[1]. الگوریتم جست‌وجوی همسایگی متغیر (VNS) یکی از روش‌های فراابتکاری[2] است که برای حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی و جامع[3] استفاده می‌شود. ایده پایه‌ای این الگوریتم، تغییر سیستماتیک همسایگی در یک جست‌وجوی محلی است. روش VNS به‌وسیله هنسن و ملادنوویچ (۱۹۹۷) ارائه شده است [۱۳]. الگوریتم VNS به‌علت آسانی استفاده و دستاورد آن در حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی، به‌شدت موردتوجه قرار گرفته است. به‌طور پایه‌ای یک روش جست‌وجوی محلی، جست‌وجو در یک فضای محدود از کل فضای حل را انجام می‌دهد؛ بنابراین یافتن جواب‌های بهتر بدون بررسی بیشتر را تسهیل می‌کند. روش VNS یک رویه جست‌وجوی ساده و اثربخش بر پایه تغییر سیستماتیک همسایگی در طول جست‌وجو است. این روش، با تغییر ساختار همسایگی از تله بهینه محلی فرار می‌کند. روش VNS یک جواب اولیه را انتخاب می‌کند؛ سپس این جواب در طول دو چرخه تودرتو یا

1. Variable Neighborhood Search
2. Meta-Heuristics
3. Combinatorial and Global Optimization Problems

آشیانه‌ای[1] توسط دو تابع ارتعاش[2] و جست‌وجوی محلی[3]، دست‌کاری می‌شود. چرخه بیرونی به‌عنوان یک اصلاح‌کننده[4] چرخه داخلی عمل می‌کند؛ درحالی‌که چرخه داخلی جست‌وجوی دقیقی درباره جواب جاری انجام می‌دهد. جست‌وجوی محلی یک جواب بهبودیافته را در همسایگی محلی جواب جاری، جست‌وجو می‌کند؛ درحالی‌که ارتعاش، جواب را با استفاده از جابه‌جایی به یک همسایگی محلی دیگر متنوع می‌کند. چرخه داخلی تا زمانی تکرار می‌شود که موجب بهبود جواب شود و یا به بیشینه تکرار از قبل تعریف‌شده برسد. زمانی که یک چرخه داخلی تکمیل شد، چرخه خارجی مجدد تغییر خواهد کرد؛ مگر آنکه شرط توقف تأمین‌شده باشد. ازآنجاکه ساختارهای همسایگی نقش کلیدی در عملکرد VNS دارند، رویه‌های تغییر ساختار همسایگی باید با دقت بسیار زیاد برای رسیدن به یک VNS کارا، انتخاب شود.
شبه کد الگوریتم VNS در شکل ۳ نشان داده شده است.

در ادامه، مشخصه‌های مختلف الگوریتم پیشنهادی برای حل مسئله موردنظر تشریح می‌شود.
طرح نمایش جواب. برای طراحی الگوریتم VNS برای مسئله موردنظر، یک طرح نمایش مناسب برای نشان‌دادن مشخصه‌های جواب، موردنیاز است. ساختار کلی نمایش جواب مورداستفاده در این مقاله، در شکل ۴ نشان داده شده است. در این طرح به هر یک از موقعیت‌های موجود یکی از پیکربندی‌های باقیمانده تخصیص می‌یابد.
تولید جواب اولیه. در این مقاله، رویکردهای متفاوتی همچون تولید اعداد تصادفی یا ترتیب اولیه خودروها برای ایجاد جواب اولیه مورداستفاده قرار گرفته است.

```
Input: a set of neighborhood structures, N_l, l=1, 2,…,t_max
S=generate initial solution ();
Repeat
 L=1;
 While (l<= t_max
 S'=Shaking (S,N_l)
 S'*=Local search(S')
 If f(S'*) < f(s)
 S= S'*
 L=1;
 Else
 L=l+1;
 Until stopping condition are met.
Output: The best solution.
```

شکل ۳. شبه کد برای الگوریتم VNS

1. Nested
2. Shaking
3. Local Search
4. Refresher

موقعیت	n	n-1	....	۲	۱
نوع پیکربندی	k_n	K_{n-1}	....	K_2	K_1

شکل ۴. نمایش جواب

ساختارهای همسایگی مورداستفاده و ترتیب آن‌ها. ساختارهای همسایگی عبارت‌اند از: جواب‌هایی که با یک تغییر در جواب حاصل می‌شوند. عملکرد روش فراابتکاری VNS وابسته به کارایی ساختار همسایگی است. در مسائل توالی عملیات، با تغییر توالی می‌توان ساختارهای همسایگی متعددی را تعریف کرد. در الگوریتم پیشنهادی از چهار ساختار همسایگی استفاده شده است. این چهار ساختار همسایگی عبارت‌اند از: جابه‌جایی دوتایی، جابه‌جایی چندگانه، انتقال و معکوس‌کردن.

ترتیب ساختارهای همسایگی استفاده‌شده در الگوریتم پیشنهادی به‌ترتیب ذکر شده است. این ترتیب در مرحله تنظیم پارامترهای الگوریتم پیشنهادی و پس از حل تعداد مسائل نمونه در ابعاد و اندازه‌های مختلف حاصل شده است.

عملگر جابه‌جایی دوتایی: پیکربندی خودروهای واقع در موقعیت i و j با یکدیگر جابه‌جا می‌شوند. پیکربندی خودروهای مابین این دو موقعیت بدون تغییر باقی می‌مانند.

عملگر جابه‌جایی چندگانه: تعداد k تا از موقعیت‌ها خالی شده و پیکربندی خودروهای مربوط به آن‌ها به‌صورت موقتی در استخری قرار داده می‌شوند؛ سپس پیکربندی‌های ذکرشده به موقعیت‌های خالی شده تخصیص مجدد می‌یابند.

عملگر انتقال: پیکربندی خودروی واقع در موقعیت j به موقعیت i منتقل می‌گردد. بدین ترتیب همه خودروهای واقع در بین این دو موقعیت به اندازه یک واحد تغییر مکان خواهند یافت.

عملگر معکوس نمودن: ترتیب قرارگیری کلیه خودروهای مابین موقعیت‌های i و j برعکس می‌شود.

شرط توقف. الگوریتم VNS تا زمانی که شرط توقف تأمین شود ادامه می‌یابد. بیشینه زمان حل مجاز، بیشینه تعداد تکرار الگوریتم و بیشینه تعداد تکرار بین دو بهبود می‌توانند به‌عنوان شرط توقف انتخاب شود. در این مقاله، تعداد تکرار از قبل تعیین‌شده برای شرط توقف استفاده شد.

تنظیم پارامترهای الگوریتم پیشنهادی. انتخاب مناسب پارامترها نقش بسیار مهمی در کارایی روش‌های فراابتکاری دارند. پارامترهای الگوریتم VNS و سطوح مختلف آن‌ها در جدول ۲، آورده شده است. آزمون‌های صورت‌گرفته بر روی نمونه مسائل نشان می‌دهد که سطوح منتخب تعیین‌شده در جدول ۲، از نظر زمان حل و میزان نزدیکی به حل بهینه، نتایج بهتری را در مقایسه با دیگر مقادیر تولید می‌کنند.

جدول ۲. پارامترها و سطوح منتخب آن‌ها در روش VNS

پارامتر	تعداد سطوح	شرح	سطوح منتخب
تعداد تکرار	۳	۵۰،۱۰۰ ,۱۵۰	۱۰۰
جواب اولیه	۲	تصادفی، توالی اولیه	توالی اولیه
ترتیب	۲۴	جایگشت‌های ۴ عملگر	جابه‌جایی دوتایی، جابه‌جایی چندگانه، انتقال، معکوس‌کردن

٤. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

طراحی مسائل آزمون. در این پژوهش برای انجام آزمون‌های محاسباتی از مسائل موجود در سایت www.csplib.org استفاده شد [۱۵]. هر یک از این مسائل شامل تعیین توالی عملیات ۲۰۰ خودرو با ۵ قطعه خاص و ۱۷ تا ۳۰ پیکربندی متفاوت هستند.

برای طراحی مسائل آزمون لازم است، شرایط بلوکه‌شدن خودروها در خط مونتاژ نهایی شبیه‌سازی شود. بدین منظور سه عامل اصلی وجود دارد که بر ابعاد مسئله مؤثر هستند:

۱. فاصله‌ای که در آن خودروها بلوکه می‌شوند؛ ۲. درصد خودروهایی که بلوکه می‌شوند؛ ۳. فاصله‌ای که در آن خودروها از حالت بلوکه خارج شده و جهت انجام عملیات تولید در توالی عملیات قرار می‌گیرند

سناریوهای ممکن برای رخداد اختلال در قالب ترکیبات مختلف سه پارامتر بالا طراحی و مقادیر مرتبط در جدول ۳، آورده شده است. طبق این جدول، سه دسته مختلف مسئله در ابعاد بزرگ، متوسط و کوچک برای آزمون روش حل طراحی شده است. در هر یک از این دسته‌ها ۹ زیرمسئله وجود دارد که به ازای هر یک از آن‌ها با استفاده از مجموعه مسائل کتابخانه ۵ نمونه مسئله تولید می‌شود. برای مثال، اگر فاصله تجدید توالی عملیات، فاصله بلوکه‌شدن و نرخ بلوکه‌شدن به‌ترتیب برابر با ۲۰، ۱۰۰ و ۱۰ باشد، به‌صورت تصادفی یکی از مسائل موجود در کتابخانه مسائل انتخاب شده و سپس ۱۰ درصد ۱۰۰ خودروی اول موجود در توالی اولیه ـ یعنی ۱۰ خودرو - به‌صورت تصادفی با پیشامد بلوکه‌شدن روبه‌رو می‌شوند؛ سپس به همراه ۲۰ خودروی انتهایی توالی اولیه در فرایند تجدید توالی عملیات قرار می‌گیرند. هر یک از این مسائل

به ازای ۴ مقدار مختلف ۱، ۰/۷۵، ۰/۵، ۰/۲۵ برای مقدار وزن α حل شده‌اند. به‌این‌ترتیب مجموع تعداد مسائل آزمون برابر با ۵۴۰ است که هر یک از آن‌ها نیز ۵ بار به‌وسیله روش پیشنهادی حل شده‌اند.

جدول ۳. طراحی مسائل آزمون و سناریوهای ممکن برای رخداد اختلال

ابعاد مسئله	فاصله تجدید توالی عملیات	فاصله بلوکه‌شدن	درصد بلوکه‌شدن تصادفی
کوچک	۲۰	۲۰،۵۰،۱۰۰	۵،۱۰،۲۰
متوسط	۵۰	۲۰،۵۰،۱۰۰	۵،۱۰،۲۰
بزرگ	۸۰	۲۰،۵۰،۱۰۰	۵،۱۰،۲۰

اعتبارسنجی و نتایج حل مسائل آزمون. برای اعتبارسنجی روش حل پیشنهادی، این مسائل در حالت تک‌هدفه حل و با جواب‌های موجود در سایت مرجع مقایسه شد. نتیجه این مقایسه نشان‌دهنده انطباق کامل جواب‌های به‌دست‌آمده با جواب‌های موجود در سایت بود؛ بنابراین مدل ریاضی توسعه‌یافته در این مقاله دارای اعتبار لازم است. مسئله دوهدفه مطرح در این مقاله تا به حال توسط هیچ یک از پژوهشگران حل نشده است.

برای ارزیابی روش حل پیشنهادی، در مسائل با ابعاد کوچک، مقدار تابع هدف تلفیقی و زمان مربوطه با مقادیر بهینه حاصل از نرم‌افزار GAMS مقایسه شده‌اند. در مسائل با ابعاد متوسط و بزرگ روش حل بهینه در زمان‌های معمول جواب نمی‌دهد؛ بنابراین روش جست‌وجوی همسایگی متغیر به ازای همه جایگشتهای ۴ عملگر مورد استفاده اجرا شده و مقدار حاصل باعنوان *VNS مورد مقایسه قرار گرفته است. برای هر یک از این مسائل جواب اولیه‌ای نیز موجود است که عبارت است از اینکه خودروهای بلوکه‌شده پس از رفع بلوکه‌شدن در ابتدای فاصله رفع بلوکه‌شدن قرار گرفته و در زودترین زمان ممکن در فرایند مونتاژ قرار گیرند. این روش باعنوان «ادامه توالی اولیه» آورده شده است. نتایج این مقایسه در جدول‌های ۴، ۵ و ۶ به‌ترتیب برای مسائل با ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ آورده شده است؛ همچنین به‌صورت نموداری مقایسه مقادیر تابع هدف و زمان محاسباتی روش‌های مختلف به‌ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ آورده شده است. طبق این شکل‌ها اگرچه روش ادامه توالی اولیه از نظر زمان محاسباتی، زمانی در حد صفر به خود اختصاص می‌دهد؛ اما مقادیر تابع هدف در مقایسه با دو روش VNS و *VNS فاصله بسیار زیادی دارد و به هیچ وجه دارای مطلوبیت نیست؛ همچنین در همه ابعاد مسائل بزرگ، متوسط و کوچک، مقادیر تابع هدف حاصل از روش پیشنهادی VNS تا حد بسیار خوبی نزدیک به جواب حاصل از روش *VNS یا GAMS است. نکته حائزاهمیت این است که

روش پیشنهادی با صرف زمانی کمتر از یک درصد زمان مربوط به روش *VNS، این نتایج را به‌دست می‌دهد. این موارد نشان‌دهنده مطلوبیت کاربردی روش پیشنهادی در شرایط واقعی تولید از نظر ارائه جواب‌های نزدیک به بهینه در زمان‌های بسیار کوتاه (نزدیک به یک ثانیه) هستند.

جدول ۴. نتایج محاسباتی حل مسائل با اندازه کوچک

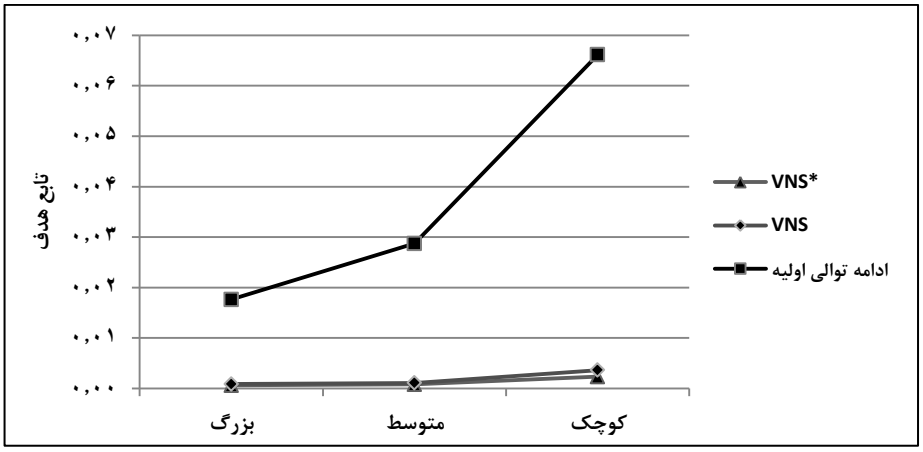
سطح α	درصد بلوکه	GAMS		VNS		Continue first sequence	
		مقدار تابع هدف	زمان محاسباتی (ثانیه)	مقدار تابع هدف	زمان محاسباتی (ثانیه)	مقدار تابع هدف	زمان محاسباتی (ثانیه)
۰/۲۵	۰/۰۵	۰/۰۰۰۷	۳۷/۶	۰/۰۰۰۷	۰/۶	۰/۰۰۹۱	۰/۰۰۰۸
	۰/۱	۰/۰۰۰۶	۴۶/۳	۰/۰۰۰۶	۰/۸	۰/۰۲۱۲	۰/۰۰۰۸
	۰/۲	۰/۰۰۰۳	۷۴/۵	۰/۰۰۰۳	۱/۲	۰/۰۳۸۲	۰/۰۰۰۹
۰/۵	۰/۰۵	۰/۰۰۲۴	۳۰/۷	۰/۰۰۳۰	۰/۴	۰/۰۲۰۶	۰/۰۰۰۸
	۰/۱	۰/۰۰۲۳	۳۹/۸	۰/۰۰۲۹	۰/۷	۰/۰۴۵۸	۰/۰۰۰۸
	۰/۲	۰/۰۰۰۷	۵۸/۷	۰/۰۰۱۰	۰/۹	۰/۰۷۶۸	۰/۰۰۰۹
۰/۷۵	۰/۰۵	۰/۰۰۷۹	۳۰/۲	۰/۰۰۹۸	۰/۴	۰/۰۴۰۰	۰/۰۰۰۸
	۰/۱	۰/۰۱۰۲	۴۰/۷	۰/۰۱۲۳	۰/۶	۰/۰۸۰۵	۰/۰۰۰۸
	۰/۲	۰/۰۰۳۰	۵۸/۶	۰/۰۰۳۸	۱/۰	۰/۱۱۸۶	۰/۰۰۰۹
۱	۰/۰۵	۰/۰۰۰۰	۲۷/۹	۰/۰۰۵۲	۰/۴	۰/۰۶۷۱	۰/۰۰۰۸
	۰/۱	۰/۰۰۰۰	۳۲/۸	۰/۰۰۲۶	۰/۵	۰/۱۱۳۲	۰/۰۰۰۸
	۰/۲	۰/۰۰۰۰	۴۴/۴	۰/۰۰۱۴	۰/۷	۰/۱۶۲۴	۰/۰۰۰۹

جدول ۵. نتایج محاسباتی حل مسائل با اندازه متوسط

سطح α	درصد بلوکه	VNS*		VNS		Continue first sequence	
		مقدار تابع هدف	زمان محاسباتی (ثانیه)	مقدار تابع هدف	زمان محاسباتی (ثانیه)	مقدار تابع هدف	زمان محاسباتی (ثانیه)
۰/۲۵	۰/۰۵	۰/۰۰۰۳	۸۶/۶۶	۰/۰۰۰۳	۱/۴۲	۰/۰۰۵۰	۰/۰۰۱۱
	۰/۱	۰/۰۰۰۰	۱۴۵/۹۸	۰/۰۰۰۱	۲/۵۰	۰/۰۱۰۴	۰/۰۰۱۲
	۰/۲	۰/۰۰۰۰	۱۳۳/۷۷	۰/۰۰۰۰	۳/۶۴	۰/۰۲۰۵	۰/۰۰۱۳
۰/۵	۰/۰۵	۰/۰۰۲۱	۶۸/۳۳	۰/۰۰۲۲	۱/۱۹	۰/۰۱۲۴	۰/۰۰۱۱
	۰/۱	۰/۰۰۱۴	۱۰۰/۴۰	۰/۰۰۲۰	۱/۷۶	۰/۰۲۳۶	۰/۰۰۱۱
	۰/۲	۰/۰۰۰۴	۱۶۵/۹۷	۰/۰۰۰۵	۲/۴۰	۰/۰۳۴۰	۰/۰۰۱۳
۰/۷۵	۰/۰۵	۰/۰۰۳۶	۶۸/۸۹	۰/۰۰۳۸	۱/۳۴	۰/۰۲۲۵	۰/۰۰۱۲
	۰/۱	۰/۰۰۱۵	۹۸/۴۶	۰/۰۰۱۹	۱/۸۲	۰/۰۳۶۵	۰/۰۰۱۲
	۰/۲	۰/۰۰۰۶	۹۳/۸۲	۰/۰۰۰۹	۱/۲۶	۰/۰۲۵۵	۰/۰۰۰۹
۱	۰/۰۵	۰/۰۰۰۰	۷۱/۹۲	۰/۰۰۰۶	۱/۳۷	۰/۰۳۵۱	۰/۰۰۱۲
	۰/۱	۰/۰۰۰۰	۸۴/۳۲	۰/۰۰۰۸	۱/۵۴	۰/۰۵۱۰	۰/۰۰۱۱
	۰/۲	۰/۰۰۰۰	۶۵/۰۵	۰/۰۰۰۰	۱/۳۴	۰/۰۶۸۱	۰/۰۰۱۲

جدول ۶. نتایج محاسباتی حل مسائل با اندازه بزرگ

سطح α	درصد بلوکه	VNS*		VNS		Continue first sequence	
		مقدار تابع هدف	زمان محاسباتی (ثانیه)	مقدار تابع هدف	زمان محاسباتی (ثانیه)	مقدار تابع هدف	زمان محاسباتی (ثانیه)
۰/۲۵	۰/۰۵	۰/۰۰۰۲	۲۴۲/۹	۰/۰۰۰۲	۴/۵	۰/۰۰۳۷	۰/۰۰۱۴
	۰/۱	۰/۰۰۰۰	۲۲۹/۸	۰/۰۰۰۰	۳/۸	۰/۰۰۶۷	۰/۰۰۱۴
	۰/۲	۰/۰۰۰۰	۲۶۹/۵	۰/۰۰۰۰	۴/۵	۰/۰۰۷۲	۰/۰۰۱۴
۰/۵	۰/۰۵	۰/۰۰۲۲	۲۳۸/۶	۰/۰۰۲۴	۵/۴	۰/۰۱۰۹	۰/۰۰۱۴
	۰/۱	۰/۰۰۰۴	۲۰۲/۱	۰/۰۰۰۴	۳/۹	۰/۰۱۴۰	۰/۰۰۱۴
	۰/۲	۰/۰۰۰۳	۲۰۹	۰/۰۰۰۴	۳/۷	۰/۰۱۴۹	۰/۰۰۱۳
۰/۷۵	۰/۰۵	۰/۰۰۲۳	۱۸۴/۸	۰/۰۰۲۵	۲/۸	۰/۰۱۷۱	۰/۰۰۱۳
	۰/۱	۰/۰۰۱۸	۲۹۷/۵	۰/۰۰۲۷	۵/۶	۰/۰۲۴۶	۰/۰۰۱۳
	۰/۲	۰/۰۰۰۱	۱۹۹/۴	۰/۰۰۰۲	۲/۸	۰/۰۲۲۳	۰/۰۰۱۴
۱	۰/۰۵	۰/۰۰۰۰	۱۱۸/۴	۰/۰۰۱۳	۱/۷	۰/۰۲۲۸	۰/۰۰۱۴
	۰/۱	۰/۰۰۰۰	۱۱۵/۴	۰/۰۰۰۰	۲/۳	۰/۰۳۶۰	۰/۰۰۱۴
	۰/۲	۰/۰۰۰۰	۱۱۲/۳	۰/۰۰۰۴	۲/۱	۰/۰۳۱۴	۰/۰۰۱۴



*شکل ۵. مقایسه مقادیر تابع هدف حاصل از روش‌های VNS,*VNS و ادامه توالی اولیه در مسائل کوچک، متوسط و بزرگ*

*شکل ۶. مقایسه زمان‌های محاسباتی روش‌های VNS,*VNS و ادامه توالی اولیه در مسائل کوچک، متوسط و بزرگ*

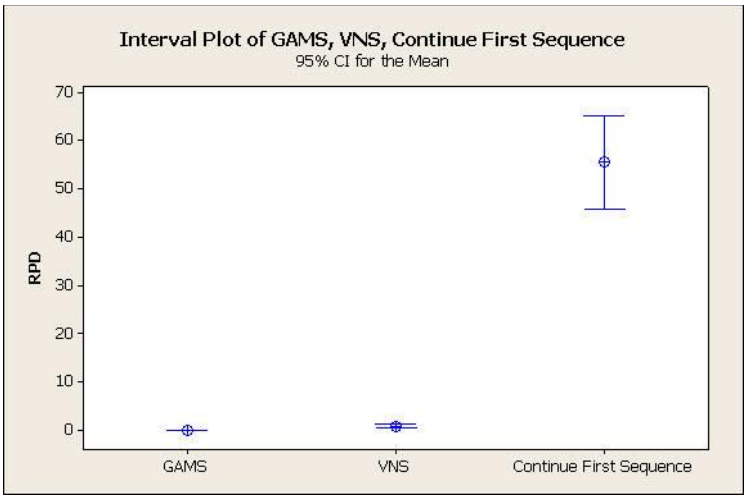
در این پژوهش، شاخص عملکرد درصد انحراف نسبی[1] برای مقایسه ۳ روش حل استفاده شده است. مقدار این شاخص به‌صورت رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{RPD} = \frac{Alg_{sol} - Min_{sol}}{Min_{sol}} * 100$$

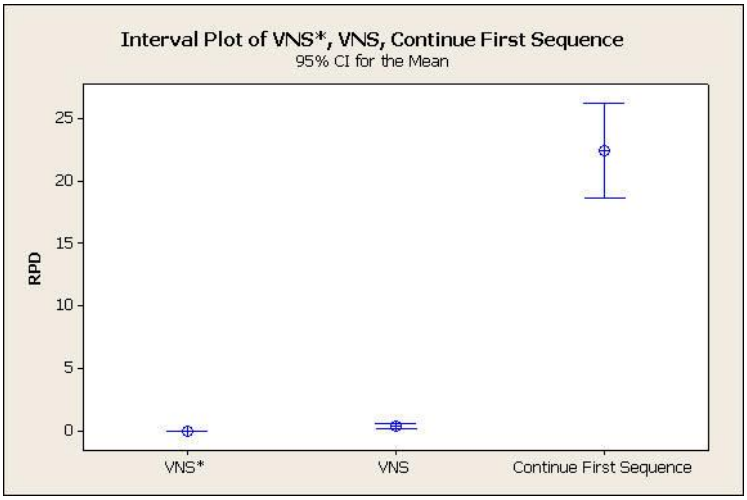
در رابطه بالا ALG_{sol} مقدار تابع هدف حاصل از یک نمونه با استفاده از الگوریتم موردنظر و Min_{sol} کمینه مقدار تابع هدف حاصل از حل آن نمونه با استفاده از روش‌های حل موردمقایسه هستند.

1. Relative Percentage Deviation (RPD)

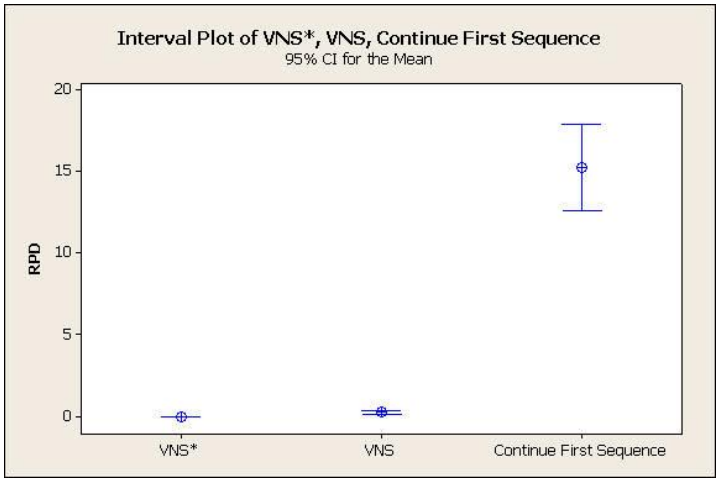
مقایسه درصد انحراف نسبی حاصل از روش‌های حل بهینه (*VNS)، VNS و ادامه توالی اولیه برای مسائل کوچک، متوسط و بزرگ به‌ترتیب در شکل‌های ۷، ۸ و ۹ آورده شده است. روش پیشنهادی VNS به‌صورت کاملاً مشهود نسبت به ادامه توالی اولیه برتری دارد و همچنین در همه ابعاد مسئله، مقادیر درصد انحراف نسبی روش پیشنهادی مشابه درصد انحراف نسبی حل بهینه (یا بهترین جواب موجود) است.



شکل ۷. مقایسه میانگین درصد انحراف نسبی با بازه اطمینان ۹۵ درصد روش‌های حل بهینه GAMS، VNS و ادامه توالی اولیه در مسائل کوچک



*شکل ۸. مقایسه میانگین درصد انحراف نسبی با بازه اطمینان ۹۵ درصد روش‌های *VNS، VNS و ادامه توالی اولیه در مسائل متوسط*



*شکل ۹. مقایسه میانگین درصد انحراف نسبی با بازه اطمینان ۹۵ درصد روش‌های *VNS، VNS و ادامه توالی اولیه در مسائل بزرگ*

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مقاله، مسئله تعیین توالی عملیات خودرو در حالتی که به‌صورت غیرمنتظره، پیشامد اختلال در تأمین رخ دهد و با درنظرگرفتن دو تابع هدف کمینه‌سازی نقض محدودیت‌های نسبتی و کمینه‌سازی تغییر نسبت به توالی اولیه، بررسی شده است. به‌منظور ارائه حل ریاضی برای این مسئله، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح با استفاده از نرم‌افزار GAMS23 توسعه یافته است؛ سپس به علت بالابودن زمان حل بهینه و با توجه به نیاز به روشی که در زمان کمتر از یک دقیقه بتواند نسبت به رخداد اختلال واکنش نشان دهد و توالی عملیات را به‌روزآوری کند، یک روش حل فراابتکاری مبتنی بر جست‌وجوی همسایگی متغیر ارائه شده است. برای ارزیابی روش حل پیشنهادی با استفاده از مسائل کتابخانه‌ای، طی سه دسته مختلف مسائل با ابعاد بزرگ، متوسط و کوچک، مجموعاً تعداد ۵۴۰ مسئله مختلف به ازای وزن‌های مختلف توابع هدف، بررسی و تحلیل شدند. نتایج این بررسی نشان‌دهنده کارایی و اثربخشی مناسب روش حل ارائه‌شده از نظر ارائه جواب‌های نزدیک به حل بهینه در زمان بسیار مناسب است.

برای ادامه مطالعه در زمینه مسئله موردبررسی، کاربرد رویکرد چندهدفه به‌منظور تعیین مجموعه جواب‌های بهینه پارتو توصیه می‌شود؛ همچنین با توجه به اینکه در خطوط مونتاژ خودرو از ظرفیت بافرهای بین مراحل مختلف تولیدی برای ذخیره‌سازی خودروهای بلوکه‌شده استفاده می‌شود؛ بنابراین ایجاد مدلی که به‌واسطه آن بتوان موجودی در جریان ساخت را کمینه کرد، پیشنهاد می‌شود.

منابع

1. Alem Tabriz, A., & Bagherzadeh Azar, M. (2012). Formulating Manufacturing Strategies – Case study in Automotive Industry. *Journal of Indusrial Management Perspective, 5*, 131-153.

2. Alinezhad, A., Sabet, S., & Ekhtiari, M. (2014). Solving Fuzzy Multiple Objective Dynamic Cellular Manufacturing System Problem using a Hybrid Algorithm of NSGA-II and Progressive Simulated Annealing. *Journal of Indusrial Management Perspective, 15*, 131-156.

3. Bard, J.F., Dar-El, E., Shtub, A., (1992). An analytic framework for sequencing mixed model assembly lines. *International Journal of Production Research, 30*, 35–48.

4. Bolat, A., (1997). Stochastic procedures for scheduling minimum job sets on mixed model assembly lines. *Journal of Operational Research Society, 48*, 490-501.

5. Boysen, N., et al. (2009). Sequencing mixed-model assembly lines: Survey, classification and model critique. *European Journal of Operational Research, 192*, 349–373.

6. Boysen, N., et al. (2011). Sequencing mixed-model assembly lines to minimize the number of work overload situations. *International Journal of Production Research, 49(16)*, 4735-4760.

7. Boysen, N., Golle, U., Rothlauf, F. (2011). The Car Resequencing Problem with Pull-Off Tables. *German Academic Association for Business Research (VHB), 4(2)*, 276-292.

8. Boysen, N., Scholl, A., Wopperer, N. (2012). Resequencing of mixed-model assembly lines: survey and research agend. 9. Celano, G., Costa, A., Fichera, S., Perrone, G., (2004). Human factor policy testing in sequencing of manual mixed model assembly lines. *Computers & Operations Research 31*, 39–59.

10. Davenport, A.J., & Tsang, E. (1999). Solving constraint satisfaction sequencing problems by iterative repair. In: Proceedings of the First International Conference on the Practical Applications of Constraint Technologies and Logic Programming (PACLP), 345–357.

11. Ding, F.-Y., Sun, H. (2004). 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)*, 525–1543.

12. Franz, C., Hällgren, E., Koberstein, A. (2014). Resequencing orders on mixed-model assembly lines: Heuristic approaches to minimize the number of overload situations, *International Journal of Production Research.*

13. Hansen, P. & Mladenovic, N. (1997).Variable neighborhood search. *Computers and Operations Research, 24(11),* 1097-1100.

14. Gan, H.-S. & Wirth, A., (2005). Comparing deterministic, robust and online scheduling using entropy. *International Journal of Production Research, 43*, 2113–2134.

15. Gent, I.P., Walsh, T. (1999). CSPLIB: A benchmark library for constraints, Technical Report, APES-09-1999, Department of Computer Science, University of Strathclyde, UK.

16. Gravel, M., Gagne, C., and Price, W. L. (2006). Review and comparison of three methods for the solution of the car sequencing problem. *Journal of the Operational Research Society, 56(11)*, 1287–1295.

17. Joly, A., & Frein, Y. (2008). Heuristics for an industrial car sequencing problem considering paint and assembly shop objectives. *Computers & Industrial Engineering, 55,* 295–310.

18. Kis, T. (2004). On the complexity of the car sequencing problem. *Operations Research Letters, 32(4),* 331–335.

19. Kubiak, W. (2003). Cyclic just-in-time sequences are optimal. *Journal of Global Optimization 27,* 333–347.

20. Meissner, S. (2010). Controlling just-in-sequence flow-production, *Logistic. Res., 2,* 45–53.

21. Miltenburg, J. (2001). One-piece flow manufacturing on U-shaped production lines: A tutorial. *IIE Transactions, 33,* 303–321.

22. Monden, Y., (1998). T*oyota Production System: An integrated approach to just-in-time,* third ed. Norcross.

23. Moreno, N., Corominas, A. (2006). Solving the minmax product rate variation problem (PRVP) as a bottleneck assignment problem. *Computers & Operations Research, 33,* 928–939.

24. Parello, B., Kabat, W., & Wos, L. (1986). Job-shop scheduling using automated reasoning: a case study of the car sequencing problem. *Journal of Automatic Reason, 2,* 1–42.

25. Prandtstetter, M. & Raidl, G. (2008). An integer linear programming approach and a hybrid variable neighborhood search for the car sequencing problem. *European Journal of Operational Research, 191(3),* 1004–1022.

26. Rabieh, M., Azar, A., Modarres, M., & Fetanat, M., (2011). Mathematical Modeling for Multi Objective Robust Sourcing Problem: An Approach in Reduction of Supply Chain Risk (Case study: IKCO Supply Chain). *Journal of Indusrial Management Perspective, 1,* 57-77.

27. Rahmani, D. (2013). Proactive-reactive approach to reduce the effect of unexpected disruptions in dynamic scheduling problems, Phd Thesis, Iran University of Science and Technology.

28. Sarker, B.R., & Pan, H., (1998). Designing a mixed-model assembly line to minimize the costs of idle and utility times. *Computers & Industrial Engineering, 34,* 609–628.

29. Sialaetal, M. (2015). A study of constraint programming heuristics for the car-sequencing problem, *Engineering Applications of Artificial Intelligence, 38,* 34–44.

30. Solnon, C. (2008). 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,* 912–927.

31. Solnon, C., (2000). Solving permutation constraint satisfaction problems with artificial ants. In: 14th European Conference on Artificial Intelligence, Amsterdam, pp.118–122.

32. Sumichrast, R.T., Oxenrider, K.A., & Clayton, E.R. (2000). An evolutionary algorithm for sequencing production on a paced assembly line. *Decision Science, 31,* 149–172.

33. Wu, T., Blackhurts, J. & Grady, P.O. (2007). Methodology for supply chain disruption analysis. *International Journal of Production Research, 45,* 1665-1682.

34. Yavuz, M. (2013). Iterated beam search for the combined car sequencing and level scheduling problem. *International Journal of Production Research,*

51(12), 3698-3718.

35. Yong-yi et al. (2013). A Hybrid Heuristic for Multi-shop Car Sequencing Problem with a Buffer, International Asia Conference, on Industrial Engineering and Management Innovation (IEMI2013), Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

36. Zegordi S.H. Davarzani (2012). Disruption & Sanction in Supply Chain : Analysis & Solution ,Tehran, Indusrial Management Publication.

37. Zhipeng, T., Xinyu, S., Haiping, Z., Hui, Y., & Fei, H. (2015). Small-World Optimization Algorithm and Its Application in a Sequencing Problem of Painted Body Storage in a Car Company, Mathematical Problems in Engineering Volume, Article ID 932502, 10 pages.