

برنامه‌ریزی تولید چندمرحله‌ای در زنجیره تأمین حلقه بسته همراه با راه‌اندازی‌های وابسته به توالی و انتقال راه‌اندازی

سمیه ترکمن^۱، سید محمد تقی فاطمی قمی^{۲*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.

۲. استاد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.

خلاصه

در این مقاله مسأله‌ی برنامه‌ریزی تولید چند مرحله‌ای، چند محصولی، چند پیرودی با راه‌اندازی‌های وابسته به توالی در زنجیره تأمین حلقه بسته مطالعه می‌شود. فرآیندهای تولید و تولید مجدد هر محصول به‌طور متوالی در نظر گرفته شده‌اند و اگر ماشین برای پردازش محصول مورد نظر آماده باشد، هر دو فرآیند قابل اجرا هستند. برای فرمول‌بندی مسأله یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط ارایه شده و به‌منظور حل مدل مذکور چهار الگوریتم ابتکاری با استفاده از رویکرد افق متحرک و یک الگوریتم ژنتیک توسعه داده شده است. دو روش ابتکاری اول بر مبنای مدل اصلی توسعه‌ی یافته‌اند، اما به‌منظور حل مسأله در ابعاد بزرگ، دو روش ابتکاری دیگر و الگوریتم ژنتیک، مبتنی بر مدل ساده‌سازی شده می‌باشند که از حذف توالی‌های غیرترتیبی فضای جواب مدل اصلی حاصل شده است. جهت تنظیم پارامترهای الگوریتم ژنتیک ارایه شده، روش تاگوچی به‌کار گرفته شده است. نتایج عددی نشان‌دهنده‌ی کارایی الگوریتم فراابتکاری ارایه‌شده نسبت به الگوریتم‌های ابتکاری مبتنی بر برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط هستند.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۳۹۴/۱۱/۱۲

پذیرش ۱۳۹۵/۱۲/۱۶

کلمات کلیدی:

برنامه‌ریزی تولید
زنجیره تأمین حلقه بسته
راه‌اندازی وابسته به توالی
انتقال راه‌اندازی
افق متحرک
جریان کارگاهی
الگوریتم ژنتیک

۱- مقدمه

زنجیره تأمین است، که هدف از آن استفاده‌ی بهینه از منابع تولید به منظور تولید محصولات و کالاها با توجه به تقاضای بازار در طول افق برنامه‌ریزی است.

تعیین اندازه انباشته یکی از مهم‌ترین و مشکل‌ترین مسایل برنامه‌ریزی تولید است. هنگامی که این مسأله در زنجیره تأمین حلقه بسته مطرح می‌شود، فرآیند تولید مجدد نیز علاوه بر تولید محصولات جدید جهت تأمین تقاضا مورد استفاده قرار می‌گیرد.

اولین بار واگنر و ویتین [۱]، یک مسأله‌ی برنامه‌ریزی تولید تک مرحله‌ای تک محصولی چند دوره‌ای و بدون محدودیت ظرفیت را با استفاده از برنامه‌ریزی پویای پیشرو حل نمودند. گلدرز و ون واسنهو [۲]، مسایل برنامه‌ریزی تولید را به سه دسته‌ی برنامه‌ریزی سلسله مراتبی، برنامه‌ریزی احتیاجات مواد، تعیین اندازه انباشته و

مدیریت جریان‌های بازگشتی در فرآیندهای تولید صنعتی، توجه روزافزون محققین را در دو دهه‌ی گذشته به خود جلب نموده است. برخلاف زنجیره تأمین سنتی، که جریان محصولات از تولیدکننده به مشتری است؛ در زنجیره تأمین حلقه بسته (closed-loop supply chain) اغلب برنامه‌ای جهت جمع‌آوری محصولات مصرف‌شده از مشتریان و پردازش مجدد آن‌ها جهت ایجاد سود و یا کاهش اثرات منفی محیطی، توسط تولیدکنندگان تنظیم می‌شود.

برنامه‌ریزی تولید در حوزه‌ی ترکیبی، شامل فعالیت‌های تولید محصول جدید و تولید مجدد^۱ از مسایل مورد توجه در حوزه‌ی

توانند و همکاران [۱۲] دو حالت متفاوت برای هزینه‌ی راه‌اندازی در نظر گرفتند؛ هزینه‌ی راه‌اندازی مشترک برای هر دو فرآیند تولید و تولید مجدد روی یک خط تولید منفرد؛ و یا هزینه‌های راه‌اندازی متفاوت هنگامی که خطوط تولید مجزا هستند. لی و همکاران [۱۳] به بررسی مسأله‌ی چند محصولی با جانشینی تقاضا پرداختند، به‌طوریکه محصول با درجه‌ی بالاتر می‌تواند جهت تأمین تقاضای محصول با درجه‌ی پایین‌تر به کار رود، اما عکس آن ممکن نیست. پن و همکاران [۱۴] مسأله‌ی تعیین اندازه انباشته با گزینه‌ی دفع محصولات بازگشتی را بررسی کردند. دفع محصولات بازگشتی با محدودیت روبه‌رو بوده و هزینه‌ی آن می‌تواند مثبت و یا منفی منظور شود. پین‌پرو و همکاران [۱۵] تقاضای محصولات جدید و محصولاتی که با فرآیند تولید مجدد تهیه شده‌اند را متفاوت در نظر گرفتند. تقاضای محصولاتی که با تولید مجدد حاصل شده‌اند، می‌تواند توسط محصولات جدید تأمین گردد؛ اما عکس آن ممکن نیست. ژانگ و همکاران [۱۶] توابع هزینه‌ی راه‌اندازی و تولید مجدد را دلخواه و متغیر با زمان در نظر گرفتند. هزینه‌ی راه‌اندازی تولید^۸ در اولین دوره از مجموعه دوره‌ها با تولید مثبت نیز، در نظر گرفته شده است. کورومیناس و همکاران [۱۷] تنوع اقلام بازگشتی را مدنظر قرار دادند و درصد اقلام بازگشتی را تابع غیرخطی از قیمت پرداختی برای آن‌ها در نظر گرفتند. چن و ابریشمی [۱۸] تقاضای محصولات جدید و محصولات تولید مجدد را متفاوت در نظر گرفته و برای حل مسأله یک روش ابتکاری مبتنی بر تجزیه‌ی لاگرانژین ارائه دادند. لی و همکاران [۱۹] برای حل مسأله یک الگوریتم جستجوی ممنوع استوار توسعه داده و با استفاده از ۶۴۸۰ مثال نمونه به ارزیابی آن پرداختند. باکی و همکاران [۲۰] فرمول‌بندی جدیدی برای مسأله ارائه دادند که در حالت ساده‌سازی خطی حد پایین بهتری ارائه می‌کند. آن‌ها برای حل مسأله، یک روش ابتکاری مبتنی بر برنامه‌ریزی پویا همراه با رویکردهای بهبود دهنده ارائه دادند. لی و همکاران [۲۱] برنامه‌ریزی ظرفیت را نیز مدنظر قرار داده و برای حل مسأله، دو روش ابتکاری مبتنی بر ساده‌سازی خطی ارائه دادند. کنستانتاراس [۲۲] برای حل مسأله یک الگوریتم جستجو همسایگی متغیر ارائه دادند. پارسوپولوس و همکاران [۲۳] اصلاحاتی در فرمول‌بندی مسأله ایجاد کردند و یک الگوریتم تکامل تفاضلی اصلاح شده^۹ جهت حل آن ارائه دادند. جینگ و همکاران [۲۴] فرض کمبود و تعدد کارخانه‌های تولیدی را در نظر گرفته و سه مدل متفاوت جهت فرمول‌بندی حالت‌های مختلف ارائه دادند. آن‌ها جهت حل مسأله یک الگوریتم ژنتیک خود تطبیقی^{۱۰} توسعه دادند.

در نظر گرفتن ویژگی‌هایی هم‌چون چندمرحله‌ای بودن سیستم تولیدی و راه‌اندازی‌های پیچیده، پیچیدگی مدل‌سازی و حل مسایل تعیین اندازه انباشته را افزایش می‌دهد، حال آنکه گامی به سوی

زمان‌بندی^۱ تقسیم نمودند. بهل و همکاران [۳]، مسایل تعیین اندازه انباشته را بر اساس تعداد مراحل (تک مرحله‌ای یا چند مرحله‌ای) و محدودیت یا عدم محدودیت منابع به چهارگروه تقسیم‌بندی می‌کنند. کریمی و همکاران [۴] مسایل تعیین اندازه انباشته را به شش گروه تعیین اندازه انباشته با محدودیت ظرفیت^۲ (CLSP)، تعیین زمان‌بندی انباشته‌ی اقتصادی تولید^۳ (ELSP)، مسأله‌ی زمان‌بندی و تعیین اندازه انباشته‌ی گسسته^۴ (DLSP)، مسأله‌ی تعیین اندازه انباشته با راه‌اندازی پیوسته^۵ (CSLP)، مسأله‌ی تعیین اندازه انباشته‌ی نسبی^۶ (PLSP) و نهایتاً مسأله‌ی زمان‌بندی و تعیین اندازه انباشته‌ی کلی^۷ (GLSP) تقسیم‌بندی می‌کنند که تمامی آن‌ها در حالت وجود محدودیت ظرفیت، NP-hard هستند. ایلگن و همکاران [۵] مطالعات مطرح شده در زمینه‌ی تولید مجدد را در شش گروه: پیش‌بینی، برنامه‌ریزی تولید، زمان‌بندی تولید، برنامه‌ریزی ظرفیت، مدیریت موجودی و اثر عدم قطعیت دسته‌بندی نموده‌اند. گاپتا و همکاران [۶] به بررسی سیستم تولید مجددی پرداختند که در آن عملیات تولید مجدد طی مراحل متوالی انجام می‌شود. این سیستم به‌عنوان یک شبکه‌ی صف باز در نظر گرفته شده و زمان خرابی، زمان تعمیر و زمان سرویس از توزیع نمایی پیروی می‌کنند. روی و همکاران [۷] به بررسی مسأله‌ی کنترل موجودی در سیستم ترکیبی تولید و تولید مجدد پرداختند. در این سیستم حین فرآیند تولید، اقلام معیوب تولید می‌شود که همراه با محصولات بازگشتی جهت فرآیند تولید مجدد مورد استفاده قرار می‌گیرند. نرخ تولید محصولات معیوب به دو صورت ثابت و فازی در نظر گرفته شده و جهت حل مسأله از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. کیم و همکاران [۸] مسأله‌ی زمان‌بندی در سیستم تولید مجدد را در نظر گرفتند. مسأله‌ی مورد نظر در یک سیستم جریان کارگاهی مطرح شده که متشکل از یک ایستگاه کاری دمونتاز، خطوط موازی از نوع جریان کارگاهی جهت پردازش مجدد و یک ایستگاه کاری مونتاژ مجدد است.

تعیین اندازه انباشته در سیستم‌های ترکیبی در بسیاری از مطالعات انجام شده در زنجیره تأمین حلقه بسته مورد بررسی قرار گرفته است. ریشتر و وبر [۹] به توسعه‌ی مدل واگنر-ویتین معکوس برای مسأله‌ی تعیین اندازه انباشته پرداختند. گولانی و همکاران [۱۰] به بیان فرمول‌بندی کلی مسأله‌ی تعیین اندازه انباشته پرداخته و اثبات کردند برای ساختارهای کلی هزینه‌ی مقعر، مسأله NP-complete است. یانگ و همکاران [۱۱] مسأله‌ی بدون محدودیت ظرفیت و با توابع هزینه‌ی مقعر را در نظر گرفته و بیان کردند حتی در صورت ثابت بودن هزینه‌ها، مسأله NP-hard است.

1. Lot sizing and scheduling
2. Capacitated Lot Sizing Problem
3. Economic lot scheduling problem
4. Discrete lot sizing and scheduling problem
5. Continuous setup lot-sizing problem
6. Proportional lot-sizing and scheduling problem
7. General lot sizing and scheduling problem

8. startup

9. modified differential evolution (DE)

10. self-adaptive genetic algorithm (SAGA)

- واقعی تر شدن فرضیات مسأله است.
- محمدی و همکاران [۲۵] مسأله‌ی تعیین اندازه انباشته‌ی چند محصولی چند پرودی با راه‌اندازی‌های وابسته به توالی و انتقال راه‌اندازی را در سیستم جریان کارگاهی مطرح نمودند. جهت مدل‌سازی مسأله‌ی مذکور، برای هر ماشین و در هر دوره‌ی زمانی N (تعداد محصولات) راه‌اندازی در نظر گرفته شده است. از آنجا که در دوره‌های بزرگتر از یک، لزوماً N راه‌اندازی واقعی نیاز نیست؛ راه‌اندازی‌های مجازی از یک محصول به همان محصول مجاز است. به‌منظور حل مسأله‌ی ارایه شده از رویکرد افق متحرک و آزادسازی و تثبیت^۱ استفاده شده است. رضانیان و همکاران [۲۶] این مسأله را، به شیوه‌ی مؤثرتری نسبت به محمدی و همکاران [۲۵] مدل‌سازی نمودند و به منظور زمان‌بندی محصولات، از مفاهیم زمان شروع و پایان پردازش هر محصول روی هر ماشین و در هر دوره‌ی زمانی استفاده کردند. هم‌چنین، جهت انتقال راه‌اندازی از یک دوره به دوره‌ی بعد متغیرهای اولین، آخرین و تنها محصول تولیدی تعریف می‌شود. حل این مدل به دلیل کاهش متغیرهای صفر و یک، متغیرهای پیوسته و محدودیت‌ها نسبت به مدل ارایه شده در مرجع [۲۵] بسیار ساده‌تر است. به‌منظور حل مدل ارایه شده، رویکرد افق متحرک در نظر گرفته شده است.
 - کلیه‌ی مطالعات انجام شده در حوزه‌ی برنامه‌ریزی تولید در زنجیره تأمین حلقه بسته، به بررسی مسأله در سیستم تولید تک مرحله‌ای با راه‌اندازی‌های ساده پرداخته‌اند. لذا، نوآوری اصلی این مقاله در نظر گرفتن سیستم تولید چند مرحله‌ای، راه‌اندازی‌های وابسته به توالی و انتقال راه‌اندازی، در این مسأله‌ی است. هم‌چنین، در این مطالعه حفظ راه‌اندازی‌ها حین دوره‌ی بیکاری مدل شده است. به‌منظور مدل‌سازی مسأله‌ی موردنظر، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط ارایه شده است و جهت حل مسأله از روش‌های ابتکاری مبتنی بر افق متحرک و الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. هم‌چنین، جهت تنظیم پارامترها روش تاگوچی به‌کار گرفته شده است.
 - در ادامه در بخش [۲]، مفروضات و مدل ریاضی مسأله مطرح می‌شود. الگوریتم‌های مبتنی بر رویکرد افق متحرک در بخش [۳] بیان شده، و در بخش [۴] الگوریتم ژنتیک جهت حل مسأله ارایه می‌شود. نتایج حاصل از اجرای الگوریتم‌های ابتکاری و الگوریتم ژنتیک در بخش [۵] ارایه می‌شود. نهایتاً، در بخش [۶] نتایج و پیشنهادهای جهت توسعه‌ی تحقیقات آتی ذکر می‌شود.
- ## ۲- مفروضات و فرمول‌بندی مسأله
- ### ۲-۱- مفروضات
- هر دو فرآیند تولید و تولید مجدد روی یک خط و با یک راه‌اندازی مشترک انجام می‌شوند.

2. Triangular inequality

1. fix-and-relax

$W_{i,j,m} = 0$
 کسری از محصول جدید j که معیوب شده و در سطح
 $ar'_{l',j}$: کیفیت l' قرار می‌گیرد.
 میزان محصول بازگشتی j با سطح کیفیت l' در
 $u'_{l',j,t}$: دوره‌ی t
 ماشین‌ها در در ابتدای افق برنامه‌ریزی برای تولید این
 j_0 : محصول راه‌اندازی شده‌اند.
 $bigM$: یک عدد بسیار بزرگ

متغیرهای مدل

میزان موجودی محصول جدید j در مرحله‌ی m در
 $I_{j,m,t}$: انتهای پریود t
 میزان موجودی محصول تولید مجدد j با سطح
 $I'_{l',j,m,t}$: کیفیت l' در مرحله‌ی m در انتهای پریود t
 میزان موجودی محصول سرویس j در انتهای پریود t
 $IS_{j,t}$: میزان موجودی محصول بازگشتی j با سطح کیفیت
 $lr'_{l',j,t}$: l' در انتهای پریود t
 $0 \leq y'_{i,j,m,t} \leq 1$. اگر محصول i آخرین محصول
 تولیدی در مرحله‌ی m ، پریود t و محصول j اولین
 محصول تولیدی در مرحله‌ی m و پریود t باشد،
 مقدار یک و در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد.
 $x_{j,m,t}$: میزان تولید محصول j در مرحله‌ی m و پریود t
 $x'_{l',j,m,t}$: میزان تولید مجدد محصول j با سطح کیفیت l' در
 مرحله‌ی m و پریود t
 $so_{j,m,t}$: زمان شروع پردازش محصول جدید j در مرحله‌ی m
 و پریود t
 $so'_{j,m,t}$: زمان شروع پردازش محصول تولید مجدد j در
 مرحله‌ی m و پریود t
 $co_{j,m,t}$: زمان تکمیل پردازش محصول جدید j در مرحله‌ی
 m و پریود t
 $co'_{j,m,t}$: زمان تکمیل پردازش محصول تولید مجدد j در
 مرحله‌ی m و پریود t
 متغیر پیوسته‌ی نامنفی. اگر دقیقاً یک محصول در
 مرحله‌ی m و پریود t تولید شود، این متغیر برابر
 صفر و در غیر این صورت یک عدد نامنفی است.
 $0 \leq w_{m,t} \leq 1$. اگر حداقل یک محصول در
 مرحله‌ی m و دوره‌ی t تولید شود، این متغیر مقدار
 یک و در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد.
 $0 \leq T_{j,m,t} \leq 1$. اگر تولید یا تولید مجدد محصول j
 در مرحله‌ی m و پریود t انجام شود، مقدار یک و در
 غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد.
 متغیر صفر و یک. اگر تولید جدید محصول j در
 مرحله‌ی m و پریود t انجام شود، مقدار یک و در غیر
 این صورت مقدار صفر می‌گیرد.
 $v_{j,m,t}$

از محصولات تولیدی جدید در دوره‌ی فعلی، جهت تولید
 مجدد در دوره‌ی بعد در دسترس قرار می‌گیرد.
 موجودی اولیه‌ی محصولات بازگشتی، محصولات نهایی و محصولات
 نیمه ساخته برابر صفر می‌باشد.

۲-۲- مدل ریاضی

روش مدل‌سازی در این مقاله مشابه روش رضائیان و همکاران
 [۲۶] بوده و علائم زیر در فرمول‌بندی مسأله مورد استفاده
 قرار گرفته‌اند:

اندیس‌های مدل

i, i', j, j', n : نوع محصول
 m : مرحله‌ی تولیدی
 t : دوره‌ی زمانی
 l' : سطح کیفیت محصولات بازگشتی

پارامترهای مدل

T : افق برنامه‌ریزی
 N : تعداد محصولات
 M : تعداد مراحل تولیدی
 L : تعداد سطوح کیفیت محصولات بازگشتی
 $b_{j,m}$: ظرفیت زمانی لازم برای تولید جدید یک واحد محصول
 j در مرحله‌ی m
 $b'_{l',j,m}$: ظرفیت زمانی لازم برای تولید مجدد یک واحد محصول
 j با سطح کیفیت l' در مرحله‌ی m
 $C_{m,t}$: ظرفیت زمانی ماشین m دوره‌ی t
 $d_{j,t}$: تقاضای محصول j در انتهای دوره‌ی t
 $h_{j,m}$: هزینه‌ی نگهداری یک واحد محصول جدید j در
 مرحله‌ی m
 $h'_{l',j,m}$: هزینه‌ی نگهداری یک واحد محصول تولید مجدد j با
 کیفیت l' در مرحله‌ی m
 hs_j : هزینه‌ی نگهداری یک واحد محصول سرویس j
 $hr'_{l',j}$: هزینه‌ی نگهداری یک واحد محصول بازگشتی j با
 کیفیت l'
 $p_{j,m,t}$: هزینه‌ی متغیر تولید یک واحد محصول جدید j در
 مرحله‌ی m و دوره‌ی t
 $p'_{l',j,m,t}$: هزینه‌ی متغیر تولید یک واحد محصول تولید مجدد j
 با سطح کیفیت l' در مرحله‌ی m و دوره‌ی t
 $S_{i,j,m}$: زمان راه‌اندازی محصول j در مرحله‌ی m ، اگر
 بلافاصله بعد از محصول i تولید شود. در صورتی‌که
 $i \neq j$ باشد، $S_{i,j,m} \geq 0$ و در غیر این صورت
 $S_{i,j,m} = 0$
 هزینه‌ی راه‌اندازی محصول j در مرحله‌ی m ، اگر
 بلافاصله بعد از محصول i تولید شود. در صورتی‌که
 $i \neq j$ باشد، $Wi,j,m \geq 0$ و در غیر این صورت

$$x_{j,m,t} \leq \text{big}M \cdot v_{j,m,t} \quad (۶)$$

$$j = 1, \dots, N; m = 1, \dots, M; t = 1, \dots, T$$

$$\sum_{l'=1}^L x_{l',j,m,t} \leq \text{big}M \cdot v'_{j,m,t} \quad (۷)$$

$$j = 1, \dots, N; m = 1, \dots, M; t = 1, \dots, T$$

$$v_{j,m,t} + v'_{j,m,t} \leq 2T_{j,m,t} \quad (۸)$$

$$j = 1, \dots, N; m = 1, \dots, M; t = 1, \dots, T$$

$$co_{j,m,t} \leq C_{m,t} \quad (۹)$$

$$j = 1, \dots, N; m = 1, \dots, M; t = 1, \dots, T$$

$$co'_{j,m,t} \leq C_{m,t} \quad (۱۰)$$

$$j = 1, \dots, N; m = 1, \dots, M; t = 1, \dots, T$$

$$co_{j,m,t} = so_{j,m,t} + b_{j,m} x_{j,m,t} \quad (۱۱)$$

$$j = 1, \dots, N; m = 1, \dots, M; t = 1, \dots, T$$

$$co'_{j,m,t} = so'_{j,m,t} + \sum_{l'=1}^L b'_{l',j,m} x'_{l',j,m,t} \quad (۱۲)$$

$$j = 1, \dots, N; m = 1, \dots, M; t = 1, \dots, T$$

$$so_{j,m,t} \geq co_{j,m-1,t} \quad (۱۳)$$

$$j = 1, \dots, N; m = 1, \dots, M; t = 1, \dots, T$$

$$so'_{j,m,t} \geq co'_{j,m-1,t} \quad (۱۴)$$

$$j = 1, \dots, N; m = 1, \dots, M; t = 1, \dots, T$$

$$so_{j,m,t} \geq co_{i,m,t} + S_{i,j,m} \cdot y_{i,j,m,t} - \text{big}M(1 - y_{i,j,m,t}) - \text{big}M(1 - Tp_{j,m,t}) \quad (۱۵)$$

$$i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, N; i \neq j; m = 2, \dots, M; t = 1, \dots, T$$

$$so_{j,m,t} \geq co'_{i,m,t} + S_{i,j,m} \cdot y_{i,j,m,t} - \text{big}M(1 - y_{i,j,m,t}) - \text{big}M(1 - Tp_{j,m,t}) \quad (۱۶)$$

$$i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, N; i \neq j; m = 2, \dots, M; t = 1, \dots, T$$

$$so'_{j,m,t} \geq co_{i,m,t} + S_{i,j,m} \cdot y_{i,j,m,t} - \text{big}M(1 - y_{i,j,m,t}) - \text{big}M(1 - Tr_{j,m,t}) \quad (۱۷)$$

$$i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, N; i \neq j; m = 2, \dots, M; t = 1, \dots, T$$

$$so'_{j,m,t} \geq co'_{i,m,t} + S_{i,j,m} \cdot y_{i,j,m,t} - \text{big}M(1 - y_{i,j,m,t}) - \text{big}M(1 - Tr_{j,m,t}) \quad (۱۸)$$

$$i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, N; i \neq j; m = 2, \dots, M; t = 1, \dots, T$$

$$so_{j,m,t} \geq co'_{j,m,t} - \text{big}M(1 - Tr_{j,m,t}) - \text{big}M(1 - v_{j,m,t}) \quad (۱۹)$$

$$j = 1, \dots, N; m = 1, \dots, M; t = 1, \dots, T$$

$$so'_{j,m,t} \geq co_{j,m,t} - \text{big}M(1 - Tp_{j,m,t}) - \text{big}M(1 - v'_{j,m,t}) \quad (۲۰)$$

$$j = 1, \dots, N; m = 1, \dots, M; t = 1, \dots, T$$

$$T_{j,m,t} = Tp_{j,m,t} + Tr_{j,m,t} \quad (۲۱)$$

$$j = 1, \dots, N; m = 1, \dots, M; t = 1, \dots, T$$

$$Tp_{j,m,t} \leq v_{j,m,t} \quad (۲۲)$$

$$j = 1, \dots, N; m = 1, \dots, M; t = 1, \dots, T$$

$$Tr_{j,m,t} \leq v'_{j,m,t} \quad (۲۳)$$

$$j = 1, \dots, N; m = 1, \dots, M; t = 1, \dots, T$$

متغیر صفر و یک. اگر تولید مجدد محصول j در مرحله m و پریود t انجام شود، مقدار یک و در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد.

متغیر صفر و یک. اگر تولید محصول j در مرحله m و پریود t اولین فرآیند از محصول j باشد، مقدار $Tp_{j,m,t}$ و در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد.

متغیر صفر و یک. اگر تولید مجدد محصول j در مرحله m و پریود t اولین فرآیند از محصول j باشد، مقدار $Tr_{j,m,t}$ و در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد.

متغیر صفر و یک. اگر راه‌اندازی در مرحله m و پریود t ، از محصول i به محصول j باشد، مقدار یک و در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد.

متغیر صفر و یک. اگر محصول j اولین محصول تولیدی در مرحله m و پریود t باشد، مقدار یک و در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد.

متغیر صفر و یک. اگر محصول j آخرین محصول تولیدی در مرحله m و پریود t باشد، مقدار یک و در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد.

با توجه به فرضیات و علایم ذکر شده، مدل برنامه‌ریزی عددصحيح مختلط ارایه شده به صورت زیر خواهد بود:

Min $\sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T p_{j,m,t} x_{j,m,t} + \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T \sum_{l'=1}^L p'_{l',j,m,t} x'_{l',j,m,t} + \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{t=1}^T h_{j,m} I_{j,m,t} + \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{t=1}^T \sum_{l'=1}^L h'_{l',j,m} I'_{l',j,m,t} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T w_{i,j,m} (y_{i,j,m,t} + y'_{i,j,m,t}) + \sum_{l'=1}^L \sum_{j=1}^N \sum_{t=1}^T hr_{l',j,t} Ir_{l',j,t} + \sum_{j=1}^N \sum_{t=1}^T hs_{j,t} Is_{j,t}$

$Ir_{l',j,t} = Ir_{l',j,t-1} + u_{l',j,t} + \alpha r_{l',j} x_{j,M,t-1} - x'_{l',j,1,t} \quad l' = 1, \dots, L; j = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T$

$Is_{j,t-1} + \left(1 - \sum_{l'=1}^L \alpha r_{l',j}\right) \cdot x_{j,M,t} + \sum_{l'=1}^L x'_{l',j,M,t} - Is_{j,t} = d_{j,t}$

$I_{j,m,t-1} + x_{j,m,t} = I_{j,m,t} + x_{j,m+1,t} \quad j = 1, \dots, N, m = 1, \dots, M - 1; t = 1, \dots, T$

$I'_{l',j,m,t-1} + x'_{l',j,m,t} = I'_{l',j,m,t} + x'_{l',j,m+1,t} \quad j = 1, \dots, N; m = 1, \dots, M - 1; t = 1, \dots, T, l' = 1, \dots, L$

$$\sum_{j=1}^N y'_{i,j,m,t} \geq \beta_{i,m,t-1}; \quad (40)$$

$$i = 1, \dots, N; m = 1, \dots, M; t = 1, \dots, T$$

$$I_{j,m,t}, I'_{i,j,m,t}, IS_{j,t}, IR'_{i,j,t}, y'_{i,j,m,t}, T_{j,m,t}, x_{j,m,t}, \quad (41)$$

$$x'_{i,j,m,t}, SO_{j,m,t}, CO_{j,m,t}, \delta_{m,t}, W_{m,t} \geq 0$$

$$y_{i,j,m,t}, \alpha_{j,m,t}, \beta_{j,m,t}, v_{j,m,t}, v'_{j,m,t}, Tp_{j,m,t}, Tr_{j,m,t} \in \quad (42)$$

$$\{0,1\}$$

رابطه‌ی (۱) بیان‌کننده‌ی تابع هدف مسئله است، که در آن مجموع هزینه‌های راه‌اندازی، هزینه‌های نگهداری و هزینه‌های متغیر تولید و تولید مجدد کمینه می‌گردد. رابطه‌ی (۲) بیان‌کننده‌ی تولید محصول تولید مجدد از محصولات بازگشتی و محصولات معیوب حاصل از تولید می‌باشد. رابطه‌ی (۳) تضمین‌کننده‌ی تقاضای محصولات است. روابط (۴) و (۵) به‌ترتیب بیان‌کننده‌ی تعادل موجودی مراحل میانی برای محصولات جدید و محصولات تولید مجدد می‌باشد. روابط (۶) و (۷) به‌ترتیب معرف پردازش و یا عدم پردازش محصولات جدید و محصولات تولید مجدد هستند. رابطه‌ی (۸) بیان می‌کند که هر یک از فرآیندهای تولید جدید و تولید مجدد محصول z تنها زمانی می‌تواند انجام شود، که تصمیم مبنی بر تولید محصول z گرفته شده باشد. روابط (۹) و (۱۰) بیان‌کننده‌ی محدودیت ظرفیت هر ماشین در هر دوره است. روابط (۱۱) و (۱۲) به‌ترتیب بیان‌کننده‌ی رابطه‌ی بین زمان شروع و زمان تکمیل محصولات جدید و محصولات تولید مجدد هستند. روابط (۱۳) و (۱۴) بیان می‌کنند که پردازش محصول z در مرحله‌ی m تنها زمانی می‌تواند آغاز شود، که پردازش این محصول در مرحله‌ی $m-1$ پایان یافته باشد. طبق روابط (۱۵) - (۱۸) اگر پردازش محصول z پس از پردازش محصول i روی ماشین m برنامه‌ریزی شده باشد، اولین فرآیند محصول z تنها زمانی می‌تواند آغاز شود که پردازش محصول i روی این ماشین پایان یافته باشد، و راه‌اندازی برای محصول z روی این ماشین صورت گرفته باشد. طبق روابط (۱۹) و (۲۰) آخرین فرآیند محصول z روی ماشین m تنها زمانی می‌تواند آغاز شود که پردازش اولین فرآیند محصول z روی ماشین m پایان یافته باشد. رابطه‌ی (۲۱) بیان می‌کند که در صورت تولید محصول z در مرحله‌ی m و دوره‌ی t ، تنها یکی از دو فرآیند تولید و تولید مجدد اولین فرآیند است. طبق روابط (۲۲) و (۲۳) تنها در صورتی که فرآیند تولید یا تولید مجدد در مرحله‌ی m و دوره‌ی t انجام شود می‌تواند اولین فرآیند از محصول z باشد. رابطه‌ی (۲۴) بیان‌کننده‌ی لزوم راه‌اندازی برای تولید محصولات است. روابط (۲۵)

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1, i \neq j}^N y_{i,j,m,t} \geq \sum_{j=1}^N T_{j,m,t} - 1 \quad (24)$$

$$m = 1, \dots, M; t = 1, \dots, T$$

$$\sum_{i=1, i \neq j}^N y_{i,j,m,t} \leq T_{j,m,t} \quad (25)$$

$$j = 1, \dots, N; m = 1, \dots, M; t = 1, \dots, T$$

$$\sum_{i=1, i \neq j}^N y_{j,i,m,t} \leq T_{j,m,t} \quad (26)$$

$$j = 1, \dots, N; m = 1, \dots, M; t = 1, \dots, T$$

$$\sum_{j=1}^N T_{j,m,t} \leq bigM \cdot w_{m,t}; m = 1, \dots, M; t = 1, \dots, T \quad (27)$$

$$\sum_{j=1}^N T_{j,m,t} - 1 \leq (N-1) \cdot \delta_{m,t} \quad (28)$$

$$m = 1, \dots, M; t = 1, \dots, T$$

$$\sum_{j=1}^N \alpha_{j,m,t} = w_{m,t}; m = 1, \dots, M; t = 1, \dots, T \quad (29)$$

$$\sum_{j=1}^N \beta_{j,m,t} = w_{m,t}; m = 1, \dots, M; t = 1, \dots, T \quad (30)$$

$$\alpha_{j,m,t} \leq T_{j,m,t} - \sum_{i=1}^N y_{i,j,m,t}; \quad (31)$$

$$j = 1, \dots, N; m = 1, \dots, M; t = 1, \dots, T$$

$$\beta_{j,m,t} \leq T_{j,m,t} - \sum_{i=1}^N y_{j,i,m,t}; \quad (32)$$

$$j = 1, \dots, N; m = 1, \dots, M; t = 1, \dots, T$$

$$\alpha_{j,m,t} + \beta_{j,m,t} \leq 2 - \delta_{m,t}; \quad (33)$$

$$j = 1, \dots, N; m = 1, \dots, M; t = 1, \dots, T$$

$$\sum_{j=1}^N y'_{j_0,j,m,1} = 1; m = 1, \dots, M \quad (34)$$

$$so_{j,m,t} \geq \sum_{i=1}^N S_{i,j,m} \cdot y'_{i,j,m,t} - bigM(1 - Tp_{j,m,t}) \quad (35)$$

$$j = 1, \dots, N; m = 1, \dots, M; t = 1, \dots, T$$

$$so'_{j,m,t} \geq \sum_{i=1}^N S_{i,j,m} \cdot y'_{i,j,m,t} - bigM(1 - Tr_{j,m,t}) \quad (36)$$

$$j = 1, \dots, N; m = 1, \dots, M; t = 1, \dots, T$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N y'_{i,j,m,t} = 1; m = 1, \dots, M; t = 1, \dots, T \quad (37)$$

$$\sum_{j'=1}^N y'_{j',j,m,t-1} + \sum_{i=1, i \neq j}^N y_{i,j,m,t-1} \quad (38)$$

$$= \sum_{n=1}^N y'_{j,n,m,t} + \sum_{i'=1, i' \neq j}^N y_{j,i',m,t-1}$$

$$m = 1, \dots, M; t = 1, \dots, T$$

$$\sum_{i=1}^N y'_{i,j,m,t} \geq \alpha_{j,m,t}; \quad (39)$$

$$j = 1, \dots, N; m = 1, \dots, M; t = 1, \dots, T$$

متغیرها و پارامترها مشابه مسأله‌ی اصلی هستند. در مدل دوم، علاوه بر توالی تولید محصولات و فرآیندها، میزان انباشته‌ی تولید و تولید مجدد نیز در مراحل مختلف هر پریود یکسان است. در این حالت، متغیرهای اندازه انباشته‌ی تولید و تولید مجدد نیز مستقل از اندیس m هستند. همچنین با توجه به اینکه میزان تولید و تولید مجدد هر محصول در مراحل مختلف هر پریود یکسان است، موجودی محصول نیمه ساخته وجود ندارد و تنها امکان نگهداری محصولات نهایی در آخرین مرحله و یا محصولات بازگشتی در مرحله‌ی اول برای استفاده در پریودهای بعد وجود دارد.

۳- رویکرد افق متحرک

در مسایل برنامه‌ریزی تولید، معمولاً هنگامی که اطلاعات قابل اطمینانی در رابطه با پارامترهای دوره‌های بعد موجود نباشد، از رویکرد افق متحرک استفاده می‌شود. در این حالت تصمیم‌گیری برای پریود اولیه انجام شده و با گذشت هر پریود، با استفاده از اطلاعات به هنگام شده مدل مجدداً اجرا خواهد شد.

علاوه بر این، رویکرد افق متحرک به منظور حل مسایل برنامه‌ریزی تولید چند دوره‌ای با پارامترهای قطعی نیز مورد استفاده قرار گرفته است [۲۵] - [۲۸]. در این حالت، به منظور غلبه بر امکان‌ناپذیری محاسباتی مسایل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط، حل مسأله‌ی اصلی با حل تعدادی مسأله‌ی کوچکتر جایگزین می‌گردد. در این روش تکراری که متشکل از T گام است، افق برنامه‌ریزی به سه قسمت مجزا تقسیم می‌شود [۲۵]. این سه بخش برای گام k به صورت زیر است:

- بخش اول^۲ از $k-1$ پریود اولیه تشکیل می‌شود. در این بخش کلیه‌ی تصمیمات یا بخشی از آن براساس جواب تکرارهای قبلی تعیین شده و براساس یک استراتژی تثبیت^۳، مقدار می‌گیرند.
 - بخش دوم که بخش مرکزی^۴ نامیده می‌شود، شامل پریود k است که در آن مسأله به طور کامل در نظر گرفته می‌شود.
 - بخش سوم یا پایانی^۵، پریودهای پایانی (از پریود $k+1$ تا پریود T) را در بر می‌گیرد. در این قسمت مدل براساس یک استراتژی ساده‌سازی، ساده می‌شود.
- در انتهای گام k هر یک از سه بخش ذکر شده یک پریود جلو رفته و گام $k+1$ اجرا می‌شود. هنگامی که دیگر بخش پایانی وجود نداشته باشد؛ الگوریتم پایان می‌یابد. جواب حاصل در گام آخر، معرف کلیه‌ی متغیرهای مسأله در افق برنامه‌ریزی است. براساس رویکرد ذکر شده، سه الگوریتم ابتکاری جهت حل مسأله توسعه داده شده است.

و (۲۶) بیان می‌کنند که محصول Z تنها در صورتی می‌تواند در توالی محصولات قرار گیرد، که در مرحله‌ی m و پریود t تولید شود. رابطه‌ی (۲۷) بیان می‌کند که در صورت تولید حداقل یک محصول $W_{m,t}$ باید مقدار یک بگیرد؛ در واقع طبق روابط (۲۹) و (۳۰) با وجود اینکه این متغیر پیوسته تعریف شده، در عمل تنها مقادیر صفر و یک را اتخاذ می‌نماید. رابطه‌ی (۲۸) بیان می‌کند که اگر بیش از یک محصول در یک دوره تولید شود، $\delta_{m,t}$ باید مقدار مثبت بگیرد. طبق روابط (۲۹) و (۳۰) در صورتی که در یک دوره و یک مرحله تولید صورت گیرد، تنها یک محصول می‌تواند اولین و یا آخرین محصول تولیدی باشد. طبق روابط (۳۱) و (۳۲) در صورتی که محصولی اولین و یا آخرین محصول تولیدی نباشد، به ترتیب مقدار α و β نظیر آن صفر خواهد بود. رابطه‌ی (۳۳) بیان می‌کند که اگر تنها یک محصول در یک دوره تولید شود، δ مقدار صفر می‌گیرد. طبق رابطه‌ی (۳۴) ماشین‌ها در ابتدای افق برنامه‌ریزی برای محصول Z_0 راه‌اندازی شده‌اند. روابط (۳۵) و (۳۶) بیان می‌کنند که پردازش اولین فرآیند از اولین محصول در هر دوره تنها پس از انجام راه‌اندازی امکان‌پذیر است. رابطه‌ی (۳۷) بیان می‌کند تنها راه‌اندازی یک محصول در مرحله‌ی m از دوره‌ی $t-1$ به دوره‌ی t منتقل می‌شود. رابطه‌ی (۳۸) حفظ راه‌اندازی در دوره‌ی بیکاری را تضمین می‌نماید. طبق روابط (۳۹) و (۴۰) در صورتی که محصول Z اولین محصول تولیدی در دوره‌ی t و محصول t آخرین محصول تولیدی در دوره‌ی $t-1$ باشد، متغیر $\gamma'_{i,j,m,t}$ برابر یک قرار می‌گیرد. روابط (۴۱) و (۴۲) به ترتیب بیان‌کننده‌ی متغیرهای پیوسته و صفر و یک مسأله هستند.

۳-۲- مدل ریاضی ترتیبی

فضای جواب مسأله‌ی اصلی متشکل از توالی‌های ترتیبی^۱ و غیرترتیبی است. در توالی‌های ترتیبی، توالی تولید محصولات و فرآیندها در کلیه‌ی مراحل هر پریود، یکسان است؛ در حالیکه در توالی‌های غیر ترتیبی، توالی تولید محصولات و فرآیندها لزوماً در تمام مراحل یک پریود یکسان نیست. به منظور توسعه‌ی مدل‌های ساده‌تر به عنوان مبنایی جهت توسعه‌ی روش‌های ابتکاری و فرآیندکاری برای حل مسأله در ابعاد بزرگ، قسمت غیرترتیبی فضای جواب مسأله حذف شده است. در مدل اول، متغیرهای $\gamma'_{i,j,m,t}$ ، $\nu'_{j,m,t}$ ، $\nu_{j,m,t}$ ، $\alpha_{j,m,t}$ ، $\beta_{j,m,t}$ ، $Tr_{j,m,t}$ ، $Tp_{j,m,t}$ ، $Tj_{m,t}$ ، $W_{m,t}$ ، $\gamma_{i,j,m,t}$ و $\delta_{m,t}$ به ترتیب با $\gamma'_{i,j,t}$ ، $Tj_{j,t}$ ، $Tp_{j,t}$ ، $Tj_{j,t}$ ، $\nu'_{i,j,t}$ ، $\nu_{j,t}$ ، $\alpha_{j,t}$ ، $\beta_{j,t}$ و δ_t جایگزین می‌شوند، اما سایر

2. Beginning section

3. Freezing strategy

4. Central section

5. Ending section

1. Permutation

۳-۱- اولین روش ابتکاری (H1)

در این روش مدل اصلی مسأله در نظر گرفته می‌شود و سه بخش الگوریتم به صورت زیر خواهد بود:

بخش اول: کلیه متغیرهای صفر و یک مربوط به پیوندهای این بخش تثبیت می‌شوند.

بخش دوم: این بخش شامل یک پیوند است که در آن مسأله به طور کامل در نظر گرفته می‌شود.

بخش سوم: کلیه متغیرهای صفر و یک مربوط به پیوندهای این بخش بین صفر و یک آزادسازی شده‌اند. همچنین، محدودیت‌های (۱۵-۲۰)، ۳۵، ۳۶ نیز برای پیوندهای این بخش در نظر گرفته نمی‌شود.

۳-۲- دومین روش ابتکاری (H2)

این روش مشابه H1 است، اما در بخش اول آن کلیه متغیرها، شامل متغیرهای پیوسته و صفر و یک، تثبیت می‌شود.

۳-۳- سومین روش ابتکاری (H3)

با افزایش تعداد متغیرهای صفر و یک مسأله، زمان حل مسأله برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط به طور نامایی افزایش می‌یابد. به منظور کاهش تعداد متغیرهای صفر و یک مسأله اصلی، جهت حل مسأله در ابعاد بزرگ، سومین الگوریتم ابتکاری بر مبنای اولین مدل ریاضی ترتیبی توسعه یافته و سه بخش الگوریتم مشابه H1 خواهد بود.

۳-۴- چهارمین روش ابتکاری (H4)

چهارمین الگوریتم ابتکاری بر مبنای دومین مدل ریاضی ترتیبی توسعه یافته، و منجر به ساده‌سازی بیشتری نسبت به الگوریتم سوم می‌شود. سه بخش این الگوریتم نیز مشابه H1 خواهد بود.

۴- الگوریتم ژنتیک^۱ (GA)

روش‌های فراابتکاری از رویکردهای کارا در حل مسایل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط هستند که همگی از یک فرآیند جستجوی تصادفی هوشمند^۲ در فضای جواب مسأله برای دستیابی به یک جواب شدنی نزدیک به بهینه استفاده می‌کنند. با توجه به کاربرد وسیع و کارایی این الگوریتم‌ها در سیستم‌های تولیدی جریان کارگاهی [۲۹] و [۳۰]، حل مسأله با الگوریتم ژنتیک در این مطالعه مدنظر قرار گرفت.

الگوریتم ژنتیک اولین بار توسط هالند [۳۱] معرفی شد و در زمره روش‌های جستجوی تصادفی هوشمند قرار می‌گیرد. در الگوریتم ژنتیک به هر جواب یک کروموزوم گفته می‌شود و متناسب با مقدار تابع هدف مسأله یک مقدار برازندگی^۳ به آن نسبت داده

می‌شود. به مجموعه‌ای از جواب‌ها جمعیت گفته می‌شود که در تکرارهای متوالی به نام نسل توسط عملگرهای ژنتیکی انتخاب، تقاطع و جهش^۴، بهبود می‌یابد. در هر نسل از الگوریتم ژنتیک با اعمال عملگرها روی جواب‌های والد، جواب‌های فرزند^۵ ایجاد شده و جهت تعیین جمعیت جدید با جمعیت فعلی رقابت می‌کنند.

الگوریتم ژنتیک در جستجوی کلی فضای جواب خوب عمل می‌کند، اما همگرایی آن به یک جواب بهینه‌ی موضعی به‌کندی صورت می‌گیرد. از طرف دیگر، روش‌های بهبود موضعی در جستجوی کلی ضعیف بوده اما در یافتن جواب بهینه‌ی موضعی موفق هستند. لذا تلفیق این دو روش می‌تواند به بهبود کارایی الگوریتم ژنتیک بینجامد.

روش‌های ترکیبی معمولاً متشکل از یک GA ساده هستند که از یک روش جستجوی همسایگی^۶ (NS) بهره می‌گیرند. روش NS روی هر جواب تولید شده توسط عملگرهای ژنتیک عمل نموده و آن را با بهترین جواب در همسایگی‌اش تعویض می‌نماید و قدرت جستجوی موضعی را به GA ساده اضافه می‌کند. در واقع در رویکرد ترکیبی، GA به عنوان جستجوگر کلی در فضای جواب به کار رفته و ابزار تنوع‌بخشی^۷ در مناطق جستجو شده‌ی فضای جواب‌ها خواهد بود و NS نقش جستجوگر موضعی را ایفا نموده و ابزار تمرکزدهی^۸ و جستجو در همسایگی هر کروموزوم محسوب می‌شود.

الگوریتم ژنتیک توسعه داده جهت حل مسأله‌ی حاضر، مبتنی بر دومین مدل ریاضی ترتیبی است. در این الگوریتم نیز متغیرهای صفر و یک مسأله که مستقل از اندیس m هستند، در قالب کروموزوم بیان شده و جواب بخش گسسته‌ی مسأله با توجه به کروموزوم‌ها تعیین می‌گردد. با جایگذاری متغیرهای صفر و یک حاصل مسأله به یک برنامه‌ریزی خطی تبدیل شده و جواب بخش پیوسته به دست می‌آید.

۴-۱- روش نمایش کروموزوم

مسأله‌ی مورد بررسی دارای N محصول، M ماشین، T پیوند و دو فرآیند تولید و تولید مجدد است. کروموزوم مسأله به صورت T زیرکروموزوم $2N$ تایی تعریف می‌شود، طوری که هر زیرکروموزوم بیان‌کننده‌ی توالی پردازش محصولات تولید و تولید مجدد در یک پیوند خاص است. در این روش برای محصول z شماره‌ی $2z-1$ معرف تولید و $2z$ تولید مجدد است. در شکل (۱) یک کروموزوم برای مسأله با سه محصول ($N=3$)، دو ماشین ($M=2$) و دو پیوند ($T=2$) نشان داده شده است. در این حالت ماشین‌ها برای تولید مجدد محصول ۳ آماده هستند. این کروموزوم دارای دو زیر کروموزوم است. اولین زیرکروموزوم بیان‌کننده‌ی توالی محصولات و فرآیندها در دوره‌ی ۱ و دومین زیر کروموزوم معرف توالی

4. Selection, crossover and mutation operators

5. Offspring

6. Neighborhood search

7. Diversification

8. Intensification

1. Genetic Algorithm

2. Intelligent random search

3. Fitness value

محصولات و فرآیندها در دوره ی ۲ است.

محصولات و فرآیندها در تمامی دوره ها یکسان است.

۳-۴- تابع برازش

به منظور ارزیابی کروموزومها لازم است یک تابع برازندگی تعریف شود. به این منظور تابع هدف مدل ترتیبی دوم که معادل حداقل کردن مجموع هزینه ها در کل افق برنامه ریزی است، به عنوان تابع برازش انتخاب شده است.

۴-۴- عملگر انتخاب

به منظور انتخاب والدهایی که باید تحت عملیات تقاطع قرار گیرند، دو روش انتخاب تورنامنت^۱ و چرخ رولت^۲ به کار گرفته شده است. در انتخاب تورنامنت دو کروموزوم به تصادف از جمعیت انتخاب شده و هر جوابی که تابع هدف بهتری داشت پذیرفته می شود. در انتخاب چرخ رولت احتمال انتخاب هر کروموزوم بر اساس برازندگی آن محاسبه می شود. بدین معنی که اگر f_k مقدار برازندگی کروموزوم k باشد، احتمال انتخاب آن کروموزوم $p_k = f_k / \sum_{i=1}^{pop-size} f_i$ خواهد بود. سپس کروموزومها بر اساس مقادیر نزولی p_k مرتب می شوند. برای انتخاب هر کروموزوم یک عدد تصادفی بین صفر و یک تولید می شود، عدد مذکور در هر بازه ای که قرار گرفت کروموزوم نظیر آن انتخاب می گردد.

۵-۴- عملگر تقاطع

به منظور ترکیب ویژگی های دو جواب والد جهت ایجاد جواب های فرزند بهتر از عملگر تقاطع استفاده می شود. در ادبیات مسایل زمان بندی با راه اندازی های وابسته به توالی، عملگرهای متعددی معرفی شده اند که از عملگرهایی مانند SJ2OX^۳ و SB2OX^۴ با حفظ بخش هایی از پیوندهای ایجاد شده میان برخی ژن ها عملکرد خوبی داشته اند. بنابراین این دو عملگر جهت اجرای الگوریتم ژنتیک مدنظر قرار گرفته اند. در عملگر SB2OX، حداقل دو ژن متوالی یکسان در زیر کروموزوم های متناظر والد که بلوک نامیده می شود، به منظور حفظ ژن هایی که در طی فرآیند ژنتیک بیشتر کنار یکدیگر قرار گرفته اند به فرزندان منتقل می شود. عملگر SJ2OX نیز مانند عملگر SB2OX عمل می کند؛ با این تفاوت که به جای انتقال بلوک های مشابه، ژن های مشابه منتقل می شوند.

۶-۴- عملگر جهش

عملگر جهش به منظور ایجاد اختلالات جزئی^۵ در کروموزوم های والد با هدف تنوع بخشی در کروموزوم های جمعیت به کار می رود. در رابطه با کروموزوم هایی که به شکل ترتیبی هستند عملگرهای جهش متفاوتی مانند عملگر تعویض، معکوس ساز، جایگذاری و

۶	۵	۴	۳	۱	۲	۲	۱	۶	۵	۴	۳
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

شکل (۱): کروموزوم برای مسأله با $(N=3, M=2, T=2)$

متغیرهای صفر و یک متناظر با زیر کروموزوم اول شکل (۱)، در جدول (۱) بیان شده است. لازم به ذکر است تنها متغیرهایی با مقدار غیر صفر در جدول ذکر شده اند.

جدول (۱): متغیرهای صفر و یک برای زیر کروموزوم اول شکل (۱)

$y'_{3,3,1} = 1$	$z'_{2,2,3,1} = 1$	$T_{1,1} = 1$	$T_{2,1} = 1$
$T_{3,1} = 1$	$y_{3,2,1} = 1$	$y_{2,1,1} = 1$	$z_{1,2,1,1} = 1$
$z_{2,1,2,1} = 1$	$z_{2,1,3,1} = 1$	$v_{1,1,1} = 1$	$v_{2,1,1} = 1$
$v_{1,2,1} = 1$	$v_{2,2,1} = 1$	$v_{1,3,1} = 1$	$v_{2,3,1} = 1$
$\alpha_{3,1} = 1$	$\beta_{1,1} = 1$	$\alpha'_{1,1,1} = 1$	$\alpha'_{2,2,1} = 1$
$\alpha'_{2,3,1} = 1$	$\beta'_{2,1,1} = 1$	$\beta'_{1,2,1} = 1$	$\beta'_{1,3,1} = 1$

۲-۴- جمعیت اولیه

جمعیت اولیه ی مناسب به بهبود کارایی الگوریتم ژنتیک می انجامد. بدین منظور با توسعه ی روش ابتکاری معرفی شده توسط محمدی [۲۹]، M جمعیت اولیه تولید شده و بقیه ی جواب ها به طور تصادفی تولید می شوند. در تولید تصادفی جمعیت، هر دو فرآیند تولید و تولید مجدد تمامی محصولات در تمامی دوره ها صورت می پذیرد.

تولید جمعیت اولیه به روش ابتکاری

به منظور تولید جمعیت اولیه روش زیر را به تعداد مراحل تولیدی (M بار) تکرار می کنیم:

برای کلیه محصولات (j ها) $\bar{W}_{j,m} = \sum_{i=1}^N W_{j,m}$ محاسبه شده و محصولات بر این اساس به صورت نزولی مرتب می شوند. سپس محصول با بالاترین مقدار $\bar{W}_{j,m}$ را از بین محصولات تخصیص نیافته در موقعیتی قرار می دهیم که مجموع هزینه های راه اندازی محصولات کمینه شود. هر محصول می تواند بین محصولات تخصیص یافته، قبل از اولین محصول تخصیص یافته و یا بعد از آخرین محصول تخصیص یافته قرار بگیرد. محصولی که تخصیص یافت از لیست محصولات مرتب شده حذف می شود. این روند ادامه می یابد تا تمامی محصولات در موقعیتی تخصیص یابند. پس از آنکه توالی محصولات تعیین شد، جهت تعیین فرآیندها هزینه های راه اندازی فرآیندهای هر محصول با یکدیگر مقایسه شده و برای مثال در صورتی که $C_{1,2,j,m}$ کمتر از $C_{2,1,j,m}$ باشد، ابتدا فرآیند تولید و سپس تولید مجدد محصول انجام می شود.

در این روش هر زیر کروموزوم تولید شده به شیوه ی ابتکاری برای تشکیل یک کروموزوم T بار تکرار می شود. یعنی توالی

1. Tournament selection
2. Roulette wheel
3. Similar job two point crossover
4. Similar block two point crossover
5. Small perturbation

ژن‌های مشابه موجود در زیر کروموزوم که بلافاصله بعد از ژن موردنظر نیستند، بعد از این ژن قرار گرفته و باقی ژن‌ها با حفظ ترتیب به سمت راست منتقل می‌شوند. سپس در صورتی که ژن مورد نظر مربوط به فرآیند تولید (تولید مجدد) باشد ژن‌های مربوط به تولید مجدد (تولید) همان محصول بلافاصله بعد از ژن‌های تولید (تولید مجدد) قرار گرفته، و مابقی ژن‌ها با حفظ ترتیب به سمت راست منتقل می‌شوند. در برخورد با محدودیت تقاضا و ظرفیت نیز از رویکرد جریمه‌ای استفاده شده است.

۹-۴- روش تعویض جمعیت جواب‌ها

از میان کروموزوم‌های موجود در جمعیت توسعه یافته به تعداد اندازه‌ی جمعیت، از بهترین کروموزوم‌ها انتخاب شده و به نسل بعد منتقل می‌شوند.

۱۰-۴- معیار توقف الگوریتم

این معیار تعیین کننده‌ی زمان توقف الگوریتم است. الگوریتم هنگامی متوقف می‌شود که تعداد تکرارهای الگوریتم به حداکثر تعداد تکرارها رسیده باشد و یا تعداد تکرارهای بدون ایجاد بهبود در بهترین جواب موجود (که از قبل مشخص می‌شود)، فرا رسد.

۱۱-۴- تنظیم پارامترها

تنظیم پارامترهای الگوریتم‌های فراابتکاری از جمله الگوریتم ژنتیک یکی از عوامل اساسی مؤثر بر کارایی الگوریتم است، به نحوی که انتخاب نادرست پارامترهای یک الگوریتم کارا منجر به عملکرد ضعیف آن می‌شود. در این پژوهش برای تنظیم پارامترهای الگوریتم‌های توسعه داده شده از روش تاگوچی^۲ استفاده شده است. آرایه‌های متعامد^۳ روش تاگوچی بررسی تعداد زیادی فاکتور را با تعداد آزمایش‌های اندک امکان‌پذیر می‌نماید. در این روش به منظور یافتن سطوح بهینه‌ی فاکتورها، معیار کارایی نسبت سیگنال به نویز^۴ (S/N) حداکثر می‌شود. نسبت سیگنال به نویز، به میانگین مجذور انحرافات تابع هدف اشاره می‌کند که میانگین و واریانس مشخصه‌های کیفی را جهت نزدیک‌تر کردن آن‌ها به مقادیر انتظاری، کمینه می‌کند [۳۲]. روش تاگوچی جهت تنظیم پارامترها به صورت زیر عمل می‌کند:

- برای هر آزمایش، نسبت S/N محاسبه می‌شود.
- برای فاکتورهایی که تأثیر قابل توجهی روی نسبت S/N دارند، سطحی که نسبت S/N را حداکثر می‌کند، بهینه است.
- در رابطه با فاکتورهایی که تأثیر چندانی روی نسبت S/N ندارند، اما روی میانگین متغیر پاسخ تأثیرگذار هستند، سطحی بهترین است که تابع هدف بهتری داشته باشد.

انتقال^۱ معرفی شده است که با توجه به عملکرد مناسب عملگر انتقال در مسایل با راه‌اندازی‌های وابسته به توالی در الگوریتم حاضر از این عملگر استفاده شده است. عملکرد این عملگر بدین نحو است که در هر زیرکروموزوم از کروموزوم انتخاب شده برای جهش، به‌طور تصادفی دو موقعیت انتخاب می‌شود، سپس ژن موقعیت اول به موقعیت دوم منتقل شده و ژن موقعیت دوم و ژن‌های بین این دو موقعیت به سمت چپ انتقال می‌یابند.

۷-۴- روش بهبود موضعی

با توجه به جمعیت اولیه‌ی ایجاد شده و عملکرد عملگرهای جهش و تقاطع ارایه شده، جواب‌هایی حاصل می‌شوند که در آن‌ها هر دو فرآیند تولید و تولید مجدد کلیه‌ی محصولات در تمامی دوره‌ها صورت می‌گیرد. در واقع به ازای تمامی مقادیر z ، l و t داریم: $v_{l,z,t} = 1$ ؛ حال آنکه می‌توان فرآیند تولید یا تولید مجدد (یا هر دو) برخی محصولات را در دوره‌های بزرگتر از یک انجام نداد و تقاضا را از طریق تنها یکی از فرآیندها و یا موجودی ابتدای دوره تأمین کرد. در دوره‌ی یک، از آنجا که ممکن است میزان محصولات بازگشتی به اندازه‌ای نباشد که تقاضای دوره توسط فرآیند تولید مجدد تأمین شود، فرآیند تولید برای تمامی محصولات در این دوره در نظر گرفته می‌شود؛ اما انجام فرآیند تولید مجدد برای این دوره نیز الزامی نیست.

روش بهبود موضعی بر مبنای یک جستجوی تکراری در همسایگی (NS) است؛ طوری که جواب حاصل از عملگر تقاطع یا جهش، طی تعویضات متوالی با یک کروموزوم بهتر در همسایگی آن جایگزین می‌شود.

همسایگی

به‌طور تصادفی یک (l, z, t) انتخاب می‌شود. در صورتی که $t > 1$ باشد، مانع انجام فرآیند l از محصول z در دوره‌ی t می‌شویم. در صورتی که $t = 1$ باشد مانع تولید مجدد محصول z در دوره‌ی t می‌شویم. بدین منظور ژن مربوطه از کروموزوم حذف شده و با اولین ژن حذف نشده‌ی قبلی جایگزین می‌شود. جستجوی تصادفی تا جایی ادامه می‌یابد که یا بهبود حاصل نشود و یا از تعداد تکرار مشخص (N) فراتر رود.

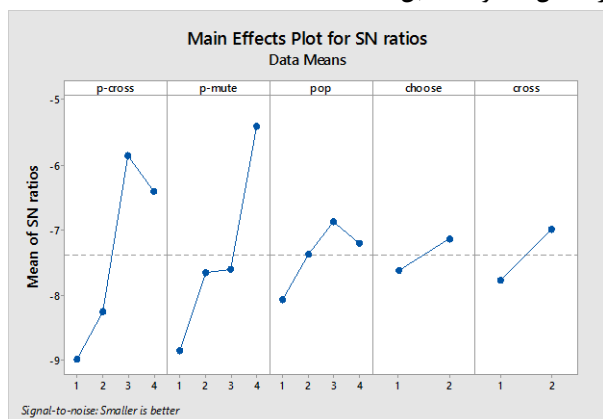
۸-۴- رویکرد برخورد با محدودیت‌ها

در این پژوهش، فرآیندهای تولید و تولید مجدد هر محصول به صورت متوالی برنامه‌ریزی می‌شوند؛ لذا به منظور تولید جواب شدنی لازم است ژن‌های مربوط به تولید و تولید مجدد هر محصول در هر زیر کروموزوم کنار یکدیگر قرار بگیرند. با توجه به عملکرد عملگرهای تقاطع و جهش ممکن است این ترتیب رعایت نشود، لذا از رویکرد اصلاحی به منظور ترمیم کروموزوم حاصل از تقاطع و جهش استفاده شده است. در این رویکرد ابتدا برای هر ژن کلیه‌ی

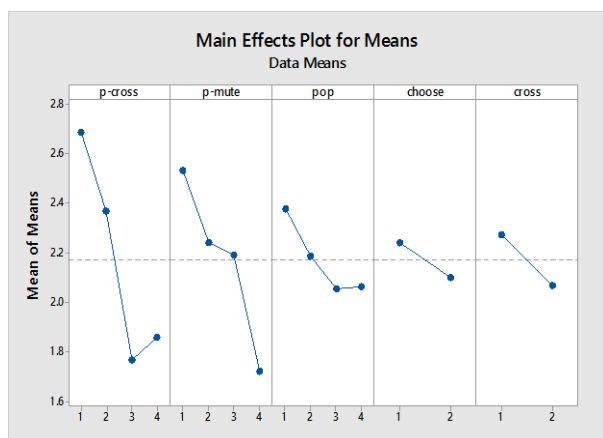
1. Swapping, inversion, insertion, shift mutation

2. Taguchi method
3. Orthogonal arrays
4. Signal-to-noise ratios

نسبت S/N و میانگین RPD برای الگوریتم ژنتیک، به ترتیب در اشکال (۳) و (۴) قابل مشاهده است.



شکل (۳): متوسط نسبت S/N در سطوح مختلف پارامترهای الگوریتم ژنتیک



شکل (۴): متوسط مقادیر RPD در سطوح مختلف پارامترهای الگوریتم ژنتیک

با توجه به اشکال فوق، بهترین سطوح فاکتورها برای این الگوریتم در جدول (۳) بیان شده است:

جدول (۳): سطوح بهینه‌ی پارامترها برای دومین الگوریتم ژنتیک

پارامتر	سطح بهینه
عملگر انتخاب	چرخ رولت
عملگر تقاطع	SJ2OX
احتمال تقاطع	۰/۷
احتمال جهش	۰/۲۵
اندازه جمعیت	5M

۵- نتایج عددی

به منظور مقایسه و ارزیابی روش‌های ابتکاری و الگوریتم ژنتیک ارایه شده جهت حل مسأله‌ی مورد نظر ۲۰ مسأله با ابعاد $N \times M \times T = 3 \times 3 \times 3$ تا $N \times M \times T = 15 \times 15 \times 15$ حل شده است. تعداد سطوح کیفیت در کلیه‌ی مسایل حل شده برابر با سه می-باشد. مدل اصلی مسأله و روش‌های ابتکاری ارایه شده با استفاده از

در رابطه با فاکتورهایی که روی هیچ یک از معیارهای نسبت S/N و یا میانگین متغیر پاسخ تأثیری ندارند، سطحی با کمترین زمان محاسباتی انتخاب می‌شود.

متغیر پاسخ مورد استفاده در این پژوهش، انحراف درصد نسبی^۱ (RPD) است که کمینه کردن آن مدنظر بوده و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$RPD = \left(\frac{OF_i - OF_{min}}{OF_{min}} \right) * 100 \quad (43)$$

که در آن OF_{min} بهترین جواب حاصل برای یک مسأله‌ی خاص و OF_i تابع هدف حاصل برای آزمایش i ام است. از آنجا که مقادیر کمتر متغیر پاسخ مطلوب است، نسبت S/N به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (44)$$

که در آن y_i مقدار RPD برای آزمایش i ام و n تعداد تکرارهاست. با بررسی ادبیات موضوع و شناسایی پارامترهایی مؤثر بر کارایی الگوریتم ژنتیک، تنظیم پارامترهای احتمال تقاطع، احتمال جهش، اندازه‌ی جمعیت، عملگر انتخاب و عملگر تقاطع در تنظیم الگوریتم ژنتیک ارایه شده مدنظر قرار گرفته است. حداکثر تعداد نسل‌ها در این الگوریتم‌ها ۱۰۰ و تعداد تکرارهای بدون ایجاد بهبود در بهترین جواب 2.N در نظر گرفته شده است.

سطوح مورد نظر برای الگوریتم‌های ژنتیک ارایه شده به صورت زیر است:

- عملگر انتخاب: دوسطح (تورنامنت و چرخ رولت)
- عملگر تقاطع: دو سطح (SB2OX, SJ2OX)
- احتمال تقاطع: چهار سطح (۰/۵، ۰/۶، ۰/۷، ۰/۸)
- احتمال جهش: چهار سطح (۰/۱، ۰/۱۵، ۰/۲، ۰/۲۵)
- اندازه‌ی جمعیت: چهار سطح (3M, 4M, 5M, 6M)

پارامترهای فوق به ترتیب با نمادهای choose, cross, p-cross, p-mute و pop در اشکال مشخص می‌شوند. براساس سطوح و فاکتورهای در نظر گرفته شده طرح L_{16} تاگوچی، به منظور تنظیم پارامترها مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۴-۱۲- تنظیم پارامترهای دومین الگوریتم ژنتیک

برای هر آزمایش تاگوچی هر یک از مسایل ارایه شده در جدول (۲) با استفاده از پارامترهای ذکر شده در بخش [۵] تولید شده و پنج مرتبه حل شده است. در نتیجه در مجموع $400 = 16 \times 5 \times 5$ مسأله حل شده است.

جدول (۲): ابعاد مسایل مورد استفاده جهت تعیین پارامترهای

دومین الگوریتم ژنتیک

۳*۳*۳	۵*۵*۵	۷*۷*۷	۱۰*۱۰*۱۰	۱۵*۱۵*۱۵
-------	-------	-------	----------	----------

1. Relative percentage deviation
2. Smaller-the-better

مسائل در زمان معقول است.

همانطور که مشاهده می‌شود، کیفیت جواب‌های حاصل از H1 بهتر از سایر الگوریتم‌هاست، چراکه مبتنی بر مدل اصلی بوده و ساده‌سازی در آن صورت نگرفته است. الگوریتم H2 نسبت به سایرین از کیفیت پایین‌تری برخوردار است، چراکه علاوه بر متغیرهای صفر و یک متغیرهای پیوسته را نیز تثبیت می‌کند. الگوریتم H3 به دلیل ساده‌سازی کمتر، از کیفیت بهتری نسبت به H4 برخوردار است. با افزایش ابعاد مسأله کیفیت جواب‌های الگوریتم H4 بهتر از الگوریتم H3 خواهد بود، چراکه مدل ساده شده‌ی دوم دارای فضای جواب کوچکتری بوده و جستجو در ابعاد بزرگ بهتر انجام می‌شود. الگوریتم ژنتیک در مقایسه با روش‌های ابتکاری دارای زمان محاسباتی کمتری بوده و قادر به حل کلیه‌ی مسائل نمونه است. همچنین، کیفیت الگوریتم ژنتیک ارایه شده در ابعاد کوچک، تقریباً نزدیک به H3 و H4 بوده و با افزایش ابعاد مسأله بهتر از این دو الگوریتم عمل می‌کند؛ چراکه این الگوریتم سریع‌تر بوده و قابلیت جستجوی مناسبی دارد. لذا، در زمان محدود قادر به جستجوی مؤثرتر و یافتن جواب‌هایی بهتر نسبت به سایر الگوریتم‌هاست. بنابراین، به‌منظور حل مسأله‌ی موردنظر الگوریتم ژنتیک ارایه شده، از کارایی بالاتری برخوردار است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله مسأله‌ی تعیین اندازه انباشته با راه‌اندازی‌های وابسته به توالی همراه با گزینه‌ی تولید مجدد در سیستم جریان کارگاهی مورد بررسی قرار گرفت و یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط جهت فرمول‌بندی مسأله ارایه شد. از آنجا که مسأله‌ی مذکور NP-hard است، به‌منظور حل مسأله چهار روش ابتکاری مبتنی بر رویکرد افق متحرک و یک الگوریتم ژنتیک توسعه داده شد.

نسخه‌ی 24.1.3 نرم‌افزار GAMS IDE (CPLEX) و الگوریتم ژنتیک با استفاده از نرم‌افزار MATLAB 2013 تهیه شده‌اند. پارامترهای مسأله دارای توزیع یکنواخت بوده و به صورت زیر می‌باشند:

$$\begin{aligned}d_{j,t} &\approx U(0,180); u_{l',j,t} \approx U(0,90/L); b_{j,m} \approx U(1.5,2); \\b_{l',j,m} &\approx (0.4 + (l'-1)p) * U(1.5,2); h_{j,m} \approx U(0.2,0.4); \\h_{l',j,m} &\approx U(0.15,0.3); hr_{l',j} \approx U(0.1,0.2); hs_j \approx U(0.4,0.8); \\p_{j,m,t} &\approx U(1.5,2); p'_{l',j,m} \approx (0.4 + (l'-1)p) * U(1.5,2); \\W_{i,j,m} &\approx U(35,70); S_{i,j,m} \approx U(35,70); \alpha r_{l',j} \approx U(0.01,0.02); \\C_{m,t} &\approx U(a_m, b_m); p = (0.6 - 0.4) / (L - 1); \\a_m &= 300N + 200(m - 1), b_m = 300N + 300(m - 1)\end{aligned}$$

تمامی مسائل با استفاده از یک کامپیوتر core i5 با سرعت 2.53GHz و رم 4GB حل شده‌اند.

تابع هدف و زمان‌های حل روش‌های ابتکاری، الگوریتم ژنتیک و روش دقیق در ابعاد کوچک در جدول (۴) مقایسه شده‌اند. نتایج حل تمامی مسائل با استفاده از روش‌های حل ارایه شده در جدول (۵) قابل مشاهده است.

با توجه به نتایج حاصل مشاهده می‌شود که حل مسائل با ابعاد بزرگتر از $5 \times 5 \times 5$ در زمان ۲ ساعت، به‌صورت دقیق امکان‌پذیر نیست. کارایی روش‌های ابتکاری با افزایش ابعاد مسأله کاهش می‌یابد، به‌طوری‌که حل مسأله با ابعاد بزرگتر از $5 \times 7 \times 5$ با الگوریتم H1 ممکن نیست. الگوریتم H2 با تثبیت متغیرهای پیوسته علاوه بر متغیرهای گسسته قادر به حل مسائل بیشتری نسبت به H1 تا سایز $5 \times 5 \times 10$ است. الگوریتم H3 که مبتنی بر مدل ساده شده‌ی اول است، با کاهش متغیرهای صفر و یک مسأله‌ی اصلی قادر به حل مسائل تا سایز $10 \times 10 \times 10$ می‌باشد. الگوریتم H4 مبتنی بر مدل ساده شده‌ی دوم بوده و در حل مسائل نمونه سریعتر از H3 عمل می‌کند، اما همچنان قادر به حل مسائل تا سایز $10 \times 10 \times 10$ می‌باشد. الگوریتم ژنتیک ارایه شده، قادر به حل تمامی نمونه

جدول (۴): مقایسه‌ی روش‌های ابتکاری با جواب دقیق در ابعاد کوچک

ابعاد مسأله (N.M.T)	جواب بهینه	H1	H2	H3	H4	GA
$3 \times 3 \times 3$	(۳۱/۳۴)	(۲۲/۴۲)	(۱۰/۹۴)	(۹/۷۲)	(۸/۴۷)	(۷/۰۲)
	۴۷۰۹/۰۷	٪۰	٪۲/۹۴	٪۱/۰۷	٪۱/۰۷	٪۱/۰۷
$5 \times 3 \times 3$	(۹۷/۷۷)	(۶۳/۵۵)	(۲۳/۸)	(۱۳/۹۲)	(۹/۷۵)	(۱۰/۰۶)
	۶۵۱۹/۸۷	٪۰	٪۴/۹۴	٪۰/۶۷	٪۰/۹۸	٪۱/۶۶
$3 \times 5 \times 3$	(۳۴/۱۶)	(۳۰/۳۹)	(۱۱/۴۸)	(۱۰/۴۵)	(۹/۱۶)	(۱۱/۸۲)
	۶۸۲۸/۲۳	٪۰	٪۱/۱۵	٪۰/۲۷	٪۰/۶۶	٪۰/۶۶
$3 \times 3 \times 5$	(۴۴/۶۳)	(۳۴/۴۹)	(۱۲/۱)	(۱۱/۶۱)	(۹/۴۵)	(۱۰/۵۳)
	۶۷۶۰/۵۷	٪۰	٪۴/۴۸	٪۰/۴۳	٪۰/۴۷	٪۰/۴۷
$5 \times 5 \times 5$	(۷۲۰۰)*	(۷۲۰۰)*	(۲۹۱۴/۳۶)	(۲۷/۸)	(۲۲/۶۳)	(۱۶/۳۸)
	۱۷۵۹۰/۱۸	٪۱/۸۵	٪۲/۱	٪-۲/۵۱	٪-۲/۴۵	٪-۲/۵۳

جدول (۵): مقایسه‌ی روش‌های ابتکاری افق متحرک

GA	H4	H3	H2	H1	جواب بهینه	ابعاد مسأله (N.M.T)
(۷/۰۲)	(۸/۴۷)	(۹/۷۲)	(۱۰/۹۴)	(۲۲/۴۲)	(۳۱/۳۴)	۳×۳×۳
۴۷۶۴/۱۸	۴۷۶۴/۱۸	۴۷۵۹/۳۶	۴۸۴۷/۵	۴۷۰۹/۰۷	۴۷۰۹/۰۷	
(۱۰/۰۶)	(۹/۷۵)	(۱۳/۹۲)	(۲۳/۸)	(۶۳/۵۵)	(۹۷/۷۷)	۵×۳×۳
۶۶۲۷/۸۷	۶۵۸۳/۸۷	۶۵۶۳/۸۱	۶۸۴۲/۰۹	۶۵۱۹/۸۷	۶۵۱۹/۸۷	
(۱۱/۸۲)	(۹/۱۶)	(۱۰/۴۵)	(۱۱/۴۸)	(۳۰/۳۹)	(۳۴/۱۶)	۳×۵×۳
۶۸۷۳/۴۸	۶۸۷۳/۴۸	۶۸۴۶/۷۷	۶۹۰۶/۸۷	۶۸۲۸/۲۳	۶۸۲۸/۲۳	
(۱۰/۵۳)	(۹/۴۵)	(۱۱/۶۱)	(۱۲/۱)	(۳۴/۴۹)	(۴۴/۶۳)	۳×۳×۵
۶۷۹۲/۴۴	۶۷۹۲/۴۴	۶۷۸۹/۹۶	۷۰۶۳/۶۷	۶۷۶۰/۵۷	۶۷۶۰/۵۷	
(۱۶/۳۸)	(۲۲/۶۳)	(۲۷/۸)	(۲۹۱۴/۳۶)	(۷۲۰۰)*	(۷۲۰۰)*	۵×۵×۵
۱۷۱۴۴/۶۸	۱۷۱۵۸/۴۰	۱۷۱۴۸/۸۴	۱۷۹۵۹/۶۱	۱۷۹۱۶/۲۲	۱۷۵۹۰/۱۸	
(۷۳/۹۹)	(۵۷۶۸/۲۷)	(۵۷۶۹/۶)	(۷۲۰۰)*	-	-	۷×۵×۵
۲۶۸۲۵/۷۱	۲۷۳۵۷/۷۹	۲۷۴۰۲/۲۵	۲۸۸۹۲/۷۷	-	-	
(۷۵/۹۶)	(۴۶۲/۷۸)	(۱۸۹۷/۹۳)	(۵۳۰۴/۳۷)	(۷۱۹۹/۶۹)	-	۵×۷×۵
۲۷۹۷۸/۲۴	۲۸۱۰۹/۱۰	۲۸۰۴۴/۵۳	۲۹۱۷۸/۸۹	۳۱۲۶۹/۷۸	-	
(۲۳/۴۱)	(۱۵۱۵/۶۸)	(۲۰۷۵/۸)	(۵۸۰۵/۴۱)	-	-	۵×۵×۷
۲۸۷۱۱/۴۶	۲۸۵۷۴/۴۹	۲۸۸۱۲/۲	۳۰۴۹۱/۸۲	-	-	
(۱۲۲/۹۱)	(۶۱۷۵/۴۳)	(۶۱۹۱/۳۳)	-	-	-	۷×۷×۷
۴۸۹۲۷/۸۳	۴۸۹۸۹/۱۶	۴۸۹۶۵/۸۶	-	-	-	
(۸۳/۸۳)	(۵۸۲۳/۹۷)	(۵۸۲۴/۳۵)	-	-	-	۱۰×۵×۵
۳۸۷۷۶/۳۸	۳۸۹۵۱/۱۰	۳۸۷۴۳/۰۵	-	-	-	
(۹۸/۵۲)	(۱۹۴۹/۹۵)	(۳۰۳۴/۵۳)	(۷۲۰۰)*	-	-	۵×۱۰×۵
۳۸۸۷۳/۶۴	۳۹۲۸۰/۶۴	۳۹۲۶۵/۵۵	۴۱۹۷۰/۷۴	-	-	
(۵۷/۵۱)	(۴۳۹۰/۲۹)	(۴۴۹۱/۱)	(۷۲۰۰)*	-	-	۵×۵×۱۰
۳۶۰۸۹/۸۳	۳۵۹۰۳/۴۳	۳۶۱۶۰/۲۸	۳۸۳۸۵/۴۶	-	-	
(۲۶۵/۶۲)	(۶۵۲۲/۲۶)	(۶۵۲۷/۵۷)	-	-	-	۱۰×۷×۷
۷۶۵۴۶/۴۷	۸۰۵۸۱/۷۸	۸۵۱۱۱/۴۱	-	-	-	
(۲۱۴/۰۳)	(۶۱۸۰/۱۸)	(۶۲۰۱/۶۳)	-	-	-	۷×۱۰×۷
۷۲۰۹۸/۷۸	۷۵۳۷۲/۱۱	۷۹۰۸۸/۷۱	-	-	-	
(۲۰۰/۶۹)	(۶۱۹۶/۷۴)	(۶۲۰۱/۷۴)	-	-	-	۷×۷×۱۰
۷۴۳۸۲/۶۹	۷۵۶۴۰/۲۶	۸۶۹۳۳/۴۸	-	-	-	
(۹۴۲/۰۳)	(۷۰۳۶/۶۴)	(۷۲۰۰)*	-	-	-	۱۰×۱۰×۱۰
۱۴۹۴۹۲/۴۵	۱۷۴۰۴۸/۶۲	۱۷۰۴۷۳/۲	-	-	-	
(۳۰۵۸/۰۷)	-	-	-	-	-	۱۵×۱۰×۱۰
۲۲۸۲۶۴/۷۰	-	-	-	-	-	
(۲۷۹۳/۰۰)	-	-	-	-	-	۱۰×۱۵×۱۰
۲۲۷۳۳۹/۱۵	-	-	-	-	-	
(۱۵۳۹/۳۱)	-	-	-	-	-	۱۰×۱۰×۱۵
۲۱۶۴۰۵/۲۱	-	-	-	-	-	
(۶۸۷۰/۶۵)	-	-	-	-	-	۱۵×۱۵×۱۵
۴۸۰۸۸۲/۹۷	-	-	-	-	-	

- (ECMPRO): a review of the state of the art, *Journal of environmental management*, 91: 563 – 591.
- [6] Gupta, S.M. (2004). Remanufacturing control in multistage systems with stochastic recovery rates.
- [7] Roy, A., Maity, K., Maiti, M., (2009). A production–inventory model with remanufacturing for defective and usable items in fuzzy-environment, *Computers & Industrial Engineering*, 56: 87 – 96.
- [8] Kim, M.G., Yu, J.M., Lee, D.H., (2015). Solution algorithms for scheduling flow-shop-type remanufacturing systems, 53:1819–1831.
- [9] Richter, K., Weber, J., (2001). The reverse Wagner/Whitin model with variable manufacturing and remanufacturing cost, *International Journal of Production Economics*, 71: 447 – 456.
- [10] Golany, B., Yang, J., Yu, G., (2001). Economic lot-sizing with remanufacturing options, *Iie Transactions*, 33: 995 – 1003.
- [11] Yang, J., Golany, B., Yu, G., (2005). A concave-cost production planning problem with remanufacturing options, *Naval Research Logistics (NRL)*, 52: 443 – 458.
- [12] Teunter, R. H., Bayindir, Z. P., van den Heuvel, W. (2005). Dynamic lot sizing with product returns, *Econometric Institute Research Papers*, 17.
- [13] Li, Y., Chen, J., Cai, X., (2006). Uncapacitated production planning with multiple product types, returned product remanufacturing and demand substitution, *OR Spectrum*, 28: 101 – 125.
- [14] Pan, Z., Tang, J., Liu, O., (2009). Capacitated dynamic lot sizing problems in closed-loop supply chain, *European Journal of Operational Research*, 198: 810 – 821.
- [15] Pineyro, P., Viera, O., (2010). The economic lot-sizing problem with remanufacturing and one-way substitution, *International Journal of Production Economics*, 124: 482 – 488.
- [16] Zhang, J., Liu, X., Tu, Y.L., (2011). A capacitated production planning problem for closed-loop supply chain with remanufacturing, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 54: 757 – 766.
- [17] Corominas, A., Lusa, A., Olivella, J., (2012). A manufacturing and remanufacturing aggregate planning model considering a non-linear supply function of recovered products, *Production Planning & Control*, 23: 194 – 204.
- [18] Chen, M., Abrishami, P., (2014). A mathematical model for production planning in hybrid manufacturing-remanufacturing systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 71: 1187-1196.

هم‌چنین جهت حل مسأله در ابعاد بزرگ دو مدل ساده شده که با حذف توالی‌های غیرترتیبی مسأله‌ی اصلی حاصل می‌شوند معرفی شدند. دو روش ابتکاری اول بر مبنای مدل اصلی مسأله، روش ابتکاری سوم بر مبنای مدل ساده‌شده‌ی اول، و روش ابتکاری چهارم و الگوریتم ژنتیک مبتنی بر مدل ساده شده‌ی دوم توسعه یافتند. هم‌چنین، جهت تنظیم پارامترهای الگوریتم ژنتیک از روش تاگوچی استفاده شده است. به منظور ارزیابی و مقایسه‌ی روش‌های ارائه شده، آزمایش‌های عددی صورت گرفت، که بیانگر کارایی الگوریتم ژنتیک نسبت به روش‌های ابتکاری است؛ چرا که این الگوریتم ضمن داشتن سرعت بالاتر نسبت به روش‌های ابتکاری مبتنی بر افق متحرک، با افزایش ابعاد مسأله جواب‌هایی با کیفیت بالاتر تولید می‌کند.

این مطالعه می‌تواند در صنایع پیچیده‌ای مانند صنعت خودرو به‌کارگرفته شود. چرا که تولید مجدد محصولات هم به لحاظ اقتصادی جذاب است و هم با کاهش مواد اولیه‌ی مورد نیاز و انرژی لازم جهت پردازش محصولات مزایای زیست محیطی به همراه دارد. استفاده از محصولات بازگشتی و تولید مجدد با تقویت سیستم لجستیک معکوس و سیاست‌های انگیزشی مانند پرداخت پول به مشتریان، جهت جمع‌آوری محصولات مصرف شده امکان‌پذیر است. لازم به ذکر است که هر یک از این روش‌ها ملاحظات خاص خود را به دنبال داشته و ممکن است منجر به هزینه‌ی اضافه شوند که باید در مسأله لحاظ شود.

در نظرگرفتن عدم قطعیت‌های موجود در رابطه با تولید مجدد، از جمله عدم قطعیت کیفیت و کمیت محصولات بازگشتی و هم‌چنین زمان پردازش محصولات بازگشتی می‌تواند به توسعه‌ی مطالعه‌ی حاضر بینجامد. توسعه و به‌کارگیری سایر روش‌های ابتکاری و فراابتکاری جهت حل مسأله نیز به‌منظور پژوهش بیشتر در این حوزه پیشنهاد می‌گردد.

مراجع

- [1] Wagner, H.M., Whitin, T.M., (1958). Dynamic version of the economic lot size model, *Management science*, 5: 89 – 96.
- [2] Gelders, L.F., Van Wassenhove, L.N., (1981). Production planning: a review, *European Journal of Operational Research*, 7: 101 – 110.
- [3] Bahl, H.C., Ritzman, L.P., Gupta, J.N., (1987). OR Practice—Determining Lot Sizes and Resource Requirements: A Review, *Operations Research*, 35: 329 – 345.
- [4] Karimi, B., Fatemi Ghomi, S.M.T., Wilson, J.M. (2003). The capacitated lot sizing problem: a review of models and algorithms, *Omega*, 31: 365 – 378.
- [5] Ilgin, M.A., Gupta, S.M., (2010). Environmentally conscious manufacturing and product recovery

- dependent setups. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 21: 501 – 510.
- [26] Ramezani, R., Saidi-Mehrabad, M., Teimoury, E., (2013). A mathematical model for integrating lot-sizing and scheduling problem in capacitated flow shop environments, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 66: 347 – 361.
- [27] Clark, A.R., Clark, S.J., (2000). Rolling-horizon lot-sizing when set-up times are sequence-dependent, *International Journal of Production Research*, 38: 2287 – 2307.
- [28] Mercé, C., Fontan, G., (2003). MIP-based heuristics for capacitated lotsizing problems, *International Journal of Production Economics*, 85: 97 – 111.
- [29] Mohammadi, M., Ghomi, S.F., Jafari, N., (2011). A genetic algorithm for simultaneous lotsizing and sequencing of the permutation flow shops with sequence-dependent setups. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 24: 87-93.
- [۳۰] بهنامیان، جواد، دیانت، فاطمه (۱۳۹۵). مقایسه‌ی سه روش فراابتکاری برای کمینه نمودن زمان چرخه در مسئله‌ی زمان‌بندی جریان کارگاهی مختلط دوره‌ای با در نظر گرفتن اثر یادگیری، نشریه‌ی پژوهشی مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، ۴(۸): ۱۰۵-۱۱۷.
- [31] Holland, J.H., (1975). *Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. U Michigan Press.
- [32] Taguchi, G., Chowdhury, S., Taguchi, S., (2000). *Robust engineering*, New York, Hard-Bound, 24(2): 141-142.
- [19] Li, X., Baki, F., Tian, P., Chaouch, B.A., (2014). A robust block-chain based tabu search algorithm for the dynamic lot sizing problem with product returns and remanufacturing. *Omega*, 42: 75-87.
- [20] Baki, M.F., Chaouch, B.A., Abdul-Kader, W., (2014). A heuristic solution procedure for the dynamic lot-sizing problem with remanufacturing and product recovery. *Computers & Operations Research*, 43: 225-236.
- [21] Lee, C.W., Doh, H.H., Lee, D.H., (2015). Capacity and production planning for a hybrid system with manufacturing and remanufacturing facilities. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 229: 1645-1653.
- [22] Sifaleras, A., Konstantaras, I., (2015). General variable neighborhood search for the multi-product dynamic lot-sizing problem in closed-loop supply chain. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 47: 69-76.
- [23] Parsopoulos, K.E., Konstantaras, I., Skouri, K. (2015). Metaheuristic optimization for the single-item dynamic lot sizing problem with returns and remanufacturing. *Computers & Industrial Engineering*, 83: 307-315.
- [24] Jing, Y., Li, W., Wang, X., Deng, L., (2016). Production planning with remanufacturing and back-ordering in a cooperative multi-factory environment. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 29: 692-708.
- [25] Mohammadi, M., Ghomi, S.F., Karimi, B., Torabi, S.A., (2010). Rolling-horizon and fix-and-relax heuristics for the multi-product multi-level capacitated lotsizing problem with sequence-



Multi-Stage Production Planning with Sequence-Dependent Setups and Setup Carry Over In Closed-Loop Supply Chain

S. Torkaman¹, S.M.T Fatemi Ghomi^{*1}

¹ Department of Industrial Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 1 February 2017
Accepted 6 March 2016

Keywords:

Production planning
Closed-loop supply chain
Sequence dependent setup
Setup carry over
Rolling horizon, Flow shop
Genetic Algorithm

ABSTRACT

This paper studies multi-stage, multi-product, multi-period production planning problem with sequence dependent setups in closed-loop supply chain. Manufacturing and remanufacturing processes of each product are regarded consequently, and both of them could be performed if machine is ready for processing corresponding product. To formulate the problem, a mixed-integer programming (MIP) model is presented and four heuristic algorithms using rolling horizon and a genetic algorithm are developed to solve the model. First two heuristic algorithms are developed based on the original model, but to solve the large instances the other two heuristics and the genetic algorithm are based on the simplified model, which is obtained by elimination of non-permutation sequences of original model solution space. To calibrate the parameters of the proposed genetic algorithm, Taguchi method is applied. The numerical results indicate the efficiency of the proposed meta-heuristic algorithm against MIP-based heuristic algorithms.

* Corresponding author. Seyed Mohammad-Taghi Fatemi Ghomi
Tel.: 021-64545381; E-mail address: fatemi@aut.ac.ir