مهندسی صنایع و مدیریت شریف، (زمستان ۱۳۹۵)
دوره‌ی ۱-۳۲، شماره‌ی ۲/۱، ص. ۴۷-۵۸

Original Article

مدل جدید یکپارچه‌ی تولید سلولی، برنامه‌ریزی تولید و زنجیره‌ی تأمین با در نظرگرفتن مکان‌یابی انبارها

علی بزرگی امیری * **(استادیار)**
دانشکده‌ی مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

محمد کاظمی (مربی)
دانشکده‌ی مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی بیرجند

شیما شفیعی‌گل (دانشجوی کارشناسی ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

مهدی علینقیان (استادیار)
دانشکده‌ی مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه صنعتی اصفهان

نیاز محیط‌های پویا به گسترش انعطاف‌پذیرتر سازمان‌ها و تسهیلات موجب سوق آنها به سمت ترکیب مدل تولید سلولی پویا، برنامه‌ریزی تولید و زنجیره‌ی تأمین با در نظرگرفتن موضوعات مختلف ــ نظیر وجود چند کارخانه، بازارها و انبارهای متعدد، تأمین‌کنندگان مختلف، چند دوره زمانی، پیکربندی دوباره ــ می‌شود. در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای مسئله‌ی تولید سلولی ارائه شده که هم‌زمان مسئله‌ی برنامه‌ریزی تولید و طراحی زنجیره‌ی تأمین را در نظر می‌گیرد. تابع هدف مدل پیشنهادی شامل کمینه‌سازی هزینه‌های نگه‌داری، عملیات، نصب و برکناری ماشین، جابه‌جایی بین سلولی و درون سلولی، نگه‌داری قطعات در انبار، برون‌سپاری قطعات، تأسیس انبار، جابه‌جایی و حمل قطعات (از: کارخانه به انبار، انبار به بازار، کارخانه به بازار)، و توزیع ماشین است. در ادامه، نتایج محاسباتی از طریق حل مثال عددی توسط نرم‌افزار گمس برای نشان‌دادن صحت و اهمیت مدل پیشنهادی ارائه شده است.

واژگان کلیدی: سیستم تولید سلولی پویا، برنامه‌ریزی تولید، زنجیره‌ی تأمین، مکان‌یابی تسهیلات، طراحی شبکه.

alibozorgi@ut.ac.ir
m.kazemi@ustmb.ac.ir
sh.shafiee@ut.ac.ir
alinaghian@cc.iut.ac.ir

۱. مقدمه

در حال حاضر با توجه به تنوع و اندازه دسته‌های تولیدی و توالی عملیات، انعطاف‌پذیر کردن هرچه بیشتر سیستم‌های تولیدی روند رو به رشدی دارد. امروزه یکی از چیدمان‌های مهم، گروه‌بندی تجهیزات برای انجام مجموعه‌یی از عملیات روی اجزاء و محصولات یکسان و هم‌خانواده است.

تکنولوژی گروهی عبارت است از تجزیه، تحلیل و مقایسه‌ی اجزا و قطعات، و قراردادن قطعات یکسان و دارای مشخصات مشابه در گروه‌های مجزا که باعث کاهش زمان برنامه‌ریزی تولید و همچنین زمان راه‌اندازی ماشین‌آلات می‌شود. تولید سلولی یکی ازکاربردهای اولیه‌ی قواعد تکنولوژی گروهی برای ساخت و تولید است که براساس آن، هر سلول متشکل از تعدادی ماشین‌آلات و تجهیزات تولیدی است که قادر به پردازش گروهی قطعات تحت عنوان خانواده‌ی قطعات با فرایندهای تولیدی مشابه‌اند.[۱]

زنجیره‌ی تأمین شامل تمامی فعالیت‌های مرتبط با جریان و مبادله‌ی کالاها و خدمات، از مرحله‌ی ماده خام تا مرحله‌ی محصول نهایی و قابل مصرف توسط مشتری است. کاهش هزینه یا کاهش موجودی‌ها، افزایش مسئولیت‌پذیری در برابر مشتریان، بهبود ارتباط زنجیره‌ی تأمین، کاهش زمان چرخه‌ی تولید و بهبود هماهنگی از اهداف مدیریت زنجیره‌ی تأمین است.[۲]

در این مقاله با ادغام و یک‌پارچه سازی سیستم تولید سلولی، برنامه‌ریزی تولید و زنجیره‌ی تأمین، ضمن در نظرگرفتن مکان‌های کاندیدا برای احداث انبار، مکان‌یابی انبارهای خارج از کارخانه مورد بحث واقع شده است؛ امری که در مقالات قبلی در نظرگرفته نشده است. افزون بر این، در راستای بهبود سیستم تولید سلولی، با اضافه کردن عبارت توزیع ماشین در تابع هدف و محدودیت‌ها و با جلوگیری از توزیع بیش از حد یک نوع ماشین باعث ایجاد تعادل و بهینه شدن ماشین‌های موجود در سلول شده است. به‌طورکلی نوآوری‌های مدل عبارت است از:

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۳/۴/۴، اصلاحیه ۱۳۹۳/۹/۸، پذیرش ۱۳۹۳/۱۲/۵.

- یک‌پارچه دیدن مسئله‌ی تولید سلولی، برنامه‌ریزی تولید و مسئله‌ی مکان‌یابی انبار در طراحی شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین؛

- جلوگیری از توزیع بیش از حد و نامناسب یک نوع ماشین در سلول‌ها.

در ادامه، بخش دوم این نوشتار به مروری بر تحقیقات انجام‌شده در حوزه‌ی تولید سلولی و زنجیره‌ی تأمین اختصاص یافته و مسائلی که توسط محققین مختلف در این زمینه مطرح شده مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در بخش سوم مدل‌سازی مسئله در قالب مدل ریاضی، و در بخش چهارم مثال عددی برای بررسی صحت و اهمیت مدل پیشنهادی ارائه شده است.

۲. ادبیات موضوع

تغییرات مکرر تشکیل سلول‌های تولیدی ممکن است برای تولیدکننده‌ها غیراقتصادی و گاهی غیرممکن باشد. بنابراین، برای تحقیق درخصوص گسترش مدل‌ها و رویه‌های حل به‌منظور پیکربندی دوباره‌ی سلول پویا تحت دوره‌ی زمانی متعدد، نیروی فزاینده مورد نیاز است.

در این قسمت ادبیات موضوع در سه بخش تولید سلولی، زنجیره‌ی تأمین و ترکیبی از این دو بررسی شده است.

الف) تولید سلولی

در سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۰۸ مدل‌هایی برای طراحی سیستم تولید سلولی چنددوره‌یی ارائه شد.[۳و۴] در مدل تک کارخانه و چنددوره‌یی ارائه شده در این تحقیق‌ها، تقاضا برای هر دوره از طریق تولید و برون‌سپاری در دوره‌ی جاری برآورده شده است.

در سال ۲۰۰۹ یک مدل ریاضی ترکیبی با چند دوره زمانی و برنامه‌ریزی تولید در یک سیستم تولید سلولی پویا، با هدف کمینه‌سازی ماشین، جابه‌جایی بین‌سلولی و درون‌سلولی، پیکربندی دوباره، قرارداد فرعی جزئی و هزینه‌های حمل موجودی ارائه شد.[۵] مدل ارائه‌شده بر سنجش و مقایسه‌ی بین هزینه‌های تولید و برون‌سپاری بر پیکربندی دوباره‌ی سلول‌ها در سیستم تولید سلولی پویا تأکید دارد.

درسال ۲۰۱۰ مسئله‌ی پیکربندی سلول در شرایط پویا با الگوریتم ژنتیک بررسی شد.[۶] در مدل ارائه‌شده، اشکالات موجود در مدل‌های قبلی مورد بررسی قرارگرفته و فرمول‌بندی بهبودیافته‌ی جدیدی برای مسئله‌ی پیکربندی سلول پویا ارائه شده است.

در سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۱ نیز مدل‌های جامعی برای طراحی سیستم تولید سلولی چنددوره‌یی ارائه شد.[۷و۸] پس از آن در سال ۲۰۱۳ یک مدل یک‌پارچه با رویکرد یکپارچگی برنامه‌ریزی تولید و مسئله‌ی شکل‌دهی سلول ارائه شد.[۹] بدین منظور با کمک یک مجموعه مثال‌های موجود در ادبیات کاربرد مدل ارائه شده به ارزیابی و بررسی شده است.

در سال ۲۰۱۴ مسئله‌ی تشکیل سلول با در نظرگرفتن اندازه قطعات بهینه برای جابه‌جایی بین سلولی با توجه به فلسفه‌ی تولید به‌هنگام بررسی شد.[۱۰] هدف محققین در این مورد کمینه‌سازی هزینه‌هایی مانند هزینه‌ی خرید ماشین‌آلات، عملیات، جابه‌جایی بین سلولی و قطعات نیمه‌ساخته (WIP) بوده است.

در سال ۲۰۱۵ یک مدل سیستم تولید سلولی با ماشین‌های قابل برنامه‌ریزی مجدد برای شرایط آشفته بازار طراحی شد.[۱۱] رویکرد ارائه‌شده در ارتباط با سه جنبه طراحی، پیکربندی دوباره و زمان‌بندی سیستم تولیدی است.

ب) زنجیره‌ی تأمین

طراحی زنجیره‌ی تأمین با موضوعاتی برای تصمیم‌گیری تعداد مکان‌های تسهیلات تولیدی و تخصیص تسهیلات تولید به‌منظور خدمت‌دهی به بازار برای تولیدات مورد نیاز سروکار دارد.[۵]

طبقه‌بندی وسیع و مطالعات پیرامون تخصیص مکان‌های تسهیلات و مسئله‌ی مدیریت زنجیره‌ی تأمین[۱۲] در سال ۲۰۰۹ دیده می‌شود.

در سال ۲۰۱۳ مقاله‌یی در رابطه با هزینه‌ی زنجیره‌ی تأمین و چگونگی اندازه‌گیری آن ارائه شد که می‌توان از آن در صنعت استفاده کرد.[۲] این مطالعه نشان داد که هزینه‌ی کامل تجزیه و تحلیل زنجیره‌ی تأمین را در بسیاری از شرکت‌ها می‌توان بهبود داد و بیشتر گستراند.

در سال ۲۰۱۰ مسئله‌ی مکان‌یابی کارخانه براساس تأمین‌کننده و مشتری ارائه شد[۱۳] و به‌طور همزمان، توزیع محصول از کارخانه به مشتری و تأمین مواد از تأمین‌کنندگان به کارخانه مد نظر قرارگرفت.

ج) ترکیب تولید سلولی و زنجیره‌ی تأمین

در سال ۲۰۰۳ ضرورت ترکیب تولید سلولی و زنجیره‌ی تأمین مطرح شد.[۱۴] در نظر گرفتن همزمان زنجیره‌ی تأمین و تولید سلولی به سنجش دو حالت کمک می‌کند: ۱. داشتن تسهیلات زیاد که به مشتری نزدیک‌تر بوده و درنتیجه منجر به هزینه‌های توزیع پایین‌تر و پاسخ‌گویی سریع‌تر به مشتری می‌شود؛ ۲. داشتن تسهیلات کم‌تر و دورتر از مشتری برای داشتن هزینه‌های تولید پایین‌تر و درنتیجه هزینه‌های توزیع بالاتر و پاسخ‌گویی کندتر به مشتری. در سال ۲۰۰۸ محققین با ارائه‌ی مدل ترکیبی نشان دادند که رویکرد ادغامی و یک‌پارچه‌ی طراحی تولید سلولی با طراحی زنجیره‌ی تأمین ترکیب شده و باعث واکنش سریع، هزینه‌های تولید پایین‌تر و هزینه‌های کم‌تر توزیع به شرکت‌ها خواهد شد.[۱] در مدل فوق، مواردی مانند چند کارخانه، چند بازار، تأمین‌کننده، برون‌سپاری و توزیع قطعات در نظرگرفته نشده است.

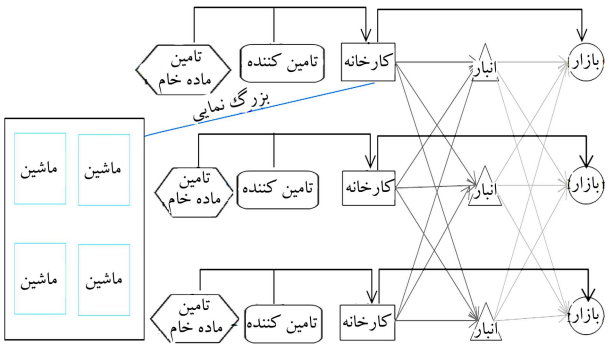
محیط‌های پویا نیازمند توسعه‌ی سازمان و امکانات انعطاف‌پذیرتر هستند. در سال ۲۰۱۲، با هدف ادغام تولید سلولی پویا و زنجیره‌ی تأمین، موارد مختلفی همچون مکان‌یابی چند کارخانه، چند بازار، چند دوره زمانی، برون‌سپاری و تأمین‌کننده مد نظر قرارگرفت.[۱۵] در مدل ارائه‌شده مکان‌یابی انبار، حمل‌ونقل از تأمین‌کننده به کارخانه، و همچنین توزیع ماشین‌ها در نظرگرفته نشده است.

در سال ۲۰۱۴ با در نظرگرفتن سلول‌های مجازی، تولید سلولی و زنجیره‌ی تأمین ترکیب شد.[۱۶] در این مدل مکان‌یابی کارخانه، توزیع قطعات و برون‌سپاری در نظرگرفته نشده است.

با توجه به شکاف‌های تحقیقاتی اشاره شده، در این مقاله یک مدل یک‌پارچه برای ادغام تولید سلولی، زنجیره‌ی تأمین و برنامه‌ریزی تولید ارائه شده است.

۳. فرمول‌بندی مسئله

در این قسمت یک مدل ریاضی جامع تولید سلولی پویا، زنجیره‌ی تأمین و برنامه‌ریزی تولید ارائه شده است. طرح گرافیکی مدل پیشنهادی در شکل ۱ نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود، اجزای مختلف سیستم زنجیره‌ی تأمین شامل تأمین‌کنندگان، کارخانجات، انبارها، حمل‌ونقل خارجی و بازارها در این مدل در نظر گرفته شده است.



شکل ۱. مدل ترکیبی زنجیره‌ی تأمین، تولید سلولی و برنامه‌ریزی تولید.

در این مسئله تعدادی تأمین‌کننده، کارخانه، انبار خارج از کارخانه و بازار در نظر گرفته شده است. همچنین قابلیت برون‌سپاری قطعات نیز در این مدل وجود دارد. قطعات یا در داخل کارخانه تولید می‌شوند یا از طریق برون‌سپاری تأمین خواهند شد که باید در نهایت پاسخ‌گوی نیاز بازارها باشند. قطعات تولیدی در داخل کارخانه تعداد عملیات مشخصی دارند که باید براساس توالی مربوطه انجام گیرند. همچنین زمان انجام تمامی عملیات یک قطعه روی ماشین‌های مختلفی که توانایی انجام آن عملیات را دارند، مشخص است. حرکت قطعات به‌صورت بین‌سلولی و درون سلولی در نظر گرفته شده و نیز قطعات قابلیت توزیع روی ماشین‌ها و سلول‌های متفاوت را دارند.

همانطورکه اشاره شد، انبار در خارج کارخانه در نظرگرفته شده است. تعدادی مکان کاندید برای تأسیس انبار وجود دارد که با توجه به محدودیت بودجه، تعداد مشخصی از آنها باید تأسیس شود. بخشی از تقاضای مورد نیاز بازارها را می‌توان مستقیماً از کارخانه تأمین کرد و بخشی دیگر (درصورت وجود کالا در انبار) را می‌توان از انبارهای موجود تأمین کرد.

۱.۳. مفروضات مسئله

فرضیات اصلی مدل عبارت است از:

۱. میزان تقاضا برای هر نوع قطعه مشخص است.

۲. ظرفیت هر نوع ماشین مشخص است.

۳. هزینه‌های ثابت مربوط به نگه‌داری ماشین‌ها مشخص است.

۴. تعداد ماشین‌های موجود از هر نوع ماشین مشخص است.

۵. بسته به نوع قطعه، هزینه‌ی جابه‌جایی بین سلولی و درون سلولی متفاوت است.

۶. تعداد سلول‌هایی که باید شکل گیرد و بیشینه و کمینه اندازه سلول از قبل مشخص است.

۷. تمامی ماشین‌ها توان انجام یک یا بیش از یک عملیات را دارند. مثلاً هر عملیات از یک قطعه را می‌توان روی چند ماشین مختلف با زمان‌های پردازش مختلف اجرا کرد.

۸. در این مدل تعداد ماشین‌ها ثابت نیست و در ابتدای هر دوره، برحسب تعداد و نوع قطعات، ماشین اضافه و کم می‌شود.

۹. تغییر مکان ماشین‌ها از یک سلول به سلول دیگر نیازمند زمانی نیست.

۱۰. موجودی قطعه‌ی نگه‌داری شده در شروع و پایان افق برنامه‌ریزی صفر است.

۱۱. سفارش تأخیر شده مجاز نیست و کل تقاضا باید در دوره داده شده برآورده شود.

۲.۳. اندیس‌ها

$i = \{1, 2, ..., I\}$: اندیس مورد استفاده برای شماره‌ی کارخانه؛

$k = \{1, 2, ..., K\}$: اندیس مورد استفاده برای عملیات قطعه؛

$p = \{1, 2, ..., P\}$: اندیس مورد استفاده برای نوع قطعات؛

$m = \{1, 2, ..., M\}$: اندیس مورد استفاده برای نوع ماشین‌ها؛

$c = \{1, 2, ..., C\}$: اندیس مورد استفاده برای شماره‌ی سلول‌ها؛

$h = \{1, 2, ..., H\}$: اندیس مورد استفاده برای دوره زمانی h؛

$j = \{1, 2, ..., J\}$: اندیس مورد استفاده برای شماره‌ی بازار؛

$r = \{1, 2, ..., R\}$: اندیس مورد استفاده برای تأمین‌کننده؛

$n = \{1, 2, ..., N\}$: اندیس مورد استفاده برای انبار.

۳.۳. پارامترها

α_{imh}: هزینه‌ی نگه‌داری ماشین m در دوره زمانی h در کارخانه‌ی i (تومان)؛

β_{imh}: هزینه‌ی عملیات روی ماشین m در دوره زمانی h در کارخانه‌ی i (تومان)؛

λ_{iph}^{inter}: هزینه‌ی جابه‌جایی بین‌سلولی قطعه‌ی p در دوره h در کارخانه‌ی i (تومان)؛

λ_{iph}^{intra}: هزینه‌ی جابه‌جایی درون‌سلولی قطعه‌ی p در دوره h در کارخانه‌ی i (تومان)؛

δ_{imh}: هزینه‌ی نصب برای ماشین نوع m در دوره زمانی h (تومان)؛

δ'_{imh}: هزینه‌ی برچیدن برای ماشین نوع m در دوره زمانی h (تومان)؛

PH_{nph}: هزینه‌ی نگه‌داری قطعه‌ی p در هر انبار (تومان)؛

OSR_{ipr}: هزینه‌ی مواد خام در تولید قطعه‌ی p که از تأمین‌کننده‌ی r گرفته می‌شود (تومان)؛

OSF_{iph}: هزینه‌ی برون‌سپاری قطعه‌ی نهایی p در دوره h؛

c_{ij}: فاصله‌ی بین کارخانه‌ی i و بازار j (۴۰۰۰× کیلومتر)؛

a_{ij}: ضریب هزینه بین کارخانه i و بازار j ((۴۰۰۰× کیلومتر)/تومان)؛

c'_{nj}: فاصله‌ی بین انبار n و بازار j (۴۰۰۰× کیلومتر)؛

a'_{nj}: ضریب هزینه بین انبار n و بازار j ((۴۰۰۰× کیلومتر)/تومان)؛

c''_{in}: فاصله‌ی بین کارخانه‌ی i و انبار n (۴۰۰۰× کیلومتر)؛

a''_{in}: ضریب هزینه بین کارخانه‌ی i و انبار n ((۴۰۰۰× کیلومتر)/تومان)؛

T_{im}: ظرفیت زمانی در دسترس ماشین نوع m در کارخانه‌ی i (ساعت)؛

r_{ikpm}: اگر عملیات k قطعه p روی ماشین m کارخانه‌ی i انجام شود برابر ۱، در غیر این‌صورت برابر صفر؛

t_{ikpm}: زمان انجام عملیات k قطعه‌ی p روی ماشین m در کارخانه‌ی i (ساعت)؛

M': عدد ثابت خیلی بزرگ؛

D_{jph}: تقاضای قطعه‌ی p در بازار j در دوره‌ی h؛

Av_{imh}: تعداد ماشین در دسترس نوع m در دوره h در کارخانه‌ی i؛

UM_{ic}: حد بالای ظرفیت سلول در کارخانه‌ی i؛

LM_{ic}: حد پایین ظرفیت سلول در کارخانه‌ی i؛

θ_n: هزینه‌ی تأسیس انبار (تومان)؛

Cap_n: ظرفیت انبار nام.

۴.۳. متغیرهای تصمیم

X_{ikpmch}: تعداد قطعه p که عملیات kام آن روی ماشین m در سلول c دوره h

در کارخانه‌ی i انجام می‌شود؛

X'_{ijph}: تعداد قطعه‌ی p که از کارخانه‌ی i به بازار j دردوره h برده می‌شود؛

N_{imch}: تعداد ماشین m که در سلول c کارخانه‌ی i استفاده می‌شود؛

K^{+}_{imch}: تعداد ماشین m که در سلول c کارخانه‌ی i اضافه می‌شود؛

K^{-}_{imch}: تعداد ماشین m که از سلول c کارخانه‌ی i خارج می‌شود؛

D^{in}_{iph}: مقدار تقاضای قطعه p که در دوره h درکارخانه‌ی i به‌صورت داخلی تولید می‌شود؛

Q^{H}_{inph}: موجودی قطعه p که در دوره h از کارخانه‌ی i به انبار n حمل و در آنجا نگه‌داری شده و به دوره $h+1$ منتقل می‌شود؛

Q'_{njph}: میزان قطعه p که در دوره h از انبار n به بازار j برده می‌شود؛

Q^{o}_{iph}: تعداد قطعه‌ی نهایی p که در دوره‌ی h برون‌سپاری می‌شود؛

LN_{imch}: اگر ماشین m در سلول c در دوره‌ی h در کارخانه‌ی i استفاده شود برابر ۱، در غیر این‌صورت برابر صفر؛

LN'_{imh}: اگر ماشین m در کارخانه‌ی i در دوره h استفاده شود برابر ۱، در غیر این‌صورت برابر صفر؛

L_n: اگر انبار در محل n تأسیس شود برابر ۱، در غیر این‌صورت برابر صفر.

۵.۳. مدل ریاضی

$$\min: \sum_{i=1}^{I}\sum_{h=1}^{H}\sum_{c=1}^{C}\sum_{m=1}^{M} N_{imch}\alpha_{imh} \quad (1)$$

$$+\sum_{i=1}^{I}\sum_{h=1}^{H}\sum_{c=1}^{C}\sum_{m=1}^{M}\sum_{p=1}^{P}\sum_{k=1}^{OP} t_{ikpm}X_{ikpmch}\beta_{imh} \quad (2)$$

$$+\left(\frac{1}{2}\right)\sum_{i=1}^{I}\sum_{h=1}^{H}\sum_{c=1}^{C}\sum_{p=1}^{P}\sum_{\substack{k=1\\k<OP}}^{OP}\lambda^{inter}_{iph} \times\left|\sum_{m=1}^{M}X_{i(k+1)pmch}-\sum_{m=1}^{M}X_{ikpmch}\right| \quad (3)$$

$$+\left(\frac{1}{2}\right)\sum_{i=1}^{I}\sum_{h=1}^{H}\sum_{c=1}^{C}\sum_{p=1}^{P}\sum_{\substack{k=1\\k<OP}}^{OP}\left(\sum_{m=1}^{M}\left|X_{i(k+1)pmch}-X_{ikpmch}\right|-\left|\sum_{m=1}^{M}X_{i(k+1)pmch}-\sum_{m=1}^{M}X_{ikpmch}\right|\right)\times\lambda^{intra}_{iph} \quad (4)$$

$$+\sum_{i=1}^{I}\sum_{h=1}^{H}\sum_{c=1}^{C}\sum_{m=1}^{M}K^{+}_{imch}\delta_{imh} \quad (5)$$

$$+\sum_{i=1}^{I}\sum_{h=1}^{H}\sum_{c=1}^{C}\sum_{m=1}^{M}K^{-}_{imch}\delta'_{imh} \quad (6)$$

$$+\sum_{n=1}^{N}\sum_{i=1}^{I}\sum_{h=1}^{H}\sum_{p=1}^{P}Q^{H}_{inph}.PH_{nph} \quad (7)$$

$$+\sum_{i=1}^{I}\sum_{h=1}^{H}\sum_{p=1}^{P}\sum_{r=1}^{r(i)}D^{in}_{iph}.OSR_{ipr} \quad (8)$$

$$+\sum_{i=1}^{I}\sum_{h=1}^{H}\sum_{p=1}^{P}Q^{o}_{iph}.OSF_{iph} \quad (9)$$

$$+\sum_{i=1}^{I}\sum_{h=1}^{H}\sum_{p=1}^{P}\sum_{j=1}^{J}X'_{jiph}c_{ij} \quad (10)$$

$$+\sum_{h=1}^{H}\sum_{m=1}^{M}\sum_{i=1}^{I}\left(\sum_{c=1}^{C}LN_{imch}-LN'_{imh}\right)\mu_{im} \quad (11)$$

$$+\sum_{n=1}^{N}\sum_{h=1}^{H}\sum_{p=1}^{P}\sum_{j=1}^{J}Q'_{njph}c'_{nj} \quad (12)$$

$$+\sum_{n=1}^{N}\sum_{h=1}^{H}\sum_{p=1}^{P}\sum_{i=1}^{I}Q^{H}_{inph}c''_{in} \quad (13)$$

$$+\sum_{n=1}^{N}\theta_n L_n \quad (14)$$

Subject to :

$$\sum_{p=1}^{P}\sum_{k=1}^{OP}t_{ikpm}X_{ikpmch}\le T_{im}N_{imch}\qquad\forall i,m,c,h \quad (15)$$

$$\sum_{c=1}^{C}X_{ikpmch}\le M'.\,r_{ikpm}\qquad\forall i,k,p,m,h \quad (16)$$

$$\sum_{c=1}^{C}\sum_{m=1}^{M}X_{ikpmch}=D^{in}_{iph}\qquad\forall i,k,p,h \quad (17)$$

$$\sum_{i=1}^{I}X'_{ijph}+\sum_{n=1}^{N}Q'_{njph}=D_{jph}\qquad\forall j,p,h \quad (18)$$

$$D^{in}_{iph}+Q^{o}_{iph}=\sum_{n=1}^{N}Q^{H}_{inph}+\sum_{j=1}^{J}X'_{ijph}\qquad\forall i,p,n \quad (19)$$

$$\sum_{c=1}^{C}N_{imch}\le Av_{imh}\qquad\forall i,m,h \quad (20)$$

$$\sum_{m=1}^{M}N_{imch}\le UM_{ic}\qquad\forall i,c,h \quad (21)$$

$$\sum_{m=1}^{M}N_{imch}\ge LM_{ic}\qquad\forall i,c,h \quad (22)$$

$$N_{imc(h-1)}+K^{+}_{imch}-K^{-}_{imch}=N_{imch}\qquad\forall i,m,c,h \quad (23)$$

$$K^{+}_{imc1}=N_{imc1}\qquad\forall i,m,c \quad (24)$$

$$N_{imch}\le M.LN_{imch}\qquad\forall i,m,c,h \quad (25)$$

$$\sum_{c=1}^{C}LN_{imch}\le M.LN'_{imh}\qquad\forall i,m,h \quad (26)$$

$$LN'_{imh}\le\sum_{c=1}^{C}LN_{imch}\qquad\forall i,m,h \quad (27)$$

$$\sum_{i=1}^{I}\sum_{p=1}^{P}Q^{H}_{inph}\le Cap_n\qquad\forall n,h \quad (28)$$

$$\sum_{i=1}^{I}Q^{H}_{inph-1}=\sum_{j=1}^{J}Q'_{njph}\qquad\forall n,p,h>1 \quad (29)$$

$$\sum_{h=1}^{H}\sum_{p=1}^{P}\sum_{i=1}^{I}Q^{H}_{inph}\le M.L_n\qquad\forall n \quad (30)$$

$$N_{imch}, K^{+}_{imch}, K^{-}_{imch}, X_{ikpmch}, Q'_{njph}, X'_{ijph}, D^{in}_{iph},$$
$$Q^{H}_{inph}, Q^{o}_{iph} \geq 0 \& \text{ int} \quad \forall i, j, k, p, m, c, h, n \qquad (31)$$
$$LN_{imch},\ LN'_{imh},\ L_n \in \{0, 1\} \quad \forall i, m, c, h, n \qquad (32)$$

تابع هدف مسئله شامل چهارده عبارت است. عبارت ۱ بیانگر هزینه‌ی نگه‌داری ماشین در هر دوره است. عبارت ۲ دربردارنده‌ی هزینه‌ی عملیات ماشین‌ها برای تولید قطعات مختلف است، که به هزینه‌ی عملیات هر نوع ماشین در هر ساعت در هر دوره زمانی، تعداد قطعاتی که در هر دوره عملیات روی آن انجام می‌شود و تعداد ساعات مورد نیاز برای هر نوع ماشین بستگی دارد. عبارت ۳ بیانگر هزینه‌ی جابه‌جایی بین سلولی قطعات است. عبارت ۴ به محاسبه‌ی هزینه‌ی جابه‌جایی درون سلولی می‌پردازد. عبارت ۵ دربردارنده‌ی هزینه‌ی نصب ماشین‌ها در هر کارخانه و در هر دوره است. عبارت ۶ بیانگر هزینه‌ی برکناری ماشین‌هاست. عبارت ۷ نشان‌دهنده‌ی هزینه‌ی نگه‌داری قطعات در انبار است. عبارت ۸ دربردارنده‌ی هزینه‌ی مربوط به قطعه‌ی خام است که از تأمین‌کننده تهیه می‌شود. عبارت ۹ به محاسبه‌ی هزینه‌ی برون‌سپاری قطعه‌ی نهایی می‌پردازد. عبارت ۱۰ هزینه‌ی حمل‌ونقل خارجی کارخانه را محاسبه می‌کند. (هزینه‌ی حمل قطعه از کارخانه به بازار مورد نظر).

پخش بیش از حد یک نوع ماشین خاص در سیستم تولید سلولی پویا به‌دلیل افزایش نیاز به نیروی کار متخصص و هزینه‌ی جابه‌جایی قطعات میان سلول‌ها منطقی نیست. بدین‌منظور عبارت ۱۱ برای متعادل و بهینه‌شدن تعداد ماشین‌آلات موجود در سلول‌های متفاوت طراحی شده است. در صورتی که ظرفیت زمانی ماشین نوع m کافی نباشد، تعداد آن نوع ماشین در همان سلول افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال فرض کنید یک اپراتور متخصص توانایی کارکردن با دو ماشین هم‌نوع به‌طور همزمان را داشته باشد. اما اگر این دو ماشین در دو سلول متفاوت قرار بگیرند، این کار غیرممکن خواهد بود و نیازمند استخدام نیروی کار جدید هستیم. بنابراین به‌منظور کاهش هزینه‌ی راه‌اندازی، بستن و بازکردن قطعه از روی ماشین، و نیزکاهش زحمت اپراتور و هزینه‌ی جابه‌جایی از این عبارت استفاده می‌شود.

عبارت ۱۲ هزینه‌ی حمل‌ونقل کالا از انبار به بازار را محاسبه می‌کند. عبارت ۱۳ هزینه‌ی حمل‌ونقل کالا ازکارخانه به انبار را محاسبه می‌کند. عبارت ۱۴ دربردارنده‌ی هزینه‌ی تشکیل انبار است.

محدودیت ۱۵ ایجاب می‌کند که از حدود ظرفیت ماشین‌های مورد استفاده برای تأمین تقاضای هر دوره تجاوز نکنیم و تقاضا را برآورده کنیم. محدودیت ۱۶ تضمین می‌کند که هرکدام از عملیات هر قطعه روی ماشینی که توان انجام آن را دارد انجام شود. محدودیت ۱۷ بیان می‌دارد که تعداد قطعات تولیدشده در سلول‌های مختلف و روی ماشین‌های متفاوت، برابر تعداد قطعاتی است که در داخل کارخانه تولید می‌شود. محدودیت ۱۸ تضمین می‌کند که کل تقاضای یک بازار برآورده شود. تعداد قطعاتی که از کارخانه‌های مختلف به یک بازار حمل می‌شود، برابر تعداد تقاضای آن بازار است. محدودیت ۱۹ معادله‌ی تعادلی مربوط به هرکارخانه است. مجموع میزان کالای تولیدی هر کارخانه و میزان برون‌سپاری شده برابر با مجموع تعداد قطعات نگه‌داری شده برای دوره‌ی آتی و میزان قطعه‌ی حمل‌شده ازکارخانه به بازارهاست. محدودیت ۲۰ بیانگر آن است که مجموع تعداد ماشین‌های نوع m در تمامی سلول‌ها باید کم‌تر یا مساوی ماشین‌های نوع m در دسترس در هر دوره زمانی باشد. محدودیت‌های ۲۱ و ۲۲ تضمین می‌کنند که از بیشینه و کمینه ظرفیت سلول درمورد تعداد ماشین‌های مورد استفاده در هر سلول تجاوز نکنیم. محدودیت ۲۳ ایجاب می‌کند که تعداد ماشین‌ها در دوره‌ی جاری برابر با تعداد ماشین‌ها در دوره‌ی قبل، به‌علاوه‌ی تعداد ماشین‌های اضافه‌شده، منهای تعداد ماشین‌های خارج شده است. محدودیت ۲۴ بیان می‌دارد که تعداد ماشین‌های نوع m در هر سلول در دوره‌ی اول، برابر با ماشین‌های نصب شده‌ی نوع m در هر سلول در دوره‌ی اول است. محدودیت ۲۵ ایجاب می‌کند که اگر ماشین نوع m در سلول c، در دوره‌ی h و درکارخانه‌ی i موجود باشد متغیر مقدار ۱ و در غیر این‌صورت مقدار صفر را اختیار می‌کند. محدودیت‌های ۲۶ و ۲۷ متغیر LN'_{imh} را محاسبه می‌کنند. به این صورت که اگر ماشین نوع m در دوره‌ی h درکارخانه‌ی i وجود داشته باشد مقدار این متغیر برابر ۱ خواهد شد. محدودیت ۲۸ تضمین می‌کند که میزان کالای هر انبار از ظرفیت انبار تجاوز نکند. محدودیت ۲۹ بیانگر تساوی میان میزان کالاهای حمل‌شده ازکارخانه به انبار و میزان کالاهای برده شده از انبار به بازارهاست. محدودیت ۳۰ تضمین می‌کند که قطعه درصورت تأسیس انبار به محل انبار منتقل می‌شود. محدودیت ۳۱ محدودیت‌های منطقی بزرگ‌تر از صفر و عدد صحیح و محدودیت ۳۲ محدودیت باینری است.

۴. نتایج محاسباتی

۱.۴. مثال‌های عددی

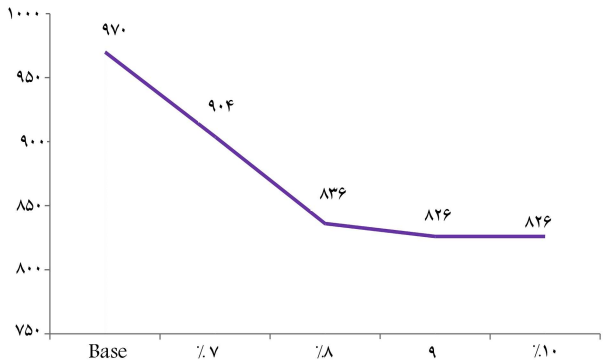
برای نشان دادن صحت عملکرد مدل یک مثال عددی حل شده است. در این مثال تعداد ۲ دوره، ۳ کارخانه، ۴ بازار، ۳ تأمین کننده، ۵ قطعه، ۳ عملیات، ۵ ماشین، ۲ سلول و ۶ مکان کاندید برای انبار در نظرگرفته شده است. حد بالا و پایین ظرفیت سلول به‌ترتیب ۵ و ۲، ظرفیت انبارها به‌ترتیب ۱۵۰، ۲۰۰، ۱۵۰، ۱۵۰، ۱۵۰، ۱۵۰ و هزینه‌های تأسیس هرکدام نیز ۱۰۰، ۹۰، ۹۰، ۹۰، ۹۵، ۱۰۰ است.

جدول ۱ هزینه‌ی نگه‌داری هر قطعه در هر انبار و میزان تقاضای هر بازار را در هر دوره نشان می‌دهد. جدول ۲ مسافت بین هرکارخانه و بازار، و نیز ضریب هزینه‌یی آن را در اختیار قرار می‌دهد. جدول ۳ مسافت بین هر انبار و بازار، مسافت بین هرکارخانه و انبار، و ضرایب هزینه‌ی آنها را در اختیار قرار می‌دهد.

۲.۴. نتایج حل

مثال مطرح شده در بخش قبل با استفاده از نرم‌افزار GAMS ۲۲/۹ توسط سیستمی با مشخصات Intel® CoreTM i5-2410M ۲/۳GHz و ۴GB RAM حل شده است. مثال پایه در مدت زمان ۵۵ ثانیه به جواب بهینه رسیده است.

شکل ۲ به درک بهتر مثال ارائه شده کمک می‌کند. با توجه به مثال، انبارهای



شکل ۲. اثر افزایش هزینه‌ی برون‌سپاری بر تعداد کل کالاهای برون‌سپاری شده.

جدول ۱. پارامترهای هزینه نگه‌داری (PH_{nph}) و میزان تقاضای بازار (D_{jph}).

Parameter		P_1		P_2		P_3		P_4		P_5	
		h_1	h_2	h_1	h_2	h_1	h_2	h_1	h_2	h_1	h_2
PH_{nph}	n_1	۰/۵	۰/۶	۰/۳	۰/۴	۰/۴	۰/۵	۰/۵	۰/۶	۰/۴	۰/۶
	n_2	۰/۳	۰/۴	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۵	۰/۳	۰/۴	۰/۲	۰/۴
	n_3	۰/۳	۰/۴	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۵	۰/۲	۰/۳	۰/۳	۰/۴
	n_4	۰/۴	۰/۵	۰/۳	۰/۴	۰/۳	۰/۴	۰/۲	۰/۳	۰/۳	۰/۴
	n_5	۰/۴	۰/۶	۰/۴	۰/۵	۰/۲	۰/۴	۰/۵	۰/۶	۰/۳	۰/۳
	n_6	۰/۳	۰/۴	۰/۴	۰/۶	۰/۳	۰/۵	۰/۳	۰/۴	۰/۳	۰/۵
D_{jph}	j_1	۲۸	۶۸	۳۰	۲۵	۴۱	۳۷	۴۵	۴۴	۳۷	۴۲
	j_2	۳۹	۵۲	۴۰	۷۰	۵۶	۲۶	۲۱	۳۶	۴۴	۳۰
	j_3	۱۷	۲۸	۵۰	۴۶	۴۵	۴۴	۳۰	۰	۴۰	۶۵
	j_4	۴۱	۵۸	۲۰	۵۰	۱۰	۶۰	۳۶	۴۴	۱۵	۴۰

جدول ۲. فاصله‌ی بین کارخانه و بازار(c_{ij}) و ضریب هزینه‌ی آن (a_{ij}).

	c_{ij}			a_{ij}		
	i_1	i_2	i_3	i_1	i_2	i_3
j_1	۰/۵۷	۰/۶۵	۰/۶۵	۱/۰	۱/۲	۱/۱
j_2	۰/۶۵	۰/۵۵	۰/۶۵	۱/۰	۱/۲	۱/۱
j_3	۰/۸۰	۰/۴۷	۰/۷۲	۱/۱	۱/۱	۱/۱
j_4	۰/۵۰	۰/۳۵	۰/۳۸	۱/۰	۱/۰	۱/۰

۲، ۳ و ۴ تأسیس می‌شود. خطوط مشکی، سبز و آبی به‌ترتیب نشان‌دهنده‌ی حمل کالا از کارخانه به بازار، از کارخانه به انبار و از انبار به بازار است. جریان‌های نشان داده شده در شکل ۲، مربوط به قطعه‌ی ۵ است. به‌عنوان مثال، در دوره اول مقداری کالا از کارخانه‌ی ۲ به انبار ۳ حمل شده و در آن نگه‌داری می‌شود. سپس در دوره دوم برای برطرف کردن تقاضای بازارهای ۲ و ۳ به آن بازارها فرستاده می‌شود. در ادامه، اطلاعات مربوط به مقادیر خروجی ارائه می‌شود.

در جدول ۴ چگونگی استفاده از ماشین‌های مختلف در سلول‌ها را در دو دوره نشان می‌دهد. به‌عنوان مثال در کارخانه‌ی ۱ ماشین ۳ و ۴ در سلول ۱ قرار داده شده‌اند. در جدول ۵ میزان کالایی که مستقیماً از هرکارخانه به هر بازار ارسال می‌شود نشان داده شده است. به‌عنوان مثال ازکارخانه‌ی ۱ تعداد ۲۸ قطعه‌ی نوع ۱ مستقیماً به بازار ۱ فرستاده می‌شود.

در جدول ۶ میزان کالای انتقالی از هر کارخانه به هر انبار به‌منظور نگه‌داری آنها جهت استفاده در دوره بعد ثبت شده است. از آنجا که میزان کالای نگه‌داری شده از دوره دوم برای دوره سوم هیچ استفاده‌یی ندارد، بنابراین مدل در پایان دوره دوم هیچ کالایی را انبار نمی‌کند. در جدول ۷ میزان کالای ارسال شده از هر انبار به هر بازار ثبت شده است. از آنجا که در ماه اول هیچ کالایی در هیچ انباری وجود ندارد، پس میزان کالای حمل شده از انبار به بازارهای مختلف در دوره اول برابر صفر است.

در جدول ۸ نیز چگونگی تصمیم بهینه برای تولید داخلی کارخانه و برون‌سپاری قطعات در هر دوره نشان داده شده است. به‌عنوان مثال کارخانه‌ی ۲ در دوره دوم تعداد ۲۸ قطعه‌ی نوع ۵ را از طریق برون‌سپاری تأمین می‌کند. در جدول ۹ هزینه‌های نهایی مربوط به مثال عددی ارائه شده است.

جدول ۳. مسافت بین انبار ـ بازار (c'_{nj})، کارخانه ـ انبار (c''_{in}) و ضرایب هزینه‌ی آنها (a'_{nj}) و (a''_{in}).

	c'_{nj}				a'_{nj}				c''_{in}			a''_{in}		
	j_1	j_2	j_3	j_4	j_1	j_2	j_3	j_4	i_1	i_2	i_3	i_1	i_2	i_3
n_1	۰/۴۵	۰/۴۷	۰/۵۸	۰/۲۶	۰/۵	۰/۵	۰/۵۲	۰/۴۷	۰/۲۵	۰/۵۲	۰/۲	۰/۷	۰/۷۱	۰/۷
n_2	۰/۲۱	۰/۲۶	۰/۴۳	۰/۲۱	۰/۵	۰/۵	۰/۵۱	۰/۵	۰/۴	۰/۵۵	۰/۴۳	۰/۷۱	۰/۷۱	۰/۷
n_3	۰/۳	۰/۱۸	۰/۱۵	۰/۲	۰/۵	۰/۴۹	۰/۴۹	۰/۵	۰/۶۷	۰/۴	۰/۵۷	۰/۷	۰/۷	۰/۷
n_4	۰/۵	۰/۴۵	۰/۴۶	۰/۱۵	۰/۵۱	۰/۵	۰/۵	۰/۴۸	۰/۵۱	۰/۲۵	۰/۲۷	۰/۷۱	۰/۷	۰/۷
n_5	۰/۶	۰/۴۵	۰/۳	۰/۳۳	۰/۵۲	۰/۵۱	۰/۵	۰/۵	۰/۸۷	۰/۲۹	۰/۶۵	۰/۷	۰/۷	۰/۷۱
n_6	۰/۳۸	۰/۵	۰/۶۳	۰/۴۵	۰/۵	۰/۵۱	۰/۵۲	۰/۵	۰/۲۱	۰/۷۴	۰/۴۴	۰/۷	۰/۷۱	۰/۷۲

جدول ۴. اطلاعات مربوط به شیوه‌ی قرارگیری ماشین‌ها در سلول‌ها.

N_{imch}		M_1		M_2		M_3		M_4		M_5	
		C_1	C_2	C_1	C_2	C_1	C_2	C_1	C_2	C_1	C_2
i_1	h_1				۲	۱		۱			
	h_2				۲	۱		۱			
i_2	h_1	۱		۲			۱				
	h_2	۱		۲			۱				
i_3	h_1	۱		۱			۱				۱
	h_2	۱		۱			۱				۱

جدول ۵. میزان کالای انتقالی از هر کارخانه به هر بازار.

X'_{ijph}			h_1					h_2				
			P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
i_1	j_1		۲۸	۳۰	۴۱	۳۳	۳۷	۶۸			۳۳	
	j_2		۳۸	۴۰	۵۶		۴۴	۴۵				
	j_3			۱۰								
	j_4											
i_2	j_1											
	j_2					۲۱						
	j_3		۱۷	۳۶	۴۵	۳۰	۴۰	۲۸				
	j_4					۳۶	۱۵	۹	۱	۶۰		۲۸
i_3	j_1					۱۲						
	j_2		۱									
	j_3			۴								
	j_4		۴۱	۲۰	۱۰			۴۹	۲۴		۲۰	

۵. تحلیل حساسیت

برای نشان‌دادن صحت و تحلیل مدل پیشنهادی، تجزیه و تحلیل حساسیت‌های زیر انجام شده است.

۱.۵. تغییر هزینه‌های مربوط به حمل قطعات

تغییر هزینه‌های مربوط به حمل قطعات (ازکارخانه به انبار، از انبار به بازار و از کارخانه به بازار)، باعث ایجاد تغییر در شیوه‌ی تولید قطعات و تأسیس انبار می‌شود.

به‌عنوان مثال شرایطی را در نظر بگیرید که به‌علت صعب‌العبور بودن مسیر در یک دوره (مثلاً شرایط بد جوی و ریزش برف در زمستان)، ارتباط بین یک کارخانه با نقاط تقاضا و انبارها بسیار سخت و محدود می‌شود. در این صورت پارامترهای مربوطه تغییر خواهد کرد (جدول ۱۰). در اثر اعمال این مورد، تغییرات ایجاد شده در جواب به‌صورت جدول ۱۱ خواهد بود. چنان‌که مشاهده می‌شود، با افزایش هزینه‌ی رفت‌وآمد ازکارخانه‌ی ۱، هیچ قطعه‌یی از این کارخانه به بازارها برده نمی‌شود و بار کاری مربوطه بین سایر کارخانه‌ها تقسیم می‌شود. همچنین تعداد انبارهای تأسیس شده در این حالت بیشتر از حالت قبل است. (در حالت قبل انبارهای ۳، ۴ و ۲ و در این حالت انبارهای ۲، ۳، ۴ و ۶ تأسیس شده است.)

در جدول ۱۲ مقادیر کالاهای نگه‌داری شده مربوط به هر کارخانه ارائه شده است. با مقایسه‌ی جداول قبلی مشاهده می‌کنیم که با افزایش هزینه‌ی حمل از کارخانه‌ی ۱، تعداد کالاهای انبار شده‌ی کارخانه‌ی ۱ کاهش می‌یابد.

در جدول ۱۳ چگونگی ارسال کالاها از هر انبار به بازارهای مختلف ثبت شده است. جدول ۱۴ نیز مقادیر کالاهای تولید داخلی هرکارخانه و همچنین میزان کالای برون‌سپاری شده را نشان می‌دهد. چنان که مشاهده می‌شود میزان کالاهای تولیدی داخل کارخانه‌ی ۱ کاهش یافته و بارکاری آن به سایر کارخانه‌ها منتقل شده است.

۲.۵. حذف عبارت مربوط به توزیع ماشین‌ها

از آنجا که توزیع بیش از حد یک نوع ماشین خاص در سیستم تولید سلولی پویا به‌دلیل افزایش نیاز به نیروی کار متخصص و هزینه‌ی جابه‌جایی قطعات میان سلول‌ها منطقی نیست، جمله‌ی یازدهم تابع هدف برای متعادل و بهینه‌کردن تعداد ماشین‌آلات موجود در سلول‌های مختلف طراحی شده است. چنانچه ظرفیت زمانی ماشین نوع m کافی نباشد، تعداد آن نوع ماشین در همان سلول افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال فرض کنید یک اپراتور متخصص می‌تواند به‌طور همزمان با دو ماشین هم‌نوع کار کند. اما اگر این دو ماشین در دو سلول متفاوت قرار بگیرند، این کار غیرممکن خواهد بود و نیازمند استخدام نیروی کار جدید و آموزش آنها خواهیم بود. درصورت حذف این عبارت، با قرار دادن یک نوع ماشین در دو سلول مختلف ممکن است هزینه‌های مربوط به جابه‌جایی بین سلولی قطعات کاهش یابد اما از سوی دیگر منجر به افزایش هزینه‌های مدیریتی، راه‌اندازی، بسته و بازکردن قطعه از روی ماشین، استخدام و آموزش خواهد شد. این امر سبب از بین رفتن نظم و انضباط سیستم و نیز استخدام کارگر اضافی خواهد شد، که هزینه تحمیل شده با حذف آن به‌مراتب بیشتر خواهد بود. به‌عنوان مثال، با حذف عبارت توزیع ماشین‌ها در مثال عددی، هزینه‌ی جابه‌جایی بین سلولی از ۷۳٫۸ به ۲۴٫۷ کاهش و هزینه جابه‌جایی درون سلولی از ۱۳۱٫۷ به ۱۶۶٫۷۲۵ افزایش یافته است.

جدول ۶. میزان کالای نگه‌داری شده در دوره‌ی اول برای استفاده در دوره‌ی دوم.

Q^H_{inph}	i_1					i_2					i_3				
	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
n_1															
n_2		۱۲۰	۴		۶۹						۷				
n_3		۴۶							۳۶	۶۸					
n_4									۲۷	۱۲			۱۰۳	۸	
n_5															
n_6															

جدول ۷. میزان کالای ارسال شده از هر انبار به هر بازار در دوره دوم.

Q'_{njph}	$g_۱$					$j_۲$					$j_۳$					$j_۴$				
	$P_۱$	$P_۲$	$P_۳$	$P_۴$	$P_۵$	$P_۱$	$P_۲$	$P_۳$	$P_۴$	$P_۵$	$P_۱$	$P_۲$	$P_۳$	$P_۴$	$P_۵$	$P_۱$	$P_۲$	$P_۳$	$P_۴$	$P_۵$
$n_۱$																				
$n_۲$		۲۵	۴		۴۲	۷	۷۰			۲۷							۲۵			
$n_۳$									۳۶	۳		۴۶			۶۵					
$n_۴$			۳۳	۱۱				۲۶					۴۴						۲۴	۱۲
$n_۵$																				
$n_۶$																				

جدول ۸. ماتریس مقادیر خروجی Q^o_{iph} و D^{in}_{iph}.

		$P_۱$		$P_۲$		$P_۳$		$P_۴$		$P_۵$	
		D^{in}_{iph}	Q^o_{iph}	D^{in}_{iph}	Q^o_{iph}	D^{in}_{iph}	Q^o_{iph}	D^{in}_{iph}	Q^o_{iph}	D^{in}_{iph}	Q^o_{iph}
$h_۱$	$i_۱$	۶۶		۲۴۶		۱۰۱		۳۳			۱۵۰
	$i_۲$	۱۷		۳۶		۴۵			۱۵۰		۱۳۵
	$i_۳$	۴۹		۲۴		۱۱۳		۲۰			
$h_۲$	$i_۱$	۶۶	۴۷					۳۳			
	$i_۲$	۳۷		۱		۶۰					۲۸
	$i_۳$	۴۹		۲۴				۲۰			

جدول ۹. ماتریس هزینه‌های نهایی.

نگه‌داری ماشین	عملیاتی	جابه‌جایی		نصب	برچیدن	نگه‌داری	تأمین‌کننده
		بین سلولی	درون سلولی			قطعات	مواد خام
۱۲۶۲	۷۷۸/۱۴	۷۳/۸	۱۳۱/۷	۳۲۵	۰	۱۱۹/۸	۱۳۱/۲
برون‌سپاری قطعه نهایی	حمل از کارخانه به بازار	اسپلیت ماشین	حمل از انبار به بازار	حمل از کارخانه به انبار	تأسیس انبار	هزینه کل	
۲۹۵۳	۵۴۹/۷۷۵	۰	۶۴/۹۸	۱۳۵/۴۱۷	۲۷۰	۶۷۹۴/۸۱۲	

جدول ۱۰. اطلاعات مربوط به ضرایب هزینه مرتبط با کارخانه ـ انبار و کارخانه ـ بازار.

	a_{ij}				a''_{in}					
	$j_۱$	$j_۲$	$j_۳$	$j_۴$	$n_۱$	$n_۲$	$n_۳$	$n_۴$	$n_۵$	$n_۶$
$i_۱$	۴/۴	۴/۲	۴/۳	۴/۵	۲/۸	۲/۵	۲/۸	۲/۶	۲/۷	۲/۸
$i_۲$	۱/۲	۱/۲	۱/۱	۱/۰	۰/۷۱	۰/۷۱	۰/۷	۰/۷	۰/۷	۰/۷۱
$i_۳$	۱/۱	۱/۱	۱/۱	۱/۰	۰/۷	۰/۷	۰/۷	۰/۷	۰/۷۱	۰/۷۲

چنان که در جدول ۱۵ مشاهده می‌شود بر اثر حذف عبارت توزیع ماشین‌ها، درکارخانه‌ی ۲ ماشین نوع ۲ و ۳ هم در سلول ۱ و هم در سلول ۲ قرار داده شده است. همچنین درکارخانه‌ی ۱ و ۳ نیز ماشین نوع ۲ در هر دو سلول استفاده شده است.

۳.۵. تغییر در میزان هزینه‌ی برون‌سپاری

به‌منظور بهتر نشان دادن قابلیت‌های مدل، تأثیر افزایش ۷، ۸، ۹ و ۱۰ درصدی

جدول ۱۱. میزان کالای انتقالی از هر کارخانه به هر بازار.

	X'_{ijph}	$h_۱$					$h_۲$				
		$P_۱$	$P_۲$	$P_۳$	$P_۴$	$P_۵$	$P_۱$	$P_۲$	$P_۳$	$P_۴$	$P_۵$
$i_۱$	$j_۱$										
	$j_۲$										
	$j_۳$										
	$j_۴$										
$i_۲$	$j_۱$					۳۷					
	$j_۲$		۴۰		۲۱	۴۴					
	$j_۳$	۱۷	۵۰	۲۱	۳۰	۴۰	۲۸	۳۴			
	$j_۴$		۲۰		۳۶	۱۵		۲۶			۲۴
$i_۳$	$j_۱$	۲۸	۳۰	۴۱	۴۵						
	$j_۲$	۳۹		۵۶			۱۱				
	$j_۳$			۲۴							
	$j_۴$	۴۱		۱۰			۵۸	۲۴			

جدول ۱۲. مقادیر کالاهای نگه‌داری شده.

Q^{H}_{inph}	i_1					i_2					i_3				
	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
n_1															
n_2										۷۱	۲۹	۵۸	۴۲		
n_3							۲۴		۴۶	۸۰					
n_4									۴۴	۲			۱۰۴		
n_5															
n_6	۷۰	۲۵		۳۴									۲۱		

جدول ۱۳. مقادیر کالاهای ارسالی از انبار به بازار.

Q'_{njph}	j_1					j_2					j_3					j_4				
	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
n_1																				
n_2			۱۶		۴۲	۲۹	۵۸	۲۶		۱۵										۱۴
n_3				۱۰			۱۲		۳۶	۱۵		۱۲			۶۵					
n_4													۴۴			۶۰	۴۴	۲		
n_5																				
n_6	۶۸	۲۵	۲۱	۳۴		۲														

جدول ۱۴. مقادیر کالاهای تولید داخلی کارخانه و برون‌سپاری.

		P_1		P_2		P_3		P_4		P_5	
		D^{in}_{iph}	Q^{o}_{iph}	D^{in}_{iph}	Q^{o}_{iph}	D^{in}_{iph}	Q^{o}_{iph}	D^{in}_{iph}	Q^{o}_{iph}	D^{in}_{iph}	Q^{o}_{iph}
h_1	i_1	۷۰		۲۵				۳۴			
	i_2	۱۷		۶۰	۷۴	۲۱		۱۷۷	۲۸۹		
	i_3	۱۷	۱۲۰	۸۸		۲۹۸		۴۵			
h_2	i_1										
	i_2	۳۸		۶۰							۲۴
	i_3	۶۹		۲۴							

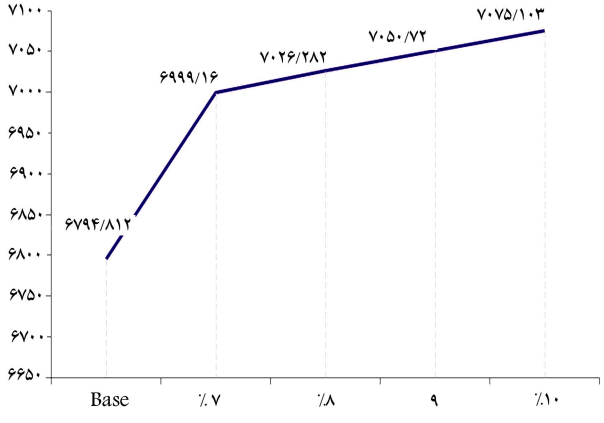
جدول ۱۵. اثر حذف عبارت توزیع ماشین‌ها بر چینش ماشین‌ها در سلول‌های هر کارخانه.

N_{imch}		M_1		M_2		M_3		M_4		M_5	
		C_1	C_2	C_1	C_2	C_1	C_2	C_1	C_2	C_1	C_2
h_1	i_1			۲	۲						
h_2	i_1			۲	۲						
h_1	i_2			۱	۱	۱	۱				
h_2	i_2			۱	۱	۱	۱				
h_1	i_3	۱		۱	۱					۱	
h_2	i_3	۱		۱	۱					۱	

جدول ۱۶. اثر افزایش هزینه برون‌سپاری و مقایسه هزینه‌ها در هر حالت.

هزینه‌ها	مثال پایه	افزایش ۷ درصدی	افزایش ۸ درصدی	افزایش ۹ درصدی	افزایش ۱۰ درصدی
نگه‌داری ماشین‌آلات	۱۲۶۲	۱۳۶۸	۱۴۶۶	۱۴۶۵	۱۴۶۵
عملیات	۷۷۸٫۱۴	۸۴۸٫۷۶	۹۲۷٫۵۲	۹۴۸٫۸	۹۴۸٫۸
جابه‌جایی بین سلولی	۷۳٫۸	۷۳٫۸	۷۳٫۸	۹۳٫۳	۹۳٫۳
جابه‌جایی درون سلولی	۱۳۱٫۷	۱۵۴٫۱۲۵	۱۷۷٫۰۷۵	۱۶۸٫۱	۱۶۸٫۱
نصب ماشین	۳۲۵	۳۵۱	۳۷۶	۳۷۹	۳۷۹
برکناری ماشین	۰	۰	۰	۰	۰
نگه‌داری قطعات	۱۱۹٫۸	۱۲۲٫۴	۱۲۴٫۱	۱۲۴٫۴	۱۲۴٫۴
تأمین‌کننده مواد خام	۱۳۱٫۲	۱۴۹٫۰۷	۱۷۰٫۶۳	۱۷۳٫۱۹	۱۷۳٫۱۹
برون‌سپاری قطعه نهایی	۲۹۵۳	۲۹۰۶۸٫۸۶۹	۲۶۶۹٫۲۲	۲۶۵۷٫۷۴۷	۲۶۸۲٫۱۳
حمل از کارخانه به بازار	۵۴۹٫۷۷۵	۵۴۱٫۰۵	۵۵۸٫۹۳۵	۵۵۷٫۹۲۶	۵۵۷٫۹۲۶
اسپلیت ماشین	۰	۰	۰	۰	۰
حمل از انبار به بازار	۶۴٫۹۸	۷۴٫۴۰۶	۷۳٫۴۵۸	۷۳٫۷۱۳	۷۳٫۷۱۳
حمل از کارخانه به انبار	۱۳۵٫۴۱۷	۱۲۹٫۶۸	۱۲۹٫۵۴۴	۱۲۹٫۵۴۴	۱۲۹٫۵۴۴
تأسیس انبار	۲۷۰	۲۸۰	۲۸۰	۲۸۰	۲۸۰
هزینه کل	۶۷۹۴٫۸۱۲	۶۹۹۹٫۱۶	۷۰۲۶٫۲۸۲	۷۰۵۰٫۷۲	۷۰۷۵٫۱۰۳
تعداد کل کالاهای برون‌سپاری شده	۹۷۰	۹۰۴	۸۳۶	۸۲۶	۸۲۶

هزینه‌ی برون‌سپاری بر مدل بررسی و در جدول ۱۶ ارائه شده است. چنان که در شکل ۳ و ۴ نیز مشاهده می‌شود بر اثر اعمال این تغییر، تعداد قطعات برون‌سپاری شده کاهش و حمل از انبار به بازار افزایش یافته است.



شکل ۳. اثر افزایش هزینه‌ی برون‌سپاری بر هزینه‌ی کل.

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادات آتی

در این نوشتار یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای مسئله‌ی تولید سلولی ارائه شد که به‌طور همزمان برنامه‌ریزی تولید و طراحی زنجیره‌ی تأمین را نیز در نظر می‌گیرد. پیکربندی سلول‌ها و تخصیص قطعات و ماشین‌ها به سلول‌ها با هدف کاهش هزینه‌های ناشی از جابه‌جایی قطعات، انجام عملیات روی ماشین‌ها و هزینه‌های ناشی از جابه‌جایی و نگه‌داری ماشین‌آلات در سیستم، برون‌سپاری، حمل کالا و تأسیس انبار منجر به افزایش بهره‌وری کل سیستم

شکل ۴. موقعیت قرارگیری کارخانه‌ها، بازارها و انبارها نسبت به یکدیگر و چگونگی جریان مربوط به قطعه‌ی ۵.

شده و باعث ایجاد تعادل در سیستم می‌شود. از دیگر سو، با در نظر گرفتن هزینه‌ی اسپلیت و توزیع ماشین‌ها از قرار دادن ماشین‌های هم‌نوع در بیش از یک سلول جلوگیری شده و باعث بهبود هزینه‌های مدیریتی و نظم و انضباط سیستم می‌شود.

موارد پیشنهادی برای رعایت در تحقیقات آتی عبارت‌اند از:

- توسعه‌ی مدل تحت شرایط پارامترهای احتمالی،
- در نظرگرفتن قیمت محصولات و مسئله‌ی قیمت‌گذاری،
- با توجه به این که مسئله‌ی طراحی سیستم تولید سلولی از نوع NP-Hard است،[۱۷] مسئله‌ی مورد بررسی در این نوشتار، که ترکیب دو مسئله‌ی طراحی سیستم تولید سلولی و طراحی زنجیره‌ی تأمین است نیز از نوع NP-Hard خواهد بود. لذا برای حل مسئله در اندازه‌های بزرگ، طراحی الگوریتم‌های فرابتکاری مناسب پیشنهاد می‌شود.

منابع (References)

1. Schaller, J. "Incorporating cellular manufacturing into supply chain design", *International Journal of Production Research*, **46**(17), pp. 4925-4945 (2008).
2. Pettersson, A. and Segerstedt, A. "Measuring supply chain cost", *International Journal of Production Economics*, **143**(2), pp. 357-363 (2013).
3. Defersha, F.M. and Chen, M. "Machine cell formation using a mathematical model and a genetic-algorithm-based heuristic", *International Journal of Production Research*, **44**(12), pp. 2421-2444 (2006).
4. Defersha, F.M. and Chen, M. "A parallel multiple Markov chain simulated annealing for multi period manufacturing cell formation", *International Advanced Manufacturing Technology*, **37**, pp. 140-156 (2008).
5. Safaei, N. and Tavakkoli-Moghaddam, R. "Integrated multi-period cell formation and subcontracting production planning in dynamic cellular manufacturing systems", *International Journal of Production Economics*, **120**, pp. 301-314 (2009).
6. Deljoo, V., Mirzapour Al-e-Hashem, S.M.J., Deljoo, F. and Aryanezhad, M.B. "Using genetic algorithm to solve dynamic cell formation problem", *Applied Mathematical*

Modelling, **34**, pp. 1078-1092 (2010).

7. Lokesh, K. and Jain, P.K. "Dynamic cellular manufacturing systems design- a comprehensive model & HHGA", *Advances in Production Engineering & Management Journal,* **5**(3), pp. 151-162 (2010).
8. Lokesh, K. and Jain, P.K. "Dynamic cellular manufacturing systems design-a comprehensive model", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **53**, pp. 11-34 (2011).
9. Raminfar, R., Zulkifli, N., Vasili, M. and Sai Hong, T. "An integrated model for production planning and cell formation in cellular manufacturing systems", *Journal of Applied Mathematics*, **2013**, Article ID, 487694, 10 p. (2013).
10. Rafiei, H., Rabbani, M., Nazaridoust, B. and Ramiyani, S.S. "Multi-objective cell formation problem considering work-in-process minimization", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* **76**(9), pp. 1747-1955 (2014).
11. Renna, P. and Ambrico, M. "Design and reconfiguration models for dynamic cellular manufacturing to handle market changes", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, **28**(2), pp. 170-186 (2015).
12. Melo, M.T., Nickel, S. and Saldanha-da-Gama, F. "Facility location and supply chain management- A review", *European Journal of Operation Research*, **196**, pp. 401-412 (2009).
13. Zhu, Z., Chu, F. and Sun, L. "The capacitated plant location problem with customers and suppliers matching", *Transportation Research Part E,* **46**, pp. 469-480 (2010).
14. Rao, P.P. and Mohanty, R.P. "Impact of cellular manufacturing on supply chain management: Exploration of interrelationships between design issues", *International Journal of Manufacturing Technology Management*, **5**, pp. 507-520 (2003).
15. Lokesh, K. and Jain, P.K. "An integrated model of dynamic cellular manufacturing and supply chain system design", *International Advanced Manufacturing Technology,* **62**, pp. 385-404 (2012).
16. Paydar, M.M. and Saidi-Mehrabad, M. "Revised multi-choice goal programming for integrated supply chain design and dynamic virtual cell formation with fuzzy parameters", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing,* **28**(3), pp. 251-265 (2015). 10.1080/0951192X.2013.874596 http://www.tandfonline.com /doi/abs/10.1080/0951192X.2013.874596.
17. Logendran, R., Ramakrishna, P. and Srikandarajah, C. "Tabu search-based heuristics for cellular manufacturing systems in the presence of alternative process plans", *International Journal of Production Research,* **32**(2), pp. 273-297 (1994).