

طراحی یک مدل یکپارچه استوار دوهدفه زنجیره تأمین و آرایش سلولی مجازی پویا

محمد مهدی پایدار^۱، محمد سعیدی مهرآباد^{۲*}

۱. استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

۲. استاد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

خلاصه

در یک محیط پویا، تغییرات تقاضا در طول افق برنامه‌ریزی در دوره‌های مختلف رخ خواهد داد. آرایش سلولی در یک دوره ممکن است برای دوره‌های دیگر مؤثر نباشد. از این رو، پیکربندی مجدد سلول‌ها ضروری به نظر می‌رسد. مفهوم آرایش سلولی مجازی رویکردی جهت مواجهه با تغییرات تقاضا بدون تحمیل هزینه‌های پیکربندی مجدد به سیستم است. از طرف دیگر، در نظر گرفتن همزمان زنجیره تأمین و آرایش سلولی منجر به کاهش هزینه‌های توزیع و تولید و پاسخگویی بهتر به تقاضای بازار می‌شود. در این تحقیق، یک مدل ریاضی دوهدفه استوار جهت یکپارچه‌سازی برنامه‌ریزی تدارکات، تولید و توزیع در شرایط عدم قطعیت توسعه داده شده است. سپس، از روش محدودیت اسپیلن تعمیم‌یافته جهت حل مدل پیشنهادی بهره گرفته شده است. در نهایت، یک مطالعه موردی صنعتی جهت اعتبارسنجی مدل پیشنهادی ارائه شده است. نتایج به‌دست آمده توسط مدیران و طراحان مورد تصدیق قرار گرفته است.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۳۹۲/۵/۲۴

پذیرش ۱۳۹۳/۳/۲۷

کلمات کلیدی:

آرایش سلولی مجازی

زنجیره تأمین

بهینه‌سازی استوار

روش محدودیت اسپیلن

۱- مقدمه

افزایش فشار رقابت، کاهش عمر و افزایش تنوع محصولات، بنگاه‌های اقتصادی را بر آن داشته است که در جهت کاهش هرچه بیشتر هزینه‌های خود، از رویکردهای جدید و مؤثرتری در بخش‌های سه‌گانه تأمین، تولید و توزیع استفاده کنند. از طرف دیگر، برنامه‌ریزی تسهیلات و طراحی استقرار ماشین‌آلات از جمله مسائل مهم و عمده در طراحی کارخانه است. استفاده مؤثر از ظرفیت تسهیلات، افزایش بهره‌وری کارگران، استفاده از سیستم‌های خودکارسازی و رباتیک جهت افزایش کیفیت و نرخ تولید، کاهش سطح موجودی، کاهش حجم حمل‌ونقل مواد و افزایش انعطاف‌پذیری از جمله اهدافی می‌باشند که امروزه اکثر مراکز تولیدی سعی در دستیابی به آن‌ها را دارند. سیستم‌های تولید سلولی جز روش‌های

نوین تولید می‌باشند که امروزه در اکثر مراکز تولیدی بزرگ با تنوع نسبتاً بالای محصول و دارای تسهیلات چندمنظوره مورد استفاده قرار می‌گیرند. مبنای یک سیستم تولید سلولی^۱، دسته‌بندی محصولات و ماشین‌آلات بر اساس تشابه ظاهری، عملیاتی و یا پردازشی آن‌ها، به صورت چند واحد تولیدی کوچک‌تر بنام سلول^۲ است [۱].

از معایب بزرگ سیستم‌های تولید سلولی کلاسیک، کاهش انعطاف‌پذیری تولید و عدم بهره‌برداری مؤثر از ظرفیت ماشین‌آلات را می‌توان نام برد. مخصوصاً در مواجهه با تغییرات سطح تقاضا و یا مخلوط تقاضا این معایب محسوس‌تر می‌باشند. بسیاری از مراکز صنعتی، درگیر تولید محصولات متنوع با تقاضای فصلی و یا مقطعی می‌باشند. تولیدکنندگان پیمانکار یا تولیدکنندگان محیط‌های کوچک ساخت برای سفارش جز این دسته محسوب می‌شوند. از بین محصولاتی که تقاضای فصلی دارند می‌توان به تجهیزات سرمازا و گرم‌زا، پوشاک، ادوات کشاورزی و برخی تجهیزات ورزشی نام برد.

* نویسنده مسئول. محمد سعیدی مهرآباد

تلفن: ۰۹۱۲۱۳۰۴۶۵۴؛ پست الکترونیکی: mehrabad@iust.ac.ir

برخلاف سیستم‌های تولید سلولی پویا، در سیستم‌های تولید سلولی مجازی پویا با توجه به این‌که پیکربندی مجدد در سیستم کنترل تولید به‌وجود می‌آید و سلول‌ها ماهیت مجازی دارند، هزینه‌هایی مانند هزینه جابه‌جایی بین دوره‌های ماشین، سرمایه‌گذاری بر روی ماشین‌های جدید و حذف ماشین‌های غیرضروری به سیستم تحمیل نمی‌شوند. در یک سیستم تولید سلولی مجازی، ماشین‌آلات و قطعات به‌طور موقت برای دوره اول گروه‌بندی می‌شود. در این حالت ماشین‌آلات در ابتدای دوره اول افق برنامه‌ریزی از نظر فیزیکی نصب می‌شوند. اما از لحاظ منطقی و ساختاری با توجه به تقاضای قطعات و یا ورود قطعه جدید به سیستم برای تولید در دوره‌های متفاوت، گروه ماشین‌آلات تغییر خواهد یافت. لذا بدون جابه‌جایی ماشین‌آلات از لحاظ فیزیکی در دوره‌های متوالی، با توجه به تقاضا و شرایط تولیدی، گروه ماشین‌آلات و خانواده قطعات برای هر دوره به صورت بهینه برنامه‌ریزی می‌شود [۴].

سیستم‌های تولیدی ابتدا زنجیره تأمین^۶ را طراحی و تعداد تسهیلات تولیدی را انتخاب و نحوه پاسخگویی به تقاضای بازار را مشخص می‌کنند. سپس به سازمان‌دهی فرآیندها (خط تولید/ کارگاه‌ها/ آرایش سلول‌ها) در داخل کارخانه می‌پردازند. در این حالت آرایش سلولی^۷ بدون در نظر گرفتن شبکه تولیدی و زنجیره انجام خواهد پذیرفت. پرداختن همزمان به طراحی زنجیره تأمین و طراحی تولید سلولی کارخانه موجب طراحی یک شبکه تولیدی با هزینه‌های تولید و توزیع پایین‌تر جهت پاسخگویی سریع به مشتریان در مقابل داشتن امکانات کمتر در تولید محصول خواهد شد. در نظر گرفتن تقاضای یک محصول خاص در بازارهای مختلف، برنامه‌ریزی تولید مناسب جهت تأمین مواد اولیه کارا از تأمین‌کنندگان و تعیین آرایش سلولی مناسب به‌طور همزمان، می‌تواند موجب کاهش هزینه‌های سیستم گردد. خانواده قطعات را می‌توان با تجمیع تقاضای محصولات مختلف در بازار با الزامات تولیدی مشابه ایجاد کرد. در این حالت با هزینه تولید پایین‌تر، هزینه تأمین کمتر و هزینه‌های توزیع کمتر می‌توان واکنش مناسبی به تقاضای مشتریان نشان داد. لذا پرداختن به طراحی زنجیره تأمین و سیستم تولید سلولی به‌صورت یکپارچه ضروری به نظر می‌رسد. روا و موهانتی [۵] به ذکر دلایل و ضرورت‌های ادغام تولید سلولی و زنجیره تأمین پرداختند. آن‌ها با ذکر مثالی روابط متقابل بین طراحی تولید سلولی و طراحی زنجیره تأمین را ارائه دادند. در نظر گرفتن همزمان زنجیره تأمین و تولید سلولی، موجب ایجاد رابطه مستقیمی بین هزینه‌های تدارکات^۸ و توزیع و هزینه‌های چیدمان تسهیلات و تولید جهت پاسخ سریع‌تر به مشتریان خواهد شد. آن‌ها نشان دادند که نگرش یکپارچه طراحی تولید سلولی با طراحی زنجیره تأمین موجب واکنش سریع‌تر، هزینه‌های تولید کمتر و هزینه‌های توزیع کمتر برای شرکت‌ها خواهد شد. پایدار و همکاران [۶] با ذکر مثالی جامع به صورت عددی نشان

همچنین تقاضای مقطعی محصولات به‌دلیل کوتاه‌تر شدن عمر و افزایش تنوع آن‌ها رخ می‌دهد. امروز نوسانات مقدار و ترکیب تقاضای محصولات، تولیدکنندگان را از محیط ساخت برای انبار به سمت محیط‌های مهندسی طبق سفارش سوق داده است. این حرکت موجب پویایی تولید و مستلزم افزایش انعطاف‌پذیری در تولید است. در حالت پویا، افق برنامه‌ریزی به چند دوره کوچک‌تر تقسیم می‌شود به‌طوری‌که مقدار و مخلوط تقاضای محصولات از دوره‌ای به دوره دیگر می‌تواند متفاوت باشد. به‌عبارت دیگر، در یک دوره خاص ممکن است برخی از محصولات فاقد تقاضا بوده و یا مقدار تقاضای آن‌ها با دوره قبل متفاوت باشد. از طرفی امکان تولید محصولات جدید با قطع تولید محصولات قدیمی در یک دوره خاص نیز وجود دارد. به محیط تولیدی که شرایط فوق بر آن حاکم باشد اصطلاحاً محیط پویا گفته می‌شود [۲]. در حالتی که ترکیب و یا سطح تقاضای محصولات به‌صورت دوره‌ای تغییر می‌کند، سلول‌های تشکیل شده یا پیکربندی سلولی هر دوره، لزوماً برای دوره بعد بهینه نخواهد بود. این امر به‌معنای امکان پیکربندی^۱ مجدد سلول‌ها در ابتدای هر دوره و در نتیجه تغییر جانمایی تسهیلات و همچنین تغییر خانواده قطعات^۲ است.

از سال ۲۰۰۰ به بعد تحقیقات متعددی در زمینه تولید سلولی پویا صورت پذیرفته است که اکثر آن‌ها دارای دو اشکال می‌باشند. اولاً آن‌ها فرض کردند که مقدار تولید با مقدار تقاضا در هر دوره برابر می‌باشند. هرچند در عمل، کمیت تولید ممکن است با مقدار تقاضا یکسان نباشد که ممکن است با تولید، برون‌سپاری^۳ یا نگهداری موجودی ارضا گردد. بنابراین کمیت تولید باید از روی برنامه‌ریزی تولید به‌منظور تعیین تعداد و نوع ماشین‌آلاتی که در سیستم به‌کار گرفته می‌شود، مشخص شود. هرچند به‌منظور تعیین کمیت تولید در هر دوره، تعداد و نوع ماشین‌آلاتی که در سلول‌های تولیدی به‌کار گرفته می‌شود، باید مشخص باشد. زیرا ظرفیت ماشین‌آلات محدود می‌باشد. بنابراین مسئله تشکیل سلول پویا و برنامه‌ریزی تولید به هم وابسته‌اند و نمی‌توان آن‌ها را به‌صورت جداگانه بررسی نمود. تحقیقات کمی در تولید سلولی پویا این موضوع را در نظر گرفته‌اند. ثانیاً، جابه‌جایی ماشین‌آلات در هر دوره باعث تحمیل هزینه‌های اضافی به سیستم می‌شود. همچنین جابه‌جایی^۴ ماشین‌آلات منجر به توقف تولید می‌شود که در زمان جابه‌جایی سود و تولید از دست خواهد رفت. در تمامی مقالات ارائه‌شده در زمینه تولید سلولی پویا، هزینه جابه‌جایی ماشین‌آلات در نظر گرفته شده است اما هیچ‌کدام زمان صرف‌شده جهت پیکربندی مجدد را در نظر نگرفته‌اند. از طرف دیگر در اکثر صنایع، جابه‌جایی ماشین‌آلات از نظر فیزیکی تقریباً از لحاظ اقتصادی غیرممکن است [۳]. برای غلبه بر این مشکل، مفهوم تولید سلولی مجازی^۵ ارائه گردیده است.

1. Reconfiguration
2. Part Family
3. Outsourcing
4. Relocation
5. Virtual

6. Supply Chain
7. Cell Formation
8. Procurement

هزینه‌ها تحت رفتار اعداد فازی به فرم توزیع امکان طراحی کرده‌اند. آن‌ها یک روش رتبه‌بندی فازی تطبیقی جهت شناسایی قطعات با تقاضای کم و غیرتکراری که به یک سلول کارکردی تخصیص می‌یابند، ارائه دادند. سپس، از یک مدل برنامه‌ریزی امکان‌تعاملی را برای مسئله آرایش سلولی جهت تخصیص قطعات باقی‌مانده استفاده کرده‌اند.

علاوه بر روش‌های تصادفی و فازی، از روش بهینه‌سازی استوار^۲ نیز در محیط‌های با شرایط عدم قطعیت در سیستم‌های تولیدی استفاده شده است [۱۵،۱۶]. اما این روش در مسائل تولید سلولی تاکنون استفاده نشده است.

هدف اصلی این مقاله طراحی یک مدل دوهفته زنجیره تأمین (تأمین، تولید و توزیع) و آرایش سلولی مجازی به‌صورت همزمان جهت برنامه‌ریزی چند دوره‌ای^۳ در شرایط عدم قطعیت می‌باشد که جهت حل آن از روش محدودیت اِپسِلین تعمیم‌یافته^۴ استفاده شده است. در نهایت جهت اعتبارسنجی مدل پیشنهادی، در یک مطالعه موردی^۵ به‌کار گرفته شده است.

بخش‌های باقیمانده مقاله بدین صورت سازمان‌دهی شده است: در بخش دوم به معرفی روش بهینه‌سازی استوار تحت سناریو می‌پردازیم. در بخش سوم فرضیات و نمادها تعریف گردیده و مدل ریاضی دو هدفه طراحی شده بیان می‌شود. برای حل مدل پیشنهادی از روش محدودیت اِپسِلین تعمیم‌یافته بهره گرفته شده است که در بخش چهارم توضیح داده شده است. جهت اعتبارسنجی مدل پیشنهادی، یک مطالعه موردی صنعتی در بخش پنجم ارائه گردیده است و در نهایت در بخش ششم نتیجه‌گیری آورده شده است.

۲- بهینه‌سازی استوار تحت سناریو

بهینه‌سازی استوار پاسخی است به عدم قطعیت در داده‌های ورودی و تصمیم‌گیران را قادر می‌سازد که در تصمیم‌گیری‌های خود با مسئله ریسک، منطبق بر سطح ریسک‌پذیری و ریسک‌گریزی خود عمل نمایند و در نهایت منجر به ایجاد یک سری از جواب‌ها می‌شود که به طور فزاینده‌ای حساسیت کمتری به عدم قطعیت در داده‌های ورودی و تحقق کامل مجموعه سناریوها داشته باشد.

مالوی و همکاران [۱۷]، در تحقیقی با عنوان بهینه‌سازی استوار سیستم‌های با مقیاس بزرگ^۶ به بحث بهینه‌سازی استوار مسائل برنامه‌ریزی ریاضی با داده‌های نامطمئن می‌پردازد. این بهینه‌سازی مرتبط با مسائلی است که جنس داده‌های آن از نوع سناریو باشد. از نظر ایشان دو تعریف مهم در حوزه مدل استوار وجود دارد، یعنی جواب استوار و مدل استوار که در ذیل به هر یک اشاره می‌گردد:

یک جواب برای مدل بهینه‌سازی، جوابی استوار نامیده می‌شود اگر آن جواب برای همه سناریوهای داده‌های ورودی مدل نزدیک به بهینه

داند که برنامه‌ریزی همزمان تولید سلولی و زنجیره تأمین موجب کاهش هزینه‌های سیستم می‌شود. براساس بررسی‌های صورت گرفته، تاکنون تحقیقات محدودی در این زمینه صورت پذیرفته است [۷،۸].

اکثر مدل‌های ارائه‌شده غیریک‌پارچه زنجیره تأمین و تولید سلولی، پارامترهای ورودی را قطعی و ثابت در نظر گرفته‌اند. عمدتاً در شرایط واقعی، ماهیت بسیاری از پارامترهای تولیدی همانند تقاضای محصولات و هزینه‌ها غیردقیق می‌باشد که از آن به‌عنوان شرایط غیرقطعی^۱ نام‌برده می‌شود. عدم قطعیت در تقاضای یک محصول بدین معنی است که قادر به پیش‌بینی یک مقدار دقیق برای تقاضای آن محصول نیستیم. تقاضای یک محصول می‌تواند همزمان تابع هر دو شرایط پویا و غیرقطعی باشد، یعنی در دوره‌هایی که تقاضا برای محصول وجود دارد، ممکن است تعیین مقدار دقیق آن میسر نباشد. همچنین به‌دلیل نوسانات اقتصادی پارامترهای هزینه در دوره‌های مختلف با عدم قطعیت مواجه هستند.

اسکی و اوزکارهان [۹] طراحی سلول‌های تولیدی را با نیازمندی‌های تولید در شرایط عدم قطعیت در نظر گرفتند. آن‌ها طبیعت تصادفی سیستم تولیدی را با یک مدل شبیه‌سازی نشان دادند. زمان‌های پردازش قطعه، زمان‌های حرکت بین سلولی قطعه و زمان حضور قطعه به‌صورت تصادفی در نظر گرفته شده است. اهداف، بیشینه‌سازی به‌کارگیری سیستم و کمینه‌سازی میانگین تأخیر در مدل، شبیه‌سازی شده بوده است. توکلی‌مقدم و همکاران [۱۰] یک مدل ریاضی برای حل مسئله چیدمان تسهیلات در سیستم تولید سلولی را در شرایط تقاضای تصادفی با هدف کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های حرکات بین و درون سلولی ارائه کردند. قضاوتی و سعیدی مهرآباد [۱۱] یک مدل صحیح تصادفی برای طراحی سیستم‌های تولید سلولی با پارامترهای تصادفی توسعه دادند. آن‌ها فرض کردند که زمان‌های پردازش قطعات بر روی ماشین‌آلات و زمان‌های ورود قطعات به سلول‌ها تصادفی بوده که توسط توزیع پیوسته توصیف می‌شود. آن‌ها هر ماشین را به‌عنوان یک سرور و هر قطعه مانند یک مشتری که سرور باید به آن خدمت بدهد، در نظر گرفته شده است. لذا، سلول‌های آرایش یافته یک سیستم صف تعریف می‌شوند که از طریق نظریه صف بهینه‌سازی شده‌اند.

شانکر و وارت [۱۲] دو مدل برنامه‌ریزی خطی فازی برای خوشه‌بندی ماشین‌آلات با در نظر گرفتن فازی بودن تقاضای قطعات، محدودیت بودجه در خرید ماشین‌آلات و سطح انتظار تابع هدف ارائه کردند. آریکان و گونگور [۱۳] یک مدل ریاضی فازی دوهفته برای طراحی سیستم تولید سلولی با هدف کمینه‌سازی هزینه حذف عناصر استثنا و بیشینه‌سازی ظرفیت به‌کارگیری ماشین‌آلات توسعه دادند. تقاضای قطعه، ظرفیت ماشین‌آلات و هزینه حذف عناصر استثنا به عنوان پارامترهای فازی در نظر گرفته شده است. ترابی و شامخی [۱۴] یک سیستم تولید سلولی که در آن تقاضای قطعات و

1. Uncertain

2. Robust Optimization
3. Multi-period
4. Augmented ϵ -constraint
5. Case Study
6. Large-scale

$$\begin{aligned} \text{Min } & \sigma(x, y_1, y_2, \dots, y_S) + \omega \times p(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_S) \quad (5) \\ \text{s.t. } & Ax = b \\ & B_s x + C_s y + \delta_s = e_s \quad \forall s \in \Omega \\ & x, y_s \geq 0 \quad \forall s \in \Omega \end{aligned}$$

در مدل استوار (5) مجموعه $\{y_1, y_2, y_3, \dots, y_S\}$ مجموعه‌ای از متغیرهای کنترل برای سناریو $s \in \Omega$ است. همچنین مجموعه $\{\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_S\}$ بردارهای خطا است که ناموجهی مجاز در محدودیت‌های کنترل تحت سناریوی s را اندازه‌گیری می‌کنند. مبادله بین استواری جواب و استواری مدل به کمک مفهوم تصمیم‌گیری چندمعیاره تعیین می‌شود. در حقیقت مدل بهینه‌سازی استوار فوق قادر است میزان این مبادله را بسنجد. در فرمول‌بندی برنامه‌ریزی خطی احتمالی مقدار میانگین $\sigma(0) = \sum_S p_s \xi_s$ مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما در مدل استوار فوق که بهینه‌سازی استوار نامیده می‌شود، عبارت $\sigma(0)$ به صورت عبارتی غیرخطی لحاظ می‌شود. در حقیقت این مدل استوار مبتنی بر سناریو کاربردی از مدل برنامه‌ریزی غیرخطی احتمالی است. عبارت دوم در تابع هدف یعنی $(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_S)$ یک تابع جریمه موجه بودن است که به منظور جریمه کردن نقض و تخطی از محدودیت‌های کنترل با توجه به برخی از سناریوها مد نظر قرار می‌گیرد. نقض و تخطی از محدودیت‌های کنترل به این مفهوم است که جواب غیرموجه برای یک مسئله در برخی از سناریوها حاصل سنجیده می‌شود. به کمک وزن ω ، توازن و مبادله بین استواری جواب (که توسط $\sigma(0)$ سنجیده می‌شود) و استواری مدل (که توسط $p(0)$ سنجیده می‌شود) می‌تواند تحت فرآیند تصمیم‌گیری چندمعیاره مدل شوند. در خصوص یافتن شکل مناسب $\sigma(0)$ و $p(0)$ می‌توان به تحقیقات [۱۷، ۱۸] رجوع کرد.

عبارت $\sigma(x, y_1, y_2, \dots, y_S)$ به وسیله مالوی و همکاران [۱۷] ارائه شده شامل مقدار میانگین به علاوه مقدار ثابت λ ضرب در واریانس آن است، به طوری که:

$$\sigma(x, y_1, y_2, \dots, y_S) = \sum_{s=1}^S p_s \times \xi_s + \lambda \times \left[\sum_{s=1}^S p_s \times \left(\xi_s - \sum_{s=1}^S p_s \times \xi_s \right)^2 \right] \quad (6)$$

این عبارت به تغییر در داده‌ها تحت همه سناریوها حساس است. واضح است که عبارت فوق شامل بخشی است که دارای توان دوم است و شکلی کوادراتیک^۲ در مدل‌سازی می‌باشد. بر این اساس، یو و لی [۱۸] بیان می‌دارند که عبارت $\sum_S p_s \times \left(\xi_s - \sum_S p_s \xi_s \right)^2$ ارائه شده توسط مالوی و همکاران (۱۹۹۵) نیازمند محاسبات زیادی است. ایشان فرمول‌بندی زیر را به جای آن ارائه نمودند:

باقی بماند و همچنین مدلی استوار است که تقریباً برای همه سناریوهای داده‌های ورودی موجه باشد. در حالت کلی در مواجهه با مدل‌های بهینه‌سازی با دو بخش مواجه هستیم:

۱- بخش ساختاری: که ثابت است و فاقد هرگونه نویز و نوسانی در داده‌های ورودی آن می‌باشد.

۲- بخش کنترل: که تابع دست‌خوش داده‌های نویزی و نوسانی است.

قبل از ارائه مدل مالوی و همکاران، دو مجموعه از متغیرها باید تعریف شوند:

$x \in R^{n_1}$: بیانگر بردار متغیرهای تصمیم و مشروط به تحقق یافتن پارامترهای نادقیق نیستند. این‌ها در حقیقت متغیرهای طراحی هستند.

$y \in R^{n_2}$: بیانگر متغیرهای تصمیم کنترل است که مستعد تنظیم پارامترهای نامطمئن هستند. مقادیر بهینه این متغیرها وابسته به تحقق پارامترهای نامطمئن و مقادیر بهینه متغیرهای طراحی هستند.

مدل برنامه‌ریزی خطی بهینه‌سازی به صورت زیر ساختار می‌یابد:

$$\text{Min } c^T x + d^T y \quad (1)$$

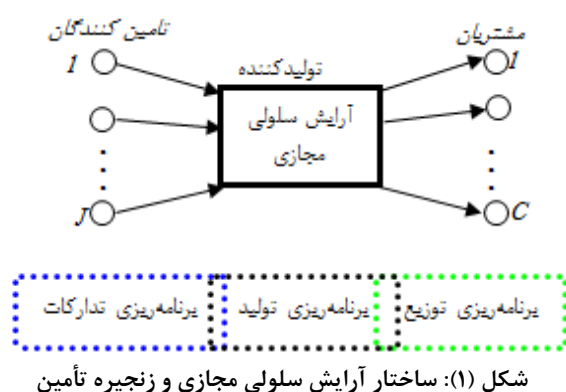
$$\text{s.t. } Ax = b \quad (2)$$

$$Bx + Cy = e \quad (3)$$

$$x, y \geq 0 \text{ and } x \in R^{n_1}, y \in R^{n_2} \quad (4)$$

معادله (۲) بیانگر محدودیت‌های ساختاری است که ضرایب آن ثابت و فاقد هرگونه نویز و نوسان (ضرایبی مطمئن) هستند. معادله (۳) بیانگر محدودیت‌های کنترل هستند. ضرایب این محدودیت در برگزیده حالت نویزی و نوسانی هستند و محدودیت (۴) بیانگر اطمینان از بردارهای نامنفی می‌باشد. به منظور تعریف مسئله بهینه‌سازی استوار مجموعه‌ای از سناریوها $\Omega = \{1, 2, \dots, S\}$ تعریف می‌شود. متناسب با هر سناریو $s \in \Omega$ و مجموعه $\{d_s, B_s, C_s, e_s\}$ از تحقق یافتن را می‌توان مرتبط دانست و احتمال رخداد هر سناریو P_s است، بطوری که $\sum_S p_s = 1$ جواب بهینه مدل ریاضی فوق به لحاظ بهینگی، استوار خواهد بود اگر به ازای هر تحقق یافتن سناریو نزدیک به بهینه باقی بماند و این استواری جواب نامیده می‌شود. جواب همچنین در قبال موجه بودن استوار است، اگر جواب به ازای هر تحقق یافتن (عملکرد) از k تقریباً موجه باشد و این استواری مدل نامیده می‌شود.

غیر محتمل است که جواب مدل (۱) برای همه سناریوهای $s \in \Omega$ ، هم موجه و هم بهینه باشد. به عبارتی، در یک مدل لازم است که مبادله^۱ بین استواری مدل و استواری جواب قابل بررسی و قابل سنجش باشد. مدل بهینه‌سازی ارائه شده توسط مالوی و همکارانش روشی را برای سنجش این مبادله ارائه می‌کند. صورت کلی مدل بهینه‌سازی استوار به شرح ذیل است:



یک تولیدکننده محصولات مختلفی را با استفاده از مجموعه مواد اولیه مشترک که توسط تأمین‌کنندگان مختلف تأمین می‌شود، تولید می‌کند. قطعات مختلف در سلول‌های مجازی جهت جلب رضایت تقاضاهای پویای مشتریان تولید شده و بر اساس برنامه‌ریزی توزیع به آن‌ها تحویل داده می‌شود. این مسئله در حقیقت سه برنامه‌ریزی را با هم جمع می‌کند: (۱) برنامه‌ریزی تدارکات و انتخاب تأمین‌کنندگان، (۲) برنامه‌ریزی تولید و طراحی سلول‌های مجازی در کارخانه تولیدکننده و (۳) برنامه‌ریزی توزیع قطعات. هدف ما دستیابی به بهترین تصمیمات برنامه‌ریزی در افق برنامه‌ریزی با رفتار یکپارچه و هماهنگ می‌باشد.

۳-۱- نمادها

اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم به‌کار برده شده جهت فرمول‌بندی مدل پیشنهادی در زیر ارائه شده است. شمارنده‌ها

r اندیس مواد اولیه ($r=1, 2, \dots, R$)

i اندیس قطعات ($i=1, 2, \dots, P$)

m اندیس ماشین‌آلات ($m=1, 2, \dots, M$)

k اندیس سلول‌های مجازی ($k=1, 2, \dots, K$)

c اندیس مشتریان ($c=1, 2, \dots, C$)

j اندیس تأمین‌کنندگان ($j=1, 2, \dots, J$)

t اندیس دوره‌ها ($t=1, 2, \dots, T$)

s اندیس سناریوها ($s=1, 2, \dots, S$)

پارامترها

HP_{its} : هزینه نگهداری هر واحد قطعه i ام در دوره t ام تحت سناریوی s ام

HR_{rts} : هزینه نگهداری هر واحد ماده اولیه r ام در دوره t ام تحت سناریوی s ام

CB_{rjts} : هزینه خرید هر واحد ماده اولیه r ام از تأمین‌کننده j ام در دوره t ام تحت سناریوی s ام

CP_{its} : هزینه تولید هر واحد قطعه i ام در دوره t ام تحت سناریوی s ام

D_{cits} : تقاضای مشتری c ام از قطعه i ام در دوره t ام تحت سناریوی s ام

$$\sigma(x, y_1, y_2, \dots, y_S) = \sum_{s=1}^S p_s \times \xi_s + \lambda \times \left| \sum_{s=1}^S p_s \times \xi_s - \sum_{s=1}^S p_s \times \xi_s \right| \quad (7)$$

اما این تابع هدف همچنان غیرخطی است ولی قابل تبدیل به تابع خطی با اضافه کردن دو متغیر غیرمنفی می‌باشد. یو و لی [۱۸]، یک روش کارا به شرح زیر ارائه کردند:

$$\begin{aligned} \text{Min} &= \sum_{s=1}^S p_s \times \xi_s + \\ &\lambda \times \left[\sum_{s=1}^S p_s \times \left(\left(\xi_s - \sum_{s=1}^S p_s \times \xi_s \right) + 2 \times \theta_s \right) \right] \\ \text{S.t.} & \\ &\xi_s - \sum_{s'=1}^S p_{s'} \times \xi_{s'} + \theta_s \geq 0 \\ &\theta_s \geq 0 \text{ and integer} \end{aligned} \quad (8)$$

عبارت دوم در تابع هدف معادله (۵)، $p(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_S)$ ، تابع جریمه غیرموجه بودن است و برای جبران میزان تخطی از سمت راست محدودیت‌های کنترلی در برخی سناریوها به‌کار می‌رود. در واقع تخطی از سمت راست محدودیت به معنای غیرموجه بودن آن محدودیت می‌باشد. با توجه به موارد ذکر شده، تابع هدف مدل بهینه‌سازی استوار می‌تواند به صورت زیر مدل شود:

$$\begin{aligned} \text{Min} &= \\ &\sum_{s=1}^S p_s \times \xi_s + \lambda \times \left[\sum_{s=1}^S p_s \times \left(\xi_s - \sum_{s=1}^S p_s \times \xi_s \right) \right] \\ &+ \omega \times \sum_{s=1}^S p_s \times \delta_s \end{aligned} \quad (9)$$

۳-۲- فرمول‌بندی مسئله

مدل مفهومی یکپارچه آرایش سلولی مجازی و طراحی زنجیره تأمین در شکل ۱ نشان داده شده است. در این مقاله، یک مدل شامل چندین تأمین‌کننده، یک تولیدکننده و چندین مشتری ارائه شده است که برنامه‌ریزی تدارکات، تولید و توزیع را با در نظر گرفتن اهداف مورد نظر یکپارچه کرده است به طوری که شرایط غیردقیق بعضی پارامترهای حیاتی مانند تقاضای مشتریان، ظرفیت تأمین‌کنندگان برای تأمین مواد اولیه و زمان در دسترس ماشین‌آلات در هر دوره را مدنظر قرار داده است. همان طوری که در شکل ۱ نشان داده شده است، شبکه در نظر گرفته شده در این مقاله یک ساختار کلی دارد که قادر است هم آرایش سلولی مجازی و هم زنجیره تأمین را پشتیبانی می‌کند که می‌تواند در صنایع مختلف کاربرد داشته باشد.

تصمیم‌گیری است که معمولاً در مدل‌های زنجیره تأمین استفاده می‌شود. هزینه‌های کل شامل هزینه‌های فعالیت‌های تدارکات، تولید و توزیع می‌شود که به صورت زیر در مدل پیشنهادی محاسبه می‌شود:

$$\text{Min } TC_s = \sum_t \sum_r \sum_j (CB_{rjts} B_{rjt} + ds_j CTR_{rts} B_{rjt}) + \quad (1-10)$$

$$\sum_t \sum_i (HP_{its} IP_{its}) + \sum_t \sum_r (HR_{rts} IR_{rts}) + \quad (2-10)$$

$$\sum_t \sum_i (CP_{its} Z_{it}) + \quad (3-10)$$

$$\sum_t \sum_i \sum_c (dc_c CTP_{its} S_{ict}) \quad (4-10)$$

تمرکز اصلی زنجیره تأمین، کنترل کارای جریان مواد میان تأمین‌کنندگان، تولیدکننده و مشتریان می‌باشد به طوری که هزینه‌های کل زنجیره تأمین کمینه گردد. تابع هدف اول فعالیت‌های مختلفی (تدارکات، تولید و توزیع) را در زنجیره تأمین یکپارچه می‌کند. عبارت اول معادله (۱-۱۰) هزینه خرید مواد اولیه از تأمین‌کنندگان را در افق برنامه‌ریزی محاسبه می‌کند. عبارت دوم معادله (۱-۱۰) هزینه حمل‌ونقل مواد اولیه منتقل شده از تأمین‌کنندگان به تولیدکننده را محاسبه می‌کند. عبارت معادله (۲-۱۰) هزینه نگهداری موجودی قطعات و مواد اولیه را در نظر می‌گیرد. معادله (۳-۱۰) هزینه تولید قطعات در کارخانه را مشخص می‌کند. عبارت اول معادله (۴-۱۰) هزینه حمل‌ونقل قطعات که به مشتری فرستاده می‌شود را نشان می‌دهد.

در طراحی سیستم‌های تولید سلولی، هدف یا اهداف طراحی شده باید مشخص باشد. برای مثال جدول ۱ سیستمی شامل ۵ قطعه و ۴ ماشین را نشان می‌دهد. عدد یک در سطر i ام و ستون m ام نشان می‌دهد که قطعه i ام یک عملیات بر روی ماشین m ام دارد. برای نمونه، قطعه اول دو عملیات بر روی ماشین‌های ۱ و ۳ دارد. همان طور که در جدول ۲ می‌بینیم دو سلول تشکیل شده است. سلول ۱ شامل ماشین‌های ۲ و ۴ است که قطعات ۲ و ۵ را تولید می‌کند. سلول ۲ شامل ماشین‌های ۱ و ۳ می‌باشد که قطعات ۱، ۳ و ۴ را تولید می‌کند. قطعه نوع سوم بر روی ماشین‌های ۱ و ۳ در سلول دوم پردازش می‌شود. هر چند قطعه نوع سوم نیاز دارد تا بر روی ماشین ۲ که در سلول اول قرار دارد نیز پردازش شود. بنابراین یک حرکت بین سلولی نیاز می‌باشد که علامت "*" یک عنصر استثنا برای قطعه نوع سوم می‌باشد. زیاد بودن عناصر استثنا باعث افزایش حرکات بین سلولی می‌شود و منجر به ناکارآمدی سلول‌ها و باعث پیچیدگی کنترل تولید می‌شود. در جدول ۲ مقدار ۰ یک فضای خالی را در سلول دوم نشان می‌دهد. یک فضای خالی نشان می‌دهد که یک ماشین در یک سلول برای پردازش یک قطعه مشخص کاربرد ندارد. وجود فضای خالی در سلول نشان‌دهنده‌ی پایین بودن کارایی سلول و بیکاری ماشین‌آلات موجود در سلول است. در این مثال ماشین ۳ برای قطعه چهارم نیاز نیست. لذا در سیستم تولید مجازی کارخانه، به دنبال تعیین

CTR_{rts} : هزینه حمل‌ونقل هر واحد ماده اولیه r ام در دوره t ام تحت سناریوی s ام

CTP_{its} : هزینه حمل‌ونقل هر واحد قطعه i ام در دوره t ام تحت سناریوی s ام

CAP_{rj} : حداکثر ظرفیت تأمین‌کننده j ام برای فراهم کردن ماده اولیه r ام در هر دوره

MAC_{rj} : حداقل ظرفیت قابل قبول برای تأمین‌کننده j ام جهت فراهم کردن ماده اولیه r ام در هر دوره

SP_{jr} : ۱ اگر تأمین‌کننده j ام بتواند ماده اولیه r ام را فراهم کند، ۰ در غیر این صورت

a_{im} : ۱ اگر قطعه i ام باید بر روی ماشین m ام پردازش شود، ۰ در غیر این صورت

λ_{ri} : تعداد مواد اولیه مورد نیاز r ام جهت تولید هر واحد قطعه i ام

T_{mt} : زمان در دسترس ماشین m ام در دوره t ام

MT_{im} : زمان پردازش مورد نیاز جهت پردازش هر واحد قطعه i ام بر روی ماشین m ام

ds_j : فاصله بین تأمین‌کننده j ام و انبار کارخانه تولیدکننده

dc_c : فاصله بین کارخانه تولیدکننده و مشتری c ام

متغیرهای تصمیم

S_{ict} : مقدار قطعه i ام که به مشتری c ام در دوره t ام فرستاده می‌شود.

B_{rjt} : مقدار مواد اولیه r ام که از تأمین‌کننده j ام در دوره t ام خریداری می‌شود

Z_{it} : تعداد قطعه نوع i ام که در دوره t ام تولید می‌شود

δ_{its} : مقدار عدم برآورده‌سازی^۱ تقاضای قطعه i ام از مشتری c ام در دوره t ام تحت سناریوی s ام

IP_{its} : مقدار موجودی قطعه i ام در انتهای دوره t ام تحت سناریوی s ام

IR_{rts} : مقدار موجودی ماده اولیه r ام در انتهای دوره t ام تحت سناریوی s ام

RM_{rjt} : ۱ اگر ماده اولیه r ام از تأمین‌کننده j ام در دوره t ام خریداری شود، ۰ در غیر این صورت

X_{ikt} : ۱ اگر قطعه i ام به سلول مجازی k ام در دوره t ام تخصیص یابد، ۰ در غیر این صورت

Y_{mkt} : ۱ اگر ماشین m ام به سلول مجازی k ام در دوره t ام تخصیص یابد، ۰ در غیر این صورت

۳-۲- توابع هدف در حالت قطعی

دو هدف مهم در مدل پیشنهادی در نظر گرفته شده است: (۱) هزینه‌های کل (۲) مجموع عناصر استثنا^۲ و تعداد فضای خالی^۳.

هزینه‌های کل یکی از پرکاربردترین و واقعی‌ترین اهداف

1. Under-fulfillment
2. Exceptional Elements
3. Void

جواب می‌باشد. معادله (۱۲-۳) شاخص استواری مدل می‌باشد که با توجه به محدودیت کنترل (۱۶) عمل می‌کند. همچنین محدودیت (۱۳)، یک محدودیت کمکی برای خطی‌سازی روش بهینه‌سازی استوار می‌باشد.

$$TC_s - \sum_{s'} p_{s'} \times TC_{s'} + \theta_s \geq 0 \quad \forall s \quad (13)$$

۳-۴- محدودیت‌ها

$$IR_{r(t-1)s} + \sum_j B_{rjt} - \sum_i \lambda_{ri} Z_{it} = IR_{rts} \quad \forall r, t, s \quad (14)$$

$$IP_{i(t-1)s} + Z_{it} - \sum_c S_{ict} = IP_{its} \quad \forall i, t, s \quad (15)$$

$$S_{ict} - \delta_{its} = D_{cits} \quad \forall i, c, t, s \quad (16)$$

$$B_{rjt} \leq CAP_{rj} \times SP_{jr} \times RM_{rjt} \quad \forall r, j, t \quad (17)$$

$$B_{rjt} \geq MAC_{rj} \times SP_{jr} \times RM_{rjt} \quad \forall r, j, t \quad (18)$$

$$\sum_i MT_{im} \times Z_{it} \leq T_{mt} \quad \forall m, t \quad (19)$$

$$\sum_k X_{ikt} = 1 \quad \forall i, t \quad (20)$$

$$\sum_k Y_{mkt} = 1 \quad \forall m, t \quad (21)$$

$$Y_{mkt}, X_{ikt}, RM_{rjt} \in \{0, 1\} \quad \forall r, i, m, k, j, t \quad (22)$$

$$Z_{it}, IP_{its}, IR_{rts}, S_{ict}, B_{rjt}, \delta_{its} \geq 0 \text{ and integer.} \quad \forall r, i, c, j, t, s \quad (23)$$

معادلات (۱۴) و (۱۵) به‌ترتیب محدودیت‌های تعادل موجودی برای مواد اولیه و قطعات در انبارهای تولیدکننده هستند. عبارت $\sum_i \lambda_{ri} Z_{it}$ مجموع مواد اولیه مورد نیاز λ ام برای تولید قطعه نوع λ ام در دوره t ام بر اساس سیاهه مواد را نشان می‌دهد. عبارت $\sum_j B_{rjt}$ مقدار مواد اولیه خریداری‌شده λ ام از تمامی تأمین‌کنندگان را در دوره t ام بیان می‌کند. عبارت $\sum_c S_{ict}$ مقدار قطعات فروخته‌شده نوع λ ام به تمامی مشتریان در هر دوره را محاسبه می‌کند. معادله (۱۶) مقدار فروش از دست رفته قطعه نوع λ ام از مشتری c ام در هر دوره را نشان می‌دهد. معمولاً هر تأمین‌کننده در هر دوره حداقل سفارش قابل‌قبول را برای هر ماده اولیه تأمین می‌کند. یعنی هر تأمین‌کننده فقط سفارش‌هایی را قبول می‌کند که بیشتر از مقدار اقتصادی از پیش تعیین شده باشد. البته در نظر گرفتن این حالت می‌تواند یک راه‌برد برد-برد بین شرکای زنجیره تأمین بهبود بخشد و تولیدکننده را مجبور می‌سازد تا تأمین‌کنندگان کمتری را در هر دوره انتخاب نماید. نامعادله (۱۷) حداکثر ظرفیت هر تأمین‌کننده را برای تأمین هر ماده اولیه محدود می‌کند. محدودیت (۱۸) اطمینان می‌دهد که تولیدکننده به حداقل ظرفیت قابل‌قبول برای تأمین‌کننده λ ام جهت فراهم کردن ماده اولیه λ ام در هر دوره را مورد لحاظ قرار می‌دهد. معادله (۱۹) محدودیت ظرفیت هر ماشین در هر دوره را در نظر می‌گیرد. محدودیت (۲۰)

سلول‌های مجازی کارا با کمینه کردن عناصر استثنا و فضای خالی هستیم.

$$Min TEEV = \sum_t \sum_i Z_{it} \sum_k \sum_m a_{im} (1 - Y_{mkt} X_{ikt}) + \sum_t \sum_i Z_{it} \sum_k \left(\sum_m X_{ikt} Y_{mkt} - \sum_m X_{ikt} Y_{mkt} a_{im} \right) \quad (11)$$

عبارت اول، تابع هدف دوم تعداد عناصر استثنا و عبارت دوم تعداد فضای خالی سلول‌های مجازی را برای قطعات برنامه‌ریزی‌شده جهت تولید را در افق برنامه‌ریزی کمینه می‌کند. البته تابع هدف دوم، یک تابع غیرخطی است که با روش‌های معمول ریاضی قابل خطی‌سازی شدن می‌باشد.

جدول (۱۹): ماتریس ماشین-قطعه شامل ۵ محصول و ۴ ماشین

		نوع قطعه				
		۱	۲	۳	۴	۵
نوع ماشین	۱	۱		۱	۱	
	۲		۱	۱		۱
	۳	۱		۱		
	۴		۱			۱

جدول (۲): آرایش سلولی مثال جدول ۱

		نوع قطعه				
		۵	۲	۳	۱	۴
نوع ماشین	۲	۱	۱	*		
	۴	۱	۱			
	۱			۱	۱	۱
	۳			۱	۱	۰

۳-۳- توابع هدف در حالت عدم قطعیت

همان‌طوری که بیان شد تابع هدف اول دارای پارامترهای هزینه‌ای است که دارای عدم قطعیت می‌باشند که می‌توان با روش بهینه‌سازی استوار بازنویسی نمود:

$$Min TC = \sum_s p_s \times TC_s + \quad (1-12)$$

$$\lambda \times \sum_s p_s \times \left(TC_s - \sum_{s'} p_{s'} \times TC_{s'} + 2 \times \theta_s \right) + \quad (2-12)$$

$$\omega \times \sum_s \sum_t \sum_i p_s \times \delta_{its} \quad (3-12)$$

معادلات (۱-۱۲) و (۲-۱۲) به‌ترتیب میانگین و واریانس تابع هدف را نسبت به سناریوها محاسبه می‌کند که شاخص استواری

موردنظر یا یک جواب بهینه پارتو به دست می آید. برخی از زیر مسئله‌ها ممکن است فضای حل نشدنی داشته باشد که کنار گذاشته می‌شوند. در میان جواب‌های بهینه پارتوی به دست آمده، جواب با بالاترین اولویت توسط تصمیم‌گیرنده انتخاب می‌شود. در روش محدودیت افسیلین دو مشکل وجود دارد: اول این که دامنه توابع هدف به دست آمده از جدول بازده روی مجموعه پارتو و کارا قرار نمی‌گیرد که این ضعف هنگامی که برای برخی از توابع هدف جواب بهینه چندگانه وجود دارد رخ می‌دهد و مشکل دوم این است که این روش تضمین نمی‌کند جواب‌های بهینه به دست آمده، کارا باشد. که به این جواب‌های بهینه به دست آمده، جواب‌های کارای ضعیف گویند [۲۰، ۱۹]. برای رفع این دو ضعف، روش محدودیت افسیلین تعمیم‌یافته ارائه گردید [۲۱]. توجه به دو ضعف روش محدودیت افسیلین، برای حل مشکل اول از تکنیک لکسیکوگراف برای محاسبه جدول بازده و برای حل مشکل دوم از روش محدودیت افسیلین تعمیم‌یافته استفاده می‌کنیم. در این روش با در نظر گرفتن مسئله (۲۴) ابتدا تابع هدف اول (بادی‌های برنجی بیش‌ترین اولویت) را با محدودیت‌های اصلی مسئله حل می‌کنیم. فرض می‌کنیم، مقدار بهینه این تابع هدف $f_1 = z_1^*$ باشد، سپس $f_1 = z_1^*$ را جهت حفظ جواب بهینه زیر مسئله بهینه‌سازی اول به محدودیت‌های اصلی اضافه کرده و تابع هدف دوم را با این محدودیت‌ها حل می‌کنیم. فرض برای تابع هدف دوم مقدار بهینه $f_2 = z_2^*$ به دست آید، حال برای بهینه کردن تابع هدف بعدی و جهت حفظ جواب بهینه دو زیر مسئله اول، $f_1 = z_1^*$ و $f_2 = z_2^*$ را به محدودیت‌ها اضافه کرده و تابع هدف سوم را با این محدودیت‌ها حل می‌کنیم تا جواب بهینه آن را نیز به دست آوریم و به همین ترتیب مراحل را تا p امین تابع هدف انجام می‌دهیم تا اینجا سطر اول جدول بازده تشکیل شد برای تشکیل سطر دوم به همین منوال ابتدا تابع هدف دوم را با محدودیت‌های اصلی حل می‌کنیم و برای تابع هدف‌های بعدی در هر مرحله مقدار بهینه تابع هدف قبل را به عنوان محدودیت به محدودیت‌های اصلی اضافه می‌کنیم.

ضعف دومی که در روش محدودیت افسیلین معمولی وجود دارد این است که جواب‌های بهینه به دست آمده لزوماً کارا نیستند. بنابراین برای حل این مشکل در روش محدودیت افسیلین تعمیم‌یافته مسئله (۲۴) را به صورت زیر تغییر می‌دهیم، ابتدا نامعادلات محدودیت‌های مربوط به تابع هدف‌ها (با اولویت پایین در روش لکسیکوگراف) را با استفاده از متغیرهای کمبود یا مازاد به تساوی تبدیل کرده و سپس این متغیرهای کمبود یا مازاد را به عنوان قسمت دوم در تابع هدف در نظر می‌گیریم که این امر مسئله را وادار می‌کند تا جواب کارا تولید کند (مسئله (۲۶)).

اطمینان می‌دهد که هر قطعه فقط به یک سلول مجازی در هر دوره تخصیص یابد. محدودیت (۲۱) بیان می‌کند که هر ماشین باید فقط به یک سلول مجازی در هر دوره اختصاص پیدا کند. روابط (۲۲) و (۲۳) بیان می‌کند که نوع متغیرهای تصمیم از جنس صحیح مثبت و صفر- یک هستند.

۴- روش محدودیت افسیلین

یک مسئله چندهدفه ریاضی با p تابع هدف $f_i(x)$, ($i=1,2,\dots,p$) را در نظر بگیرید $x \in X$ که یک بردار از فضای جواب شدنی است که توسط محدودیت‌های مسئله چندهدفه مشخص می‌شود. در اینجا فرض می‌کنیم که همه تابع هدف‌ها باید کمینه گردند. در روش محدودیت افسیلین، ابتدا یکی از توابع هدف که دارای بیشترین اولویت است به عنوان تابع هدف اصلی در نظر گرفته شده و (فرض تابع هدف اول) بهینه می‌شود و بقیه توابع هدف به عنوان محدودیت به فضای جواب شدنی X به صورت زیر اضافه می‌گردد:

$$\begin{aligned} \text{Min } f_i(x) \\ f_2(x) \leq e_2, f_3(x) \leq e_3, \dots, f_p(x) \leq e_p, \quad x \in X. \end{aligned} \quad (24)$$

جواب‌های بهینه پارتو با کمک متغیرهای پارامتری سمت راست (e_2, e_3, \dots, e_p) محدودیت‌های جدید محاسبه می‌گردد. برای به کار بردن روش محدودیت افسیلین باید دامنه هر تابع هدف (حداقل $p-1$ تابع هدفی که در محدودیت قرار می‌گیرند) را داشته باشیم که این دامنه‌ها جهت تعیین نقاط شبکه برای مقادیر متغیرهای پارامتری سمت راست مورد استفاده قرار می‌گیرد. متداول‌ترین روش برای محاسبه دامنه توابع هدف استفاده از جدول بازده است. که برای تشکیل جدول بازده برای مسائل چندهدفه ابتدا هر تابع هدف f_i به صورت جداگانه با محدودیت‌های اصلی حل شده و جواب بهینه آن محاسبه می‌گردد. مقدار بهینه f_i با $f_i^*(x_i^*)$ نشان داده می‌شود که x_i^* بردار متغیرهای تصمیم است که تابع هدف f_i را بهینه می‌کند سپس با این بردار متغیر تصمیم، مقادیر دیگر توابع هدف $f_1, f_2, \dots, f_i, f_{i+1}, \dots, f_p$ را محاسبه می‌کنیم که به صورت $f_1(x_i^*), f_2(x_i^*), \dots, f_i(x_i^*), f_{i+1}(x_i^*), \dots, f_p(x_i^*)$ نشان داده می‌شود.

بعد از یافتن دامنه همه توابع هدف با استفاده از جدول بازده تکنیک محدودیت افسیلین دامنه $p-1$ تابع هدف f_2, f_3, \dots, f_p را به q_2, q_3, \dots, q_p ، فاصله مساوی تقسیم می‌شود. که این فاصله‌ها با استفاده از $(q_2-1), (q_3-1), \dots, (q_p-1)$ نقطه شبکه‌ای میانی با فاصله مساوی تشکیل می‌شوند. با در نظر گرفتن نقاط پیشینه و کمینه تابع هدف‌ها، در کل تعداد نقاط شبکه‌ای برای هر تابع هدف f_i برابر (q_i+1) است (برای $i=2, \dots, p$). بنابراین ما باید $\prod_{i=2}^p (q_i+1)$ زیر مسئله بهینه‌سازی حل کنیم، که زیر مسئله‌های (n_2, n_3, \dots, n_p) به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} \text{Min } f_1(x) \\ \text{S.t. } f_2(x) \leq e_{2,n_2}, \dots, f_p(x) \leq e_{p,n_p} \quad x \in X \end{aligned} \quad (25)$$

با حل هر زیر مسئله بهینه یک جواب کاندید برای مسئله

چندین عملیات می‌باشد که باید براساس زمان پردازش مشخص در ایستگاه‌های کاری مختلف انجام شوند که در جدول ۴ گزارش شده است. جدول ۵ سیاهه مواد را نشان می‌دهد که هر درایه (p, r) به مقدار مواد اولیه r که برای تولید محصول p مورد نیاز است اشاره می‌کند. همچنین اطلاعات تأمین‌کنندگان در جدول ۶ گردآوری شده است. ما مدل پیشنهادی را برای سه دوره برنامه‌ریزی اجرا می‌کنیم. بر اساس سوابق اطلاعات بازار، سه نوع سناریوی اقتصادی را برای شرایط آینده می‌توان تعریف نمود: خوب، متوسط و بد که احتمال رخداد هر کدام به ترتیب برابر ۰.۴۵، ۰.۳۵ و ۰.۲ می‌باشد. همچنین پارامترهای روش بهینه‌سازی استوار برابر $\lambda = 1$ و $\omega = 180$ در نظر گرفته شده است. جهت حل مدل پیشنهادی با استفاده از روش محدودیت اسیلون تعمیم‌یافته، تابع هدف هزینه را به‌عنوان تابع هدف اصلی در نظر گرفته و تابع هدف دوم را به‌عنوان محدودیت به فضای جواب شدنی اضافه می‌کنیم. مطالعه موردی از طریق روش شاخه و کران توسط نرم‌افزار لینگو ۹ بر روی رایانه شخصی پنتیوم چهارم، پردازشگر دو هسته‌ای اینتل با ۴ گیگابایت حافظه داخلی تحت سیستم‌عامل ویندوز XP SP3 حل شده است. بعد از حل مدل، سه جواب پارتو به دست می‌آید که در شکل ۲ نشان داده شده است. اگر جواب پارتو دوم را در نظر بگیریم، آرایش سلولی و برنامه تولیدی به دست آمده به ترتیب در شکل ۳ و جدول ۷ نشان داده شده است. همان‌طوری که بیان شد، در تولید سلولی مجازی، جابه‌جایی ماشین‌آلات به‌صورت فیزیکی رخ نمی‌دهد ولی تخصیص ماشین‌آلات می‌تواند در سلول‌های مجازی تغییر کند. در دوره اول، سلول مجازی ۱ شامل ایستگاه‌های کاری دوم و چهارم و سلول مجازی دوم شامل ایستگاه‌های ۱ و ۳ می‌باشند. همچنین، دوره اول شامل دو عنصر استثنا و یک فضای خالی در سلولی مجازی دوم است. در دوره دوم، سلول مجازی اول شامل ایستگاه‌های ۱ و ۳ و ۴ و سلول مجازی دوم شامل ایستگاه پنجم است. در دوره سوم، پیکربندی سلول‌های مجازی تغییر یافته است و ایستگاه‌های ۱ و ۳ از سلول دوم به سلول اول انتقال یافته است. در دوره سوم، پیکربندی مشابه دوره اول است. میزان توابع هدف برای جواب بهینه پارتوی دوم به ترتیب برابر ۱۹۸۷۶۵ و ۷۲۷۱ است. براساس نتایج به دست آمده، می‌توان نشان داد که روش پیشنهادی به راحتی در بنگاه‌های کوچک و متوسط قابل اجرا می‌باشد که در این راستا می‌توان از مزیت‌های تولید سلولی و زنجیره تأمین به‌صورت هم‌زمان بهره برد.

جدول (۳): اطلاعات پارامترهای ورودی

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
HP_{its}	$U(0.3, 0.42)$	T_{mi}	$U(680, 710)$
HR_{rs}	$U(0.24, 0.28)$	MAC_{rj}	$U(300, 700)$
CB_{rjts}	$U(1.1, 1.5)$	CAP_{rj}	$U(1000, 3500)$
CP_{its}	$U(1.8, 2.9)$	D_{cit1}	$U(90, 130)$
CTR_{rs}	$U(0.5, 0.8)$	D_{cit2}	$U(110, 300)$
CTP_{its}	$U(0.7, 0.9)$	D_{cit3}	$U(300, 370)$

$$\begin{aligned} & \text{Min} \left(f_1(x) - eps \times (s_2 + s_3 + \dots + s_p) \right) \\ & \text{St. } f_2(x) + s_2 = e_2 \end{aligned} \quad (26)$$

$$\dots\dots$$

$$f_p(x) + s_p = e_p$$

$$x \in X, s \in R^+$$

که در آن eps یک عدد بسیار کوچک می‌باشد. معمولاً بین 10^{-3} تا 10^{-6} لازم به ذکر است که اگر هدف بیشینه کردن باشد ضریب eps مثبت و ضریب s_i ها منفی خواهد بود. اثبات اینکه مسئله (۲۶) فقط جواب کارا تولید می‌کند و از تولید جواب کارای ضعیف جلوگیری می‌کند توسط آقای و همکاران [۲۲] بیان شده است. با توجه به این که واحد توابع هدف با هم متفاوت است، لذا جهت جلوگیری از مشکلات مقیاس‌گذاری و برای از بین بردن واحد، پیشنهاد می‌شود در بخش دوم تابع هدف مسئله (۲۶) بجای s_i از s_i/r_i استفاده شود که در آن r_i همان دامنه تابع هدف نام می‌باشد. بنابراین تابع هدف مسئله محدودیت اسیلون به‌صورت زیر بیان می‌گردد:

$$\text{Min} \left(f_1(x) - eps \times \left(\frac{s_2}{r_2} + \frac{s_3}{r_3} + \dots + \frac{s_p}{r_p} \right) \right) \quad (27)$$

۵- مطالعه موردی

مفهوم تقسیم فیزیکی کارخانه به سلول‌ها به‌طور قطع برای واحدهای تولیدی بزرگ جذاب بوده و موجب افزایش چابکی آن‌ها می‌گردد. اما در بنگاه‌های اقتصادی کوچک و متوسط، جداسازی فیزیکی به دلایل زیادی امکان‌پذیر نیست [۲۳]. اگرچه در این صنایع کوچک و متوسط، به‌کارگیری تولید سلولی می‌تواند مزایایی را به‌دنبال داشته باشد. اما، جداسازی فیزیکی عملیات به سلول‌ها محدودیت‌های عملی، فنی و سازمانی دارد. در چنین موقعیتی، این‌گونه صنایع جهت استفاده از مزایای تولید سلولی بدون جداسازی فیزیکی کارخانه به سلول‌ها و پیکربندی مجدد سلول‌ها به آرایش سلول‌های مجازی می‌توانند توجه کنند. جهت نشان دادن صحت و کاربرد مدل پیشنهادی، یک مطالعه موردی صنعتی انجام شده است. مطالعه موردی بر روی یک شرکت سازنده تجهیزات و ادوات کشاورزی در شمال ایران صورت پذیرفته است. این شرکت به‌عنوان یک بنگاه اقتصادی کوچک و متوسط قطعات مختلف کشاورزی تولید می‌کند. این شرکت با چهار تأمین‌کننده عمده جهت تأمین ۱۲ نوع مواد اولیه مختلف برای تولید ۸ نوع محصول همکاری می‌کند. کارگاه تولیدکننده شامل ۵ ایستگاه کاری است. شرکت جهت فروش محصولات خود دارای ۳ عامل فروش همکاری می‌کند.

پارامترهای مسئله با توجه به مستندات واحدهای فروش، تولید و تأمین جمع‌آوری شده است. با توجه به محیط تغییرپذیر، توزیع یکنواخت برای پارامترهای هزینه و تقاضا در نظر گرفته شده که در جدول ۳ نشان داده شده است. هر محصول جهت تولید شامل

جدول (۷): برنامه تولیدی جواب پارتوی دوم

		Z_{i1}	Z_{i2}	Z_{i3}
محصول	۱	۳۰۰	۳۳۰	۰
	۲	۳۱۸	۰	۳۸۰
	۳	۶۰۲	۵۲۷	۰
	۴	۲۸۰	۶۸۰	۳۵۷
	۵	۳۵۰	۲۰۰	۵۴۰
	۶	۰	۲۵۰	۴۵۰
	۷	۲۵۰	۰	۰
	۸	۴۰	۰	۷۰۰

جدول (۴): اطلاعات ایستگاه‌های کاری و محصول

		ایستگاه کاری				
		۱	۲	۳	۴	۵
محصول	۱	۰.۲۰			۰.۹۵	۰.۴۵
	۲		۰.۳۱		۰.۴۵	
	۳	۰.۶۵		۰.۶۳		۰.۵۲
	۴		۰.۲۳		۰.۲۱	
	۵	۰.۶۲	۰.۳۷		۰.۲۷	۰.۱۹
	۶	۰.۳۷				۰.۹۲
	۷	۰.۲۵		۰.۵۲		
	۸		۰.۴۴		۰.۳۳	

جدول (۵): ماتریس سیاهه مواد

		مواد اولیه											
		۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
محصول	۱	۱	۱	۴	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۳
	۲	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳	۲	۰	۱	۰
	۳	۱	۱	۰	۲	۱	۴	۰	۰	۱	۲	۰	۲
	۴	۱	۱	۰	۴	۱	۰	۱	۰	۲	۰	۱	۰
	۵	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۲	۰	۲	۰	۰	۲
	۶	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۰	۱	۰	۱
	۷	۱	۱	۴	۲	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۲	۱
	۸	۱	۰	۴	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۲	۰

		C1				C2		
		P2	P4	P5	P8	P1	P3	P7
C1	M2	۱	۱	۱	۱			
	M4	۱	۱	۱	۱	۱		
C2	M1			۱		۱	۱	۱
	M3					۰	۱	۱
	M5			۱		۱	۱	۰

الف دوره اول

		C2			C1	
		P3	P4	P5	P1	P6
C1	M2	۰	۱	۱		
	M4	۰	۱	۱	۱	
	M1	۱	۰	۱	۱	۱
	M3	۱	۰	۰		
C2	M5	۱		۱	۱	۱

ب) دوره دوم

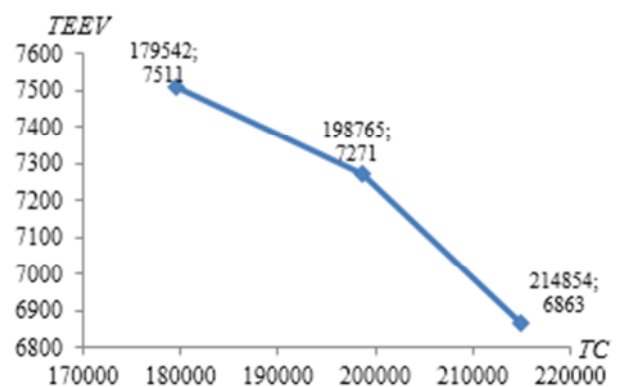
		C1			C2	
		P2	P4	P8	P5	P6
C1	M2	۱	۱	۱	۱	
	M4	۱	۱	۱	۱	
C2	M1				۱	۱
	M3				۰	۰
	M5				۱	۱

ج. دوره سوم

شکل (۳): پیکربندی تولید سلولی مجازی

جدول (۶): اطلاعات تأمین کنندگان

		مواد اولیه											
		۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
تأمین کننده	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۰
	۲	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۱
	۳	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۰
	۴	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۱	۱	۰



شکل ۲: جواب‌های پارتو به دست آمده

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، یک مدل برنامه‌ریزی دو هدفه استوار جهت فرمول‌بندی مسئله آرایش سلولی مجازی پویا و زنجیره تأمین با یکپارچه‌سازی برنامه‌ریزی تدارکات، تولید و تأمین در یک شبکه چند

- [11] Ghezavati, V. R. and Saidi-Mehrabad, M. "An efficient hybrid self-learning method for stochastic cellular manufacturing problem: A queuing-based analysis", *Expert Systems with Applications*, 38(3), pp.1326-1335 (2011).
- [12] Shanker, R. and Vrat, P. "Some design issues in cellular manufacturing using the fuzzy programming approach", *International Journal of Production Research*, 37(11), pp. 2545-2563 (1999).
- [13] Arikan, F. and Gungör, Z. "Modeling of a manufacturing cell design problem with fuzzy multi-objective parametric programming", *Mathematical and Computer Modelling*, 50(3-4), pp. 407- 420 (2009).
- [14] Torabi, S.A. and Shamekhi Amiri, A. "A possibilistic approach for designing hybrid cellular manufacturing systems", *International Journal of Production Research*, 50(15), pp. 4090- 4104(2012).
- [15] Leung, S.C.H. Tsang, S.O.S. Ng, W.L. and Wu, Y. "A robust optimization model for multi-site production planning problem in an uncertain environment", *European Journal of Operational Research*, 181(1), pp. 224-38 (2007).
- [16] MirzapourAl-e-hashem, S.M.J. Malekly, H. and Aryanezhad, M.B. "A multi-objective robust optimization model for multi-product multi-site aggregate production planning in a supply chain under uncertainty", *International Journal of Production Economics*, 134(1), pp. 28-42 (2011).
- [17] Mulvey, J.M. Vanderbei, R.J. and Zenios, S.A. "Robust optimization of large-scale systems", *Operations Research*, 43(2), pp. 264-281 (1995).
- [18] Yu, C.S. and Li, H.L. "A robust optimization model for stochastic logistic problems", *International Journal of Production Economics*, 64(1-3), pp. 385-397 (2000).
- [19] Chankong, V. and Haimes, Y.Y. "Multiobjective Decision Making: Theory and Methodology", North-Holland, New York, 1983.
- [20] Cohon, J.L. "Multiobjective Programming and Planning", Academic Press, New York, 1978.
- [21] Mavrotas, G. "Effective implementation of the e-constraint method in Multi Objective Mathematical Programming problems", *Applied Mathematics and Computation*, 213, pp. 455-465 (2009).
- [22] Aghaei, J. Amjady, N. and Shayanfar, H.A. "Multi-objective electricity market clearing considering dynamic security by lexicographic optimization and augmented epsilon constraint method", *Applied Soft Computing*, 11(4), pp. 3846-3858 (2012).
- [23] Babu, S. Nandurkar, K. N. and Thomas, A. "Development of virtual cellular manufacturing systems for SMEs" *Logistics Information Management*, 13(4), pp. 228-242 (2000).
- سطحی، چند محصولی، چند دوره‌ای تحت شرایط عدم قطعیت ارائه شده است. با وجود سناریوهای اقتصادی مختلف با احتمالات تعیین شده در شرایطی که اطلاعات با عدم قطعیت مواجه‌اند، آرایش سلولی و برنامه‌ریزی‌های استوار به راحتی قابل دستیابی می‌باشند. جهت حل مدل دو هدف پیشنهاد، از روش محدودیت اسپیلن تعمیم‌یافته بهره گرفته شده است. یک مطالعه موردی صنعتی جهت اعتبارسنجی مدل پیشنهادی صورت پذیرفته است. مدل پیشنهادی، نگرشی مناسب برای تصمیم‌گیرنده فراهم می‌کند که به او جهت درک بهتر شرایط و تصمیم در اتخاذ برنامه‌ریزی مناسب کمک می‌کند. جهت انجام تحقیقات آتی می‌توان مواردی همچون: در نظر گرفتن توالی عملیات در تعیین آرایش سلولی و در نظر گرفتن نقش کارگران و آموزش آنان اشاره نمود.
- ### مراجع
- [1] Paydar, M.M. and Saidi-Mehrabad, M. "A hybrid genetic-variable neighborhood search algorithm for the cell formation problem based on grouping efficacy", *Computers & Operations Research*, 40(4), pp. 980-990 (2013).
- [2] Rheault, M. Drolet, J. and Abdounour, G. "Physically reconfigurable virtual cells: A dynamic model for a highly dynamic environment", *Computers & Industrial Engineering*, 29 (1-4), pp. 221-225 (1995).
- [3] Pillai, V. M and Subbarao, K. "A robust cellular manufacturing system design for dynamic part population using a genetic algorithm", *International Journal of Production Research*, 46 (18), pp. 5191- 5210 (2008).
- [4] Mahdavi, I. Aalaei, A. Paydar, M.M. and Solimanpur, M. "Multi-objective cell formation and production planning in dynamic virtual cellular manufacturing systems", *International Journal of Production Research*, 49(21), pp. 6517- 6537 (2011).
- [5] 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 (5-6), pp. 507-520 (2003).
- [6] aydar, M.M., Saidi-Mehrabad, M., Teimoury, E., (2013), "Robust optimisation model for generalised cell formation problem considering machine layout and supplier selection", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, DOI:10.1080/0951192X.2013.834476.
- [7] Schaller, J. "Incorporating cellular manufacturing into supply chain design", *International Journal of Production Research*, 46(17), pp. 4925-4945 (2008).
- [8] Saxena, L.K. and Jain, P. K. "An integrated model of dynamic cellular manufacturing and supply chain system design", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 62 (1-4), pp. 385-404 (2012).
- [9] Eski, O. and Ozkarahan, I. "Design of Manufacturing Cells for Uncertain Production Requirements with Presence of Routing Flexibility", *ICIC 2007, LNAI 4682*, pp. 670-681 (2007).
- [10] Tavakkoli-Moghaddam, R. Javadian, N. Javadi, B. and Safaei, N. " Design of a facility layout problem in cellular manufacturing systems with stochastic demands", *Applied Mathematics and Computation*, 184(2), pp. 721-728 (2007).



Designing a robust bi-objective mathematical model for integrated supply chain planning and dynamic virtual cell formation

M. M. Paydar¹, M. Saidi-Mehrabad^{2,*}

1. Department of Industrial Engineering, Babol University of Technology, Babol, Iran

2. Department of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received 15 August 2013

Accepted 17 June 2014

Keywords:

Virtual cell formation
Supply chain
Robust optimization
 ϵ -constraint.

ABSTRACT

Cell formation, as one of the most important decision problems in designing a cellular manufacturing system, consists of grouping parts into part families and machines into cells. In a dynamic environment, the part demand/mix change is considered over a planning horizon divided into periods. Hence, the formation of cells for one period may no longer be effective for other periods and therefore, reconfiguration of cells is essential. Due to the variation of demand and the need for cells reconfiguration, virtual cell formation concept is introduced by researchers to take the advantage of cell formation without incurring reconfiguration charges. On the other hand, Simultaneous consideration of supply chain issues and cell formation results in lower distribution and procurement costs and faster response to customers. In traditional manufacturing systems, first, the supply chain is designed, the number of production facilities is determined and the facilities are assigned to support each market for each product; then, the organization of the processes (product line, process or cell formation) within factory is decided. In this paper, a new bi-objective robust optimization mathematical model is developed for integrating procurement, production and distribution planning considering various conflicting objectives simultaneously as well as the uncertainty of some critical parameters such as customer demands. The augmented ϵ -constraint method is utilized to solve the proposed mathematical model and to find a preferred compromise solution. Moreover, a real world industrial case is provided to justify the applicability of the proposed model.

* Corresponding author. Mohammad Saidi-Mehrabad
Tel.: 021-73225025; E-mail addresses: mehrabad@iust.ac.ir