نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید

نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید

ISSN: 2345-2269

سال سوم شماره ششم پاییز و زمستان ۱۳۹۴، صفحه ۱۳۳-۱۴۷

www.ier.basu.ac.ir

زمانبندی چندهدفه شبکه‌های تولید چندکارخانه‌ای با استفاده از الگوریتم ژنتیک زیرجمعیت و روش ارتجاعی

جواد بهنامیان[۱،*]

۱. استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۳۹۳/۱۱/۱۲

پذیرش ۱۳۹۴/۰۹/۱۵

کلمات کلیدی:

زمانبندی چند هدفه

تولید چند کارخانه‌ای

روش ارتجاعی

الگوریتم ژنتیک زیر جمعیت

خلاصه

روند جهانی‌سازی موجود سبب پیدایش رقابتی شدید برای کسب هر چه بیشتر منافع در بین تولیدکنندگان شده است. برای حفظ شرایط رقابت‌پذیری در چنین بازارهایی، کارخانه‌ها تصمیم به ایجاد شبکه تولیدی متشکل از چندین کارخانه می‌نمایند. پراکندگی اعضاء در نقاط مختلف جغرافیایی در ساختارهای توزیع‌شده سبب در دسترس بودن منابع ارزان‌تر، توانایی تولید بالاتر و مواجهه سریع‌تر با تغییرات و قدرت رقابتی بالاتر شده است. به این منظور در این مقاله زمانبندی چندکارخانه‌ای توزیع شده مورد مطالعه قرار گرفته است. علاوه‌بر این، با در نظر گرفتن امکان جابه‌جایی کارها در بین کارخانه‌ها سعی شده است شرایط سیستم مورد بررسی هر چه بیشتر به دنیای واقعی صنعت نزدیک گردد. بدلیل توجه کمتر به مسائل چندهدفه در زمانبندی توزیع شده، در این تحقیق پس از مدل کردن مسئله با دو تابع هدف مجموع زمان‌های دیرکرد و زودکرد کارها به‌عنوان تابع هدف اول و مجموع زمان‌های تکمیل به‌عنوان تابع هدف دوم، یک روش دقیق و یک الگوریتم فرابتکاری چندهدفه برای حل مساله به‌کار رفته است. در پایان نیز نتایج بدست آمده از این الگوریتم با نتایج به‌دست آمده از الگوریتم بر پایه گروه ذرات مقایسه و گزارش شده است.

۱- مقدمه

امروزه بازارها همواره در حال تغییر هستند. تکنولوژی‌های جدید همواره در حال ظهور بوده و رقبا به رقابت جهانی خود افزوده‌اند. برای افزایش رقابت‌پذیری و پاسخگویی به تغییرات بازار جهانی بسیاری از شرکت‌ها چارچوب تولیدی خود را با ایجاد کارخانه‌های جدید، ادغام‌سازی‌ها (ایجاد شبکه‌های مجازی) و مالکیت کارخانه‌های جدید از حالت سنتی تک‌کارخانه‌ای به حالت تولید شبکه‌ای تغییر داده‌اند. با روند پیچیده‌تر شدن مسائل واقعی، استفاده از رویکرد متمرکز کارایی کافی نداشته چرا که با روند جهانی‌سازی موجود، شرکت‌ها تلاش زیادی در جهت توسعه خود داشته تا بتوانند موقعیت خود را در شرایط رقابتی حفظ نمایند. دستیابی به ورودی‌ها با قیمت ارزان‌تر همچون مواد اولیه و نیروی انسانی، استفاده از منابع کاری و تکنولوژیکی محلی ارزان‌تر، نزدیکی به بازار جهت تمرکز بهتر بر مشتریان و داشتن عکس‌العمل‌های سریعتر و بهتر در مقابل تغییرات از دیگر انگیزه‌های اصلی تولیدگان در جهت توسعه کارخانه‌ها از طریق ایجاد شبکه‌های قدرتمندتر تولید است. از دیگر مزایای ایجاد شبکه‌های تولیدی آن است که اعضاء می‌توانند در مواقع نیاز به سرعت و به صورت کارا منابع تولیدی در دسترس خود را در جهت تولید هر چه بهتر کارها در سرتاسر شبکه به اشتراک گذارند [۱]. این محیط رقابتی کلی سبب شده است تا الگوهایی جدید در برنامه‌ریزی و مدیریت سیستم‌های تولیدی به‌وجود آید. قدرت رقابتی

* نویسنده مسئول. جواد بهنامیان

تلفن: ۰۸۱-۳۸۲۹۲۵۰۵؛ پست الکترونیکی: Behnamian@basu.ac.ir

حاصل از ساختار شبکه‌ای توزیع‌شده[1] توانایی در کنار هم قرار گرفتن اجزاء و ایجاد شبکه همزمان مشتری‌مدار را بالا برده است. یکی از تأثیرات مهم ایجاد چنین شبکه‌هایی در دسترس بودن منابع ارزان‌تر، توانایی تولید بالاتر و مواجه سریع‌تر با تغییرات موجود است. همچنین از دیگر فواید تولید چنین سیستم‌هایی، عدم توقف کل روند تولید در صورت خرابی یکی از عوامل است، چرا که در حالت تولید متمرکز در یک کارخانه وقوع توقف در تولید اجتناب‌ناپذیر بوده و ممکن است به بهای از دست رفتن کل سفارش تولید گردد. البته باید توجه داشته باشیم برخی تفاوت‌های اساسی بین تولید تک‌کارخانه‌ای و چندکارخانه‌ای وجود دارد [۲]. در حالت تک‌کارخانه‌ای محصولات با استفاده از یک کارخانه تولید شده و سپس به مکان‌های فروش تحویل می‌گردند که وظیفه توزیع یا خرده‌فروشی این محصولات را دارند. در حالت تولید شبکه‌ای این امکان وجود دارد که این تولیدکننده چندین کارخانه تولیدی موازی را که در نقاط مختلف جغرافیایی پراکنده شده‌اند به‌کار گیرد تا بتواند در هزینه و زمان‌های حمل و نقل صرفه‌جویی کرده و سطح سرویس بهتری از طریق قرار دادن کارخانه در نزدیکی مشتری برای مشتریان فراهم آورد.

در سال‌های اخیر سیستم‌های توزیع‌شده اهمیت روز افزونی یافته‌اند، به‌گونه‌ای‌که کاربرد آنها در دامنه گسترده‌ای از علوم (از صنعت چند رسانه‌ای گرفته تا کنترل تولید) مورد بررسی قرار گرفته و نیز تلاش‌های زیادی برای بهره‌گیری از آن در سایر حوزه‌ها بعمل آمده است. در مقوله تولید نیز مدیران صنعتی در سال‌های اخیر با توجه به تغییرات در محیط تولیدی به استفاده از سیستم‌های توزیع‌شده گرایش یافته‌اند. تولید در محیط توزیع‌شده در شبکه تولید چندکارخانه‌ای جزء جذاب‌ترین موضوعات چند سال اخیر است [۳]. زمانبندی کارا برای کارخانه‌ها جهت ماندن در میدان رقابت برای پاسخگویی به تغییرات بازار امری ضروری است و سبب شده است تا این موضوع از ابتدای قرن جاری در دو بخش صنعت و محیط آکادمیک به‌طور همزمان مورد توجه قرار گیرد.

به‌دلیل آنکه متغیرهای مجزا و اهداف متضاد به طور واقعی در ذات مسائل کاربردی هستند، بسیاری از مسائل در جهان واقعی مسائل بهینه‌سازی ترکیباتی چندهدفه می‌باشند [۴]. به این منظور در ادامه پس از مدل‌بندی مسئله زمانبندی شبکه‌های تولید چندکارخانه‌ای در قالب مدل چندهدفه، به‌دلیل وجود معایب در روش‌های حل مسئله چندهدفه، روش ترکیبی جدیدی برای حل مسئله پیشنهاد شده است. همچنین با توجه به شدت سختی مسئله، برای حل نمودهای با ابعاد بزرگ‌تر نیز روش جدیدی بر پایه روش‌های فراابتکاری پیشنهاد شده است.

بخش دوم به مرور ادبیات پرداخته و بخش سوم به بیان مسئله، مدل ریاضی و پیچیدگی مسئله اختصاص خواهد یافت. در بخش چهارم روش چندهدفه جدیدی مورد بررسی قرار گرفته و در بخش پنجم نیز الگوریتم پیشنهادی ارائه می‌شود. نتایج عددی در بخش ششم گزارش شده و در نهایت در بخش آخر پس از ارائه جمع‌بندی، زمینه‌ای برای مطالعه آتی پیشنهاد می‌گردد.

1 Distributed network

۲- مرور ادبیات

در حل مسائل زمانبندی، روش‌های مختلفی بر اساس برنامه‌ریزی ریاضی پیشنهاد شده است که از این میان می‌توان به تحقیق انجام شده توسط ویلیامز[2] [۵] در سال ۱۹۸۱ اشاره نمود که می‌توان اظهار نمود اولین تحقیق انجام شده در موضوع زمانبندی توزیع‌شده چندکارخانه‌ای است. در این تحقیق ویلیامز [۵] زمانبندی مشترک[3] را در مسئله تولید و توزیع در شبکه‌های پیچیده در نظر گرفت. او به این منظور روشی بر اساس برنامه‌ریزی پویا پیشنهاد نمود و برای بررسی کارایی، آن را با روش‌های ابتکاری موجود در محیط تولیدی متمرکز مقایسه نمود. در این تحقیق تابع هدف، حداقل کردن هزینه‌های تولید و توزیع در هر دوره زمانی بود. یکی از ضعف‌های تحقیق آن است که نویسنده فرض کرده که نرخ تقاضا ثابت است که این فرض از کاربردی بودن آن کاسته است. در همین زمینه بلومنفلد[4] و همکاران [۶] زمانبندی در سیستم‌های تولیدی و توزیع‌شده را در نظر گرفتند. در این مطالعه فرض شده است که هزینه‌های ارسال هر محموله ثابت بوده و به ازای هر نوع محصول یک مقصد به‌عنوان کارخانه مونتاژ نهایی وجود دارد.

سامباسیوان و یحیی[5] [۷] روشی بر پایه لاگرانژ جهت برنامه‌ریزی تولید چندکارخانه‌ای پیشنهاد دادند که در آن چهار کارخانه بزرگ تولیدکننده فولاد که در نقاط مختلف ایالات متحده با یکدیگر شبکه تولیدی را تشکیل داده بودند. در این شبکه هر محصول می‌توانست به‌صورت مستقیم از طریق هر کارخانه به مشتری موردنظر تحویل داده شود. بنابراین مشتریان تنها ناگزیر به پرداخت هزینه حمل از نزدیک‌ترین کارخانه به محل خود را داشتند. همچنین در صورت نیاز هر کارخانه می‌توانست مجموعه‌ای از محصولات را از سایر کارخانه‌ها خریداری نموده، به‌عنوان موجودی ذخیره کرده و آن را به مشتری خود تحویل دهد. بنابراین مسئله مطرح، نحوه تأمین مشتریان توسط هر کارخانه و همچنین چگونگی تأمین نیاز از سایر کارخانه‌ها در صورت نیاز بود به‌گونه‌ای‌که هزینه کلی سیستم حداقل گردد. البته در این مسئله تنها مسئله تخصیص کار مطرح بوده بدون آنکه به زمانبندی داخل کارخانه‌ها پرداخته شود.

پیرکول و جایارامان[6] [۸] مشارکت بین تولیدی‌های پروکتر[7]، گمبل[8] و وال- مارت[9] را به‌عنوان مثالی از تولید چندکارخانه‌ای مورد

2 Williams
3 Joint scheduling
4Blumenfeld
5Sambasivan and Yahya
6 Pirkul and Jayaraman
7 Procter
8 Gamble
9 Wal-Mart

بررسی قرار دادند. این سه شرکت بایستی به‌صورت کارا مدیریت جریان محصولات را در بین یکدیگر را به‌عهده گرفته و نحوهٔ همکاری نزدیک‌تر بین تولید و توزیع را مورد بررسی قرار می‌دادند. مسئله مطرح، نحوه ایجاد هماهنگی بین کارخانه‌های تولیدی جهت تأمین مشتریانی بود که تنوع درخواست در محصول با مقادیر خاص را داشتند.

کیم[1] و همکاران [۹] مدل یکپارچه‌ای از شبکه تأمین و برنامه‌ریزی تولید برای ایجاد همکاری بین پالایشگاه‌های چندگانه تولیدکننده سوخت که در نقاط مختلف واقع شده بودند، را پیشنهاد نمودند. در این مطالعه نتایج حاصل از شبیه‌سازی و مدل‌های بهینه‌سازی مشخص نمود که برنامه‌ریزی تولید کارخانه‌های محلی بایستی به‌عنوان جزء لاینفک برنامه‌ریزی شبکه تولیدی در نظر گرفته شود. ژانگ[2] و همکاران [۱۰] روشی به نام ماکسیت[3] برای مسئله بهینه‌سازی چندکارخانه‌ای در صنعت نیمه‌رسانا ارائه نمودند که برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط را به‌کار می‌گیرد. نویسندگان این مقاله توابع هدف را بر اساس شرایط تجاری تعریف نموده و پارامترها، متغیرهای تصمیم، محدودیت‌ها و توابع هدف را در نرم-افزارهای حل مدل‌های برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح وارد نموده تا جواب بهینه‌ای را ارائه کند که بیشترین تأمین تقاضا با حداقل منابع تأمین مصرفی داشته باشد. وینسنت و استفان[4] [۱۱] برای ایجاد هماهنگی بین کارخانه‌های توزیع‌شده، روشی به نام "شبه عوامل زنبور[5]" پیشنهاد نمودند. روش پیشنهادی آنها شامل الگوریتمی جهت تعیین چگونگی تخصیص کار به کارخانه بوده که وظیفه رد یا قبول تخصیص کار جدید به یک ماشین در کارخانه انتخاب شده اولیه را دارد. این نویسندگان برای سنجش عملکرد الگوریتم پیشنهادی خود از نمونه‌های واقعی استفاده نمودند که در آن نحوه تخصیص چندین کامیون به چندین کارگاه مستقل رنگرزی بررسی شده است. مصداق‌های دیگری از الگوریتم‌های ابتکاری در ادبیات می‌توان یافت که از این میان می‌توان به تحقیق صورت گرفته توسط بارُسو[6] و همکارانش [۱۲] اشاره کرد که در آن روشی کاملاً ابتکاری برای مسئله تخصیص کار به کارخانه مناسب در محیط تولید توزیع‌شده پیشنهاد شده است. بهدانی[7] و همکاران [۱۳] سازمان چندکارخانه‌ای را در صنایع شیمیایی به عنوان یک شرکت پیچیده از تولیدکنندگان توزیع‌شده در نقاط مختلف جغرافیایی که وظیفه تولید و توزیع محصولات خاص را بر عهده دارند، در نظر گرفته‌اند. با در نظر گرفتن برخی شرایط غیرعادی و واقعی‌کننده مسئله، محققین نشان دادند که چگونه مدل‌های بر پایه عوامل[8] می‌توانند رفتار پویای موجود در شبکه چندعاملی را منعکس کنند. به این منظور آنها در این گونه مدل‌ها مکانیزم‌های مختلفی را مقایسه نمودند تا رفتار مدل پیشنهادی را در برابر شرایط پویا در دو حالت متمرکز و توزیع‌شده مورد مطالعه قرار دهند. به تازگی بهنامیان و فاطمی قمی [۱۴] مسئله زمانبندی تولید چندکارخانه‌ای را در نظر گرفتند. برای حل مسئله شبکه تولیدی با چندین کارخانه توزیع‌شده که با هدف تأمین نیاز بازار آن‌جا ایجاد شده‌اند، محققین روش فراابتکاری بر پایه ترکیبی بر پایه بهینه سازی گروه ذرات ارائه نمودند.

نادری و رویز [۱۵] به ارائه الگوریتمی جهت حل مسئله زمانبندی جایگشت توزیع شده جریان کارگاهی پرداختند. در الگوریتم پیشنهادی بعضی تکنیک‌های پیشرفته مانند جستجوی پراکنده همراه با روش راه‌اندازی مجدد و جستجوی محلی نیز بکار رفته است. سان و همکاران [۱۶] یک مسئله کاربردی در محیط زمانبندی چند کارخانه را انجام دادند که در آن حمل نقل داخلی و دریایی نیز در نظر گرفته شده است. به‌منظور حل این مسئله آنها یک روش ابتکاری بر پایه برش موعد تحویل ارائه دادند تا بوسیله آن کارایی الگوریتم‌های دقیق و ژنتیک پیشنهادی خود را بهبود دهند. آنها همچنین برای واقعی‌تر شدن مسئله مورد بررسی خود، کنترل فازی را نیز به الگوریتم ژنتیک خود اضافه کردند.

با توجه به مرور ادبیات انجام شده و نیز مقاله بهنامیان و فاطمی قمی [۱۷] می‌توان به این نتیجه رسید که در زمانبندی توزیع‌شده، شکاف محسوسی در رابطه با زمانبندی چندهدفه در ادبیات وجود دارد به‌گونه‌ای‌که در کل ادبیات، تنها یک مطالعه، آن هم در محیط کارکارگاهی به این موضوع پرداخته است. از این رو، با در نظر گرفتن همزمان اهداف حداقل کردن مجموع زمان‌های تکمیل و مجموع زودکرد و دیرکرد کارها قصد داریم توان عملیاتی ماشین‌آلات را حداکثر و خلاءهای موجود در این زمینه را مرتفع سازیم.

۳- بیان مسئله، مدل ریاضی و پیچیدگی مسئله

مدل‌های تولید چندکارخانه‌ای می‌توانند به‌صورت موازی یا سری ساختاربندی شوند [۱۸]. در این مقاله مدل‌های موازی تولید توزیع‌شده مورد بررسی قرار گرفته است. با وجود واقعی‌تر بودن زمانبندی توزیع‌شده در مقایسه با حالت تک‌کارخانه‌ای به دلیل پیچیدگی موجود در مسئله توزیع‌شده، اکثر تحقیقات بر زمانبندی تک‌کارخانه متمرکز شده‌اند. دلیل این پیچیدگی در آن است که نه تنها تصمیمات مرتبط با زمانبندی کلاسیک (زمانبندی تک کارخانه‌ای) مطرح است، بلکه بایستی تصمیماتی مرتبط با نحوه تخصیص کارها به کارخانه مناسب نیز لحاظ گردد [۱۹]. با توجه به این توضیحات می‌توان نتیجه گرفت که کنترل چنین شبکه‌هایی بسیار دشوارتر از سیستم‌های کلاسیک است، ولی باید توجه داشت که در شرایط بازار رقابتی کنونی حرکت به سمت سیستم‌های توزیع‌شده با وجود پیچیدگی‌های موجود در آن ناگزیر است.

1 Kim
2 Zhang
3 MaxIt
4Vincent and Stephen
5 Wasp-like agents
6 Barroso
7 Behdani
8 Agent

۳-۱- بیان مسئله

فرضیات اصلی مسئله زمانبندی توزیع‌شده مورد بررسی در این مقاله به شرح زیر است:

۱. مسئله F کارخانه ناهمسان موازی با ماشین‌های موازی دارد.
۲. n کار باید زمانبندی شوند که از یکدیگر مستقل‌اند و نسبت به یکدیگر اولویت خاصی ندارند.
۳. تمام کارها و ماشین‌آلات به‌طور همزمان در ابتدای دوره برنامه‌ریزی در دسترس‌اند.
۴. زمان انجام هر کار مستقل از ترتیبی است که کارها تحت پردازش قرار می‌گیرند.
۵. بریدگی و تقسیم یک کار خاص مجاز نیست، به عبارت دیگر وقتی کاری روی یک ماشین در حال انجام است، تا زمان تکمیل، از روی ماشین برداشته نمی‌شود.
۶. هرگز ماشین‌آلات خراب نمی‌شوند.
۷. زمان‌های حمل و نقل درون کارخانه‌ای ناچیز بوده و یا در زمان انجام کار لحاظ شده‌اند.
۸. زمان‌های آماده‌سازی ناچیز و قابل چشم‌پوشی هستند.
۹. هر کار باید دقیقاً به یکی از کارخانه‌های تولیدی اختصاص یابد و هر کاری که برای پردازش به کارخانه دیگری ارسال می‌شود، بایستی بعد از پردازش به کارخانه مبداء جهت تحویل به مشتری بازگردانده شود.

در شبکه‌های توزیع‌شده، کارخانه‌ها در نقاط مختلف جغرافیایی پراکنده شده‌اند تا بتوانند با نزدیکی به بازارهای هدف، شراط رقابتی خود را بهبود داده و انعطاف‌پذیری خود را ارتقاء دهند. همچنین با توجه به مطالب اظهار شده می‌توان نتیجه گرفت که بهینه‌سازی تابع هدف در زمانبندی توزیع‌شده دو وجه دارد که منجر به شکل‌گیری مقدار نهایی تابع هدف مسئله می‌گردد. برای مثال در ساده‌ترین شکل سیستم‌های توزیع‌شده تولیدی که سیستم توزیع‌شده همسان است، برای حداقل کردن تابع هدفی واحد در بین تمام کارخانه‌ها باید دو بخش زیر را در بهینه‌سازی بصورت همزمان در نظر گرفت:

۱. بهینه‌سازی تابع هدف موردنظر به صورت محلی در تک‌کارخانه که در حقیقت متناظر با حل یک مسئله زمانبندی کلاسیک برای یک کارخانه واحد است که بسته به محیط کارخانه تعیین می‌شود.
۲. بهینه‌سازی تابع هدف کلی سیستم که مربوط به مجموعه کامل کارخانه‌هاست و به‌دنبال بهینه کردن معیار مورد نظر برای همه کارخانه‌ها است.

با فرض اینکه هر کارخانه مسئول تولید محصولات در ناحیه خود است، برای توازن هر چه بهتر کل سفارشات دریافتی در شبکه، این امکان وجود دارد که کارها با هدف بهبود تابع هدف کلی شبکه در کارخانه‌ای به جز کارخانه منطقه خود پردازش شوند. این مهم تنها با در نظر گرفتن امکان جابه‌جایی کارها از ماشین با تراکم بارگذاری بالا به کارخانه‌ای که ماشینی در آن بیکار است، تحقق می‌یابد. بنابراین در نظر گرفتن زمان‌های حمل و نقل بین کارخانه‌ای، سبب واقعی‌تر شدن مسئله شده و آن را کاربردی‌تر از حالتی می‌کند که چنین فرضی در آن در نظر گرفته نشده است. با توجه به توزیع کارخانه‌ها و نیاز به هماهنگی بین زمانبندی آنها، در مدلسازی مسئله زمانبندی مورد بررسی، لازم است فرضیات زیر را در نظر بگیریم:

- همواره تعداد نامحدودی وسیله حمل و نقل برای جابجایی کارها در بین کارخانه‌ها وجود دارد.
- هماهنگی و ارتباط بین اجزاء شبکه به منظور اطلاع از وضعیت بارگذاری‌ها امری ضروری است.

در این مسئله و به‌منظور واقعی‌تر شدن شرایط مسئله، با به‌کارگیری پیاده‌سازی فلسفه تولید بهنگام به‌دنبال آن هستیم که هر کالا درست در زمانی که مشتری به آن نیاز دارد به او تحویل داده شود. عدم تأخیر سبب بالا رفتن رضایت مشتری از تحویل به موقع و در نتیجه بالا رفتن توان رقابتی سازمان شده و از طرفی با کم کردن زودکردهای تولید از هزینه‌هایی همچون هزینه انبارداری کالای ساخته شده جلوگیری خواهد شد [۲۰].

۳-۲- مدل ریاضی

در این بخش، مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای فرموله کردن زمانبندی توزیع‌شده تولید برای کارخانه‌های ناهمسان در حالت تک هدفه یکسان برای همه کارخانه‌ها ارائه می‌شود. قبل از ارائه مدل پیشنهادی پارامترها و اندیس‌های زیر معرفی می‌شود. لازم به ذکر است که متغیرهای تصمیم معرفی شده برای هر مدل باید سه تصمیم موجود در هر مسئله زمانبندی توزیع‌شده تولید را در بر گیرند. این سه تصمیم شامل تعیین نحوه تخصیص کارها به کارخانه‌ها، تعیین نحوه تخصیص کارهای تخصیص داده شده به هر کارخانه بر روی ماشینهای آن و در نهایت تعیین توالی کارها برای هر ماشین است. سعی شده است که تعداد متغیرهای صفر و یک را به طور چشمگیری کاهش دهیم. در این مدل متغیرهای صفر و یک x را برای تعیین توالی ماشین‌ها برای کار و متغیرهای صفر و یک y را برای مشخص کردن تخصیص کار به کارخانه‌ها تعریف می‌کنیم.

متغیرهای تصمیم این مدل به‌صورت زیر هستند:

x_{ij}^{f} متغیر صفر و یک که وقتی کار j ام بلافاصله بعد از کار iام در کارخانه f باشد، عدد ۱ و در غیر این صورت عدد ۰ را می‌پذیرد.

y_{i}^{f} متغیر صفر و یک که وقتی کار i ام به کارخانه f تخصیص داده شود، عدد ۱ و در غیر این صورت عدد ۰ را می‌پذیرد.

C_{i}^{f} متغیر پیوسته برای تعیین زمان تکمیل پردازش کار i ام در کارخانه f

C_{max} متغیر پیوسته زمان تکمیل آخرین کار

E_i متغیر پیوسته زمان زودکرد کار iام

T_i متغیر پیوسته زمان دیرکرد کار iام

پارامترها و شمارنده‌های استفاده شده به قرار زیر هستند:

n تعداد کارها

F تعداد کارخانه‌ها

M مجموع تعداد کل ماشین‌ها در تمام کارخانه‌ها

i,j,k شمارنده کارها $\{1, 2, \dots, n\}$

f شمارنده کارخانه‌ها $\{1, 2, \dots, F\}$

h شمارنده ماشین‌ها در کارخانه‌ها $\{1, 2, \dots, m^f\}$

m^f تعداد ماشین در کارخانهf

v^f سرعت ماشین‌های کارخانه f

p_i زمان استاندارد پردازش کار iام

p_i^f زمان پردازش کار iام در کارخانه f

L عدد مثبت بزرگ

p_i^{fq} زمان پردازش کار i ام در کارخانه q اگر به کارخانه f سفارش شده باشد

t^{fq} زمان جابجایی کار از کارخانه f به کارخانه q ام

w_i^f اگر کار i ام به کارخانه f سفارش شده باشد یک و در غیر اینصورت صفر است.

در این مدل، نیاز به تعریف کارهای مجازی صفر و $n+1$ است که زمان پردازش آنها صفر می‌باشد. برای هر ماشین دو کار مجازی 0 و $n+1$ تعریف می‌شود که به ترتیب اولین و آخرین کاری خواهد بود که بر روی آن ماشین پردازش می‌شود. از این‌رو نیاز است که شماره‌های کار نیز به همین ترتیب از صفر شروع و تا کار $n+1$ ادامه داشته باشند. در نهایت مدل به‌صورت زیر یک مسئله زمانبندی توزیع‌شده تولید را فرموله می‌کند:

$$\text{Min } Z=\left(\sum_{f=1}^{F}\sum_{i=1}^{n}C_i^f, \sum_{i=1}^{n}E_i+T_i\right) \quad (۱)$$

$$s.t. \quad \sum_{f=1}^{F} y_i^f = 1, \quad i=1,2,\dots,n, \quad (۲)$$

$$\sum_{\substack{i=0,\\ i\neq j}}^{n}\sum_{f=1}^{F} x_{ij}^f = 1, \quad j=1,2,\dots,n, \quad (۳)$$

$$\sum_{j=1}^{n} x_{0j}^f = m^f, \quad f=1,2,\dots,F, \quad (۴)$$

$$\sum_{f=1}^{F} x_{0j}^f \le 1, \quad j=1,2,\dots,n, \quad (۵)$$

$$\sum_{\substack{i=0,\\ i\neq j}}^{n} x_{ij}^f + \sum_{\substack{k=1,\\ k\neq j}}^{n+1} x_{jk}^f = 2.y_j^f, \quad j=1,2,\dots,n,\ f=1,2,\dots,F, \quad (۶)$$

$$\sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{n}\sum_{f=1}^{F} x_{ij}^f \le 1, \quad i=1,2,\dots,n, \quad (۷)$$

$$\sum_{f=1}^{F}(x_{ij}^f + x_{ji}^f) \le 1, \quad i=1,2,\dots,n-1, \quad j>i, \quad (۸)$$

$$p_i^{fq} = w_i^f\left(\left(\frac{p_i}{v^q}\right)+2t^{fq}\right), \quad i=1,2,\dots,n, \quad f,q=1,2,\dots,F, \quad (۹)$$

$$C_j^f - C_i^f \ge p_j^f - L(1-x_{ij}^f), \quad i,j=0,1,\dots,n, \quad i\neq j, \ f=1,2,\dots,F, \quad (۱۰)$$

$$C_i^f + E_i - T_i = d_i, \quad i=1,2,\dots,n, \ f=1,2,\dots,F \quad (۱۱)$$

$$E_i \ge d_i - C_i^f, \quad i=1,2,\dots,n, \ f=1,2,\dots,F \quad (۱۲)$$

$$T_i \ge C_i^f - d_i, \quad i=1,2,\dots,n, \ f=1,2,\dots,F, \quad (۱۳)$$

$$E_i \ge 0, \quad i=1,2,\dots,n, \quad (۱۴)$$

$$T_i \ge 0, \quad i=1,2,\dots,n. \quad (۱۵)$$

$$x_{ij}^f, y_i^f \in \{0,1\}, \quad i,j=0,1,\dots,n+1, \ i\neq j, \ f=1,\dots,F, \quad (۱۶)$$

$$C_i^f \ge 0, \quad i=1,\dots,n, \quad f=1,\dots,F. \quad (۱۷)$$

عبارت (۱) نشان‌دهنده مجموع زمان تکمیل کل کارها و مجموع زودکرد و دیرکردها است که بایستی حداقل گردند. مجموعه محدودیت‌های (۲) مشخص می‌کند که هر کار بایستی تنها به یک کارخانه تخصیص داده شود. مجموعه محدودیت‌های (۳) اشاره دارد که هر کار در هر کارخانه تنها روی یک ماشین پردازش می‌شود. مجموعه محدودیت‌های (۴) مشخص می‌کند که دقیقاً هر ماشین در هر کارخانه برای شروع به یک کار مجازی صفر نیاز داشته در حالی که مجموعه محدودیت‌های (۵) مشخص می‌کند که بعد از کار مجازی صفر حداکثر یک کار می‌تواند تخصیص یابد. مجموعه محدودیت‌های (۶) اشاره دارد که اگر کار غیرمجازی به کارخانه‌ای خاص اختصاص یابد، دقیقاً یک کار قبلی و یک کار بعدی در همان کارخانه خواهد داشت. مجموعه محدودیت‌های (۷) اشاره دارد که هر کار روی هر ماشین می‌تواند حداکثر یک کار به‌عنوان کار بعدی داشته باشد. مجموعه محدودیت (۸) از ایجاد جواب‌های غیرموجه بدین نحو که یک کار همزمان کار بعدی و قبلی کار دیگری باشد جلوگیری می‌کند. رابطه (۹) مقدار زمان پردازش هر کار را وقتی به کارخانه‌ای خاص تخصیص داده شود با توجه به زمان‌های جابجایی محاسبه می‌کند. مجموعه محدودیت‌های (۱۰) ارتباط زمان تکمیل کارهای i و j است که که بلافاصله بعد از هم روی یک ماشین پردازش می‌شوند، درحالی‌که مجموعه محدودیت (۱۱) رابطه بین زمان تکمیل، سررسید، زودکرد و دیرکرد هر کار را نشان می‌دهد.

محدودیت‌های (۱۲) و (۱۳) به‌ترتیب زودکردها و دیرکردهای کارها را محاسبه می‌کند. روابط (۱۴) و (۱۵) وضعیت دیرکردها و زودکردها را نشان می‌دهند. متغیرهای مدل نیز توسط دو مجموعه محدودیت (۱۶) و (۱۷) تعریف می‌شوند.

۳-۳- پیچیدگی مسئله

مسأله ماشین‌های موازی جز مسائل سخت است [۲۱]. حال اگر در یک مسئله زمانبندی توزیع‌شده با ماشین‌های موازی فرض شود که تعداد کارخانه‌ها برابر ۱ است، مسئله تبدیل به مسئله زمانبندی کلاسیک خواهد شد.

قضیه ۱: مسئله زمانبندی چندکارخانه‌ای شامل تابع هدف حداکثر زمان تکمیل کلیه کارها یک مسئله سخت است.

اثبات. مسئله مورد بررسی در این مطالعه حداقل سختی مسئله تک‌کارخانه‌ای را دارد زیرا اگر در یک مسئله زمانبندی توزیع‌شده با ماشین‌های موازی فرض شود که در شکل ساده شده آن تنها یک کارخانه در شبکه تولید وجود دارد، مسئله تبدیل به مسئله زمانبندی کلاسیک خواهد شد. این مسئله در حالت ساده *NP-Complete* است [۲۱]. در نتیجه در مسئله تولید چند کارخانه‌ای که در آن تعداد کارها به اندازه کافی بزرگتر از تعداد کارخانه‌ها است، در نتیجه F زیر مسئله سخت وجود خواهد داشت.

سخت بودن یک مسئله به این مفهوم است که یافتن جواب بهینه آنها بدون استفاده از الگوریتم‌های شمارش کامل غیرممکن بوده و زمان محاسباتی آن نیز با افزایش ابعاد مسئله به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد. تعیین جواب بهینه با استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی خطی کارایی کافی نداشته و به‌خصوص برای مسائل نمونه با ابعاد بزرگ عملی نمی‌باشد. در چنین شرایطی روشهای ابتکاری خوب می‌توانند جواب‌های خوبی را (البته نه لزوماً بهینه) در زمانی معقول ارائه نمایند.

۴- بهینه‌سازی چندهدفه

در اینجا ابتدا برخی از روش‌ها کلاسیک به اختصار توصیف شده، سپس با تحلیل ایرادات موجود در هر یک، روشی نوین که ترکیبی از این روش‌ها است توصیف خواهد شد.

۴-۱- روش وزنی

این روش اولین بار توسط زاده [۲۲] پیشنهاد شد که به نوعی جزء مهمترین روش بهینه‌سازی چندهدفه به‌شمار می‌آید. اگر به هر تابع هدف i وزن نامنفی w_i به‌عنوان درجه اهمیت آن داده شود به طوریکه در مسئله k هدفه Σw_i مساوی ۱ شود، آنگاه اهداف به‌صورت جمع وزنی مدلبندی می‌شوند. با استفاده از این روش تنها یک جواب برای مسئله چندهدفه به دست می‌آید.

۴-۲- روش ε- محدودیت

در این روش به جز یک تابع هدف، مابقی اهداف در حالت حداقل‌سازی با یک حد بالا در محدودیت قرار خواهد گرفت [۲۳]. مشکل اصلی در اینجا انتخاب تابع هدفی است که بایستی در غالب محدودیت بیان شده و نیز تعیین این حد بالا است.

همچنان که ملاحظه کردید، هر یک از این روش‌ها دارای نقاط قوت و ضعفی است، به همین دلیل ما استفاده از روش ترکیبی جدیدی برای حل مسئله زمانبندی توزیع شده چندهدفه، را پیشنهاد نموده‌ایم.

۴-۳- الگوریتم دقیق چندهدفه: روشی ترکیبی

مهمترین ویژگی روش وزنی در آن است که نیاز به تلاش محاسباتی زیادی ندارد و همچون مسائل تک هدفه قابل حل است. البته معایبی نیز در این روش وجود دارد. برای مثال می‌توان به زمانبر بودن الگوریتم شمارش همه جواب‌های پارتو اشاره کرد که در آن تعداد زیادی w به‌صورت سیستماتیک تغییر می‌کنند و با این حال در برخی شرایط نیز بسته به شکل لایه پارتو امکان تولید تمام جواب‌های پارتو تنها با تغییر در w ها، ناشدنی است. علاوه بر این، روش وزنی قادر به یافتن جواب‌های پارتو در شرایطی که لایه پارتو غیر محدب است، نمی‌باشد. در روش دوم یعنی ε-محدودیت نیز با وجود آنکه می‌توان با تغییر حدود بالای محدودیت تابع هدفی، تمام جواب‌های پارتو را به دست آورد اما معمولاً تعیین همین حدود بالا نیز خود یک مسئله *NP-Hard* است. همچنین این روش شدیداً به اطلاعات قبلی نسبت به مسئله نیاز داشته و معمولاً برای تعداد زیادی تابع هدف مناسب نیست. این معایب سبب شد تا برای مسئله مورد بررسی در این تحقیق استفاده از روش ترکیبی جدیدی به شرح زیر پیشنهاد شود.

۴-۵- روش دقیق چندهدفه ارتجاعی

این روش، مسئله را با فضای شدنی اولیه S و دو تابع هدف f_a و f_b به صورت زیر مدلبندی می‌نماید.

$$\begin{aligned} \min \quad & w_a\, f_a(x) + w_b s_b \\ \text{s.t.} \quad & X \in S \\ & f_b(x) + l_b - s_b = \varepsilon_b \\ & w_a + w_b = 1 \\ & 0 < w_a,\ w_b < 1 \\ & l_b \geq 0,\ s_b \geq 0,\ \varepsilon > 0 \end{aligned} \qquad (۱۹)$$

که در آن s و l به‌ترتیب متغیرهای مازاد و کمبود هستند و w ضریب جریمه و ε سمت راست محدودیت تابع هدفی به عنوان حد بالای آن است. در این روش انتخاب مناسب s و l سبب تبدیل نامساوی محدودیت تابع هدفی به حالت تساوی شده و مقدارگیری s_b

به‌دلیل نامحدود بودن افزایش آن با ضریب جریمه نامنفی w_b به تابع هدف اضافه می‌شود. خصوصیات مهم این روش به شرح زیر است.

قضیه ۲. اگر وزن‌ها مثبت و (x^*, l^*, s^*) جواب بهینه (۱۹) باشد، آنگاه x^* جواب پارتو بهینه ضعیف برای مسئله MOP است.

اثبات. اگر فرض کنیم وزن‌ها مثبت است، خواهیم داشت $s_k^* = max\{0, f_b(x^*) - \varepsilon_b\}$. فرض کنید تعدادی x' با شرط $x' \in S$ وجود داشته باشد بطوریکه $f(x') < f(x^*)$ برقرار باشد. حال اگر $l'_b := max\{0, \varepsilon_b - f_b(x')\}$ و $s'_b := max\{0, f_b(x') - \varepsilon_b\}$ برقرار باشد، آنگاه (x', l', s') برای (۱۹) یک جواب شدنی بوده و تابع هدفی بهتر از (x^*,l^*,s^*) خواهیم داشت که این نتیجه ناقض بهینگی (x^*,l^*,s^*) است. بنابراین قضیه اثبات می‌شود.

قضیه ۳. اگر وزن‌ها مثبت و (x^*, l^*, s^*) جواب بهینه (۱۹) باشد، یکتایی x^* در تمام جواب‌های بهینه و $s^*>0$، دو شرط کافی است برای آنکه x^* جوابی مؤثر باشد.

اثبات. اگر فرض کنیم $s^*>0$ بوده و $x' \in S$ وجود داشته باشد به‌طوری‌که $f(x') < f(x^*)$، آنگاه قضیه ۲ دلیلی است بر آنکه x^* جواب پارتو ضعیف بوده و همین امر وجود شرط اول را اثبات می‌کند. همچنین برقراری همزمان دو شرط $s^* > 0$ و مثبت بودن وزن‌ها بر این موضوع دلالت می‌کند که $l^* = 0$ برقرار است. با توجه به قضیه ۲ و همچنین تعریف s' و l'، جواب شدنی (x', l', s') وجود دارد به‌طوری‌که یکی از دو نامساوی $w_a f_a(x') < w_a f_a(x^*)$ و $s'_b < s_b^*$ برقرار بوده و این ناقض بهینگی $(x^*, 0, s^*)$ و اثباتی برای قضیه ۳ است.

قضیه ۴. با توجه به اینکه روش ارتجاعی، متشکل از دو روش وزنی و ε- محدودیت است؛

(*i*) اگر $\varepsilon_b \le min\{ f_b(x) : x \in S\}$ برقرار باشد، مسئله (۱۹) معادل روش وزنی است و

(*ii*) اگر $w_b = \infty$ را قرار دهیم آنگاه مسئله (۱۹) معادل روش ε-محدودیت است.

اثبات.

(*i*) با انتخاب $\varepsilon_b \le min\{ f_b(x) : x \in S\}$، باید در هر جواب شدنی (۱۹)، شرط $s_b \ge 0$ برقرار باشد. همچنین در جواب بهینه نیز شرط $l_b = 0$ برقرار خواهد بود. بنابراین اگر شرط

(*ii*) $s_b = f_b(x) - \varepsilon_b \ge 0$ برقرار باشد، آنگاه حل مسئله (۱۹) معادل حل مسئله‌ای با تابع هدف $\min\ w_a f_a(x) + w_b f_a(x) - w_b \varepsilon_b$ خواهد بود و با توجه به آنکه عبارت آخر در این تابع هدف مقداری ثابت است، مسئله مسئله تبدیل به مسئله وزنی خواهد شد.

(*ii*) اگر $w_b = \infty$ باشد، از آن‌جایی‌که s_b بایستی در تابع هدف حداقل‌سازی صفر باشد، هر جواب (x, l, s) از (۱۹) با تابع هدف محدود، بایستی شرط $f_b(x) + l_b = \varepsilon_b$ را با تابع هدف $\min\ w_a f_a(x)$ ارضاء کند. از آن‌جایی‌که ضریب w_a در تابع هدف تأثیری بر جواب مدل ندارد، در نتیجه مسئله (۱۹) تبدیل به مسئله ε- محدودیت خواهد شد.

۵- الگوریتم چندهدفه زیرجمعیت

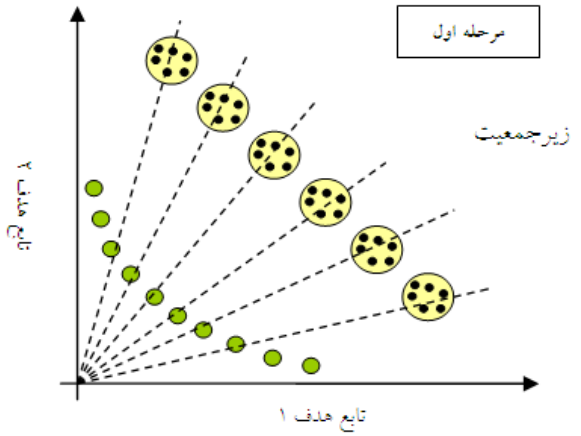
هدف اصلی در مسائل تصمیم‌گیری چندهدفه رسیدن به مجموعه مناسب از جواب‌های پارتو است و جواب‌های پایانی به‌دست آمده از حل نمایانگر ترجیحات تصمیم‌گیرنده در درجه اهمیّت رسیدن به تابع هدف‌های گوناگون مسأله بهینه‌سازی است. روش‌های مختلفی در ادبیات برای رسیدن به این منظور پیشنهاد شده است. در اینجا روش چندهدفه به نام الگوریتم چندهدفه زیرجمعیت[1] که در دو مرحله جواب‌ها را ایجاد و بهبود می‌دهد، معرفی می‌شود تا در نهایت با ایجاد چنین ترکیبی امکان رسیدن به جواب‌های پارتو با کیفیت مناسبی با توجه به چندین معیار متنوع فراهم آید. اساس کار این الگوریتم به پایه تقسیم جمعیت اصلی یک الگوریتم بر پایه جمعیت به چندین زیرجمعیت، اختصاص وزن بر اساس مکانیزمی خاص به هر یک و حل آنها به‌صورت جداگانه با هدف رسیدن به مجموعه جواب‌های متنوع است. در نهایت نیز با ادغام تمام جواب‌های بدست آمده و با استفاده از استرتژی نخبه‌گرایی کیفیت جواب‌های اوّلیه پارتو حاصل از مرحله اوّل را بهبود می‌یابد.

۵-۱- مرحله اول: تولید جواب‌های پارتو اوّلیه

نرسیدن به جوابی با تنوع مناسب نشان از روندی نابالغ در روند رسیدن به جواب‌ها در یک الگوریتم تکاملی است. اساس اصلی وجود این مرحله بر اساس همین اصل است. در این مرحله برای ایجاد جواب‌های متنوع، با تجزیه کردن جمعیت اوّلیه خود به چندین زیرجمعیت[2] هدف آن است تا از طریق روش وزن‌دهی مجموعه جواب‌های پارتو با تنوع مناسب ایجاد گردد.

این روش یک روش دو مرحله‌ای است که در آن جمعیت اوّلیه الگوریتم ژنتیک در همان ابتدا برای ایجاد تنوع در جواب‌های موثر به چندین زیرجمعیت تقسیم شده و به هر یک از زیرجمعیت‌ها یک وزن خاص اختصاص می‌یابد و در حقیقت تمایز هر یک از این زیرجمعیت‌ها در نحوه وزن‌دهی به اهداف چندگانه آن است. این تقسیم شدن به‌صورت شماتیک در شکل (۱) نشان داده شده است.

1 Sub-Population Genetic Algorithm (SPGA)
2 Sub-Population



شکل (۱): مرحله اوّل الگوریتم SPGA

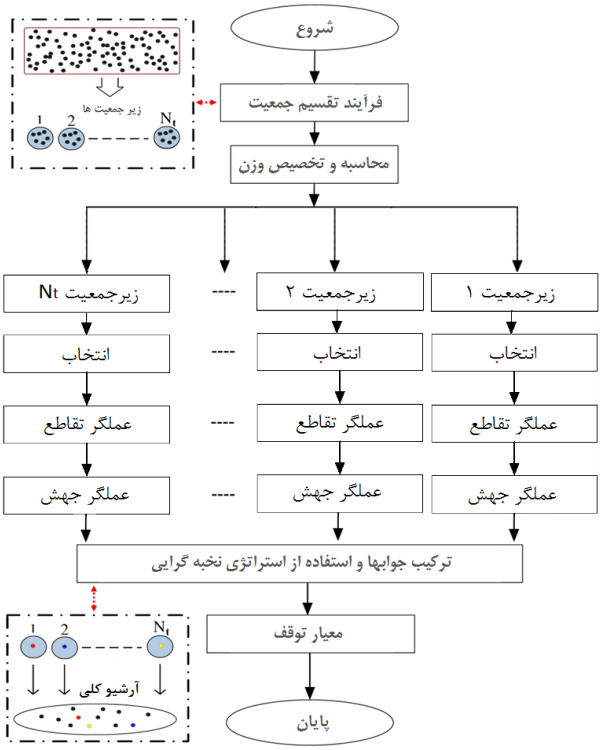
با ترکیب این روش حل با روش تعیین تابع هدف برآیند، روند اجرای مرحله اوّل را به‌صورت شکل (۲) خواهد بود. تعیین مقدار وزن بسیار مهم است چرا که وجه تمایز هر یک از زیرجمعیت‌ها در مقدار w است که به تمام اعضای آن زیرجمعیت اختصاص می‌یابد. به همین دلیل از یک روش وزن‌دهی قانونمند استفاده شده است. در این روش که در ادبیات موضوع زمانبندی نیز استفاده و کارایی آن اثبات شده است [۲۴]، رابطه زیر برای وزن‌دهی به هر یک از اعضای زیرجمعیت‌ها به‌کار رفته است.

$$(w_a(t), w_b(t)) = (\ |\sin(2\pi t/R)|\ ,\ 1-w_a(t)), \qquad (۲۰)$$

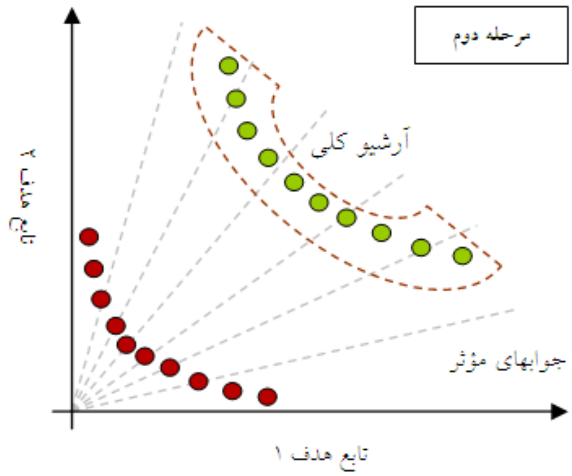
در این رابطه پارامتر t شمارنده زیرجمعیت‌ها بوده و با توجه به اینکه جمعیت اوّلیه این روش ۲۵۰۰ عضوی با ۵۰ زیرجمعیت است، آنگاه $t = 1,\ldots, 50$ بوده و $R = 200$ می‌باشد. این رابطه به گونه‌ایست که برای تمامی wها همواره $w_a \le 1$ و $0 \le w_b$ بوده و مجموع w_a و w_b برابر ۱ می‌باشد.

۵-۲- مرحله دوم: ارتقاء جواب‌های پارتو

با توجه به آنکه جواب‌های حاصل از مرحله اوّل به‌صورت جداگانه به‌دست آمده است و جواب‌های پارتو در آرشیوی واحد گرد هم نیامده‌اند این امکان وجود دارد که شانس ایجاد جواب‌های بهتر ناشی از ادغام جواب‌ها از دست رفته و هر زیرجمعیت هیچ نقشی در بهبود جواب‌های زیرجمعیت‌های دیگر نداشته باشد. در نتیجه در مرحله‌ای جدید و با یکپارچه کردن تمام جواب‌های به‌دست آمده از مرحله اوّل در یک آرشیو کلی و با استفاده از استرتژی نخبه‌گرایی کیفیت جواب‌های اوّلیه پارتو حاصل از مرحله اوّل را بهبود می‌یابد. ارتباط مرحله اوّل و مرحله دوّم در شکل (۳) به‌صورت شماتیک نشان داده شده است.



شکل (۲): الگوریتم ژنتیک زیرجمعیت



شکل (۳): ارتباط بین مرحله اوّل و دوم در الگوریتم SPGA

با اجرای مرحله دوّم این انتظار وجود دارد که علاوه‌بر حفظ تنوع جواب‌های پارتو، کیفیت آنها نیز بهبود یابد. به این منظور و به‌عنوان ابزار حل بعد از آن‌که مجموعه مرجع مرحله دوّم تشکیل شد از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است.

۵-۳- نمایش جواب

در محیط توزیع‌شده که در آن کارها بین چندین کارخانه تقسیم می‌شوند، به دلیل آنکه کروموزوم بایستی شامل اطلاعات بیشتری همچون کارخانه انتخاب شده برای هر کار و زمانبندی کار در هر کارخانه باشد، قاعدتاً نحوه نمایش جواب در مقایسه با حالت عادی

پیچیده‌تر خواهد بود. بنابراین نحوه نمایش جواب بایستی به‌گونه‌ای طراحی شود که این دو مقوله را همزمان برای هر کار نمایش دهد.

با فرض آنکه n^f تعداد کارهای اختصاص داده شده به کارخانه f، m^f تعداد ماشین موازی موجود در کارخانه f و F تعداد کل کارخانه‌های موجود در شبکه تولید باشند، جواب با یک ماتریس $F \times \max_{f\in\{0,1,\dots,F\}}(n^f+m^f-1)$ نمایش داده می‌شود. در اینجا هر کارخانه به تعداد (m^f-1) شامل علامت "*" است که در هر سطر برای متمایز کردن یک ماشین از دیگری استفاده می‌شود. همچنین برای کارخانه مفروض k ، علامت "-" را برای مسدود کردن تعداد ژن‌هایی از یک کارخانه که (n^f+m^f-1) آن از مقدار حداکثر (n^f+m^f-1) کمتر است و به نوعی بلااستفاده می‌باشد، بکار می‌گیریم. به عبارت دیگر برای سطر k ام به تعداد $\left(\max_{f\in\{0,1,\dots,F\}}(n^f+m^f)-(n^k+m^k)\right)$ ژن از انتهای سطر بوسیله "-" مسدود می‌گردد. اعداد درون این ماتریس نشان‌دهنده شماره کارهاست. برای درک بهتر این نحوه از نمایش جواب، به مثال زیر توجه کنید. شکل (۴) نشان دهنده یک مسئله ۳ کارخانه‌ای با ۱۲ کار است که به‌ترتیب در هر کارخانه ۳، ۲ و۳ ماشین وجود دارد.

f_1	10	*	9	4	*	8
f_2	5	1	*	7	3	-
f_3	2	*	11	*	12	6

شکل(۴): نمایش جواب در زمانبندی توزیع‌شده با ماشین‌های موازی

همچنان‌که مشاهده می‌کنید از بین این ۱۲ کار، ۴ کار به هر کارخانه اختصاص داده شده است. از بین کارهای ۱۰، ۹، ۴ و ۸ که به کارخانه اول اختصاص یافته است، با توجه به چیدمان "*" در سطر اول، کار ۱۰ به ماشین اول، کارهای ۹ و ۴ به ماشین دوم و کار ۸ به آخرین ماشین اختصاص یافته است. به همین ترتیب می‌توان کارهای تخصیص داده شده به کارخانه‌های دوم و سوم و توالی آنها در روی هر ماشین را مشخص نمود. لازم به ذکر است که در این شکل از نمایش جواب، توالی کارها بر روی هر ماشین (برای حالاتی که بیش از یک کار به یک ماشین اختصاص یافته) به‌ترتیب ظاهر شدن اعداد در سطر ماتریس نمایش و از چپ به راست است. با این توضیح برای مثال مذکور می‌توان نتیجه گرفت که توالی کارها روی ماشین دوم در کارخانه اول به‌ترتیب ۴→۹ است. همچنین در کارخانه دوم این مثال، به دلیل آنکه (n^2+m^2) برابر ۶ و $(max(n^f+m^f))$ برابر ۷ است، آخرین ژن از سطر دوم با علامت "-" مسدود می‌گردد.

۵-۴- عملگر جهش

عملگرهای جهش عملگرهایی هستند که یک یا چند ژن از یک کروموزوم را انتخاب و مقادیر آنها را تغییر می‌دهند. در این عملگرها یک یا چند محل از یک رشته کاراکتری با طول خاص در نظر گرفته شده و مقادیر کاراکترها در آن محل‌ها تغییر می‌یابد. در اینجا با توجه به فضای چندکارخانه‌ای بودن مسئله، عملگری به شرح زیر مورد استفاده قرار گرفته است [۱۴].

۱: کارخانه‌های f و q را بصورت تصادفی انتخاب می‌کنیم.

۲: یک کار از از کارخانه f (با رنگ تیره) و یک موقعیت از کارخانه‌های q (با نماد↑) بصورت تصادفی انتخاب می‌کنیم.

۳: کار انتخابی را به موقعیت مورد نظر انتقال می‌دهیم.

f	3	2	1	4	5
	6	7	8	9	10
q	11	15	13	12	14

↑

f	3	1	4	5		
	6	7	8	9	10	
q	11	15	13	2	12	14

شکل (۵): جابه‌جایی حاصل از جهش

۵-۵- عملگر تقاطع

عملگر تقاطعی در یک لحظه بر روی دو کروموزوم اعمال شده و دو فرزند به‌وسیله ترکیب ساختار دو کروموزوم ایجاد می‌گردد. در این بخش با الگو گرفتن از عملگر تقاطع در حالت تک‌کارخانه‌ای از روشی به شکل زیر جهت ایجاد تقاطع در الگوریتم ژنتیک استفاده شده است[۱۴].

I. دو کروموزوم $(P1)$ و $(P2)$ را در نظر می‌گیریم.

P1	f_1	10	*	9	4	8	*
	f_2	5	1	*	7	3	-
	f_3	2	*	11	*	12	6

P2	f_1	8	7	*	4	*	-
	f_2	3	*	11	6	9	12
	f_3	5	*	10	2	*	1

II. در این مرحله به هر یک از خانه‌های ماتریس بصورت تصادفی عدد صفر یا یک را اختصاص می‌دهیم.

BT	f_1	1	0	0	1	0	1
	f_2	1	0	1	0	0	1
	f_3	0	1	1	1	0	0

III. از کروموزوم $(P1)$ مقادیری که در سلول‌های متناظر BT یک است را به نتیجه حاصل از تقاطع (OS) کپی می‌کنیم.

IV. از کروموزوم $(P2)$ مقادیر کپی شده در (OS) را حذف می‌نمائیم تا از انتقال مجدد آنها به (OS) جلوگیری شود.

نکته اینکه در حذف مقادیر تکراری در $(P2)$، بایستی "*"ها به‌صورت جداگانه در نظر گرفته شوند، به این معنی که اگر مثلاً در سطر سوم از $(P1)$ یک "*" به (OS) کپی شده، در سطر متناظر $(P2)$ نیز فقط یک "*" حذف گردد.

۷. خانه‌های خالی موجود در موقعیت جدید بوسیله مقادیر حذف نشده ($P2$) و با همان ترتیب پر می‌شود.

OS	f_1	10	8	7	4	*	*
	f_2	5	3	*	6	9	-
	f_3	12	*	11	*	2	1

۵-۶- استراتژی برخورد با محدودیت‌ها

بحث دیگری که در اجرای الگوریتم چگونگی برخورد با محدودیت‌های مسأله می‌باشد زیرا ممکن است عملگرهای مورد استفاده در الگوریتم باعث تولید کروموزوم‌های غیرموجه شوند. در اینجا پس از تولید هر کروموزوم آن را از نظر موجه بودن آزمایش کرده و در صورت غیرموجه بودن حذف می‌گردد. باید توجه داشته داشت که این استراتژی در مواردی کارایی دارد که نسبت جواب های امکان ناپذیر به کل فضای جواب مساله مقدار کوچکی باشد [۲۶]. به این منظور و انجام آزمایش‌های اولیه مشخص شد که در روند حل حدود ۲۰ درصد از جواب‌ها تولید شده با استفاده از این استراتژی حذف شد. این روش بسیار ساده و به علت عدم انجام عملیات روی جواب غیرموجه، دارای سرعت عمل مناسبی است [۲۶].

۷-۵- تنظیم پارامترها

کارایی الگوریتم‌های فراابتکاری ارتباط مستقیمی با تنظیم پارامترهای آن دارد، به‌گونه‌ای‌که انتخاب نادرست پارامترهای الگوریتمی کاملاً کارا، باعث ناکارآمدی آن می‌شود. در این تحقیق از روش فاکتوریل در طراحی آزمایش‌ها استفاده شده است و این کار تنها برای ۳ پارامتر نرخ تقاطع (C_r)، نرخ جهش (M_r) و اندازه جمعیت (P_{size}) با سطوح زیر انجام شده است.

- C_r : سه سطح (۰/۷۰، ۰/۸۰ و ۰/۹۰)
- M_r: دو سطح (۰/۰۵ و ۰/۱۰)
- P_{size}: سه سطح (۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰)

جدول (۱) سطوح بهینه حاصل برای اندازه‌های مختلف مسأله را ارائه می‌دهد.

جدول (۱): تنظیم پارامتر

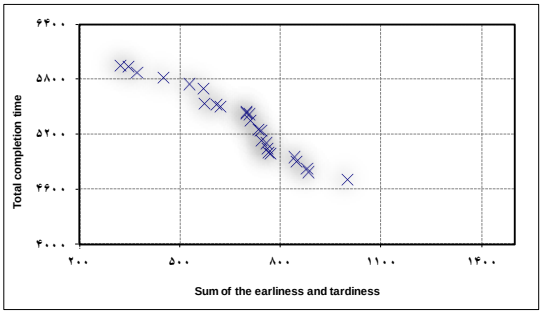
پارامترها	اندازه مسأله		
	کوچک	متوسط	بزرگ
C_r	۰.۸	۰.۸	۰.۹
M_r	۰.۰۵	۰.۰۵	۰.۰۵
P_{size}	۲۰۰	۳۰۰	۳۰۰

۶- تحلیل عملکرد الگوریتم‌های پیشنهادی

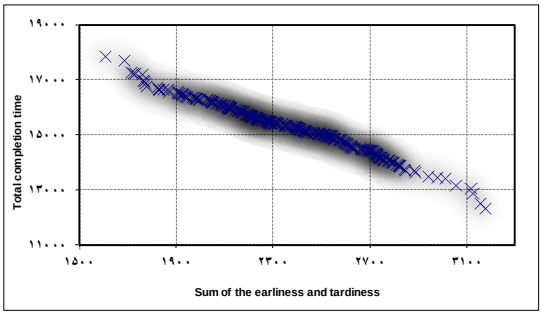
برای اعتبارسنجی کارایی روش پیشنهادی و به‌دلیل شباهت مسئله مورد بررسی در این مقاله با تحقیق [۱۴]، نتایج حاصل با نتایج روش هایپرهیوریستیک[1] بر پایه بهینه‌سازی گروه ذرات پیشنهادی در [۱۴] در مسائل نمونه با ابعاد بزرگ مقایسه شده است.

۱-۶- نتایج عددی در نمودهای با اندازه کوچک

شکل (۶) نشان‌دهنده نتایج عددی برای دو نمود: ۱۵ کار و ۲ کارخانه، و ۲۵ کار و ۲ کارخانه است که با استفاده از حل روش ارتجاعی در محیط *GAMS 21.4* حاصل شده است. زمان‌های پردازش در این دو نمود دارای توزیع یکنواخت در فاصله ۳۰ تا۶۰ است.



(الف) نمود با ۱۵ کار



(ب) نمود با ۲۵ کار

شکل (۶): پراکندگی جوابهای روش ارتجاعی در محیط سیپلکس

با وجود اینکه روش ارتجاعی منجر به جوابهای خوب می‌شود ولی ما تنها قادریم مسائل با اندازه‌های کوچک را حل کنیم.

۲-۶- نتایج عددی در نمودهای با اندازه بزرگ

معیارهای زیادی در اندازه‌گیری عملکرد الگوریتم‌های چندهدفه پیشنهاد شده است که هر یک از آنها دارای مزایا و معایبی است. بخشی از این معیار صرفاً تعداد جوابهای پارتو را مورد توجه قرار می‌دهد در حالی که معمولاً در فضای حل مسائل، آنچه بیشتر مورد توجه است کیفیت جواب‌های به‌دست آمده است. البته با توجه به آنکه در فضای چندهدفه تنها یک جواب به عنوان جواب بهینه وجود ندارد، معیار دیگری به نام تنوع جواب‌ها نیز مطرح می‌شود. به این منظور و با توجه به [۲۵]، در این تحقیق در مقایسات سه معیار

1 Hyper Particle swarm optimization algorithm (HPSO)

اندازه‌گیری کارایی مورد استفاده قرار گرفته است که در آنها هم عامل کیفیت حل و هم عامل تنوع پوشش داده شده است. این معیارها عبارتند از:

۱. *MID*: فاصله از نقطه ایده‌آل
۲. *SNS*: درجهٔ توازن در رسیدن همزمان به اهداف
۳. *RAS*: پراکندگی جواب‌های پارتو

نحوه محاسبه معیار اول بصورت رابطه زیر است.

$$MID = \frac{\sum_{i=1}^{n} c_i}{n} \qquad (۲۰)$$

در رابطه فوق n تعداد بردارها در لایه پارتو است و c_i فاصله اقلیدسی بین هر عضو از مجموعه از مبداء مختصات است که از رابطه $\sqrt{f_{1i}^2 + f_{2i}^2 + \ldots + f_{ki}^2}$ به‌دست می‌آید. منظور از f_{ki}، مقدار k امین مقدار تابع هدف در بردار جواب پارتو i ام است. بدیهی است که برای مجموعه‌های مورد مقایسه هر قدر که این مقدار کوچک‌تر باشد، مطلوبیت آن مجموعه بیشتر خواهد بود. در رابطه با معیار درجهٔ توازن در رسیدن همزمان به اهداف، اگر جوابی در امتداد یک محور باشد به‌دلیل آنکه این جواب تنها برای یک هدف مناسب بوده و برای هدف دیگر عملکرد مناسبی نداشته است مطلوبیت کمی دارد؛ ولی جواب‌هایی که در آنها به یک توازن قابل قبول بین اهداف دست یافته‌ایم، جواب‌هایی مناسب هستند. به این منظور در این مطالعه رابطهٔ زیر پیشنهاد شده است که در آن $F_i=min\{f_{1i}, f_{2i}\}$ است.

$$RAS = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left[\left(\frac{f_{1i}-F_i}{F_i}\right)+\left(\frac{f_{2i}-F_i}{F_i}\right)\right]}{n} \qquad (۲۱)$$

معیار آخر ارزیابی جواب‌ها به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

$$SNS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(MID-c_i)^2}{n-1}} \qquad (۲۲)$$

بدیهی است با توجه به *SNS* مقادیر بزرگ‌تر به‌دست آمده از الگوریتم‌ها دارای مطلوبیت بیشتری هستند.

در اینجا قصد داریم با استفاده معیارهای کارایی معرفی شده، نتایج به‌دست آمده از الگوریتم‌های پیشنهادی و الگوریتم بر پایه گروه ذرات را مقایسه کنیم. با توجه به آنکه مسئله مورد بررسی جدید بوده و هیچ داده‌ی کتابخانه‌ای وجود ندارد در این بخش از ۴۰ مسأله نمونه موجود در [۱۴] جهت ارزیابی الگوریتم‌ها استفاده شده است. این مثال‌ها دارای ۳ کارخانه با مشخصات $m^f = (3,4,5)$ و $v^f \in [1,1.2]$ و زمانهای پردازش با توزیع یکنواخت در فاصله ۷۰ تا ۱۰۰ دقیقه است. جدول (۲) مقادیر حاصل از هر نمود با توجه به معیارهای معرفی شده را نشان می‌دهد.

همچنان‌که ملاحظه می‌کنید در تمام اندازه‌های الگوریتم پیشنهادی با توجه به معیار *MID* کارایی بهتری نسبت به الگوریتم بر پایه گروه ذرات دارد اما در نقطه مقابل با توجه به معیار *SNS*، الگوریتم گروه ذرات دارای کارایی بهتری بوده و اختلاف کارایی با بالا رفتن تعداد کارخانه‌ها بیشتر نیز شده است. همچنین با توجه به عامل *RAS*، الگوریتم الگوریتم ژنتیک زیرجمعیت دارای کارایی مناسب‌تری در اندازه‌های بزرگ ۲۰۰ و ۵۰۰ کار در مقایسه با الگوریتم گروه ذرات دارد.

۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق زمانبندی شبکه‌های تولید چندکارخانه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به آنکه متغیرهای مجزا و اهداف متضاد به‌طور واقعی در ذات مسائل کاربردی وجود دارند و در مرور ادبیات انجام شده، به وضوح مشخص شد که در زمانبندی توزیع شده، شکاف محسوسی در رابطه با زمانبندی چندهدفه در ادبیات وجود دارد لذا در قالب زمانبندی توزیع شده چندهدفه دو تابع هدف مجموع زمان‌های دیرکرد و زودکرد کارها به‌عنوان تابع هدف اول و مجموع زمان‌های تکمیل به‌عنوان تابع هدف دوم در نظر گرفته شد. سایر نوآوری‌های تحقیق جاری را می‌توان به شکل زیر لیست کرد.

- ✓ تعریف مفهوم زمانبندی دو تخصیصی شامل تخصیص کار به کارخانه و تخصیص کار به ماشین
- ✓ زمانبندی چند کارخانه‌های ناهمسان با توسعه توزیع شده
- ✓ مدلبندی ریاضی مسئله
- ✓ در نظر گرفتن اهداف چندگانه در مسئله
- ✓ پیشنهاد روش دقیق چندهدفه ارتجاعی برای مسئله: با بررسی نقاط قوت و ضعف روش‌های مختلف، با ارائه ۳ قضیه، استفاده از روش ترکیبی وزن‌دهی و ϵ- محدودیت جهت رفع نواقص هر یک از آنها، پیشنهاد شده است.
- ✓ الگوریتم ژنتیک زیرجمعیت: با بررسی روش‌های مختلف موجود، با ارائه ایده‌ای جدید در نمایش جواب برای اولین بار از الگوریتم ژنتیک چندهدفه‌ای بهره برده‌ایم که دقیقاً متناسب با توجه به شرایط مسئله ما طراحی شده است.

با توجه به اینکه در واقعیت پردازش تحت تأثیر اتفاقات تصادفی قرار می‌گیرد و اتفاقاتی همچون ورود تصادفی کارها به کارخانه‌ها، خرابی ماشین‌آلات (از کارافتادگی آنها)، تغییرات در سررسیدها، لغو سفارشات و تأخیرات در عملیات ماهیت تصادفی دارند، زمانبندی توزیع‌شده احتمالی جزء موضوعات جذاب برای تحقیقات آتی به شمار می‌آید.

جدول (۲): نتایج محاسباتی در نمودهای با اندازه بزرگ

تعداد کار	نمود	الگوریتم و شاخص					
		MID		*SNS*		*RAS*	
		HPSO	*SPGA*	*HPSO*	*SPGA*	*HPSO*	*SPGA*
۵۰ کار	۱	۲۱۱۱۸.۷۵	۱۰۵۱۷.۵۶	۹۸۹.۳۷	۸۸.۰۱	۰.۱۶۷	۰.۵۴۳
	۲	۲۴۰۲۲.۸۶	۱۰۹۰۹.۴۶	۱۶۵۲.۱۵	۶۰.۳۴	۰.۲۶۶	۰.۷۵۸
	۳	۲۵۶۶۸.۰۲	۱۳۶۳۹.۷۱	۱۲۷۵.۲۰	۹۱.۵۳	۰.۱۵۳	۰.۷۷۹
	۴	۲۳۰۵۸.۲۶	۱۰۷۴۰.۳۶	۱۳۶۷.۰۱	۹۲.۶۳	۰.۱۸۴	۰.۶۳۷
	۵	۱۵۹۱۲.۱۸	۱۱۴۵۵.۹۰	۶۹۷.۸۲	۷۶.۶۲	۰.۶۱۴	۰.۷۳۷
	۶	۲۰۰۴۵.۶۱	۱۱۸۶۳.۴۴	۸۳۷.۹۷	۸۸.۳۹	۰.۱۲۰	۰.۴۰۸
	۷	۲۱۶۲۸.۷۱	۱۴۱۶۰.۰۲	۱۰۵۲.۴۷	۹۱.۰۱	۰.۱۱۶	۰.۵۰۴
	۸	۲۲۳۷۲.۹۱	۱۱۵۵۱.۵۸	۱۱۶۲.۳۷	۸۱.۹۰	۰.۱۵۸	۰.۶۰۰
	۹	۲۳۰۷۹.۰۷	۱۳۵۲۷.۴۲	۱۲۶۴.۹۸	۹۷.۳۹	۰.۱۵۷	۰.۵۱۷
	۱۰	۲۴۱۴۷.۲۳	۱۳۶۵۲.۵۹	۱۳۷۱.۲۵	۷۹.۴۹	۰.۱۷۲	۰.۷۱۷
	متوسط	۲۲۱۰۵.۳۶	۱۲۲۰۱.۸۱	۱۱۶۷.۰۶	۸۴.۷۳	۰.۲۱۱	۰.۶۲۰
۱۰۰ کار	۱	۵۹۰۳۳.۸۳	۴۱۷۳۴.۴۴	۴۴۷.۸۲	۱۶۳.۲۸	۰.۰۸۲	۰.۵۲۶
	۲	۵۹۵۶۹.۶۸	۴۴۷۲۵.۱۴	۳۲۵.۸۱	۳۰۰.۲۹	۰.۱۰۹	۰.۳۰۳
	۳	۵۸۵۶۰.۱۳	۴۳۹۹۸.۴۵	۵۵۹.۵۰	۲۶۰.۳۴	۰.۱۸۴	۰.۳۷۲
	۴	۶۰۸۲۶.۲۶	۴۲۴۲۶.۷۷	۳۲۸.۴۸	۱۷۸.۲۰	۰.۰۸۷	۰.۴۲۳
	۵	۵۷۶۷۱.۳۸	۵۴۲۹۶.۱۶	۳۵۷.۷۲	۲۵۹.۶۰	۰.۱۱۴	۰.۵۲۶
	۶	۶۰۶۲۷.۹۷	۴۲۰۴۱.۵۵	۲۸۵.۰۶	۳۳۳.۹۸	۰.۱۱۷	۰.۳۷۵
	۷	۵۷۱۰۹.۹۷	۵۳۶۶۲.۲۱	۵۲۷.۵۱	۲۲۷.۳۵	۰.۰۹۹	۰.۵۳۷
	۸	۶۱۷۸۷.۱۶	۴۴۱۱۶.۲۲	۶۰۸.۱۷	۲۸۴.۵۵	۰.۰۸۱	۰.۴۷۹
	۹	۵۸۲۰۰.۵۲	۴۰۴۱۲.۲۲	۹۰۹.۵۴	۲۷۱.۰۲	۰.۰۹۸	۰.۶۱۹
	۱۰	۶۱۴۳۱.۰۱	۵۳۴۷۸.۲۷	۳۰۰.۸۷	۲۶۰.۷۷	۰.۰۷۰	۰.۳۸۴
	متوسط	۵۹۴۸۱.۷۹	۴۶۰۸۹.۱۴	۴۶۵.۰۵	۲۵۳.۹۴	۰.۱۰۴	۰.۴۵۴
۲۰۰ کار	۱	۳۰۴۵۹۷.۴۶	۱۵۲۳۸۰.۱۲	۷۹۵۸.۹۴	۷۹۴.۵۵	۰.۱۳۱	۰.۳۶۰
	۲	۲۶۸۸۳۸.۲۸	۱۸۲۸۷۸.۲۶	۳۳۴.۰۴	۱۴۶۹.۲۵	۰.۱۲۶	۰.۲۵۷
	۳	۲۲۶۸۲۷.۲۹	۱۸۳۳۸۳.۵۹	۳۹۰۰.۶۲	۵۳۰.۱۰	۰.۳۱۷	۰.۱۴۰
	۴	۲۷۰۱۹۳.۴۲	۱۵۳۸۷۹.۳۳	۲۳۹۳.۷۹	۹۳۹.۱۸	۰.۰۸۹	۰.۰۵۹
	۵	۲۹۲۷۷۲.۸۶	۱۴۷۴۸۲.۲۳	۲۸۴۶.۳۸	۲۰۱.۸۲	۰.۰۰۸	۰.۲۴۴
	۶	۲۸۵۰۶۲.۷۸	۱۵۵۷۱۳.۲۳	۶۵۰۰.۷۳	۸۲۳.۰۲	۰.۰۹۴	۰.۱۸۲
	۷	۲۶۲۶۷۴.۳۸	۱۸۷۲۸۶.۵۱	۱۹۴۰.۷۵	۳۵۳.۸۱	۰.۰۵۱	۰.۰۴۹
	۸	۲۶۰۳۰۷.۴۹	۱۵۹۷۸۰.۸۱	۱۱۵۶.۱۳	۱۸۳.۳۰	۰.۵۹۱	۰.۱۴۱
	۹	۲۷۵۳۸۲.۹۶	۱۸۹۹۸۹.۴۴	۴۸۰۰.۲۲	۱۰۴۶.۴۸	۰.۲۵۱	۰.۱۹۲
	۱۰	۲۲۲۲۵۴.۷۵	۱۵۸۷۵۴.۳۵	۵۹۱۴.۷۳	۲۷۳.۰۴	۰.۲۴۵	۰.۱۹۳
	متوسط	۲۶۶۸۹۱.۱۷	۱۶۷۱۵۲.۷۹	۳۷۷۴.۶۳	۶۶۱.۴۶	۰.۱۹۰	۰.۱۸۲
۵۰۰ کار	۱	۱۸۰۹۳۲۹.۸۵	۱۰۰۸۲۳۵.۵	۳۱۳۷۴.۳۰	۸۵۴۱.۵۳	۰.۰۳۷	۰.۲۰۰
	۲	۱۸۵۵۷۵۹.۸۵	۱۰۲۲۶۳۲.۲	۳۸۵۷۷.۰۲	۱۴۴۰۳.۸۳	۰.۱۵۴	۰.۴۳۳
	۳	۱۸۴۵۳۸۰.۰۶	۱۰۳۵۹۴۵.۸	۲۸۸۵۱.۰۳	۱۰۳۴۸.۵۳	۰.۱۷۹	۰.۳۵۷
	۴	۱۸۳۷۷۳۳.۹۶	۱۲۷۴۷۰۹.۰	۲۸۵۸۸.۷۳	۷۷۷۶.۲۰	۰.۴۳۵	۰.۰۰۳
	۵	۱۷۹۴۷۳۸.۲۷	۱۳۸۳۲۶۳.۵	۲۸۴۷۳.۱۰	۷۳۴۶.۵۰	۰.۵۷۶	۰.۱۵۷
	۶	۲۰۲۳۴۲۲.۵۶	۱۳۷۱۳۵۶.۰	۵۹۰۲۱.۷۶	۱۱۳۱۷.۵۵	۰.۰۷۲	۰.۰۷۰
	۷	۲۲۹۸۳۲۳.۶۸	۱۴۴۵۷۶۴.۵	۸۴۷۹۵.۵۰	۳۱۱۱.۹۹	۰.۰۲۲	۰.۰۹۳
	۸	۱۶۹۹۵۴۱.۱۲	۱۳۹۰۸۴۲.۱	۱۶۲۵۴.۹۸	۹۷۱۵.۵۴	۰.۰۳۸	۰.۰۳۹
	۹	۱۵۸۶۹۹۹.۲۱	۱۳۲۳۸۰۷.۳	۲۷۱۵.۰۹	۶۳۳۹.۰۲	۰.۱۲۸	۰.۲۰۰
	۱۰	۱۹۵۲۱۷۲.۸۰	۱۱۶۵۹۶۵.۰	۵۴۷۸۹.۶۸	۶۰۵۵.۴۱	۰.۱۵۸	۰.۰۱۷
	متوسط	۱۸۷۰۳۴۰.۱۴	۱۲۴۲۲۵۲.۱	۳۷۳۴۴.۱۲	۸۴۹۵.۶۱	۰.۱۸۰	۰.۱۵۷

۸- مراجع

[1] Shen, W.D.H. (1999). Norrie, Agent-based systems for intelligent manufacturing: A state-of-the-art survey, International Journal Knowledge and Information Systems, 1(2): 129–156.

[2] Dhaenens-Flipo, G., Finke, G. (2001). An integrated model for an industrial production-distribution problem, IIE Transactions, 33(9): 705–715.

[3] Soares, A.L., Azevedo, A.L., De Sousa, J.P. (2000). Distributed planning and control systems for the virtual enterprise: Organizational requirements and development life-cycle, Journal of Intelligent Manufacturing, 11: 253-270.

[۴] بشیری، مهدی، شرافتی، مهتاب (۱۳۹۲). طراحی دو هدفه شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته با در نظر گرفتن معیارهای همبسته در محیط فازی، نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، شماره ۱، صفحه ۲۵-۳۶.

[5] Williams, J.F. (1981). Heuristic techniques for simultaneous scheduling of production and distribution in multi-echelon structures: Theory and empirical comparisons, Management Science, 27: 336-352.

[6] Blumenfeld, D.E., Burns, L.D., Daganzo, C.F., Frick, M.C., Hall, R.W. (1987) Reducing logistics cost at General Motors, Interfaces, 17: 26-47.

[7] Sambasivan, M., Yahya, S. (2005). A Lagrangean-based heuristic for multi-plant, multi-item, multi-period capacitated lot-sizing problems with inter-plant transfers, Computers & Operations Research, 32: 537-555.

[8] Pirkul, H., Jayaraman, V. (1998). A multi-commodity, multi-plant, capacitated facility location problem: Formulation and efficient heuristic solution, Computers & Operation Research, 25(10): 869-878.

[9] Kim, Y., Yun, C., Park, S.B., Park, S., Fan, L.T. (2008). An integrated model of supply network and production planning for multiple fuel products of multi-site refineries, Computers & Chemical Engineering, 32: 2529–2535.

[10] Zhang, M.T., Niu, S., Mai, M., Li, Q. (2005). Multi-factory optimization enables kit reconfiguration in semiconductor manufacturing, In Proceedings of the International Conference on Automation Science and Engineering Edmonton, Canada, 105 –112.

[11] Vincent, A.C., Stephen, F.S. (2004). Wasp-like agents for distributed factory coordination, Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, 8: 237–266.

[12] Barroso, A.M., Torreao, J.R.A., Leite, J.C.B., Loques, O.G., Fraga, J.S. (1997). A new technique for task allocation in real-time distributed systems, In Proceedings of the 7th Brazilian Symposium of Fault Tolerant Computers, Campina Grande, Brazil, 269–278.

[13] Behdani, B., Lukszo, Z., Adhitya, A., Srinivasan, R. (2010). Decentralized vs. centralized management of abnormal situations in a multi-plant enterprise using an agent-based approach, Computer Aided Chemical Engineering, 28:1219-1224.

[۱۴] بهنامیان، جواد، فاطمی قمی، سیدمحمدتقی (۱۳۹۲). ارائه الگوریتم ترکیبی بر پایه بهینه سازی گروه ذرات و روش هایپرهیوریستیک برای زمانبندی کارخانه‌های توزیع‌شده با اتحاد مجازی، نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، شماره ۱، صفحه ۱-۱۱.

[15] Naderi, B., Ruiz, R. (2010). The distributed permutation flowshop scheduling problem, Computers & Operations Research, 37: 754-768.

[16] Sun, X.T., Chung Felix, S.H., Chan T.S. (2015). Integrated scheduling of a multi-product multi-factory manufacturing system with maritime transport limits, Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 79: 110–127.

[17] Behnamian, J., Fatemi Ghomi, S.M.T. (2014). A survey of multi-factory scheduling, Journal of Intelligent Manufacturing, 27(1), 231-249.

[18] Sule, D.R. (1997). Industrial Scheduling, 1nd ed., Boston: PWS Publishing Company.

[19] Behnamian, J. (2014). Decomposition based hybrid VNS–TS algorithm for distributed parallel factories scheduling with virtual corporation, Computers & Operations Research, 52: 181-191.

[20] Behnamian, J., Fatemi Ghomi, S.M.T. (2014). Realistic variant of just-in-time flowshop scheduling: Integration of Lp-metric method in PSO-like algorithm, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 75 (9-12): 1787-1797.

[21] Brucker, P. (2007). Scheduling Algorithms, 5nd ed., New York: Springer.

[22] Zadeh, L. (1963). Optimality and non-scalar-valued performance criteria, IEEE Transactions on Automatic Control, 8: 59–60.

[23] Chankong, V., Haimes, Y.Y. (1983). Multiobjective Decision Making: Theory and

Methodology, 1nd ed., New York: Elsevier Science.

[24] Behnamian, J., Fatemi Ghomi, S.M.T., Zandieh, A.M. (2009). multi-phase covering Pareto-optimal front method to multi-objective scheduling in a realistic hybrid flowshop using a hybrid metaheuristic, Expert Systems with Applications, 36: 11057-11069.

[25] Behnamian, J., Fatemi Ghomi, S.M.T. (2014). Multi-objective fuzzy multiprocessor flowshop scheduling, Applied soft computing, 21: 139–148.

[26] Talbi E.G. (2009). Metaheuristics: From Design to Implementation, John Wiley & Sons, Page 49.

IERPS Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems

ISSN: 2345-2269

Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems

Fall and Winter 2016 Volume 3. No.6. pp. 133-147
www.ier.basu.ac.ir

Multi-Objective Production Network Scheduling Using Sub-Population Genetic Algorithm and Elastic Method

J. Behnamian*

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

ARTICLE INFO

***Article history*:**

Received 1 February 2015
Accepted 6 December 2015

***Keywords*:**

Multi-objective scheduling
Multi-factory production
Elastic method
Sub-population genetic algorithm

ABSTRACT

The globalization trend causes the emergence of intense competition among manufacturers to gain more profits. In order to be competitive in today's rapidly changing business world, organizations have shifted from a centralized single factory production to a decentralized multi-factory structure. We assume that production takes place in several factories, which may be geographically distributed in different locations, in order to comply with and to take advantage from the trend of globalization. This allows them to be closer to their customers, to employ professionals, to comply with local laws, to focus on a few product types, to produce and market their products more effectively, and respond to market changes more quickly. These can be attained by transporting the jobs from an overloaded factory to the factory which has fewer workloads. Obviously, considering these assumptions, as well as multi-objective scheduling are surely more practical than those scheduling problems which do not take them into account. In this research, after formulating the scheduling problem as a mixed integer linear programming for simultaneous minimization of the sum of the earliness and tardiness of jobs and the total completion time, a new exact method and a multi-objective metaheuristic algorithm are proposed. Finally, the heuristic algorithm and the output of particle swarm-based algorithm are reported.

* Corresponding author. Javad Behnamian
Tel.: 081-38292505; *E-mail addresses:* Behnamian@basu.ac.ir