



## ارائه الگوریتم ترکیبی بر پایه بهینه‌سازی گروه ذرات و روش هایبرهیوریستیک برای زمان‌بندی کارخانه‌های توزیع شده با اتحاد مجازی

جواد بهنامیان<sup>\*</sup>، سیدمحمدتقی فاطمی قمی<sup>†</sup>

<sup>\*</sup> استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان  
<sup>†</sup> استاد دانشکده صنایع، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

### خلاصه

این مقاله به زمان‌بندی تولید چندکارخانه‌ای پرداخته است که در آن مجموعه‌ای از تولیدکنندگان با مالکیت مستقل به یکدیگر ملحق شده تا یک شبکه تولید را ایجاد نمایند. در این سیستم، اعضا در وهله اول موظف به تامین نیاز منطقه خود بوده و با انگیزه فعالیت اقتصادی‌تر نسبت به حالت انفرادی با یکدیگر مشارکت می‌کنند. در این سیستم تولیدی که به نام شبکه تولید توزیع شده با ارتباطات مجازی نیز شناخته می‌شود، هر کارخانه به عنوان عضوی مجزا معمولاً بر روی منافع شخصی خود متمرکز بوده و برای بهبود آن تلاش می‌کند و کمتر دغدغه منافع سایر اعضای شبکه را دارد. در اینجا الگوریتم ابتکاری جدیدی برای حداقل‌سازی تابع هدف مجموع زمان‌های تکمیل پیشنهاد شده است. در اینجا با وجود تک هدفه بودن مساله، بحث جواب‌های غالب و مغلوب برای اولین بار در فضای مسائل تک هدفی مطرح شده است. به این دلیل نیاز است از تکنیک‌های حل چند هدفه نیز استفاده شود. بنابراین روش ترکیبی حاصل از روش وزنی و  $Lp$ -متریک پیشنهاد شده است. کارایی الگوریتم با انجام آزمایشات با الگوریتم رقابت استعماری مقایسه و در نهایت نتایج گزارش شده است.

### اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۳۹۲/۱/۲۷

پذیرش ۱۳۹۲/۴/۲۰

کلمات کلیدی:

زمان‌بندی

برنامه‌ریزی توزیع شده

بهینه‌سازی گروه ذرات

اتحاد مجازی چندکارخانه‌ای

### ۱- مقدمه

در تحقیقات مسائل زمان‌بندی ماشین‌آلات عموماً فرض می‌شود که کارها به صورت متمرکز و در یک کارخانه تولید می‌گردد. با پیچیده‌تر شدن مسائل واقعی و با روند جهانی‌سازی موجود، حجم بالایی تقاضاهای متنوع در بازارها، رقابت شدید و فشار در نوآوری جهت به دست آوردن هر چه بیشتر منافع حاصل از آن موجب شده که رویکرد متمرکز کارایی کافی را در جهان واقعی نداشته باشد. برای حفظ شرایط رقابت‌پذیری در چنین بازارهایی، کارخانه‌ها با رشد خود

به طور پیش فرض به پیکربندی داخلی می‌پردازند تا بواسطه افزایش در سطح ظرفیت از اقتصاد مقیاس برخوردار شوند. با استمرار رشد، کارخانه‌ها تصمیم به ایجاد شبکه تولیدی متشکل از چندین سایت می‌نمایند. این تغییر و تحول در کارخانه‌های تولیدی و نیز علاقه شرکت‌های کوچکتر برای ورود به عرصه جهانی چالشی جدید در ساختاربندی، مدیریت و عملیات کارا در شبکه‌های حاصل که به صورت جغرافیایی توزیع شده‌اند، بوجود آورده است.

در سال‌های اخیر نیز در منابع اصلی زمان‌بندی به اهمیت موضوع این مقاله و کاربردهای واقعی آن در برنامه‌ریزی به وضوح اشاره شده است به طوری که در آخرین چاپ کتاب پیندو [۱]، در آخرین بخش کتاب با نام "نچه پیش روی محققان است" به موضوع زمان‌بندی چند عاملی اشاره شده است. در این بخش با توضیح در مورد اینکه

۱. نویسنده مسئول.

تلفن: ۰۸۱۱-۸۲۹۲۵۰۵، پست الکترونیکی: Behnamian@basu.ac.ir

تولیدی کمتر بوده و محدود به پنج مطالعه در شرایط ساده شده از واقعیت است که در ادامه به مرور آنها خواهیم پرداخت.

سیکریلیو و اسمیت<sup>۱</sup> [۵] روشی بر پایه رفتار زنبورها با نام عوامل زنبور-مانند<sup>۲</sup> برای هماهنگی بین کارخانه‌ای توزیع شده با ماشین‌های موازی ارائه نمودند. این عوامل مدلی بر اساس رفتار زنبورها در تخصیص کارها دارند که در آن در مورد اینکه آیا کار جدید در صف انتظار پردازش ماشینی پذیرفته گردد یا نه تصمیم گرفته می‌شود. همچنین در این رویکرد برای کارهای ورودی به سیستم، استراتژی بر پایه مفهوم تئوری مزایده ارائه شده است. آنها با استفاده از مسائل واقعی تخصیص واگن‌های به ایستگاه‌هایی که وظیفه رنگ آمیزی آنها را دارند، کارایی عملکرد روش پیشنهادی خود را آزمودند.

در تحقیقی مشابه، هوکو<sup>۳</sup> [۶] روشی ترکیبی شامل برنامه‌ریزی عدد صحیح<sup>۴</sup> و برنامه‌ریزی محدودیت‌ها جهت حل مساله برنامه‌ریزی و زمانبندی در محیط چند کارخانه‌ای با ماشین‌های موازی ارائه نمودند. در این مطالعه، محققین با استفاده از مدل‌بندی ریاضی عدد صحیح مختلط، کارها را به کارخانه مناسب تخصیص داده و با استفاده از روش برنامه‌ریزی محدودیت‌ها، کارهای تخصیصی به هر کارخانه را زمانبندی نمودند. در اینجا در شرایط برابری زمان ورود کارها به کارگاه<sup>۵</sup> و سررسید تمام کارها، آنها به دنبال حداقل کردن هزینه‌ها به همراه حداقل کردن زمان انجام کل کارها بودند.

چن و پاندو<sup>۶</sup> [۷] پیچیدگی زمانبندی در زنجیره تامین در حالات مختلف را بررسی و روش‌های ابتکاری سریعی برای هر یک از حالات پیشنهاد نمودند. مساله در نظر گرفته شده در این تحقیق شبکه تولید و توزیع شامل چندین کارخانه موازی در کشورهای خارجی و یک مرکز توزیع داخلی<sup>۷</sup> است. در این شبکه ابتدا کارها در کارخانه‌ها پردازش و سپس به مرکز توزیع حمل می‌شود تا بین خرده فروشان کشورهای دیگر توزیع گردد. با توجه به تنوع در بهره‌وری و هزینه‌ها در کارخانه‌های مختلف، هزینه‌ها و زمان‌های پردازش بسته به آنکه کار در کدام کارخانه انجام شود، متفاوت است. نویسندگان در این مقاله برای مساله خود چهار تابع هدف مختلف در نظر گرفته که همگی آنها شامل زمان‌های تحویل و هزینه‌های تولید و توزیع بودند. در این مطالعه برای هر کدام از این حالات پیچیدگی مساله بررسی و روشی ابتکاری برای آن ارائه شده است. کارل و گروسو<sup>۸</sup> [۸] یک سیستم تخصیص چند کاربری در شرایط خودخواهانه بودن کاربران<sup>۹</sup> را در قالب یک بازی غیر همکارانه در محیط ماشین‌های موازی مدل‌بندی کردند. به دلیل نبود هماهنگی بین کاربران، در این مدل

روند توسعه در بازارها سبب حرکت سیستم تولیدی از حالت تک کارخانه‌ای به چندکارخانه‌ای شده است، به محققین و خوانندگان به عنوان زمینه‌های تحقیقات آتی زمانبندی در این محیط‌ها را پیشنهاد نموده است.

در این راستا در اکثر تحقیقات گذشته در حیطه زمانبندی توزیع شده فرض بر این بوده است که کارخانه‌ها تک ماشین بوده و نیز در حالت چند ماشینی فرض شده است که کارخانه‌ها کاملاً یکسان هستند. ولی در واقعیت همواره این فرض برقرار نبوده و هر کارخانه توانمندی‌ها و محدودیت‌های مخصوص به خود را دارد. علاوه بر این در تمام تحقیقات گذشته فرض بر یکسانی اهداف کارخانه‌ها بوده است. به عبارت ساده‌تر فرض شده است که تمام کارخانه‌های مورد زمانبندی یک اداره مرکزی واحد و در نتیجه تابع هدف یکسانی دارند. حال شرایطی را در نظر بگیرید که در آن چند شرکت با مالکیت مجزا به این نتیجه برسند که با ایجاد یک شبکه تولید مجازی می‌توانند به منافع بیشتری نسب به حالتی که بصورت مجزا فعالیت می‌کنند دست یابند. در چنین شرایطی هر یک از کارخانه‌ها ممکن است هدف متفاوتی داشته و این هدف در مقایسه با هدف کلی شبکه زمانبندی توزیع شده مجازی در اولویت است. در این حالت زمانبندی توزیع شده‌ای وجود خواهد داشت که عوامل تابع هدف‌های مختلفی دارند. حالت واقعی‌تری را نیز می‌توان در نظر گرفت که در آن کارخانه‌ها توابع هدف چندگانه دارند.

در ادامه بعد از مرور ادبیات در بخش دوم، به دلیل جدید بودن زمانبندی در محیط اتحاد مجازی، در بخش سوم مفهوم اتحاد مجازی تشریح و فرضیات مساله بازگو خواهد شد. در بخش چهارم الگوریتم پیشنهادی ارائه و نتایج عددی آن در بخش پنجم گزارش می‌گردد. در نهایت نیز در بخش آخر پس از ارائه جمع‌بندی، زمینه‌های مطالعات آتی پیشنهاد می‌گردد.

## ۲- مرور ادبیات

تولید در محیط توزیع شده در شبکه تولید چندکارخانه‌ای جزء جذاب‌ترین موضوعات چند سال اخیر است [۲]. 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 دانشگاهی بطور همزمان مورد توجه قرار گیرد [۳]. در این زمینه مقالات متعددی در سال‌های اخیر به چاپ رسیده است [۴].

نظر به اینکه زمانبندی توزیع شده با کارخانه‌های موازی که خود محیط ماشین‌های موازی دارند شامل دوتخصیص (تخصیص کار به کارخانه مناسب و تخصیص کارها به هر ماشین در هر کارخانه) است، می‌توان نتیجه گرفت که این محیط جزء سخت‌ترین مسائل در محیط زمانبندی چند کارخانه‌ای است. به همین دلیل تعداد تحقیقات انجام شده در این زمینه در مقایسه با سایر محیط‌های

1 . Cicirello and Smith

2 . Wasp-like agents

3 . Hooker

4 . Mixed integer linear programming (MILP)

5 . Release date

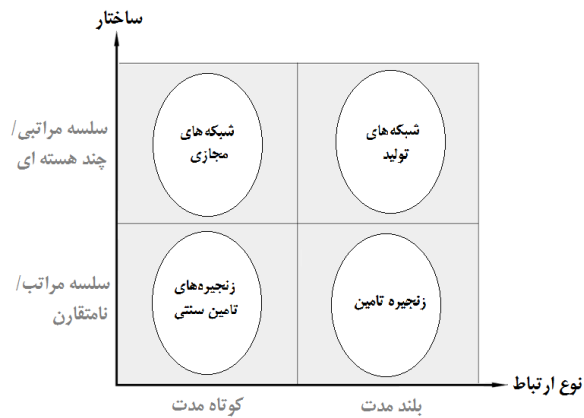
6 . Chen and Pundoor

7 . Distributed center

8 . Carroll and Grosu

9 . Selfish multi-user job scheduling

شرکت‌ها برای آنکه بتوانند یک سفارش بزرگتر از توان خود را بپذیرند و انجام دهند، در چنین اتحادیه‌های موقتی شرکت و پس از اتمام تولید این سفارش خاص، هر یک از اعضا راه خود را بپیمایند [۱۱].



شکل (۱): دسته بندی انواع شبکه‌های تولیدی [۱۱]

اعضای این شبکه‌ها با وجود اینکه محصول واحدی را تولید می‌کنند، اما به دلایل مختلف همچون قدمت ماشین آلات و یا تکنولوژی آنها، سرعت تولید در اعضای مختلف، ممکن است همسان نباشند. در این مقاله فرض شده است چنین کارخانه‌های ناهمسانی در شبکه وجود داشته که هر یک با همکاری سایر اعضا در وهله اول موظف به ارضاء نیاز بازار خود بوده و نیز می‌توانند در این تولید تابع هدفی متفاوت از دیگران داشته باشند. مثال‌های واقعی مختلفی با چنین شرایطی در جهان واقعی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به صنایع هوانوردی و صنایع خودرو اشاره کرد.

فرضیات اصلی مساله زمانبندی توزیع شده مورد بررسی این رساله به شرح زیر است:

۱. مساله  $F$  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 بطور همزمان در ابتدای دوره برنامه‌ریزی در دسترس‌اند.
۴. بریدگی و تقسیم یک کار خاص مجاز نیست.
۵. هرگز ماشین‌آلات خراب نمی‌شوند.
۶. زمان‌های حمل و نقل درون کارخانه ای ناچیز بوده و یا در زمان انجام کار لحاظ شده‌اند.
۷. زمان‌های آماده‌سازی ناچیز و قابل چشم‌پوشی هستند.
۸. هر کار باید دقیقاً به یکی از کارخانه‌های تولیدی اختصاص یابد.

شکل (۲) مقایسه بین فعالیت انفرادی کارخانه‌ها و ایجاد شبکه مجازی در رسیدن به سه عامل مهم توانمندساز کارخانه‌ها (نوآوری، انعطاف‌پذیری و رقابت هزینه‌ای) را نشان می‌دهد [۱۲].

هزینه اغتشاش در راستای کمی کردن معیارهای ارزیابی سیستم در نظر گرفته شده و بر اساس آن زمانبندی صورت می‌گیرد.

به تازگی بهنامیان و فاطمی قمی [۹] مساله زمانبندی تولید چندکارخانه ای را در نظر گرفتند. برای حل مساله شبکه تولیدی با چندین کارخانه‌های توزیع شده که با هدف تامین نیاز بازار آنجا ایجاد شده‌اند، محققین روش فراابتکاری بر پایه رقابت استعماری ارائه نموده و در نهایت کارایی روش را گزارش کردند.

در تحقیق حاضر با وجود تک هدفه بودن مساله، بحث جواب‌های غالب و مغلوب برای اولین بار در فضای مسائل تک هدفی مطرح شده است. همچنین الگوریتم ترکیبی جدیدی برای حل مساله پیشنهاد گردیده است.

### ۳- تعریف مساله و تحلیل ویژگی‌های آن

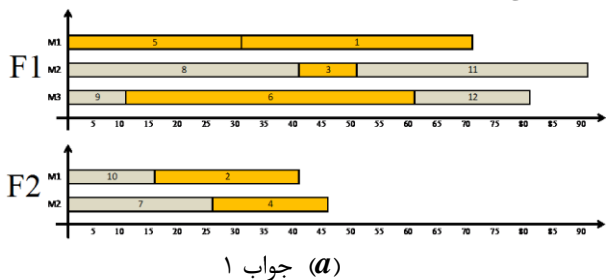
بازار نقشی کلیدی در تعریف اهداف اصلی در سیستم‌های تولیدی دارد. نیاز به نوآوری، تولید بر پایه خواسته مشتری و پاسخ سریع به تقاضاها از ویژگی‌های چنین بازارهایی است. ویژگی دیگر این بازارها پویایی و تصادفی بودن آنها است. سیستم‌های تولید سنتی، به دلایل زیر قادر به پاسخگویی به این بازارها نیستند [۱۰]:

۱. زمان پاسخ به برآشتگی‌های تصادفی بزرگ در بازار به دلیل کند بودن سیستم‌های تولید سنتی، رضایت بخش نیست.
۲. اطلاعات ناکافی، نادرست و غیر قابل اعتماد به دلیل بزرگی جغرافیایی توزیع مشتریان سبب شده است تا تصمیم‌گیرندگان بر پایه حدس و یا اطلاعات بسیار کم تصمیم‌گیری کنند.
۳. ساختار سازمانی سیستم‌های سنتی از پیش تعیین شده و بسیار خشک است و این امر سبب می‌شود که در برابر پیدایش بازارهای جدید و تغییرات آن منقطع نباشند.

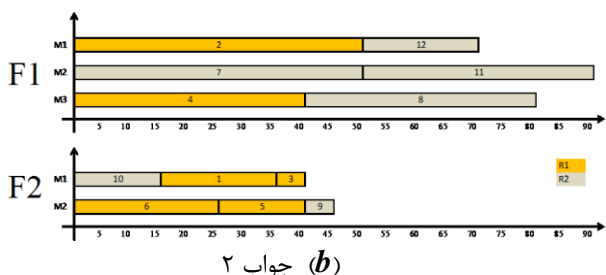
به منظور غلبه بر چنین معایبی، سیستم‌های جدید تولیدی حاصل از مشارکت چندین کارخانه به وجود آمده‌اند. امروزه کارخانه‌ها علاقمند به ایجاد ارتباطات موازی بوده تا بتوانند از منافع حضور در چنین شبکه‌هایی برای بهبود وضعیت رقابتی خود استفاده کنند. چنین به اشتراک‌گذاری منابع توزیع شده در نقاط مختلف جغرافیایی باعث پیدایش شبکه‌های تولیدی می‌شود که یکی از اقسام آنها شبکه با اعضای خودخواه<sup>۱</sup> است که به نوعی تشکیل یک شبکه مجازی<sup>۲</sup> را می‌دهد. همچنان که در شکل (۱) آمده است این نوع مشارکت جزء مشارکت کوتاه مدت بوده و دوام آن تا زمانی است که اعضا به منافع بیشتری در مقایسه با حالتی که انفرادی فعالیت کنند، دست یابند. در شبکه‌های مجازی، مهمترین مساله مدیریت منافع محدود با توجه به شرایط اعضا است به گونه‌ای که مجموعه نسبت به شرایط داخلی و بیرونی منعطف‌تر شود. گاه ممکن است حتی

1. Self-interested  
2. Virtual network

را نشان می دهد.



(a) جواب ۱



(b) جواب ۲

شکل (۳): نتایج حاصل از دو جواب تصادفی در نمودار گانت

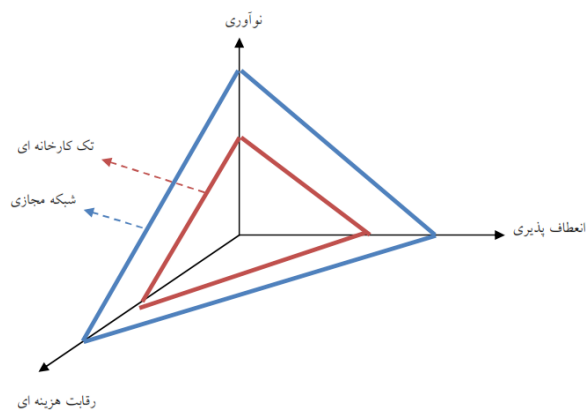
جدول (۲) مقادیر حاصل برای هر یک از  $R$  ها را برای دو جواب نشان داده است. همچنان که مشاهده می شود در حالتی که همه کارخانه ها تابع هدف زمان تکمیل کل کارها دارند، جواب (۲) بر جواب (۱) مسلط است. حال آنکه اگر همه کارخانه ها تابع هدف مجموع زمان های تکمیل را داشته باشند، هر دو جواب، جواب غالبی هستند. در حالت سوم نیز که کارخانه (۱) تابع هدف مجموع زمان های تکمیل و کارخانه (۲) تابع هدف زمان تکمیل کل کارها را دارند باز هم جواب (۲)، جواب غالبی است.

جدول (۲): نتایج حاصل مثال عددی دو کارخانه در شبکه مجازی

$C_{max}(R_2)$	$C_{max}(R_1)$	جواب
90	70	1
90	50	2
$\sum C(R_2)$	$\sum C(R_1)$	جواب
260	235	1
350	230	2
$C_{max}(R_2)$	$\sum C(R_1)$	جواب
90	235	1
90	230	2

#### ۴- الگوریتم چندهدفه فراابتکاری بر پایه جمعیت

با توجه به پیچیدگی شدید این مساله، استفاده از روش های فراابتکاری به خصوص برای حل مسائل با ابعاد بزرگ بسیار مطلوب است. به این منظور در این تحقیق یک روش جستجو نوین که برای اولین بار با یک تکنیک چندهدفه با نام زیرجمعیت در جهت رسیدن به جواب های پارتو ترکیب شده، پیشنهاد شده است. الگوریتم بهینه-



شکل (۲): مقایسه بین کارخانه انفرادی و شبکه مجازی [۱۲]

در این شبکه فرض شده است که دو دسته تابع هدف وجود دارد به گونه ای که گروهی از کارخانه ها تابع هدف زمان تکمیل کل کارها را در تولید داشته و گروهی دیگر تابع هدف مجموع زمان های تکمیل را دارند. در این مطالعه علاوه بر در نظر گرفتن دو حالت از این توابع، حالت سومی نیز در مساله زمانبندی شبکه مجازی تولید در نظر گرفته شده که در آن تابع هدف حداقل کردن هزینه های پردازش، زودکرد و دیرکرد است که البته با در نظر گرفتن تفاوت این هزینه ها در کارخانه های مختلف، مساله جذاب تر شده است. در این حالت نیز پس از حل دقیق مساله در اندازه های کوچک، روش جدیدی در قالب الگوریتم مونت کارلو برای اندازه های بزرگ مساله ارائه شده است.

قبل از طراحی الگوریتم ها، می خواهیم با یک مثال ساده برای ۲ کارخانه ۳ و ۲ ماشینی با ۱۲ کار، نشان دهیم در محیط شبکه مجازی تولید توزیع شده چگونه حتی با یک تابع هدف یکسان نیز بحث جواب های مسلط مطرح است. جدول (۱) مشخصه های عددی مساله نمونه مورد بررسی را نشان می دهد.

جدول (۱) جدول زمان های پردازش کارها در کارخانه های ۱ و ۲

زمان های پردازش	کارهای متعلق به $R1$					
	1	2	3	4	5	6
$p_i^1$	40	50	10	40	30	50
$p_i^2$	20	25	5	20	15	25
زمان های پردازش	کارهای متعلق به $R2$					
	7	8	9	10	11	12
$p_i^1$	50	40	10	30	40	20
$p_i^2$	25	20	5	15	20	10

در این جدول از نمادهای  $R1$  و  $R2$  استفاده شده است تا نشان داده شود کارخانه ها چه تابع هدفی دارند. در این رابطه  $p_i^1$  و  $p_i^2$  نیز به ترتیب نشان دهنده زمان های پردازش در  $R1$  و  $R2$  هستند. شکل (۳) نتایج حاصل از دو جواب تصادفی در قالب نمودار گانت

سازی گروه ذرات، PSO، یک تکنیک بهینه‌سازی است که از رفتار جمعی پرندگان و ماهی‌ها در پیدا کردن غذا الهام گرفته شده است. این الگوریتم در سال 1995 توسط کندی<sup>۱</sup> و ابرهارت<sup>۲</sup> ارائه شد. در این روش، هر نامزد برای جواب مسأله، یک پرنده در فضای جستجو است که ذره<sup>۳</sup> نام دارد. هر ذره دارای یک مقدار شایستگی است که توسط تابع شایستگی<sup>۴</sup> مساله بدست می‌آید. پرنده ای که به غذا نزدیکتر است، شایستگی بیشتری دارد. این روش مانند اکثر روش‌های جستجوی تکاملی، با یک گروه از جواب‌های تصادفی (ذره‌ها) جستجو را به شکل موازی شروع می‌کند و سپس برای یافتن جواب بهینه در فضای مساله، با به هنگام کردن مکان ذره‌ها، به جستجو ادامه می‌دهد. مکان هر ذره در هر تکرار متأثر از دو عامل است. اولین عامل، بهترین موقعیتی است که این ذره تا کنون کسب کرده است و دومین عامل بهترین موقعیتی است که تا به حال در همسایگی این ذره کسب شده است. موقعیت<sup>۵</sup> هر ذره بر اساس این دو عامل به هنگام می‌شود. به عبارت دیگر اعضای جمعیت از طرفی موظفند موقعیت خود را با تبعیت از بهترین عضو جمعیت، در یک شعاع همسایگی، تغییر دهند و از طرف دیگر لازم است بهترین موقعیتی را که تا کنون شخصا تجربه کرده‌اند در حافظه خود نگهداری کرده و تمایلی نیز به سمت آن داشته باشند.

#### ۴-۱- تشکیل زیر جمعیت و وزن‌دهی

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 اولیه خود به چندین زیر-جمعیت<sup>۶</sup> هدف آن است تا از طریق ترکیب روش‌های وزن‌دهی با روش  $L_p$ -متریک مجموع جواب‌های پارتو با تنوع مناسب ایجاد گردد. در این روش با ترکیب این دو در قالب یک روش حل، اولاً مشکل تک جوابه بودن روش  $L_p$ -متریک و ثانیاً مشکل لزوم هم‌مقیاسی در روش وزن‌دهی حل شده است. در نتیجه برآیند ۲ تابع هدف به‌صورت زیر خواهد بود.

$$z = \left[ \omega_1 \left( \frac{f_1(x) - f_1^*}{f_1^*} \right)^p + \omega_2 \left( \frac{f_2(x) - f_2^*}{f_2^*} \right)^p \right]^{\frac{1}{p}}, \quad (1)$$

در رابطه (۱) تعیین مقادیر  $\omega$ ،  $p$  و  $f^*$ ها بسیار مهم است. با توجه به اینکه  $f_1(x)$  و  $f_2(x)$  به‌ترتیب نمایانگر تابع هدف حداکثر زمان تکمیل و مجموع زمان‌های پردازش است،  $\omega_1$  و  $\omega_2$  نیز بترتیب نمایانگر درجه اهمیت این دو هدف است. در این روش برای تعیین

1. Kennedy
2. Eberhart
3. Particle
4. Fitness Function
5. Position
6. Sub-population

$$(\omega_1(t), \omega_2(t)) = (|\sin(2\pi t/R)|, 1 - \omega_1(t)) \quad (2)$$

با استفاده از رابطه (۲) وزن‌ها تخصیص یافته به زیر جمعیت‌ها بصورت سیستماتیک تغییر می‌کند که در آن پارامتر  $t$  شمارنده زیرجمعیت‌ها است و با توجه به اینکه جمعیت اولیه این روش ۵۰۰۰ عضو با ۵۰ زیرجمعیت است، آنگاه  $t = 1, \dots, 100$  بوده و  $R = 400$  است. توجه داشته باشید که برای تمامی  $w$ ها همواره  $0 \leq w_1, w_2 \leq 1$  بوده و مجموع  $w_1$  و  $w_2$  برابر یک می‌باشد.

#### ۴-۲- الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات

در روش بهینه‌سازی گروه ذرات برای هر ذره  $i$ ، یک موقعیت  $X_i$  و یک سرعت<sup>۷</sup>  $V_i$  در نظر گرفته می‌شود. اگر بعد مساله بهینه‌سازی  $n$  فرض شود، بردار موقعیت و بردار سرعت ذره  $i$ ،  $X_{id}$  و  $V_{id}$  به ترتیب بیانگر موقعیت مکانی و سرعت بعد  $d$ م ذره  $i$  است. سرعت و موقعیت ذره  $i$  در تکرار  $t$  به صورت زیر است.

$$V_{id}(t) = w \times V_{id}(t-1) + C_1 \times \text{rand}(P_{id}(t-1) - X_{id}(t-1)) + C_2 \times \text{rand}(P_{gd}(t-1) - X_{id}(t-1)) \quad (3)$$

$$X_{id}(t) = X_{id}(t-1) + V_{id}(t) \quad (4)$$

که در رابطه (۳) وزن اینرسی و  $C_1$  و  $C_2$  مقادیر ثابت مثبت هستند،  $\text{rand}$  تابع تصادفی در بازه  $[0, 1]$  می‌باشد،  $X_{id}$  ذره نام است و  $P_i$  نمایانگر بهترین موقعیت قبلی است (موقعیتی که بهترین مقدار تابع شایستگی را نتیجه داده است).  $g$  اندیس بهترین ذره در میان کل ذرات جمعیت است و  $V_i$  نمایانگر میزان تغییر موقعیت ذره نام است (سرعت). رابطه دوم (۴) مسیر پرواز جمعیتی از ذرات را نشان می‌دهد.

نحوه محاسبه سرعت جدید هر ذره از سه بخش تشکیل شده است: بخش اول معرف اینرسی است که به‌وسیله سرعت فعلی از تغییر سرعت قبلی به‌دست می‌آید. بخش دوم قسمت شناختی است که نمایانگر تفکر خصوصی ذره است که از تجربیات پروازهای گذشته نگهداری می‌شود. بخش سوم قسمت اجتماعی است که نمایانگر همکاری میان ذرات است که از تجربیات پروازهای دست جمعی ذرات به‌دست می‌آید. الگوریتم PSO به لحاظ محتوی ساده، از جهت پیاده‌سازی آسان، و به لحاظ محاسباتی کارآمد می‌باشد. اما دارای ایراداتی نیز هست. در رابطه (۳)،  $w$ ،  $C_1$  و  $C_2$  بایستی مقادیرشان با توجه به ادبیات و بصورت تجربی و یا با استفاده از تکنیک‌های

7. Velocity

تخصیص داده شده به کارخانه های دوم و سوم و توالی آنها در روی هر ماشین را مشخص نمود.

لازم به ذکر است که در این نحو از نمایش حل، توالی کارها بر روی هر ماشین (برای حالاتی که بیش از یک کار به یک ماشین اختصاص یافته) به ترتیب ظاهر شدن اعداد در سطر ماتریس نمایش و از چپ به راست است. با این توضیح برای مثال مذکور می توان نتیجه گرفت که توالی کارها روی ماشین دوم در کارخانه اول به ترتیب  $4 \rightarrow 9$  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 می گردد.

#### ۴-۴- حرکت بر پایه اینرسی

در اینجا ذره علاقمند است بر مبنای وضعیت فعلی، وضعیت آتی خود را شکل دهد. به این منظور از جستجوی محلی در قالب روش های هیوریستیک برای هر ذره استفاده شده است. الگوریتم های هیوریستیک بر پایه یک جواب اولیه کار خود را شروع کرده، به این ترتیب که به محض دریافت جواب اولیه به عنوان هسته الگوریتم محاسباتی، آن را برای الگوریتم های سطح پایین ارسال می کند تا این الگوریتم های سطح پایین جستجوی محلی را با توجه به ساختار همسایگی تعریفی خود برای تعداد تکراری خاص، فضای حل بر پایه جواب دریافتی را جستجو کنند. سپس هر یک از آنها جواب جدید حاصل از جستجوی خود را که ممکن است تابع هدفی بهتر، بدتر یا حتی مساوی با تابع هدف ورودی باشد، برای هسته الگوریتم ارسال می کند. به محض دریافت پاسخها، هسته الگوریتم های هیوریستیک، بهترین الگوریتم ابتکاری و جواب متناظر با آن را از بین تمام دریافتی ها ذخیره می کند. منظور از بهترین الگوریتم ابتکاری سطح پایین، الگوریتمی است که بیشترین بهبود را در تابع هدف جاری ایجاد کرده و یا کمترین بدتر شدن جواب را در شرایطی که هیچکدام از الگوریتم ها نتوانسته باشند جواب فعلی را بهبود دهند، داشته باشد. به این منظور در این مطالعه و با توجه به شرایط زمانبندی در شبکه های مجازی با کارخانه های موازی شامل ماشین های موازی، سه نوع فرآیند جستجوی همسایگی پیشنهاد شده که در عین حال که دارای سرعت بالایی هستند، ساختارهای مختلفی در جهت نیل به جواب به اندازه کافی خوب، دارند. فرآیند جستجوی همسایگی در هر یک از این سه الگوریتم سطح پایین با ارائه شکلی در ادامه توصیف شده است.

#### الگوریتم (۱).

- ۱: ماشین  $i$  را بصورت تصادفی از کارخانه تصادفی  $f$  انتخاب کنید.
- ۲: یک کار و یک موقعیت را در توالی در ماشین  $i$  بصورت تصادفی انتخاب کنید.
- ۳: کار انتخابی را به موقعیت مورد نظر انتقال دهید (شکل ۵).

تنظیمی بدست آید. همچنین این شکل از الگوریتم تنها در محیط پیوسته قابل استفاده است. در اینجا با بهره گیری از مفاهیم موجود در سایر الگوریتم ها، برای مسأله زمانبندی توزیع شده حالت گسسته الگوریتم نوینی ارائه شده است.

#### ۴-۳- نحوه نمایش جواب

در محیط توزیع شده که در آن کارها بین چندین کارخانه تقسیم می شوند، 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 پیچیده تر خواهد بود. بنابراین نحوه نمایش جواب بایستی به گونه ای طراحی شود که این دو مقوله را همزمان برای هر کار نمایش دهد. به این منظور در این مطالعه روشی جدیدی به شرح زیر بر اساس نمایش ماتریسی جواب پیشنهاد شده است.

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 کارخانه های موجود در شبکه تولید باشند، جواب با یک ماتریس  $(n^f + m^f - 1) \times F$  نمایش داده می شود. در این شکل از نمایش جواب هر کارخانه به تعداد  $(m^f - 1)$  شامل علامت "\*" است که در هر سطر برای متمایز کردن یک ماشین از دیگری استفاده می شود. همچنین برای کارخانه مفروض  $k$ ، علامت "-" را برای مسدود کردن تعداد ژن هایی از یک کارخانه که  $(n^f + m^f - 1)$  آن از مقدار حداکثر  $(n^f + m^f - 1)$  کمتر است و به نوعی بلا استفاده می باشد، بکار می گیریم. به عبارت دیگر برای سطر  $k$  ام به تعداد  $(\max_{f \in \{0,1,\dots,F\}} (n^f + m^f) - (n^k + m^k))$  ژن از انتهای سطر بوسیله "-" مسدود می گردد. اعداد درون این ماتریس نشان دهنده شماره کارهاست.

برای درک هر چه بهتر این نحو از نمایش حل، به مثال زیر توجه کنید. شکل (۴) نشان دهنده یک مسأله ۳ کارخانه ای با ۱۲ کار است که به ترتیب در هر کارخانه ۳، ۲ و ۳ ماشین قرار دارد.

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

شکل (۴): نمایش حل در زمانبندی توزیع شده

همچنان که مشاهده می شود از بین این ۱۲ کار، ۴ کار به هر کارخانه اختصاص داده شده است. از بین کارهای ۹، ۱۰، ۴ و ۸ که به کارخانه اول اختصاص یافته است، با توجه به چیدمان "\*" در سطر اول، کار ۱۰ به ماشین اول، کار ۹ و ۴ به ماشین دوم و کار ۸ به آخرین ماشین اختصاص یافته است. به همین ترتیب می توان کارها

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

<b>P1</b>	$f_1$	10	*	9	4	8	*
	$f_2$	5	1	*	7	3	-
	$f_3$	2	*	11	*	12	6
<b>P2</b>	$f_1$	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 به صورت تصادفی عدد صفر یا ۱ را اختصاص دهید.

<b>BT</b>	$f_1$	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 نمایید.

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

نکته اینکه در حذف مقادیر تکراری در ( $P2$ )، بایستی "\*"ها به صورت 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.

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

<b>OS</b>	$f_1$	10	8	7	4	*	*
	$f_2$	5	3	*	6	9	-
	$f_3$	12	*	11	*	2	1

#### ۷-۴- همگرایی

رویه‌های مذکور به ترتیب بر روی هر ذره به صورت متوالی برای موقعیت فعلی هر ذره در هر تکرار از الگوریتم اعمال کرده و این روند تا رسیدن به شرط توقف الگوریتم ادامه خواهد داشت.

#### ۵- تحلیل عملکرد الگوریتم

در این بخش برای اعتبار سنجی کارایی روش‌های پیشنهادی، نتایج حاصل از الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات در مسائل نمونه با ابعاد بزرگ با نتایج به دست آمده از الگوریتم رقابت استعماری

$f$	3	2	1	4	5
	6	7	8	9	10

$f$	2	3	1	4	5
	6	7	8	9	10

شکل (۵): جابجایی حاصل از الگوریتم ۱

#### الگوریتم (۲)

۱: ماشین‌های  $i_1$  و  $i_2$  را بصورت تصادفی از کارخانه تصادفی  $f$  انتخاب کنید.

۲: یک کار و یک موقعیت را به ترتیب از ماشین‌های  $i_1$  و  $i_2$  به صورت تصادفی انتخاب کنید.

۳: کارهای انتخابی را با یکدیگر تعویض کنید (شکل ۶).

$f$	3	2	1	4	5
	6	7	8	9	10

$f$	9	2	1	4	5
	6	7	8	3	10

شکل (۶): جابجایی حاصل از الگوریتم ۲

#### الگوریتم (۳)

۱: کارخانه‌های  $f$  و  $q$  را بصورت تصادفی انتخاب کنید.

۲: یک کار و یک موقعیت را به ترتیب از کارخانه‌های  $f$  و  $q$  بصورت تصادفی انتخاب کنید.

۳: کار انتخابی را به موقعیت مورد نظر انتقال دهید (شکل ۷).

$f$	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
$q$	11	15	13	2
				10
				12
				14

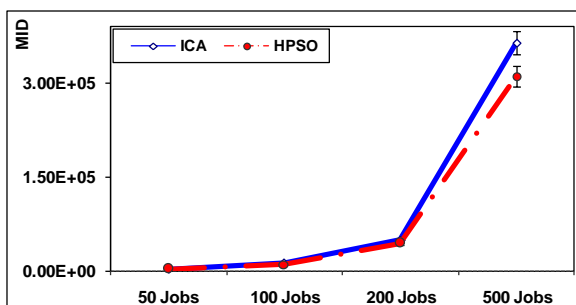
شکل (۷): جابجایی حاصل از الگوریتم ۳

#### ۴-۵- حرکت بر پایه رفتار شناختی

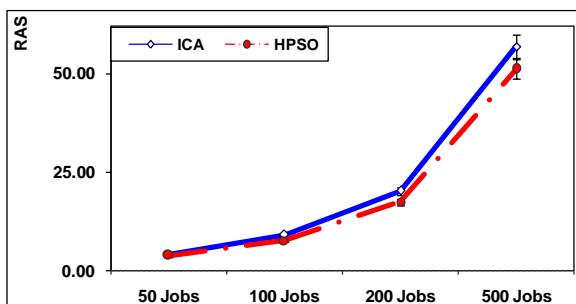
مقدار تابع شایستگی محاسبه شده هر ذره را با  $P_{best}$  آن ذره مقایسه می‌شود. اگر مقدار حاصل از وضعیت کنونی بهتر بود، بهترین موقعیت قبلی را برابر موقعیت کنونی قرار داده می‌شود.

#### ۴-۶- حرکت بر پایه رفتار اجتماعی

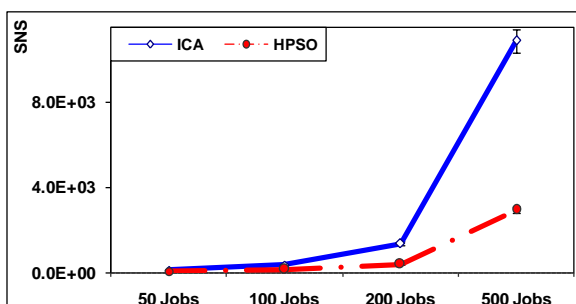
در این بخش به این منظور از روشی استفاده شده است که در آن نوعی تقاطع بین ذره مورد نظر و  $G_{best}$  صورت می‌گیرد تا به نوعی حرکت به سمت بهترین جامعه با تغییری که توسط این عملگر صورت می‌گیرد، انجام شود. ساختار الگوریتمی این عملگر، به صورت زیر پیشنهاد شده است.



شکل (۸): مقایسه الگوریتم در رابطه با معیار MID



شکل (۹): مقایسه الگوریتم در رابطه با معیار RAS



شکل (۱۰): مقایسه الگوریتم در رابطه با معیار SNS

## ۶- نتیجه گیری و پیشنهاد مطالعات آتی

با توجه به آنکه زمانبندی توزیع شده با کارخانه های موازی شامل دوتخصیص (تخصیص کار به کارخانه مناسب و تخصیص کارها به هر ماشین در هر کارخانه) است، می توان نتیجه گرفت که این محیط جزء سخت ترین مسائل در محیط زمانبندی چند کارخانه ای است. در این مقاله محیطی در نظر گرفته شده است که در آن تعدادی شرکت های مجزا به یکدیگر ملحق شده تا یک شبکه تولید چند کارخانه ای را ایجاد نمایند. در اینجا با وجود تک هدفه بودن هر کارخانه، بحث جواب های غالب و مغلوب برای اولین بار در فضای مسائل تک هدفی مطرح شده است. به دلیل  $NP-Hard$  بودن مساله، در این تحقیق الگوریتم ترکیبی بر پایه روش فراابتکاری گروه ذرات پیشنهاد شده و نتایج آن با نتایج الگوریتم ژنتیک مقایسه شده است. نتایج حاصل نشان از کارایی نسبی الگوریتم پیشنهادی دارد. به عنوان مطالعه آتی ارائه الگوریتم های دقیق و تقریبی برای این مساله پیشنهاد می گردد.

پیشنهادی در مرجع [۹] مقایسه شده است. در مقایسات سه معیار اندازه گیری کارایی پیشنهاد شده است. معیار اول فاصله از نقطه ایده آل که بصورت رابطه زیر است.

$$MID = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{n} \quad (5)$$

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  $\sqrt{f_{1i}^2 + f_{2i}^2 + \dots + f_{ki}^2}$  بدست می آید. منظور از  $f_{ki}$  مقدار  $k$  امین تابع هدف در بردار جواب پارتو  $i$  ام است. بدیهی است که برای مجموعه های مورد مقایسه هر قدر که این مقدار کوچکتر باشد، مطلوبیت آن مجموعه بیشتر خواهد بود.

معیار بعدی، معیار درجه توازن در رسیدن همزمان به اهداف است که با توجه به آن اگر حلی تنها برای یک هدف مناسب بوده و برای هدف دیگر عملکرد مناسبی نداشته است مطلوبیت کمی دارد. به این منظور در این مطالعه، رابطه زیر پیشنهاد شده است.

$$RAS = \frac{\sum_{i=1}^n \left[ \left( \frac{f_{1i} - F_i}{F_i} \right) + \left( \frac{f_{2i} - F_i}{F_i} \right) \right]}{n} \quad (6)$$

که در آن  $F_i = \min\{f_{1i}, f_{2i}\}$  است.

معیار آخر ارزیابی جوابها در محیط پارتو به صورت زیر تعریف می شود که بزرگتر بودن آن مطلوبیت بیشتری دارد.

$$SNS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (MID - c_i)^2}{n-1}} \quad (7)$$

## ۵-۱- نتایج عددی

جدول (۳) نتایج حاصل از مقایسات گزارش شده است. در این بخش هر یک از ۴۰ مساله نمونه دارای ۳ کارخانه با مشخصات  $m^f = (3,4,5)$  و  $v^f \in [1,1.2]$  است. این جدول مقادیر حاصل از هر مساله نمونه با توجه به معیارهای معرفی شده را نشان می دهد.

با توجه به نتایج به دست آمده از جدول (۳) می توان نتیجه گرفت با در نظر گرفتن معیارهای کارایی MID و RAS، الگوریتم بهینه سازی گروه ذرات کارایی بهتری در مقایسه با الگوریتم رقابت استعماری دارد ولی با توجه به SNS، الگوریتم رقابت استعماری پراکندگی بهتری دارد. همچنین همان طور که در شکل (۸) ملاحظه می شود در رابطه با معیار MID با افزایش اندازه مساله کارایی هر دو الگوریتم بدتر می شود و این روند در رابطه با معیار RAS نیز کاملاً مشهود است (شکل ۹). با توجه به اینکه هر چه پراکندگی جواب های بدست آمده بیشتر باشد کارایی الگوریتم متناظر بالاتر است، می توان از شکل (۱۰) نتیجه گرفت که با افزایش تعداد کارها کارایی هر دو الگوریتم بهبود یافته است و البته روند این بهبود برای الگوریتم رقابت استعماری مشهودتر است.



جدول (۳). نتایج محاسباتی در مسائل نمونه

الگوریتم‌ها و شاخص‌ها						مساله نمونه	تعداد کارها
RAS		SNS		MID			
HPSO	ICA	HPSO	ICA	HPSO	ICA		
3.974517	3.705247	61.73958	108.2107	2936.875	2950.148	1	
3.195717	3.558261	42.48485	113.3078	2507.983	3014.335	2	
3.577722	4.265749	50.49588	109.4842	2727.398	3208.944	3	
3.628711	3.686812	50.81846	151.3635	2892.848	3475.151	4	
3.420005	4.137561	42.13402	70.57677	2425.252	2710.711	5	۵۰ کار
3.695344	4.162395	49.41756	96.99644	2781.478	2709.029	6	
3.793995	3.983538	51.83525	115.8486	2736.425	2962.233	7	
3.892165	3.952305	67.32136	128.4008	2776.561	3175.742	8	
4.051057	4.019392	66.17448	98.14687	2608.544	2703.477	9	
3.577059	4.110544	51.30548	130.8757	2544.544	3176.164	10	
7.880689	8.831562	120.4819	535.0371	9856.022	13028.56	1	
7.275817	8.900164	150.7603	258.6877	10677.06	11827.33	2	
7.792346	9.214895	133.298	340.3616	10554.26	11288.11	3	
7.348805	9.527916	117.7951	334.6789	9579.414	11501.86	4	
7.684618	8.662425	103.6051	500.4691	10709.81	12684.85	5	۱۰۰ کار
7.962749	8.917713	124.5501	266.7731	10286.26	11823.93	6	
7.668813	9.697217	138.6592	279.5398	9744.079	11995.32	7	
7.102523	9.172855	135.7479	353.5363	10202.77	11091.98	8	
7.999316	9.067017	158.3127	367.4041	9692.022	10607.47	9	
7.401184	8.470711	126.4024	293.6086	9465.034	10959.6	10	
16.38122	20.38871	324.9024	1396.711	46722.82	51990.93	1	
16.50915	21.34232	414.9402	1061.15	43694.15	49703.51	2	
17.81649	19.90109	383.4387	1209.795	46809.67	46882.17	3	
19.02141	19.09867	349.7608	1110.699	41969.87	45218.81	4	۲۰۰ کار
15.96434	18.42178	342.5119	535.244	41707.66	44699.41	5	
17.85283	19.79285	361.9265	1514.124	42074.76	50216.8	6	
17.50773	21.24869	395.2465	2031.125	45755.44	51486.04	7	
17.67612	19.58066	382.1803	1514.256	40300.81	51361.02	8	
17.49161	19.78281	431.2123	1223.377	43693.28	47323.22	9	
17.81424	22.00402	344.4709	2055.6	45873.54	55521.19	10	
48.37231	54.32091	2510.629	10366.75	297942.1	347930.2	1	
50.77301	56.02767	2077.247	6815.164	285086.8	303925.9	2	
52.5568	60.18064	3208.309	10122.23	312693.9	366334.8	3	
50.74113	57.10618	2632.913	8955.947	308731.5	340883.7	4	
52.65552	57.02423	3220.379	8714.262	283517.3	339361.8	5	
49.26652	57.45735	2716.187	14374.71	336959.5	415983.4	6	۵۰۰ کار
53.46308	54.13113	2819.892	14946.28	320366.5	379052.9	7	
48.57054	60.71043	2916.392	9133.495	323483.3	336243.2	8	
49.22128	54.75859	2878.521	8918.298	301355.1	356870.4	9	
55.91911	57.80802	4373.763	16545.15	341367.2	457585.4	10	

## مراجع

- [5] Cicirello, V.A., Smith, S.F. (2004). Wasp-like agents for distributed factory coordination, *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 8: 237–266.
- [6] Hooker, J.N. (2005). A hybrid method for the planning and scheduling, *Constraints*, 10(4): 385–401.
- [7] Chen, Z.L., Pundoor, G. (2006). Order assignment and scheduling in a supply chain, *Operations Research*, 54(3): 555–572.
- [8] Carroll, T.E., Grosu, D. (2006). Selfish multi-user task scheduling, *The Fifth International Symposium on Parallel and Distributed Computing (ISPDC '06)*, Timisoara, pp. 99–106.
- [9] Behnamian, J., Fatemi Ghomi, S.M.T. (2013). Incorporating transportation times in multi-agent production network scheduling, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, (In press), DOI: 10.1080/0951192X.2012.684716
- [1] Pinedo, M.L. (2008). *Scheduling Theory, Algorithms, and Systems*, 3rd ed., Springer, NY.
- [2] Chung, S.H., Lau, H.C.W., Ho, G.T.S., Ip W.H. (2009). Optimization of system reliability in multi-factory production networks by maintenance approach, *Expert Systems with Applications*, 36: 10188–10196.
- [3] Chung, S.H., Lau, H.C.W., Choy, K.L., Ho, G.T.S., Tse, Y.K. (2010). Application of genetic approach for advanced planning in multi-factory environment, *International Journal of Production Economics*, 127: 300–308.
- [4] Cochran, J.K., Horng, S.M., Fowler J.W., (2003). A multi-population genetic algorithm to solve multi-objective scheduling problems for parallel machines, *Computers & Operations Research*, 30: 1087–1102.

- [10] Gao, J., Chen, R. (2011). A hybrid genetic algorithm for the distributed permutation flowshop scheduling problem, *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 4(4): 497-508.
- [11] Wiendahl, J.H.P., Helms, K., Lutz, S. (1999). Supply net–new methods for capacity flexibilization in production networks, In: P. G. Maropoulos and J. A. McGeough, eds. *Proceedings of the 15th International Conference on Computer-Aided Production Engineering*, UK, Durham, pp. 609 – 614.
- [12] Bartlett, C.A., Ghoshal, S. (1998). *Managing across borders: The transnational solution*, 2<sup>th</sup> ed. HBS Press, Boston, MA.