



پژوهش‌های نوین در تصمیم‌گیری

دوره ۸، شماره ۱، بهار ۱۴۰۲، صص ۱۴۴-۱۱۴

نوع مقاله: پژوهشی

زمان‌بندی و تعیین اندازه انباشته هم‌زمان در محیط جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با در نظر گرفتن بافرهای میانی و عمومی

فاطمه مهینی^۱، سمیه قندی بیدگلی^{۲*}

۱. دانش‌آموخته کارشناسی مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

۲. استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۱۷

چکیده

به دلیل جایگاه ویژه زمان‌بندی و تعیین اندازه انباشته سیستم‌های جریان کارگاهی در مراکز تولیدی، این مسائل در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه واقع شده‌اند. در محیط‌های صنعتی واقعی ممکن است ظرفیت بافر بین دو ایستگاه متوالی با توجه به ابعاد فیزیکی محصولات و کمبود فضا محدود باشد. محدود بودن ظرفیت بافر ممکن است سبب بلوکه کردن شود. با توجه به اهمیت این موضوع، در تحقیق حاضر مسئله زمان‌بندی و تعیین اندازه انباشته هم‌زمان جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با محدودیت‌های بافر بین ایستگاه‌های کاری و بافر عمومی بررسی شده است که به صورت چند دوره‌ای و چند محصولی بوده و ظرفیت ماشین‌ها نیز محدود می‌باشد. همچنین از بین بافرها، بافرهای میانی برای پر شدن اولویت بالاتری نسبت به بافر عمومی دارند. برای مسئله مورد بحث یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط ارائه گردیده است. در این مدل هدف، کمینه‌سازی هزینه‌های تولید، نگهداری و تأمین خارجی می‌باشد. برای حل مدل از نرم‌افزار گمز استفاده شده است. با توجه به پیچیدگی مدل و NP-hard بودن مسئله مورد بررسی، جهت حل مسائل با ابعاد بزرگ الگوریتم فراابتکاری کلونی زنبور عسل مصنوعی گسسته ترکیبی پیشنهاد شده است. به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، به حل مسائل نمونه عددی در اندازه‌های مختلف با استفاده از این الگوریتم، نرم‌افزار گمز الگوریتم ژنتیک و همچنین ترکیب الگوریتم شبکه عصبی هاپفیلد با الگوریتم بازپخت شبیه‌سازی شده پرداخته شده است. نتایج محاسباتی، موید کارایی بسیار خوب الگوریتم مذکور برای حل مسئله مورد بررسی می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: زمان‌بندی و تعیین اندازه انباشته هم‌زمان، جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر، بافرهای میانی، بافر عمومی، الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی گسسته ترکیبی.



۱- مقدمه و بیان مسئله

زمان‌بندی تولید حوزه وسیعی از مسائل اکثر سیستم‌های تولیدی و خدماتی را تحت پوشش قرار داده است. به همین دلیل ساختار این نوع مسائل بسیار متنوع هستند. هدف زمان‌بندی تولید، تخصیص منابع محدود در طول زمان برای انجام گروهی از فعالیت‌های مختلف است. این نوع مسائل دارای ویژگی‌های گوناگون، اهداف و اولویت‌های مختلف هستند، به همین دلیل مدل‌سازی این گونه مسائل بسیار مشکل است. زمان‌بندی سیستم جریان کارگاهی جزء یکی از پیچیده‌ترین مباحث بهینه‌سازی ترکیبی به شمار می‌رود. در مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی کلاسیک، یک‌سری از ماشین‌ها با عملکرد و انواع متفاوت در مراحل مختلف قرار داشته و هر مرحله فقط شامل یک نوع ماشین می‌باشد. کارها ترتیب پردازش یکسانی روی تمام ماشین‌ها دارند که ثابت و از پیش تعیین شده است. در این مسئله فرض بر این است که تنها یک مسیر پردازش برای هر کار وجود دارد. مسئله جریان کارگاهی^۱ در واقع زمان‌بندی مجموعه‌ای از کارها روی مجموعه‌ای از ماشین‌ها با هدف کاهش یک معیار معین است. این مسئله برای اولین بار توسط جانسون^۲ در سال ۱۹۵۴ معرفی و فرمولبندی شد [۱]. همچنین جانسون الگوریتمی برای یافتن پاسخ بهینه مسئله مذکور در شرایط وجود ۲ ماشین و شرایط وجود سه ماشین در موارد محدود ارائه داد. بعدها یک الگوریتم ابتکاری به نام NEH (Nawaz- Enscore-Ham) برای حل مساله زمان‌بندی جریان کارگاهی در شرایط وجود m ماشین و n کار معرفی گردید [۲]. از آنجا که مسئله FSP یک مسئله NP-Hard می‌باشد [۳]، تلاش‌های فراوانی برای توسعه الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری برای حل این مسئله انجام شده است. به عنوان مثال می‌توان به الگوریتم‌های ژنتیک، شبیه‌سازی تبرید و ازدحام ذرات [۴]، ازدحام ذرات جدید [۵] و نهنگ ترکیبی [۳] اشاره نمود.

مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر^۳ نقش بسیار مهمی در برنامه‌ریزی و تولید و نیز تخصیص منابع در صنعت دنیای امروز دارد. این مسئله به زمان‌بندی انجام مجموعه‌ای از کارهای شامل یک‌سری عملیات مشابه می‌پردازد. هر عملیات می‌تواند روی مجموعه‌ای از ماشین‌آلات موازی انجام شود. وجود انعطاف‌پذیری در مسائل زمان‌بندی راهکار موثری برای رفع مشکلات گوناگونی، افزایش تولید، بهبود عملکرد سیستم و ایجاد مزیت رقابتی می‌شود که البته در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری در این مسائل باعث افزایش پیچیدگی می‌شود. به طوری که این مسئله در زمره مسائل NP-hard طبقه‌بندی گردیده و دستیابی به پاسخ بهینه حتی در ابعاد کوچک دشوار و بسیار زمان‌بر است. این مسئله برای اولین بار در سال ۱۹۷۱ مورد مطالعه قرار گرفت [۶]. پس از آن روش‌های مختلفی برای حل مساله مذکور ارائه گردیدند که به طور کلی به ۴ دسته زیر قابل دسته‌بندی می‌باشند [۷]:



- روش‌های دقیق شامل روش شاخه و کران.
- روش‌های ابتکاری شامل قوانین تخصیص پویا و تکامل دیفرانسیل گسسته.
- روش‌های فراابتکاری شامل الگوریتم ژنتیک، بازپخت شبیه‌سازی شده و روش جستجوی ممنوع.
- روش‌های ترکیبی شامل ترکیبی از روش‌های رقابت امپریالیستی تطبیقی و بازپخت شبیه‌سازی شده مبتنی بر جمعیت و ترکیبی از روش کلونی زنبورهای عسل مصنوعی گسسته بهبودیافته و تکامل دیفرانسیل جدید و جستجوی محلی متغیر اصلاح شده.
تعیین اندازه انباشته^۲ به معنی تعیین اندازه سفارش‌ها به منظور پاسخگویی به تقاضای مشتریان و تصمیم‌گیری در این مورد می‌باشد که در چه دوره‌ای و چه مقدار محصول تولید شود که هزینه‌های عملیاتی و تولید حداقل گردد. یک دسته نشان‌دهنده مقدار محصولی است که روی یک ماشین به صورت پیوسته و بدون انقطاع ساخته می‌شود. تصمیماتی که در زمینه تعیین اندازه انباشته گرفته می‌شود مستقیماً بر عملکرد و کارایی سیستم تأثیرگذار بوده و در نتیجه در توان تولیدی کارخانه جهت رقابت در بازار بسیار مهم است. یکی از مسائل مهم در سیستم‌های جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر، موضوع زمان‌بندی و تعیین اندازه انباشته به صورت همزمان می‌باشد. تغییرات بین کارهای موجود در یک خط تولید اغلب منجر به تحمیل زمان و هزینه آماده‌سازی می‌گردد. بنابراین به منظور جلوگیری از تغییرات غیرضروری، سفارش‌های مشتریان باید در دسته‌هایی متمرکز گردند. برای اولین بار یک مدل ریاضی غیرخطی برای مسئله زمان‌بندی و تعیین اندازه انباشته همزمان چند سطحی و چند ماشین توسعه یافته و از مفهوم محصول سایه (محصول مجازی) استفاده گردید [۸]. اما به دلیل پیچیدگی بالای مسئله برای آن روش حلی ارائه نگردید. محمدی و همکاران یک مدل ریاضی جدید برای مسئله تعیین اندازه انباشته و زمان‌بندی جریان کارگاهی ارائه کردند. در این مدل نیز از مفهوم محصول سایه استفاده شد. در این مقاله پنج روش حل بر پایه بهینه‌سازی عدد صحیح مختلط (MIP) ارائه گردید [۹]. بابایی و همکاران مدلی ریاضی برای مسئله اندازه انباشته و زمان‌بندی یکپارچه در یک سیستم جریان کارگاهی با ظرفیت محدود، راه‌اندازی وابسته به توالی، امکان انتقال راه‌اندازی و کمبود ارائه دادند و برای یافتن جواب‌های بهینه یا نزدیک بهینه در زمان قابل قبول، یک الگوریتم ژنتیک و کران پایین معرفی کردند [۱۰]. رضائیان و همکاران یک مدل ریاضی جدید برای فرموله کردن مسئله تعیین اندازه انباشته و زمان‌بندی همزمان در محیط تولیدی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با محدودیت منابع پیشنهاد دادند [۱۱]. نادری و محمدی از الگوریتم ترکیبی بهینه‌سازی میرایی ارتعاش با الگوریتم‌های رقابت امپریالیستی و شبیه‌سازی تبرید برای حل مسئله زمان‌بندی و اندازه انباشته اقتصادی در جریان کارگاهی جایگشتی توزیع شده با کارخانه‌های متفاوت استفاده نموده‌اند [۱۲]. همچنین می‌توان به تحقیقاتی در زمینه زمان‌بندی و تعیین اندازه انباشته همزمان در صنایع مختلفی مانند صنعت



خودروسازی [۱۳] و صنعت پتروشیمی [۱۴] اشاره نمود. در مقالاتی مانند [۱۵] از رویکرد بهینه‌سازی استوار جهت حل مسئله تعیین اندازه انباشته و زمان‌بندی همزمان در محیط جریان کارگاهی با زمان‌های پردازش غیرقطعی استفاده گردیده است. همچنین در [۱۶] مروری جامع بر تحقیقات انجام شده در زمینه تعیین اندازه انباشته و زمان‌بندی همزمان در محیط جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر انجام شده است. مسئله زمان‌بندی با محدودیت بافر برای سناریوهای تولید عملی از ارزش قابل توجهی برخوردار بوده و از طرفی از نظر تئوری بسیار چالش برانگیز است. در سال‌های اخیر، مسئله مذکور توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است. انواع محدودیت بافر به شرح زیر می‌باشد:

۱. **بافرهای میانی**^۵: در این حالت میان هر ایستگاه با ایستگاه بعدی آن فضای محدودی به عنوان بافر در نظر گرفته می‌شود. حداکثر تعداد بافرها همواره یکی از تعداد ایستگاه‌ها کمتر است. در سال ۲۰۱۵ ترکیب الگوریتم کلونی زنبورهای مصنوعی و جستجوی ممنوع جهت زمان‌بندی استفاده گردید. هدف حداقل نمودن حداکثر زمان تکمیل کارها بوده و بافرها با ظرفیت مشخص و به صورت میانی بودند [۱۷]. همچنین محققان در تحقیق [۱۸] به دنبال بهینه کردن ظرفیت بافر یک خط تولید با چند ایستگاه کاری با تابع هدف حداقل کردن استفاده از بافر بوده و از روش حل شاخه و کران برای حل این مسئله استفاده نمودند. در واقع در پژوهش مذکور ظرفیت بافرها نامشخص می‌باشد [۱۸].

۲. **بافر چند صغه**^۶: در این حالت بافرهای میانی هر یک شامل چند بافر می‌باشند به صورتی که بعد از هر ایستگاه کاری به تعداد ماشین‌های موجود در ایستگاه کاری بعدی بافر موجود می‌باشد. در واقع به ازای هر ماشین یک بافر موجود می‌باشد. در سال ۲۰۱۸ جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با بافر چندصغه بررسی گردید. آنها از الگوریتم دو بخشی برای حل مسئله مذکور استفاده نمودند که بخش اول آن الگوریتم تکامل تفاضلی بوده و بخش دوم آن الگوریتم تخمین فضای بافر می‌باشد [۱۹].

۳. **بافرهای میانی همراه با بافر عمومی**^۷: در خطوط تولیدی مانند خط تولید خودرو که اندازه محصولات بزرگ بوده و به علت کمبود فضا نمی‌توان ظرفیت بافرهای میانی را زیاد در نظر گرفت، علاوه بر بافرهای میانی از یک بافر عمومی نیز استفاده می‌گردد. در واقع فضایی خارج از خط تولید به عنوان بافر عمومی در نظر گرفته می‌شود. در سال ۲۰۱۸ اولین مقاله با موضوع بافر عمومی در محیط جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر ارائه گردید. خط تولید مسئله موردنظر به این‌گونه می‌باشد که بافرهای میانی با ظرفیت محدود بین ایستگاه‌ها وجود داشته و علاوه بر این بافرها یک بافر عمومی در خارج از خط تولید قرار دارد که پس از اینکه بافرهای میانی پر شدند، محصولات تولید شده در هر ایستگاه با هزینه‌ای مشخص به بافر عمومی منتقل می‌گردند. بافرهای میانی دارای ظرفیت مشخص بوده ولی ظرفیت بافر عمومی متغیر می‌باشد [۲۰]. مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی با بافرهای میانی همراه با بافر عمومی در [۲۱]



در نظر گرفته شده است که در آن ماشین‌ها دارای زمان آماده‌سازی می‌باشند. با ترکیب الگوریتم شبکه عصبی هاپفیلد با الگوریتم بازپخت شبیه‌سازی شده توانایی الگوریتم برای پرش از نقاط بهینه محلی افزایش یافته است. در جدول (۱) خلاصه‌ای از مرور ادبیات گذشته ارائه گردیده است.

جدول ۱. خلاصه‌ای از مرور ادبیات گذشته

مرجع	[۶]	[۸]	[۹]	[۱۰]	[۱۱]	[۱۲]	[۱۳]	[۱۴]	[۱۵]	[۱۷]	[۱۸]	[۱۹]	[۲۰]	[۲۱]	پژوهش حاضر
	تا [۷]	[۵]													
زمان‌بندی جریان کارگاهی	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
انعطاف‌پذیری	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
تعیین اندازه انباشته							✓	✓	✓						✓
بافر میانی										✓	✓				✓
بافر عمومی															✓

با تجزیه و تحلیل مطالعات انجام شده در زمینه زمان‌بندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر، موارد زیر را می‌توان بیان نمود:

- مسئله زمان‌بندی و تعیین اندازه انباشته همزمان در محیط جریان کارگاهی در تحقیقات کمی بررسی شده است. در حالی که مدل‌سازی این مسئله برای محیط‌های تولیدی و خدماتی امری ضروری می‌باشد.
- مقالات موجود در زمینه زمان‌بندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با محدودیت بافر بدون در نظر گرفتن فرضیات واقعی از قبیل تعیین اندازه انباشته انجام شده‌اند.
- در صنایعی مانند صنعت خودروسازی زمانی که ظرفیت بافرهای میانی به حد بالایی می‌رسد، قطعه کار تکمیل شده ایستگاه قبل نمی‌تواند وارد بافر شود و در نتیجه انسداد (بلوکه شدن) خط تولید اتفاق می‌افتد. این امر منجر به طولانی شدن زمان ناخالص تولید و کاهش مدت زمان استفاده از ماشین‌ها می‌گردد. با اضافه نمودن بافر عمومی با ظرفیت متغیر به بافرهای میانی با ظرفیت مشخص و محدود، مشکل انسداد خط تولید در محیط جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر تا حد زیادی قابل حل می‌باشد.
- مسئله زمان‌بندی و تعیین اندازه انباشته همزمان در محیط جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با در نظر گرفتن محدودیت بافرهای میانی و عمومی که برای برخی کاربردهای عملی مانند محیط‌های ساخت و تولید پیشرفته نیاز می‌باشد، تا کنون در هیچ تحقیقی در نظر گرفته نشده است.



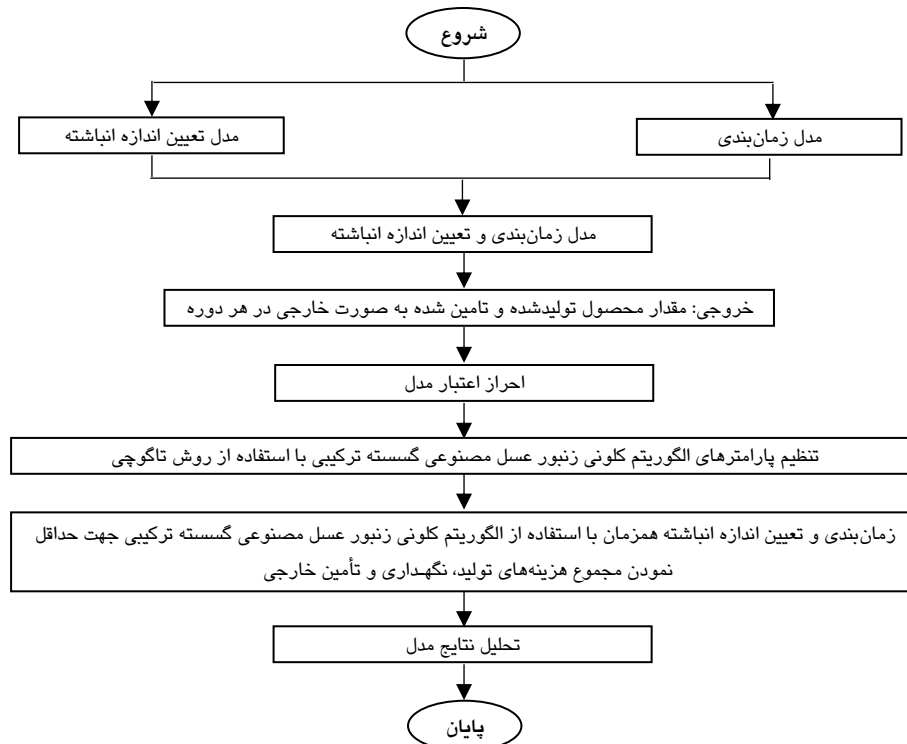
با توجه به این موارد و گپ تحقیقاتی ذکرشده، نوآوری‌های اصلی این مقاله به صورت زیر می‌باشند:

۱- در این مقاله برای نخستین بار مسئله زمان‌بندی و تعیین اندازه انباشته همزمان در محیط جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با در نظر گرفتن محدودیت بافرهای میانی و عمومی در نظر گرفته شده است. این امر به گسترش مرزهای تحقیقاتی در حوزه تئوری زمان‌بندی کمک می‌نماید.

۲- به منظور تسهیل کاربردهای عملی مسئله مذکور، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی مختلط برای این مسئله توسعه داده شده است.

۳- با توجه به پیچیدگی ذاتی موجود در مسئله مورد نظر، یک الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی^۸ برای حل این مسئله به صورت موثر و کارآمد ارائه شده است.

در شکل (۱) فلوچارت متدولوژی تحقیق نشان داده شده است. در ابتدا مسئله زمان‌بندی و تعیین اندازه انباشته همزمان در محیط جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با در نظر گرفتن محدودیت بافرهای میانی و عمومی مدل‌سازی می‌گردد (بخش ۲). خروجی این مدل مقدار محصول تولیدشده و تامین شده به صورت خارجی در هر دوره می‌باشد. سپس اصول و اجزای الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی گسسته ترکیبی برای مسئله مورد نظر تعیین گردیده (بخش ۳) و سپس مسائل نمونه عددی در اندازه‌های مختلف با استفاده از الگوریتم مذکور اجرا می‌گردند. در نهایت نتایج حاصل از اجرای این الگوریتم تحلیل می‌گردند (بخش ۴). در بخش ۵، نکات مهم انجام شده در مقاله به صورت خلاصه مرور و نتایج به دست آمده توضیح داده شده‌اند. همچنین پیشنهاداتی برای تحقیقات آتی بیان گردیده است.



شکل ۱. فلوچارت متدولوژی تحقیق



۲- مسئله زمان‌بندی و تعیین اندازه انباشته همزمان در محیط جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با در نظر گرفتن محدودیت بافرهای میانی و عمومی

یک مسئله زمان‌بندی و تعیین اندازه انباشته همزمان در محیط جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با در نظر گرفتن محدودیت بافرهای میانی و عمومی می‌تواند به صورت n کار $\{J_1, J_2, \dots, J_n\}$ توصیف گردد که بایستی با ترتیب مشخص و یکسانی از مرحله (ایستگاه) اول به آخر پردازش گردند. در هر مرحله چندین ماشین موازی، غیرمشابه و مستقل از هم وجود دارد که این باعث انعطاف‌پذیری در مسئله می‌شود. بین هر ایستگاه و ایستگاه بعدی آن بافری با ظرفیت مشخص و محدود وجود دارد. همچنین علاوه بر بافرهای میانی از یک بافر عمومی نیز استفاده می‌گردد. در واقع فضایی خارج از خط تولید به عنوان بافر عمومی در نظر گرفته می‌شود. هدف تخصیص کارها در هر مرحله به ماشین‌های مناسب و تعیین توالی عملیات روی ماشین‌های هر مرحله و همچنین تعیین مقدار محصول تولید شده و تأمین شده به صورت خارجی در هر دوره به نحوی است که مجموع هزینه‌های تولید، نگهداری و تأمین خارجی حداقل گردد.

۳- مدل ریاضی مسئله زمان‌بندی و تعیین اندازه انباشته همزمان در محیط جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با در نظر گرفتن محدودیت بافرهای میانی و عمومی

در این بخش، مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی مختلط پیشنهادی تشریح خواهد شد.

۳-۱- فرضیات مدل

فرضیات مدل به صورت زیر می‌باشند:

- تمام کارها در زمان صفر برای پردازش موجود هستند.
- همه ماشین‌ها از زمان صفر در دسترس می‌باشند.
- تقاضای محصولات نهایی شناخته شده است.
- زمان حمل و نقل بین مراحل مختلف و همچنین بین مراحل و بافر عمومی ناچیز بوده و برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود.
- از بین بافرها، بافرهای میانی برای پر شدن اولویت بالاتری نسبت به بافر عمومی دارند. به منظور تحقق این امر، هزینه‌ای جهت ارسال کارها به بافر عمومی تعریف گردیده است.
- در این مسئله برای محدودیت‌های بافر بازه زمانی t به زمان‌های کوچک t' تقسیم شده است.
- هر کار در هر لحظه تنها روی یک ماشین پردازش گردیده و هر ماشین در هر لحظه تنها قادر



- به پردازش یک کار بوده و انقطاع کارها مجاز نمی‌باشد.
- موجودی در کارگاه مجاز بوده و در صورت بیشتر بودن تقاضا، از طریق قرارداد جنبی تأمین می‌شود.
- هزینه های تولید، نگهداری و تأمین خارجی برای محصولات مختلف مشخص است.

۳-۲- پارامترهای مدل

پارامترهای مدل به صورت زیر تعریف می‌شوند:

تعداد دوره‌ها (افق برنامه‌ریزی)	T	۱
تعداد زمان‌های کوچک در هر دوره	t'_{max}	۲
تعداد محصولات مختلف	N	۳
تعداد مراحل (ایستگاه‌های) تولید	S	۴
تعداد ماشین‌های موازی در مرحله s	n_s	۵
ظرفیت در دسترس برای m امین ماشین از مرحله s در دوره t	C_{smt}	۶
تقاضا برای محصول j در پایان دوره t	d_{jt}	۷
ظرفیت مورد نیاز برای تولید یک واحد از محصول j روی ماشین m در	b_{smjt}	۸
هزینه مواد موردنیاز برای تولید یک واحد محصول j در دوره t	mc_{jt}	۹
بهای کالای در جریان ساخت برای تولید یک واحد محصول j در دوره t	cuc_{jt}	۱۰
هزینه ناشی از توقف یک واحد محصول j در بافر در زمان کوچک t'	$sibc_{jt}$	۱۱
هزینه پردازش یک واحد محصول j در مرحله s روی ماشین m در دوره	p_{jsmt}	۱۲
هزینه نگهداری یک واحد محصول j در دوره t	h_{jt}	۱۳
هزینه تأمین خارجی یک واحد محصول j در دوره t	CE_{jt}	۱۴
موجودی محصول j در آغاز افق برنامه‌ریزی	ini_j	۱۵
عدد ثابت بزرگ	M	۱۶
حجم یا سطح هر واحد از محصول j	V_j	۱۷
حداکثر حجم یا مساحت موجود بین مراحل s و $s+1$	$maxV_s$	۱۸
حداکثر ظرفیت بافر عمومی	$pcap$	۱۹
هزینه ارسال یک واحد محصول j از مرحله s به بافر عمومی	$scos_j$	۲۰

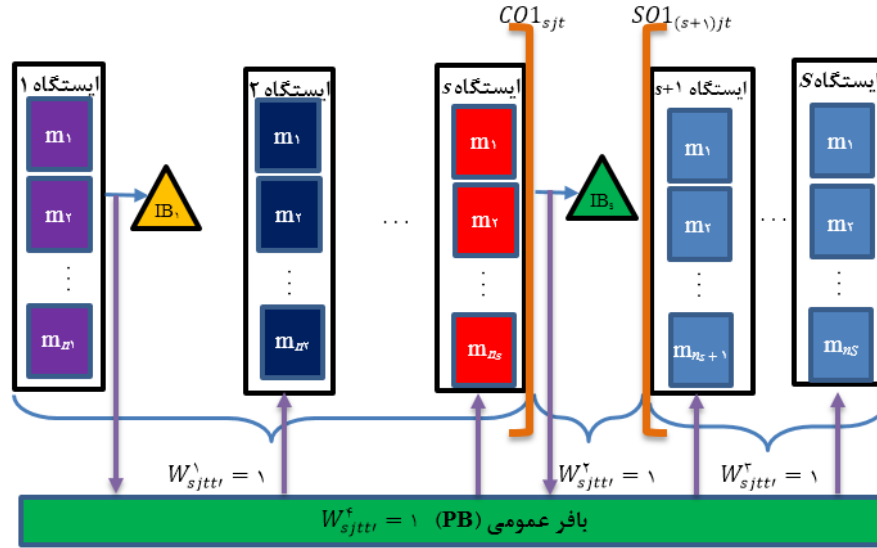


۳-۳- متغیرهای تصمیم مدل

متغیرهای تصمیم مدل به صورت زیر تعریف می‌شوند:

مقدار محصول Z تولید شده در دوره t (اندازه انباشته)	X_{jt}	۱
میزان موجودی محصول Z در انتهای دوره t	I_{jt}	۲
مقدار محصول Z تأمین شده به صورت خارجی در دوره t (اندازه انباشته)	XE_{jt}	۳
زمان شروع پردازش محصول Z روی ماشین m در مرحله s در دوره t	SO_{smjt}	۴
زمان خاتمه پردازش محصول Z روی ماشین m در مرحله s در دوره t	CO_{smjt}	۵
زمان شروع پردازش محصول Z در مرحله s در دوره t	$SO1_{sjt}$	۶
زمان خاتمه پردازش محصول Z در مرحله s در دوره t	$CO1_{sjt}$	۷
متغیر باینری ($\lambda=1$)، اگر محصول Z در دوره t تولید شود، در غیر این صورت ($\lambda=0$)	Z_{jt}	۸
متغیر باینری ($\lambda=1$)، اگر محصول Z برای پردازش به ماشین m ام مرحله s در دوره t	Q_{smjt}	۹
متغیر باینری ($\lambda=1$)، اگر عملیات راه‌اندازی روی ماشین m در مرحله s در دوره t از محصول i به محصول Z انجام پذیرد، در غیر این صورت ($\lambda=0$)	Y_{smijt}	۱۰
طول زمان انتظار محصول Z پس از مرحله s در دوره t	W_{sjt}	۱۱
متغیر باینری ($\lambda=1$)، اگر محصول Z در دوره t و در زمان t' روی یکی از ماشین‌های مرحله s یا مراحل قبل از آن در حال پردازش باشد، در غیر این صورت ($\lambda=0$)	$W_{sjtt'}$	۱۲
متغیر باینری ($\lambda=1$)، اگر محصول Z در دوره t و در زمان t' بین دو مرحله s و $(s+1)$	$W_{sjtt'}^y$	۱۳
متغیر باینری ($\lambda=1$)، اگر محصول Z در دوره t و در زمان t' روی یکی از ماشین‌های مرحله $(s+1)$ یا پس از آن در حال پردازش باشد، در غیر این صورت ($\lambda=0$)	$W_{sjtt'}^x$	۱۴
متغیر باینری ($\lambda=1$)، اگر محصول Z در دوره t و در زمان t' بین دو مرحله s و $(s+1)$	$W_{sjtt'}^z$	۱۵
اندازه بافر بین مرحله s و $(s+1)$ در زمان t' از دوره t	$IBS_{stt'}$	۱۶
اندازه بافر عمومی در زمان t' از دوره t	$PBS_{tt'}$	۱۷

در شکل (۲) ارتباط بین متغیرهای باینری وضعیت محصول Z و زمان خاتمه پردازش محصول در ایستگاه (مرحله) s و زمان شروع پردازش آن در ایستگاه $(s+1)$ در زمان t' از دوره t نشان داده شده است.



شکل ۲. ارتباط بین متغیرهای بایرنی $W_{sjtt'}^1$ تا $W_{sjtt'}^s$ و متغیرهای $CO1_{sjt}$ و $SO1_{(s+1)jt}$

۳-۴- تابع هدف و محدودیت‌های مدل

$$\begin{aligned}
 \text{Min } TC = & \sum_{j=1}^n \sum_{s=1}^S \sum_{m=1}^{n_s} \sum_{t=1}^T p_{jsmt} \cdot X_{jt} \\
 & + \sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^T mc_{jt} \cdot X_{jt} + \sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^T h_{jt} \cdot I_{jt} + \sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^T CE_{jt} \cdot XE_{jt} \\
 & + \sum_{j=1}^n \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T \sum_{t'=1}^{t'_{max}} X_{jt} \cdot W_{sjtt'}^s \cdot sco_{js} \\
 & + \sum_{j=1}^n \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T \sum_{t'=1}^{t'_{max}} X_{jt} \cdot (w_{sjtt'}^s + w_{sjtt'}^s) \cdot sibo_{js}
 \end{aligned} \tag{۱}$$

s.t

$$I_{j(t-1)} + X_{jt} - I_{jt} + XE_{jt} = d_{jt} \quad \forall j, t \tag{۲}$$



$$X_{jt} \leq M \cdot Z_{jt} \quad \forall j, t \quad (3)$$

$$\sum_{m=1}^{n_s} Q_{smjt} = Z_{jt} \quad \forall s, j, t \quad (4)$$

$$CO_{smjt} \leq C_{smt} \quad \forall s, m, j, t \quad (5)$$

$$\sum_{m=1}^{n_s} CO_{smjt} \cdot Q_{smjt} = \sum_{m=1}^{n_s} SO_{smjt} \cdot Q_{smjt} + \sum_{m=1}^{n_s} b_{smjt} \cdot X_{jt} \cdot Q_{smjt} \quad \forall s, j, t \quad (6)$$

$$\sum_{m=1}^{n_s} SO_{smjt} \cdot Q_{smjt} \geq \sum_{m=1}^{n_{(s-1)}} CO_{(s-1)mjt} \cdot Q_{(s-1)mjt} \quad \forall j, t, s = 2, \dots, S \quad (7)$$

$$SO_{smjt} \cdot Q_{smjt} \geq CO_{smit} \cdot Q_{smit} - M \cdot (1 - Y_{smijt}) \quad \forall s, m, i, j, t, i \neq j \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n Y_{smijt} \geq \sum_{j=1}^n Q_{smjt} - 1 \quad \forall s, m, t \quad (9)$$

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n Y_{smijt} \leq Q_{smjt} \quad \forall s, m, j, t \quad (10)$$

$$\sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n Y_{smijt} \leq Q_{smit} \quad \forall s, m, i, t \quad (11)$$

$$I_{j0} = I_{ini_j} \quad \forall j \quad (12)$$

$$W_{sjt} = SO1_{(s+1)jt} - CO1_{sjt} \quad \forall j, t = 2, \dots, T \quad (13)$$

$$CO1_{sjt} = \sum_{m=1}^{n_s} CO_{smjt} \cdot Q_{smjt} \quad \forall s, j, t \quad (14)$$

$$SO1_{sjt} = \sum_{m=1}^{n_s} SO_{smjt} \cdot Q_{smjt} \quad \forall s, j, t \quad (15)$$

$$IBS_{stt'} = \sum_{j=1}^n V_j \cdot X_{jt} \cdot w_{sijt'}^x \quad \forall s, t, t' \quad (16)$$

$$IBS_{stt'} \leq \max V_s \quad \forall s, t, t' \quad (17)$$



$$PBS_{tt'} = \sum_{j=1}^n \sum_{s=1}^S V_j \cdot X_{jt} \cdot w_{sjtt'}^{\xi} \quad \forall t, t' \quad (18)$$

$$PBS_{tt'} \leq pcap \quad \forall t, t' \quad (19)$$

$$ord(t') \leq CO1_{s jt} + M(1 - w_{sjtt'}^{\lambda}) \quad \forall s, j, t, t' \quad (20)$$

$$ord(t') \geq SO1_{(s+1)jt} - M(1 - w_{sjtt'}^{\gamma}) \quad \forall s, j, t, t' \quad (21)$$

$$ord(t') \geq \epsilon + CO1_{s jt} + M(w_{sjtt'}^{\gamma} + w_{sjtt'}^{\gamma} + w_{sjtt'}^{\xi} - 1) \quad \forall s, j, t, t' \quad (22)$$

$$ord(t') \leq SO1_{(s+1)jt} - M(w_{sjtt'}^{\lambda} + w_{sjtt'}^{\gamma} + w_{sjtt'}^{\xi} - 1) \quad \forall s, j, t, t' \quad (23)$$

$$w_{sjtt'}^{\lambda} + w_{sjtt'}^{\gamma} + w_{sjtt'}^{\gamma} + W_{sjtt'}^{\xi} = Z_{jt} \quad \forall s, j, t, t' \quad (24)$$

$$SO_{smjt}, CO_{smjt}, SO1_{s jt}, CO1_{s jt} \text{ و } W_{s jt} \geq \cdot \quad \forall s, m, j, t \quad (25)$$

$$X_{jt}, XE_{jt}, I_{jt}, IBS_{stt'}, PBS_{tt'} \geq \cdot, Integer \quad \forall s, m, j, t \quad (26)$$

$$Y_{smijt}, Q_{smjt}, Z_{jt}, W_{s jt}^{\lambda}, W_{s jt}^{\gamma}, W_{s jt}^{\gamma}, W_{s jt}^{\xi} = \{0,1\} \quad \forall s, m, j, t \quad (27)$$

عبارت (۱) تابع هدف مسئله بوده و بیانگر این است که باید مجموع هزینه‌های تولید، نگهداری و تأمین خارجی کمینه‌سازی شود. محدودیت (۲) محدودیت بالانس جریان برای تأمین کردن تقاضاست. محدودیت (۳) رابطه بین تولید برنامه‌ریزی شده و متغیر باینری را تعریف می‌کند که نشان می‌دهد محصول j در دوره t تولید می‌شود یا خیر. محدودیت (۴) نشان‌دهنده این است که در صورتی که محصول j در دوره t تولید شود، این محصول برای پردازش تنها به یکی از ماشین‌های مرحله s می‌رود. محدودیت (۵)، محدودیت ظرفیت برای هر ماشین است. محدودیت (۶)، رابطه بین زمان شروع و زمان تکمیل پردازش برای محصولات تولیدی برنامه‌ریزی شده در هر مرحله تولید در هر دوره است. محدودیت (۷) مجبور می‌کند زمان شروع پردازش j از زمان محصول برنامه‌ریزی شده زمانی رخ دهد که پردازش این محصول روی مرحله تولیدی قبل خاتمه یافته باشد. محدودیت (۸) موجب می‌شود زمان شروع پردازش یک کار روی ماشین تخصیص‌یافته در یک مرحله تولیدی مشخص، پس از تکمیل شدن محصول قرارگرفته در موقعیت قبل آن روی همان ماشین در مرحله تولیدی موردنظر رخ دهد. محدودیت‌های (۹) تا (۱۱)، توالی محصولات در محیط تولیدی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر را تعیین می‌کنند. طبق محدودیت‌های (۱۰) و (۱۱)، اگر محصولات مشخصی



به ماشین m در مرحله s در دوره t تخصیص یافته باشند، توالی عملیات بر روی آن ماشین شامل محصولات موردنظر است. محدودیت (۱۲) بیان می‌کند موجودی اولیه در ابتدای افق برنامه‌ریزی برابر با مقادیر ابتدایی باشد. محدودیت (۱۳) طول زمان انتظار محصول Z_{jt} پس از مرحله s در دوره t را نشان می‌دهد. محدودیت (۱۴) زمان خاتمه پردازش محصول Z_{jt} در مرحله s در دوره t و محدودیت (۱۵) زمان شروع پردازش محصول Z_{jt} در مرحله $s+1$ در دوره t را نشان می‌دهد. محدودیت (۱۶) اندازه بافر بین مراحل s و $s+1$ در زمان t' از دوره t را بیان می‌کند. محدودیت (۱۷)، بیانگر این است که اندازه بافر بین مراحل نباید از حداکثر حجم یا مساحت موجود بین مراحل s و $s+1$ بیشتر شود. محدودیت (۱۸) اندازه بافر عمومی در زمان t' از دوره t را بیان می‌کند. محدودیت (۱۹)، بیانگر این است که اندازه بافر عمومی نباید از حداکثر ظرفیت بافر عمومی بیشتر شود. محدودیت‌های (۲۰) تا (۲۴)، بیانگر وضعیت محصول Z_{jt} در زمان t' از دوره t می‌باشد. همان‌طور که از این محدودیت‌ها و شکل (۲) مشخص می‌باشد، در صورتی که محصول Z_{jt} در دوره t تولید شود (یعنی $Z_{jt} = 1$ باشد) یکی از چهار وضعیت زیر برای محصول مذکور پیش می‌آید:

۱- $W_{sjttr}^1 = 1$: محصول Z_{jt} در دوره t و در زمان t' روی یکی از ماشین‌های مرحله s یا مراحل قبل از آن در حال پردازش می‌باشد.

۲- $W_{sjttr}^2 = 1$: محصول Z_{jt} در دوره t و در زمان t' بین دو مرحله s و $(s+1)$ در بافر میانی می‌باشد.

۳- $W_{sjttr}^3 = 1$: محصول Z_{jt} در دوره t و در زمان t' روی یکی از ماشین‌های مرحله $(s+1)$ یا پس از آن در حال پردازش می‌باشد.

۴- $W_{sjttr}^4 = 1$: محصول Z_{jt} در دوره t و در زمان t' بین دو مرحله s و $(s+1)$ در بافر میانی می‌باشد. روابط (۲۵) تا (۲۷) جهت تعریف متغیرهای تصمیم مسئله ایجاد گردیده‌اند.

شایان ذکر است که مدل ارائه شده برگرفته از مدل مسئله زمان‌بندی و تعیین اندازه انباشته همزمان در محیط جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر معرفی شده در مرجع [۲۲] می‌باشد. نوآوری‌های صورت گرفته در مدل این مقاله، اضافه‌نمودن پارامترهای ۹ تا ۱۱ و ۱۷ تا ۲۰، متغیرهای تصمیم ۶ تا ۷ و ۱۱ تا ۱۷، محدودیت‌های (۱۳) تا (۲۷) به مدل پایه و همچنین در نظرگرفتن هزینه‌های مواد موردنیاز برای تولید محصول، بهای تمام‌شده کالای در جریان ساخت و هزینه ناشی از توقف محصول در بافرهای میانی و عمومی در تابع هدف مدل جهت نزدیک‌تر شدن هر چه بیشتر آن به واقعیت می‌باشد. اعتبارسنجی مدل مذکور با استفاده از حل مثال‌های عددی که در بخش نتایج محاسباتی توضیح داده خواهند شد بررسی گردیده و موردتایید قرار گرفت.



۴- اصول و اجزای الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی گسسته ترکیبی برای

مسئله مورد بررسی

از آنجا که مسئله مورد نظر در این مقاله یک مسئله سخت می‌باشد، در این پژوهش یک الگوریتم فراابتکاری کلونی زنبور عسل مصنوعی گسسته ترکیبی جهت حل مسائلی با ابعاد بزرگ توسعه داده شده است. دلیل انتخاب این الگوریتم برای مسئله مورد بررسی این است که الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی گسسته با موفقیت جهت حل مسائل عملی بهینه‌سازی همچون زمان‌بندی جریان کارگاهی با جریان زیاد [۲۳] و زمان‌بندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با محدودیت بافر میانی [۱۷] به کار برده شده است. در این بخش در ابتدا ساختار و مراحل الگوریتم مذکور ارائه گردیده و سپس اجزای این الگوریتم جهت حل مسئله زمان‌بندی و تعیین اندازه انباشته همزمان در محیط جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با در نظر گرفتن بافرهای میانی و عمومی توضیح داده خواهد شد.

۵- ساختار و مراحل الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی

الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی یک راهکار بهینه‌سازی است که رفتار یک کلونی زنبور عسل را شبیه‌سازی می‌کند و برای اولین بار در سال ۲۰۰۵ برای بهینه‌سازی پارامتر واقعی ارائه شده است [۲۴]. این الگوریتم با الهام از رفتارهای جستجوی زنبورهای عسل واقعی در اصل برای مسائل بهینه‌سازی پیوسته طراحی شده است. در یک کلونی زنبور عسل واقعی، برخی از وظایف توسط افراد متخصص انجام می‌شود. زنبورها سعی می‌کنند با تقسیم کار و خودسازمان‌دهی، مقدار شهد تخلیه شده به انبارهای غذا در کندو را به حداکثر برسانند. کلونی زنبورهای مصنوعی در الگوریتم ABC شامل سه گروه زنبورها به نام‌های زنبورهای کارگر، زنبورهای ناظر و زنبورهای دیده‌بان است. زنبورهای کارگر روی گردآوری غذا و آوردن آن به کندو از یک منبع غذایی خاص کار می‌کنند. زنبورهای ناظر در میان کارگرها گشت می‌زنند تا تشخیص دهند یک منبع غذایی همچنان ارزش استفاده دارد یا خیر. در واقع زنبورهای ناظر، زنبورهای کارگر را در منابع غذایی گردآوری‌کرده‌شان مورد نظارت قرار می‌دهند و از میان منابع غذایی موجود با بیشترین میزان شهد، یک منبع را انتخاب می‌کنند. در صورت خالی شدن یک منبع غذایی، زنبوران کارگر یا ناظر به زنبورهای دیده‌بان مبدل شده و به جستجوی تصادفی برای کشف منابع غذایی جدید می‌پردازند. زنبورهای ناظر و دیده‌بان را زنبورهای بیکار نیز می‌نامند. یک منبع غذایی به عنوان جوابی در فضای جستجو تعریف گردیده و تعداد منابع غذایی در ابتدا برابر با تعداد زنبورهای موجود در کندو است. میزان شهد هر منبع غذایی در واقع متناسب با مقدار تابع هدف در آن منبع می‌باشد. مراحل الگوریتم عبارتند از:



۱. ایجاد جمعیت اولیه.
۲. فرستادن زنبورهای کارگر جهت بهره‌برداری از منابع غذایی.
۳. قرار دادن زنبورهای ناظر در منابع غذایی بر اساس میزان شهد آنها.
۴. حرکت زنبورهای دیده‌بان برای جستجوی تصادفی و کشف منابع غذایی جدید.
۵. ذخیره کردن بهترین منبع غذایی یافت شده تاکنون.
۶. بررسی شرط توقف الگوریتم: در صورت عدم برقراری شرط توقف، ادامه الگوریتم از مرحله ۲.

۶- الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی گسسته ترکیبی توسعه داده شده برای مسئله

مورد بررسی

در این بخش اجزای مهم الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی گسسته ترکیبی توسعه داده شده برای حل مسئله زمان‌بندی و تعیین اندازه انباشته همزمان در محیط جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با در نظر گرفتن بافرهای میانی و عمومی توضیح داده خواهد شد.

۶-۱- نحوه نمایش جواب در الگوریتم توسعه داده شده

یکی از مولفه‌های مهم در الگوریتم‌های فراابتکاری نحوه نمایش جواب می‌باشد. ساختار نمایش جواب، در مسائل مختلف، متفاوت بوده و متناسب با ویژگی‌های مسئله مورد بررسی، تعریف می‌گردد. به دلیل ماهیت پیوسته الگوریتم ABC پایه و از آنجا که ساختار نمایش مسئله زمان‌بندی و تعیین اندازه انباشته جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر به صورت گسسته می‌باشد، استفاده از روشی مناسب جهت تبدیل دامنه پیوسته به مقادیر گسسته جهت ایجاد یک جواب امکان‌پذیر امری مهم و ضروری می‌باشد. برای مسئله مورد بررسی در این پژوهش، از دو ماتریس \bar{A} و $\bar{L}ot$ استفاده شده است که به صورت یک ماتریس $T \times n$ می‌باشند که در آن T نشان‌دهنده تعداد دوره‌ها و n نیز تعداد کل کارها است. در واقع، سطر t ام از ماتریس Π بیانگر ترتیب پردازش کارها در تمامی مراحل در دوره t بوده و همچنین سطر t ام از ماتریس Lot نشان‌دهنده اندازه انباشته محصولات مختلف به ترتیب توالی کارها در دوره t می‌باشد. از آنجا که الگوریتم ABC در یک دامنه پیوسته کار می‌کند، ساختار جواب برای این الگوریتم و در نتیجه اعداد موجود در دو ماتریس مذکور بایستی به صورت مقادیر تصادفی در بازه صفر و یک باشند. به عنوان مثال در شکل (۳) این ماتریس‌ها برای مثالی با ۶ محصول و ۳ دوره نشان داده شده‌اند.



توالی	۱	۲	۳	۴	۵	۶
دوره ۱	۰,۷۱	۰,۲۳	۰,۹۳	۰,۸۹	۰,۹۹	۰,۵۷
دوره ۲	۰,۰۴	۰,۳۹	۰,۱۹	۰,۹۱	۰,۹۶	۰,۲۸
دوره ۳	۰,۵۹	۰,۳۲	۰,۱۶	۰,۴۵	۰,۷۸	۰,۹۶

ماتریس $\bar{\Pi}$

توالی	۱	۲	۳	۴	۵	۶
دوره ۱	۰,۵۵	۰,۱۱	۰,۶۳	۰,۸۲	۰,۹۹	۰,۴۵
دوره ۲	۰,۱۵	۰,۴۱	۰,۵۷	۰,۷۳	۰,۲۸	۰,۸۸
دوره ۳	۰,۵۶	۰,۴۲	۰,۱۷	۰,۷۱	۰,۹۵	۰,۳۵

ماتریس \bar{Lot}

شکل ۳. ماتریس‌های $\bar{\Pi}$ و \bar{Lot} برای مثالی با ۶ محصول و ۳ دوره

به منظور تبدیل مقادیر پیوسته موجود در این دو ماتریس به مقادیر گسسته جهت ایجاد یک جواب امکان‌پذیر متناظر با هر یک از این ماتریس‌ها، دو ماتریس $\bar{\Pi}$ و \bar{Lot} با مقادیر گسسته بایستی ایجاد گردند. با توجه به این توضیحات در ادامه نحوه تبدیل مقادیر هر یک از ماتریس‌ها در ساختار پیوسته به ساختار گسسته توضیح داده می‌شود.

۶-۲- تبدیل مقادیر ماتریس با ساختار پیوسته $\bar{\Pi}$ به ماتریس با ساختار گسسته Π :

برای این تبدیل بایستی ابتدا مقادیر موجود در هر سطر از ماتریس $\bar{\Pi}$ به صورت صعودی مرتب گردند. ترتیب پردازش محصولات در هر دوره به صورت کوچکترین عدد تا بزرگترین عدد در سطر مربوطه در داخل این ماتریس است. به عنوان مثال توالی پردازش محصولات برای اولین دوره (اولین سطر از ماتریس $\bar{\Pi}$ از شکل (۳)) به ترتیب از چپ به راست به صورت ۲-۶-۴-۵-۱-۳ خواهد بود. زیرا عدد متناظر با کار ۲ در ماتریس $\bar{\Pi}$ ، کوچکترین عدد در میان تمامی شش عدد بوده و به همین دلیل به عنوان اولین محصول پردازش خواهد شد. به همین ترتیب توالی سایر محصولات برای دوره ۱ بر اساس مقدار عدد متناظر در سطر اول این ماتریس به صورت صعودی مشخص می‌گردد.

۶-۳- تبدیل مقادیر ماتریس با ساختار پیوسته \bar{Lot} به ماتریس با ساختار گسسته Lot :

با فرض اینکه مقادیر موجود در ماتریس \bar{Lot} مقادیری در بازه $[0, 1]$ باشند، با استفاده از رابطه زیر می‌توان مقادیر ماتریس مذکور را به مقادیر گسسته برای ماتریس Lot تبدیل نمود:

$$Lot(t, j) = [d_{\pi(j)t} \times \bar{lot}(t, j)] \quad (28)$$

که در آن $Lot(t, j)$ و $\bar{lot}(t, j)$ به ترتیب مقادیر موجود در سطر t و ستون j از ماتریس‌های Lot و \bar{Lot} می‌باشند. در واقع $Lot(t, j)$ نشان‌دهنده اندازه انباشته j امین محصول موجود در توالی در دوره t می‌باشد. در رابطه (۲۸) مقدار $d_{\pi(j)t}$ بیانگر میزان تقاضای j امین محصول موجود در توالی در دوره t می‌باشد. همچنین $[x]$ بیانگر بزرگترین عدد صحیح کوچکتر یا مساوی x می‌باشد. به عنوان



مثال با توجه به مقدار $Lot(1, 5)$ در شکل (۳) که برابر با مقدار ۰.۹۹ می‌باشد و همچنین با این فرض که میزان تقاضای پنجمین محصول موجود در توالی در دوره ۱ (یعنی محصول شماره ۶) برابر با ۱۸۰ عدد باشد، مقدار $Lot(1, 5)$ به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$Lot(1, 5) = [d_{\pi(5)1} \times \bar{Lot}(1, 5)] = [d_{11} \times 0.99] = [180 \times 0.99] = 178$$

با توجه به این توضیحات در شکل (۴) ماتریس‌های با ساختار گسسته Π و Lot معادل با ماتریس‌های با ساختار پیوسته شکل (۳) برای مثالی با ۶ کار و ۳ دوره نشان داده شده‌اند. لازم به ذکر است که میزان تقاضای محصولات شماره ۱ تا ۶ در تمامی دوره‌ها به ترتیب برابر با ۱۰۰، ۱۵۰، ۱۴۰، ۱۲۰، ۲۰۰ و ۱۸۰ عدد محصول می‌باشد. در شکل (۴) عدد ۵ در سطر اول و ستون سوم از ماتریس Π بیان‌کننده این است که کار شماره ۵، سومین کاری می‌باشد که در دوره ۱ پردازش می‌گردد. همچنین عدد ۸۸ در سطر اول و ستون سوم از ماتریس Lot بیانگر این است که اندازه انباشته محصول شماره ۳ در دوره ۱ برابر با ۸۸ عدد محصول می‌باشد.

توالی	۱	۲	۳	۴	۵	۶
دوره ۱	۳	۱	۵	۴	۶	۲
دوره ۲	۱	۴	۲	۵	۶	۳
دوره ۳	۴	۲	۱	۳	۵	۶

ماتریس Π

توالی	۱	۲	۳	۴	۵	۶
دوره ۱	۷۷	۱۱	۱۳۶	۹۸	۱۷۸	۶۷
دوره ۲	۱۵	۴۹	۸۵	۱۴۶	۵۰	۱۲۳
دوره ۳	۶۷	۶۳	۱۷	۹۹	۱۹۰	۴۵

ماتریس Lot

شکل ۴. ماتریس‌های Π و Lot برای مثالی با ۶ محصول و ۳ دوره

شایان ذکر است که با در نظر گرفتن ترتیب کارهای قرار گرفته در هر دوره، در هر مرحله ماشینی که زودتر در دسترس باشد برای تخصیص کار مورد نظر انتخاب می‌شود. همچنین با توجه به ظرفیت بافرهای میانی و عمومی و اندازه انباشته محصولات در هر دوره، زمان‌بندی تولید محصولات مختلف و اندازه بافرها در زمان‌های کوچک موجود در هر دوره تعیین می‌گردد. جهت ایجاد یک جواب امکان‌پذیر سه شرط زیر بایستی برقرار باشند:

۱- هر کار در هر لحظه تنها روی یک ماشین پردازش گردیده و هر ماشین در هر لحظه تنها یک کار را پردازش نماید.

۲- کل زمان مورد استفاده از ماشین‌های مختلف در هر مرحله و هر دوره \square از ظرفیت در دسترس ماشین مورد نظر در آن مرحله و دوره تجاوز نکند.



۳- اندازه بافرهای میانی مراحل مختلف و بافر عمومی در زمان‌های کوچک موجود در هر دوره، از ظرفیت بافرهای میانی مراحل موردنظر و بافر عمومی در آن زمان کوچک و دوره تجاوز نکند.

۴-۶- نحوه ایجاد جمعیت اولیه در الگوریتم توسعه داده شده

شایان ذکر است که تعداد منابع غذایی با پارامتر N_{POP} تعیین می‌شود که نشان‌دهنده زنبورهای کارگر یا زنبورهای ناظر است. در این مقاله روش ابتکاری NEH [۲] و دو روش ابتکاری مبتنی بر آن برای ساختن نیمی از جمعیت اولیه استفاده شده‌اند. یکی از این روش‌ها روش NEH_WPT نام دارد که تفاوت آن با روش NEH در این است که در آن کارها به صورت افزایشی مرتب می‌گردند نه کاهشی [۲۵]. علاوه بر این، در صورتی که کارها در روش NEH به ترتیب تصادفی مرتب گردند، روش ابتکاری تصادفی به دست آمده که تحت عنوان روش NEH_RAN شناخته می‌شود برای مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی به خوبی کار می‌کند [۲۶]. در الگوریتم پیشنهادی ما، دو راه‌حل تولیدشده توسط روش‌های NEH و NEH_WPT در جمعیت اولیه گنجانده شده، $2 - N_{POP} \times 0.5$ جواب با استفاده از روش NEH_RAN ایجاد گردیده و باقی‌مانده جمعیت اولیه (یعنی نیمی از جمعیت اولیه) به صورت تصادفی ایجاد می‌گردند. این امر منجر به ایجاد جواب‌های اولیه با کیفیت و متنوع می‌گردد.

۵-۶- مرحله زنبورهای کارگر

برای هر جواب موجود در جمعیت، ابتدا یک زنبور کارگر استفاده می‌شود. بنابراین تعداد N_{POP} زنبور کارگر در ابتدا موجود می‌باشند. در این مرحله، از دو اپراتور جایگذاری^۱ و PMX^1 برای یافتن منبع غذایی همسایه از منبع غذایی فعلی استفاده می‌شود. اپراتور جایگذاری بدین صورت عمل می‌کند که یک موقعیت به تصادف در ماتریس‌های Π و Lot انتخاب گردیده و محصول موجود در موقعیت مذکور به همراه اندازه انباشته آن به یک موقعیت تصادفی دیگر (متفاوت از موقعیت اولیه) منتقل می‌گردند. همچنین در اپراتور PMX که بر روی دو جواب اعمال می‌گردد، دو موقعیت به تصادف انتخاب شده و تمام مقادیر ماتریس‌های Π و Lot بین این دو موقعیت برای دو جواب با یکدیگر جابجا می‌شوند. در نهایت مقادیر تکراری موجود در سایر موقعیت‌های این دو جواب اصلاح می‌گردند. نحوه کار مرحله زنبورهای کارگر بدین صورت است که برای هر زنبور کارگر، یکی از جواب‌های موجود در جمعیت به تصادف انتخاب گردیده و اپراتور جایگذاری به تعداد N_{Ins} بار بر روی جواب انتخابی اعمال می‌گردد. سپس در بین N_{Ins} جواب ایجادگردیده تنها جوابی حفظ می‌گردد که دارای کمترین مقدار تابع هدف باشد. پس از آن اپراتور PMX بر روی جواب اولیه و بهترین جواب ایجادشده با استفاده از اپراتور جایگذاری اعمال



گردیده و دو جواب جدید ایجاد می‌گردند. در نهایت در بین این ۴ جواب، جواب با کمترین مقدار تابع هدف انتخاب گردیده و جایگزین جواب اولیه می‌گردد.

۶-۶- مرحله زنبورهای ناظر

برای هر جواب موجود در جمعیت زنبورهای کارگر، یک زنبور ناظر متناظر ایجاد می‌گردد. بنابراین تعداد N_{POP} زنبور ناظر در نهایت موجود می‌باشند. در این مرحله، از دو اپراتور جایگذاری و تعویض^{۱۱} برای بهبود منابع غذایی فعلی استفاده می‌شود. اپراتور تعویض بدین صورت عمل می‌کند که دو موقعیت به تصادف در ماتریس‌های Π و Lot انتخاب گردیده و محصولات موجود در موقعیت‌های مذکور به همراه اندازه انباشته آنها با یکدیگر جابجا می‌گردند. نحوه کار مرحله زنبورهای ناظر بدین صورت است که برای هر زنبور کارگر، ابتدا اپراتور جایگذاری به تعداد N_{Ins} بار بر روی آن اعمال می‌گردد. سپس در صورت بهبود جواب، اپراتور تعویض به تعداد N_{Swa} بار بر روی جواب بهبودیافته اعمال می‌گردد. دوباره در صورت بهبود جواب، اپراتور جایگذاری بر روی جواب بهبودیافته اعمال می‌گردد. این فرآیند تا زمانی ادامه می‌یابد که دیگر نتوان با استفاده از اپراتورهای جایگذاری یا تعویض کیفیت جواب را بهبود داد. در این صورت بهترین جواب یافت شده به عنوان زنبور ناظر در نظر گرفته شده و جایگزین زنبور کارگر انتخابی می‌گردد.

۶-۷ - مرحله زنبورهای دیده‌بان

شایان ذکر است که در این تحقیق تعداد زنبورهای دیده‌بان مشابه مقاله [۲۷] $0.1 \times N_{POP}$ در نظر گرفته شده است. وظیفه این زنبورها افزایش تنوع و پراکندگی جمعیت و جلوگیری از گرفتار شدن در جواب بهینه محلی می‌باشد. در این مرحله، از اپراتور معکوس^{۱۲} برای یافتن و ایجاد منابع غذایی جدید استفاده می‌شود. اپراتور معکوس بدین صورت عمل می‌کند که دو موقعیت به تصادف در ماتریس‌های Π و Lot انتخاب گردیده و محصولات موجود بین دو موقعیت مذکور به همراه اندازه انباشته آنها با یکدیگر جابجا می‌گردند. نحوه کار مرحله زنبورهای دیده‌بان بدین صورت است که در ابتدا دو زنبور ناظر به تصادف از جمعیت زنبورهای ناظر انتخاب گردیده (به عنوان مثال زنبورهای ناظر a و b) و مقدار تابع هدف آنها با یکدیگر مقایسه می‌گردند. سپس اپراتور معکوس به تعداد N_{Inv} بار بر روی جواب بدتر (به عنوان مثال زنبور ناظر b) اعمال گردیده و جواب حاصل جایگزین جواب اولیه (جواب b) می‌گردد.



۶-۸- تنظیم پارامترهای الگوریتم HDABC توسعه داده شده

از آنجا که خروجی الگوریتم‌های فراابتکاری به شدت به مقادیر ورودی آنها وابسته است، در این مقاله برای تنظیم پارامترهای الگوریتم HDABC از روش تاگوچی استفاده گردیده است. ۴ پارامتر قابل تنظیم در این الگوریتم عبارت از اندازه جمعیت (N_{pop})، تعداد دفعات اعمال اپراتور جایگذاری (N_{Ins})، تعداد دفعات اعمال اپراتور تعویض (N_{Swa}) و تعداد دفعات اعمال اپراتور معکوس (N_{Inv}) می‌باشند که برای هر یک از این پارامترها، ۳ سطح از مقادیر مختلف تعریف گردیدند (جدول (۲)). بنابراین تعداد حالات ایجاد شده عبارت از 3^4 یا ۸۱ حالت می‌باشد. روش تاگوچی برای یافتن بهترین مقادیر این پارامترها، این حالت‌ها را به ۹ حالت نشان داده شده در جدول (۳) کاهش می‌دهد [۲۸].

جدول ۲. پارامترهای الگوریتم HDABC و سطوح هر یک از آنها

سطوح	N_{pop}	N_{Ins}	N_{Swa}	N_{Inv}
۱	$0.1 \times n$	۳	۴	۳
۲	n	۴	۵	۴
۳	$1.2 \times n$	۵	۶	۵

جدول ۳. حالت‌های پیشنهادی روش تاگوچی و مقادیر تابع هدف متناظر با آنها

حالت	N_{pop}	N_{Ins}	N_{Swa}	N_{Inv}	مقدار تابع هدف
۱	$0.1 \times n$	۳	۴	۳	۳۴۱۷۲,۶۵
۲	$0.1 \times n$	۴	۵	۴	۳۶۲۲۶,۶۱
۳	$0.1 \times n$	۵	۶	۵	۳۴۹۱۵,۰۹
۴	N	۳	۵	۵	۳۳۳۵۴,۰۲
۵	N	۴	۶	۳	۳۴۸۵۶,۳۵
۶	N	۵	۴	۴	۳۶۲۶۶,۴۹
۷	$1.2 \times n$	۳	۶	۴	۳۲۱۱۹,۳۱
۸	$1.2 \times n$	۴	۴	۵	۳۶۱۹۲,۱۶
۹	$1.2 \times n$	۵	۵	۳	۳۳۳۰۴,۷۶

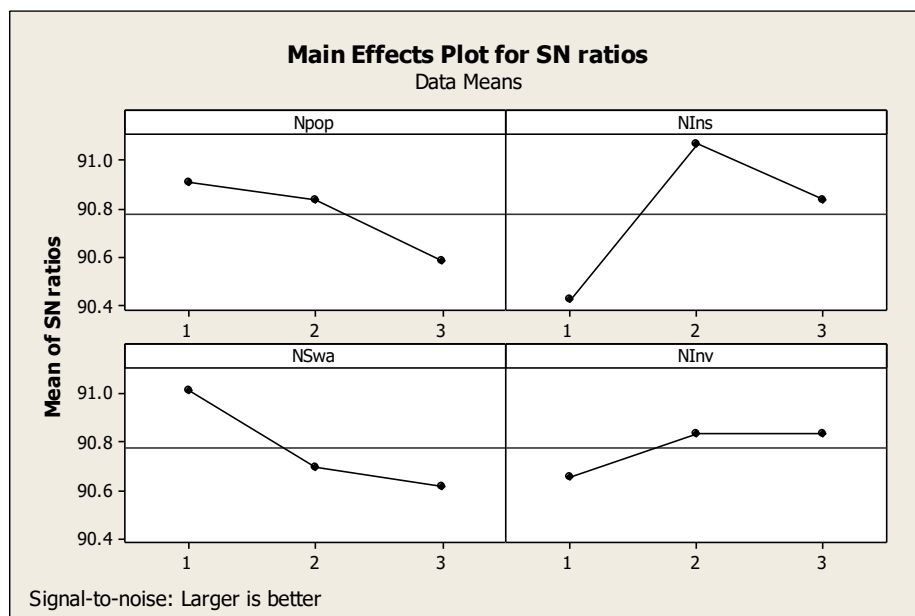
پس از اجرای حالت‌های پیشنهادی، مقادیر معیارها نرمال‌سازی شده و جمع وزنی آنها به نرم‌افزار Minitab داده می‌شود. در نهایت پس از تحلیل این داده‌ها بر اساس نسبت سیگنال به نویز، نرم‌افزار مینی‌تب بهترین حالت را از بین ۸۱ حالت اعلام نمود. خروجی‌های این نرم‌افزار در شکل (۵) نشان داده شده است. در تحلیل نسبت سیگنال به نویز، با استفاده از تغییر نتایج، بهترین و قوی‌ترین شرایط کاری تعیین می‌گردند. به عبارت دیگر، این نسبت پراکنده‌گی در اطراف یک مقدار مشخص را بیان می‌کند. برای



مسئله مورد بررسی در این مقاله با تابع هدف کمینه‌سازی هر چه این نسبت بیشتر باشد، پراکندگی کمتر بوده و در نتیجه اثر پارامتر مربوطه مهم‌تر می‌باشد. با توجه به این توضیحات و بر اساس مقادیر نشان داده شده در شکل (۵) و جدول (۴) بهترین مقادیر برای پارامترهای الگوریتم HDABC عبارت از $n \times 0.8$ ، $N_{pop} = 4$ ، $N_{Ins} = 4$ ، $N_{Swa} = 4$ و $N_{Inv} = 4$ می‌باشند.

جدول ۴. بهترین مقادیر ایجادشده توسط روش تاگوچی برای پارامترهای الگوریتم HDABC

پارامتر	N_{pop}	N_{Ins}	N_{Swa}	N_{Inv}
سطح	۱	۲	۱	۲
مقدار بهینه	$0.8 \times n$	۴	۴	۴



شکل ۵. نمودار پارامترهای اصلی ارائه شده توسط روش تاگوچی برای نسبت سیگنال به نویز

۷- نتایج محاسباتی

در این مقاله به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی، نتایج حاصل از اجرای این الگوریتم برای حل مثال‌های عددی ایجاد شده به صورت تصادفی با نتایج حاصل از اجرای نرم‌افزار



GAMS، الگوریتم ژنتیک [۱۲] و ترکیب الگوریتم شبکه عصبی هاپفیلد با الگوریتم بازپخت شبیه‌سازی شده (SAA-HNN) [۲۱] مقایسه می‌گردد. علت انتخاب الگوریتم ژنتیک، مشابهت مسئله در نظر گرفته شده در مرجع مذکور با مسئله مورد بررسی در این مقاله می‌باشد. نوآوری اصلی مدل و روش حل ارائه شده در مقاله حاضر نسبت به مدل معرفی شده در مرجع [۱۳] در نظر گرفتن بافرهای میانی و عمومی می‌باشد. اندازه جمعیت اولیه الگوریتم GA برابر با ۲۰۰ جواب می‌باشد که به صورت تصادفی تولید گردیده و سپس با اعمال عملگرهای تقاطع و جهش هر یک با احتمال ۰٫۹ و ۰٫۰۰۳، جمعیت مرحله بعد تولید می‌شود. این کار تا زمان برقراری شرط توقف الگوریتم (۶۰۰ تکرار) ادامه می‌یابد. همچنین علت انتخاب روش SAA-HNN این است که در مرجع ذکر شده مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با بافرهای میانی و عمومی در نظر گرفته شده و بررسی گردیده است. تفاوت اصلی مدل و روش حل ارائه شده در مقاله حاضر نسبت به مدل معرفی شده در مرجع [۲۱] این است که در این مقاله علاوه بر زمان‌بندی، تعیین اندازه انباشته نیز به طور همزمان با زمان‌بندی در محیط جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با بافرهای میانی و عمومی انجام می‌گردد است. تفاوت روش SAA-HNN با روش شبکه عصبی هاپفیلد در این است که استفاده از الگوریتم بازپخت شبیه‌سازی شده در طول هر فرآیند آموزشی الگوریتم استاندارد HNN باعث می‌شود که ورودی نورون پس از محاسبه مقدار تابع انرژی، اختلال تصادفی را افزایش داده و این امر منجر به گسترش دامنه بهینه‌سازی الگوریتم استاندارد HNN و احتمال بیشتر دستیابی به راه‌حل بهتر می‌گردد. برنامه الگوریتم‌ها با استفاده از نرم‌افزار Matlab نوشته شده و بر روی سیستمی با حافظه CPU Intel Core i7 ۲٫۰ GHz و ۸ GB رم اجرا گردیده است. لازم به ذکر است که داده‌های مسئله با استفاده از نرم‌افزار اکسل و با استفاده از روشی مشابه مقاله [۲۹] ایجاد گردیده‌اند. دلیل این کار، نبودن داده‌های جامع در ادبیات موضوع می‌باشد. به منظور تولید مسائل تصادفی، سه دسته مسئله کوچک، متوسط و بزرگ طراحی گردیده‌اند که هر یک به ترتیب شامل ۲، ۳ و ۵ نمونه می‌باشند. برای مسائل کوچک تعداد کل محصولات ۲ یا ۳، برای مسائل متوسط تعداد کل محصولات ۵ یا ۷ و برای مسائل بزرگ تعداد کل محصولات ۱۰ یا ۱۵ در نظر گرفته شده‌اند. مقادیر پارامترهای مختلف مسائل در جدول (۵) نشان داده شده‌اند.

جدول ۵. نحوه ایجاد پارامترهای مختلف مسائل تصادفی

پارامتر	t'_{max}	c_{smt}	b_{smjt}	d_{jt}	$Iini_j$	p_{jsmt}	h_{jt}	CE_{jt}	sco_{js}	V_j	$maxV_s$	$pcap$
مقدار	۱۴۴۰۰۰	۲۴۰۰	[۷/۵, ۲]	[۰, ۱۸۰]	۰	[۱/۵, ۲]	[۰/۲, ۰/۴]	[۵, ۱۰]	[۰/۱, ۰/۳]	۰/۵	۴۰	۸۰
واحد	ثانیه	دقیقه	محصول	محصول	واحد پولی	مترمکعب						



به منظور از بین بردن تبعات حاصل از تصادفی بودن نتایج، هریک از مجموعه مسائل نمونه، ۵ بار اجرا شده و متوسط نتایج به دست آمده مبنای مقایسه‌ها قرار گرفته است. زمان حل نرم‌افزار GAMS بر روی ۳۶۰۰ ثانیه تنظیم شده است و در صورت عدم دستیابی به جواب بهینه تا زمان تنظیم شده، بهترین مقدار به دست آمده به عنوان جواب این نرم‌افزار در نظر گرفته می‌شود. در جدول (۶) نتایج حاصل از اجرای الگوریتم HDABC، الگوریتم GA، الگوریتم SAA-HNN و نرم‌افزار Gams برای مثال‌های عددی با اندازه‌های مختلف آورده شده است. مسائل شماره ۱ و ۲ دارای اندازه کوچک، مسائل شماره ۳ تا ۵ دارای اندازه متوسط و مسائل ۶ تا ۱۰ دارای اندازه بزرگ می‌باشند.

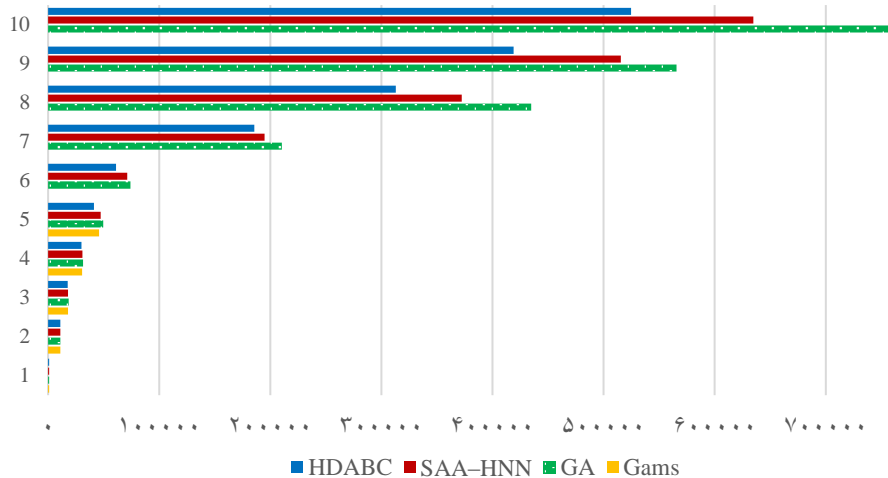
جدول ۶. نتایج محاسباتی عملکرد نرم‌افزار GAMS و الگوریتم‌های GA، SAA-HNN و HDABC در مسائل با اندازه‌های مختلف

شماره مسئله	اطلاعات مسئله (n, S, n_s, T)	نتایج GAMS		نتایج GA			نتایج SAA-HNN			نتایج HDABC		
		TC^*	Time	TC^*	\overline{TC}	\overline{Time}	TC^*	\overline{TC}	\overline{Time}	TC^*	\overline{TC}	\overline{Time}
۱	(۲، ۲، ۲، ۲)	۸۶۶	۱۲/۷	۸۶۶	۹۵۲/۶	۱۲۷/۸	۸۶۶	۹۰۱/۴	۱۰۹/۷	۸۶۶	۸۷۵/۵	۸۵/۶
۲	(۳، ۳، ۳، ۳)	۱۰۹۵۰	۱۳۲/۹	۱۰۹۵۰	۱۱۳۱۰/۱	۷۱۲/۴	۱۰۹۵۰	۱۱۱۶۰/۹	۶۲۳/۸	۱۰۹۵۰	۱۱۰۳۰/۸	۴۹۲/۵
۳	(۵، ۳، ۳، ۳)	۱۷۸۲۰	۳۶۰۰	۱۸۴۹۰	۱۸۸۶۰/۱	۷۸۳/۲	۱۸۰۵۰	۱۸۵۹۰/۲	۶۸۶/۴	۱۷۶۱۰	۱۷۷۸۰/۶	۵۶۶/۹
۴	(۵، ۵، ۳، ۵)	۳۰۴۸۰	۳۶۰۰	۳۱۴۴۰	۳۳۰۱۰/۲	۸۳۶/۱	۳۰۷۸۰	۳۲۳۱۰/۹	۷۶۰/۱	۲۹۹۱۰	۳۰۱۷۰/۹	۶۹۱/۲
۵	(۷، ۵، ۳، ۵)	۴۵۷۷۰	۳۶۰۰	۴۹۴۸۰	۴۹۹۲۰/۵	۱۰۰۳/۲	۴۷۴۲۰	۴۷۸۴۰/۷	۹۱۲/۳	۴۱۲۳۰	۴۱۶۰۰/۱	۸۲۹/۴
۶	(۱۰، ۵، ۳، ۵)	-	-	۷۴۲۲۰	۸۱۶۴۰/۲	۱۱۵۳/۷	۷۱۱۳۰	۷۸۲۴۰/۳	۱۰۴۹/۱	۶۱۰۵۰	۶۱۵۳۰/۸	۹۵۳/۸
۷	(۱۰، ۷، ۳، ۷)	-	-	۲۱۰۳۵۶	۲۱۱۴۸۷	۱۴۳۲/۹	۱۹۴۸۷۰	۲۱۰۶۲/۶	۱۲۰۶/۴	۱۸۵۴۷۰	۱۹۵۷۲/۶	۱۰۹/۹
۸	(۱۰، ۲، ۱۰)	-	-	۴۳۴۷۹۹	۴۷۸۲۷/۹	۱۶۰۳/۸	۳۷۲۳۳۸	۴۰۵۷۳/۴	۱۳۵۰/۷	۳۱۲۸۰۵	۳۴۴۰۸/۵	۱۲۲/۵
۹	(۱۵، ۱۰، ۳، ۱۵)	-	-	۵۶۵۷۱۵	۶۵۰۵۷/۱	۲۰۴۵/۶	۵۱۵۴۲۹	۵۸۷۵۸/۱	۱۷۵۵/۹	۴۱۹۰۴۸	۴۶۰۹۵/۸	۱۵۳/۴
۱۰	(۲۰، ۱۰، ۳، ۱۵)	-	-	۷۶۰۷۶۵	۸۲۹۲۳/۶	۲۵۵۷/۵	۶۳۴۸۴۶	۷۰۴۶۷/۹	۲۱۴۲/۳	۵۲۴۶۶۶	۵۲۸۸۶/۳	۱۸۲/۵

در این جدول T, n_s, S, n به ترتیب عبارت از تعداد کل محصولات، تعداد کل مراحل، تعداد ماشین‌های موازی در مرحله s و تعداد دوره‌ها می‌باشند. مقدار TC^* مقدار کل هزینه برای بهترین جواب حاصل توسط یک الگوریتم بخصوص می‌باشد. مقادیر \overline{TC} و \overline{Time} نیز به ترتیب نشان‌دهنده میانگین مقادیر جواب TC و زمان حل (ثانیه) برای تمامی جواب‌های حاصل توسط یک الگوریتم بخصوص می‌باشد. طبق این جدول تمامی الگوریتم‌ها قابلیت دستیابی به جواب بهینه حاصل از اجرای نرم‌افزار گمز را برای مسائل با اندازه کوچک دارند. همچنین برای تمامی مسائل مقادیر میانگین و کمترین هزینه کل حاصل



توسط روش پیشنهادی کمتر از هر دو الگوریتم GA و SAA-HNN می‌باشد. بنابراین، الگوریتم فراابتکاری کلونی زنبور عسل مصنوعی گسسته ترکیبی پیشنهاد شده برای مسئله مورد بررسی در این مقاله عملکرد بهتری داشته و قادر به یافتن جواب‌های بهتر در زمان کوتاه تری نسبت به روش‌های مورد مقایسه می‌باشد. در خصوص جواب‌های ایجاد شده توسط نرم‌افزار گمز ذکر این نکته ضروری است که با توجه به در نظر گرفتن محدودیت زمانی ۳۶۰۰ ثانیه برای زمان حل، جواب‌های حاصل توسط نرم‌افزار مذکور برای مسائل با اندازه متوسط در واقع جواب‌های بهینه نبوده و بهترین جواب ایجاد شده توسط این نرم‌افزار در ۳۶۰۰ ثانیه اجرای آن می‌باشد. همچنین برای مسائل با اندازه بزرگ این نرم‌افزار حتی پس از ۳۶۰۰ ثانیه نیز قادر به یافتن یک جواب امکان‌پذیر برای مسئله مورد بررسی نمی‌باشد. این امر موید برتری الگوریتم پیشنهادی نسبت به نرم‌افزار مذکور بخصوص برای حل مسائل با اندازه بزرگ می‌باشد. در شکل (۶) سه روش به صورت گرافیکی مقایسه گردیده‌اند. بر اساس نتایج نشان داده شده در جدول (۶) و شکل (۶) این نتیجه حاصل می‌گردد که الگوریتم HDABC توسعه داده شده از نظر هر ۳ معیار در نظر گرفته شده بهتر از سه روش دیگر عمل می‌نماید. مقادیر نشان داده شده به صورت پرنگ در جدول (۶) برتری الگوریتم مذکور را نسبت به سه روش دیگر تایید می‌نماید.



شکل ۶. مقایسه معیار TC^* برای نرم‌افزار Gams و الگوریتم‌های GA، SAA-HNN و HDABC در مسائل با اندازه‌های مختلف



۸- مطالعه موردی شرکت سازنده اتوبوس

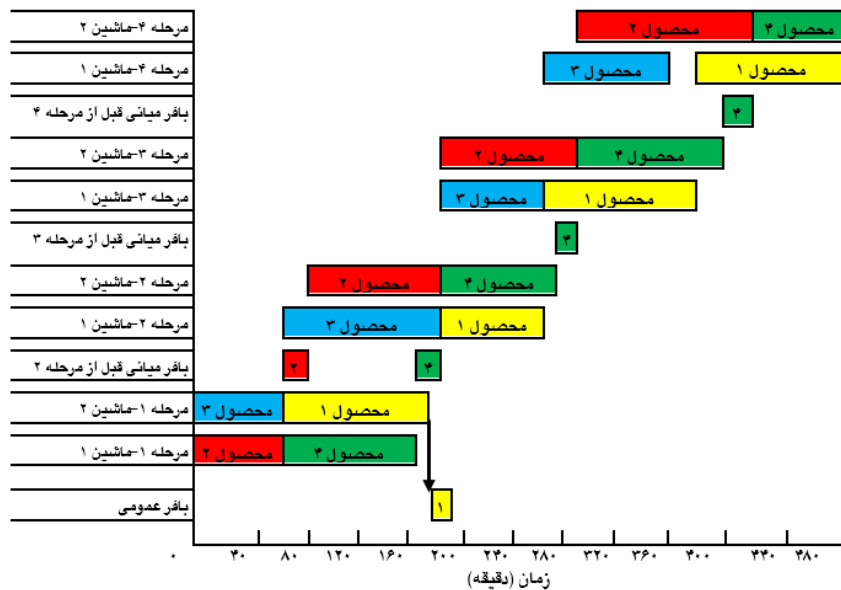
در این بخش با در نظر گرفتن یک تولیدکننده اتوبوس که یکی از شرکت‌های واقعی تولید محصولات در مقیاس بزرگ می‌باشد، داده‌های شبیه‌سازی برای عملیات تولید بدنه و کارگاه رنگ برای شرکت مذکور با الهام از مقاله [۲۱] ایجاد می‌گردد. طرح سیستم تولید و کارگاه رنگ بدنه اتوبوس به صورت یک محیط جریان کارگاهی انعطاف پذیر چهار مرحله‌ای خلاصه می‌شود. کارگاه تولید بدنه، یک کارگاه جریانی با خطوط تولید مشخص و متعدد می‌باشد که می‌توان آن را در یک مرحله تولید ساده کرد. همچنین کارگاه رنگ را می‌توان به سه مرحله ساده نمود. بنابراین داده‌های شبیه‌سازی شده شامل ۴ مرحله $s = 1, 2, 3, 4$ بوده و تعداد ایستگاه‌ها یا ماشین‌های موازی موجود در تمامی این مراحل برابر با $n_s = 2$ می‌باشد. تعداد محصولات برابر با $n = 4$ محصول می‌باشد. محصول اول اتوبوس بین شهری با طول ۸ متر، عرض ۲/۵ متر و در نتیجه مساحت ۲۰ مترمربع می‌باشد. محصول دوم ون باری با طول ۵/۳ متر، عرض ۱/۷ متر و در نتیجه مساحت ۹ مترمربع می‌باشد. محصول سوم اتوبوس شهری با طول ۱۲/۴ متر، عرض ۲/۵ متر و در نتیجه مساحت ۳۱ مترمربع می‌باشد. همچنین محصول چهارم آمبولانسی با ابعاد طول ۳/۲ متر، عرض ۱/۵۵ متر و در نتیجه مساحت ۵ مترمربع می‌باشد. اندازه بافرمیان بین مراحل مختلف برابر با $maxVs = 20 m^2$ می‌باشد. علاوه بر این، یک بافر عمومی در نظر گرفته شده است که دارای حداکثر ظرفیتی برابر با $pcap = 100 m^2$ می‌باشد. همچنین هزینه انتقال هر یک از محصولات از مراحل مختلف به بافر عمومی و هزینه ناشی از توقف هر واحد محصول در بافرهای میانی یا عمومی به ترتیب برابر با $sco_{js} = 50$ و $sibc_{js} = 100$ واحد پولی می‌باشد. افق برنامه‌ریزی برابر با یک روز ۸ ساعته در نظر گرفته شده که فقط شامل $T = 1$ دوره می‌باشد. بنابراین مقدار c_{smt} برابر با ۴۸۰ دقیقه و مقدار t'_{max} برابر با ۲۸۸۰۰ ثانیه می‌باشد. موجودی محصولات در ابتدای افق برنامه‌ریزی برابر با صفر می‌باشد. همچنین میزان تقاضا برای هر یک از چهار محصول موردنظر برابر با $d_{jt} = 10$ می‌باشد. هزینه‌های تولید در هر مرحله، مواد اولیه، بهای تمام شده کالای در جریان ساخت، نگهداری و تامین خارجی محصولات به ترتیب برابر با $p_{jsmt} = 400$ ، $mc_{jt} = 400$ ، cuc_{jt} و $h_{jt} = 200$ ، 200 و $CE_{jt} = 3000$ واحد پولی می‌باشند. در جدول (۷) زمان پردازش محصولات روی هر یک از ماشین‌آلات نشان داده شده است.



جدول ۷. زمان پردازش محصولات روی هریک از ماشین‌آلات موجود در مراحل مختلف (b_{smjt})

محصول	مرحله S _۱		مرحله S _۲		مرحله S _۳		مرحله S _۴	
	ماشین $m_۱$	ماشین $m_۲$	ماشین $m_۱$	ماشین $m_۲$	ماشین $m_۱$	ماشین $m_۲$	ماشین $m_۱$	ماشین $m_۲$
۱	۳۵	۶۰	۴۰	۴۵	۵۵	۴۰	۵۰	۷۰
۲	۳۰	۳۵	۵۰	۵۵	۶۰	۵۰	۷۰	۶۵
۳	۴۰	۲۰	۶۵	۵۰	۴۰	۵۰	۴۵	۶۰
۴	۵۵	۴۰	۵۰	۴۵	۳۰	۵۵	۸۵	۳۰

در شکل (۷) گانت چارت مربوط به جواب ایجادشده توسط الگوریتم HDABC برای مطالعه موردی شرکت سازنده اتوبوس نشان داده شده است. محور افقی بیانگر زمان بوده و در محور عمودی ماشین‌های موجود در مراحل مختلف، بافرهای میانی و بافر عمومی نشان داده شده‌اند. محصولات مختلف در این شکل به ترتیب با رنگ‌های سبز، قرمز، آبی و زرد نشان داده شده‌اند. همان‌طور که از شکل مشخص است هر محصول در هر زمان تنها روی یکی از ماشین‌های موجود در مراحل مختلف پردازش گردیده و هر ماشین نیز در هر زمان تنها قادر به پردازش یک محصول می‌باشد. همچنین محدودیت ظرفیت بافرهای میانی و عمومی در جواب ایجادشده رعایت گردیده است.



شکل ۷. گانت چارت جواب ایجادشده توسط الگوریتم HDABC برای شرکت سازنده اتوبوس



همان‌طور که در شکل مشخص است پس از پردازش دو عدد محصول ۲ بر روی اولین ماشین از مرحله ۱، از آنجا که زمان شروع پردازش این محصول در مرحله ۲ برابر با ۸۰ می‌باشد این محصول وارد بافر میانی قبل از مرحله ۲ گردیده و به مدت ۲۰ دقیقه در بافر می‌ماند. از آنجا که مساحت موردنیاز هر عدد محصول دوم برابر با ۹ مترمربع می‌باشد. مقدار فضای اشغال شده توسط دو واحد از این محصول کمتر از ظرفیت بافر (یعنی ۲۰ مترمربع) بوده و در نتیجه محدودیت ظرفیت بافر لحاظ گردیده است. از طرفی پردازش دو واحد از محصول ۴ در زمان ۱۷۰ روی اولین ماشین از مرحله ۱ پایان یافته و از آنجا که زمان شروع پردازش این محصول در مرحله ۲ برابر با ۱۹۰ می‌باشد. این محصول وارد بافر میانی قبل از مرحله ۲ گردیده و به مدت ۲۰ دقیقه در بافر می‌ماند. از آنجا که مساحت موردنیاز هر عدد محصول چهارم برابر با ۵ مترمربع می‌باشد. مقدار فضای اشغال شده توسط دو واحد از این محصول کمتر از ظرفیت بافر (۲۰ مترمربع) بوده و در نتیجه محدودیت ظرفیت بافر اعمال گردیده است. پس از قراردادن محصول ۴، ظرفیت باقیمانده این بافر میانی برابر با ۱۰ مترمربع می‌باشد. زمانی که پردازش دو واحد از محصول ۱ بر روی دومین ماشین از مرحله ۱ به اتمام می‌رسد (یعنی زمان ۱۸۰) به دلیل کمبود فضای باقیمانده در بافر میانی قبل از مرحله ۲، دو واحد محصول ۱ با هزینه ۱۰۰ واحد پولی به بافر عمومی منتقل گردیده و در زمان ۱۹۰ جهت شروع پردازش بر روی آنها روی اولین ماشین از مرحله ۲ از بافر عمومی خارج می‌گردند.

در جدول (۸) هزینه‌های کل برنامه تولید تعیین شده برای مسئله واقعی مورد بررسی و همچنین هزینه‌های تولید و تامین خارجی به تفکیک برای روش‌های مورد مقایسه نشان داده شده است. لازم به ذکر است که زمان حل نرم‌افزار GAMS برای مطالعه کاربردی بر روی ۶۰۰ ثانیه تنظیم شده است و در صورت عدم دستیابی به جواب بهینه تا زمان تنظیم شده، بهترین مقدار به دست آمده به عنوان جواب این نرم‌افزار در نظر گرفته می‌شود. همچنین از آنجا که فقط یک دوره در نظر گرفته شده است. میزان موجودی نگهداری شده و در نتیجه هزینه نگهداری برای تمام روش‌ها برابر با صفر می‌باشد. همان‌طور که قابل مشاهده است، با توجه به هزینه زیاد تامین خارجی در جواب ایجاد شده توسط روش ارائه شده تا حد ممکن (با توجه به محدودیت منابع و محدودیت بافرهای میانی و عمومی) تقاضا از طریق استفاده از حداکثر ظرفیت تولید داخلی تامین گردیده است. بنابراین الگوریتم HDABC برای حل مطالعه موردی دارای عملکرد محاسباتی بهتری بوده و به نتایج بهتری با زمان پایین‌تر می‌رسد.



جدول ۸. هزینه‌های بهترین جواب ایجاد شده نرم‌افزار گمز و الگوریتم‌های GA، SAA-HNN و HDABC

روش حل	زمان حل (ثانیه)	میزان تولید				میزان تامین خارجی				هزینه کل	هزینه تولید	هزینه تامین خارجی
		۱	۲	۳	۴	۱	۲	۳	۴			
GAMS	۶۰۰	۲	۱	۲	۲	۸	۹	۸	۸	۱۱۴۴۰۰	۱۵۴۰۰۰	۹۹۰۰۰
GA	۷۲۵/۳۱	۱	۱	۱	۱	۹	۹	۹	۹	۱۳۶۸۰۰	۸۸۰۰	۱۰۸۰۰۰
SAA-HNN	۵۹۷/۶۰	۱	۱	۲	۲	۹	۹	۸	۸	۱۱۵۲۰۰	۱۳۲۰۰	۱۰۲۰۰۰
HDABC	۴۲۳/۶۵	۲	۲	۲	۲	۸	۸	۸	۸	۱۱۳۹۰۰	۱۷۹۰۰	۹۶۰۰۰

۹- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله زمان بندی و تعیین اندازه انباشته هم زمان در محیط جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با در نظر گرفتن بافرهای میانی و عمومی بررسی گردید. یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای این مسئله توسعه داده شده و یک الگوریتم فراابتکاری کلونی زنبور عسل مصنوعی برای این مسئله ارائه گردید. از آنجا که خروجی الگوریتم‌های فراابتکاری به شدت به مقادیر ورودی آن‌ها وابسته است، برای تنظیم پارامترهای الگوریتم HDABC از روش تاگوچی استفاده گردید. نتایج الگوریتم HDABC در مثال‌های عددی با اندازه‌ها و داده‌های مختلف با نتایج حاصل از نرم‌افزار گمز، الگوریتم ژنتیک و ترکیب الگوریتم شبکه عصبی هاپفیلد با الگوریتم بازپخت شبیه‌سازی شده بر اساس معیارهای زمان، بهترین مقدار هزینه کل و میانگین مقادیر هزینه کل برای تمامی جواب‌های یافت شده مقایسه گردید. نتایج حاصل نشان‌دهنده عملکرد بهتر الگوریتم ارائه شده نسبت به نرم‌افزار گمز و دو الگوریتم دیگر می‌باشد. برای مطالعات آتی، می‌توان مساله زمان‌بندی معرفی شده را با در نظر گرفتن مفروضات واقعی مانند قابلیت انقطاع کارها، در نظر گرفتن فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات، زمان آماده‌سازی وابسته به توالی، زمان آزادسازی کارها و یا در نظر گرفتن بافر چندصفاه مدل‌سازی نمود. همچنین می‌توان مسئله مورد بررسی را در حالت چندهدفه بررسی نمود. در این مقاله یکی از مفروضات این است که زمان حمل و نقل بین مراحل مختلف و همچنین بین مراحل و بافر عمومی ناچیز بوده و برابر با صفر در نظر گرفته شده است. اما در برخی موارد، این زمان حمل و نقل قابل ملاحظه بوده و بنابراین در نظر گرفتن و لحاظ نمودن آن جهت نزدیک نمودن مسئله مورد بررسی به شرایط دنیای واقعی مفید می‌باشد. همچنین در نظر گرفتن حالات مختلف روابط انسان-ماشین شامل سرویس همزمان، سرویس کاملاً تصادفی و ترکیبی از سرویس همزمان و سرویس کاملاً تصادفی برای محاسبه و مشخص نمودن تعداد نیروی انسانی موردنیاز و اضافه نمودن آن به مدل یکی از پیشنهادات کاربردی



و مفید دیگر برای تحقیقات آتی می‌باشد. به عنوان پیشنهاد آخر می‌توان از سایر الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری جهت حل مسئله موردنظر در این مقاله استفاده نمود.

۱۰- پی‌نوشت‌ها

- | | | |
|------------------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| 1. Flow Shop Problem (FSP) | 2. Johnson | 3. Flexible Flow Shop Problem |
| 4. Lot sizing | 5. intermediate buffers | 6. multi-queue buffer |
| 7. intermediate and public buffers | 8. Artificial Bee Colony | 9. Insertion |
| 10. Partially Mapped Crossover | 11. Swap | 12. Inversion |

۱۱- منابع

- [۱] Johnson, S.M., Optimal two-and three-stage production schedules with setup times included. *Naval research logistics quarterly*, ۱۹۵۴. ۱(۱): p. ۶۱-۶۸.
- [۲] Nawaz, M., E.E. Enscore Jr, and I. Ham, A heuristic algorithm for the m-machine, n-job flow-shop sequencing problem. *Omega*, ۱۹۸۳. ۱۱(۱): p. ۹۱-۹۵.
- [۳] Abdel-Basset, M., et al., A hybrid whale optimization algorithm based on local search strategy for the permutation flow shop scheduling problem. *Future Generation Computer Systems*, ۲۰۱۸. ۸۵.
- [۴] Olfat, L., Total Tardiness Minimization in Flow Shop with Intermediate Due Dates, *Modern Researches in Decision Making*, 2017, 2(3): p. 25-47.
- [۵] Lian, Z., X. Gu, and B. Jiao, A novel particle swarm optimization algorithm for permutation flow-shop scheduling to minimize makespan. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2008. 35(5): p. ۸۵۱-۸۶۱.
- [۶] Arthanary, T., An extension of two machine sequencing problem. *Opsearch*, ۱۹۷۱. ۸: p. ۱۰-۲۲.
- [۷] Lee, T. and Y. Loong, A review of scheduling problem and resolution methods in flexible flow shop. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, ۲۰۱۹. ۱۰(۱): p. ۶۷-۸۸.
- [۸] Fandel, G. and C. Stammen-Hegene, Simultaneous lot sizing and scheduling for multi-product multi-level production. *International Journal of Production Economics*, 2006. ۱۰۴(۲): p. ۳۰۸-۳۱۶.
- [۹] Mohammadi, M., et al., Rolling-horizon and fix-and-relax heuristics for the multi-product multi-level capacitated lotsizing problem with sequence-dependent setups. *Journal of Intelligent Manufacturing*, ۲۰۱۰. ۲۱(۴): p. ۵۰۱-۵۱۰.
- [۱۰] Babaei, M., M. Mohammadi, and S. Ghomi, A genetic algorithm for the simultaneous lot sizing and scheduling problem in capacitated flow shop with complex setups and backlogging. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, ۲۰۱۴. ۷۰(۱): p. ۱۲۵-۱۳۴.
- [۱۱] Ramezani, R., M. Saidi-Mehrabad, and E. Teimoury, A mathematical model for



- integrating lot-sizing and scheduling problem in capacitated flow shop environments. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, ۲۰۱۳, ۶۶(۱): p. ۳۴۷-۳۶۱.
- [۱۲] Alaghebandha, M., et al., Modeling of Scheduling and Economic Lot Sizing In Distributed Permutation Flow Shops with Non-Identical Multi Factory, Modern Researches in Decision Making, 2018, 3(3): p. 129-155.
- [۱۳] Badri, H.M., N.K. Khamis, and M.J. Ghazali, Integration of lot sizing and scheduling models to minimize production cost and time in the automotive industry. International Journal of Industrial Optimization, ۲۰۲۰, ۱(۱): p. ۱-۱۴.
- [۱۴] Abdullah, S., A. Shamayleh, and M. Ndiaye. Capacitated lot-sizing and scheduling with sequence-dependent setups in petrochemical plants. in Proceedings of the 2016 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, Kuala Lumpur, Malaysia. ۲۰۱۶.
- [۱۵] Mirnajafizadeh, S.M. and M. Bijari, Robust simultaneous lot-sizing and scheduling with considering controllable processing time and fixed carbon emission in flow-shop environment. International Journal of Industrial and Systems Engineering, ۲۰۲۲, ۴۰(۳): p. ۳۴۳-۳۶۹.
- [۱۶] Copil, K., et al., Simultaneous lotsizing and scheduling problems: a classification and review of models. OR spectrum, ۲۰۱۷, ۳۹(۱): p. ۱-۶۴.
- [۱۷] Li, J.-q. and Q.-k. Pan, Solving the large-scale hybrid flow shop scheduling problem with limited buffers by a hybrid artificial bee colony algorithm. Information Sciences, 2015, ۳(۱۶): p. ۴۸۷-۵۰۲.
- [۱۸] Xiang, L., Y. Ai-ling, and Z. Hui-yu. Buffer allocation optimization for flexible flow shop. in 2016 IEEE Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference. 2016.
- [۱۹] Han, Z., et al., Hybrid flow shop scheduling with finite buffers. International Journal of Simulation and Process Modelling, ۲۰۱۸, ۱۳(۲): p. ۱۵۶-۱۶۶.
- [۲۰] Lin, S., et al. Research on buffer dynamic capacity-increase scheduling method in flexible flow shop based on public buffer. in ۱۰th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC). ۲۰۱۸.
- [۲۱] Han, Z., et al., Flexible flow shop scheduling method with public buffer. Processes, ۲۰۱۹, ۷(۱۰): p. ۶۸۱.
- [۲۲] Fllah Sanami, S., et al, Concurrent scheduling and lot sizing in a flexible flow shop environment considering limited resources, Advances in Industrial Engineering, 2016, 17(50): p. 295-310.
- [۲۳] Sang, H., L. Gao, and Q. Pan, Discrete artificial bee colony algorithm for lot-streaming flowshop with total flowtime minimization. Chinese journal of mechanical engineering, 2012, 25(5): p. 990-1000.
- [۲۴] Karaboga, D., An idea based on honey bee swarm for numerical optimization. ۲۰۰۵,



Technical report-tr۰۶, Erciyes university, engineering faculty, computer.

- [۲۵] Wang, L., Q.-K. Pan, and M.F. Tasgetiren, Minimizing the total flow time in a flow shop with blocking by using hybrid harmony search algorithms. *Expert Systems with Applications*, ۲۰۱۰. ۳۷(۱۲): p. ۷۹۲۹-۷۹۳۶.
- [۲۶] Deng, G., H. Yang, and S. Zhang, An enhanced discrete artificial bee colony algorithm to minimize the total flow time in permutation flow shop scheduling with limited buffers. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016.
- [۲۷] Cui, Z. and X. Gu, An improved discrete artificial bee colony algorithm to minimize the makespan on hybrid flow shop problems. *Neurocomputing*, ۲۰۱۰. ۱۴۸: p. ۲۴۸-۲۵۹.
- [۲۸] Ghandi Bidgoli, S. and Karimi, F., A Simulation-Based Optimization Approach for Mixed model Two-sided Assembly Line Balancing with stochastic task times (Case Study: Beh Afarinan Datis Tiva Company), *Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems*, 2020, 8(16): p. 199-213.
- [۲۹] Ramezani, R., M. Saidi-Mehrabad, and P. Fattahi, Integrated lot-sizing and scheduling with overlapping for multi-level capacitated production system. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, ۲۰۱۳. ۲۶(۷): p. ۶۸۱-۶۹۰.