



Simultaneous Lot Sizing and Scheduling in Flexible Job Shop Problems

M. Rohaninejad & A.M. Kheirkhah* & P. Fattahi

Mohammad Rohaninejad,
Amirsaman Kheirkhah,
Parviz Fattahi,

Keywords

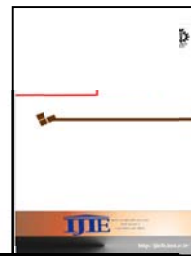
Lotsizing, Scheduling,
Flexible job shop,
Genetic algorithm,
Particle swarm optimization algorithm,
Shifting procedure

ABSTRACT

In this paper the problem of simultaneous lot size and scheduling in flexible job shop with machine capacity constraint has been investigated. Due to the nature of the flexible job shop environment, the problem has a multi-level and multi-machine structure, and the objective is to determine an optimal or nearly-optimum production plan so that the system costs, including the costs of production, holding, setup and overtime, are minimized. For this purpose, first a new mixed integer programming model in the form of a big bucket time has been presented. Since the problem is strongly NP-hard, a meta-heuristic method that combines the genetic algorithm with the particle swarm optimization algorithm has been proposed for its solution. Also, since it has been proven that in capacitated lot sizing problem with setup time, finding a feasible solution is NP-hard, and in order to not spend a large part of the search process in search of the optimal solution in the infeasible points of the solution space, an effective heuristic method called shifting procedure has been presented. Through a neighborhood search, this procedure helps direct the search process to the feasible points of the problem. Finally, the computational results have been used to demonstrate the effectiveness of the proposed solution method.

© 2014 IUST Publication, IJIEPM. Vol. 25, No. 3, All Rights Reserved

*
Corresponding author : Amir Saman Kheyrkhah
Email: amirsamankheirkhah@yahoo.com



بهینه سازی همزمان اندازه انباشته و زمانبندی عملیات در محیط تولید کارگاهی انعطاف پذیر

محمد روحانی نژاد، امیر سامان خیرخواه، پرویز فتاحی

کلمات کلیدی

اندازه انباشته،
زمانبندی،
تولید کارگاهی انعطاف پذیر،
الگوریتم ژنتیک،
الگوریتم شبیه سازی توده ذرات،
قاعده انتقال

چکیده:

در این مقاله مسأله بهینه سازی همزمان اندازه انباشته و زمانبندی در محیط تولید کارگاهی انعطاف پذیر با محدودیت ظرفیت ماشین ها بررسی شده است. بدلیل ماهیت محیط تولید کارگاهی انعطاف پذیر مسأله دارای ساختار چند مرحله ای و چند ماشینی بوده و هدف از آن تعیین برنامه تولید بهینه به نحوی است که هزینه های سیستم شامل هزینه های تولید، نگهداری، راه اندازی و اضافه کاری کمینه گردد. ابتدا یک مدل برنامه ریزی ترکیبی عدد صحیح جدید در قالب مدل ظرف زمانی بزرگ تعیین اندازه انباشته و زمانبندی جامع (GLSP) برای مسأله ارائه و با توجه به اینکه مسأله قویاً NP-hard است یک روش فراابتکاری مبتنی بر ترکیب الگوریتم ژنتیک با الگوریتم بهینه سازی توده ذرات برای حل آن پیشنهاد شده است. همچنین از آنجایی که ثابت شده است پیدا کردن یک جواب شدنی در مسأله تعیین اندازه انباشته با ظرفیت محدود منابع و داشتن زمان راه اندازی NP-hard است به دلیل جلوگیری از صرف بخش زیادی از فرآیند جستجوی جواب بهینه به جستجو در نقاط نشدنی فضای مسأله یک روش ابتکاری موثر و کارآمد بنام رویه انتقال ارائه شده است. این رویه در نتیجه یک جستجوی همسایگی به هدایت فرآیند کاوش به نقاط شدنی مسأله کمک می نماید. نهایتاً نتایج محاسباتی کارایی روش حل پیشنهادی را نمایش می دهد.

۱. مقدمه

امروزه برنامه ریزی تولید یکی از مسائل مهم در صنایع تولیدی و تصمیم گیری در این حوزه یکی از چالش های مدیران صنعت بحساب می آید. برنامه ریزی تولید فعالیتی است که بدنبال بهترین استفاده از منابع تولیدی می باشد بنحوی که اهداف تولید از قبیل نیازمندی های تولید و مقدار فروش مورد انتظار را در یک دوره زمانی که افق برنامه ریزی^۱ نامیده می شود برآورده نماید. این مسائل عموماً به سه بازه زمانی بلند مدت، میان مدت و کوتاه مدت تقسیم می شوند. یکی از مسائل مهم و پرکاربرد در برنامه

ریزی تولید که جزء مسائل میان مدت و بلند مدت می باشد مسأله تعیین اندازه انباشته یا اندازه دسته اقتصادی است. این مسأله مشخص می کند که چه مقدار از تولید محصول و در چه زمانی، اهداف سیستم را برآورده می نماید [۱]. محاسبه صحیح و مناسب اندازه انباشته، یکی از عوامل مؤثر بر عملکرد سیستم، بهره وری آن و همچنین حفظ توانایی و قابلیت رقابتی در بازار است. از این رو توسعه و بهبود مدل ها و روشهایی به منظور تعیین اندازه انباشته بسیار مهم و حائز اهمیت است. مسائل تعیین اندازه انباشته را می توان به حالت های مختلفی دسته بندی کرد. این دسته بندی ها شامل ساختار تولیدی اعم از ساختار تک مرحله ای و چند مرحله ای، حالت های دارای ظرفیت محدود یا فاقد محدودیت ظرفیت، حالت های یک یا چند منبعه و همچنین یک یا چند محصولی و... است. این مسأله با ظرفیت محدود منابع و ساختار تک مرحله ای جزء مسائل NP-hard است [۲]. با افزایش سطوح ساختار تولیدی از ساختارهای تک مرحله ای به چند مرحله ای پیچیدگی مسأله به شدت افزایش یافته بگونه ای

تاریخ وصول: ۹۰/۱۱/۱۱

تاریخ تصویب: ۹۱/۹/۲۷

محمد روحانی نژاد، دانشگاه بوعلی سینا - همدان

rohaninejad.sm@gmail.com

*نویسنده مسئول مقاله: دکتر امیر سامان خیرخواه، استادیار دانشگاه

بوعلی سینا همدان amirsamankheirkhah@yahoo.com

پرویز فتاحی، دانشیار دانشگاه بوعلی سینا، همدان

pfattahi@gmail.com

² planning horizon

تخصیص تولیدات درون یک دوره نیز تصمیم گیری شود. هیچگونه کمبودی اعم از فروش از دست رفته یا سفارش پس افت مجاز نیست. هزینه و زمان راه اندازی وابسته به توالی انجام کارها و ماشین آلات امکان انجام اضافه کار بیشتر از ظرفیت مجازشان را با صرف هزینه بیشتری دارند.

بطور کلی در مسائل بهینه سازی همزمان اندازه انباشته و زمانبندی دو شیوه مدلسازی پایه مدل‌های با ظرف زمانی کوچک و مدل‌های با ظرف زمانی بزرگ وجود دارد. در مدل‌های ظرف زمانی کوچک، ابتدا دوره زمانی بزرگ‌تر به دوره‌های کوچک‌تر تجزیه و سپس به مدلسازی پرداخته می‌شود. در این مدل‌ها فرض می‌گردد در هر دوره یک یا حداکثر دو محصول ممکن است تولید گردد. از مدل‌های رایج ظرف زمانی کوچک می‌توان به مدل مسأله اندازه انباشته و زمانبندی گسسته^۲ (DLSP)، مدل مسأله اندازه انباشته با راه اندازی دنباله دار^۳ (CSLP)، مدل مسأله اندازه انباشته و زمانبندی متناسب^۴ (PLSP) اشاره کرد. در مدل DLSP که اولین بار توسط فلیشمن و همکارانش [۷] ارائه شده تنها یک محصول می‌تواند در هر دوره زمانی کوچک تولید شده و مقادیر تولید بصورت گسسته و تابعی از ظرفیت دوره‌های زمانی کوچک است به عبارت بهتر اگر محصولی در یک دوره زمانی کوچک تولید شود لازم است از کل ظرفیت آن دوره استفاده نماید. به همین دلیل به آن مدل "همه یا هیچ"^۵ نیز می‌گویند. اما مدل CSLP برخلاف مدل DLSP فرض سخت گیرانه "همه یا هیچ" را نداشته و در این مدل می‌توان به مقدار کسری از ظرفیت یک دوره تولید کرد ولی در این صورت مقدار ظرفیت مصرف نشده در آن دوره بلااستفاده مانده و امکان برنامه ریزی آن وجود نخواهد داشت. مدل PLSP که توسط دراکسل و همکارانش [۸] ارائه شد این ضعف مدل CSLP را با فراهم نمودن امکان برنامه ریزی حداکثر دو کار در هر دوره رفع نموده است. البته شرایط این مدل نیز بگونه‌ای است که در آن امکان تولید یک محصول به اندازه کسری از ظرفیت یک دوره زمانی کوچک و در ابتدای آن دوره وجود ندارد. در حالی که در انتهای دوره قبل و همان دوره محصول دیگری تولید شود. در این مدل‌ها با افزایش تعداد دوره‌های زمانی کوچک می‌توان تأثیر نواقص یاد شده را کاهش و مدل را به شرایط بهینه واقعی نزدیکتر کرد اما این امر رشد پیچیدگی‌های محاسباتی مدل را در پی خواهد داشت. تحقیقات بسیاری توسط محققین درخصوص ارائه مدل‌های ظرف زمانی بزرگ انجام شده است که علاوه بر تعیین اندازه انباشته توانایی زمانبندی و تعیین توالی بهینه کارها را نیز داشته

که مسائل چند مرحله‌ای دارای ساختار عمومی^۱ حتی در حالت فاقد محدودیت ظرفیت جزء مسائل NP-hard می‌باشند [۴و۳]. در سالهای اخیر سیستم‌های ساخت و تولید به دلایلی مانند افزایش تنوع محصولات، تغییرات سریع در تقاضای بازار و مشتریان و نیاز به انعطاف پذیری بالا، فشرده شدن فضای رقابتی، ضرورت کاهش هزینه‌های زائد، کاهش زمان تحویل کالا و... نیازمند برنامه ریزی دقیق تر و واقع بینانه تری هستند. به همین دلیل محققین با لحاظ نمودن شرایط مسائل زمانبندی و توالی عملیات در مسائل اندازه انباشته، به مطالعه و بررسی مسائل بهینه سازی همزمان اندازه انباشته و زمانبندی پرداختند. از طرفی با افزایش توان محاسباتی نسل جدید کامپیوترها و تحقیقات وسیع انجام شده بمنظور ارائه روشهای حل کارآمدتر و سریع تر، نگرانی ناشی از بالا رفتن پیچیدگی‌های محاسباتی حاصل از ترکیب این دو مسأله تا حدودی مرتفع شده است. ما نیز در این مقاله به بررسی بهینه سازی همزمان اندازه انباشته و زمانبندی عملیات در محیط تولید کارگاهی انعطاف پذیر می‌پردازیم. مسأله تولید کارگاهی انعطاف پذیر، توسعه مسأله تولید کارگاهی است که اولین بار توسط بروکر و اسپچیل ارائه شد [۵]. مسأله تولید کارگاهی یکی از انواع مسائل زمانبندی می‌باشد که به دنبال تعیین بهترین توالی کارهای از پیش تعریف شده در یک محیط چند ماشینی می‌باشد. در حالت کلاسیک مسأله تعداد n کار با فرض اینکه هر کار امکان پردازش بر روی یک ماشین را دارد توسط m ماشین مختلف پردازش می‌شوند. مسأله تولید کارگاهی در حالت عمومی به شدت NP-hard است [۶]. اما در فرم انعطاف پذیر مسأله هر عملیات می‌تواند بر روی مجموعه مشخصی از ماشین آلات مختلف با زمانهای پردازش متفاوت، پردازش شود. لذا مسائل زمانبندی تولید کارگاهی انعطاف پذیر شامل دو زیر مسأله می‌شوند. اول چگونگی تخصیص هر عملیات به یک ماشین از مجموعه ماشین‌های مجاز برای آن عملیات و دوم تعیین چگونگی ترتیب و توالی انجام تمامی عملیات‌ها به نحوی که اهداف از پیش تعریف شده مسأله محقق شود. به همین دلیل این مسأله با داشتن دو متغیر تصمیم تخصیص و توالی نسبت به مسأله تولید کارگاهی با یک متغیر تصمیم تعیین توالی، از سطح پیچیدگی بالاتری برخوردار است. بدلیل ماهیت محیط تولید کارگاهی انعطاف پذیر مسأله مورد بررسی در این مقاله دارای ساختار چند مرحله‌ای و چند ماشینی است. در این مسأله بدنبال تعیین برنامه تولید بهینه یا نزدیک به بهینه در یک افق برنامه ریزی متناهی در حالی هستیم که ظرفیت ماشین آلات محدود است. در این مسأله لازم است ضمن تعیین دوره‌های تولیدی و مقدار تولید برای هر محصول درخصوص توالی و

² Discrete lot sizing and scheduling problem

³ Continues setup lot sizing and scheduling problem

⁴ proportional lot sizing and scheduling problem

⁵ All or nothing

¹ General structure

ریاضی و روش های فراابتکاری است. محققینی مانند استنادتلا و شاهلینگ [۱۷]، تمپلمیر و بوشکول [۱۸]، سانتوس و آلمادا-لوا [۱۹] از روش های مبتنی بر برنامه ریزی ریاضی برای حل مسأله بهره برده اند. اما با توجه به اینکه مسأله NP-hard است استفاده از روش های فراابتکاری از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. ما نیز در این مقاله یک روش فراابتکاری ترکیبی حاصل از ترکیب الگوریتم ژنتیک با الگوریتم بهینه سازی توده ذرات را پیشنهاد داده ایم. درخصوص استفاده از روش های فراابتکاری خصوصاً الگوریتم ژنتیک می توان به مطالعه صورت گرفته توسط سیکورا [۲۰] اشاره کرد او از الگوریتم ژنتیک برای مسأله خط تولید با محدودیت ظرفیت، راه اندازی وابسته به توالی، محدودیت بافر بین دو ماشین و زمان تحویل استفاده نمود. لی و همکاران [۲۱] رویکردی بر پایه الگوریتم ژنتیک را برای حل مسأله تعیین اندازه انباشته و توالی در خط جریان با تابع هدف حداقل نمودن حداکثر زمان اتمام کارها، ارائه نمودند. پونامبالام و موهان ردی [۲۲] یک الگوریتم جستجوی هیبرید با ترکیب الگوریتم ژنتیک و تبرید شبیه سازی شده را جهت حداقل کردن حداکثر زمان اتمام کارها و هزینه نگهداری و اضافه کاری پیشنهاد نمودند. پالانیپان و جواهر [۲۳] مسأله تعیین اندازه انباشته در تدارک و زمانبندی خط مونتاژ را با قابلیت مونتاژ مدل های مختلف جهت حداقل نمودن هزینه های کل در نظر گرفته و از یک الگوریتم ژنتیک برای حل مسأله استفاده نمودند. آلمادا-لوا و جیمز [۲۴] از الگوریتم فراابتکاری جستجوی همسایگی، برای حل مسأله با راه-اندازی وابسته به توالی در حالت تک ماشینی استفاده نمودند. محمدی و فاطمی قمی [۲۵] از ترکیب الگوریتم ژنتیک و روش برنامه ریزی افق غلطان برای حل مسأله در محیط جریان کارگاهی با راه اندازی وابسته به توالی استفاده کردند. جیمز و آلمادا-لوا [۲۶] یک روش ابتکاری تکرارشونده که ترکیبی از الگوریتم فراابتکاری جستجوی همسایگی و برنامه ریزی عدد صحیح است را برای حل مسأله در حالت تک ماشینی و ماشین-های موازی ارائه نمودند. رضانیان و سعیدی مهرآباد [۲۷] از الگوریتم های شبیه سازی تبرید و کرم شب تاب برای حل مسأله در محیط جریان کارگاهی استفاده کرده اند.

در ادامه این مقاله در بخش دوم مدل مدل برنامه ریزی ترکیبی عدد صحیح مسأله، در بخش سوم روش حل پیشنهادی و در بخش چهارم نتایج محاسباتی و در بخش پنجم نتیجه گیری و جهت گیری های آتی ارائه شده است.

۲. مدل برنامه ریزی ترکیبی عدد صحیح مسأله

در این قسمت یک مدل ریاضی برنامه ریزی ترکیبی عدد صحیح جدید در قالب مدل GLSP برای مسأله ارائه می شود. مدل های

باشند. یکی از معتبرترین مدل هایی که در این خصوص توسط فلیشمن و همکارانش [۹] ارائه شد مدل تعیین اندازه انباشته و زمانبندی جامع^۱ (GLSP) است. در این مدل بر خلاف مدل های ظرف زمانی کوچک، از تعداد از پیش تعیین شده ای موقعیت^۲ تولیدی در یک دوره به عنوان جایگزین دوره های زمانی کوچک استفاده می شود. فرض اساسی مدل این است که به هر موقعیت تنها می توان یک کار (محصول) تخصیص داد از معایب این مدل محدود بودن تعداد موقعیت ها در هر دوره است. اما این مدل پیچیدگی محاسباتی بسیار کمتری نسبت به مدل های ظرف زمانی کوچک دارد. ما به همین دلیل در این مقاله از قالب GLSP برای مدل سازی مسأله استفاده نموده ایم. در بکارگیری مدل GLSP برای بهینه سازی همزمان اندازه انباشته و زمانبندی ابتدا درکسل و کیمس [۱۰] و فلیشمن و میر [۹] این مدل را بصورت تک مرحله ای، چند محصولی، تک ماشینی با هزینه های راه اندازی وابسته به توالی با ظرف زمانی کوچک اما بدون در نظر گرفتن زمان های راه اندازی و کمبود، پیشنهاد دادند. میر [۱۱] زمان راه اندازی را در محدودیت ظرفیت منبع در نظر گرفت و روش حل ترکیبی جستجوی محلی با بهینه سازی دوگان را پیشنهاد نمود. همچنین میر [۱۲] مدل GLSP با فرض ماشین های موازی غیر یکسان و در حالت تک مرحله ای را در نظر گرفت. کلارک و کلارک [۱۳] مدل GLSP را در حالت ماشین-های موازی در نظر گرفتند و با استفاده از رویکرد افق غلطان به حل مسأله پرداخت. هاس و کیمس [۱۴] یک مدل برنامه ریزی مختلط عدد صحیح GLSP را در حالت تک مرحله ای و تک ماشینه با زمان و هزینه های راه اندازی وابسته به توالی، ارائه نمودند. فاندل و استمن-هگن [۱۵] مسأله تعیین اندازه انباشته و زمانبندی همزمان برای سیستم تولیدی چند مرحله ای و چند محصولی جهت کمینه کردن هزینه های سیستم را با ارائه یک مدل GLSP جدید مورد مطالعه قرار دادند. انور و نقی [۱۶] یک روش دو فازی را برای یک مسأله تولید کارگاهی که بصورت GLSP مدل شده بود پیشنهاد نمودند. روش ابتکاری در فاز اول، زمانبندی عملیات ها را با جستجوی مسیر بحرانی برای حداقل نمودن زمان اتمام سراسری^۳ بر پایه انباشته-به-انباشته^۴ انجام می دهد و در فاز دوم، بصورت تکراری و با تمرکز بر زمان اتمام سراسری و کاهش هزینه، آیتم ها را برای تعیین اندازه انباشته ها، گروه بندی می کند.

دو گروه اصلی از روش های حل مسائل بهینه سازی همزمان اندازه انباشته و زمانبندی شامل روش های مبتنی بر برنامه ریزی

¹ General lot sizing and scheduling model

² Position

³ Makespan

⁴ Lot-for-lot

GLSP بدلیل انجام برنامه ریزی تولید در دوره های زمانی اصلی مسأله دارای پیچیدگی بسیار کمتری نسبت به مدل های ظرف زمانی کوچک هستند. اما تاکنون محققین کمی از این قالب مدلسازی برای مسائل دارای ساختار تولید چند مرحله ای و چند ماشینی استفاده کرده اند. مدل سازی ساختارهای چند مرحله ای و چند ماشینی در قالب مدل GLSP کوچک دارای پیچیدگی بسیاری در زمانبندی و برقرار نمودن اصل توازن موجودی در داخل یک دوره است. زیرا موقعیت های تولید در مدل GLSP دارای زمانبندی و زمان شروع و پایان مشخصی نیستند به همین دلیل در حالت چند ماشینی برخلاف مدل های ظرف زمانی کوچک، هیچگاه نمی توان قضاوت کرد که اولین موقعیت تولید ماشین m قطعاً قبل از دومین موقعیت تولید ماشین m' خاتمه می یابد. بنابراین وابستگی تولیدات در موقعیت های مختلف داخل یک دوره در مسائل چند مرحله ای و همچنین مشخص نبودن زمان های شروع و پایان موقعیت های تولید در مدل GLSP، برقراری اصل توازن موجودی در داخل یک دوره را با مشکل در نحوه مدل سازی مسأله مواجه می نماید. محققینی مانند انور و همکارانش [۱۶] و همچنین فاندل و همکارانش [۱۵] از این قالب مدلسازی برای مسأله تولید کارگاهی استفاده نمودند. اما آنها نهایتاً توانستند یک مدل غیر خطی برای مسأله ارائه دهند. ما در این مقاله ضمن بهره مندی از مزیت مدل GLSP در کاهش پیچیدگی های محاسباتی سعی نموده ایم مشکلات این مدل را در مدلسازی مسائل چند مرحله ای و چند ماشینی با ارائه یک مدل خطی مرتفع نماییم. سایر شرایط مدل عبارتند از:

- هر عملیات در هر دوره حداکثر یک بار امکان پردازش را دارد.
- زمان تأمین سفارش ناچیز و برابر صفر فرض شده است.
- ماشین آلات از لحظه صفر در دسترس هستند.
- یک ماشین در یک لحظه امکان پردازش بیش از یک کار را ندارد.
- پیشدستی کارها نسبت به هم مجاز نیست.

پارامترهای مدل عبارتند از :

$HC_{j,h}^t$: هزینه نگهداری محصول حاصل از عملیات h ام کار j ام در انتهای دوره t

$SC_{j,h}^m$: هزینه راه اندازی عملیات h ام کار j ام بر روی ماشین m

$PC_{m,t}$: هزینه هر واحد زمانی استفاده از ماشین m ام در دوره t

$OC_{m,t}$: هزینه هر واحد زمانی اضافه کاری ماشین m ام در دوره t

$C_{m,t}$: ظرفیت معمول ماشین m ام در دوره t

$a_{j,h}^m$: مقدار زمان مصرف شده برای تولید یک واحد محصول حاصل از عملیات h ام کار j ام بر روی ماشین m

$\delta_{j,h,k,l}^m$: زمان راه اندازی عملیات h ام کار j ام بر روی ماشین m اگر بلافاصله بعد از عملیات l ام کار k ام پردازش شود.

$e_{j,h}^m$: اگر عملیات h ام کار j ام بر روی ماشین m امکان پردازش داشته باشد برابر یک و در غیر اینصورت برابر صفر است.

$d_{j,t}$: تقاضای محصول نهایی حاصل از کار j ام در دوره t

$\rho_{j,h}$: ضریب مصرف محصول حاصل از عملیات h ام کار j ام در عملیات $h+1$ ام کار j ام

N : تعداد مجاز پردازش عملیات بر روی یک ماشین در هر دوره

$O_{m,t}$: مقدار مجاز اضافه کاری بر روی ماشین m در دوره t

h_j : آخرین عملیات کار j ام

F_t : زمان پایان دوره t

S_t : زمان شروع دوره t

G : عدد مثبت بسیار بزرگ

متغیر های مدل عبارتند از :

$I_{j,h}^t$: موجودی عملیات h ام کار j ام در انتهای دوره t

$X_{j,h}^{m,r}$: مقدار تولید محصول حاصل از پردازش عملیات h ام کار j ام در r امین موقعیت ماشین m

$O_{m,t}$: مقدار اضافه کار ماشین m ام در دوره t

$s^{m,r}$: زمان شروع r امین موقعیت ماشین m

$f^{m,r}$: زمان پایان r امین موقعیت ماشین m

$Z_{j,h,k,l}^{m,r}$: برابر یک است اگر عملیات h ام کار j ام در r امین موقعیت ماشین m و بلافاصله بعد از عملیات l ام کار k ام پردازش شود و در غیر اینصورت برابر صفر است.

$X_{j,h}^{m,r,m',r'}$: حد بالای متغیر $X_{j,h}^{m,r,m',r'}$

$\Psi_{j,h}^{m,r,m',r'}$: حد پایین متغیر $X_{j,h}^{m,r,m',r'}$

$i_{j,h}^{m,r}$: حد پایین موجودی محصول عملیات h ام کار j ام در ابتدای r امین موقعیت ماشین m

$q^{m,r,m',r'}$: اگر موقعیت r' ام ماشین m' بعد از موقعیت r ام ماشین m شروع شود برابر یک و در غیر آن برابر صفر است.

$p^{m,r,m',r'}$: اگر موقعیت r' ام ماشین m' بعد از موقعیت r ام ماشین m پایان یابد برابر یک و در غیر آن برابر صفر است.

$Y_{j,h}^{m,r}$: در ایجاد شرایط راه اندازی دنباله دار مسأله بکار می رود و برابر یک است اگر عملیات h ام کار j ام در r امین موقعیت ماشین m راه اندازی شود. همچنین این متغیر برابر یک است اگر عملیات h ام کار j ام در r' امین موقعیت m (ماشین m راه اندازی شود در حالی که در موقعیت های بین r' و r ماشین m هیچ محصولی تولید نشود.

مدل برنامه ریزی ترکیبی عدد صحیح مسأله بصورت زیر است.

$$Z_{j,h,k,l}^{m,r} \geq y_{j,h}^{m,r} - (1 - y_{k,l}^{m,r-1})$$

$$j, k = 1, \dots, J + 1; h = 1, \dots, h_j; l = 1, \dots, h_k | j \neq k \text{ or } h \neq l; r = 1, \dots, NT \& m = 1, \dots, M \quad (10)$$

$$\sum_{r \in t} \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^{h_k} \sum_{l=1}^{h_k} Z_{j,h,k,l}^{m,r} \leq 1$$

$$j = 1, \dots, J; h = 1, \dots, h_j; t = 1, \dots, T \quad (11)$$

$$y_{j,h}^{m,r+1} + \sum_{k=1}^J \sum_{l=1}^{h_k} X_{k,l}^{m,r+1} \geq y_{j,h}^{m,r}$$

$$j = 1, \dots, J; h = 1, \dots, h_j; r = 1, \dots, NT - 1; m = 1, \dots, M \quad (12)$$

$$i_{j,h}^{m,r} + X_{j,h}^{m,r} - \rho_{j,h} X_{j,h+1}^{m,r} + \sum_{m'=1}^M \sum_{r' \in t | m \neq m' \text{ or } r \neq r'} \left(\eta_{j,h}^{m,r,m'r'} - \rho_{j,h} \psi_{j,h+1}^{m,r,m'r'} \right) = I_{j,h}^t$$

$$j = 1, \dots, J; h = 1, \dots, h_j - 1; t = 1, \dots, T \& r = 1, \dots, M \quad (13)$$

$$i_{j,h}^{m,r} \geq \rho_{j,h} X_{j,h+1}^{m,r}$$

$$j = 1, \dots, J; h = 1, \dots, h_j - 1; r = 1, \dots, NT; m = 1, \dots, M \quad (14)$$

$$X_{j,h}^{m'r'} \leq \eta_{j,h}^{m,r,m'r'} + (1 - p^{m,r,m'r'})G \quad (15)$$

$$X_{j,h}^{m'r'} \geq \psi_{j,h}^{m,r,m'r'}$$

$$t = 1, \dots, T \& j = 1, \dots, J; h = 1, \dots, h_j \& r \in t \& r' \in t; m, m' = 1, \dots, M | m \neq m' \text{ or } r \neq r' \quad (16)$$

$$(s^{m'r'} - s^{m,r}) - q^{m,r,m'r'} G \leq 0 \quad (17)$$

$$(s^{m,r} - s^{m'r'}) - (1 - q^{m,r,m'r'}) G \leq 0 \quad (18)$$

$$(f^{m'r'} - s^{m,r}) - p^{m,r,m'r'} G \leq 0 \quad (19)$$

$$(s^{m,r} - f^{m'r'}) - (1 - p^{m,r,m'r'}) G < 0$$

$$t = 1, \dots, T \& r \in t \& r' \in t; m, m' = 1, \dots, M | m \neq m' \text{ or } r \neq r' \quad (20)$$

$$\psi_{j,h}^{m,r,m'r'} - q^{m,r,m'r'} G \leq 0 \quad (21)$$

$$\eta_{j,h}^{m,r,m'r'} - p^{m,r,m'r'} G \leq 0$$

$$t = 1, \dots, T \& r \in t \& r' \in t; m, m' = 1, \dots, M | m \neq m' \text{ or } r \neq r' \quad (22)$$

$$\text{Min} \sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^{h_j} \sum_{t=1}^T \text{HC}_{j,h}^t I_{j,h}^t$$

$$+ \sum_{m=1}^M \sum_{r=1}^N \sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^{h_j} \sum_{k=1}^J \sum_{l=1}^{h_k} \text{SC}_{j,h}^m Z_{j,h,k,l}^{m,r}$$

$$+ \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T \sum_{r \in t} \sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^{h_j} (a_{j,h}^m \cdot X_{j,h}^{m,r} \cdot \text{PC}_{m,t})$$

$$+ \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T o_{m,t} \cdot \text{OC}_{m,t} \quad (1)$$

$$I_{j,h_j}^{t-1} + \sum_{m=1}^M \sum_{r \in t} X_{j,h_j}^{m,r} - I_{j,h_j}^t = d_{j,t}$$

$$t = 1, \dots, T \& j = 1, \dots, J \quad (2)$$

$$I_{j,h}^{t-1} + \sum_{m=1}^M \sum_{r \in t} X_{j,h}^{m,r} - I_{j,h}^t = \sum_{m=1}^M \sum_{r \in t} \rho_{j,h} X_{j,h+1}^{m,r}$$

$$t = 1, \dots, T \& j = 1, \dots, J \& h = 1, \dots, h_j - 1 \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^{h_j} \sum_{r \in t} (a_{j,h}^m \cdot X_{j,h}^{m,r} + \sum_{k=1}^{h_k} \sum_{l=1}^{h_k} \delta_{j,h,k,l}^m Z_{j,h,k,l}^{m,r}) \leq C_{m,t} + o_{m,t}$$

$$t = 1, \dots, T; m = 1, \dots, M \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^{h_j} y_{j,h}^{m,r} \leq 1$$

$$r = 1, \dots, NT; m = 1, \dots, M \quad (5)$$

$$X_{j,h}^{m,r} - G y_{j,h}^{m,r} \leq 0$$

$$j = 1, \dots, J \& h = 1, \dots, h_j \quad (6)$$

$$X_{j,h}^{m,r} - G \sum_{k=1}^J \sum_{l=1}^{h_k} Z_{j,h,k,l}^{m,r} \leq 0$$

$$r = 1, \dots, NT; m = 1, \dots, M \quad (7)$$

$$y_{j,h}^{m,r} \leq e_{j,h}^m$$

$$j = 1, \dots, J \& h = 1, \dots, h_j; r = 1, \dots, NT \& m = 1, \dots, M \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^J \sum_{l=1}^{h_k} Z_{j,h,k,l}^{m,r} \leq y_{j,h}^{m,r}$$

$$j = 1, \dots, J; h = 1, \dots, h_j; r = 1, \dots, NT; m = 1, \dots, M \quad (9)$$

زمان راه اندازی را برای یک محصول در یک دوره بپردازیم که محصول دیگری در آن موقعیت برنامه ریزی نشده باشد. رابطه شماره (۱۰) تضمین می کند تنها در صورتی مجاز به پرداخت هزینه و صرف زمان راه اندازی برای یک محصول هستیم که در موقعیت قبل محصول دیگری تولید شده باشد. رابطه شماره (۱۱) تضمین می کند در هر دوره هر عملیات حداکثر یکبار امکان پردازش را دارد. رابطه شماره (۱۲) تضمین کننده خاصیت راه اندازی دنباله دار با وجود پارامتر راه اندازی وابسته به توالی است. در شرایط راه اندازی دنباله دار چنانچه بین دو راه اندازی متوالی یک عملیات بر روی یک ماشین، هیچ عملیات دیگری راه اندازی نشود نیاز به راه اندازی مجدد آن عملیات نیست. اما در این مدل بدلیل وجود پارامتر راه اندازی وابسته به توالی نمی توان تنها به رابطه شماره (۱۰) بمنظور ایجاد خاصیت راه اندازی دنباله دار اکتفاء نمود. به عبارت بهتر در صورت عدم وجود پارامتر راه اندازی وابسته به توالی، رابطه شماره (۱۰) که برگرفته از مدل CSLP است خاصیت راه اندازی دنباله دار را تضمین می نماید. (برای آشنایی بیشتر با مدل CSLP به مقالات ارائه شده توسط دراکسل و همکارانش [۱۰] و استاگمیر و کلارک [۲۸] مراجعه شود) روابط شماره (۱۳) و (۱۴) تضمین کننده اصل بقاء ماده یا توازن موجودی در داخل یک دوره هستند و حداقل موجودی لازم را برای تولید یک محصول در یک موقعیت خاص تضمین می کنند. روابط شماره (۱۵) و (۱۶) حدود بالا و پایین تولید یک محصول در یک موقعیت را بگونه ای تعیین می کنند که اصل بقاء ماده یا توازن موجودی در داخل دوره رعایت شود. روابط (۱۷) و (۱۸) و (۱۹) و (۲۰) وضعیت دو موقعیت متفاوت را در داخل یک دوره از نظر زمان شروع و پایان نسبت به هم مشخص می کنند. توجه به نامعلوم بودن زمان های شروع و پایان موقعیت های تولیدی در مدل ظرف زمانی بزرگ GLSP، روابط فوق جهت تعیین وضعیت موقعیت های تولیدی دو ماشین متفاوت در درون یک دوره نسبت به هم بکار گرفته شده اند. روابط (۲۱) و (۲۲) تضمین می کنند محصول ناشی از پردازش در یک موقعیت خاص تا زمانی که پردازش یا تولید در آن موقعیت خاتمه نیابد قابل مصرف توسط عملیات یا محصول مابعد خود نیست. برخی عملیات ها مانند عملیات های حرارتی که ورودی خود را یکجا تحویل گرفته و خروجی خود را نیز یکجا تحویل می دهند از این نوع اند. روابط (۲۳) و (۲۴) و (۲۵) و (۲۶) تنظیم و تعیین کننده زمان های شروع و پایان موقعیت ها هستند. روابط (۲۷) و (۲۸) به ترتیب حدود متغیرهای اصلی و کمکی مدل را مشخص می کنند. در مدل فوق عملیات $O_{j+1,1}$ یک عملیات مجازی است که بمنظور تعیین زمان و هزینه اولین راه اندازی روی هر ماشین استفاده می شود.

$$f^{m,r} = s^{m,r} + \sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^{h_j} (a_{j,h}^m \cdot X_{j,h}^{m,r} + \sum_{k=1}^J \sum_{l=1}^{h_k} \delta_{j,h,k,l}^m Z_{j,h,k,l}^{m,r}) \quad (23)$$

$$r = 1, \dots, NT \& m = 1, \dots, M$$

$$s^{m,r+1} \geq f^{m,r} \quad \begin{matrix} r \\ = 1, \dots, NT - 1; \\ m = 1, \dots, M \end{matrix} \quad (24)$$

$$f^{m,r} \leq F_t \quad \begin{matrix} t = 1, \dots, T \& ret; \\ m = 1, \dots, M \end{matrix} \quad (25)$$

$$s^{m,r} \geq S_t \quad (26)$$

$$\begin{matrix} o_{m,t} \leq O_{m,t}; X_{j,h}^{m,r} \geq 0; I_{j,h}^t \geq 0; i_{j,h}^{m,r} \geq 0; \\ s^{m,r} \geq 0; f^{m,r} \geq 0; y_{j,h}^{m,r} \in \{0,1\}; Z_{j,h,k,l}^{m,r} \in \{0,1\} \\ t = 1, \dots, T; m = 1, \dots, M; r = 1, \dots, NT; j, k \\ = 1, \dots, J; \\ h = 1, \dots, h_j; l = 1, \dots, h_k \end{matrix} \quad (27)$$

$$\begin{matrix} \eta_{j,h}^{m,r,m'r'} \geq 0; \psi_{j,h}^{m,r,m'r'} \geq 0; q^{m,r,m'r'} \\ \in \{0,1\}; \\ p^{m,r,m'r'} \in \{0,1\} \\ t = 1, \dots, T \& r \& r' \& et; m, m' = 1, \dots, M; |m \\ \neq m' \text{ or} \\ r \neq r'; j = 1, \dots, J; h = 1, \dots, h_j \end{matrix} \quad (28)$$

رابطه شماره (۱) نشان دهنده تابع هدف مسئله شامل مجموع هزینه های نگهداری، راه اندازی، تولید و اضافه کاری است. رابطه شماره (۲) نشان دهنده اصل بقاء ماده یا توازن موجودی بین دوره های زمانی برای عملیات های آخر هر کار و رابطه شماره (۳) نشان دهنده این اصل برای سایر عملیات ها است. رابطه شماره (۴) تضمین می نماید محدودیت ظرفیت در هر دوره رعایت شود. این رابطه نشان می دهد عملیات راه اندازی وابسته به توالی کارها از ظرفیت ماشین آلات استفاده می کند و همچنین انجام اضافه کار نیز برای ماشین ها مجاز است. رابطه شماره (۵) نشان می دهد در هر موقعیت حداکثر یک عملیات امکان پردازش را دارد. روابط شماره (۶) و (۷) تضمین می کنند انجام تولید یک محصول در یک موقعیت منوط به پرداخت هزینه و صرف زمان راه اندازی آن محصول است. رابطه شماره (۸) نشان می دهد یک عملیات تنها در صورتی می تواند بر روی یک ماشین پردازش شود که آن ماشین قابلیت پردازش آن عملیات را داشته باشد. رابطه شماره (۹) تضمین می کند تنها در صورتی می توانیم هزینه و

۳. الگوریتم پیشنهادی حل مسأله

در این مقاله یک روش فراابتکاری ترکیبی حاصل از ترکیب الگوریتم ژنتیک با الگوریتم بهینه سازی توده ذرات را پیشنهاد داده ایم. توانایی الگوریتم ژنتیک در بهینه مسائل با فضای جواب گسسته و توانایی الگوریتم بهینه سازی توده ذرات در حل مسائل با فضای حل پیوسته ما را به ارائه این ترکیب مؤثر از دو الگوریتم واداشت. زیرا در این مسأله با دو فضای حل گسسته (متغیرهای مربوط به توالی، تخصیص و تعیین دوره تولید) و پیوسته (متغیر اندازه انباشته) مواجهه ایم. همچنین از آنجایی که میس و همکارانش [۳] ثابت کرده اند پیدا کردن یک جواب شدنی برای مسأله اندازه انباشته با محدودیت ظرفیت منابع و وجود زمان راه اندازی NP-hard است. قطعاً بخش زیادی از فرآیند جستجوی جواب بهینه صرف جستجو در نقاط نشدنی فضای مسأله خواهد شد و این موضوع کاهش کیفیت جواب های نهایی الگوریتم را در پی خواهد داشت. به همین دلیل ما یک روش ابتکاری مؤثر و کارآمد را به نام رویه انتقال ارائه داده ایم. این روش ابتکاری برخلاف استراتژی های حذف یا تعریف تابع جریمه برای جواب های نشدنی، با استفاده از یک جستجوی همسایگی به هدایت فرآیند کاوش به نقاط شدنی مسأله کمک می کند. در ادامه این بخش نحوه اجرای الگوریتم ترکیبی پیشنهادی به تفکیک اجزاء الگوریتم و به تفصیل بیان خواهد شد.

۳-۱. نحوه کد گذاری کروموزم ها

بمنظور نمایش کروموزم های الگوریتم ژنتیک از یک ماتریس با دو سطر و تعداد MNT ستون استفاده می شود که در آن M تعداد ماشین ها، N تعداد موقعیت تولید هر ماشین در هر دوره

T و تعداد دوره ها در طول افق برنامه ریزی است. در این ماتریس عناصر سطر اول شامل سه مولفه (j, h, q) هستند که نشان می دهند تولید محصول حاصل از عملیات $O_{j,h}$ برابر q واحد است. ترتیب قرار گیری مولفه های سطر اول ماتریس، توالی انجام کارها را نسبت به هم مشخص می نماید. با توجه به اینکه هر ماشین در هر دوره دارای N موقعیت تولید است بنابراین MN آرایه اول سطر اول نشان دهنده توالی های مربوط به دوره اول و MN آرایه t ام سطر اول نشان دهنده توالی MN موقعیت مربوط به دوره t ام است. در این مسأله پارامتر N بگونه ای تعیین می شود که تمام عملیاتها فرصت تولید در یک دوره را داشته باشند. همچنین سطر دوم ماتریس معرف تخصیص صورت گرفته به عناصر سطر اول است و مؤلف های آن نشان دهنده شماره ماشین های تخصیص داده شده به عملیات های سطر اول است. شکل ۱ یک کروموزم را برای دو کار نمایش می دهد که هر کدام شامل دو عملیات هستند و قرار است بر روی دو ماشین در یک افق برنامه ریزی بطول سه دوره پردازش شوند. در حالی که مقدار پارامتر N مساوی ۲ فرض شده است در ۴ ژن اول کروموزم که مربوط به اولین دوره افق برنامه ریزی است مشاهده می شود که عملیات $O_{1,1}$ به مقدار ۳۰ واحد در اولین توالی مربوط به این دوره و بر روی ماشین یک تولید می شود. دومین توالی دوره اول مربوط به اولین موقعیت تولیدی ماشین دو است که در آن محصول عملیات $O_{2,1}$ به مقدار ۳۰ واحد تولید می شود. همچنین هیچگونه برنامه ریزی برای چهارمین توالی دوره اول که طبیعتاً طبق توالی های قبل مربوط به موقعیت دوم ماشین دو است وجود ندارد.

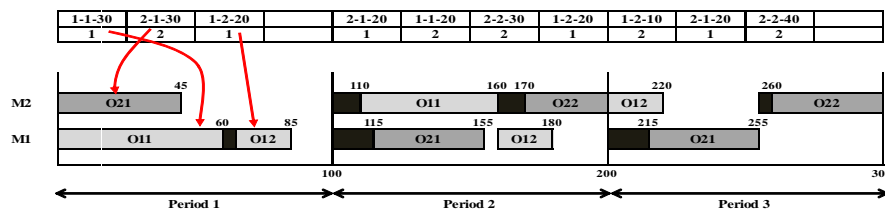
period 1			period 2			period 3			
1-1-30	2-1-30	1-2-20	2-1-20	1-1-20	2-2-30	1-2-20	1-2-10	2-1-20	2-2-40
1	2	1	1	2	2	1	2	1	2

شکل ۱. نمایش نحوه کد گذاری کروموزم ها

بودن هر دو فاکتور برای شروع عملیات، زمان شروع برابر با ماکزیمم این دو فاکتور است. همچنین طول زمان پردازش عملیات $O_{j,h}$ برابر با q است چنانچه فرض کنیم عملیات $O_{j,h}$ به ماشین m تخصیص یافته است. شکل ۲ نحوه رمز گشایی کروموزم شکل ۱ را نمایش می دهد.

۳-۲. نحوه رمز گشایی کروموزم ها

در رمز گشایی کروموزم باید به دو عامل زمان شروع پردازش یک عملیات و همچنین طول زمان پردازش آن عملیات توجه نمود. زمان شروع پردازش یک عملیات وابسته به زمان در دسترس قرار گرفتن ماشین مربوط به آن عملیات و همچنین زمان فراهم بودن موجودی لازم برای شروع پردازش عملیات است. با توجه به لازم



شکل ۲. نمایش نحوه رمز گشایی مسأله

$$A_i(t_1, t_2) = \frac{\sum_{t=t_1+1}^{t_2-1} \sum_{m=1}^M SC_{j,h}^m}{\sum_{t=t_1+1}^T \sum_{m=1}^M SC_{j,h}^m} \quad (30)$$

قاعده مبتنی بر موجودی^۲: در این قاعده که تمایل به کاهش مقادیر موجودی از طریق افزایش تعداد راه اندازی دارد احتمال انتخاب دوره t_2 پس از انتخاب دوره t_1 برای محصول i برابر است با:

$$PL_i(t_1, t_2) = \frac{L_i(t_1, t_2)}{\sum_{\varphi > t_1} L_i(t_1, \varphi)} \quad (31)$$

درحالی که:

$$L_i(t_1, t_2) = \frac{\sum_{t=t_1}^{t_2-1} \omega_t(t - t_2 + t_1)}{\sum_{t=t_1}^{t_2-1} (t - t_2 + t_1)} \quad (32)$$

مقدار ω_t برابر صفر است چنانچه محصول i در دوره t با تقاضای مواجه باشد و در غیر این صورت برابر با یک است.

برای هر جواب عضو جمعیت اولیه از ترکیب های متفاوت سه قاعده فوق استفاده می شود که بصورت تصادفی به هر محصول از مجموعه محصولات جواب اولیه تخصیص می یابند. انتخاب دوره ها برای هر محصول براساس یک حرکت پیشرونده است. پس از انتخاب دوره t_1 انتخاب بعدی از بین دوره های $\{t_1 + 1, t_1 + 2, \dots, T + 1\}$ انجام می شود. دوره $T + 1$ یک دوره مجازی بوده که انتخاب آن به منزله توقف تولید محصول در دوره t_1 است. بدلیل جلوگیری از مواجهه با کمبود انتخاب اولین دوره تولیدی برای هر محصول تابعی از اولین دوره ای است که آن محصول در آن با تقاضا مواجه است. به عبارت بهتر اولین دوره تولیدی یک محصول حتماً باید کوچکتر مساوی اولین دوره ای باشد که در آن با تقاضا مواجه است.

۳-۳-۲. تعیین توالی اجرای عملیات های تخصیص یافته به یک دوره

برای تعیین توالی اجرای عملیات هایی که به یک دوره خاص تخصیص داده شده اند از دو روش زیر استفاده می شود.

- روش تصادفی: در این روش از عملیات های تخصیص یافته به یک دوره، یک عملیات بطور تصادفی انتخاب شده و وارد اولین اولویت توالی برنامه ریزی نشده آن دوره می شود.
- روش بیشترین عملیات باقیمانده (MOR): در این روش ابتدا تعداد دفعات راه اندازی هر کدام از عملیات ها مشخص می شود. فرآیند انتخاب عملیات ها برای ورود به برنامه تولید مبتنی بر بیشترین راه اندازی باقیمانده است و هر کدام از عملیات ها که تعداد راه اندازی باقیمانده (برنامه ریزی نشده) آن بیشتر از بقیه باشد انتخاب و وارد اولین توالی برنامه ریزی نشده آن دوره می

در شکل ۲ با توجه به اینکه مقدار $a_{1,1}^1$ برابر ۲ فرض شده است مشاهده می شود عملیات $O_{1,1}$ در اولین دوره به مقدار ۶۰ واحد زمانی پردازش شده است همچنین می توان پی برد که مقدار $a_{2,1}^1$ ، $a_{2,1}^2$ و $a_{2,1}^3$ به ترتیب برابر با ۲.۵، ۲ و ۱.۵ فرض شده است. در این شکل قسمت های سیاه رنگ نشان دهنده زمان های آماده سازی وابسته به توالی هستند. همچنین در سومین دوره افق برنامه ریزی مشاهده می شود زمان شروع عملیات $O_{2,2}$ علی رغم در دسترس بودن ماشین ۲ در زمان ۲۲۰ و بدلیل کافی نبودن مقدار موجودی محصول حاصل از عملیات $O_{2,1}$ تا زمان ۲۵۵ به تعویق افتاده است. (ضریب مصرف محصول عملیات $O_{2,1}$ در محصول عملیات $O_{2,2}$ برابر یک فرض شده است)

۳-۳. تولید جمعیت اولیه الگوریتم

الگوریتم ژنتیک جزء الگوریتم های مبتنی بر جمعیت اولیه است. برای مسأله مورد بررسی بمنظور تولید جمعیت اولیه لازم است متغیر های تصمیم مسأله بنوعی تعیین شوند که ضمن سرعت بخشیدن جهت دستیابی به جواب بهینه یا نزدیک به بهینه به جستجوی بخشهای وسیعی از فضای جواب کمک نماید بدین منظور جمعیت اولیه می بایست هم دارای تنوع و گوناگونی بوده و هم به بخش هایی از فضای جواب که تصور می شود جواب های مناسبی را می توان در آن فضا یافت نزدیکی داشته باشد. تولید جمعیت اولیه، با توجه به متغیر های تصمیم مسأله مبتنی بر چهار قدم زیر است.

۳-۳-۱. تعیین دوره های تولیدی برای هر محصول

در این قدم دوره های تولیدی هر محصول براساس سه قاعده زیر تعیین می شوند.

روش تصادفی: طبق این قاعده دوره های تولیدی برای محصول i بصورت تصادفی انتخاب می شوند. در این قاعده تمامی دوره ها از شانس یکسانی جهت انتخاب برخوردار هستند.

قاعده مبتنی بر راه اندازی^۱: در این قاعده که تمایل به انجام تعداد راه اندازی کمتر دارد، احتمال انتخاب دوره t_2 پس از انتخاب دوره t_1 برای محصول i (محصول عملیات $O_{j,h}$) برابر است با:

$$PA_i(t_1, t_2) = \frac{A_i(t_1, t_2)}{\sum_{\varphi > t_1}^{T+1} A_i(t_1, \varphi)}$$

درحالی که:

² Inventory based method

³ Most operation remained

¹ Setup based method

شوند. در صورتی که تعداد بیشتر از یک عملیات با بیشترین راه اندازی باقیمانده وجود داشته باشد یکی از آنها بصورت تصادفی انتخاب می شود.

در روش های فوق بمنظور جلوگیری از ایجاد کمبود باید در نظر داشت که اولین مرتبه تولید یک عملیات هیچگاه بعد از اولین مرتبه تولید عملیات مابعد آن برنامه ریزی نشود.

۳-۳-۳. تعیین مقادیر اندازه انباشته برای هر عملیات

نحوه تعیین مقادیر اندازه انباشته بطوری که با کمبود مواجه نشویم حائز اهمیت است. رویه تعیین اندازه انباشته یک عملیات براساس یک روند پیشرونده است و از دوره اول شروع و تا دوره آخر ادامه می یابد. ابتدا مجموع مقادیر تقاضای یک عملیات $(r_{j,h})$ بین دو راه اندازی متوالی S_1 و S_2 طبق روابط زیر محاسبه می شود.

$$r_{j,h} = \sum_{s=S_1}^{S_2-1} \rho_{j,h} X_{j,h+1}^s \quad (33)$$

همچنین برای آخرین عملیات هر کار (O_{j,h_j}) :

$$r_{j,h_j} = \sum_{t=t_1}^{t_2-1} d_{j,t} \quad \begin{matrix} S_1 \in t_1 \text{ and } S_2 \\ \in t_2 \end{matrix} \quad (34)$$

به علت وابسته بودن برنامه تقاضای یک عملیات به برنامه تولید عملیات مابعدش لازم است تعیین اندازه انباشته همواره از آخرین عملیات یک کار شروع شود. بعد از محاسبه پارامتر $r_{j,h}$ حد پایین تولید در توالی S_1 طبق رابطه زیر محاسبه می شود:

$$l_{j,h} = \max(r_{j,h} - \Delta_{j,h}, 0) \quad \Delta_{j,h} \geq 0 \quad (35)$$

در حالی که پارامتر $\Delta_{j,h}$ تفاضل مجموع تولید منهای مجموع مصرف محصول عملیات $O_{j,h}$ تا قبل از توالی S_1 است. نهایتاً مقدار تولید محصول عملیات $O_{j,h}$ در توالی S_1 برابر است با:

$$X_{j,h}^{S_1} = l_{j,h} + R(D_{j,h} - \Delta_{j,h} + \sum_{s=1}^{S_1} \rho_{j,h} X_{j,h+1}^s - l_{j,h}) \quad (36)$$

در رابطه (۳۶) R یک عدد تصادفی بین صفر و یک و $D_{j,h}$ کل تقاضای محصول عملیات $O_{j,h}$ در طول افق برنامه ریزی است.

۳-۳-۴. تخصیص ماشین به عملیات ها

بمنظور تخصیص یک ماشین به یک عملیات از سه روش زیر استفاده خواهد شد.

- روش تصادفی: در این روش یک ماشین از ماشین آلات مجاز بطور تصادفی به هر عملیات تخصیص می یابد.
- روش زودترین زمان دسترس: در این روش از مجموعه ماشین آلات مجاز هر عملیات، ماشینی انتخاب می شود که زودتر از

سایر ماشین ها در دسترس باشد. ابتدا انتخاب ماشین برای عملیات واقع در اولین توالی هر دوره بطور تصادفی انجام می شود. سپس در هر توالی پس از انجام تخصیص، زمان در دسترس ماشین ها برای عملیات بعد بروز رسانی و نهایتاً آن عملیات به ماشینی تخصیص داده می شود که زودتر از سایر ماشین ها در دسترس است.

- روش کمترین زمان راه اندازی: در این روش از مجموعه ماشین آلات مجاز یک عملیات، ماشینی انتخاب می شود که با توجه به آخرین عملیات پردازش شده بر روی آن، متحمل کمترین زمان راه اندازی وابسته به توالی شویم.

۳-۴. نحوه انتخاب برای تولید مجدد

پس از محاسبه تابع هدف برای هر یک از جواب ها عضو جمعیت فعلی، از یک تورنمنت بمنظور انتخاب جوابهایی از جمعیت جهت تولید نسل بعد استفاده می شود. در این تورنمنت دو جواب بطور تصادفی انتخاب و بصورت زیر تصمیم گیری می شود.

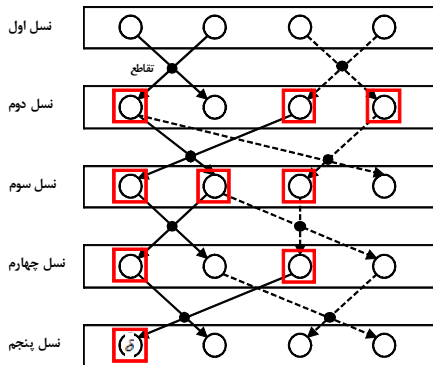
- در مقایسه دو جواب شدنی، جوابی انتخاب می شود که مقدار تابع هدف کمتری داشته باشد.
- در مقایسه یک جواب شدنی و یک جواب نشدنی، همواره جواب شدنی ارجح تر بوده و انتخاب می شود.
- در مقایسه دو جواب نشدنی، یک جواب تصادفی انتخاب می شود.

۳-۵. عملگر تقاطع

در این مسأله، عملگر تقاطع مبتنی بر تقاطع بر روی یک یا چند کار است. در این عملگر ابتدا تعداد k کار $(1 \leq k \leq J)$ بصورت تصادفی انتخاب می شوند. سپس برای تولید فرزند اول، برنامه تولید کارهای منتخب بدون تغییر در مؤلفه های توالی، تخصیص و مقدار اندازه انباشته عیناً در فرزند اول کپی می شود. برنامه تولید مابقی کارها از والد دوم و طبق اولویت توالی شان در فرزند اول کپی می شوند. برای تولید فرزند دوم بصورت عکس فرزند اول عمل می شود. این تقاطع علاوه بر سادگی در صورتی که کروموزم های والد شدنی باشند همواره یک جواب شدنی تولید می کند. شکل ۳ یک نمونه از عملگر تقاطع را بر روی دو کروموزم فرضی نمایش می دهد. در این شکل کار ۱ جهت انجام عملگر تقاطع انتخاب شده است.

	period 1				period 2				period 3			
parent1	1-1-30	2-1-30	1-2-20		2-1-20	1-1-20	2-2-30	1-2-20	1-2-10	2-1-20	2-2-40	
	1	2	1		1	2	2	1	2	1	2	
proto child	1-1-30		1-2-20			1-1-20		1-2-20	1-2-10			
	1		1			2		1	2			
final child	1-1-30	2-1-20	1-2-20	2-2-15	2-1-20	1-1-20	2-2-25	1-2-20	1-2-10	2-1-30	2-2-30	
	1	1	1	2	2	2	2	1	2	1	1	
parent2	2-1-20	2-2-15	1-1-30		2-1-20	1-1-20	2-2-25		2-1-30	1-2-50	2-2-30	
	1	2	2		2	1	2		1	2	1	

شکل ۳. نمایش نحوه اجرای عملگر تقاطع



شکل ۴. نمایش نحوه شناسایی نسل های گذشته یک

کروموزم با پارامتر $\lambda = 3$

پس از شناسایی مجموعه والدین کروموزم δ تا λ نسل قبل (E) جهت تعیین pbest طبق شبه کد زیر عمل می نمایم.

```

Best objective = a positive large number
pbest = 0
FOR each i ∈ E
    IF  $y_{j,h}^{m,t} = 1$  and objective function(i) < Best objective THEN
        Best objective = objective function(i)
        pbest =  $x_{j,h}^{m,t}$ 
    ENDIF
ENDIFOR
IF pbest = 0 THEN
    FOR each i ∈ E
        IF  $\exists$  a machine  $m'$  that  $y_{j,h}^{m',t} = 1$  and objective function(i) < Best objective THEN
            Best objective = objective function(i)
            pbest =  $x_{j,h}^{m',t}$ 
        ENDIF
    ENDFOR
ENDIF
    
```

۳-۶. عملگر جهشی

اجرای عملگر جهشی مسأله نیز مبتنی بر برنامه ریزی مجدد تعداد k کار ($1 \leq k \leq J$) است که بطور تصادفی انتخاب می شوند. در این عملگر کارهای انتخاب شده مجدداً مطابق توضیحات ارائه در تولید جمعیت اولیه، برنامه ریزی می شوند.

۳-۷. تعیین مقادیر اندازه انباشته براساس الگوریتم بهینه

سازی توده ذرات

آنچه مسلم است اجرای عملگر تقاطع بصورت تشریح شده در قسمت (۵.۳) میزان جستجو در فضای متغیر تصمیم اندازه انباشته را محدود به مقادیر تعیین شده در جمعیت اولیه نموده و هیچگونه کاوشی در طیف وسیعی از این مقادیر صورت نخواهد گرفت. به همین منظور از ترکیب رویکردی برگرفته از الگوریتم بهینه سازی توده ذرات با الگوریتم ژنتیک بمنظور جستجوی بیشتر در فضای متغیر تصمیم اندازه انباشته استفاده نموده ایم. در این رویکرد پس از اجرای عملگر تقاطع مقادیر اندازه انباشته تعداد k کار انتخاب شده جهت اجرای تقاطع، در کروموزم فرزند δ بصورت زیر تعیین می شود. در واقع می خواهیم در کروموزم مقدار اندازه انباشته عملیات $O_{j,h}$ را در دوره t و روی ماشین m ($x_{j,h}^{m,t}$) تعیین کنیم.

قدم یک. تعیین مؤلفه ادراکی (pbest):

این مؤلفه همانند حافظه ای، موقعیتی که ذره در آن بهتر بوده را حفظ و در بازگشت ذره به بهترین موقعیت قبلی اش تأثیر گذار است. در الگوریتم پیشنهادی پارامتر pbest با توجه به مقادیر اندازه انباشته نسل های گذشته یک کروموزم تعیین می شود. میزان رجوع به نسل های گذشته بمنظور تعیین مقدار pbest محدود و توسط پارامتر از پیش تعیین شده λ مشخص می شود. شکل ۴ نحوه شناسایی نسل های گذشته کروموزم فرزند δ را با $\lambda = 3$ و جمعیتی به اندازه ۴ کروموزم نمایش می دهد.

مرحله درصد از پیش تعیین شده ای از بهترین جواب های جمعیت فعلی مستقیماً به نسل بعد منتقل می شوند.

۳-۹. رویه انتقال

در مسأله مورد بررسی با سه نوع از جواب های نشدنی مواجه هستیم. نوع اول مربوط به جواب هایی دارای کمبود است. نوع دوم جواب هایی هستند که در آن ها ظرفیت مجاز استفاده از یک ماشین شامل ظرفیت معمول ماشین بعلاوه ظرفیت اضافه کاری نقض شده است و نوع سوم مربوط به جواب هایی می شوند که در آن ها ظرفیت یک دوره نقض شده باشد به عبارت بهتر طول برنامه زمانبندی عملیات های تخصیص یافته به دوره از طول دوره فراتر شود. درخصوص نوع اول جواب های نشدنی ما رویکردی پیشگیرانه اتخاذ و با ایجاد شرایطی در نحوه تولید جمعیت اولیه و اجرای عملگرهای تقاطع و جهش از تولید اینگونه جواب ها جلوگیری می نماییم. اما در جواب های نوع دوم و سوم از رویکردی اصلاحی بهره می بریم. زیرا به نظر می رسد در خصوص این نوع از جواب های نشدنی، اعمال رویکرد پیشگیرانه نیازمند صرف زمان و پیچیدگی های محاسباتی بالاتری است. به همین منظور در هر مرحله از حل الگوریتم پس از تولید جمعیت جدیدی از جواب ها، کلیه جواب های جمعیت از نظر رعایت محدودیت ظرفیت ماشین آلات و دوره ها کنترل می شوند. چنانچه جواب یا جواب هایی دارای دوره یا دوره هایی باشند که در آنها شرایط محدودیت ظرفیت نقض شده است از یک روش ابتکاری ساده و در عین حال مؤثر برای اصلاح جواب و تولید یک جواب شدنی استفاده می کنیم. از آنجایی که این روش بر مبنای انتقال بخشی از تولید دوره های ناقص محدودیت ظرفیت به سایر دوره ها عمل می کند به آن رویه انتقال می گوئیم. رویه انتقال دارای یک رویکرد عقب رونده است و بر مبنای انتقال مقادیر تولید اضافه دوره t به دوره $t - 1$ عمل خواهد کرد. (چنانچه دوره t دوره ای باشد که در آن محدودیت ظرفیت شامل ظرفیت ماشین یا دوره نقض شده باشد). برای اجرای این رویه طبق قدم های زیر عمل می کنیم.

قدم یک . شناسایی آخرین دوره در طول افق برنامه ریزی که محدودیت ظرفیت ماشین یا دوره در آن نقض شده است. در صورتی که محدودیت ظرفیت در تمام دوره ها رعایت شده باشد فرآیند انتقال با ایجاد یک جواب شدنی متوقف می شود. همچنین در صورتی که محدودیت ظرفیت در اولین دوره افق برنامه ریزی نقض شده باشد رویه انتقال بدون ایجاد یک جواب شدنی متوقف می شود.

قدم دو . محاسبه مقدار ظرفیت استفاده شده غیر مجاز در دوره t (Q_t) :

در شبه کد فوق مقدار $y_{j,h}^{m,t}$ برابر یک است اگر عملیات $O_{j,h}$ در دوره t و روی ماشین m تولید شود و در غیر اینصورت برابر صفر است.

قدم دو. تعیین مؤلفه اجتماعی (gbest) :

مؤلفه اجتماعی همانند معیاری است که ذرات برای رسیدن به آن تلاش می کنند. تأثیر این مؤلفه این است که هر ذره به سمت بهترین موقعیت پیدا شده توسط همسایگانش کشیده می شود. در الگوریتم پیشنهادی پارامتر gbest برابر با مقدار اندازه انباشته عملیات $O_{j,h}$ در دوره t در بهترین جواب کشف شده در طول پروسه حل است.

قدم سه. تعیین مقدار اندازه انباشته عملیات $O_{j,h}$ را در دوره t و روی ماشین m ($x_{j,h}^{m,t}$) در این قدم مطابق شبه کد زیر عمل می شود.

$$\begin{aligned} V_{j,h}^{t(z+1)} &= V_{j,h}^{t(z)} + c_1 R_1 (pbest - x_{j,h}^{m,t(z)}) \\ &\quad + c_2 R_2 (gbest - x_{j,h}^{m,t(z)}) \\ x_{j,h}^{m,t(z+1)} &= x_{j,h}^{m,t(z)} + V_{j,h}^{t(z+1)} \\ \text{IF } x_{j,h}^{m,t(z+1)} &> ux_{i,j}^{m,t} \text{ THEN} \\ x_{j,h}^{m,t(z+1)} &= ux_{i,j}^{m,t} \\ \text{ELSEIF } x_{j,h}^{m,t(z+1)} &< lx_{i,j}^{m,t} \text{ THEN} \\ x_{j,h}^{m,t(z+1)} &= lx_{i,j}^{m,t} \\ \text{ENDIF} \end{aligned}$$

Z : نشان دهنده عدد تکرار الگوریتم است.

$ux_{i,j}^{m,t}$: حد بالای تولید محصول عملیات $O_{j,h}$ در دوره t و روی ماشین m را بیان می کند به عبارت دیگر تولید بیش از این مقدار محصول عملیات $O_{j,h}$ در دوره t و روی ماشین m فراتر از کل نیاز محصول در طول افق برنامه ریزی است.

$lx_{i,j}^{m,t}$: حد پایین تولید محصول عملیات $O_{j,h}$ در دوره t و روی ماشین m را بیان می کند به عبارت دیگر تولید کمتر از این مقدار محصول عملیات $O_{j,h}$ در دوره t و روی ماشین m موجب کمبود خواهد شد.

$V_{j,h}^t$: سرعت اولیه برای تولید محصول عملیات $O_{j,h}$ در دوره t و R_1 و R_2 : دو عدد تصادفی بین صفر و یک
 C_1 و C_2 : ثابتهای شتاب هستند که به ترتیب وزن کشش هر ذره به سمت موقعیت pbest (جزء اداراکی) و gbest (جزء اجتماعی) را نشان می دهند.

۳-۸. نخبه گرایی

در این الگوریتم بدلیل استفاده از بهترین جواب هایی که در نسل های قبل یافت شده اند و ایجاد خاصیت نخبه گرایی، در هر

Find first unplanned position $r' \in t - 1$ on the machine m and $X_{j,h}^{r',m} = qs_{j,h}$
ELSE
 Select random a machine m' with unplanned position
 Find first unplanned position r' on the machine m' and $X_{j,h}^{r',m'} = qs_{j,h}$
ENDIF

قدم پنجم. اصلاح توالی تولید محصولات در دوره $t - 1$. در برخی موارد در نتیجه انتقال بخشی از تولید عملیات $O_{j,h}$ از دوره t به دوره $t - 1$ ممکن است اصل توازن موجودی در داخل دوره $t - 1$ برای عملیات $O_{j,h}$ از بین برود. به عبارت دیگر در چنین مواقعی قطعاً عملیات $I_{j,h-1}^{t-2} < \rho_{j,h-1} X_{j,h}^{t-1}$ در دوره $t - 1$ و در توالی بعد از توالی عملیات $O_{j,h}$ ، برنامه ریزی شده است و کافی است که توالی دو عملیات با هم جایجا شوند.

۴. نتایج محاسباتی

در این بخش به کمک نتایج محاسباتی، عملکرد و کارایی روش حل و اعتبار مدل ریاضی پیشنهادی بررسی و مقایسه می گردد. مدل ریاضی برنامه ریزی ترکیبی عدد صحیح پیشنهادی توسط نرم افزار GAMS 23.4 حل شده و دو الگوریتم فراابتکاری با نام های GA و GA_PSO توسط نرم افزار MATLAB 7.1 کد شده و بر روی کامپیوتر با پردازشگر 4 G و 2.66 GHz حافظه اجراء شده است.

در الگوریتم GA هر فرزند مقدار اندازه انباشته کارهای خود را عیناً از والدین خود به ارث می برد. اما در الگوریتم GA_PSO مقادیر اندازه انباشته در هر فرزند پس از اجرای عملگر تقاطع براساس رویکردی برگرفته از الگوریتم PSO تعیین خواهد شد. بمنظور بررسی عملکرد الگوریتم ها و مدل ریاضی پیشنهادی از شاخص زیر استفاده خواهد شد.

$$GAP_A = \frac{(\text{objective function})_A - \text{Min}(\text{objective function})}{\text{Min}(\text{objective function})} \quad (39)$$

۴-۱. تولید داده های آزمایش مسأله

با توجه به اینکه مسأله بهینه سازی همزمان اندازه انباشته و زمانبندی کارها در محیط تولید کارگاهی انعطاف پذیر هیچگونه سابقه ای در تحقیقات انجام شده در این حوزه ندارد لازم است داده های آزمایشی مسأله بمنظور بررسی و اعتبار سنجی مدل ریاضی پیشنهادی و همچنین کیفیت نتایج روش حل پیشنهادی

در این قدم چنانچه محدودیت ظرفیت ماشین m در دوره t نقض شده باشد داریم:

$$Q_t = \sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^{h_j} \sum_{r \in t} (a_{j,h}^m \cdot X_{j,h}^{m,r} + \sum_{k=1}^J \sum_{l=1}^{h_k} \delta_{j,h,k,l}^m Z_{j,h,k,l}^{m,r}) - C_{m,t} + O_{m,t} \quad (37)$$

و چنانچه محدودیت ظرفیت دوره t نقض شده باشد داریم:

$$Q_t = \max((f^{m,r} - (t - 1)PC) | r \in t) - PC \quad (38)$$

PC: کل ظرفیت یا طول هر دوره افق برنامه ریزی

قدم سه. شناسایی مسیر بحرانی زمانبندی تولید

در این قدم چنانچه محدودیت ظرفیت ماشین ظرفیت ماشین m در دوره t نقض شده باشد مسیر بحرانی شامل کلیه عملیات های پردازش شده روی ماشین m بعلاوه عملیات هایی است که باعث می شوند زمان اتمام کار ماشین m در دوره t کمتر از $(f^{m,r} | r = Nt)$ نشود. ولی چنانچه محدودیت ظرفیت دوره t نقض شده باشد مسیر بحرانی شامل مجموعه ای از عملیات هایی است که در زمانبندی تولید دوره t هیچگونه شنآوری ندارند.

قدم چهار. انتقال اولین عملیات مسیر بحرانی

در این قدم مقادیری از تولید اولین عملیات مسیر بحرانی (عملیات $O_{j,h}$) از دوره t به دوره $t - 1$ منتقل می شود. توجه به این نکته ضروری است که حتماً می بایست انتقال از اولین عملیات مسیر بحرانی انجام شود زیرا در غیر اینصورت ممکن است با کمبود در دوره $t - 1$ مواجه شویم. برای این انتقال با فرض اینکه عملیات $O_{j,h}$ بر روی ماشین m پردازش شده و $TP_{j,h}^t$ برابر با کل زمان پردازش و راه اندازی عملیات $O_{j,h}$ در دوره t باشد بصورت زیر عمل می شود.

• اگر $TP_{j,h}^t \leq Q_t$ باشد کل تولید عملیات $O_{j,h}$ در دوره t ($qs_{j,h} = X_{j,h}^t$) به دوره $t - 1$ منتقل و به قدم دو باز می گردیم.

• اگر $TP_{j,h}^t > Q_t$ بخشی از تولید عملیات $O_{j,h}$ در دوره t ($qs_{j,h} = \min\{\frac{Q_t}{a_{j,h}^m}, X_{j,h}^t\}$) به دوره $t - 1$ منتقل می شود.

• بمنظور زمانبندی مقادیر انتقال داده شده در دوره $t - 1$ طبق شبه کد زیر عمل می شود.

IF
 \exists a position $r' \in t - 1$ and a machine m' that $X_{j,h}^{r',m'} > 0$ **THEN**
 $X_{j,h}^{r',m'} = X_{j,h}^{r',m'} + qs_{j,h}$
ELSEIF machine m have minimum a unplanned position in period $t - 1$ **THEN**

تولید شوند. جدول ۱ نحوه تولید نمونه مسائل آزمایشی را نمایش می دهد.

جدول ۱. بیان نحوه تولید نمونه مسائل آزمایشی

مقدار	علامت پارامتر	پارامتر
200 تا 480 واحد	PC	طول هر دوره در افق برنامه ریزی
توزیع یکنواخت بین [0.65PC-PC]	$C_{m,t}$	ظرفیت معمول ماشین m ام در دوره t
PC - $C_{m,t}$	$O_{m,t}$	ظرفیت اضافه کاری ماشین m ام در دوره t
توزیع یکنواخت بین [0.2-1]	$PC_{m,t}$	هزینه هر واحد زمانی استفاده از ماشین m ام در دوره t
1.5PC _{m,t}	$OC_{m,t}$	هزینه هر واحد زمانی اضافه کاری ماشین m ام در دوره t
توزیع یکنواخت بین [50-200]	$SC_{j,h}^m$	هزینه راه اندازی عملیات h ام کار j ام بر روی ماشین m
توزیع یکنواخت بین [0.5-2]	$HC_{j,h}^t$	هزینه نگهداری محصول حاصل از عملیات h ام کار j ام در انتهای دوره t
توزیع یکنواخت بین [0.2-3]	$a_{j,h}^m$	زمان لازم برای تولید یک واحد محصول عملیات h ام کار j ام روی ماشین m
توزیع یکنواخت بین [10-60]	$\delta_{j,h,k,l}^m$	زمان راه اندازی وابسته به توالی
1	$\rho_{j,h}$	ضریب مصرف محصول عملیات h ام کار j ام در عملیات h+1 ام کار j ام

همچنین مقادیر تقاضای هر کار براساس توزیع نرمال با میانگین $\frac{480.T.M}{6*\sigma}$ و واریانس ۲۰ تولید شده و بطور تصادفی به دوره هایی از افق برنامه ریزی تخصیص یافته است. (O برابر تعداد کل عملیات ها و M برابر تعداد ماشین ها است)

نهایتاً تعداد ۲۵ نمونه مسأله آزمایشی با شرایط فوق در اندازه های کوچک (STP)، متوسط (MTP) و بزرگ (LTP) تولید و هر نمونه با علائم ($\alpha; \beta; \gamma; \delta$) نام گذاری شد. که به ترتیب نشان دهنده تعداد کار، تعداد عملیات ها، تعداد ماشین و تعداد دوره در طول افق برنامه ریزی هستند.

۴-۲. تعیین پارامتر با استفاده از روش تاگوچی

تنظیم مناسب پارامترها و انتخاب درست عملگرها در الگوریتم-های فراابتکاری تاثیر بسزایی بر عملکرد آنها دارد که می بایست با توجه به شرایط مسأله مورد بررسی، تعیین گردد. با این وجود بیشتر محققین این تنظیمات را با استفاده از مقادیر مرجع که در مقالات مشابه پیشنهاد شده انجام می دهند. در این مقاله از روش تاگوچی جهت تنظیم پارامترهای الگوریتم های GA و

GA_PSO استفاده شده است. این روش در اوایل دهه ۱۹۶۰ توسط تاگوچی ارائه شده است و می تواند در طراحی فرآیندها مورد استفاده قرار گیرد. آرایه های متعامد^۱ روش تاگوچی برای مطالعه تعداد زیادی از فاکتورها با استفاده از تعداد کمی از آزمایشات مورد استفاده قرار می گیرد. در روش تاگوچی فاکتورها به دو گروه اساسی فاکتورهای قابل کنترل و فاکتورهای نویز^۲ تقسیم می شوند. فاکتورهای نویز به آن دسته از فاکتورها گفته می شود که امکان کنترل آنها وجود ندارد. از آنجایی که حذف تاثیرات فاکتورهای نویز غیر عملی و ناممکن می باشد، روش تاگوچی به دنبال مینیم کردن اثرات نویز و تعیین سطوح بهینه فاکتورهای کنترل بر مبنای مفهوم پایداری^۳ می باشد. مقادیر معیار عملکرد به دست آمده از آزمایشات، به نسبت سیگنال به نویز^۴ تبدیل می شود و در برخی از تحلیل های بعدی مورد استفاده قرار می گیرد. رویه روش تاگوچی می تواند به صورت ذیل شرح داده شود [۲۹]:

- تاثیر فاکتورها بر روی مقادیر نرخ S/N و میانگین مقادیر معیار عملکرد ارزیابی می شود. (در اینجا از تحلیل واریانس (ANOVA) برای تست تاثیرگذاری فاکتورها استفاده می شود.)

- برای هر فاکتور که تاثیر معناداری بر روی مقادیر نرخ S/N داشته باشد، سطحی از آن فاکتور که بیشترین مقدار نرخ S/N را دارد، انتخاب می شود. این فاکتورها، فاکتورهای کنترل نامیده می شوند.

- برای هر فاکتور که تاثیر معناداری بر روی مقادیر نرخ S/N نداشته اما تاثیر معنادار بر روی میانگین معیار عملکرد داشته باشد، سطحی از آن فاکتور که نزدیکتر به نقطه هدف باشد، انتخاب می شود. این فاکتورها، فاکتورهای تنظیم^۵ نامیده می شوند.

- هر فاکتور که تاثیر معناداری بر روی نرخ S/N و میانگین معیار عملکرد، نداشته باشد، فاکتور اقتصادی^۶ نامیده شده و سطحی از آن که معیار عملکرد بهتری را نتیجه بدهد و یا زمان محاسباتی کمتری داشته باشد، انتخاب می شود.

در روش تاگوچی توابع هدف به سه نوع مقدار کوچکتر بهتر، مقدار بزرگتر بهتر و مقدار اسمی بهتر تقسیم می شوند. در اینجا میانگین درصد انحراف نسبی^۷ (RPD) به عنوان معیار عملکرد در نظر گرفته شده است که با توجه به آن نوع هدف مقدار کوچکتر بهتر در روش تاگوچی برای آن مناسب می باشد. مقادیر

¹Orthogonal array

²Noise factor

³Robustness

⁴S/N ratio

⁵Adjustment factor

⁶Economical factors

⁷The relative percentage deviation

از معیار RPD به عنوان معیار عملکرد طبق رابطه (۴۱) استفاده شده است.

$$\text{mean(RPD)}_{ij} = \frac{\text{mean}(\text{objective}_{ijk}) - \min_i}{\min_i} \quad (41)$$

که i ، j و k به ترتیب نشان دهنده اندیس نمونه، شماره آزمایش و شماره تکرار می باشد. و \min_i مینیمم مقدار به دست آمده برای نمونه i می باشد. میانگین مقادیر RPD به نرخ S/N تبدیل می شود. شکل های ۵ به ترتیب میانگین نرخ S/N برای هر سطح از فاکتورها در الگوریتم GA_PSO را نمایش می دهند.

جهت تست آماری معنادار بودن اثر فاکتورها بر مقادیر نرخ S/N از آنالیز واریانس استفاده شده است که نتایج آن در جدول ۳ نشان داده شده است. در جدول آنالیز واریانس، معیارهایی که دارای مقدار P value کمتر از ۰.۱ باشند دارای تاثیر معناداری می باشند. با توجه به جدول ۴ فاکتورهای نرخ نخبه گرایی، احتمال تقاطع، احتمال جهش، سرعت اولیه و ثابت شتاب مولفه اجتماعی دارای تاثیر معناداری بر روی نرخ S/N در الگوریتم GA_PSO می باشند بنابراین این فاکتورها به عنوان فاکتورهای کنترل در نظر گرفته می شوند و سطوح با بیشترین مقادیر نرخ S/N به عنوان مقدار بهینه برای هر یک از آنها انتخاب می شود. همچنین فاکتور ثابت شتاب مولفه ادراکی تاثیر معناداری بر روی مقادیر نرخ S/N و مقادیر میانگین RPD در الگوریتم GA_PSO ندارد در نتیجه به عنوان فاکتور اقتصادی شناخته می شود و سطحی از آن که منجر به زمان محاسباتی کمتر یا جواب با کیفیت تر می شود انتخاب می گردد.

نرخ S/N در این حالت از رابطه زیر به دست می آید [۲۹].

$$S/N \text{ ratio} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (40)$$

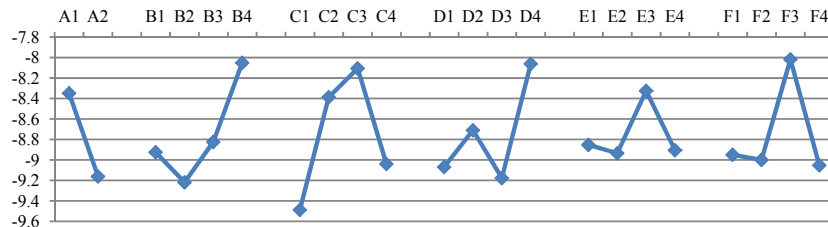
این نسبت برای هر سطح از فاکتورها محاسبه می شود که n تعداد آزمایشات با یک سطح از یک فاکتور مشخص، و y_i مقدار معیار عملکرد می باشد. پس از بررسی الگوریتم GA_PSO تعداد ۶ فاکتور برای الگوریتم در نظر گرفته شد. این فاکتورها و سطوح مناسب آن ها در جدول های ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲. سطوح مختلف فاکتورهای الگوریتم GA_PSO

Factor	levels	Number of levels
Elitism rate(A)	{0.15 ; 0.3}	2
Pc(B)	{0.7 ; 0.8 ; 0.85 ; 0.9}	4
Pm(C)	{0.05 ; 0.1 ; 0.15 ; 0.2}	4
Initial velocity(D)	{20 ; 40 ; 60 ; 80}	4
c1(E)	{0.5 ; 1 ; 1.5 ; 2}	4
c2(F)	{0.5 ; 1 ; 1.5 ; 2}	4

از طرح تاگوچی $L_{32}(2^4, 4^5)$ برای الگوریتم GA_PSO استفاده شده است.

طرح ذکر شده دارای ۳۲ ترکیب مختلف از سطوح پارامترها می باشد. برای هر ترکیب ۵ آزمایش در اندازه های متفاوت (۲ آزمایش با اندازه کوچک، ۲ آزمایش با اندازه متوسط و ۱ آزمایش با اندازه بزرگ) در نظر گرفته شده است که برای رسیدن به نتایج قابل اطمینان تر هر یک ۳ بار تکرار می گردند.



شکل ۵. نمودار میانگین مقادیر S/N ratio برای هر سطح از فاکتورهای الگوریتم GA_PSO

جدول ۳. آنالیز واریانس برای مقادیر S/N ratio در الگوریتم GA_PSO

Factor	df	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P value
Elitism rate	1	5.284	5.284	5.2844	12.14	0.003
Pc	3	5.951	5.951	1.9836	4.56	0.018
Pm	3	9.404	9.404	3.1346	7.20	0.003
Initial velocity	3	6.076	6.076	2.0255	4.65	0.017
c1	3	1.999	1.999	0.6662	1.53	0.247
c2	3	5.850	5.850	1.9499	4.48	0.020
Error	15	6.528	6.528	0.4352		
Total	31	41.091				

	$a_{1,1}^2 = 1.1$	$a_{1,2}^2 = 1.3$	$a_{1,3}^2 = 1.3$
Job2	$a_{2,1}^1 = 0.3$	$a_{2,2}^1 = 0.2$	$a_{2,3}^1 = 1.9$
	$a_{2,1}^2 = 1.0$	$a_{2,2}^2 = 1.1$	$a_{2,3}^2 = 1.2$
	$a_{3,1}^1 = 1.8$	$a_{3,2}^1 = 2.4$	
Job3	$a_{3,1}^2 = 1.1$	$a_{3,2}^2 = 1.3$	

با توجه به موارد ذکر شده مقادیر بهینه فاکتورهای نرخ نخبه گرایبی، احتمال تقاطع، احتمال جهش، سرعت اولیه، ثابت شتاب مولفه ادراکی و ثابت شتاب مولفه اجتماعی در الگوریتم GA_PSO به ترتیب برابر ۰.۱۵، ۰.۰۹، ۰.۰۱۵، ۰.۸۰، ۱.۵ و ۱.۵ است همچنین مقادیر بهینه فاکتورهای نرخ نخبه گرایبی، احتمال تقاطع، احتمال جهش در الگوریتم GA مطابق روش تاگوچی به ترتیب برابر ۰.۱۵، ۰.۰۹، ۰.۰۱۵ است.

۳-۴. نتایج محاسباتی و مقایسه عملکرد

در این قسمت ابتدا بمنظور درک بهتر، اطلاعات و جواب حاصل از مسأله STP6 بیان شده و سپس در جدول ۶ مقایسه و ارزیابی عملکرد روش های حل و مدل برنامه ریزی ترکیبی عدد صحیح مسأله ارائه شده است. در مسأله STP6 مقدار تقاضای کارهای ۱ تا ۳ به ترتیب برابر ۳۵ واحد در انتهای دوره دوم، ۳۰ واحد در انتهای دوره دوم و ۱۵ واحد در انتهای دوره اول است. طول هر دوره برابر با ۲۰۰ واحد زمانی بوده و ظرفیت ماشین ۱ در دوره های اول و دوم به ترتیب برابر ۱۳۰ و ۱۴۵ واحد زمانی و ظرفیت ماشین ۲ در هر دوره به ترتیب برابر ۱۷۰ و ۱۶۰ واحد زمانی است. هزینه هر واحد زمانی استفاده از ماشین ۱ در دوره های اول و دوم به ترتیب ۰.۹ و ۰.۷ و برای ماشین ۲ به ترتیب ۰.۴ و ۱ است.

همچنین از زمان های راه اندازی وابسته به توالی در این مثال صرف نظر شده است. سایر داده ها در جداول ۴ و ۵ نمایش داده شده است.

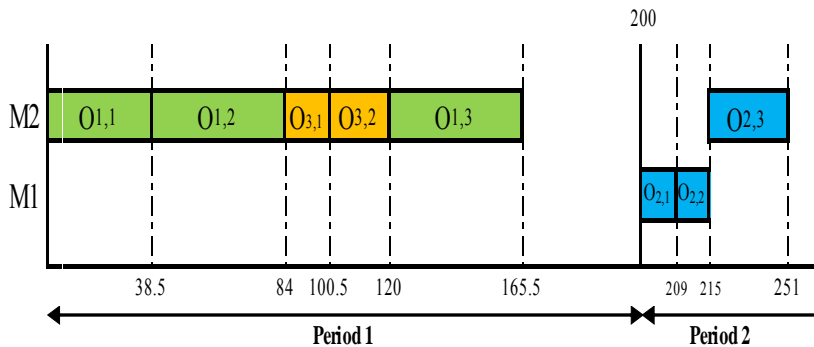
جدول ۵. اطلاعات پارامترهای هزینه نگهداری و راه اندازی

	در مسأله STP6							
	$O_{1,1}$	$O_{1,2}$	$O_{1,3}$	$O_{2,1}$	$O_{2,2}$	$O_{2,3}$	$O_{3,1}$	$O_{3,2}$
$HC_{j,h}^1$	1.9	1.4	0.7	1.1	0.5	1.9	0.8	1.8
$SC_{j,h}^1$	18	13	12	86	75	15	11	18
$SC_{j,h}^2$	9	5	0	3	0	3	0	0
	50	70	53	19	14	60	63	12
				3	0			0

شکل ۶ جواب بهینه مسأله STP6 را با مقدار تابع هدف ۷۱۴.۲ نمایش می دهد. در این جواب مقدار هزینه های تولید، راه اندازی و نگهداری به ترتیب برابر با ۵۷۷، ۱۱۲.۷ و ۲۴.۵ است. از جدول ۶ می توان دریافت الگوریتم ترکیبی GA_PSO در مقایسه با الگوریتم GA و مدل MIP از شرایط بهتری برخوردار است. همچنین در این جدول روند صعودی انحرافات الگوریتم GA و مدل MIP با افزایش اندازه مسأله بوضوح قابل مشاهده است. عملکرد الگوریتم ترکیبی GA_PSO نسبت به الگوریتم GA در شاخص فوق درحالی بهتر است که اختلاف چندانی در زمان اجرای دو الگوریتم مشاهده نمی شود.

جدول ۴. اطلاعات پارامتر $a_{j,h}^m$ در مسأله STP6

	Operation		
	1	2	3
Job1	$a_{1,1}^1 = 0.9$	$a_{1,2}^1 = 1.7$	$a_{1,3}^1 = 0.9$



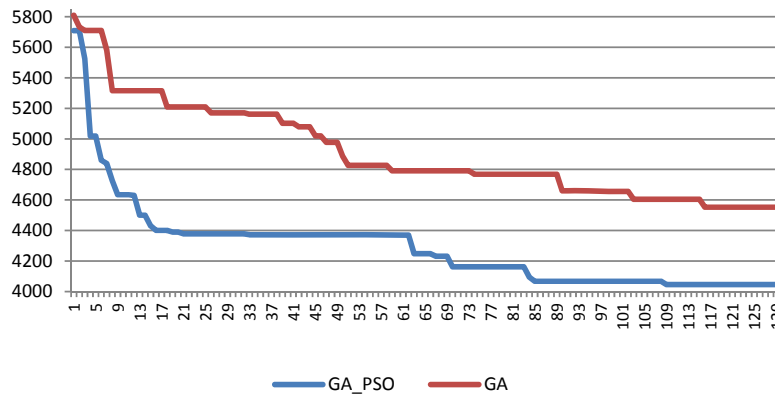
شکل ۶. نمایش جواب بهینه مسأله STP6

جدول ۶. مقایسه و ارزیابی عملکرد روش های حل و مدل برنامه ریزی ترکیبی عدد صحیح مسأله

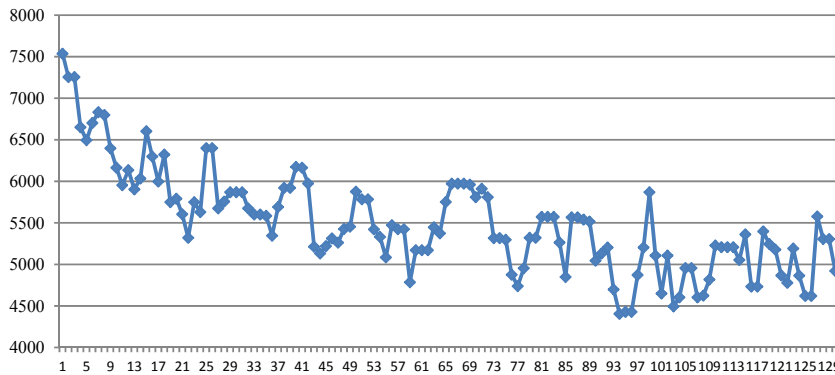
Test problems	Population size	Number of position(N)	iteration	time(s)			objective function			Gap%		
				GA	GA_PSO	MIP	GA	GA_PSO	MIP	GA	GA_PSO	MIP
STP1(2:4:2:2)	30	2	50	2.2	2.8	0.7	707.7 5	707.7 5	707.75	0.0%	0.0%	0.0%
STP2(2:4:2:3)	30	2	10 0	5.8	6.3	1.8	1039	1039	1039	0.0%	0.0%	0.0%
STP3(2:6:2:2)	30	3	10 0	5.7	6.8	13.7	773.5	773.5	773.5	0.0%	0.0%	0.0%
STP4(2:6:2:3)	40	3	10 0	10.1	10.6	60.2	1288. 2	1288. 2	1288.2	0.0%	0.0%	0.0%
STP5(3:6:2:4)	40	3	10 0	13.8	13.7	401.6	1231	1231	1231	0.0%	0.0%	0.0%
STP6(3:8:2:2)	40	4	10 0	12.6	13.2	1247	714.2	714.2	714.2	0.0%	0.0%	0.0%
STP7(3:8:2:3)	40	4	10 0	14.2	14.6	3124	998.3	998.3	998.3	0.0%	0.0%	0.0%
STP8(4:10:2:2)	40	5	10 0	14.6	14.8	>3600	1475. 2	1475. 2	1553.7	0.0%	0.0%	5.3%
STP9(3:8:3:4)	40	3	10 0	17.1	17.8	>3600	2226. 5	2004. 5	2502.7	11.1 %	0.0%	24.9 %
STP10(4:8:3:5)	40	3	10 0	22.6	22.4	>3600	2237. 6	1994. 5	2338.8	12.2 %	0.0%	17.3 %
MTP1(4:10:3:5)	40	4	10 0	27.7	28.2	>3600	2438. 2	2346. 7	2616.1	3.9%	0.0%	11.5 %
MTP2(4:12:4:5)	40	3	12 0	42.3	40.9	>3600	3075	3005. 9	3557.6	2.3%	0.0%	18.4 %
MTP3(4:15:4:5)	40	4	12 0	54	55.7	>3600	3479. 5	3127. 3	3557.1	11.3 %	0.0%	13.7 %
MTP4(5:16:5:6)	40	4	13 0	86.7	90.4	>3600	5931. 6	5211	6110.5	13.8 %	0.0%	17.3 %
MTP5(5:18:5:6)	40	4	13 0	98.8	99.5	>3600	5374. 4	4976. 6	5608.6	8.0%	0.0%	12.7 %
MTP6(5:20:5:6)	40	4	13 0	112.5	114.5	>3600	4522. 7	4045. 1	4539.9	11.8 %	0.0%	12.2 %
MTP7(6:22:5:6)	40	5	13 0	143.7	146.3	>3600	5158. 7	4701. 6	5486.4	9.7%	0.0%	16.7 %
MTP8(6:24:5:6)	44	5	15 0	202	210.8	>3600	4884. 9	4131. 4	5287.7	18.2 %	0.0%	28.0 %
MTP9(7:26:5:6)	44	6	15 0	223.5	231.5	>3600	6246. 5	5651. 2	7137.6	10.5 %	0.0%	26.3 %
MTP10(7:28:5:6)	44	6	16 0	261.3	270.7	>3600	6533. 9	6164. 6	6995.3	6.0%	0.0%	13.5 %
LTP1(8:30:6:6)	44	5	16 0	314.7	311.4	>3600	7307. 8	6650. 2	8024.7	9.9%	0.0%	20.7 %
LTP2(9:35:6:8)	46	6	18 0	751.2	810.5	>3600	12943	11468	15502	12.9 %	0.0%	35.2 %
LTP3(10:40:6:10)	46	7	18 0	1234	1267	>3600	11883	10400	13193. 3	14.3 %	0.0%	26.9 %
LTP4(12:45:8:10)	50	6	20 0	1997	2040	>3600	11734	9699. 4	14502. 9	21.0 %	0.0%	49.5 %
LTP5(12:50:8:12)	50	7	20 0	2688	2740	>3600	15616	13696	17316. 9	14.0 %	0.0%	26.4 %

تکرار ها کیفیت جواب های عضو جمعیت رو به بهبود است. شکل ۹ زمان محاسباتی حل دقیق مسأله STP6 را با نرم افزار GAMS در سه حالت مختلف از مسأله نمایش می دهد. در حالت یک پارامتر تعداد راه اندازی مجاز بر روی هر ماشین در هر دوره (N) برابر ۲ فرض شده است این پارامتر در حالت های دوم و سوم به ترتیب برابر ۳ و ۴ فرض شده است. مشاهده می شود با افزایش این پارامتر زمان محاسباتی الگوریتم بشدت افزایش می باید. ولی همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می شود این افزایش موجب بهبود کیفیت جواب مسأله خواهد شد و کاهش این پارامتر از کیفیت جواب مسأله می کاهد. بدلیل حذف و کوچکتر شدن فضای جواب مسأله در نتیجه کاهش پارامتر N، کیفیت جواب های مسأله نیز کاهش می یابد.

شکل ۷ روند بهبود جواب را در الگوریتم GA_PSO در مقایسه با الگوریتم GA در مسأله MTP6 نمایش می دهد در این شکل الگوریتم GA_PSO نسبت به الگوریتم GA دارای روند بهبود بهتری و همچنین سرعت بهبود بالاتر مخصوصاً در تکرارهای اولیه الگوریتم است. شکل ۸ روند همگرایی در الگوریتم GA_PSO را نمایش می دهد. بدلیل وجود خاصیت نخبه گرایی در الگوریتم پیشنهادی و انتقال مستقیم بهترین جواب های هر جمعیت به جمعیت بعد امکان نمایش روند همگرایی الگوریتم بوسیله بهترین جواب های هر جمعیت از الگوریتم وجود ندارد به همین منظور در این شکل از مقدار بدترین جواب هر جمعیت از الگوریتم GA_PSO در مسأله MTP6 برای نمایش روند همگرایی استفاده شده است. در این شکل مشخص است با افزایش تعداد



شکل ۷. روند بهبود جواب را در الگوریتم GA_PSO در مقایسه با الگوریتم GA برای مسأله MTP6

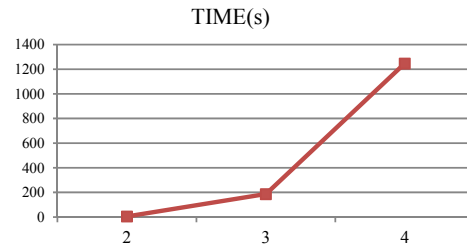


شکل ۸. نمایش روند همگرایی در الگوریتم GA_PSO در مسأله MTP6

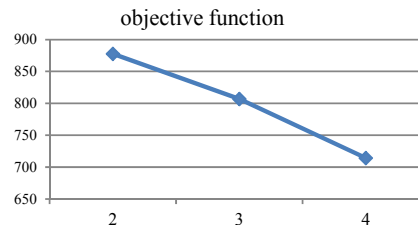
ابتکاری ، روش های فراابتکاری قوی تری برای حل مسئله ارائه داد.

مراجع

- [1] Karimi, B., Fatemi Ghomi, S.M.T., Wilson, J.M., "The capacitated lot sizing problem: a review of models and algorithms, *Omega*", 31, 2003, PP.365-378.
- [2] Bitran, G.R., Yanasse, H.H., "Computational complexity of the capacitated lot size problem", *Management Science*, 28, 1982, PP.1174-1186.
- [3] Maes, J., McClain, J.O., Van Wassenhove, LN., "Multilevel capacitated lot sizing complexity and LP-based heuristics", *European Journal of Operational Research*, 53(2), 1991, PP. 131-148.
- [4] Dellaert, N., Jeunet, J., Jonard, N., A "genetic algorithm to solve the general multi-level lot-sizing problem with timevarying costs", *International Journal of Production Economics*, 68, 2000, PP. 241-257.
- [5] Brucker, P., Schlie, R., "Job-shop scheduling with multi-purpose machines, *Computing*", 45, 1990, PP. 369-375.
- [6] Garey, M.R., Johnson, D.S., Sethi, R., "The complexity of flowshop and job shop scheduling", *Mathematics of Operations Research*, 1(2), 1976, PP. 117-129.
- [7] Fleischmann, B., "The discrete lot-sizing and scheduling problem", *European Journal of Operational Research*, 44, 1990, PP. 337-348.



شکل ۹. زمان محاسباتی حل دقیق مسأله STP6 با نرم افزار GAMS با پارامتر N متفاوت



شکل ۱۰. جواب های بهینه مسأله STP6 با تعداد پارامتر N متفاوت

۵. نتیجه گیری و جهت گیری های آتی

در این مقاله حلت خاصی از بهینه سازی همزمان اندازه انباشته و زمانبندی با ترکیب مسأله تعیین اندازه انباشته و مسأله زمانبندی در محیط تولید کارگاهی انعطاف پذیر مورد بررسی قرار گرفت. بمنظور تعیین ترکیبی از متغیر های تصمیم دو مسأله با هدف کمینه نمودن هزینه ای سیستم یک مدل برنامه ریزی ترکیبی عدد صحیح جدید در قالب مدل ظرف زمانی بزرگ GLSP بهمراه یک روش فراابتکاری از ترکیب الگوریتم ژنتیک با الگوریتم بهینه سازی توده ذرات ارائه گردید. یک روش ابتکاری مؤثر بنام رویه انتقال نیز بمنظور کاوش بیشتر نقاط شدنی مسئله ارائه شد. نهایتاً نتایج محاسباتی ضمن صحه گذاردن بر اعتبار مدل ریاضی پیشنهادی نشان داد کارایی الگوریتم ژنتیک برای حل مسأله بوسیله ترکیب آن با الگوریتم بهینه سازی توده ذرات بطور قابل ملاحظه ای بهبود یافته است که از این رویکرد می توان برای حل سایر مسائل بهینه سازی همزمان اندازه انباشته و زمانبندی بهره برد. بمنظور ادامه تحقیقات در این حوزه استفاده از روش های حل مبتنی بر برنامه ریزی ریاضی براساس مدل ریاضی پیشنهادی توصیه می شود. از طرفی این مسأله بدلیل دارا بودن چهار نوع متغیر تصمیم تعیین دوره تولید ، تعیین توالی تولید ، تعیین تخصیص تولید و تعیین اندازه انباشته برای یک محصول دارای فضای حل بسیار وسیع و گسترده ای است. بنابراین پیشنهاد می شود با تقویت خاصیت کاوش و استفاده از برخی روش های

- [16] Anwar, M.F., Nagi, R., “*Integrated lot-sizing and scheduling for just-in-time production of complex assemblies with finite set-ups*”, International Journal of Production Research, 35:5, 1997, PP. 1447-1470.
- [17] Stadtler, H., Sahling, F., “*A lot-sizing and scheduling model for multi-stage flow lines with zero lead times*”, European Journal of Operational Research, 225, 2013, PP. 404-419.
- [18] Tempelmeier, H., Buschkuhl, L., “*Dynamic multi-machine lotsizing and sequencing with simultaneous scheduling of a common setup resource*”, Int. J. Production Economics, 113, 2008, PP. 401-412.
- [19] Santos, M.O., Almada-Lobo, B., “*Integrated pulp and paper mill planning and scheduling*”, Computers & Industrial Engineering, 63, 2012, PP. 1-12.
- [20] Sikora, R., “*A genetic algorithm for integrating lot-sizing and sequencing in scheduling a capacitated flow line*”, Journal of Computers & Industrial Engineering, 30:4, 1996, PP. 969-681.
- [21] Lee, I., Sikora, R., Shaw, M.J., “*A Genetic Algorithm-Based Approach to Flexible Flow-Line Scheduling with Variable Lot Sizes*”, IEEE Transaction on systems, 27, 1997, PP. 36-54.
- [22] Ponnambalam, S.G., Mohan Reddy, M., “*A GA-SA Multi objective Hybrid Search Algorithm for Integrating Lot Sizing and Sequencing in Flow-Line Scheduling*”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 21, 2003, PP. 126-137.
- [8] Drexl, A., Haase, K., “*Proportional lotsizing and scheduling*”, International Journal of Production Economics, 40, 1995, PP. 73-87.
- [9] Fleischmann, B., Meyr, H., “*The general lotsizing and scheduling problem*”, OR Spektrum, 19, 1997, PP. 11-21.
- [10] Drexl, A., Kimms, A., “*Lot sizing and scheduling-survey and extensions*”, European Journal of Operational Research, 99(2), 1997, PP. 228-249.
- [11] Meyr, H., “*Simultaneous lotsizing and scheduling by combining local search with dual reoptimization*”, European Journal of Operational Research, 120, 2000, PP. 311-326.
- [12] Meyr, H., “*Simultaneous lotsizing and scheduling on parallel machines*”, European Journal of Operational Research, 139(2), 2002, PP. 277-292.
- [13] Clark, A.R., Clark, S.J., “*Rolling-horizon lot-sizing when setup times are sequence-dependent*”, International Journal of Production Research, 38 (10), 2000, PP. 2287-2308.
- [14] Haase, K., Kimms, A., “*Lot Sizing and Scheduling with Sequence-Dependent Setup Costs and Times and Efficient Rescheduling Opportunities*”, International Journal of Production Economics, 66, 2000, PP. 159-169.
- [15] Fandel, G., Stammen-Hegene, C., “*Simultaneous lot sizing and scheduling for multi-product multi-level production*”, International Journal of Production Economics, 104, 2006, PP. 308-316.

- [29] Wu, C.F.J., Hamada, M.S., Experiments: Planning, Analysis, and Parameter Design Optimization. John Wiley, 2000.
- [23] Palaniappan, PL.K, Jawahar, N., A “*genetic algorithm for simultaneous optimisation of lot sizing and scheduling in a flow line assembly*”, International Journal of Production Research, 49:2, 2011, PP. 375-400.
- [24] Almada-Lobo, B., James, R., “*Neighbourhood search meta-heuristics for capacitated lot-sizing with sequence-dependent setups*”, International Journal of Production Research, 48:3, 2010, PP. 861-878.
- [25] Mohammadi, M., Fatemi Ghomi, S.M.T., “*Genetic algorithm-based heuristic for capacitated lotsizing problem in flow shops with sequence-dependent setups*”, Expert Systems with Applications, 38, 2011, PP. 7201–7207.
- [26] James, R., Almada-Lobo, B., “*Single and parallel machine capacitated lotsizing and scheduling: New iterative MIP-based neighborhood search heuristics*”, Computers & Operations Research, 38, 2011, PP. 1816-1825.
- [27] Ramezani, R., Saidi-Mehrabad, M., “*Hybrid simulated annealing and MIP-based heuristics for stochastic lot-sizing and scheduling problem in capacitated multi-stage production system*”, Applied Mathematical Modelling (2012).
- [28] Staggemeier, A.T, Clark, A.R., “*A survey of lot-sizing and scheduling models, In: 23rd annual symposium of the Brazilian Operational Research Society (SOBRAPO)*”, Campos do Jordao SP, Brazil, 2001, PP. 938-947.