

## **An ant colony optimization for an Integrated Production and Distribution Scheduling Model in Supply Chains: Minimizing Total Weighted Tardiness and Delivery Cost**

**Seyed Reza Rezaei\***

M.Sc. student, Department of Industrial and Systems Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, sr.rezaei@in.iut.ac.ir

**Seyed Reza Hejazi**

Associate professor, Department of Industrial and Systems Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, rehejazi@cc.iut.ac.ir

**Morteza Rasti-Barzoki**

Assistant professor, Department of Industrial and Systems Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, rasti@cc.iut.ac.ir

### **Abstract:**

In this paper, integrated production and batch delivery scheduling problem for make to order production system and one customer in supply chain has been addressed. One manufacture received  $n$  orders from one customer. Orders must be processed by single machine and sent in batches to customer. Sending several jobs as a batch leads to less transportation cost but may increase the cost of tardiness jobs. The objective is determining the production and delivery scheduling so that the related costs is minimized. The problem is strongly NP-hard. In this paper, one new math programming model including Mixed Integer Programming (MIP) model, Ant Colony System (ACS) and Elastic Ant System (EAS) are presented for solving it. In order to evaluate the efficiency of these two methods computational tests based on full factorial experimental design has been conducted. Computational test is performed for evaluation of these methods. The obtained results show that the heuristic algorithm is efficient which has been verified by using. Analysis of variance (ANOVA) technique. The results showed that the ACS is the most efficient method.

**Keywords:** Ant colony system, Supply chain scheduling, Integer Programming, Batch Delivery and Total Weighted Tardiness.

---

\* Corresponding author

مدیریت تولید و عملیات، دوره ۸، پیاپی ۱۵، شماره ۲، پاییز و زمستان ۱۳۹۶

دریافت: ۱۳۹۲/۰۵/۰۳ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۰/۱۲

صص: ۶۱-۸۲

## بهینه‌سازی کلونی مورچگان برای مسأله زمان‌بندی یکپارچه تولید و توزیع در زنجیره تأمین: کمینه‌سازی مجموع وزنی تأخیر کارها و هزینه ارسال

سیدرضا رضائی<sup>۱\*</sup>، سیدرضا حجازی<sup>۲</sup>، مرتضی راستی برزکی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران، sr.rezaei@in.iut.ac.ir

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه صنعتی، اصفهان، ایران، rehejazi@cc.iut.ac.ir

۳- استادیار، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران، راستی@cc.iut.ac.ir

**چکیده:** در این مقاله مسأله یکپارچه زمان‌بندی تولید و توزیع سفارش‌ها در حالت تک‌مشتري برای سیستم تولیدی «تولید برای سفارش» در یک زنجیره تأمین بررسی شده است. یک تولیدکننده  $n$  سفارش از یک مشتری دریافت می‌کند. سفارشات لازم است توسط یک ماشین پردازش و در قالب دسته‌هایی به مشتری ارسال شود. ارسال دسته‌ای سفارش‌ها منجر به کاهش هزینه‌های ارسال می‌شود؛ اما ممکن است موجب افزایش تأخیر بعضی از سفارش‌ها شود. هدف تعیین توالی پردازش کارها و تعیین دسته‌بندی آنها برای ارسال است؛ به طوری که مجموع وزنی تأخیر کارها و هزینه‌های ارسال کمینه شود. مسئله به طور قوی NP-hard است. در این مقاله، مدل خطی مختلط به همراه روش‌های بهینه‌سازی کلونی مورچگان و سیستم مورچه‌نخه‌گرا برای حل مسأله گفته‌شده ارائه شده است. به منظور بررسی کارایی این دو روش، تست‌های محاسباتی با رویکرد طراحی آزمایش‌ها به صورت کامل انجام شده است و تحلیل نتایج با به‌کارگیری تکنیک آنالیز واریانس صورت گرفته است. نتایج تست محاسباتی، کارایی روش ACS را نشان می‌دهد. همچنین وضعیت عملکرد روش ACS برای گروه‌های مختلف و پارامترهای مسئله، تجزیه و تحلیل شده است.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم جمعیت مورچگان، زمان‌بندی زنجیره تأمین، ارسال دسته‌ای، مجموع وزنی تأخیر

## ۱- مقدمه

سطح رضایتمندی مشتری را به همراه دارد. یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها جهت رضایت مشتری، عملکرد تحویل کالا یا خدمات ارائه داده شده است (محمد باقر فخرزاد و همکاران، ۱۳۹۱).

پژوهش و یافته‌های جدید نیز نشان می‌دهد که عملکرد تحویل یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های مدیران در زنجیره تأمین است (لاکامی و همکاران<sup>۹</sup>، ۲۰۰۴). برآورده نشدن تحویل به موقع به عنوان تأخیر شناخته می‌شود؛ این مسئله زمانی مطرح می‌شود که تولیدکننده نتواند خدمت یا کالایی را در زمان (یا بازه زمانی) توافق شده با مشتری ارائه کند (لاکامی و همکاران، ۲۰۰۴). مدل‌های یکپارچه زمان بندی تولید و توزیع با توجه به هزینه‌های تأخیر و هزینه‌های زیاد لجستیک بسیار مهم هستند. چن و واراکناراکیس (۲۰۰۵) و پاندور و چن (۲۰۰۵) نشان داده‌اند که در مدل‌هایی که آنها بررسی کرده‌اند، سود هنگفتی در گرفتن تصمیمات یکپارچه می‌تواند وجود داشته باشد. یکپارچگی تولید و توزیع، می‌تواند هزینه‌های کلی سیستم را بسته به هدف زمان بندی، ۲۰ درصد، ۲۵ درصد و حتی بیشتر کاهش دهد (هال و پاتس، ۲۰۰۵). اسلوتنیک و سوبل (۲۰۰۵) اشاره کرده‌اند که هزینه‌های مرتبط با تأخیر در صنعت هوا فضا می‌تواند تا نزدیک یک میلیون دلار در روز برای تأمین کنندگان قطعات هواپیما سازی باشد. همچنین بررسی توماس و گریفین (۱۹۹۶) نشان داده است که بیش از ۱۱ درصد تولید خالص ملی آمریکا صرف هزینه‌های حمل و نقل می‌شود و هزینه‌های لجستیک بیش از ۳۰ درصد هزینه کالاهای فروخته شده را تشکیل می‌دهد. به دلیل اهمیت تحویل سفارشات بدون تأخیر برای تولیدکننده، مسأله کمینه کردن مجموع وزنی تأخیر کارها یکی از مسائل مهم تئوری و کاربردی است که سال‌ها مورد توجه محققان قرار گرفته و تاکنون پژوهش بسیار زیادی در

مدیریت زنجیره تأمین<sup>۱</sup> (SCM) یکی از موضوعات بسیار مهمی است که از نظر تئوری و از جنبه کاربردی سال‌ها مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است (مظاهری و همکاران، ۱۳۹۳). اما موضوع زمان بندی زنجیره تأمین از موضوعات نسبتاً جدیدی است که اهم پژوهش‌ها آن مربوط به سال‌های بعد از ۲۰۰۰ میلادی است (راستی برزکی و همکاران، ۱۳۹۲). در سه دهه گذشته، پژوهش زیادی بر مدل‌های یکپارچه تولید و توزیع صورت گرفته است و مقالات مروری زیادی نظیر سارمیتو و نقی<sup>۲</sup> (۱۹۹۹)، ارنگوس و همکاران<sup>۳</sup> (۱۹۹۹)، گوتسچالک و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۰۲)، بیلگن و اوخاهان<sup>۵</sup> (۲۰۰۴)، چن (۲۰۰۴) در خصوص چنین مدل‌هایی وجود دارد. به طور خاص موضوع زمان بندی یکپارچه تولید و توزیع نیز یکی از موضوعات مهمی است که پس از ارائه مقاله هال و پاتس<sup>۶</sup> (۲۰۰۳) در سال ۲۰۰۳ پژوهش‌های زیادی را به خود اختصاص داده است. چن<sup>۷</sup> (۲۰۱۰) مطالعه مروری مناسبی را در این زمینه ارائه کرده است که بررسی آن پژوهش، این موضوع را به خوبی نشان می‌دهد. تولید و توزیع دو جزء مهم یک زنجیره تأمین را شامل می‌شوند؛ بنابراین هماهنگی برنامه ریزی تولید و ارسال، یکی از مسائل مهم زمان بندی زنجیره تأمین است. در مسائل کلاسیک زمان بندی به هماهنگی با واحد حمل و نقل و در نظر گرفتن شرایط ارسال توجهی نشده است و تصمیمات مربوط به زمان بندی تولید و برنامه ریزی ارسال به طور جداگانه انجام می‌شود (راستی برزکی<sup>۸</sup> و همکاران، ۲۰۱۳)؛ در حالی که، گرفتن تصمیمات یکپارچه تولید و توزیع که نگرش جامع تر این موضوع است، کاهش هزینه‌ها و افزایش سودآوری مرتبط با سیستم تولیدی و بهبود سطح سرویس و

ترکیبی ابتکاری و فراابتکاری (آندراس نراچو، ۲۰۱۳) تمرکز یافته است. الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان یکی از روش‌های فراابتکاری است که با الهام از رفتار مورچه‌های طبیعی، به‌عنوان یکی از الگوریتم‌های فراابتکاری مبتنی بر هوش جمعی و جمعیت است که تاکنون بر مسائل گوناگون پژوهش عملیاتی از جمله  $n/1/\sum W_j T_j$  استفاده شده است.

مرکل و میدندورف (۲۰۰۵) با استفاده از الگوریتم مورچگان توانستند یک جایگشت مناسبی را برای مسئله SMTWTP ارائه کنند. لیائو و جوان (۲۰۰۷) یک الگوریتم مورچگان را برای SMTWTP با در نظر گرفتن زمان‌های آماده‌سازی ارائه کردند. یاگماهان و یینسی (۲۰۰۸) یک مسئله زمان‌بندی چندهدفه برپایه الگوریتم مورچگان را برای کاهش هزینه‌های زمان‌بندی ارائه دادند. آنگینولفی و پائولوسی یک رویکرد جدید ACO برای توالی وابسته به زمان‌های آماده‌سازی مسئله SMTWTP ارائه کرد. مادور و همکاران (۲۰۱۲) یک الگوریتم ACS برای مسئله SMTWTP برای مقیاس بزرگ ارائه کردند و نتایج الگوریتم را با داده‌های الگو OR-Library مقایسه کردند. با توجه به اهمیت موضوع، در مقاله حاضر تابع هدف SMTWTP به‌عنوان هدف زمان‌بندی تولید برای گرفتن تصمیم یکپارچه تولید و توزیع انتخاب شده است.

دسته‌بندی به‌منظور کاهش هزینه‌های ارسال به مشتری صورت می‌گیرد؛ بدین ترتیب که یک دسته شامل کارهایی است که یک‌دفعه و با یکدیگر توسط یک وسیله ارسال می‌شوند. گسترش این نوع از مسائل موضوع مهمی است که اخیراً مورد توجه محققان زنجیره تأمین واقع شده است. این دسته از مسائل در ادبیات موضوع به ارسال دسته‌ای<sup>۱۷</sup> معروف شده است.

این زمینه انجام شده است (پاتس و همکاران، ۲۰۱۳). ایمون (۱۹۶۹) برای اولین بار با بررسی مسئله مجموع تأخیر سفارشات، اصول غلبه‌ای را ارائه داد که یکی از شاخص‌ترین توسعه‌های است که تاکنون ارائه شده است. لاور (۱۹۷۷) و لنسترا و همکارانش (۱۹۷۷) در دو پژوهش مجزا NP-Hard بودن مسئله مجموع تأخیر کارها را از جنبه پیچیدگی زمانی نشان دادند. چارژه و بیکر (۱۹۷۸) یک الگوریتم برنامه‌ریزی پویای و پاتس و واسنهوز (۱۹۹۱) با ارائه یک الگوریتم شاخه و کران توانستند اولین الگوریتم‌های دقیق را برای مسئله مجموع تأخیر کارها را ارائه دهند. فرنچ (۱۹۹۰) مسئله کمیته‌کردن مجموع وزنی تأخیر کارها (تعمیم یافته مسئله  $1//\sum T_j$ ) را یکی از مشهورترین مسئله بهینه‌سازی ترکیبی در تئوری زمان‌بندی معرفی کرد و از عبارت اختصاری SMTWTP<sup>۱۰</sup> برای بیان مسئله استفاده کرد؛ همچنین نمایش اختصاری مسئله گفته‌شده براساس علامت‌گذاری فرنچ به‌صورت  $n/1/\sum W_j T_j$  است.

در سال‌های اخیر، به‌روشنمایی که با الهام از طبیعت به‌عنوان یک ابزار کارا برای بهینه‌سازی مسائل پیچیده بهینه‌سازی ترکیبی استفاده می‌شود توجه زیادی شده است. بعد از سال ۱۹۹۰ به‌دلیل پیچیدگی حل SMTWTP حجم گسترده‌ای از پژوهش بر الگوریتم‌های فراابتکاری فراوانی نظیر الگوریتم تبرید<sup>۱۱</sup> ((ماتسو، ۱۹۸۹)، (پاتس و واسنهوز، ۱۹۹۱)، (کراول، ۱۹۹۸)، الگوریتم ژنتیک<sup>۱۲</sup> ((کراول، ۱۹۹۸)، (کلوگوز، ۱۹۹۸))، الگوریتم جستجوی ممنوعه<sup>۱۳</sup> ((کراول، ۱۹۹۸)، (بیلز، ۲۰۰۷))، الگوریتم بهینه‌سازی مورچگان<sup>۱۴</sup> (باور، ۱۹۹۹)، الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات<sup>۱۵</sup> (تاسگترین، ۲۰۰۶)، الگوریتم جستجوی همسایگی<sup>۱۶</sup> (ونگ و تانگ، ۲۰۰۹) و الگوریتم

با روش ارسال تکی و فوری به مقاله پاتس اشاره دارند. در سال ۱۹۹۳ اولین مقاله با در نظر گرفتن هزینه حمل و نقل برای ارسال دسته‌ها توسط چنگ و کالباجر (۲۰۰۸) ارائه شد؛ آنها مسأله  $1//V(\infty, \infty), direct/1/\sum E_j + TC$  را بررسی کردند. تنها مطالعه موجود در زمینه یکپارچگی تولید و توزیع با محوریت تأخیر مربوط به پاتس (۲۰۰۵) است که برای اولین بار در زمینه مسائل IPODS تابع هدف مجموع تأخیر کارها را محور بخش زمان‌بندی تولید قرار داد و آن را با مفهوم زمان‌بندی ارسال دسته‌ای ترکیب کرد و برای مسأله  $1//V(\infty, \infty), direct/1/\sum T_j + TC$  یک الگوریتم برنامه‌ریزی پویا ( $DP^{1A}$ ) شبه‌چندجمله‌ای ارائه داد. حالت تعمیم‌یافته مسأله پاتس یعنی  $1/S/$  ترکیب مسأله SMTWTP و ارسال دسته‌ای است در مقاله حاضر بررسی می‌شود (جمع‌بندی ادبیات موضوع را در جدول ۱ ببینید).

اولین مقاله با در نظر گرفتن هزینه حمل و نقل برای ارسال دسته‌ها توسط چنگ و کالباجر (۲۰۰۸) ارائه شد؛ آنها مسأله  $1//V(\infty, \infty), direct/1/\sum E_j + TC$  را بررسی کردند؛ در این مورد نیز اغلب مقالات مرتبط با روش ارسال مستقیم ارجاعی به این مقاله دارند. از سال ۱۹۹۳ تا سال ۲۰۱۲ بیش از ۴۵ مقاله در این زمینه منتشر شده است که بیانگر گسترش و اهمیت این دسته از مسائل است که اخیراً مورد توجه محققان در بحث زنجیره تأمین واقع شده است (راستی، ۱۳۹۱). در این مطالعه ارسال مستقیم سفارشات به هر مشتری بررسی می‌شود. تابع هزینه ارسال به صورت یک رابطه خطی بین تعداد دفعات ارسال و هزینه هر بار ارسال تعریف می‌شود. به نظر می‌رسد اولین مقاله در زمینه مسائل تولید و توزیع یکپارچه مسأله  $1/r_j/V(\infty, 1), iid/n/D_{max}$  باشد که در سال ۱۹۸۰ ارائه شد (پاتس، ۱۹۸۰). این پژوهش با در نظر گرفتن زمان حمل و نقل اما بدون ظرفیت یا هزینه ارسال است. اغلب مقالات IPODS

جدول ۱- بررسی ادبیات موضوع برحسب سال انتشار

| سال  | نویسنده               | سال  | نویسنده             | سال  | نویسنده               |
|------|-----------------------|------|---------------------|------|-----------------------|
| ۲۰۰۶ | تاسگترین              | ۱۹۹۸ | کراول               | ۱۳۹۱ | راستی                 |
| ۲۰۰۷ | هال و پاتس            | ۱۹۹۹ | سارمیتو و نقی       | ۱۳۹۱ | فخرزاد و همکاران      |
| ۲۰۰۷ | بیلز                  | ۱۹۹۹ | ارنگوس و همکارانش   | ۱۳۹۲ | راستی برزکی و همکاران |
| ۲۰۰۷ | لیانو و جوان          | ۱۹۹۹ | باور                | ۱۳۹۳ | مظاهری و همکاران      |
| ۲۰۰۸ | یاگماهان و ینسی       | ۲۰۰۲ | گوتسچالک و همکارانش | ۱۹۶۹ | ایمون                 |
| ۲۰۰۸ | چنگ و کالباجر         | ۲۰۰۴ | بیلگن و اوخاهان     | ۱۹۷۷ | لاور                  |
| ۲۰۰۸ | چنگ و کالباجر         | ۲۰۰۴ | چن                  | ۱۹۷۷ | لنسترا و همکارانش     |
| ۲۰۰۹ | ونگ و تانگ            | ۲۰۰۴ | لاکامی و همکاران    | ۱۹۷۸ | چارژه و بیکر          |
| ۲۰۱۰ | چن                    | ۲۰۰۵ | چن و واراکتاراکیس   | ۱۹۸۰ | پاتس                  |
| ۲۰۱۲ | مادور و همکاران       | ۲۰۰۵ | پاندور و چن         | ۱۹۸۹ | ماتسو                 |
| ۲۰۱۳ | راستی برزکی و همکاران | ۲۰۰۵ | هال و پاتس          | ۱۹۹۰ | فرنچ                  |
| ۲۰۱۳ | پاتس و همکاران        | ۲۰۰۵ | اسلوتنیک و سوبل     | ۱۹۹۱ | پاتس و واسنهوز        |
| ۲۰۱۳ | آندراس نراچو          | ۲۰۰۵ | مرکل و میدندورف     | ۱۹۹۶ | توماس و گریفین        |

ساختار این مقاله بدین صورت است که در بخش اول مسأله مورد نظر تعریف می‌شود و پیچیدگی و کاربردهای آن بررسی می‌شود، در بخش دوم مدل خطی مختلط<sup>۱۹</sup> آورده شده است. در بخش چهارم، الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان<sup>۲۰</sup> و الگوریتم سیستم مورچه‌ای نخبه‌گرا ارائه می‌شود. انجام تست‌های محاسباتی به منظور مقایسه دو رویکرد در بخش پنجم آورده شده است. جمع‌بندی به همراه ارائه پیشنهاداتی جهت کارهای آتی نیز در بخش پایانی مقاله است.

## ۲- تعریف مسئله

یک مسأله زمان‌بندی تک‌ماشین زنجیره تأمین را در نظر بگیرید که در آن  $n$  کار توسط یک مشتری سفارش داده می‌شود. زمان پردازش کار  $J_m$  و  $p_j$  موعده تحویل آن  $d_j$  است. به منظور کاهش هزینه‌های ارسال می‌توان کارهای پردازش شده را دسته‌بندی کرد و تمام کارهای یک دسته را با یک وسیله و با هزینه  $\theta$  (مستقل از حجم و تعداد کارها) ارسال کرد. فرض می‌شود به تعداد کافی وسیله وجود دارد و تحویل دسته به مشتری در زمان ارسال صورت می‌گیرد. به عبارت دیگر زمان تحویل هر سفارش به مشتری، برابر زمان تکمیل دسته‌ای است که آن سفارش با آن دسته فرستاده می‌شود. هدف کمیته‌سازی مجموع وزنی تأخیر کارها و هزینه‌های ارسال است. به منظور تطابق بیشتر با دنیای واقعی، برای هر دسته یک زمان آماده‌سازی در نظر گرفته می‌شود. استینر و ژانگ در پژوهش‌های خود اشاره کرده‌اند که استفاده از این نوع زمان آماده‌سازی بسیار واقعی‌تر و عملی‌تر است و پژوهش‌ها کاربردی‌تر می‌شوند (استینر و ژانگ، ۲۰۰۹). نمونه‌هایی از کاربرد زمان آماده‌سازی برای هر دسته که موضوع ارسال هم در آن وجود دارد در

مطالعات هاچمن و لاندی (۱۹۹۱) و نیز لینگ و چنگ (۲۰۰۵) ارائه شده است. به‌عنوان مثال می‌توان به زمان‌های مورد نیاز جهت بسته‌بندی سفارشات اشاره کرد که در آن به جز زمان پردازش سفارشات زمانی هم برای آماده‌سازی پالت یا انتقال بسته باید منظور کرد. همچنین نمونه‌های دیگری از کاربرد آن در سیستم‌های بارگیری است که زمانی صرف انتقال بسته‌ها می‌شود. گفتنی است جهت محاسبه زمان تکمیل هر دسته باید زمان تکمیل پردازش کارهای موجود در آن دسته را با یک زمان آماده‌سازی جمع کرد (تفاوتی در اینکه زمان آماده‌سازی در کجای دسته در نظر گرفته شود وجود ندارد؛ زیرا زمان تکمیل دسته برابر مجموع زمان‌های گفته شده است و زمان تکمیل هر کار برابر زمان تکمیل دسته مربوطه است) (راستی برزکی و همکاران، ۱۳۹۱). براساس نمایش اختصاری پیشنهاد شده توسط چن (۲۰۱۰) نمایش اختصاری این مسئله به صورت

$$1/s/V(\infty, \infty), \text{direct}/1/\sum_{j=1}^n w_j T_j + \theta B$$

است که در آن  $\sum_{j=1}^n w_j T_j$  مجموع وزنی تأخیر کارها و  $\theta B$  کل هزینه ارسال است.

## ۲-۱- مفروضات مسئله

- سیستم تولیدی تک‌ماشین است؛
- یک مشتری وجود دارد؛
- نحوه ارسال مستقیم و دسته‌ای است؛
- برای هر دسته یک زمان آماده‌سازی منظور می‌شود؛
- برای هر دسته یک هزینه ارسال مستقل از حجم و تعداد کارهای آن دسته منظور می‌شود؛
- موعده تحویل کارها مختلف و مشخص است (برای هر کار یک موعده تحویل)؛
- زمان‌های پردازش برای هر کار مشخص است؛
- انقطاع کارها مجاز نیست؛
- کلیه کارها در زمان صفر در دسترس هستند؛

جدول ۲- تعریف علائم مورد استفاده در مدل

| علائم    | تعریف   |
|----------|---|
| $j$      | اندیس سفارشات (کارها) ( $j = 1, 2, \dots, n$ )                              |
| $n$      | تعداد کل سفارشات  |
| $S$      | زمان آماده‌سازی هر دسته   |
| $\theta$ | هزینه ارسال هر دسته   |
| $B$      | تعداد دسته‌ها (متغیر تصمیم)   |
| $p_j$    | زمان پردازش کار $j$ ام  |
| $x_{jb}$ | یک اگر کار $j$ متعلق به دسته $b$ ام باشد؛ صفر در غیر این صورت (متغیر تصمیم) |
| $w_j$    | وزن (جریمه) دیرکرد کار $j$ ام   |
| $T_j$    | تأخیر کار $j$ ام (متغیر تصمیم)  |
| $y_b$    | یک اگر دسته $b$ ام خالی نباشد؛ صفر در غیر این صورت (متغیر تصمیم)            |
| $C_b$    | زمان تکمیل دسته $b$ ام (متغیر تصمیم)  |
| $d_j$    | موعد تحویل کار $j$ ام   |
| $M$      | یک عدد بزرگ   |
| $D_j$    | زمان ارسال کار $j$ ام   |

• کار تکمیل شده در یک دسته، تا زمان تکمیل تمام کارهای متعلق به آن دسته برای ارسال منتظر می‌ماند.

### ۲-۲- پیچیدگی مسئله

واضح است مسائلی که علاوه بر اهداف معمول زمان‌بندی و توالی، هزینه‌های ارسال را نیز در نظر می‌گیرند پیچیده‌تر از مسائل کلاسیک هستند. مسئله  $\sum_{j=1}^n w_j T_j$  به‌طور قوی  $NP$ -hard<sup>۲۱</sup> است (چنگ، ۲۰۰۴). بنابراین، مسئله  $1/s/V(\infty, \infty), direct/1/$  نیز به‌طور قوی  $NP$ -hard است.

### ۳-۲- علائم اصلی

علائم مورد استفاده در برنامه‌ریزی عدد صحیح مسئله مورد بررسی در جدول ۲ آمده است.

$$\text{Min} \quad \sum_{j=1}^n w_j T_j + \theta B \quad (1)$$

$$S. t: \quad T_j = D_j - d_j \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$\sum_{b=1}^n x_{jb} = 1 \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$C_b = C_{b-1} + \sum_{j=1}^n p_j x_{jb} + S y_b \quad b = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$C_0 = 0 \quad (5)$$

$$D_j \geq C_b - M(1 - x_{jb}) \quad b = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{jb} \leq M y_b \quad b = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

$$\sum_{b=1}^n y_b = B \quad (8)$$

$$C_b \geq 0 \quad b = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

$$x_{jb} \in \{0, 1\} \quad b = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

$$y_b \in \{0, 1\} \quad b = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

$$T_j > 0 \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

$$B \geq 0 \quad \text{Integer} \quad (13)$$

### ۳- برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط

در این بخش، برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای مسئله گفته‌شده ارائه می‌شود (رضایی و همکاران، ۱۳۹۲).

تابع هدف شامل کمیته‌کردن مجموع هزینه‌های تأخیر و ارسال است که در رابطه (۱) نشان داده شده است. رابطه (۲) مقدار تأخیر هر کار را محاسبه می‌کند. رابطه (۳) نشان می‌دهد که هر کار باید فقط به یک دسته اختصاص یابد. رابطه (۴)، زمان تکمیل پردازش یک دسته را با در نظر گرفتن زمان آماده‌سازی محاسبه می‌کند. مقدار اولیه متغیر زمان تکمیل دسته  $(C_0)$  در رابطه (۵) آورده شده است. رابطه (۶) زمان ارسال هر کار را با استفاده از زمان تکمیل دسته‌ای که آن کار متعلق به آن دسته است، محاسبه می‌کند. رابطه (۸) و (۹) تعداد دسته‌های بهینه مسئله را با استفاده از متغیر  $y_b$  مشخص می‌کند. روابط (۱۰) تا (۱۳) نیز وضعیت متغیرهای مدل را نشان می‌دهند.

### ۴- معرفی الگوریتم مورچگان

در این بخش، یکی از الگوریتم‌های فراابتکاری مبتنی بر هوش جمعی و جمعیت، به نام بهینه‌سازی کلونی مورچگان معرفی می‌شود. بهینه‌سازی کلونی مورچگان، شامل مجموعه‌ای از روش‌هاست که از رفتار کلونی مورچه‌ها، برای جستجوی غذا الهام گرفته شده است. مورچه‌ها برای یافتن غذا، همواره مسیر یکسانی را دنبال می‌کنند و این مسیر، کوتاه‌ترین مسیر ممکن است. هر مورچه در طول مسیر از خود یک ماده شیمیایی به نام فرومون ترشح می‌کند. تمامی اعضای کلونی، این ماده را حس

می‌کنند و حرکت خود را به سمت مسیری جهت می‌دهند که دارای فرومون بیشتری است. به عبارت دیگر، مسیری که دارای فرومون بیشتری باشد، جذابیت بیشتری برای انتخاب توسط یک مورچه خواهد داشت (دوریگو و همکاران، ۲۰۰۲). الگوریتم ACS یکی از کاراترین نسخه‌های الگوریتم مورچگان است که تاکنون در مسائل گوناگون پژوهش عملیاتی استفاده شده است. ساختار الگوریتم ACS بدین صورت است که تعدادی مورچه در یک گراف که متناظر با مسأله بهینه‌یابی است قرار می‌گیرد. هر چه مورچه به صورت احتمالی در این گراف حرکت می‌کند و براساس مقدار فرومون و اطلاعات ابتکاری اقدام به تولید جواب می‌کند. سپس مقدار فرومون مسیر را براساس کیفیت جواب تولیدشده به‌هنگام می‌کند و به این وسیله بین مورچه‌ها ارتباط برقرار می‌شود. هر مورچه مصنوعی علاوه بر ویژگی‌های مورچه‌های طبیعی، از اطلاعات ابتکاری و حافظه‌ای برای ثبت حرکت‌های قبلی خود بهره می‌برد. اطلاعات ابتکاری براساس تابع هدف مسئله تعریف می‌شود، به این صورت که معرف میزان بهبود در مقدار این تابع، در اثر حرکت یک مورچه از یک گره به گره دیگری است. همچنین هر حرکتی که یک مورچه مصنوعی انجام می‌دهد در حافظه‌ای ذخیره می‌شود، تا برگشت به عقب و اصلاح مقادیر فرومون به‌سادگی قابل انجام باشد. همچنین به‌علت ساختار پیچیده‌ای که مسئله دارد تاکنون تعداد کمی از کاربرد الگوریتم مورچگان برای حل مسأله  $1/s/V(\infty, \infty), direct/1/\sum_{j=1}^n w_j T_j + \theta B$  استفاده شده است. در این مقاله یک روش ACS و یک روش EAS برای حل مسأله تحت مطالعه ارائه



$\alpha, \beta$ : پارامترهایی کنترلی هستند که نسبت اهمیت مقدار میدان دید مورچه را در برابر مقدار فرومون روی یالی که گره  $i$  و  $j$  را متصل کرده است تعیین می‌کند.

$q$ : یک پارامتر تصادفی است که به‌طور یکنواخت در  $[0,1]$  توزیع شده است.

$q_0$ : یک پارامتر آستانه ثابت در  $[0,1]$  است که نسبت اهمیت استخراج به اکتشاف را تعیین می‌کند. توجه کنید که انتخاب  $q_0 = 0$  روش ACS را به روش AS تبدیل می‌کند. بنابراین موقعی که  $q$  کمتر یا مساوی  $q_0$  باشد مورچه‌ها اکتشاف را به کار می‌گیرند تا کار  $j$  را به‌عنوان کار بعدی در زمان‌بندی انتخاب کنند؛ در حالی که اگر  $q$  بزرگ‌تر از  $q_0$  باشد مورچه‌ها از استخراج برپایه احتمال، برای انتخاب کار بعدی استفاده می‌کند.

#### ۴-۳- مقداردهی اولیه<sup>۲۵</sup>

در این گام، تعداد  $k$  مورچه هر کدام به‌صورت تصادفی به یکی از کارهای مسئله اختصاص داده می‌شوند. این کارها، نقطه شروع هر مورچه برای ساخت جوابش است. همچنین میزان  $\tau_0$  را به‌عنوان مقدار اولیه فرومون به تمام کمان‌های مسئله اختصاص می‌دهیم  $(\forall (i,j), \tau_{ij} = \tau_0)$  که در اینجا  $\tau_{ij}$  میزان فرومون کمان  $(i,j)$  است. معمولاً مقدار اولیه فرومون را  $\tau_0 = \frac{1}{(n \times HA\_Value)}$  در نظر می‌گیرند که در آن،  $HA\_Value$  مقدار هزینه‌ای است که توسط الگوریتم ابتکاری به دست می‌آید.

#### ۴-۴- ساخت جواب<sup>۲۶</sup>

در مرحله ساخت جواب، هر مورچه یک توالی شدنی را در  $n$  گام می‌سازد. در هر گام، مورچه  $k$  که در کار نام قرار دارد، با احتمال  $q_0$  کار بعدی‌اش،  $j$  را طبق رابطه (۱۴) حساب می‌کند:

$$j = \arg \max_{i \in N_i^k} \{ [\tau_{il}]^\alpha [\eta_{il}]^\beta \} \quad (14)$$

می‌شود که در بخش‌های بعدی با جزئیات کافی به آن پرداخته می‌شود.

#### ۴-۱- الگوریتم جمعیت مورچگان<sup>۲۲</sup> (ACS)

تاکنون نسخه‌های مختلفی برای الگوریتم ACO ارائه شده است. از جمله این الگوریتم‌ها می‌توان به الگوریتم سیستم مورچگان<sup>۲۳</sup> (AS)، سیستم مورچگان ماکس مین<sup>۲۴</sup> (MMAS) و سیستم اجتماع مورچگان (ACS) اشاره کرد (لیائو و جوان، ۲۰۰۷). البته عمده تفاوت نسخه‌های مختلف الگوریتم ACO در نحوه به‌روزرسانی فرومون‌های آنها است. الگوریتم ACS، یکی از موفق‌ترین نسخه‌های الگوریتم ACO است که آن را دوریگو و گامباردلا (۲۰۰۵) ارائه کرده‌اند.

شکل ۱ شبه‌کدهای این الگوریتم را نشان می‌دهد.

|   |
|---|
| مقداردهی اولیه را انجام بده<br>تا هنگامی که شرایط خاتمه برقرار نشده<br>جواب‌های مورچه‌ها را بساز و به‌روزرسانی محلی فرومون‌ها را<br>انجام بده<br>جستجوی محلی را انجام بده / اختیاری /<br>به‌روزرسانی سراسری فرومون‌ها را انجام بده<br>پایان |
|---|

شکل ۱- شبه‌کدهای الگوریتم ACS

#### ۴-۲- معرفی پارامترهای روش ACS

$\tau_{ij}$ : مقدار فرومون روی یالی است که گره‌های  $i$  و  $j$  را به هم متصل می‌کند.  
 $p_{ij}^k$ : احتمال حرکت از گره  $i$  به گره ملاقات‌نشده<sup>۲۷</sup>  $j$  و به‌وسیله مورچه  $k$  است.  
 $\eta_{ij}$ : اطلاعات ابتکاری برای اندازه‌گیری میدان دید مورچه است.

که  $0 < \rho \leq 1$ ، نرخ تبخیر،  $\Delta\tau_{ij}^{bs} = 1/C^{bs}$  و  $C^{bs}$  نیز مقدار  $T^{bs}$  است. البته همین عمل سبب تشویق مورچه‌های دیگر به تکرار این تور می‌شود (الایب و همکاران، ۲۰۰۷).

#### ۴-۷- شرط خاتمه

الگوریتم ACS در صورتی خاتمه می‌یابد که تعداد تکرارهای الگوریتم به بیشترین مقدار خود برسد (این مقدار در تنظیم پارامترها تعیین می‌شود).

#### ۵- الگوریتم سیستم مورچه نخبه‌گرا<sup>۲۷</sup> (EAS)

اولین بهبودی که بر AS اتفاق افتاد، استفاده از استراتژی نخبه بود که توسط دوریگو و همکارانش در سال ۱۹۹۶ ارائه شد. این الگوریتم به دلیل معرفی مکانیسم‌هایی جدید از لحاظ کارایی نسبت به AS به بهبودهایی دست یافته بود. باید توجه کرد که روند استراتژی نخبه بدین صورت است که یکی از مورچه‌ها، بهترین مورچه‌ای که تاکنون توانسته است بهترین جواب را به دست آورد، می‌تواند در هر تکرار مسیر خود را دوباره فرمون‌ریزی کند. این کار باعث می‌شود کارایی الگوریتم بهتر شود؛ زیرا در روش AS تمام مورچه‌ها بعد از مدتی توالی‌های یکسانی تولید می‌کردند و این کار باعث می‌شد که اگر این تور مطلوب نباشد عملاً الگوریتم توانایی خود را برای یافتن جواب بهتر از دست داده و روند جستجو و استخراج جواب متوقف شود. در نتیجه الگوریتم برای مسائل نسبتاً بزرگ، کارایی خود را از دست می‌دهد. تفاوت عمده‌ای که EAS نسبت به الگوریتم AS دارد عبارت‌اند از:

فرض کنید  $S_{gb}$  بهترین جوابی است که تاکنون در اجرای کامل الگوریتم به دست آمده است؛ بنابراین

همچنین با احتمال  $(1 - q_0)$  کار بعدی‌اش را به صورت احتمالی طبق رابطه (۱۵) حساب می‌کند:

$$p_{ij}^k = \frac{[\tau_{ij}]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{l \in N_i^k} [\tau_{il}]^\alpha [\eta_{il}]^\beta}, \text{ if } j \in N^k, \quad (15)$$

که در این روابط  $d_{ij}$  طول کمان  $(i, j)$ ،  $\eta_{ij} = \frac{1}{d_{ij}}$  یک مقدار ابتکاری و  $\beta$  میزان تأثیر این مقدار ابتکاری را نشان می‌دهد. همچنین  $N^k$  مجموعه کارهای کاندید مورچه  $k$  برای حرکت بعدی‌اش است.

بعد از اینکه کار  $z$  برای حرکت بعدی مورچه  $k$  انتخاب شد، این کار را از  $N^k$  حذف می‌کنیم. به عبارت دیگر تا انتهای فرایند ساخت جواب، مورچه  $k$  دیگر حق ندارد کار  $z$  را انتخاب کند. همچنین گفتنی است که در ابتدای فرایند ساخت جواب،  $N^k = V$ ،  $1 \leq k \leq K$  که  $V$  مجموعه تمام کارهای مسئله است.

#### ۴-۵- به‌روزرسانی محلی فرمون‌ها

در طول فرایند ساخت جواب، به محض اینکه یک مورچه یک کمان  $(i, j)$  را طی کند، میزان فرمون روی آن کمان نیز طبق رابطه (۱۶) به‌روز می‌شود.

$$\tau_{ij} = (1 - \rho)\tau_{ij} + \rho\tau_0 \quad (16)$$

که در این رابطه  $0 < \rho \leq 1$ ،  $\rho$  یک پارامتر است. به این فرایند، به‌روزرسانی محلی فرمون‌ها می‌گویند.

#### ۴-۶- به‌روزرسانی سراسری فرمون‌ها

وقتی فرایند ساخت جواب برای تمام مورچه‌ها کامل شود و فرایند جستجوی محلی بر همه این جواب‌ها صورت گیرد، فرایند به‌روزرسانی سراسری فرمون‌ها صورت می‌پذیرد. در به‌روزرسانی سراسری فرمون‌ها، فقط میزان فرمون روی کمان‌های بهترین جواب به دست آمده در هر تکرار، یعنی  $T^{bs}$ ، طبق رابطه (۱۸) به‌روز می‌شود:

$$\tau_{ij} = (1 - \rho)\tau_{ij} + \rho\Delta\tau_{ij}^{bs}, \quad \forall (i, j) \in T^{bs}, \quad (18)$$

می‌کند. بنابراین ضریب ثابت  $e$  نمی‌تواند ضریب مناسبی برای تشویق بهترین مسیر تاکنون به دست آمده باشد؛ زیرا تفاوتی در اینکه بهترین جواب در چه تکراری و با چه دقتی به دست آمده، نمی‌گذارد. در روند بهبود EAS مشخص شد که استفاده از رابطه (۲۱) در ابتدا دارای مقدار ۱ است و هر زمانی که الگوریتم جواب بهتر را به دست آورد یک واحد افزایش پیدا می‌کند، سبب می‌شود که نتایج بهتری برای به دست آید که در بخش بعدی به تفصیل شرح داده می‌شود.

$$e_{loop+1} = (e_{loop} + 1)^{1.25} \quad e_1 \quad (21)$$

$$= 1$$

علاوه بر این، این تابع چندجمله‌ای از آن جهت انتخاب نسبتاً مناسبی به نظر می‌آید که اولاً یک تابع صعودی است و ثانیاً دارای یک شیب متغیر است، به عبارت دیگر با افزایش تکرارها و به دست آمدن جواب‌های بهتر، تابع مربوطه رشد کرده و بهترین مسیر به دست آمده با قدرت بیشتری نسبت به جواب‌های قبلی تشویق می‌شود.

توجه به این نکته ضروری است که مقدار کم تابع در ابتدای الگوریتم باعث می‌شود که فرمون ریخته شده بر بهترین مسیر تأثیر کمتری بر انتخاب مسیرها در تکرارهای بعدی الگوریتم داشته باشد و مورچه‌ها نوعی از فراموشی را به اجرا بگذارند؛ به عبارت دیگر این کار باعث می‌شود که اگر مورچه‌ها جواب‌های ضعیفی را در ابتدای الگوریتم به دست آوردند، این جواب‌ها را به فراموشی بسپارند؛ اما با گذشت زمان که الگوریتم به جلو می‌رود و جواب‌ها با دقت بیشتری به دست می‌آیند این مقدار چندجمله‌ای نیز به سرعت افزایش پیدا می‌کند و یال‌های متعلق به بهترین جواب، فرمون بیشتری را جذب می‌کند.

در هنگام به‌روزرسانی فرمون، مسیر طی شده به وسیله مورچه‌ای که مسیر  $S_{gb}$  را تولید کرده است یک مقدار اضافی از فرمون با مقدار  $e \cdot \Delta\tau_{ij}^{gb}(t)$  را جذب می‌کند. بنابراین معادله به‌روزرسانی فرمون به صورت رابطه (۱۹) اصلاح می‌شود.

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t) + e \cdot \Delta\tau_{ij}^{gb}(t) \quad (19)$$

که در آن:

$e$ : وزن تور  $S_{gb}$  است و دارای یک مقدار ثابت است که توسط کاربر تعیین می‌شود.

$C^k(t)$ : هزینه توری است که مورچه  $k$ ام پیموده است.

$\rho$ : نرخ تبخیر ثابت در دامنه  $[0,1]$  است که کاربر بدین وسیله کاهش فرمون روی یال‌ها را تنظیم می‌کند.

$T^k$ : مجموعه یال‌هایی که توسط مورچه  $k$ ام مورد ملاقات قرار گرفته است.

$\Delta\tau_{ij}^k(t)$ : مقدار فرمون ریزی محلی است که در آن مورچه‌ها در حین حرکت ما بین هر گره  $i$  و  $j$ ، مقداری فرمون، به اندازه عکس اندازه‌ای که هر کدام تاکنون پیموده‌اند، روی یال مربوطه می‌ریزند (رابطه (۲۰)).

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{1}{C^k(t)} & (i,j) \in T^k \\ 0 & (i,j) \notin T^k \end{cases} \quad (20)$$

$\Delta\tau_{ij}^{gb}(t)$ : مقدار فرمون سراسری است که روی یال‌های متعلق به بهترین تور تاکنون شناخته شده ریخته می‌شود و برابر  $\frac{1}{f(S_{gb})}$  است که در آن  $f(S_{gb})$  مقدار طول بهترین مسیر به دست آمده است.

از طرف دیگر گفتنی است که ساختار الگوریتم EAS به نحوی است که دقت جواب‌ها در ابتدا بسیار پایین است؛ اما به تدریج با افزایش تکرارها و ریختن فرمون توسط مورچه‌ها دقت جواب‌ها افزایش پیدا

## ۶- تنظیم پارامترها

قبل از اجرای ACS و EAS برای حل مسائل، ابتدا باید پارامترهای الگوریتم تنظیم شوند بدین منظور مهم‌ترین پارامترهای الگوریتم پیشنهادی که تأثیر بسزایی در همگرایی الگوریتم دارند، تجزیه و تحلیل می‌شوند. برای این منظور برای هر پارامتر موردنظر مقادیر مختلفی آزمایش می‌شود تا بهترین مقادیر برای پارامترهای موردبررسی در بازه انتخاب‌شده یافت شود. برای انتخاب این مقادیری، آزمایشی مطابق جدول طراحی شد و برای هر تعداد کار در هر گروه، ۳ مسئله به صورت تصادفی تولید شدند؛ بنابراین، تعداد کل مسائل تولیدشده برای ۲۷ گروه و ۱۰۸ (۴×۲۷) تیمار، ۳۲۴ (۱۰۸×۳) مسئله است. هر مسأله تولیدشده توسط روش ACS به‌ازای تمام پارامترهای موجود در جدول یعنی ۴۸۶ (۳×۳×۲×۳×۳×۳) مرتبه حل شد از طرف دیگر در هنگامی که یک پارامتر بررسی می‌شود، بقیه پارامترها ثابت در نظر گرفته می‌شوند تا به این ترتیب بتوان با دقت بیشتری پارامتر موردآزمایش را بررسی کرد. نتایجی که در جدول نشان داده شده است، بهترین مقادیری است که الگوریتم توانسته است در حل ۱۵۷۴۶۴ (۴۸۶×۳۲۴) مسئله به دست آورد.

## ۷- نتایج محاسباتی

در این بخش به منظور ارزیابی عملکرد روش‌های ارائه‌شده، نتایج محاسباتی ارائه می‌شود. داده‌های معیاری برای مسأله مطرح‌شده یافت نشد. در این تست عملکرد ACS در مقایسه با CPLEX ارزیابی می‌شود. روش‌ها ACS در محیط MATLAB 2011 (a) و مدل MIP در محیط GAMS23.7 کدنویسی شدند. CPLEX یکی از مشهورترین و بهترین محصولات تجاری برای حل MIP در نرم‌افزار

GAMS است (براکر و همکاران، ۲۰۰۸). رایانه مورداستفاده دارای مشخصات CPU 2.30GHz, RAM 2GB, OS Windows 7 (64-bit) است. با توجه به پیچیدگی بالای مسئله (SNP) و محدودیت پردازشگرها، CPLEX و ACS جهت استفاده مسائلی با تعداد محدودی از کارها مورد توجه قرار می‌گیرند. از آنجایی که مقادیر پارامترهای مسئله بر زمان حل آن تأثیر می‌گذارند در این تست بازه‌های مختلفی برای تعدادی از پارامترهای مهم مسئله در نظر گرفته شده است. این تست نشان می‌دهد که مقادیر پارامترها چگونه بر زمان حل مسائل تأثیر می‌گذارد. پارامترهای مسائل به‌طور تصادفی از توزیع یکنواخت در بازه‌هایی به شرح زیر تولید شدند:

زمان‌های پردازش ( $p_j$ ) در بازه  $[1, 100]$ ،

زمان راه‌اندازی دسته برای مشتری ( $s$ ) در بازه  $[0, 10]$ ،

وزن کارها ( $w_j$ ) در بازه‌های  $[1, 10]$ ،  $[45, 55]$  و  $[1, 100]$ ،

موعد تحویل هر کار ( $d_j$ ) در بازه‌های  $[0, 0.5P]$ ،  $[0.5P, P]$  و  $[0.5P, 1.5P]$ ،

جدول ۳ عوامل انتخاب‌شده و سطوح موردنظر را نشان می‌دهد.

برای هر تعداد کار در هر گروه، ۱۰ مسئله به صورت تصادفی تولید و حل شدند؛ بنابراین، تعداد کل مسائل تولیدشده برای ۲۷ گروه و ۱۰۸ (۴×۲۷) تیمار، ۱۰۸۰ (۱۰۸×۱۰) مسئله است. همچنین، یک محدودیت زمانی ۳۶۰۰ ثانیه‌ای برای حل هر مسئله در نظر گرفته شد؛ به طوری که اگر الگوریتم در محدودیت گفته‌شده به پایان نرسد بالاجبار متوقف می‌شود. نتایج تست محاسباتی برای ۲۷ گروه و ۱۰۸ تیمار گفته‌شده در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۳- عوامل و سطوح انتخاب شده برای پارامترها

| Factor   | Value              | Level        | Code |
|----------|--------------------|--------------|------|
| $n$      | 4,7,10 and 13 jobs | 4, 7, 10, 13 | -    |
| $w$      | [1, 10]            | Low          | 1    |
|          | [45, 55]           | High         | 2    |
|          | [1, 100]           | Outspread    | 3    |
| $d$      | [0, 0.5P]          | Tight        | 1    |
|          | [0.5P, P]          | Medium       | 2    |
|          | [0.5P, 1.5P]       | Loose        | 3    |
| $\theta$ | [1, 10]            | Low          | 1    |
|          | [45, 55]           | High         | 2    |
|          | [1, 100]           | Outspread    | 3    |

جدول ۴- نتایج تنظیم پارامتر برای روش ACS

| $e$      | max_it |    |    | $q_0$ |      |      | $\beta$ |   |   | $\alpha$ |   |     | $\rho$ |     |   | k |   |     | روش تنظیم پارامتر | الگوریتم |
|----------|--------|----|----|-------|------|------|---------|---|---|----------|---|-----|--------|-----|---|---|---|-----|-------------------|----------|
|          | 10     | 20 | 30 | 0.6   | 0.79 | 0.98 | 1       | 3 | 5 | 1        | 2 | 0.1 | 0.5    | 0.9 | 2 | 5 | 8 |     |                   |          |
| -        |        |    | *  |       |      | *    |         |   | * |          | * |     |        | *   |   |   | * | DOE | EAS               |          |
| Function |        |    | *  |       |      | *    |         |   | * |          | * |     |        | *   |   |   | * | DOE | ACS               |          |

جدول ۵- نتایج تست محاسباتی برای روش های ACS و MIP

| $\theta$ | $d$ | $W$ | $n$ | Avg. of running time (s) |      | $((ACS - Opt)/Opt) \times 100$ |       |       | No. of optimum instances |     |
|----------|-----|-----|-----|--------------------------|------|--------------------------------|-------|-------|--------------------------|-----|
|          |     |     |     | MIP                      | ACS  | Avg                            | Max   | Min   | MIP                      | ACS |
| 1        | 1   | 1   | 4   | 0.90                     | 0.89 | 2.04                           | 7.67  | 0.00  | 10                       | 4   |
| 1        | 1   | 1   | 7   | 4.10                     | 1.76 | 1.65                           | 6.59  | 0.00  | 10                       | 2   |
| 1        | 1   | 1   | 10  | 1239.35                  | 2.55 | 4.53                           | 10.16 | 0.39  | 8                        | 0   |
| 1        | 1   | 1   | 13  | -                        | -    | -                              | -     | -     | -                        | -   |
| 1        | 1   | 2   | 4   | 1.01                     | 0.88 | 0.56                           | 5.06  | 0.00  | 10                       | 8   |
| 1        | 1   | 2   | 7   | 9.14                     | 1.70 | 2.50                           | 10.53 | 0.00  | 10                       | 2   |
| 1        | 1   | 2   | 10  | 1566.47                  | 2.51 | 5.43                           | 7.63  | 0.00  | 8                        | 1   |
| 1        | 1   | 2   | 13  | -                        | -    | -                              | -     | -     | -                        | -   |
| 1        | 1   | 3   | 4   | 0.25                     | 0.91 | 0.00                           | 0.00  | 0.00  | 10                       | 10  |
| 1        | 1   | 3   | 7   | 2.83                     | 1.72 | 0.84                           | 4.80  | 0.00  | 10                       | 5   |
| 1        | 1   | 3   | 10  | 472.16                   | 2.48 | 5.88                           | 11.54 | 0.92  | 10                       | 0   |
| 1        | 1   | 3   | 13  | 963.55                   | 3.30 | 33.59                          | 33.59 | 33.59 | 1                        | 0   |
| 1        | 2   | 1   | 4   | 0.20                     | 0.87 | 0.00                           | 0.00  | 0.00  | 10                       | 10  |
| 1        | 2   | 1   | 7   | 0.95                     | 1.64 | 1.96                           | 10.04 | 0.00  | 10                       | 7   |
| 1        | 2   | 1   | 10  | 21.14                    | 2.39 | 5.94                           | 29.19 | 0.00  | 10                       | 6   |
| 1        | 2   | 1   | 13  | 1052.68                  | 3.18 | 11.02                          | 34.52 | 0.00  | 7                        | 3   |
| 1        | 2   | 2   | 4   | 0.20                     | 0.86 | 0.10                           | 0.98  | 0.00  | 10                       | 9   |
| 1        | 2   | 2   | 7   | 0.84                     | 1.65 | 10.62                          | 45.24 | 0.00  | 10                       | 5   |
| 1        | 2   | 2   | 10  | 66.98                    | 2.39 | 17.22                          | 80.00 | 0.00  | 10                       | 4   |
| 1        | 2   | 2   | 13  | 759.34                   | 3.17 | 18.18                          | 53.24 | 0.00  | 10                       | 4   |
| 1        | 2   | 3   | 4   | 0.20                     | 0.88 | 0.00                           | 0.00  | 0.00  | 10                       | 10  |
| 1        | 2   | 3   | 7   | 0.85                     | 1.66 | 5.97                           | 30.48 | 0.00  | 10                       | 8   |
| 1        | 2   | 3   | 10  | 31.74                    | 2.43 | 4.96                           | 16.77 | 0.00  | 10                       | 6   |
| 1        | 2   | 3   | 13  | 751.13                   | 3.19 | 6.41                           | 32.07 | 0.00  | 9                        | 6   |
| 1        | 3   | 1   | 4   | 0.18                     | 0.84 | 1.10                           | 10.96 | 0.00  | 10                       | 9   |
| 1        | 3   | 1   | 7   | 0.25                     | 1.62 | 0.00                           | 0.00  | 0.00  | 10                       | 10  |
| 1        | 3   | 1   | 10  | 2.80                     | 2.36 | 6.82                           | 34.83 | 0.00  | 10                       | 8   |
| 1        | 3   | 1   | 13  | 0.64                     | 3.14 | 3.33                           | 33.33 | 0.00  | 10                       | 9   |
| 1        | 3   | 2   | 4   | 0.20                     | 0.84 | 0.00                           | 0.00  | 0.00  | 10                       | 10  |
| 1        | 3   | 2   | 7   | 0.26                     | 1.61 | 0.00                           | 0.00  | 0.00  | 10                       | 10  |

ادامه جدول ۵- نتایج تست محاسباتی برای روش‌های ACS و MIP

| $\theta$ | $d$ | $W$ | $n$ | Avg. of running time (s) |      | $((ACS - Opt)/Opt) \times 100$ |       |      | No. of optimum instances |     |
|----------|-----|-----|-----|--------------------------|------|--------------------------------|-------|------|--------------------------|-----|
|          |     |     |     | MIP                      | ACS  | Avg                            | Max   | Min  | MIP                      | ACS |
| 1        | 3   | 2   | 10  | 0.74                     | 2.35 | 8.33                           | 50.00 | 0.00 | 10                       | 8   |
| 1        | 3   | 2   | 13  | 1.29                     | 3.13 | 3.33                           | 33.33 | 0.00 | 10                       | 9   |
| 1        | 3   | 3   | 4   | 0.19                     | 0.84 | 0.00                           | 0.00  | 0.00 | 10                       | 10  |
| 1        | 3   | 3   | 7   | 0.27                     | 1.62 | 5.38                           | 33.44 | 0.00 | 10                       | 8   |
| 1        | 3   | 3   | 10  | 0.51                     | 2.35 | 0.00                           | 0.00  | 0.00 | 10                       | 10  |
| 1        | 3   | 3   | 13  | 2.14                     | 3.15 | 3.33                           | 33.33 | 0.00 | 10                       | 9   |
| 2        | 1   | 1   | 4   | 0.22                     | 0.88 | 0.72                           | 3.94  | 0.00 | 10                       | 8   |
| 2        | 1   | 1   | 7   | 2.86                     | 1.71 | 1.59                           | 4.54  | 0.00 | 10                       | 3   |
| 2        | 1   | 1   | 10  | 998.48                   | 2.50 | 5.39                           | 11.51 | 1.09 | 10                       | 0   |
| 2        | 1   | 1   | 13  | -                        | -    | -                              | -     | -    | -                        | -   |
| 2        | 1   | 2   | 4   | 0.20                     | 0.90 | 0.50                           | 4.98  | 0.00 | 10                       | 9   |
| 2        | 1   | 2   | 7   | 5.64                     | 1.64 | 1.34                           | 5.51  | 0.00 | 10                       | 2   |
| 2        | 1   | 2   | 10  | 1914.29                  | 2.38 | 2.94                           | 9.01  | 0.91 | 6                        | 0   |
| 2        | 1   | 2   | 13  | -                        | -    | -                              | -     | -    | -                        | -   |
| 2        | 1   | 3   | 4   | 0.22                     | 0.89 | 2.25                           | 14.36 | 0.00 | 10                       | 7   |
| 2        | 1   | 3   | 7   | 1.89                     | 1.67 | 0.82                           | 2.62  | 0.00 | 10                       | 5   |
| 2        | 1   | 3   | 10  | 344.85                   | 2.42 | 6.10                           | 11.72 | 1.16 | 8                        | 0   |
| 2        | 1   | 3   | 13  | -                        | -    | -                              | -     | -    | -                        | -   |
| 2        | 2   | 1   | 4   | 0.27                     | 0.89 | 0.29                           | 2.88  | 0.00 | 10                       | 9   |
| 2        | 2   | 1   | 7   | 1.05                     | 1.62 | 5.06                           | 39.46 | 0.00 | 10                       | 6   |
| 2        | 2   | 1   | 10  | 52.38                    | 2.32 | 5.59                           | 19.48 | 0.00 | 10                       | 3   |
| 2        | 2   | 1   | 13  | 607.05                   | 3.06 | 24.94                          | 65.97 | 0.00 | 7                        | 2   |
| 2        | 2   | 2   | 4   | 0.22                     | 0.86 | 0.30                           | 2.25  | 0.00 | 10                       | 8   |
| 2        | 2   | 2   | 7   | 1.00                     | 1.61 | 0.05                           | 0.45  | 0.00 | 10                       | 9   |
| 2        | 2   | 2   | 10  | 57.02                    | 2.35 | 18.60                          | 39.60 | 0.00 | 10                       | 2   |
| 2        | 2   | 2   | 13  | 1316.76                  | 3.09 | 24.65                          | 76.76 | 0.00 | 5                        | 3   |
| 2        | 2   | 3   | 4   | 0.21                     | 0.86 | 1.01                           | 5.99  | 0.00 | 10                       | 8   |
| 2        | 2   | 3   | 7   | 0.76                     | 1.60 | 3.73                           | 35.30 | 0.00 | 10                       | 8   |
| 2        | 2   | 3   | 10  | 14.52                    | 2.32 | 8.34                           | 74.42 | 0.00 | 10                       | 8   |
| 2        | 2   | 3   | 13  | 909.12                   | 3.07 | 22.54                          | 64.67 | 0.00 | 10                       | 4   |
| 2        | 3   | 1   | 4   | 0.20                     | 0.85 | 0.00                           | 0.00  | 0.00 | 10                       | 10  |
| 2        | 3   | 1   | 7   | 0.31                     | 1.58 | 1.20                           | 12.03 | 0.00 | 10                       | 9   |
| 2        | 3   | 1   | 10  | 1.45                     | 2.31 | 3.59                           | 30.26 | 0.00 | 10                       | 8   |
| 2        | 3   | 1   | 13  | 5.93                     | 3.03 | 5.00                           | 50.00 | 0.00 | 10                       | 9   |
| 2        | 3   | 2   | 4   | 0.20                     | 0.86 | 2.59                           | 15.48 | 0.00 | 10                       | 8   |
| 2        | 3   | 2   | 7   | 0.29                     | 1.60 | 0.00                           | 0.00  | 0.00 | 10                       | 10  |
| 2        | 3   | 2   | 10  | 0.83                     | 2.28 | 0.00                           | 0.00  | 0.00 | 10                       | 10  |
| 2        | 3   | 2   | 13  | 0.66                     | 3.03 | 15.00                          | 50.00 | 0.00 | 10                       | 7   |
| 2        | 3   | 3   | 4   | 0.19                     | 0.84 | 0.00                           | 0.00  | 0.00 | 10                       | 10  |
| 2        | 3   | 3   | 7   | 0.29                     | 1.58 | 0.00                           | 0.00  | 0.00 | 10                       | 10  |
| 2        | 3   | 3   | 10  | 1.37                     | 2.29 | 1.31                           | 13.10 | 0.00 | 10                       | 9   |
| 2        | 3   | 3   | 13  | 1.78                     | 3.02 | 3.33                           | 33.33 | 0.00 | 10                       | 9   |
| 3        | 1   | 1   | 4   | 0.21                     | 0.88 | 0.31                           | 2.49  | 0.00 | 10                       | 8   |
| 3        | 1   | 1   | 7   | 3.44                     | 1.66 | 1.96                           | 5.51  | 0.00 | 10                       | 4   |
| 3        | 1   | 1   | 10  | 910.81                   | 2.42 | 2.99                           | 8.69  | 0.27 | 9                        | 0   |
| 3        | 1   | 1   | 13  | -                        | -    | -                              | -     | -    | -                        | -   |
| 3        | 1   | 2   | 4   | 0.23                     | 0.88 | 0.89                           | 3.44  | 0.00 | 10                       | 7   |
| 3        | 1   | 2   | 7   | 10.50                    | 1.69 | 2.61                           | 8.60  | 0.00 | 10                       | 3   |
| 3        | 1   | 2   | 10  | 1283.52                  | 2.41 | 7.08                           | 14.04 | 1.65 | 9                        | 0   |
| 3        | 1   | 2   | 13  | -                        | -    | -                              | -     | -    | -                        | -   |
| 3        | 1   | 3   | 4   | 0.22                     | 0.91 | 0.00                           | 0.00  | 0.00 | 10                       | 10  |
| 3        | 1   | 3   | 7   | 2.77                     | 1.67 | 2.19                           | 6.03  | 0.00 | 10                       | 3   |
| 3        | 1   | 3   | 10  | 296.95                   | 2.42 | 9.16                           | 25.39 | 0.21 | 9                        | 0   |

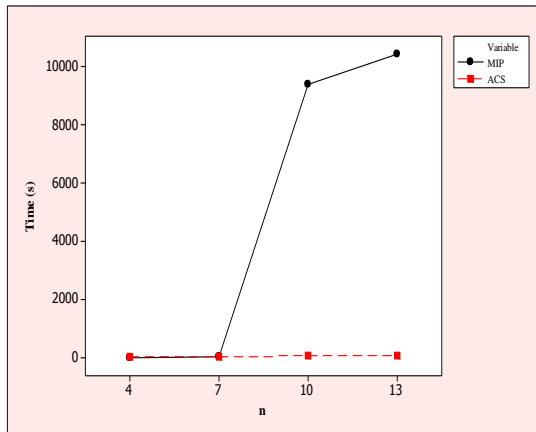
ادامه جدول ۵- نتایج تست محاسباتی برای روش‌های ACS و MIP

| $\theta$ | $d$ | $W$ | $n$ | Avg. of running time (s) |      | $((ACS - Opt)/Opt) \times 100$ |       |      | No. of optimum instances |     |
|----------|-----|-----|-----|--------------------------|------|--------------------------------|-------|------|--------------------------|-----|
|          |     |     |     | MIP                      | ACS  | Avg                            | Max   | Min  | MIP                      | ACS |
| 3        | 1   | 3   | 13  | 1601.80                  | 3.21 | 5.83                           | 5.83  | 5.83 | 1                        | 0   |
| 3        | 2   | 1   | 4   | 0.20                     | 0.85 | 0.04                           | 0.41  | 0.00 | 10                       | 9   |
| 3        | 2   | 1   | 7   | 0.79                     | 1.59 | 1.27                           | 12.73 | 0.00 | 10                       | 9   |
| 3        | 2   | 1   | 10  | 32.36                    | 2.31 | 12.94                          | 41.53 | 0.00 | 10                       | 4   |
| 3        | 2   | 1   | 13  | 568.03                   | 3.07 | 19.75                          | 86.61 | 0.00 | 9                        | 3   |
| 3        | 2   | 2   | 4   | 0.22                     | 0.85 | 0.35                           | 3.47  | 0.00 | 10                       | 9   |
| 3        | 2   | 2   | 7   | 0.97                     | 1.59 | 3.38                           | 18.96 | 0.00 | 10                       | 6   |
| 3        | 2   | 2   | 10  | 66.93                    | 2.32 | 11.61                          | 38.28 | 0.00 | 10                       | 2   |
| 3        | 2   | 2   | 13  | 1214.25                  | 3.07 | 26.45                          | 47.52 | 0.00 | 8                        | 1   |
| 3        | 2   | 3   | 4   | 0.22                     | 0.85 | 0.00                           | 0.03  | 0.00 | 10                       | 9   |
| 3        | 2   | 3   | 7   | 0.74                     | 1.60 | 2.16                           | 9.25  | 0.00 | 10                       | 7   |
| 3        | 2   | 3   | 10  | 22.40                    | 2.31 | 10.39                          | 45.53 | 0.00 | 10                       | 5   |
| 3        | 2   | 3   | 13  | 649.94                   | 3.05 | 16.07                          | 64.24 | 0.00 | 10                       | 3   |
| 3        | 3   | 1   | 4   | 0.19                     | 0.83 | 0.00                           | 0.00  | 0.00 | 10                       | 10  |
| 3        | 3   | 1   | 7   | 0.27                     | 1.57 | 2.06                           | 20.57 | 0.00 | 10                       | 9   |
| 3        | 3   | 1   | 10  | 1.09                     | 2.27 | 10.35                          | 52.13 | 0.00 | 10                       | 6   |
| 3        | 3   | 1   | 13  | 0.67                     | 3.01 | 7.20                           | 35.57 | 0.00 | 10                       | 7   |
| 3        | 3   | 2   | 4   | 0.19                     | 0.84 | 0.00                           | 0.00  | 0.00 | 10                       | 10  |
| 3        | 3   | 2   | 7   | 0.30                     | 1.59 | 0.00                           | 0.00  | 0.00 | 10                       | 10  |
| 3        | 3   | 2   | 10  | 0.77                     | 2.30 | 0.00                           | 0.00  | 0.00 | 10                       | 10  |
| 3        | 3   | 2   | 13  | 25.98                    | 3.03 | 5.00                           | 50.00 | 0.00 | 10                       | 9   |
| 3        | 3   | 3   | 4   | 0.19                     | 0.83 | 0.00                           | 0.00  | 0.00 | 10                       | 10  |
| 3        | 3   | 3   | 7   | 0.37                     | 1.58 | 0.00                           | 0.00  | 0.00 | 10                       | 10  |
| 3        | 3   | 3   | 10  | 0.48                     | 2.31 | 0.00                           | 0.00  | 0.00 | 10                       | 10  |
| 3        | 3   | 3   | 13  | 1.23                     | 3.01 | 14.72                          | 50.00 | 0.00 | 10                       | 7   |

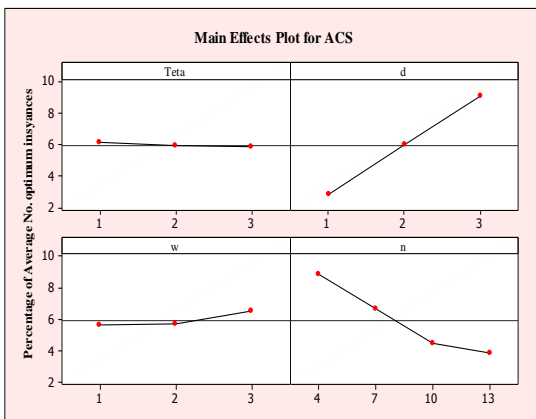
\* علامت "-" نشان‌دهنده این است که الگوریتم نتوانسته است مسائل تولیدشده را در محدودیت زمانی ۳۶۰۰ ثانیه حل کند.

تعداد کارها، زمان حل مسائل روش MIP به صورت کاملاً نمایی افزایش یافته است؛ این در حالی است که روش ACS توانسته است مسائل را در زمان بسیار اندکی حل کند. این موضوع نشان می‌دهد که الگوریتم فراابتکاری طراحی شده در معیار زمان بسیار بهتر از روش دقیق است و می‌تواند عدم‌کارایی روش MIP را برای اندازه‌های بزرگ جبران کند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت با در نظر گرفتن هم‌زمان دو معیار سرعت و دقت الگوریتم و توجه به پیچیدگی بالای مسأله  $1/s/V(\infty, \infty), direct/1/\sum_{j=1}^n w_j T_j + \theta B$ ، این نتایج برای روش فراابتکاری بسیار مناسب هستند. نتایج حاصل از آنالیز واریانس برای تست گفته شده در آورده شده است. براساس p-value مدل، مدل برای همه روش‌ها معنادار است؛ بنابراین، حداقل یکی از

برخلاف الگوریتم‌های دقیق که زمان معیار اصلی موفقیت آنها محسوب می‌شود، دو موضوع مهم در ارزیابی الگوریتم‌های فراابتکاری مورد توجه است: اول سرعت الگوریتم و دوم دقت جواب. براساس مشاهدات تست‌های انجام شده، کمترین، متوسط و بیشترین متوسط انحراف ACS از جواب بهینه برای همه تیمارها به ترتیب ۰/۰۰ درصد، ۵/۱۱ درصد و ۳۳/۵۹ درصد است. ACS، ۶۲/۲۸ درصد از مسائل تولیدشده را صورت بهینه حل کرده است؛ این در حالی است که روش MIP با توجه به ساختار مسئله ۸۹ درصد مسائل تولیدشده را حل کرده است؛ همچنین کمترین، متوسط و بیشترین زمان اجرای ACS برای همه تیمارها به ترتیب ۳/۳، ۸۳/ و ۱/۹۲ ثانیه است البته همان‌طور که از شکل ۲ مشهود است با افزایش



شکل ۲- زمان اجرای روش‌های ACS و MIP برحسب  $n$  به صورت تجمعی



شکل ۳- نمودار آثار اصلی، متغیر پاسخ: درصد جواب‌های بهینه به دست آمده توسط ACS

عوامل انتخاب‌شده دارای اثر اصلی یا حداقل دو مورد از عوامل انتخاب‌شده دارای آثار متقابل بر روش مورد استفاده هستند. گفتنی است آثار از درجه دو به بالا به عنوان باقیمانده در مدل در نظر گرفته شده است. مطابق جدول ۶، علاوه بر وجود آثار اصلی معنادار یکی از آثار متقابل عوامل نیز معنادار هستند؛ بنابراین، در تحلیل نتایج لازم است به آثار متقابل عوامل دقت شود. همچنین در سطح معناداری ۵ درصد، سختی مسئله برای هر سه رویکرد متأثر از عوامل تعداد کارها، وزن کارها و موعد تحویل است. بنابراین، عملکرد ACS و CPLEX نه تنها به اندازه مسئله بلکه به مقادیر پارامترها نیز بستگی دارد.

برای ارزیابی کارایی ACS و EAS برای ابعاد متوسط و بزرگ (۱۵، ۳۰، ۴۵، ...، ۱۰۵) شاخص‌های متعدد و متنوعی وجود دارد که پس از انجام مطالعات مرتبط، سه شاخص زمان حل، کیفیت و پراکندگی جواب‌های به دست آمده انتخاب شده است که در ادامه بحث خواهد شد.

جدول ۶- تحلیل ANOVA برای ACS و CPLEX

| Method          | ACS      |        |          |       | CPLEX    |      |           |       |
|-----------------|----------|--------|----------|-------|----------|------|-----------|-------|
|                 | s.s.*    | d.f.** | F        | p     | s.s.     | d.f. | F         | P     |
| Corrected Model | 1057.333 | 39     | 17.954   | 0.000 | 197.607  | 39   | 13.184    | 0.000 |
| $\theta$        | 2490.323 | 1      | 1649.183 | 0.577 | 5671.474 | 1    | 14757.768 | 0.119 |
| $d$             | 1.677    | 2      | .555     | 0.000 | 1.695    | 2    | 2.205     | 0.000 |
| $w$             | 459.641  | 2      | 152.195  | 0.006 | 88.795   | 2    | 115.527   | 0.046 |
| $n$             | 17.003   | 2      | 5.630    | 0.000 | 2.499    | 2    | 3.251     | 0.000 |
| $d * \theta$    | 336.107  | 3      | 74.194   | 0.671 | 118.103  | 3    | 102.438   | 0.667 |
| $n * \theta$    | 3.562    | 4      | .590     | 0.430 | .917     | 4    | .596      | 0.499 |
| $w * \theta$    | 9.117    | 6      | 1.006    | 0.907 | 2.080    | 6    | .902      | 0.267 |
| $d * n$         | 1.522    | 4      | .252     | 0.000 | 2.052    | 4    | 1.335     | 0.000 |
| $d * w$         | 141.622  | 6      | 15.631   | 0.194 | 103.905  | 6    | 45.062    | 0.335 |
| $w * n$         | 9.485    | 4      | 1.570    | 0.963 | 1.790    | 4    | 1.165     | 0.151 |
| Error           | 92.112   | 61     |          |       | 23.443   | 61   |           |       |
| Total           | 5243.000 | 101    |          |       | 9422.000 | 101  |           |       |
| Corrected Total | 1149.446 | 100    |          |       | 221.050  | 100  |           |       |

\* مجموع مربعات \*\* درجه آزادی

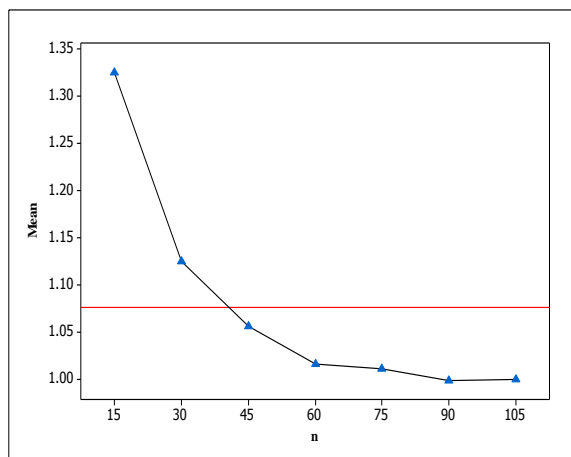


جدول ۷- نتایج تست‌های محاسباتی برای روش‌های ACS و EAS

| Index     | Avg. of CPU time (s) |        | EAS/ACS |      | RPD  | Index     | Avg. of CPU time (s) |        | EAS/ACS |      | RPD  |
|-----------|----------------------|--------|---------|------|------|-----------|----------------------|--------|---------|------|------|
|           | ACS                  | EAS    | Avg.    | Max  |      |           | ACS                  | EAS    | Avg.    | Max  |      |
| 1_1_1_15  | 20.40                | 20.68  | 1.11    | 1.32 | 0.44 | 2_2_1_15  | 18.67                | 19.89  | 1.64    | 3.97 | 0.23 |
| 1_1_1_30  | 45.17                | 45.71  | 1.08    | 1.18 | 0.58 | 2_2_1_30  | 41.72                | 44.22  | 1.24    | 2.02 | 0.46 |
| 1_1_1_45  | 75.20                | 75.06  | 1.04    | 1.15 | 0.49 | 2_2_1_45  | 69.00                | 73.72  | 1.08    | 1.72 | 0.45 |
| 1_1_1_60  | 111.14               | 110.95 | 1.02    | 1.14 | 0.41 | 2_2_1_60  | 103.61               | 109.32 | 0.96    | 1.32 | 0.57 |
| 1_1_1_75  | 152.91               | 152.41 | 1.04    | 1.16 | 0.43 | 2_2_1_75  | 142.55               | 149.76 | 1.05    | 1.33 | 0.65 |
| 1_1_1_90  | 199.97               | 199.00 | 1.01    | 1.09 | 0.43 | 2_2_1_90  | 186.64               | 195.45 | 0.98    | 1.47 | 0.36 |
| 1_1_1_105 | 252.94               | 251.31 | 1.01    | 1.09 | 0.55 | 2_2_1_105 | 236.06               | 248.78 | 1.01    | 1.54 | 0.28 |
| 1_1_2_15  | 20.36                | 20.60  | 1.09    | 1.21 | 0.60 | 2_2_2_15  | 18.62                | 19.85  | 1.64    | 3.32 | 0.28 |
| 1_1_2_30  | 45.41                | 45.75  | 1.06    | 1.10 | 0.45 | 2_2_2_30  | 41.55                | 44.37  | 1.31    | 1.88 | 0.44 |
| 1_1_2_45  | 75.23                | 75.16  | 1.02    | 1.06 | 0.74 | 2_2_2_45  | 69.02                | 73.67  | 1.13    | 1.78 | 0.39 |
| 1_1_2_60  | 111.70               | 111.79 | 1.02    | 1.08 | 0.56 | 2_2_2_60  | 103.57               | 109.89 | 1.05    | 1.56 | 0.40 |
| 1_1_2_75  | 152.99               | 153.03 | 1.03    | 1.14 | 0.36 | 2_2_2_75  | 142.67               | 150.46 | 1.10    | 1.45 | 0.57 |
| 1_1_2_90  | 199.64               | 199.58 | 1.01    | 1.10 | 0.56 | 2_2_2_90  | 186.92               | 195.62 | 0.97    | 1.17 | 0.49 |
| 1_1_2_105 | 253.31               | 251.34 | 1.02    | 1.07 | 0.55 | 2_2_2_105 | 237.09               | 248.45 | 1.03    | 1.47 | 0.39 |
| 1_1_3_15  | 20.35                | 20.65  | 1.12    | 1.32 | 0.44 | 2_2_3_15  | 18.68                | 19.93  | 1.56    | 2.46 | 0.45 |
| 1_1_3_30  | 45.35                | 45.69  | 1.09    | 1.20 | 0.55 | 2_2_3_30  | 41.57                | 44.13  | 1.63    | 3.78 | 0.31 |
| 1_1_3_45  | 75.06                | 75.00  | 1.03    | 1.16 | 0.55 | 2_2_3_45  | 68.93                | 73.70  | 0.94    | 1.78 | 0.48 |
| 1_1_3_60  | 110.86               | 111.31 | 1.05    | 1.14 | 0.45 | 2_2_3_60  | 103.58               | 109.24 | 1.10    | 1.60 | 0.53 |
| 1_1_3_75  | 152.97               | 153.37 | 1.06    | 1.11 | 0.70 | 2_2_3_75  | 142.30               | 150.22 | 1.17    | 1.81 | 0.30 |
| 1_1_3_90  | 199.96               | 199.82 | 1.04    | 1.10 | 0.63 | 2_2_3_90  | 186.36               | 195.30 | 1.13    | 2.37 | 0.34 |
| 1_1_3_105 | 253.38               | 251.80 | 1.01    | 1.09 | 0.50 | 2_2_3_105 | 237.65               | 249.73 | 1.04    | 1.66 | 0.30 |
| 1_2_1_15  | 19.67                | 19.84  | 1.37    | 2.47 | 0.38 | 2_3_1_15  | 19.19                | 20.39  | 1.25    | 1.86 | 0.32 |
| 1_2_1_30  | 43.92                | 43.90  | 0.93    | 1.36 | 0.54 | 2_3_1_30  | 42.75                | 45.22  | 1.02    | 1.28 | 0.51 |
| 1_2_1_45  | 72.71                | 72.38  | 1.10    | 1.57 | 0.59 | 2_3_1_45  | 70.75                | 75.30  | 1.07    | 1.35 | 0.46 |
| 1_2_1_60  | 108.07               | 107.59 | 1.11    | 1.94 | 0.29 | 2_3_1_60  | 106.10               | 111.81 | 1.01    | 1.11 | 0.53 |
| 1_2_1_75  | 150.19               | 148.94 | 0.89    | 1.48 | 0.37 | 2_3_1_75  | 145.39               | 153.00 | 1.02    | 1.10 | 0.49 |
| 1_2_1_90  | 198.88               | 197.93 | 0.81    | 1.33 | 0.32 | 2_3_1_90  | 189.97               | 200.04 | 1.07    | 1.22 | 0.61 |
| 1_2_1_105 | 251.73               | 248.11 | 0.84    | 1.06 | 0.47 | 2_3_1_105 | 242.01               | 254.80 | 1.10    | 1.22 | 0.62 |
| 1_2_2_15  | 20.31                | 20.40  | 1.37    | 2.95 | 0.38 | 2_3_2_15  | 19.21                | 20.43  | 1.15    | 1.48 | 0.35 |
| 1_2_2_30  | 44.97                | 44.80  | 1.27    | 2.49 | 0.34 | 2_3_2_30  | 42.82                | 45.46  | 1.04    | 1.29 | 0.50 |
| 1_2_2_45  | 74.14                | 73.85  | 1.13    | 1.51 | 0.60 | 2_3_2_45  | 70.94                | 75.83  | 1.10    | 1.20 | 0.53 |
| 1_2_2_60  | 109.87               | 109.08 | 0.99    | 1.46 | 0.47 | 2_3_2_60  | 105.93               | 111.89 | 1.00    | 1.09 | 0.56 |
| 1_2_2_75  | 150.82               | 150.36 | 0.95    | 1.17 | 0.41 | 2_3_2_75  | 145.93               | 153.44 | 1.05    | 1.16 | 0.61 |
| 1_2_2_90  | 197.53               | 194.93 | 0.86    | 1.07 | 0.43 | 2_3_2_90  | 190.15               | 199.42 | 1.03    | 1.20 | 0.52 |
| 1_2_2_105 | 250.72               | 247.56 | 0.88    | 1.08 | 0.60 | 2_3_2_105 | 242.86               | 254.57 | 1.02    | 1.10 | 0.68 |
| 1_2_3_15  | 20.31                | 20.39  | 1.97    | 3.04 | 0.48 | 2_3_3_15  | 19.31                | 20.41  | 1.34    | 2.10 | 0.36 |
| 1_2_3_30  | 44.96                | 44.62  | 1.20    | 1.90 | 0.52 | 2_3_3_30  | 42.79                | 45.46  | 1.05    | 1.32 | 0.56 |
| 1_2_3_45  | 74.30                | 73.43  | 0.87    | 1.47 | 0.35 | 2_3_3_45  | 71.08                | 75.29  | 1.11    | 1.38 | 0.56 |
| 1_2_3_60  | 109.46               | 108.96 | 0.85    | 1.22 | 0.57 | 2_3_3_60  | 107.07               | 111.98 | 1.05    | 1.32 | 0.41 |
| 1_2_3_75  | 150.90               | 150.03 | 0.90    | 1.24 | 0.53 | 2_3_3_75  | 146.40               | 153.12 | 1.09    | 1.20 | 0.55 |
| 1_2_3_90  | 197.43               | 194.81 | 0.87    | 1.28 | 0.42 | 2_3_3_90  | 191.39               | 199.48 | 0.97    | 1.11 | 0.60 |
| 1_2_3_105 | 249.95               | 246.95 | 0.86    | 1.25 | 0.47 | 2_3_3_105 | 243.83               | 255.39 | 1.04    | 1.10 | 0.55 |
| 1_3_1_15  | 20.67                | 20.84  | 1.36    | 2.04 | 0.47 | 3_1_1_15  | 20.79                | 21.19  | 1.16    | 1.30 | 0.60 |
| 1_3_1_30  | 45.83                | 46.08  | 1.13    | 1.50 | 0.35 | 3_1_1_30  | 45.22                | 45.63  | 1.07    | 1.15 | 0.59 |
| 1_3_1_45  | 75.90                | 75.40  | 1.11    | 1.34 | 0.52 | 3_1_1_45  | 74.91                | 75.07  | 1.05    | 1.31 | 0.35 |
| 1_3_1_60  | 111.96               | 111.98 | 0.99    | 1.20 | 0.39 | 3_1_1_60  | 112.66               | 112.81 | 1.08    | 1.21 | 0.48 |
| 1_3_1_75  | 154.15               | 153.85 | 1.02    | 1.22 | 0.47 | 3_1_1_75  | 153.67               | 154.16 | 1.04    | 1.14 | 0.55 |
| 1_3_1_90  | 201.75               | 200.65 | 1.05    | 1.14 | 0.56 | 3_1_1_90  | 200.84               | 200.94 | 1.03    | 1.08 | 0.62 |
| 1_3_1_105 | 258.80               | 259.46 | 1.05    | 1.18 | 0.52 | 3_1_1_105 | 254.86               | 253.66 | 1.02    | 1.11 | 0.57 |
| 1_3_2_15  | 20.85                | 21.08  | 1.17    | 1.28 | 0.36 | 3_1_2_15  | 20.48                | 20.79  | 1.07    | 1.14 | 0.49 |
| 1_3_2_30  | 45.96                | 46.00  | 1.09    | 1.63 | 0.31 | 3_1_2_30  | 45.34                | 45.73  | 1.05    | 1.12 | 0.50 |
| 1_3_2_45  | 76.18                | 75.60  | 1.05    | 1.18 | 0.49 | 3_1_2_45  | 75.11                | 75.36  | 1.04    | 1.12 | 0.49 |
| 1_3_2_60  | 112.51               | 112.27 | 1.05    | 1.20 | 0.41 | 3_1_2_60  | 111.86               | 111.97 | 1.04    | 1.10 | 0.48 |
| 1_3_2_75  | 155.22               | 154.97 | 1.02    | 1.15 | 0.34 | 3_1_2_75  | 153.25               | 152.72 | 1.02    | 1.09 | 0.47 |

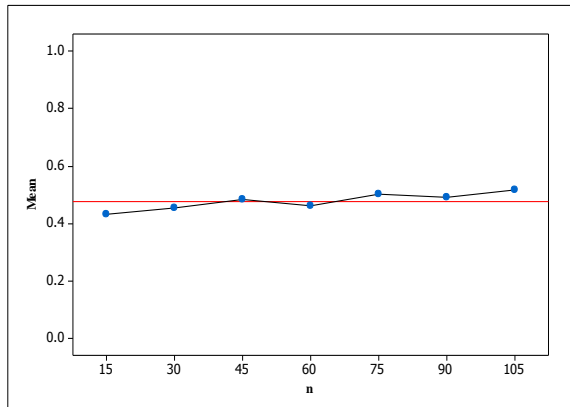
ادامه جدول ۷- نتایج تست‌های محاسباتی برای روش‌های ACS و EAS

| Index     | Avg. of CPU time (s) |        | EAS/ACS |      | RPD  | Index     | Avg. of CPU time (s) |        | EAS/ACS |      | RPD  |
|-----------|----------------------|--------|---------|------|------|-----------|----------------------|--------|---------|------|------|
|           | ACS                  | EAS    | Avg.    | Max  |      |           | ACS                  | EAS    | Avg.    | Max  |      |
| 1_3_2_90  | 199.88               | 200.01 | 1.10    | 1.24 | 0.38 | 3_1_2_90  | 201.61               | 200.37 | 1.02    | 1.09 | 0.55 |
| 1_3_2_105 | 253.73               | 253.50 | 1.02    | 1.13 | 0.53 | 3_1_2_105 | 255.40               | 254.99 | 1.03    | 1.09 | 0.54 |
| 1_3_3_15  | 20.72                | 20.92  | 1.36    | 1.99 | 0.38 | 3_1_3_15  | 20.51                | 20.78  | 1.10    | 1.37 | 0.43 |
| 1_3_3_30  | 45.78                | 46.04  | 1.14    | 1.37 | 0.46 | 3_1_3_30  | 45.44                | 45.76  | 1.05    | 1.28 | 0.45 |
| 1_3_3_45  | 75.80                | 75.41  | 1.13    | 1.49 | 0.34 | 3_1_3_45  | 75.18                | 75.28  | 1.03    | 1.13 | 0.46 |
| 1_3_3_60  | 112.58               | 112.41 | 1.05    | 1.22 | 0.47 | 3_1_3_60  | 112.12               | 111.77 | 1.03    | 1.14 | 0.47 |
| 1_3_3_75  | 154.72               | 154.68 | 1.04    | 1.22 | 0.51 | 3_1_3_75  | 153.96               | 152.62 | 1.03    | 1.10 | 0.51 |
| 1_3_3_90  | 203.43               | 203.09 | 1.03    | 1.20 | 0.46 | 3_1_3_90  | 201.90               | 201.58 | 1.03    | 1.13 | 0.49 |
| 1_3_3_105 | 257.82               | 256.39 | 1.02    | 1.10 | 0.55 | 3_1_3_105 | 256.47               | 256.47 | 1.04    | 1.16 | 0.43 |
| 2_1_1_15  | 19.66                | 21.30  | 1.11    | 1.30 | 0.43 | 3_2_1_15  | 19.82                | 19.95  | 1.14    | 1.37 | 0.57 |
| 2_1_1_30  | 43.70                | 46.18  | 1.07    | 1.24 | 0.36 | 3_2_1_30  | 44.19                | 44.10  | 1.18    | 2.27 | 0.31 |
| 2_1_1_45  | 71.77                | 76.59  | 1.03    | 1.19 | 0.51 | 3_2_1_45  | 73.00                | 72.73  | 1.24    | 1.87 | 0.39 |
| 2_1_1_60  | 107.21               | 113.78 | 1.02    | 1.12 | 0.40 | 3_2_1_60  | 109.17               | 108.04 | 0.93    | 1.46 | 0.43 |
| 2_1_1_75  | 147.26               | 155.38 | 1.04    | 1.15 | 0.46 | 3_2_1_75  | 150.13               | 148.21 | 0.96    | 1.61 | 0.31 |
| 2_1_1_90  | 191.95               | 201.90 | 1.03    | 1.10 | 0.58 | 3_2_1_90  | 197.32               | 196.21 | 0.89    | 1.15 | 0.48 |
| 2_1_1_105 | 243.16               | 258.89 | 1.03    | 1.08 | 0.53 | 3_2_1_105 | 250.50               | 249.13 | 0.94    | 1.19 | 0.39 |
| 2_1_2_15  | 19.56                | 20.75  | 1.10    | 1.19 | 0.59 | 3_2_2_15  | 19.84                | 19.95  | 1.94    | 4.23 | 0.34 |
| 2_1_2_30  | 43.45                | 45.87  | 1.04    | 1.09 | 0.45 | 3_2_2_30  | 44.06                | 43.98  | 1.01    | 2.37 | 0.38 |
| 2_1_2_45  | 71.87                | 76.56  | 1.04    | 1.10 | 0.49 | 3_2_2_45  | 72.87                | 72.54  | 0.86    | 1.16 | 0.41 |
| 2_1_2_60  | 107.44               | 113.95 | 1.04    | 1.09 | 0.51 | 3_2_2_60  | 109.55               | 108.77 | 0.99    | 1.26 | 0.48 |
| 2_1_2_75  | 146.67               | 155.21 | 1.02    | 1.06 | 0.65 | 3_2_2_75  | 150.13               | 149.22 | 0.83    | 1.02 | 0.51 |
| 2_1_2_90  | 190.58               | 202.62 | 1.02    | 1.08 | 0.48 | 3_2_2_90  | 196.99               | 195.99 | 0.93    | 1.25 | 0.44 |
| 2_1_2_105 | 241.25               | 256.65 | 1.02    | 1.06 | 0.52 | 3_2_2_105 | 249.28               | 247.90 | 0.94    | 1.09 | 0.57 |
| 2_1_3_15  | 19.55                | 20.76  | 1.10    | 1.40 | 0.40 | 3_2_3_15  | 19.80                | 19.96  | 1.46    | 2.18 | 0.47 |
| 2_1_3_30  | 43.59                | 45.94  | 1.10    | 1.24 | 0.43 | 3_2_3_30  | 44.07                | 44.04  | 1.37    | 3.30 | 0.33 |
| 2_1_3_45  | 71.77                | 76.78  | 1.06    | 1.15 | 0.61 | 3_2_3_45  | 72.85                | 72.63  | 1.16    | 2.32 | 0.39 |
| 2_1_3_60  | 107.33               | 116.39 | 1.04    | 1.14 | 0.39 | 3_2_3_60  | 109.35               | 108.45 | 0.89    | 1.32 | 0.44 |
| 2_1_3_75  | 147.02               | 156.93 | 0.99    | 1.07 | 0.58 | 3_2_3_75  | 149.93               | 149.02 | 0.81    | 1.23 | 0.43 |
| 2_1_3_90  | 191.76               | 202.09 | 1.05    | 1.11 | 0.57 | 3_2_3_90  | 197.20               | 196.03 | 0.97    | 1.14 | 0.51 |
| 2_1_3_105 | 242.88               | 256.19 | 0.97    | 1.04 | 0.66 | 3_2_3_105 | 249.69               | 248.18 | 0.88    | 1.12 | 0.54 |



شکل ۴- نمایش نسبت  $\frac{EAS}{ACS}$  برای اندازه‌های مختلف  $n$

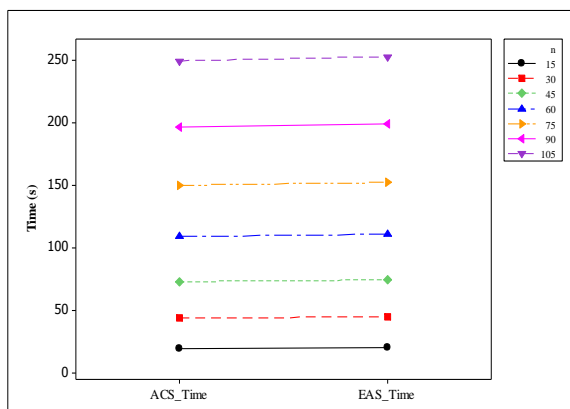
در این بخش، از نسبت  $\frac{EAS}{ACS}$  برای مقایسهٔ کیفیت جواب‌های به‌دست‌آمده توسط هر روش استفاده می‌شود. برای درک بهتری از عملکرد روش‌های ACS و EAS برای ابعاد متوسط و بزرگ شکل ۴ که نسبت  $\frac{EAS}{ACS}$  را برای اندازه‌های مختلف  $n$  را نشان می‌دهد ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش  $n$ ، نسبت  $\frac{EAS}{ACS}$  کاهش می‌یابد که بیانگر عملکرد بسیار خوب ACS در ابعاد متوسط نسبت به EAS و عملکرد مشابه هر دو الگوریتم در ابعاد بزرگ است.



شکل ۵- متوسط RDP برای اندازه‌های مختلف n

### ۲-۷- مقایسه زمان اجرای ACS و EAS

شکل ۶ متوسط زمان اجرای هر روش را برای هر دو الگوریتم را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود می‌توان گفت رفتار هر دو روش در معیار زمان مشابه یکدیگر بوده است.



شکل ۶- متوسط زمان حل روش‌های ACS و EAS

### ۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مسئله تصمیم‌گیری هم‌زمان (یکپارچه) زمان‌بندی تولید و ارسال دسته‌ای با هدف کمینه‌سازی مجموع وزنی تأخیر کارها و هزینه ارسال مورد بررسی قرار گرفت و پس از معرفی، برای ابعاد کوچک مدل ریاضی مسئله (MIP) و یک روش ACS برای مسئله گفته شده ارائه شد. به منظور بررسی کارایی این دو روش، تست‌های محاسباتی با رویکرد طراحی آزمایش‌ها به صورت کامل انجام شده و

### ۱-۷- شاخص پراکنندگی

در این مقاله، برای ارزیابی پراکنندگی جواب‌های تولیدشده الگوریتم‌های فراابتکاری از معیار درصد انحراف نسبی<sup>۲۸</sup> (RDP) استفاده شده است. این شاخص را زنده و همکاران معرفی کرده‌اند؛ نحوه محاسبه شاخص RDP در رابطه (۱۷) مشاهده می‌شود.

$$RDP = \frac{Alg_{sol} - Min_{group}}{Max_{group} - Min_{group}} \times 100 \quad (17)$$

در این رابطه،  $Alg_{sol} = \frac{EAS}{ACS}$  نشان‌دهنده نسبت جواب به دست‌آمده توسط الگوریتم‌های توسعه داده شده است و  $Min_{group}$  و  $Max_{group}$  به ترتیب، کوچک‌ترین و بزرگ‌ترین مقدار نسبت  $Alg_{sol} = \frac{EAS}{ACS}$  از اجرای الگوریتم‌ها در هر ۱۰ مسئله تولیدی در هر گروه، در نظر گرفته شده است. مقدار RDP نشان می‌دهد که جواب‌ها در هر الگوریتم تا چه اندازه از حداقل نسبت به دست‌آمده (حداقل نسبت بیانگر حداقل برتری الگوریتم تحت مطالعه نسبت به الگوریتم معیار است) در ۱۰ مسئله تولیدشده فاصله دارند. هر چه این فاصله بیشتر باشد به این معنی است که الگوریتم‌ها جواب‌های پرت‌تری تولید می‌کنند و متقابلاً هر چه این فاصله کمتر باشد، نشان می‌دهد که الگوریتم‌ها جواب‌های بهتری تولید می‌کنند و در نتیجه الگوریتم‌های مناسب‌تری هستند. شکل ۵ تغییرات متوسط RDP را برای اندازه‌های مختلف مسائل تولیدشده نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود میانگین کل این معیار برای همه مسائل کمتر از ۰/۵ است و تغییرات مقدار RDP برای n‌های مختلف نشان‌دهنده یک ثبات و پایداری مناسب در میانگین نسبت به دست‌آمده متناظر هر n در شکل ۵ است.

راستی برزکی، مرتضی؛ حجازی، سیدرضا و مهدوی مزده، محمد. (۱۳۹۲). «یک FPTAS برای کمیته‌کردن مجموع وزنی تعداد کارهای تأخیری با در نظر گرفتن مجموع هزینه‌های تخصیص موعد تحویل گروهی، تخصیص منابع و برنامه‌ریزی توزیع در زنجیره تأمین»، نشریه بین‌المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، در دست چاپ.

راستی برزکی، مرتضی. (۱۳۹۱). «مدل یکپارچه تخصیص موعد تحویل، تخصیص منابع و زمان‌بندی تولید و توزیع در زنجیره تأمین»، رساله دکتری، دانشگاه صنعتی اصفهان.

رضایی، سید رضا؛ حجازی، سیدرضا و راستی برزکی، مرتضی. (۱۳۹۲). «کمیته‌کردن مجموع وزنی تأخیر کارها و هزینه ارسال مدل زمان‌بندی یکپارچه تولید و توزیع در زنجیره تأمین»، نشریه بین‌المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، در دست بررسی.

راستی برزکی، مرتضی و حجازی، سیدرضا. (۱۳۹۲). «کمیته‌کردن مجموع وزنی تعداد کارهای تأخیری با در نظر گرفتن مجموع هزینه‌های تخصیص موعد تحویل گروهی و هزینه‌های ارسال»، نشریه بین‌المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، در دست چاپ.

فخرزاد، محمداقبر و عظیم‌زاده، مهدی. (۱۳۹۱). «الگوریتم ژنتیک برای مسئله زمان‌بندی تک‌ماشین با جرایم زودکرد خطی، دیرکرد توان دوم و با در نظر گرفتن زمان بیکاری و شکست کار»، مدیریت تولید و عملیات، ۳(۱)، ۶۹-۹۲.

قجاوند، حمزه؛ زندیه، مصطفی؛ دری، بهروز (۱۳۹۰) به‌کارگیری الگوریتم‌های فراابتکاری در مدل یکپارچه‌سازی شبکه لجستیک توزیع کالا، چشم‌انداز مدیریت صنعتی، ۳، ۹۹-۱۱۹.

تحلیل نتایج با به‌کارگیری تکنیک آنالیز واریانس صورت گرفته است. همچنین وضعیت عملکرد روش ACS برای گروه‌های مختلف و پارامترهای مسئله تجزیه و تحلیل شده است. نتایج تست محاسباتی براساس تعداد جواب‌های بهینه، درصد خطای روش ابتکاری و متوسط زمان حل، کارایی روش ACS را نشان می‌دهد. اما به‌منظور بررسی عملکرد روش ACS در ابعاد متوسط و بزرگ، یک EAS ارائه شد و عملکرد روش ACS برای شاخص‌های کیفیت، پراکندگی و زمان مطالعه شد که نتایج تست‌های محاسباتی، کارایی روش ACS را نشان می‌دهد. همچنین می‌توان به‌منظور انجام پژوهش‌های آتی به تغییر تابع هدف زمان‌بندی همچون ترکیب آن با مجموع وزنی زودکردها اشاره کرد. ارسال به‌صورت مسیریابی<sup>۲۹</sup> به جای ارسال مستقیم (که در آن می‌توان سفارشات چند مشتری را با یکدیگر و به‌طور هم‌زمان به‌وسیله یک وسیله ارسال کرد) نیز از جمله فعالیت‌های آتی گسترش این پژوهش است.

## ۹- تشکر و قدردانی

در پایان وظیفه خود می‌دانم که از آقای علی بهشتی برای هم‌فکری‌ها و راهنمایی‌هایی که در تدوین این مقاله داشته‌اند، صمیمانه تشکر و قدردانی کنم.

## References

- مظاهری، علی؛ کرباسیان، مهدی؛ سجادی، سید مجتبی؛ شیرویه زاد، هادی و همکاران (۱۳۹۳). «ارائه مدلی جهت بهینه‌سازی زنجیره تأمین یکپارچه با استفاده از روش برنامه‌ریزی تصادفی چندهدفه»، نشریه بین‌المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، ۲(۲۵).

- Andreas C. Nearchou. (2012). "A Hybrid Metaheuristic For The Single-Machine Total Weighted Tardiness Problem". *Cybernetics and Systems*, 43(8), 651-668.
- Bauer, A., Bullnheimer, B., Hartl, R. F., and Strauss, C. (1999). "An Ant Colony Optimization Approach for the Single Machine Total Tardiness Problem". In Proceedings of CEC'99, P. J. Angeline, Z. Michalewicz, M.Schoenauer, X. Yao, and A. Zalzalán (eds.), 1445-1450.
- Bilge, U., Kurtulan, M., and Kirac, F. (2007). "A Tabu Search Algorithm for the Single Machine Total Weighted Tardiness Problem". *European Journal of Operational Research*, 176, 1423-35.
- Bilgen, B., I. Ozkarahan. (2004). "Strategic tactical and operational production-distribution models: A review", *Internat. J. Tech. Management*, 28, 151-171.
- Brucker P., Kampmeyer T. (2008). "A general model for cyclic machine scheduling problems". *Discrete Applied Mathematics*, 156, 2561-2572.
- C. Liao, and H. Juan. (2007). "An ant colony optimization for single machine tardiness scheduling with sequence-dependent setups". *Computers & Operations Research*, 34, 1899-1909.
- Chen Z-L. (2010). "Integrated Production And Outbound Distribution Scheduling: Review and Extensions". *Operations Research*, 58, 130-148.
- Chen Z-L., Vairaktarakis L.G. (2005). "Integrated Scheduling of Production and Distribution Operations". *Management Science*, 51, 614-628.
- Chen, Z.-L. (2004). " Integrated production and distribution operations: Taxonomy, models, and review". D. Simchi-Levi, S. D. Wu, Z.-J. Shen, eds. *Handbook of Quantitative Supply Chain Analysis: Modeling in the E-Business Era*. Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA.
- Cheng, T. C. E., H. G. Kahlbacher. (1993). "Scheduling with delivery and earliness penalties". *Asia-Pacific Journal of Operation Research*, 10, 145-152.
- Cheng, T.C.E., (2004). "Single machine scheduling to minimize total weighted tardiness". *European Journal of Operational Research*, 165, 423-443.
- Crauwels, H. A. J., Potts, C. N. and Van Wassenhove, L. N. (1998). "Local Search Heuristics for the Single Machine Total Weighted Tardiness Scheduling Problem". *INFORMS Journal on Computing*, 10, 341-350.
- Dorigo M, Stützle T. (2002). " The ant colony optimization metaheuristics: algorithms, applications, and advances". In: Glover F, Kochenberger G, editors. *Handbook of metaheuristics*, vol. 57. International Series in Operations Research & Management Science. Dordrecht: Kluwer; 251-85.
- Ellabib, I., Calamai, P. and Basir, O. (2007): "Exchange strategies for multiple ant colony system". *Information Sciences. an International Journal*, 177, 1248-1264.
- Emmons, H. (1969). "One-machine sequencing to minimize certain functions of job tardiness". *Operations Research*, 17, 701-715.
- Erenguc, S.S., N.C. Simpson, A. J. Vakharia. (1999). "Integrated production/distribution planning in supply chains: An invited review". *European Journal of Operational Research*, 115, 219-236 .
- French, S. (1990). "Sequencing and Scheduling, an Introduction to the Mathematics of the Job-Shop". New York: EllisHorwood, John-Wiley&Sons.
- Goetschalckx, M., C. J. Vidal, K. Dogan. (2002). "Modeling and design of global logistics systems: A review of integrated strategic and tactical models and design algorithms". *European Journal of Operational Research*, 143, 1-18 .
- Hall N.G., Potts C.N. (2003). "Supply Chain Scheduling: Batching And Delivery". *Operations Research*, 51 4, 566-584.
- Hall, N. G., C. N. Potts. (2005). "The coordination of scheduling and batch deliveries". *Annual Operations of Research*, 135, 41-64.
- Hochbaum, D.S., Landy, D. (1994). "Scheduling with batching: minimizing the

- weighted number of tardy jobs". *Operations Research Letters*, 16, 79-86.
- Kellegoz, T., Toklu, B., and Wilson, J. (2008). "Comparing Efficiencies of Genetic Crossover Operators for One Machine Total Weighted Tardiness Problem". *Applied Mathematics and Computation*, 199, 590-598.
- Lawer, E. L. (1977). "A 'Pseudopolynomial' Algorithm for Sequencing Jobs to Minimize Total Tardiness". *Annals of Discrete Mathematics*, 1, 331-342.
- Lenstra, J. K., Rinnoy Kan, A. H. G., and Brucker, P. (1977). "Complexity of Machine Scheduling Problems". *Annals of Discrete Mathematics*, 1, 343-362.
- Lin, B.M.T., Cheng, T.C.E. (2005). "Two-machine flowshop batching and scheduling". *Annals of Operations Research*, 133, 149-161.
- Lockamy, A., McCormack, K. (2004). "Linking SCOR planning practices to supply chain performance". *International Journal of Operations and Production Management*, 24, 1192-1218.
- M. Dorigo, and L. M. Gambardella. (1997). "Ant Colony System: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem". *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1, 53-66.
- Matsuo, H., Suh, C. J., and Sullivan, R. S. (1989). "A Controlled Search Simulated Annealing Method for the Single Machine Weighted Tardiness Problem". *Annals of Operations Research*, 21, 85-108.
- Potts, C. N. and Van Wassenhove, L. N. (1991). "Single Machine Tardiness Sequencing Heuristics". *IEE Transactions*, 23, 346-354.
- Potts, C. N. (1980). "Analysis of a heuristic for one machine sequencing with release dates and delivery times". *Operations Research*, 28, 1436-1441 .
- Potts, C. N., Kanet, J. J., Birkemeier, C. (2013). "Weighted tardiness for the single machine scheduling problem: An examination of precedence theorem productivity". *Computers & Operations Research*, 40, 91-97.
- Pundoor, G., Z.-L. Chen. (2005). "Scheduling a production-distribution system to optimize the trade off between delivery tardiness and total distribution cost". *Naval Research Logistics*, 52, 571-589 .
- Rasti-Barzoki, M., Hejazi, S.R., Mazdeh, M.M. (2013). "Minimizing the weighted number of tardy jobs with due date assignment and capacity constrained deliveries for multiple customers in supply chains". *European Journal of Operational Research*, 228, 345-357.
- Sarmiento, A. M., R. Nagi. (1991). "A review of integrated analysis of production-distribution systems". *IIE Trans*, 31, 1061-1074 .
- Scharge, L., and K. R. Baker. (1978). "Dynamic Programming Solution of Sequencing Problems With Precedence Constraints". *Operational Research*, 26, 444-449.
- Slotnick, S. A., & Sobel, M. J. (2005). "Manufacturing lead-time rules: Customer retention versus tardiness costs". *European Journal of Operational Research*, 169, 825-856.
- Steiner G, Zhang R. (2009). "Approximation algorithms for minimizing the total weighted number of late jobs with late deliveries in two-level supply chains". *Journal of Scheduling*, 12, 565-574.
- Tasgetiren, M. F., Liang, Y.-C., Sevkli, M., and Gencyilmaz, G. (2006). "Particle Swarm Optimization and Differential Evolution for the Single Machine Total Weighted Tardiness Problem". *International Journal of Production Research*, 22, 4737-4754.
- Thomas, D. J., & Griffin, P. M. (1996). "Coordinated supply chain management". *European Journal of Operational Research*, 94, 1-15.
- Wang, X. and Tang, L. (2009). "A Population-Based Variable Neighborhood Search for the Single Machine Total Weighted Tardiness Problem". *Computers & Operations Research*, 36, 2105-2110.

- 
- 1- Supply Chain Management
  - 2- Sarmiento and Nagi
  - 3- Erenguc et al.
  - 4- Goetschalckx et al.
  - 5- Bilgen and Ozkarahan
  - 6- Hall and Potts
  - 7- Chen
  - 8- Rasti Barzoki et al.
  - 9- Lockamy et al.
  - 10- Single Machine Total Weighted Tardiness Problem
  - 11- Simulated Annealing
  - 12- Genetic Algorithm
  - 13- Tabu Search
  - 14- Ant Colony Optimization
  - 15- Particle Swarm Optimization
  - 16- Variable Neighborhood Search
  - 17- Batch Delivery
  - 18- Dynamic Programming
  - 19- MIP
  - 20- ACS
  - 21- Strongly
  - 22- ACS
  - 23- Ant Colony System
  - 24- Max-Min Ant System
  - 25- Initialization
  - 26- Tour Construction
  - 27- Elitist Ant System
  - 28- Relative Deviation Percentage
  - 29- Routing