

# ارایه یک مدل ابتکاری مبتنی بر سیستم اجتماع مورچه‌ها برای حل مسئله زمان‌بندی حرکت قطار

کیوان قصیری، استادیار، دانشکده راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
فهیمه مرشدسلوک، کارشناس، دانشکده راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
E-mail:ghoseiri@iust.ac.ir.

## چکیده

در این مقاله با توسعه الگوریتم فوق ابتکاری<sup>۱</sup> سیستم اجتماع مورچه‌ها (ACS) الگوریتمی برای زمان‌بندی حرکت قطار معرفی شده است. ابتدا نوعی از مسئله زمان‌بندی حرکت قطار در قالب یک برنامه ریزی ریاضی مدلسازی و سپس الگوریتمی مبتنی بر ACS برای حل آن پیشنهاد شده است. با این فرض که هر قطار در مسئله زمان‌بندی حرکت قطار معادل یک شهر در مسئله فروشنده دوره گرد (TSP) باشد، ACS بر روی گراف مسئله TSP، توالی حرکت قطارها را مشخص می‌کند. بر اساس این توالی و رفع تلاقی در برخورد قطارها، زمان‌بندی حرکت مشخص خواهد شد. مثالهای عددی در ابعاد کوچک و متوسط برای بررسی صحت و کیفیت جوابها توسط الگوریتم حل شده و نتایج حاصله با حل دقیق بهینه آنها مقایسه شده اند. از مقایسه نتایج حل دقیق مسائل و حل آنها توسط الگوریتم پیشنهادی صرفه‌جویی‌های زمانی و پاسخی با کیفیت خوب به دست آمده است. در انتها برای توصیف نحوه محاسبات نیز یک مطالعه موردی ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم فوق ابتکاری، بهینه‌سازی اجتماع مورچه‌ها، سیستم اجتماع مورچه‌ها، مسئله زمان‌بندی حرکت قطار، مسئله فروشنده دوره گرد

## ۱. مقدمه

بین یک مبدأ و مقصد معین سفر را مشخص می‌کنند. برنامه‌ریزی خط شامل تصمیم‌گیری در مورد مسیرها و خطوط است. این برنامه‌ریزی تعیین می‌کند که کدام خطوط و مسیرها و با چه تواتری باید مورد بهره برداری قرار گیرند. در مرحله زمان‌بندی حرکت قطارها زمان‌های ورود و خروج تمامی قطارها از خطوط معین می‌شوند. تعیین جدول زمانی به تفکیک زمانهای ورود و خروج مبدأ، مقصد و ایستگاه‌های میانی، محصول این مرحله است. در مرحله بعد واگن‌ها و لوکوموتیوهای که به خطوط تخصیص داده شده‌اند برای تشکیل قطار به هم متصل می‌شوند. این مرحله برنامه‌ریزی آلات نقلیه نامیده می‌شود. فعالیت بعدی

برنامه‌ریزی حمل و نقل ریلی فرآیند بسیار پیچیده‌ای است که بر پایه مدیریت واکنش متقابل میان تعداد زیادی از اجزاء متأثر از هم صورت می‌پذیرد. با توجه به پیچیدگی برنامه‌ریزی حمل و نقل ریلی، این فرآیند به چند مرحله تقسیم می‌شود. این مراحل شامل تجزیه و تحلیل تقاضا، برنامه‌ریزی استفاده از خط، زمان‌بندی حرکت قطار، برنامه‌ریزی مربوط به استفاده از آلات نقلیه و مدیریت خدمه است. در زیر شرحی مختصر بر این فرآیند برنامه‌ریزی سلسله مراتبی آورده شده است:

در مرحله اول، مقدار و نوع تقاضای مشتری بررسی و مشخص می‌شود. نتایج به دست آمده از این مرحله مقدار تقاضای مسافر

افزایش سریع‌تری می‌یابد که سرانجام باعث می‌شود اکثر مورچه‌ها این مسیر را انتخاب کنند.

## ۲. مرور ادبیات

مسئله زمان‌بندی حرکت قطار یکی از مسائل مشکل در برنامه ریزی حمل و نقل ریلی است. این برنامه‌ریزی برای بیش از یک قرن به صورت دستی و با روش سعی و خطا انجام شده است. در این روش زمانهای ورود و خروج قطارها از ایستگاهها بر اساس تجربه و اطلاعات فرد معین می‌شوند. کیفیت و زمان ساخت جواب در این روش در ارتباط نزدیک با تجربه و نظریات شخص است (برای مطالعه بیشتر به چیانگ و همکارانش [4] مراجعه شود). با پیشرفت علوم و فناوریهای محاسباتی این روش دیگر مقرون به صرفه نبوده و روشهای جدید برای آن به وجود آمده‌اند.

این روش‌های زمان‌بندی حرکت قطار را می‌توان به صورت برنامه‌ریزی ریاضی، شبیه‌سازی، سیستمهای خبره، و روش‌های ابتکاری و فوق‌ابتکاری و ترکیبی دسته‌بندی کرد. مثال‌هایی از روش‌های ریاضی عبارتند از: فرانک [5]، آمیت و گلدفارب [6]، اسزیگل [7]، پترسون [8]، چن و هارکر [9]، کیتن [10]، کری و هارکر [11]، لیندر [2]، برودال و جاکوب [12] و قصیری و همکارانش [1]. چندین تحقیق در زمینه شبیه‌سازی در شبکه‌های راه‌آهن وجود دارند: بیت و همکارانش [13]، جوانویک و هارکر [14]، دسوکی و لچمن [15]، چنگ [16]، هگینز و کوزان (1997) [17]. زمان‌بندی حرکت قطار یک مسئله بهینه‌سازی ترکیبی است. در این مسئله هدف تعیین زمان ورود و خروج قطارها از ایستگاههایی است که قطاراز آنها عبور می‌کند. این مسئله از نوع  $NP^E$  بوده (با افزایش بُعد مسئله زمان حل به شکل نمایی افزایش می‌یابد) و به دلیل بُعد و پیچیدگی طبیعی در مدل ریاضی این مسائل تکنیک‌های بهینه‌سازی سنتی در حل این مسائل کارآمد نبوده و روشهای دقیق فقط در مثال‌هایی با اندازه‌های کوچک قابل استفاده هستند و برای حل مسائلی با بعد واقعی بهتر است از روشهای ابتکاری استفاده شود (1998) [18].

از جمله کاربردهای الگوریتم‌های ابتکاری در برنامه‌ریزی راه‌آهن را می‌توان در کای و گو [19]، کری و لاکوود [20]، و هگینز و همکارانش (1997) [18] ملاحظه کرد. مثالهایی از کاربرد سیستمهای خبره در راه‌آهن عبارتند از؛ تحقیقات کاری و همکارانش [21]، آریا و آبه [22]، آیدا [23] کومایا و فاکودا [24].

مدیریت خدمه است که توزیع و تخصیص خدمه قطارها را مشخص می‌کند و باید به صورتی انجام شود که خدمه مورد نیاز هر قطار را تأمین کند. مدیریت خدمه شامل دو بخش برنامه‌ریزی خدمه و تهیه صورت کار خدمه است. برنامه‌ریزی خدمه منجر به تخصیص مأمورین به قطارها می‌شود و صورت کار خدمه شرح وظایف آنها را معلوم می‌کند. تمام این مراحل در ارتباط نزدیک به یکدیگر هستند. محاسبه جواب بهینه در یک مرحله ممکن است فضای پاسخ‌های موجه در مراحل بعدی را محدود کند (برای مطالعه بیشتر به قصیری و همکارانش [1] و لیندر [۲] مراجعه شود).

گونه‌های مختلفی از مورچه‌های خاص این توانایی را دارند که فرمون (ماده شیمیایی که مورچه‌ها وجود آن را احساس می‌کنند) را در مسیر حرکتشان پخش کنند. با احساس کردن این رد مورچه‌های دیگر اجتماع می‌توانند برای یافتن غذا، مسیری را که توسط مورچه‌های دیگر کشف شده است دنبال کنند. اغلب این مورچه‌ها می‌توانند برای یافتن کوتاه‌ترین مسیر به سوی غذا، رد فرمون را دنبال کنند. همان گونه که در دوریگو و دی کارو [3] نیز ذکر شده است الگوریتم‌های مورچه بر اساس این خصوصیت از نتایج آزمایش‌هایی الهام گرفته شدند.

در این آزمایشها یک اجتماع آزمایشگاهی از مورچه‌ها در یک محوطه بسته قرار داده شدند که در آن محوطه لانه به وسیله یک راه دو شاخه (به طولهای متفاوت) به منبع غذایی متصل می‌شد. بعد از چندین بار آزمایش مشاهده شد که پس از گذشت یک دوره زودگذر چند دقیقه‌ای همه مورچه‌ها برای رسیدن به غذا مسیر کوتاه‌تر را انتخاب می‌کنند. همچنین در این آزمایش مشاهده شد که احتمال انتخاب مسیر کوتاه‌تر با افزایش اختلاف طول دو شاخه افزایش می‌یابد. دلیل این رفتار در مورچه‌ها به صورت زیر توضیح داده شده است: در شروع آزمایش در هیچ کدام از شاخه‌ها فرمون وجود ندارد، از این رو مورچه‌ها با احتمال مساوی یکی از دو راه را انتخاب می‌کنند. بنابراین می‌توان انتظار داشت که در ابتدای آزمایش به طور میانگین نیمی از مورچه‌ها شاخه بلندتر و نیمی دیگر شاخه کوتاه‌تر را انتخاب کنند. به دلیل کوتاهی یکی از مسیرها مورچه‌هایی که مسیر کوتاه‌تر را انتخاب کرده‌اند زودتر به منبع غذایی می‌رسند و به لانه برمی‌گردند. زمانی که این مورچه‌ها برای رسیدن دوباره به منبع غذایی می‌خواهند یکی از دو راه را انتخاب کنند وجود فرمون در شاخه کوتاه‌تر، مورچه‌ها را به انتخاب این شاخه راغب می‌کند. بنابراین مقدار فرمون در این مسیر

توجه به کیفیت خوب عملکرد الگوریتم ACS در حل مسئله TSP و همچنین قابلیت تبدیل مسئله زمان‌بندی حرکت قطار به TSP تصمیم به حل مسئله زمان‌بندی حرکت قطار با این الگوریتم گرفته شده است.

بهبودسازی اجتماع مورچه‌ها یک الگوریتم فوق‌ابتکاری جدید برای حل مسائل بهبودسازی ترکیبی است. الگوریتم‌های ACS بر پایه رفتار مورچه‌ها بنا نهاده شده‌اند. در ACS اجتماعی از عوامل ساده (مورچه‌های مصنوعی) از طریق فرمون مصنوعی (اطلاعات توزیع شده عددی) با یکدیگر ارتباط برقرار می‌کنند و با همکاری یکدیگر یک جواب برای مسئله می‌سازند. اولین الگوریتم از این دسته از الگوریتم‌ها، الگوریتم AS<sup>11</sup> است که در سال ۱۹۹۱ توسط دوریگو و همکارانش [40] برای حل مسئله فروشنده دوره گرد مورد استفاده قرار گرفت. با وجود نتایج امیدوارکننده، نتایج این الگوریتم قابل مقایسه با الگوریتم‌های پیشرفته دیگری نبود که پیش از آن برای حل این مسئله به کار گرفته شده بودند. با وجود این، این الگوریتم اصول مهمی را در ایجاد الگوریتم‌های پیشرفته‌تر ACS بنیان نهاد. در حال حاضر الگوریتم‌های بسیاری بر اساس بهبود الگوریتم فوق پیشنهاد شده‌اند و برای حل مسائل ترکیبی گوناگونی مانند فروشنده دوره گرد [40]، مسیریابی وسایل نقلیه [41]، تخصیص درجه ۲ [42]، توالی عملیات [43]، زمان‌بندی آموزشی [44] و... به کار رفته‌اند. (برای مطالعه بیشتر و مشاهده فهرست کاملی از کاربردهای الگوریتم‌های مورچه به دوریگو و دی کارو (1999) [45] مراجعه شود).

### ۳. الگوریتم پیشنهادی حل مسئله زمان‌بندی

#### حرکت قطار با استفاده از ACS

در این بخش ابتدا الگوریتم سیستم اجتماع مورچه مرور شده است و سپس یک مدل ریاضی برای نوع خاصی از مسئله زمان‌بندی حرکت قطارها معرفی شده و در انتها الگوریتم پیشنهادی برای حل مسئله زمان‌بندی حرکت قطار با استفاده از ACS آورده شده است.

#### ۳-۱ الگوریتم سیستم اجتماع مورچه (ACS)

ACS در سال ۱۹۹۶ توسط دوریگو و گامباردلا [39 و 46] به عنوان یک روش هیورستیک جدید برای حل مسائل بهبودسازی پیشنهاد شد. این الگوریتم شکل تصحیح شده الگوریتم AS است و به صورت زیر عمل می‌کند:

میتون و همکارانش [25]، زوبن و همکارانش [26]. بعضی از الگوریتم‌های فوق‌ابتکاری عبارتند از: الگوریتم ژنتیک<sup>۵</sup> (GA)، شبکه‌های عصبی مصنوعی<sup>۱</sup> (ANN)، سیستم‌های دفاعی<sup>۷</sup> (IS)، جستجوی تحریم شده<sup>۸</sup> (TS)، بازپخت شبیه‌سازی شده<sup>۹</sup> (SA) و بهبودسازی اجتماع مورچه‌ها<sup>۱۱</sup> (ACO). اگرچه کیفیت جواب در این الگوریتم‌ها رضایت‌بخش است و اغلب آنها پاسخ‌هایی نزدیک به بهینه تولید می‌کنند، ولی در این زمینه تحقیقات کمی در مسائل برنامه ریزی حمل و نقل ریلی وجود دارند. به عنوان مثال: هانتلی و همکارانش [27]، ون وزل و همکارانش [28]، مارتینلی و تنگ [29]، ناچتیگال و ووگت [30]، گورمن [31]، پاسیاری و پرانزو [32]، کوان و میستری [33]، سپهری [34]، انگلهدارت فانک و کولونکو [35].

فیجیتی و همکاران [36]، گوتین و پونن [37] و نون و بین [38] نشان داده‌اند که به راحتی می‌توان مسئله زمان‌بندی حرکت قطار را به یک مسئله فروشنده دوره گرد (TSP) تبدیل کرد. دوریگو و گامباردلا [39] نشان دادند که الگوریتم ACS در حل مسئله TSP از دیگر الگوریتم‌های فوق‌ابتکاری موفق‌تر بوده است. همان گونه که در جدول ۱ توسط دوریگو و گامباردلا [39] نشان داده شده است، سیستم اجتماع مورچه‌ها (ACS) در حل ۳ مسئله فروشنده دوره گرد (TSP) به ترتیب در ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ شهر جوابی بهتر از سه الگوریتم فوق‌ابتکاری دیگر (بازپخت شبیه‌سازی شده (SA)، برنامه ریزی تکاملی<sup>۱۱</sup> (EP) و الگوریتم ژنتیک) و دقیقاً منطبق بر جواب بهینه مسئله حاصل نموده است. اعداد ذکر شده در این جدول نشان دهنده طول مسیر ساخته شده است.

#### جدول ۱. مقایسه الگوریتم‌های فوق‌ابتکاری

(برگرفته شده از دوریگو و گامباردلا [39])

مقدار	ACS	GA	EP	SA	نام مسئله
۴۲۵	۴۲۵	۴۲۸	۴۲۶	۴۴۳	TSP با ۵۰ شهر
۵۳۵	۵۳۵	۵۴۵	۵۴۲	۵۸۰	TSP با ۷۵ شهر
۲۱۲۸۲	۲۱۲۸۲	۲۱۷۶۱	غیر قابل حل	غیر قابل حل	TSP با ۱۰۰ شهر

با توجه به قابلیت تبدیل مسئله زمان‌بندی حرکت قطار به یک مسئله TSP می‌توان انتظار جواب‌های خوبی را از حل آن توسط الگوریتم ACS داشت. تا کنون در حل مسئله زمان‌بندی حرکت قطار از الگوریتم‌های ACS استفاده نشده است. در این مقاله با

استفاده از قانون بهنگام کردن محلی فرمون<sup>۱۵</sup>، سطح فرمون در کمانهای عبوری را کاهش می‌دهد:

$$\tau_{ij} \leftarrow (1 - \xi)\tau_{ij} + \xi\tau_0 \quad (5)$$

$\tau_0$  یک مقدار ثابت کوچک و  $\xi < 1$  ضریب تخییر محلی فرمون<sup>۱۶</sup> است. ساختار کلی الگوریتم ACS در شکل ۱ نشان داده شده است.

```

Procedure Ant colony system
Set pheromone trails to small constant
While (termination condition not met) do
  Place each ant on initial node
  For  $i=1$  to  $n$  do
    For  $k=1$  to  $m$  do
      Apply State Transition Rule (pseudo random proportional)
      Apply Local Update pheromone
    Next  $i$ 
  Next  $i$ 
  Apply Global Update
End while
End Ant colony system
    
```

شکل ۱. الگوریتم ACS (در محیط برنامه نویسی)

### ۲-۳ مدل ریاضی برنامه‌ریزی حرکت قطار

در این بخش یک مدل ریاضی برای برنامه‌ریزی حرکت قطار در خطوط یک خطه در مسیر مستقیم و بدون انشعاب معرفی شده است. در این مدل فرض شده که قطارها فقط از دو ایستگاه ابتدایی و انتهایی اعزام می‌شوند. قطارها بعد از آماده شدن در ایستگاه ابتدا و یا انتها باید فوراً اعزام شوند. در صورت نگهداری قطارهای آماده اعزام در ایستگاهها، متناسب با زمان توقف غیر مجاز در ایستگاهها متحمل صرف هزینه می‌شویم. در این مدل سرعت و زمانهای سیر قطارها در بلاکها مقدار ثابت فرض شده‌اند. در این مدل قطارها می‌توانند در دو جهت حرکت کنند ولی حق سبقت در ایستگاه را ندارند.

نمادها:

R: مجموعه قطارهای اعزامی از ایستگاه راست به چپ

L: مجموعه قطارهای اعزامی از ایستگاه چپ به راست

T: مجموعه کل قطارها ( $i, j \in R$  or  $L$  or  $T$ )  
 $(T = R \cup L)$

B: مجموعه بلاکها ( $k \in B$ )

بلاک  $k$  بین ۲ ایستگاه  $k$  و  $k+1$  قرار دارد. ایستگاهها و بلاکها به ترتیب از ایستگاه چپ به راست شماره گذاری شده‌اند.

S: مجموعه ایستگاهها ( $k \in S$ )

هر مورچه یک جواب کامل را توسط انتخاب نقطه‌ها بر اساس قانون احتمالی انتقال وضعیت تولید می‌کند، به این صورت که مورچه  $k$  در گره  $i$  بر اساس فرمول زیر حرکت به گره  $j$  را انتخاب می‌کند.

$$s = \begin{cases} \arg [\text{Max}_{j \in N_i^k} \{\tau_{ij}[\eta_{ij}]^\beta\}] & \text{اگر } q \leq q_0 \\ S & \text{اگر } q > q_0 \end{cases} \quad (1)$$

$$p_{ij}^k = \frac{[\tau_{ij}][\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{l \in N_i^k} [\tau_{il}][\eta_{il}]^\beta} \quad (2)$$

$q$  عدد تصادفی یکنواخت در بازه  $[0,1]$  است،  $q_0$  پارامتری بین صفر و یک است و  $S$  یک متغیر تصادفی است که از توزیع احتمال فرمول ۲ حاصل می‌شود.  $\tau_{ij}$  مقدار فرمون در کمان  $ij$  است.  $\delta_{ij}$  برابر هزینه کمان  $ij$  است و  $\eta_{ij} = 1/\delta_{ij}$  است.  $\beta$  درجه اهمیت  $\eta$  را در مقایسه با  $\tau$  مشخص می‌کند و  $N_i^k$  مجموعه گره‌های باقیمانده مورچه  $k$  ام بر اساس حرکت از گره  $i$  برای ساخت یک پاسخ موجه است.

قانون حالت انتقال به دست آمده از فرمول ۱ و ۲ قانون انتخاب شبه تصادفی<sup>۱۳</sup> نامیده می‌شود. در الگوریتم ACS فقط مورچه‌ای که بهترین جواب را ساخته است در گراف، فرمون بر جا می‌گذارد. زمانی که همه مورچه‌ها جوابهای خود را ساختند، قانون بهنگام کردن عمومی فرمون<sup>۱۴</sup> به کار برده می‌شود. این قانون به صورت زیر است:

$$\tau_{ij} \leftarrow (1 - \rho)\tau_{ij} + \rho\Delta\tau_{ij} \quad (3)$$

که در آن:

$\rho < 1$  پارامتر تخییر فرمون و  $\Delta\tau_{ij}$  برابر است با:

$$\Delta\tau_{ij} = \begin{cases} 1/\text{cost}_{gb} & \text{اگر } (i, j) \in \psi^{gb} \\ 0 & \text{اگر } (i, j) \notin \psi^{gb} \end{cases} \quad (4)$$

$\psi^{gb}$  بهترین جواب ساخته شده است و  $\text{Cost}_{gb}$  هزینه بهترین جواب است. در این روش هر مورچه در حین ساخت جواب با

محدودیت ها:

$$Xa(i, k) - Xd(i, k - 1) = t_{ik} \quad (10)$$

$i \in R, k \in S$

محدودیت زمان سیر قطارهای اعزامی از ایستگاه چپ:

$$Xa(i, k - 1) - Xd(i, k) = t_{ik} \quad (11)$$

$i \in L, k \in S$

محدودیت توقف قطارهای اعزامی از ایستگاه راست و چپ:

$$Xd(i, k) - Xa(i, k) \geq d_{ik} \quad (12)$$

$i \in T, k \in S$

محدودیت توالی قطارهای اعزامی از ایستگاه راست:

$$Xd(j, k - 1) - Xa(i, k) \geq h_{ijk} - M(1 - a_{ij}) \quad (13)$$

$$Xd(i, k - 1) - Xa(j, k) \geq h_{ijk} - Ma_{ij}$$

$i, j \in R, k \in S$

محدودیت توالی قطارهای اعزامی از ایستگاه چپ:

$$Xd(j, k) - Xa(i, k - 1) \geq h_{ijk} - M(1 - b_{ij})$$

$$Xd(i, k) - Xa(j, k - 1) \geq h_{ijk} - Mb_{ij}$$

$(14)$

محدودیت تلاقی:

$$Xd(j, k) - Xa(i, k) \geq h_{ijk} - Mc_{ijk} \quad (15)$$

$$Xd(i, k + 1) - Xa(j, k + 1) \geq h_{ijk} - M(1 - c_{ijk})$$

### ۳-۳ روش حل مدل پیشنهادی با ACS

در الگوریتم پیشنهادی چنین فرض شده است که قطارها همان نقش شهرها (گره‌ها) را در مسئله TSP ایفا می‌کنند. قطارهای اعزامی از چپ به راست و همچنین قطارهای اعزامی از راست به چپ تشکیل ۲ زیر شبکه مستقل را در TSP می‌دهند. طبق تعریف مسیر انتخابی هر مورچه در شبکه قطارها توالی اعزام قطارها را نشان می‌دهد. برای مثال در شکل ۲ که شامل ۷ قطار (سه قطار اعزامی از راست به چپ و ۴ قطار اعزامی از چپ به راست) است، اگر مورچه ای مسیر گره شروع، قطار ۱، قطار ۳ و قطار ۲ را انتخاب کند به معنی توالی اعزام قطارهای ۳، ۱ و ۲ است. در این الگوریتم یک اجتماع شامل  $2 \times n$  مورچه است که این تعداد در

D: مجموعه زمان توقف مجاز در ایستگاه ( $d_{ik} \in D$ )

AD: مجموعه زمان ورود و خروج از ایستگاه  
( $Xa(i, k), Xd(i, k) \in AD$ )

پارامترها:

زمان سفر: زمانی که قطار  $i$  برای طی کردن بلاک  $k$  نیاز دارد ( $t_{ik}$ )  
زمان توقف: این زمان نشان دهنده مقدار توقف مجاز (اجباری) قطار  $i$  در ایستگاه  $k$  است. ( $d_{ik}$ )

زمان سر فاصله: این زمان حداقل فاصله زمانی بین ورود/خروج دو قطار متوالی  $i$  و  $j$  از بلاک  $k$  است. ( $h_{ijk}$ )  
M: یک عدد مثبت به اندازه کافی بزرگ است.

متغیرهای تصمیم‌گیری:

متغیرهای دو مقداره<sup>۱۷</sup>

(6)

$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{اگر قطار } j \in R \text{ بعد از قطار } i \in R \text{ وارد بلاک شود} \\ 0 & \text{در غیر اینصورت} \end{cases}$

(7)

$b_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{اگر قطار } j \in L \text{ بعد از قطار } i \in L \text{ وارد بلاک شود} \\ 0 & \text{در غیر اینصورت} \end{cases}$

(8)

$c_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{اگر قطار } j \in R \text{ بعد از قطار } i \in R \text{ وارد بلاک } k \text{ شود} \\ 0 & \text{در غیر اینصورت} \end{cases}$

متغیرهای پیوسته

$Xa(i, k)$  = زمان ورود قطار  $i$  به ایستگاه  $k$

$Xd(i, k)$  = زمان خروج قطار  $i$  از ایستگاه  $k$

با توجه به آن که ترکیبی از متغیرهای دو مقداره و پیوسته در مدل استفاده شده‌اند می‌توان آن را از جمله مدل‌های برنامه‌ریزی مخلوط عدد صحیح<sup>۱۸</sup> (MIP) در تحقیق در عملیات<sup>۱۹</sup> (OR) دانست.

تابع هدف:

تابع هدف در این مدل حداقل کردن جمع تاخیر قطارها در ایستگاه‌ها است. تاخیر برابر است با اختلاف زمان توقف قطار در ایستگاه با زمان توقف مجاز در ایستگاه:

$$Min z = \sum_{i \in T} \sum_{k \in S} (Xd(i, k) - Xa(i, k) - d_{ik}) \quad (9)$$

در این فرمول  $i$  نشان دهنده قطارهای انتخاب شده از مجموعه قطارهای اعزامی از ایستگاه راست است و  $k$  بلاکی است که در آن تلاقی صورت گرفته است. در این صورت برای رفع تلاقی بین دو قطار زمان خروج قطار انتخابی از ایستگاه مربوطه به صورت زیر تغییر داده می‌شود:

$$Xd(j, k) = Xa(i, k) + h_{ijk} \quad (17)$$

زمان ورود و خروج این قطار تا ایستگاه پایانی اش بر اساس این زمان محاسبه می‌شود.

اگر قطار انتخابی، قطار اعزامی از ایستگاه راست باشد در صورت صدق کردن زمانهای به دست آمده در رابطه (۱۸) تلاقی اتفاق افتاده است:

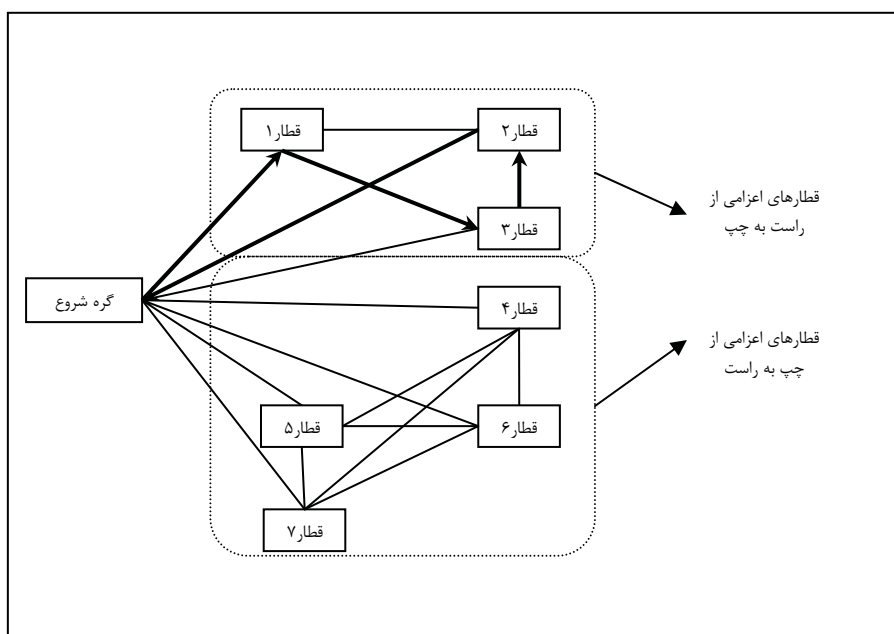
$$\begin{aligned} Xa(i, k-1) + h_{ijk} &> Xd(j, k-1) \\ &\& \\ Xd(i, k) - h_{ijk} &< Xd(j, k) \end{aligned} \quad (18)$$

$n$  گروه ۲ تایی در کنار هم برای ساخت جواب همکاری می‌کنند. هر گروه شامل ۲ مورچه است که یکی از آنها به ساخت توالی در مجموعه قطارهای اعزامی از ایستگاه راست به چپ، و دیگری به ساخت توالی در مجموعه قطارهای اعزامی از ایستگاه چپ به راست تخصیص می‌یابند.

در ابتدا هر دو مورچه در گره مجازی صفر (گره شروع) قرار می‌گیرند، سپس از اولین گروه یکی از مورچه‌ها به طور تصادفی انتخاب می‌شود.

اولین مورچه انتخابی یک قطار را انتخاب می‌کند. زمان سیر، زمان ورود و خروج این قطار تا ایستگاه پایانی محاسبه می‌شود، سپس مورچه دیگر قطار خود را انتخاب می‌کند. زمان ورود و خروج این قطار از هر ایستگاه با توجه به این که با قطار سمت مخالف تلاقی دارد یا نه معلوم می‌شود. اگر قطار انتخابی، قطار اعزامی از ایستگاه چپ باشد در صورت صدق کردن زمانهای به دست آمده در رابطه (۱۶) تلاقی اتفاق افتاده است:

$$\begin{aligned} Xa(i, k) + h_{ijk} &> Xd(j, k) \\ &\& \\ Xd(i, k-1) - h_{ijk} &< Xd(j, k-1) \end{aligned} \quad (16)$$



شکل ۲. گراف مسئله با ۷ قطار

۰/۱، مقدار فرمون اولیه در مسیرها برابر با ۰/۰۰۰۰۰۰۵، پارامتر انتخاب ACS یا  $q_0$  برابر با ۰.۹ و  $\beta = 0$  هستند، همچنین بر اساس تعریف مسئله تعداد مورچه های اجتماع برابر با ۲ برابر تعداد قطارها در نظر گرفته شده است و مقدار اولیه ثابت  $\tau_0$  بر اساس پیشنهاد دوریگو و گامباردلا [38 و 45] با استفاده از فرمول  $\tau_0 = (n.L_{mn})^{-1}$  به دست آمده است که در آن  $n$  تعداد قطارها و  $L_{mn}$  هزینه حاصل از جواب ساخته شده توسط یک روش ابتکاری است.

شکل ۴ حساسیت مدت زمان حل مسائل را در دو روش بهینه و الگوریتم پیشنهادی نشان می دهد. در شکل ۴-الف حساسیت زمان با تغییر تعداد بلاک و در شکل ۴-ب حساسیت زمان به تغییر تعداد قطار مورد سنجش قرار گرفته است. تابع زمانی حساسیت حل مسائل به تعداد قطارها در حل دقیق مسئله که توسط نرم افزار MATLAB به دست آمده است کاملاً نشان دهنده NP بودن مسئله است:

$$Time(s) = 0.0118 e^{\text{Number of Trains}} \quad (20)$$

در حالی که تابع زمان حل توسط ACS یک تابع خطی است:

$$Time(s) = 1.702 \times \text{Number of Trains} - 2.738 \quad (21)$$

تابع زمانی حساسیت حل مسائل به تعداد بلاکها در حل دقیق مسئله که توسط نرم افزار MATLAB به دست آمده است به صورت تابع خطی با ضریب زاویه ۱۷۲/۶ است:

$$Time(s) = 172.6 \times \text{Number of Trains} - 403.6 \quad (22)$$

در حالی که تابع زمان حل توسط ACS یک تابع خطی با ضریب زاویه ۱۱/۷۵ است:

$$Time(s) = 1.75 \times \text{Number of Trains} + 3.107 \quad (23)$$

قابل توجه است که در ۴۵ مسئله حل شده مقدار کل تأخیر در اعزام قطارها از هر دو روش تقریباً با هم برابر بود، در حالی که زمان حل روش ACS پیشنهادی صرفه‌جویی‌های زمانی قابل توجهی را در مقایسه با روش حل دقیق آن نشان داده است.

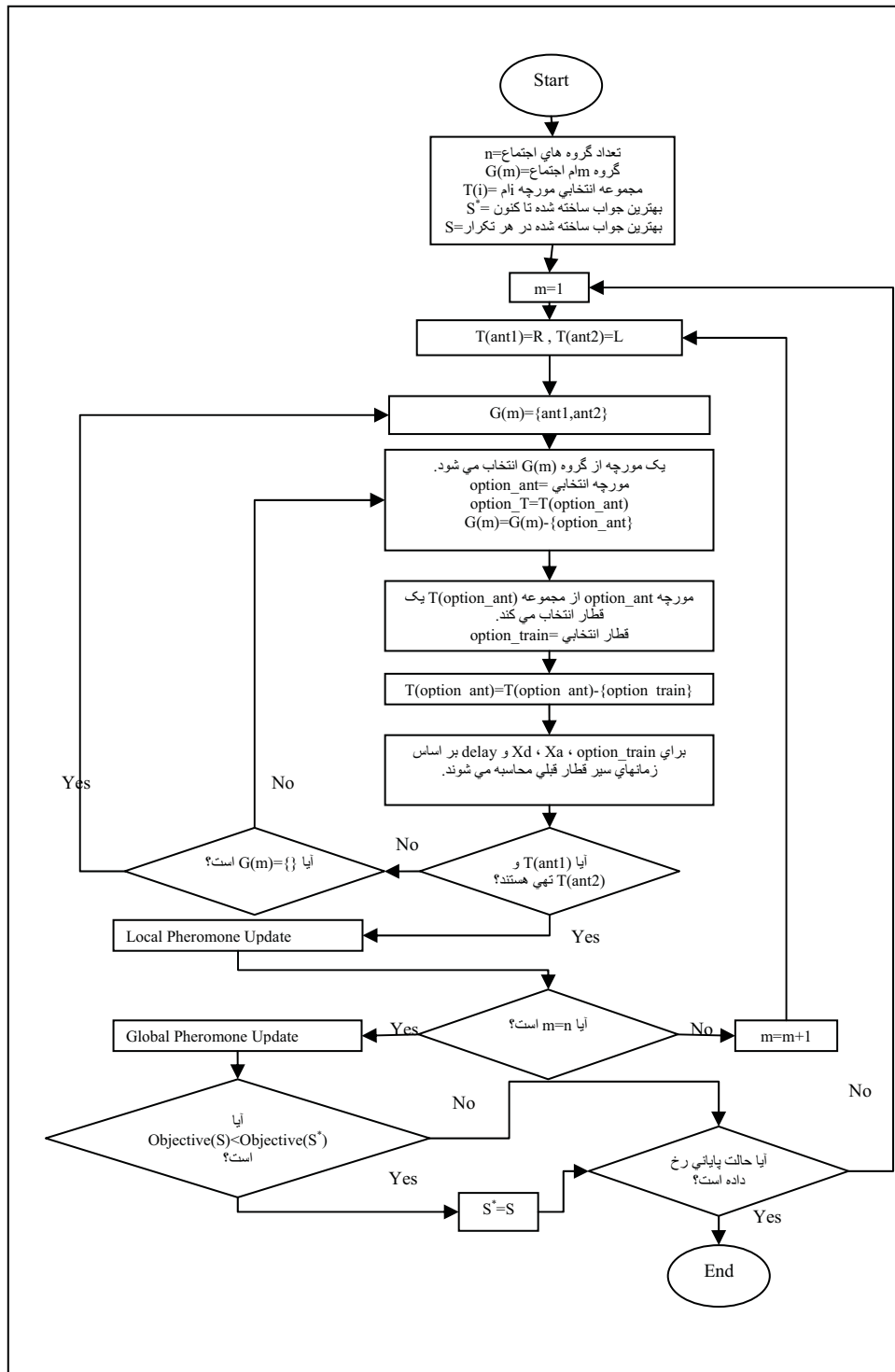
که در آن:  $i$  قطار انتخابی است،  $i$  نشان دهنده قطارهای انتخاب شده از مجموعه قطارهای اعزامی از ایستگاه چپ، و  $k$  بلاکی است که در آن تلاقی صورت گرفته است. در این صورت برای رفع تلاقی بین دو قطار زمان خروج قطار انتخابی فوق از ایستگاه مربوطه به صورت زیر تغییر می‌کند:

$$Xd(j, k - 1) = Xa(i, k - 1) + h_{ijk} \quad (19)$$

قطارهای انتخابی از مجموعه قطارهای مربوط حذف می‌شوند. سپس دوباره یک مورچه به طور تصادفی انتخاب می‌شود. این مورچه از مجموعه خود یک قطار انتخاب می‌کند. زمان ورود و خروج این قطار در ایستگاه با توجه به توالی آن در گروه خود مشخص می‌شود. هنگامی که زمان ورود و خروج از یک بلاک معلوم شد، مانند آنچه گذشت، شرط تلاقی قطار انتخابی با قطارهای انتخاب شده اعزامی از جهت مخالف بررسی و در صورت وجود تلاقی، تلاقی آن رفع می‌شود. در صورتی که تلاقی در بلاک فوق اتفاق نیافتاده باشد، زمان ورود و خروج این قطار در بلاک بعدی مشخص می‌شود. اگر تلاقی در این قسمت اتفاق افتاده باشد رفع می‌شود، به همین صورت این عملیات ادامه پیدا می‌کند تا تمام زمانهای ورود و خروج از تمام ایستگاهها مشخص شوند. سپس قطار بعدی توسط مورچه دیگر انتخاب می‌شود. این روال تا زمانی که مورچه‌ها تمام قطارهای مجموعه خود را انتخاب کنند ادامه پیدا می‌کند. فلوچارت الگوریتم در شکل ۳ نشان داده شده است.

#### ۴. تحلیل نتایج مدل

برای تحلیل نتایج، جوابهای حاصل از الگوریتم پیشنهادی با روش دقیق بهینه سازی حل مسئله برنامه ریزی حرکت قطار مقایسه شده‌اند. برای این منظور محاسبات برای ۴۵ مسئله که شامل تعداد ۳ تا ۸ قطار و ۲ تا ۸ بلاک بودند انجام شد. جوابهای دقیق بهینه حل مسائل با نرم افزار بهینه سازی LINGO حاصل شده‌اند. جدول شماره ۲ نتایج حاصل از حل این ۴۵ مسئله را با جزییات بیشتر نشان می دهد. در تمامی این مسائل علاوه بر اطلاعات ذکر شده در جدول، فرض شده است که زمان سر فاصله برابر با ۰/۳، حداقل زمان توقف در ایستگاهها برابر با ۱، ضریب تبخیر عمومی فرمون یا  $\rho$  برابر با ۰/۱، ضریب تبخیر محلی فرمون یا  $\rho_c$  برابر با



شکل ۳. فلوجارت الگوریتم ابتکاری حل مسئله زمان بندی حرکت قطار بر اساس سیستم اجتماع مورچه ها



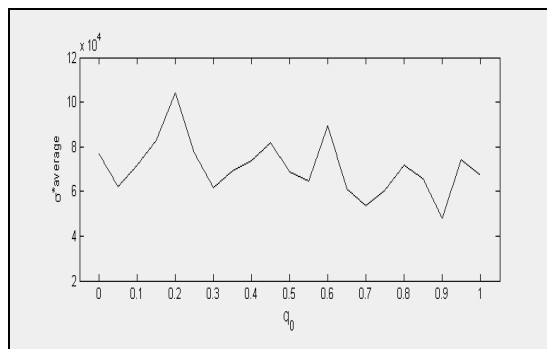
ابتدا مقادیر اولیه پارامترها برابر با مقادیر تعیین شده در قسمت ۴ در نظر گرفته شدند و سپس بهترین مقدار پارامترها به صورت تخمینی تعیین شدند. برای این منظور مقدار پارامترها تغییر داده شده و سپس برای هر مقدار، الگوریتم ۱۰ بار اجرا شده است. پس از این مرحله بهترین مقدار پارامترها تعیین شده و مساله با این پارامترها حل شده است.

#### ۵-۱-۱ پارامتر $q_0$

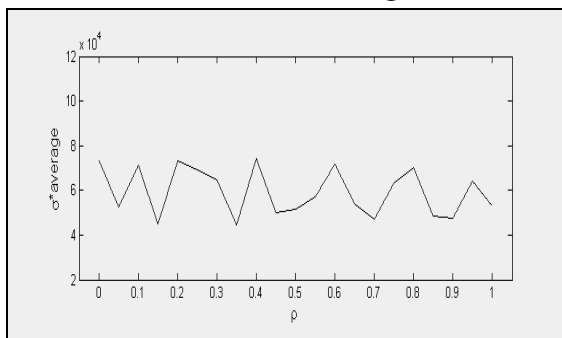
در تعیین  $q_0$  از مقدار ۰ تا ۱ با قدمهای ۰/۰۵ بررسی شده و همان گونه که از شکل ۵ مشخص است بر اساس کمترین مقدار حاصلضرب میانگین در انحراف معیار در ۱۰ بار اجرای برای هر یک از مقادیر  $q_0$  مقدار مطلوب آن برابر با  $q_0 = 0.9$  در نظر گرفته شده است.

#### ۵-۱-۲ تعیین مقدار $\rho$

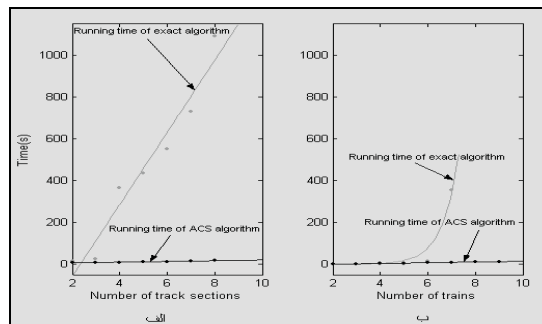
مقدار  $\rho$  بر اساس  $q_0 = 0.9$  تعیین شده است. در شکل ۶ خلاصه نتایج بر اساس تغییرات از ۰ تا ۱ با قدمهای ۰/۰۵ برای تعیین  $\rho$  آورده شده است. بهترین مقدار بر اساس کمترین مقدار میانگین در انحراف معیار در ۱۰ بار اجرا برای هر یک از مقادیر  $\rho$  برابر با  $\rho = 0.350$  به دست آمده است.



شکل ۵. نتایج محاسبات مربوط به تعیین مقدار  $q_0$



شکل ۶. نتایج محاسبات مربوط به تعیین مقدار  $\rho$



شکل ۴. حساسیت مدت زمان حل مسائل در دو روش بهینه و الگوریتم پیشنهادی

#### ۵. بررسی موردی

در این قسمت برای روشن شدن هر چه بیشتر الگوریتم پیشنهادی مسئله ای با ۳۰ قطار و ۴ بلاک حل شده است.

#### ۵-۱ تعیین پارامترهای الگوریتم ACS

در ابتدا مقادیر اولیه برای پارامترها به شرح زیر و براساس پیشنهاد دوریگو و گامباردلا [46و39] در حل مسئله TSP با استفاده از ACS در نظر گرفته شده اند:

ضریب تبخیر عمومی فرمون،  $\rho = 0.1$

ضریب تبخیر محلی فرمون،  $\xi = 0.1$

مقدار فرمون اولیه در مسیرها  $= 0.000005$

پارامتر انتخاب ACS،  $q_0 = 0.9$

همچنین براساس تعریف مسئله تعداد مورچه های اجتماع برابر ۶۰ در نظر گرفته شده است و مقدار اولیه ثابت  $\tau_0 = 0.012$  با استفاده از فرمول  $\tau_0 = (n.L_{mm})^{-1}$  به دست آمده است که در آن  $n$  تعداد قطارها و  $L_{mm}$  هزینه حاصل از جواب ساخته شده توسط یک روش ابتکاری است. (برای مطالعه بیشتر به دوریگو و گامباردلا [46و39] مراجعه شود.) همچنین باتوجه به آن که در الگوریتم پیشنهادی طول کمانها در مسئله دارای مفهوم نیست، بنابراین با انتخاب  $\beta = 0$  تاثیر طول کمان در ACS حذف شده است. سپس بهترین مقدار پارامترها به صورت تخمینی معین گردیده است. برای این منظور مقدار پارامترها تغییر داده شده و سپس برای هر مقدار، الگوریتم ۱۰ بار اجرا شده است. بعد از این مرحله، بهترین مقدار پارامترها تعیین شده و مساله با این پارامترها حل شده است.

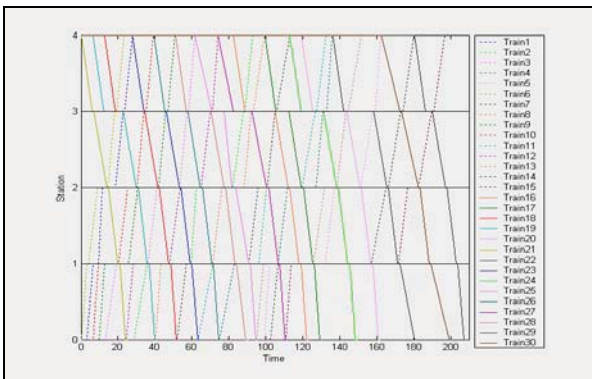
قصیری و مرشد سلوک

جدول ۲. مقایسه نتایج ۴۵ مسئله نمونه با استفاده از روش دقیق بهینه سازی و الگوریتم پیشنهادی

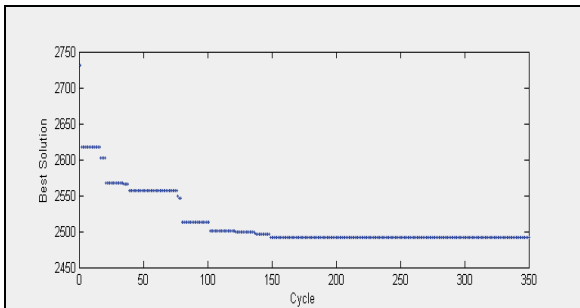
مسئله	تعداد قطارها	تعداد قطار چپ به راست	تعداد قطار راست به چپ	تعداد بلاک سیر	زمان حل (ثانیه)		جواب (جمع کل تأخیر قطارها در ایستگاهها بر حسب ثانیه)	
					روش ACS	روش دقیق	روش ACS	روش دقیق
۱	۳	۲	۲	۲	۰	۰	۵/۳	۵/۳
۲	۴	۳	۱	۲	۰	۰	۱۶/۹	۱۶/۹
۳	۵	۲	۳	۲	۱	۱	۳۳/۷	۳۵
۴	۵	۳	۲	۲	۷	۱	۳۱/۹	۳۴/۸
۵	۶	۳	۳	۲	۲	۴	۴۹/۴	۵۰/۷
۶	۷	۳	۴	۲	۲۰	۷	۷۶/۹	۸۰/۳
۷	۷	۴	۳	۲	۲۲	۷	۷۶/۷	۸۲/۶
۸	۸	۳	۵	۲	*	۸	*	۱۲۴
۹	۸	۴	۴	۲	*	۸	*	۱۲۳/۸
۱۰	۸	۵	۳	۲	*	۸	*	۱۲۲/۳
۱۱	۳	۲	۱	۳	۰	۰	۳/۹	۳/۹
۱۲	۴	۳	۱	۳	۱	۱	۱۴/۱	۱۴/۱
۱۳	۵	۲	۳	۳	۱	۲	۳۲	۳۵/۱
۱۴	۵	۳	۲	۳	۱	۲	۲۹/۳	۳۰/۵
۱۵	۶	۳	۳	۳	۴	۷	۵۰/۳	۵۰/۳
۱۶	۷	۳	۴	۳	۳۵	۹	۷۸	۸۲/۴
۱۷	۷	۴	۳	۳	۴۷	۹	۷۸/۵	۸۲/۸
۱۸	۸	۳	۵	۳	*	۱۰	*	۱۲۱/۶
۱۹	۸	۴	۴	۳	*	۱۰	*	۱۱۴/۲
۲۰	۸	۵	۳	۳	*	۱۰	*	۱۱۶/۲
۲۱	۳	۲	۱	۴	۰	۲	۶/۶	۶/۶
۲۲	۴	۳	۱	۴	۰	۵	۱۴/۲	۱۴/۲
۲۳	۵	۲	۳	۴	۱	۶	۳۲	۳۲
۲۴	۵	۳	۲	۴	۵	۶	۳۱	۳۵
۲۵	۶	۳	۳	۴	۹	۸	۵۲/۶	۵۲/۶
۲۶	۷	۳	۴	۴	۱۴۹۵	۹	۷۷/۲	۷۸/۳
۲۷	۷	۴	۳	۴	۹۷	۹	۸۱/۱	۸۳/۶
۲۸	۸	۳	۵	۴	*	۱۱	*	۱۲۱/۱
۲۹	۸	۴	۴	۴	*	۱۱	*	۱۲۴/۳
۳۰	۸	۵	۳	۴	*	۱۱	*	۱۲۵/۲
۳۱	۳	۲	۱	۵	۰	۳	۳/۹	۳/۹
۳۲	۴	۳	۱	۵	۳	۵	۱۲/۸	۱۲/۸
۳۳	۵	۲	۳	۵	۱	۸	۲۷/۸	۲۷/۸
۳۴	۵	۳	۲	۵	۱	۸	۳۰/۳	۳۱/۸
۳۵	۶	۳	۳	۵	۱۷	۱۱	۴۶/۷	۴۶/۷
۳۶	۷	۳	۴	۵	۱۶۴۸	۱۲	۷۰/۷	۷۱/۵
۳۷	۷	۴	۳	۵	۱۷۲	۱۲	۷۳/۶	۷۹/۵
۳۸	۸	۳	۵	۵	*	۱۵	*	۱۲۱/۶
۳۹	۸	۴	۴	۵	*	۱۵	*	۹۹/۷
۴۰	۸	۵	۳	۵	*	۱۵	*	۱۲۱
۴۱	۷	۴	۳	۶	۳۰۱	۱۵	۵۸/۷	۶۰/۸
۴۲	۷	۲	۵	۶	۸۷	۱۳	۶۰/۲	۷۰/۴
۴۳	۷	۳	۴	۷	۸۲	۱۵	۷۷/۳	۸۰/۹
۴۴	۷	۵	۲	۷	۹۰۱	۱۵	۷۲/۸	۷۵/۲
۴۵	۷	۴	۳	۸	۵۵۷	۱۸	۶۹	۷۲/۶

(علامت \* نشان دهنده آن است که رایانه در زمان قابل قبولی قادر به یافتن جواب نبوده است.)

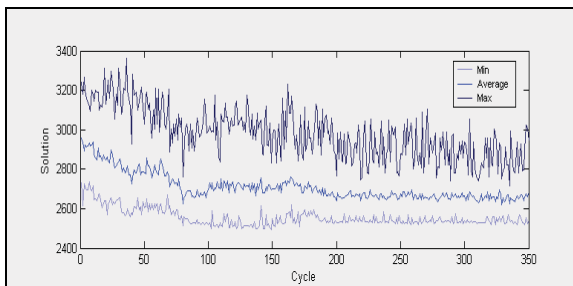
راه آهن است. شکل ۱۰ نشان دهنده همگرایی در بهبود جواب‌ها در هر چرخه از اجرای الگوریتم است. مقدار تأخیر پس از همگرایی جوابها در چرخه ۱۵۲ برابر با ۲۴۹۲.۱ واحد زمانی است. شکل ۱۱ میانگین، بیشینه و کمینه جوابهای ساخته شده در هر چرخه را نشان می‌دهد که تأکیدی بر همگرایی جوابها بوده و مکمل شکل ۱۰ است. نمودار شکل ۱۲ انحراف معیار جوابهای ساخته شده در هر چرخه را نشان می‌دهد که گویای کاهش دامنه تغییرات جوابها در هر چرخه از اجرای الگوریتم است.



شکل ۹. نمودار مسافت زمان حرکت قطارها در مسئله ای با ۳۰ قطار



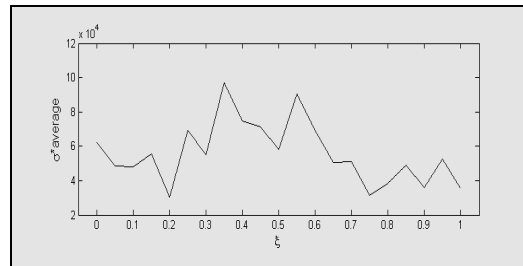
شکل ۱۰. همگرایی در بهبود جوابها در هر چرخه از اجرای الگوریتم



شکل ۱۱. میانگین، بیشینه و کمینه جوابهای ساخته شده در هر چرخه

### ۳-۱-۵ تعیین مقدار $\xi$

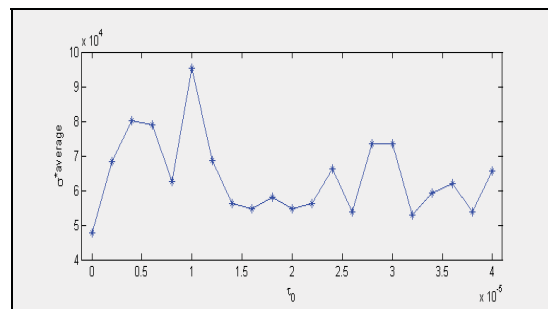
مقدار  $\xi$  با توجه به مقادیر  $q_0 = 0.9$  و  $\rho = 0.350$  تعیین گردیده است. در شکل ۷ خلاصه نتایج بر اساس تغییرات از ۰ تا ۱ با قدمهای ۰.۰۵ برای تعیین  $\xi$  آورده شده است. بهترین مقدار بر اساس کمترین مقدار میانگین در انحراف معیار در ۱۰ بار اجرا برای هر یک از مقادیر  $\xi$  برابر با  $\xi = 0.2$  است.



شکل ۷. نتایج محاسبات مربوط به تعیین مقدار  $\xi$

### ۴-۱-۵ تعیین مقدار $\tau_0$

مقدار  $\tau_0$  بر اساس مقادیر  $q_0 = 0.9$  و  $\rho = 0.350$  و  $\xi = 0.2$  تعیین گردیده است. در شکل ۸ خلاصه نتایج بر اساس تغییرات از ۰ تا ۰.۰۰۰۴ با قدمهای ۰.۰۰۰۰۲ برای تعیین  $\tau_0$  آورده شده است. بهترین مقدار بر اساس کمترین مقدار میانگین در انحراف معیار در ۱۰ بار اجرا برای هر یک از مقادیر  $\tau_0$  برابر با  $\tau_0 = 0$  است.

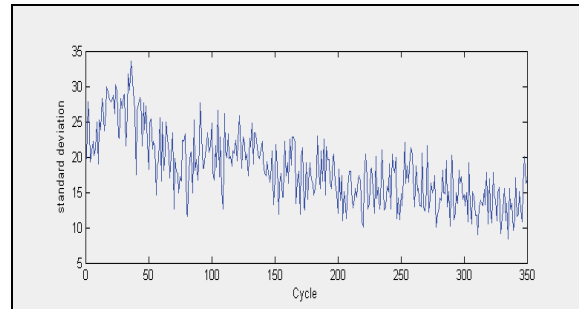


شکل ۸. نتایج محاسبات مربوط به تعیین مقدار  $\tau_0$

### ۲-۵ نتایج اجرای مدل

بعد از تعیین پارامترها، الگوریتم پیشنهادی برای مسئله ای با ۳۰ قطار اجرا شده است. نمودار حرکت قطارها در شکل ۹ نشان داده شده است. نمودار حرکت قطارها موقعیت هر قطار بر روی مسیر به صورت تابعی از زمان نشان می‌دهد. در این نمودار زمانهای ورود و خروج هر یک از قطارها از ایستگاه‌های مبدا، میانی و مقصد نشان داده می‌شود که مبنای برنامه ریزی و بهره برداری در

2. Lindner, T. (2000) "Train schedule optimization in public rail transport", Ph.D Thesis, Technische Universitat Braunschweig.
3. Dorigo, M., Di Caro, G. (1999) "Ant algorithms for discrete optimization" *Artificial Life*, 5(3), pp.137-172.
4. Chiang, T., Hau, H., Chiang, H., Ko, S., Hsieh, C. (1998) "Knowledge-based system for railway scheduling", *Data & Knowledge Engineering* 27, pp.289-312.
5. Frank, I., (1965) "Two-way traffic on a single line of railway", *Operations Research* 14, pp.801-811.
6. Amit, I., Goldfarb, D. (1971) "The timetable problem for railways", *Developments in Operations Research* 2, pp.379-387.
7. Szpigel, B. (1973) "Optimal train scheduling on a single-track railway", *Operational Research*, 72, M. Ross (editor) OR'72, pp.343-351, 1973.
8. Petersen, E.R. (1974) "Over the road transit time for a single track railway" *Transportation Science* 8, pp.65-74.
9. Chen, B., Harker, P.T. (1990) "Two moments estimation of the delay on single-track rail lines with scheduled traffic. *Transportation Science* 24, pp.261-275.
10. Keaton, M.H. (1989) "Designing optimal railroad operating plans: Lagrangian relaxation and heuristic approaches" *Transportation Research*, part B 23, pp.415-431.
11. Kraay, R.D., Harker, P.T. (1995) "Real time scheduling of freight railroads", *Transportation Research*, part B 29, pp.213-229.
12. Brodal, G., Jacob, R. (2004) "Time-dependent networks as models to achieve fast exact time-table queries" *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, 92, pp.3-15.
13. Peat, Marwick, Mitchell & Co. (1975) "Train dispatching simulation model: Capabilities and description" USA. Report No. DOT-FR-4-5014-1, March 1975, Prepared for Federal



شکل ۱۲. انحراف استاندارد جوابهای حاصله در هر چرخه

## ۶. نتیجه گیری

در این مقاله با توسعه الگوریتم فوق ابتکاری سیستم اجتماع مورچه‌ها (ACS)، الگوریتمی برای زمان‌بندی حرکت قطار معرفی شد. ابتدا نوعی از مسئله زمان‌بندی حرکت قطار در قالب یک مدل برنامه ریزی ریاضی مدلسازی شده و سپس الگوریتمی مبتنی بر ACS برای حل آن پیشنهاد شد.

با فرض آن که هر قطار در مسئله برنامه ریزی حرکت قطار معادل یک شهر در مسئله فروشنده دوره گرد (TSP) باشد، ACS بر روی گراف مسئله TSP، توالی حرکت قطارها را مشخص کرد و بر اساس این توالی و رفع تلاقی در برخورد قطارها، زمان‌بندی حرکت مشخص شد.

به دلیل فرضیاتی در مدل مانند حرکت قطارها در خطوط یک خطه در مسیر مستقیم و بدون انشعاب، اعزام بلافاصله قطارها فقط از دو ایستگاه ابتدایی و انتهایی بعد از آماده شدن، سرعت و زمانهای سیر ثابت قطارها در بلاکها، و نداشتن حق سبقت قطارها محدودیت‌هایی از نظر کاربردی در مدل وجود دارد. مثالهای عددی در ابعاد کوچک و متوسط برای بررسی صحت و کیفیت جوابها توسط الگوریتم حل شدند و نتایج حاصله با حل دقیق و بهینه آنها مقایسه شد.

از مقایسه نتایج حل دقیق مسائل و حل آنها توسط الگوریتم پیشنهادی صرفه‌جویی‌های زمانی و کیفیت جواب خوب نتیجه گرفته شد. در انتها نیز برای توصیف نحوه محاسبات یک مطالعه موردی ارائه شده است.

## ۷. مراجع

1. Ghoseiri, K., Szidarovszky, F., Asgharpour, M.J. (2004) "A multi-objective train scheduling: model and solution". *Transportation Research*, Part B 38, pp.927-952.

- Railroad Administration, Department of Transportation, Washington DC.
25. Minton, S., Johnston, M.D., Philips, A.B., Laird, P. (1992) "Minimizing conflicts: a heuristic repair method for constraint satisfaction and scheduling problems", *Artificial Intelligence* 58, pp.161-205.
  26. Zweben, M., Davis, E., Daun, B., Deale, M.J. (1993) "Scheduling and rescheduling with iterative repair", *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics* 23, pp.1588-1596.
  27. Huntley, C.L., Brown, D.E., Sappington, D.E., Markowicz, B.P. (1995) "Freight routing and scheduling at CSX", *Transportation Interfaces* 25(3), pp.58-71.
  28. Van Wezel, M.C., Kok, J.N., Van den Berg, J., Van Kampen, W.(1994) "Genetic improvement of railway timetables", *Computer Science* 866, pp.566-574.
  29. Martinelli, R.D., Teng, H. (1996) "Optimization of railway operations using neural networks", *Transportation Research* 4c, pp.33-49.
  30. Nachtigall, K., Voget, S. (1996) "A genetic algorithm approach to periodic railway synchronization", *Computers and Operations Research* 23, pp.453-463.
  31. Gorman, M.F. (1998) "An application of genetic and tabu searches to the freight railroad operating plan problem", *Annals of Operations Research*. 78, 51-69.
  32. Pacciarelli, D., Pranzo, M. (2001) "A tabu search algorithm for the railway scheduling problem. Proceedings of the 4th Metaheuristic International Conference, Porto (Portugal), pp.16-20.
  33. Kwan, R.S.K., Mistry, P. (2003) "A co-evolutionary algorithm for train timetabling", University of Leeds, School of Computing, Research Report Series No. 2003.13.
  34. Sepehri, M. (2003) "Railway crew scheduling with grouping evolutionary algorithm. (In Persian), *Amirkabir Engineering Journal*, 14(54), pp.565-577.
  35. Engelhardt-Funke, O., Kolonko, M. (2004) "Analyzing stability and investments in railway networks using advanced
  14. Jovanovic, D., Harker, P.T. (1990) "A decision support system for train dispatching: an optimization - based methodology", *Transportation Research Forum*, XXXI, 25-37.
  15. Dessouky, M., Leachman, R.C. (1995) "A simulation modeling methodology for analyzing large complex rail networks", *Simulation* 65(2), pp.131-142.
  16. Cheng, Y. (1998) "Hybrid simulation for resolving resource conflicts in train traffic rescheduling", *Computers in Industry*, 35, pp.233-246.
  17. Higgins, A., Kozan, E. (1998) "Modeling train delays in urban networks", *Transportation Science*, 32(4), pp.346-357.
  18. Higgins, A., Kozan, E., Ferreira, L. (1997) "Heuristic techniques for single line train", *Scheduling. Heuristics*, 3(20), pp.43-62.
  19. Cai, X., Goh, C.H. (1994) "A fast heuristic for the train scheduling problem", *Computers and Operation Research*, 21, pp.499-510.
  20. Carey, M., Lockwood, D.(1985) "A model, algorithms and strategy for train Pathing", *Operational Research Society*, 46, pp.988-1005.
  21. Cury, J.E., Gomide, F.A.C., Mendes, M.J. (1980) "A methodology for generation of optimal schedules for an underground railway system", *IEEE Trans. on Automatic Control* 25(2), 217-222.
  22. Araya, S., Abe, K. (1983) "An optimal rescheduling for online train traffic control in disturber situations", *Proc. 22<sup>nd</sup> IEEE Conference on Decision and Control*, pp.489-494.
  23. Iida, Y. (1988) "Timetable preparation by A.I Approach", *Proceeding of European Simulation Multi-Conference, Nice, France*, pp.163-168.
  24. Komaya, K., Fukuda, T. (1991) "A knowledge-based approach for railway scheduling", *Proc. CAIA*, pp. pp.405-411.

- problem", Accepted for publication in *Inform Journal on Computing*, 12(3), pp.237-255.
44. Socha, K., Sampels, M., Manfrin, M. (2003) "Ant algorithms for the university course timetabling problem with regard to the state-of-the-art" *Computer Science*, 2611, pp.334-345.
45. Dorigo, M., Di Caro, G. (1999) "The ant colony optimization meta-heuristic". *New Ideas in Optimization*, D., Corne, M., Dorigo, F., Glover (eds), McGraw-Hill, London, pp.11-32.
46. Dorigo, M., Gambardella, L.M. (1997) "Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem". *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 1(1), pp.53-66.
36. Fischetti, M., Salazar-Gonzales, J., Toth, P. (2002) "The Generalized traveling salesman problem and orienteering problem", In *The Traveling Salesman Problem and its Variations* (G. Gutin and Punnen, eds), Kluwer, Academic Press, pp.609-663.
37. Gutin, G., Punnen, A.P. (2003) "Traveling salesman and related problems and its variations" In *handbook of Graph Theory* (J. Gross and J. Yellen, eds), CRC Press.
38. Noon, C., Bean, J. (1991) "A Lagrangian based approach for the asymmetric generalized traveling salesman problem", *Operations Research*, 39, pp.623-632.
39. Dorigo, M., Gambardella, L.M. (1996) "Ant colonies for the traveling salesman problem", *BioSystems*, 43, pp.73-81.
40. Dorigo, M., Maniezzo, V., Colomi, A. (1991) "Positive feedback as a search strategy" Technical Report 91-016, Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Milano, Italy.
41. Gambardella, L.M., Taillard, E., Agazzi, G., (1999) "MACS-VRPTW: vehicle routing problem with time windows", *New Ideas in Optimization*, D., Corne, M., Dorigo, F., Glover (eds), McGraw-Hill, London, pp.63-76.
42. Stutzle, T., Hoos, H. (2000) "MAX-MIN ant system. future generation computer systems", 16(8), pp.889-914.
43. Gambardella, L.M., Dorigo, M. (2000) "An ant colony system hybridized with a new local search for the sequential ordering

#### پانویس ها

- 1- Meta-heuristic
- 2-Ant colony system
- 3-Traveling salesman problem
- 4-Nondeterministic polynomial
- 5-Genetic algorithm
- 6-Artificial neural networks
- 7-Immune system
- 8-Tabu search
- 9-Simulating annealing
- 10-Ant colony optimization
- 11-Evolution programming
- 12-Ant system
- 13-Pseudo-random-proportional rule
- 14- Global update pheromone
- 15- Local update pheromone
- 16- Local evaporation coefficient of pheromone
- 17- Binary variables
- 18- Mixed integer programming
- 19- Operation research

# An Ant Colony System Heuristic for Train Scheduling Problem

*K. Ghoseiri, Assistant Professor, Department of Railway Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.*

*F. Morshedsolouk, BS., Department of Railway Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran, 16846-13114  
E-mail: ghoseiri@iust.ac.ir*

## ABSTRACT

Train scheduling problem is one of the severe problems in rail transport planning. Mathematical programming, simulation, expert systems, heuristic and meta-heuristic methods, and combinational methods are amongst techniques for train scheduling. This paper develops an algorithm to train scheduling problem using Ant Colony System meta-heuristic. At first, a kind of train scheduling problem is formulated in a mathematical model and then the algorithm based ACS is presented to solve the problem. The problem is considered as a traveling salesman problem wherein cities represent the trains.

ACS determines sequence of trains dispatched on the graph of TSP. According to the sequence as well as removing trains collisions incurred, train scheduling is determined. Numerical examples in small and medium size are solved by using the algorithm and compared to exact optimum solutions to check for the quality and accuracy. To analyze the solution results obtained, they are compared with those of exact optimization method of the train scheduling model. For this purpose, computations are carried out for 45 problems including 3 to 8 trains and 2 to 8 track sections. Comparison of the solutions shows good enough quality and time savings. Sensitivity of the run times of the algorithm with respect to variation of number of track sections as well as with respect to variation of number of trains have been shown and compared with those of exact optimization method. To clarify use of the proposed algorithm, a problem with 30 trains and 4 track sections is solved to illustrate the solution. Structure of the paper is as follows: section 1 presents a hierarchical process of rail transport planning and ant's behavior which gives inspiration for ant algorithms, is presented.

Section 2 reviews the literature of the train scheduling problem and then the manner of creating, developing and applying the ant algorithms is put forward. Section 3 presents the proposed ACS-based model and solution method using ACS for train scheduling. In this section a mathematical model for train scheduling on a single track line is presented. Section 4 illustrates the analysis of the model. This chapter compares the solution results obtained from the model with those of exact optimization method of the train scheduling. Section 5 presents a case study that supports the qualified results of the model. This section describes how to determine the ACS algorithm parameters and section 6 summarizes the paper.

**Keywords:** Ant colony system, train scheduling problem, traveling salesman problem, mathematical programming, rail transport planning