

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 ابتکاری¹ سیستم اجتماع مورچه‌ها² (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 گرد³ (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

1. 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 سریع تری می‌یابد که سرانجام باعث می‌شود اکثر مورچه‌ها این مسیر را انتخاب کنند.

2. 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 فن‌آوریهای 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]، اسپینگل [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: پیت 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 قطار از آنها عبور می‌کند. این مسئله از نوع NP^4 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] کوما یا 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 [2] 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

قطار از الگوریتم‌های ACO استفاده نشده است. در این مقاله با 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.

بهینه‌سازی اجتماع مورچه‌ها یک الگوریتم فوق‌ابتکاری جدید برای حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی است. الگوریتم‌های ACO بر پایه رفتار مورچه‌ها بنا نهاده شده‌اند. در ACO 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 AS¹² است که در سال 1991 توسط دوریگو و همکارانش [40] برای حل مسئله فروشنده دوره گرد مورد استفاده قرار گرفت. با وجود نتایج امیدوار کننده، 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 ACO 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 2 [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).

3. 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.

3-1 الگوریتم سیستم اجتماع مورچه (ACS)

ACS در سال 1996 توسط دوریگو و گامباردلا [39 و 46] به عنوان یک روش هیورستیک جدید برای حل مسائل بهینه‌سازی 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 ژنتیک⁵ (GA)، شبکه‌های عصبی مصنوعی⁶ (ANN)، سیستم‌های دفاعی⁷ (IS)، جستجوی تحریم شده⁸ (TS)، بازپخت شبیه‌سازی شده⁹ (SA) و بهینه‌سازی اجتماع مورچه‌ها¹⁰ (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]، انگلهاردت 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 1 توسط دوریگو و گامباردلا [39] نشان داده شده است، سیستم اجتماع مورچه‌ها (ACS) در حل 3 مسئله فروشنده دوره گرد (TSP) به ترتیب در 50، 75 و 100 شهر جوابی بهتر از سه الگوریتم فوق‌ابتکاری دیگر (بازپخت شبیه‌سازی شده (SA)، برنامه ریزی تکاملی¹¹ (EP) و الگوریتم ژنتیک) و دقیقاً مطابق بر جواب بهینه مسئله حاصل نموده است. اعداد ذکر شده در این جدول نشان دهنده طول مسیر ساخته شده است.

جدول 1. مقایسه الگوریتم‌های فوق‌ابتکاری (بر گرفته شده از دوریگو و گامباردلا [39])

| مقدار | ACS | GA | EP | SA | نام مسئله |
|-------------|-------|-------|-------------|-------------|----------------|
| بهینه مسئله | | | | | |
| 425 | 425 | 428 | 426 | 443 | TSP با 50 شهر |
| 535 | 535 | 545 | 542 | 580 | TSP با 75 شهر |
| 21282 | 21282 | 21761 | غیر قابل حل | غیر قابل حل | TSP با 100 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

استفاده از قانون بهنگام کردن محلی فرمون¹⁵، سطح فرمون در کمانهای عبوری را کاهش می‌دهد:

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

τ_0 یک مقدار ثابت کوچک و $0 < \xi < 1$ ضریب تبخیر محلی فرمون¹⁶ است. ساختار کلی الگوریتم ACS در شکل 1 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 1. الگوریتم ACS (در محیط برنامه نویسی)

3-2 مدل ریاضی برنامه ریزی حرکت قطار

در این بخش یک مدل ریاضی برای برنامه ریزی 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 شده اند. 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 2 ایستگاه k و $k+1$ قرار دارد. ایستگاهها و بلاکها به ترتیب از ایستگاه چپ به راست شماره گذاری شده اند.

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 براساس 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 2 حاصل می‌شود. τ_{ij} مقدار فرمون در کمان ij است. δ_{ij} برابر هزینه کمان ij است و $\eta_{ij} = 1/\delta_{ij}$ است. β درجه اهمیت η را در مقایسه با τ مشخص می‌کند و N_i^k مجموعه گره‌های باقیمانده مورچه k ام براساس حرکت از گره i برای ساخت یک پاسخ موجه است.

قانون حالت انتقال به دست آمده از فرمول 1 و 2 قانون انتخاب شبه تصادفی¹³ 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 فرمون¹⁴ 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:

$0 < \rho < 1$ پارامتر تبخیر فرمون و $\Delta\tau_{ij}$ برابر است با:

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

ψ^{gb} بهترین جواب ساخته شده است و 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:

$$Xd(j, k) - Xa(i, k - 1) \geq h_{ijk} - M(1 - b_{ij}) \quad (14)$$

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

محدودیت تلاقی:

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

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

3-3 روش حل مدل پیشنهادی با ACS

در الگوریتم پیشنهادی چنین فرض شده است که قطارها همان نقش شهرها (گره ها) را در مسئله TSP ایفا می کنند. قطارهای اعزامی از چپ به راست و همچنین قطارهای اعزامی از راست به چپ تشکیل 2 زیر شبکه مستقل را در TSP می دهند. طبق تعریف مسیر انتخابی هر مورچه در شبکه قطارها توالی اعزام قطارها را نشان می دهد. برای مثال در شکل 2 که شامل 7 قطار (سه قطار اعزامی از راست به چپ و 4 قطار اعزامی از چپ به راست) است، اگر مورچه ای مسیر گره شروع، قطار 1، قطار 3 و قطار 2 را انتخاب کند به معنی توالی اعزام قطارهای 1، 3 و 2 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 به از بلاک k است. (h_{ijk})

M: یک عدد مثبت به اندازه کافی بزرگ است.

متغیرهای تصمیم گیری:

متغیرهای دو مقداره¹⁷

(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 شده اند می توان آن را از جمله مدل های برنامه ریزی مخلوط عدد صحیح¹⁸ (MIP) در تحقیق در عملیات¹⁹ (OR) دانست.

تابع هدف:

تابع هدف در این مدل حداقل کردن جمع تاخیر قطارها در ایستگاه ها 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 t قطار انتخابی است، 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 (18) تلاقی اتفاق افتاده است:

$$Xa(i, k - 1) + h_{ijk} > Xd(j, k - 1)$$

&

$$Xd(i, k) - h_{ijk} < Xd(j, k)$$

(18)

n گروه 2 تایی در کنار هم برای ساخت جواب همکاری می‌کنند. هر گروه شامل 2 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.

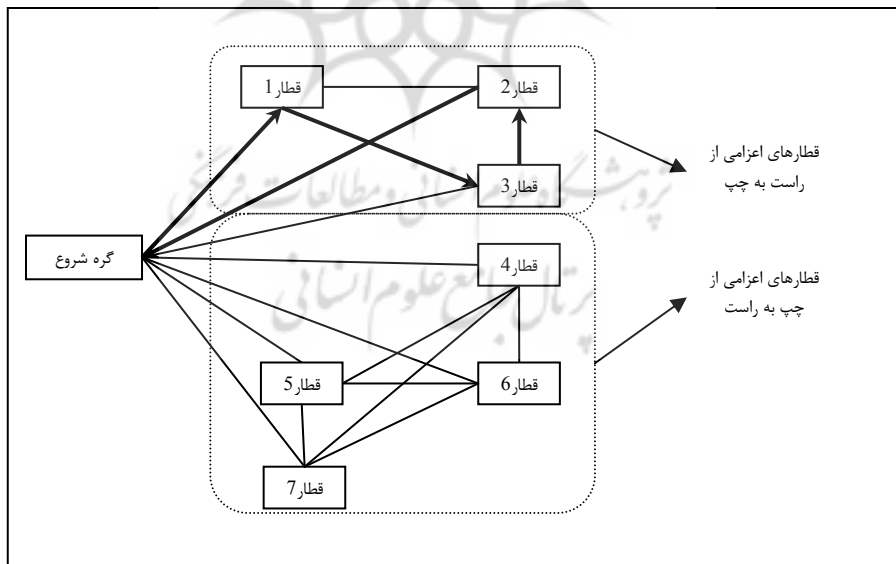
اولین مورچه انتخابی یک قطار را انتخاب می‌کند. زمان سیر، زمان ورود و خروج این قطار تا ایستگاه پایانی محاسبه می‌شود، سپس مورچه دیگر قطار خود را انتخاب می‌کند. زمان ورود و خروج این قطار از هر ایستگاه با توجه به این که با قطار سمت مخالف تلاقی دارد یا نه معلوم می‌شود. اگر قطار انتخابی، قطار اعزامی از ایستگاه چپ باشد در صورت صدق کردن زمانهای به دست آمده در رابطه (16) تلاقی اتفاق افتاده است:

$$Xa(i, k) + h_{ijk} > Xd(j, k)$$

&

$$Xd(i, k - 1) - h_{ijk} < Xd(j, k - 1)$$

(16)



شکل 2. گراف مسئله با 7 قطار

0/1، مقدار فرمون اولیه در مسیرها برابر با 0/000005، پارامتر انتخاب ACS یا q_0 برابر با 0.9 و $\beta = 0$ هستند، همچنین بر اساس تعریف مسئله تعداد مورچه های اجتماع برابر با 2 برابر تعداد قطارها در نظر گرفته شده است و مقدار اولیه ثابت τ_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 4 حساسیت مدت زمان حل مسائل را در دو روش بهینه و الگوریتم پیشنهادی نشان می دهد. در شکل 4-الف حساسیت زمان با تغییر تعداد بلاک و در شکل 4-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:

(20)

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

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 172/6 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 1/75 است:

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

قابل توجه است که در 45 مسئله حل شده مقدار کل تأخیر در اعزام قطارها از هر دو روش تقریباً با هم برابر بود، در حالی که

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 می کند:

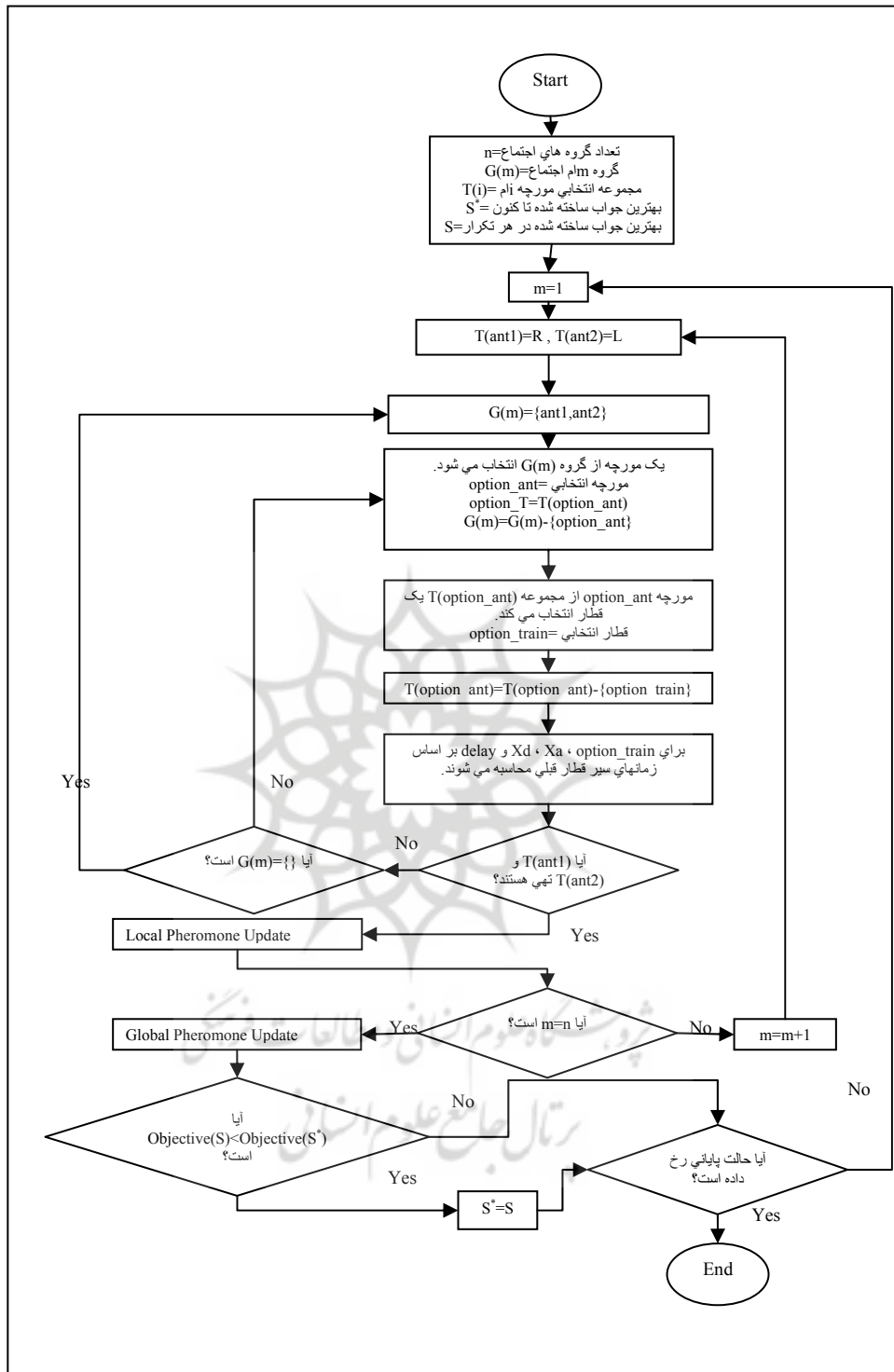
$$Xd(j, k - 1) = Xa(i, k - 1) + h_{ijk} \quad (19)$$

قطارهای انتخابی از مجموعه قطارهای مربوط حذف می شوند. سپس دوباره یک مورچه به طور تصادفی انتخاب می شود. این مورچه از مجموعه خود یک قطار انتخاب می کند. زمان ورود و خروج این قطار در ایستگاه با توجه به توالی آن در گروه خود مشخص می شود. 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 می شود. در صورتی که تلاقی در بلاک فوق اتفاق نیافتاده باشد، زمان ورود و خروج این قطار در بلاک بعدی مشخص می شود. اگر تلاقی در این قسمت اتفاق افتاده باشد رفع می شود، به همین صورت این عملیات ادامه پیدا می کند تا تمام زمانهای ورود و خروج از تمام ایستگاهها مشخص شوند. سپس قطار بعدی توسط مورچه دیگر انتخاب می شود. این روال تا زمانی که مورچهها تمام قطارهای مجموعه خود را انتخاب کنند ادامه پیدا می کند. فلوچارت الگوریتم در شکل 3 نشان داده شده است.

4. تحلیل نتایج مدل

برای تحلیل نتایج، جوابهای حاصل از الگوریتم پیشنهادی با روش دقیق بهینه سازی حل مسئله برنامه ریزی حرکت قطار مقایسه شده اند. برای این منظور محاسبات برای 45 مسئله که شامل تعداد 3 تا 8 قطار و 2 تا 8 بلاک بودند انجام شد. جوابهای دقیق بهینه حل مسائل با نرم افزار بهینه سازی LINGO حاصل شده اند. جدول شماره 2 نتایج حاصل از حل این 45 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 0/3، حداقل زمان توقف در ایستگاهها برابر با 1، ضریب تبخیر عمومی فرمون یا p برابر با 0/1، ضریب تبخیر محلی فرمون یا q برابر با

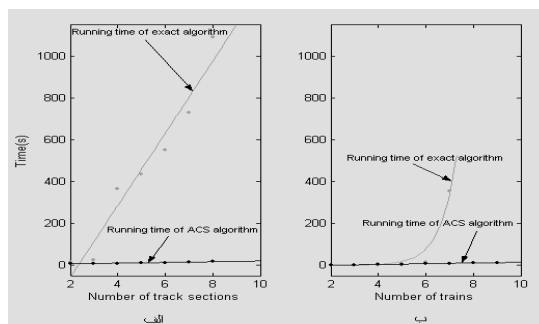
زمان حل روش ACS پیشنهادی صرفه‌جویی‌های زمانی قابل توجهی را در مقایسه با روش حل دقیق آن نشان داده است.



شکل 3. فلوجارت الگوریتم ابتکاری حل مسئله زمان بندی حرکت قطار بر اساس سیستم اجتماع مورچه‌ها

مرحله، بهترین مقدار پارامترها تعیین شده و مساله با این پارامترها حل شده است.

ابتدا مقادیر اولیه پارامترها برابر با مقادیر تعیین شده در قسمت 4 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 10 بار اجرا شده است. پس از این مرحله بهترین مقدار پارامترها تعیین شده و مساله با این پارامترها حل شده است.



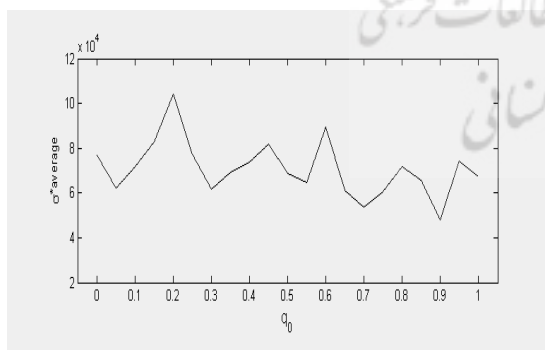
شکل 4. حساسیت مدت زمان حل مسائل در دو روش بهینه و الگوریتم پیشنهادی

5-1-1 پارامتر q_0

در تعیین q_0 از مقدار 0 تا 1 با قدمهای 0/05 بررسی شده و همان گونه که از شکل 5 مشخص است بر اساس کمترین مقدار حاصلضرب میانگین در انحراف معیار در 10 بار اجرای برای هر یک از مقادیر q_0 مقدار مطلوب آن برابر با $q_0=0/9$ در نظر گرفته شده است.

5-1-2 تعیین مقدار ρ

مقدار ρ بر اساس $q_0=0/9$ تعیین شده است. در شکل 6 خلاصه نتایج بر اساس تغییرات از 0 تا 1 با قدمهای 0/05 برای تعیین ρ آورده شده است. بهترین مقدار بر اساس کمترین مقدار میانگین در انحراف معیار در 10 بار اجرا برای هر یک از مقادیر ρ برابر با $\rho=0/350$ به دست آمده است.



شکل 5. نتایج محاسبات مربوط به تعیین مقدار q_0

5. بررسی موردی

در این قسمت برای روشن شدن هر چه بیشتر الگوریتم پیشنهادی مسئله ای با 30 قطار و 4 بلاک حل شده است.

5-1 تعیین پارامترهای الگوریتم ACS

در ابتدا مقادیر اولیه برای پارامترها به شرح زیر و براساس پیشنهاد دوریگو و گامباردلا [39 و 46] در حل مسئله TSP با استفاده از ACS در نظر گرفته شده اند:

$$\rho = 0/1$$

$$\xi = 0/1$$

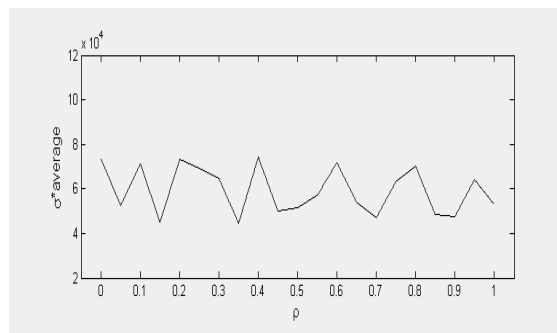
$$\text{مقدار فرمون اولیه در مسیرها} = 0/000005$$

$$q_0 = 0/9$$

همچنین براساس تعریف مسئله تعداد مورچه های اجتماع برابر 60 در نظر گرفته شده است و مقدار اولیه ثابت $\tau_0 = 0/012$ 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. (برای مطالعه بیشتر به دوریگو و گامباردلا [39 و 46] 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 10 بار اجرا شده است. بعد از این

شکل 6. نتایج محاسبات مربوط به تعیین مقدار ρ



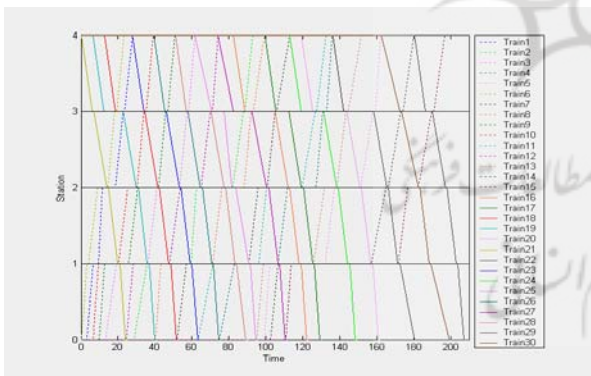
جدول 2. مقایسه نتایج 45 مسئله نمونه با استفاده از روش دقیق بهینه سازی و الگوریتم پیشنهادی

| جواب (جمع کل تأخیر قطارها در ایستگاهها بر حسب ثانیه) | | زمان حل (ثانیه) | | تعداد بلاک سیر | تعداد قطار راست به چپ | تعداد قطار چپ به راست | تعداد قطارها | مسئله |
|--|---------|-----------------|---------|----------------|-----------------------|-----------------------|--------------|-------|
| روش دقیق | روش ACS | روش دقیق | روش ACS | | | | | |
| 5/3 | 5/3 | 0 | 0 | 2 | 1 | 2 | 3 | 1 |
| 16/9 | 16/9 | 0 | 0 | 2 | 1 | 3 | 4 | 2 |
| 33/7 | 35 | 1 | 1 | 2 | 3 | 2 | 5 | 3 |
| 31/9 | 34/8 | 7 | 1 | 2 | 2 | 3 | 5 | 4 |
| 49/4 | 50/7 | 2 | 4 | 2 | 3 | 3 | 6 | 5 |
| 76/9 | 80/3 | 20 | 7 | 2 | 4 | 3 | 7 | 6 |
| 76/7 | 82/6 | 22 | 7 | 2 | 3 | 4 | 7 | 7 |
| * | 124 | * | 8 | 2 | 5 | 3 | 8 | 8 |
| * | 123/8 | * | 8 | 2 | 4 | 4 | 8 | 9 |
| * | 122/3 | * | 8 | 2 | 3 | 5 | 8 | 10 |
| 3/9 | 3/9 | 0 | 0 | 3 | 1 | 2 | 3 | 11 |
| 14/1 | 14/1 | 2 | 1 | 3 | 1 | 3 | 4 | 12 |
| 32 | 35/1 | 1 | 2 | 3 | 3 | 2 | 5 | 13 |
| 29/3 | 30/5 | 1 | 2 | 3 | 2 | 3 | 5 | 14 |
| 50/3 | 50/3 | 4 | 7 | 3 | 3 | 3 | 6 | 15 |
| 78 | 82/4 | 35 | 9 | 3 | 4 | 3 | 7 | 16 |
| 78/5 | 82/8 | 47 | 9 | 3 | 3 | 4 | 7 | 17 |
| * | 121/6 | * | 10 | 3 | 5 | 3 | 8 | 18 |
| * | 114/2 | * | 10 | 3 | 4 | 4 | 8 | 19 |
| * | 116/2 | * | 10 | 3 | 3 | 5 | 8 | 20 |
| 6/6 | 6/6 | 0 | 2 | 4 | 1 | 2 | 3 | 21 |
| 14/2 | 14/2 | 0 | 5 | 4 | 1 | 3 | 4 | 22 |
| 32 | 32 | 1 | 6 | 4 | 3 | 2 | 5 | 23 |
| 31 | 35 | 5 | 6 | 4 | 2 | 3 | 5 | 24 |
| 52/6 | 52/6 | 9 | 8 | 4 | 3 | 3 | 6 | 25 |
| 77/2 | 78/3 | 1495 | 4 | 4 | 4 | 3 | 7 | 26 |
| 81/1 | 83/6 | 97 | 9 | 4 | 3 | 4 | 7 | 27 |
| * | 121/1 | * | 11 | 4 | 5 | 3 | 8 | 28 |
| * | 124/3 | * | 11 | 4 | 4 | 4 | 8 | 29 |
| * | 125/2 | * | 11 | 4 | 3 | 5 | 8 | 30 |
| 3/9 | 3/9 | 0 | 3 | 5 | 1 | 2 | 3 | 31 |
| 12/8 | 12/8 | 3 | 5 | 5 | 1 | 3 | 4 | 32 |
| 27/8 | 27/8 | 1 | 8 | 5 | 3 | 2 | 5 | 33 |
| 30/3 | 31/8 | 6 | 8 | 5 | 2 | 3 | 5 | 34 |
| 46/7 | 46/7 | 17 | 11 | 5 | 3 | 3 | 6 | 35 |
| 70/7 | 71/5 | 1648 | 12 | 5 | 4 | 3 | 7 | 36 |
| 73/6 | 79/5 | 172 | 12 | 5 | 3 | 4 | 7 | 37 |
| * | 121/6 | * | 15 | 5 | 5 | 3 | 8 | 38 |
| * | 99/7 | * | 15 | 5 | 4 | 4 | 8 | 39 |
| * | 121 | * | 15 | 5 | 3 | 5 | 8 | 40 |
| 58/7 | 60/8 | 301 | 15 | 6 | 3 | 4 | 7 | 41 |
| 60/2 | 70/4 | 87 | 13 | 6 | 5 | 2 | 7 | 42 |
| 77/3 | 80/9 | 82 | 15 | 7 | 4 | 3 | 7 | 43 |

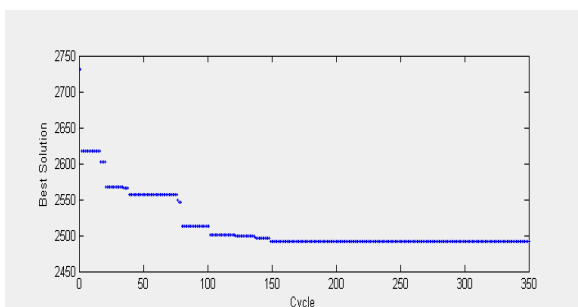
| | | | | | | | | |
|------|------|-----|----|---|---|---|---|----|
| 72/8 | 75/2 | 901 | 15 | 7 | 2 | 5 | 7 | 44 |
| 69 | 72/6 | 557 | 18 | 8 | 3 | 4 | 7 | 45 |

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

بعد از تعیین پارامترها، الگوریتم پیشنهادی برای مسئله ای با 30 قطار اجرا شده است. نمودار حرکت قطارها در شکل 9 نشان داده شده است. نمودار حرکت قطارها موقعیت هر قطار بر روی مسیر به صورت تابعی از زمان نشان می دهد. در این نمودار زمانهای ورود و خروج هر یک از قطارها از ایستگاه های مبدأ، میانی و مقصد نشان داده می شود که مبنای برنامه ریزی و بهره برداری در راه آهن است. شکل 10 نشان دهنده همگرایی در بهبود جواب ها در هر چرخه از اجرای الگوریتم است. مقدار تأخیر پس از همگرایی جوابها در چرخه 152 برابر با 2492.1 واحد زمانی است. شکل 11 میانگین، بیشینه و کمینه جوابهای ساخته شده در هر چرخه را نشان می دهد که تأییدی بر همگرایی جوابها بوده و مکمل شکل 10 است. نمودار شکل 12 انحراف معیار جوابهای ساخته شده در هر چرخه را نشان می دهد که گویای کاهش دامنه تغییرات جوابها در هر چرخه از اجرای الگوریتم است.

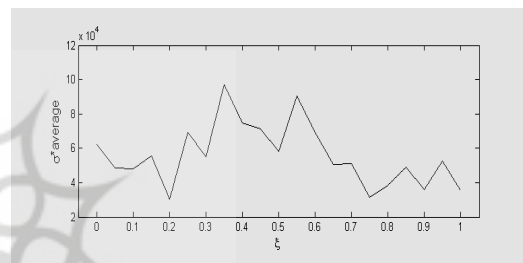


شکل 9. نمودار مسافت زمان حرکت قطارها در مسئله ای با 30 قطار



3-1-5 تعیین مقدار ξ

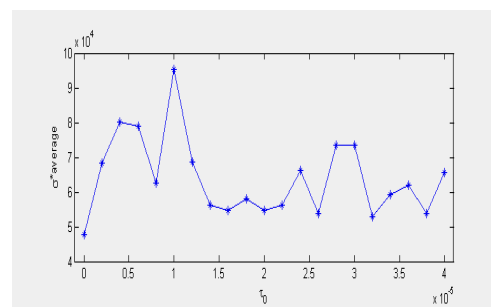
مقدار ξ با توجه به مقادیر $q_0 = 0.9$ و $\rho = 0.350$ تعیین گردیده است. در شکل 7 خلاصه نتایج بر اساس تغییرات از 0 تا 1 با قدمهای 0.05 برای تعیین ξ آورده شده است. بهترین مقدار بر اساس کمترین مقدار میانگین در انحراف معیار در 10 بار اجرا برای هر یک از مقادیر ξ برابر با $0.2 = \xi$ است.



شکل 7. نتایج محاسبات مربوط به تعیین مقدار ξ

4-1-5 تعیین مقدار τ_0

مقدار τ_0 بر اساس مقادیر $q_0 = 0.9$ و $\rho = 0.350$ و $\xi = 0.2$ تعیین گردیده است. در شکل 8 خلاصه نتایج بر اساس تغییرات از 0 تا 0.0004 با قدمهای 0.00002 برای تعیین τ_0 آورده شده است. بهترین مقدار بر اساس کمترین مقدار میانگین در انحراف معیار در 10 بار اجرا برای هر یک از مقادیر τ_0 برابر با $0 = \tau_0$ است.



شکل 8. نتایج محاسبات مربوط به تعیین مقدار τ_0

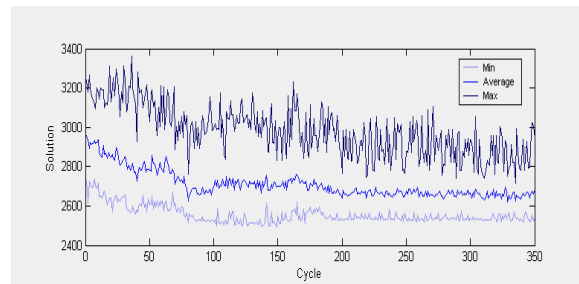
2-5 نتایج اجرای مدل

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.

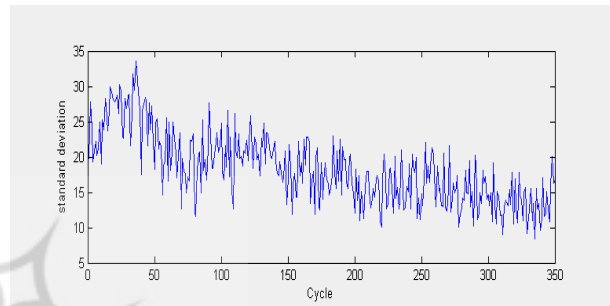
7. مراجع

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.
2. Lindner, T. (2000) "Train schedule optimization in public rail transport", Ph.D Thesis, Technische Universität 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.

شکل 10. همگرایی در بهبود جوابها در هر چرخه از اجرای الگوریتم



شکل 11. میانگین، بیشینه و کمینه جوابهای ساخته شده در هر چرخه



شکل 12. انحراف استاندارد جوابهای حاصله در هر چرخه

6. نتیجه‌گیری

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 تلافی 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

22. Araya, S., Abe, K. (1983) "An optimal rescheduling for online train traffic control in disturber situations", Proc. 22nd 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.405-411.
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
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 Railroad Administration, Department of Transportation, Washington DC.
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.

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 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.
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 evolutionary algorithms", *International Transactions in Operational Research* 11, pp.381-394.
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.

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