یافتن کوتاه‌ترین تور همیلتونی ایران با استفاده از ترکیب الگوریتم سیستم اجتماع مورچه‌ها و جستجوی محلی

کیوان قصیری، استادیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
حسن سرحدی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
Email: ghoseiri@iust.ac.ir

چکیده

مسألة فروشندة دوره‌گرد یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین مسائل در حوزة بهینه‌سازی ترکیباتی است که در آنها کاربردهای حمل و نقلی مهم ترین جایگاه را در بین کاربردهای عملی آن به خود اختصاص می دهند. از آنجا که موفقیت در حل این مسأله نشانة توانمندی در استفاده از آن در حوزه‌های مختلف علوم و مهندسی است، روش‌های متعددی برای حل آن پیشنهاد شده است. در این مقاله، کوتاه‌ترین تور همیلتونی ایران را از حل مسألة فروشندة دوره‌گرد متقارن برای ۳۶۰ نقطة منتخب ایران با استفاده از الگوریتم پیشنهادی ترکیب سیستم اجتماع مورچه‌ها و جستجوی محلی خواهیم یافت. به منظور بررسی کیفیت جواب‌های حاصل، نتایج آن با الگوریتم شناخته شده سیستم اجتماع مورچه‌ها مقایسه خواهد شد. این مقایسه نشان دهندة برتری قابل ملاحظه کیفیت جواب‌های حاصل از الگوریتم پیشنهادی بر کیفیت جواب‌های حاصل از الگوریتم سیستم اجتماع مورچه‌ها است.

واژه‌های کلیدی: مسألة فروشندة دوره‌گرد، کوتاه‌ترین تور همیلتونی ایران، بهینه‌سازی ترکیباتی، اجتماع مورچه‌ها، جستجوی محلی.

۱. مقدمه

مسألة فروشندة دوره‌گرد[1] یکی از معروف‌ترین و پرکاربردترین مسائل در بهینه‌سازی ترکیباتی[2] است. بیان و شرح این مسأله بسیار ساده، اما حل کردن آن بسیار دشوار است. در این مسأله، فروشنده‌ای دوره‌گرد می‌خواهد کم هزینه‌ترین ترتیب بازدید مجموعه‌ای از شهرها را با شروع از یک شهر و بازگشت به همان شهر پیدا کند، به طوری که بقیه شهرها فقط یکبار بازدید شوند[۱]. مسألة فروشندة دوره‌گرد می‌تواند متقارن[3] یا غیر متقارن[4] باشد که در حالت متقارن فاصلة دو شهر به جهت حرکت بستگی ندارد. علاوه بر فروشندة دوره‌گرد معمولی یا کلاسیک که در بالا تعریف شد، این مسأله دارای گونه‌های متعددی است که از آن جمله می‌توان به فروشندة دوره‌گرد با پنجرة زمانی[5]، فروشندة دوره‌گرد دوره‌ای[6]، فروشندة دوره‌گرد سیاه و سفید[7]، فروشندة دوره‌گرد انتخابی[8]، فروشندة دوره گرد با هدف متحرک[9] و ... اشاره کرد. خوانندگان علاقه‌مند برای آشنایی با گونه‌های این مسئله می‌توانند به مرجع [۲] مراجعه کنند. مسألة فروشندة دوره‌گرد یکی از نخستین مسائلی است که NP-Complete بودن آن به اثبات رسیده است[۳] و بنابر این نمی‌توان الگوریتمی یافت که در زمان چندجمله‌ای آن‌را به شکل قطعی حل کند.

مسائل عمومی مسیریابی عموماً در ارتباط با حمل‌ونقل محصولات و یا سفر بر روی مسیرهایی در یک شبکة مفروض با روشی بهینه هستند. موارد زیر از جمله مسائل عمومی مسیریابی هستند :

- توزیع کالاها و خدمات از دپوها به محل مشتریان
- برنامه‌ریزی تولید و توزیع محصولات
- برنامه‌ریزی انبار و توزیع کالاها از دپوها به نمایندگی‌های فروش
- زمان‌بندی خدمه
- حمل و نقل کالاهای نیمه ساخته بین مکان‌های تولید

چنین مسائلی همه روزه در مدیریت و برنامه‌ریزی عملیاتی وسائل نقلیه و خدمه در شبکه رخ می‌دهند. مبداء و منشاء چنین

*تاریخ دریافت ۸۶/۸/۵- تاریخ پذیرش: ۸۷/۱۱/۱۰

مسائلی، مسئلهٔ فروشندهٔ دوره‌گرد کلاسیک است[٤]. از آنجا که هزینه‌های توزیع فیزیکی کالاها حجم قابل توجهی از هزینه‌های توزیع سالانه کالاها را در اقتصاد هر کشوری به خود اختصاص می‌دهند(به عنوان مثال در سال ۱۹۸۳، هزینه‌های توزیع کالاها در حدود ٤٠٠ میلیارد دلار در ایالات متحده آمریکا تخمین زده شده است ، که حدود ١٦٪ از آنها، هزینه‌های توزیع فیزیکی بوده است[٤])، هرگونه کاهش در این هزینه‌ها از طریق بهبود روش‌ها و الگوریتم های حل مسائل مسیریابی، منجر به صرفه جویی قابل توجهی شده و منافع زیادی را به مصرف کنندهٔ نهایی می‌رساند.

در این مقاله برای نخستین بار، مسألهٔ فروشندهٔ دوره‌گرد متقارن (یافتن کوتاه‌ترین تور همیلتونی) برای ٣٦٠ نقطهٔ ایران با دو روش (الگوریتم سیستم اجتماع مورچه‌ها و الگوریتم پیشنهادی ترکیب سیستم اجتماع مورچه‌ها و جستجوی محلی) حل شده و سپس نتایج حاصل از آنها مقایسه و در نهایت پیشنهاداتی برای بهبود کیفیت جواب‌ها ارائه می‌شود.

۲. اهمیت مسأله و پیشینهٔ مطالعات

اهمیت مسألهٔ فروشندهٔ دوره‌گرد در دو زمینه تجلی یافته است؛ کاربردهای عملی و کاربردهای نظری. در زمینهٔ کاربردهای عملی، مسألهٔ فروشندهٔ دوره‌گرد و گونه‌های مختلف آن را می‌توان از پرکاربردترین مسائل در بهینه‌سازی ترکیباتی دانست. همچنان که از نام این مسأله انتظار داریم، نخستین کاربردهای آن در حمل و نقل بوده و در ادامه کاربردهایی در تولید صنعتی پیدا کرده است. به تدریج کاربردهایی از این مسأله در علوم جدیدتر هم به وجود آمده‌اند که از جمله می‌توان به کاربردهای آن در بیوانفورماتیک اشاره کرد. جدول۱ برخی از کاربردهای عملی مسألهٔ فروشندهٔ دوره‌گرد را نشان می‌دهد.

اما در زمینهٔ کاربردهای نظری، مسألهٔ فروشندهٔ دوره‌گرد به دلیل سادگی در بیان و مدل‌سازی و اینکه یکی از نخستین مسائلی بود که NP-Complete بودنش ثابت شد، به محملی برای آزمایش ایده‌های الگوریتمی جدید تبدیل شده است، به طوری که کارآیی اکثر ایده‌های الگوریتمی جدید با اعمال آنها بر مسألهٔ فروشندهٔ دوره‌گرد تعیین می‌شود. نکته قابل توجه دیگر در مورد مسألهٔ فروشندهٔ دوره‌گرد این است که سادگی بیان، سادگی مدل‌سازی و وجود الگوریتم‌هایی که به طور موثری به حل این مسأله می‌پردازند در مجموع باعث شده است که بسیاری از مسائل عملی به شکل یک مسألهٔ فروشندهٔ دوره‌گرد مدل‌سازی و حل شوند. این در حالی است که می‌توان این گونه مسائل را مستقیماً هم مدل‌سازی و حل کرد. اما گستردگی مطالعات در مورد مسألهٔ فروشندهٔ دوره‌گرد و در نتیجه وجود الگوریتم‌های موثر در حل آن باعث شده که محققین در حل بسیاری از مسائل عملی به این شکل از مسألهٔ فروشندهٔ دوره‌گرد استفاده کنند[٥-٦].

یافتن کوتاه‌ترین تور همیلتونی کشورها، یکی از کاربردهای مسألهٔ فروشندهٔ دوره‌گرد است که هم در زمینهٔ نظری و هم در زمینهٔ عملی بسیار حائز اهمیت است.

علاوه بر کاربردهای عملی که یافتن تور همیلتونی کشورها دارد (مثلاً یافتن کوتاه‌ترین تور همیلتونی بین ٥٣٢ سویچ مخابراتی در کشور آمریکا برای شرکت AT&T[٧])، دانشمندان تحقیق در عملیات و علوم رایانه ای عموماً دو هدف زیر را از یافتن تور همیلتونی کشورها دنبال می‌کنند:

- آزمایش ایده‌ها و الگوریتم‌های جدید در حل (قطعی یا تقریبی) این مسأله
- نشان دادن توانمندی در حل این مسأله و استفاده موثر از این مسأله در کاربردهای عملی آن.

این نحوه نگرش به مسأله فروشنده دوره‌گرد، از نخستین روزهای ظهور علم تحقیق در عملیات آغاز شده و تاکنون هم ادامه یافته و قطعاً در آینده هم ادامه خواهد داشت. جدول۲ نشان دهندهٔ تلاش دانشمندان و محققان در یافتن کوتاه‌ترین تور همیلتونی کشورهای مختلف در طی نیم قرن اخیر است.

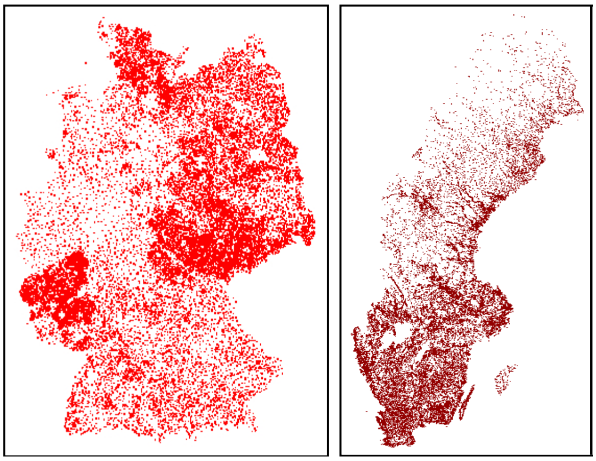
در این جدول، مسألهٔ Dantzig42 با ٤٩ شهر نخستین مسألهٔ فروشندهٔ دوره‌گرد بود که در سال ١٩٥٤ توسط دانتزیک و همکارانش حل شد. مسائل D15112 و Sw24798 از جمله بزرگ ترین مسائل موجود در کتابخانهٔ مسألهٔ فروشندهٔ دوره‌گرد[١٠] هستند که به ترتیب شامل ١٥١١٢ شهر در آلمان و ٢٤٧٩٨ شهر در سوئد می‌شوند. تور بهینه آنها به ترتیب در حدود ٦٦٠٠٠ و ٧٢٥٠٠ کیلومتر طول دارد. محاسبات این دو مسأله به ترتیب بر روی شبکه‌ای از ١١٠ پردازندهٔ موازی در دانشگاه پرینستون (با صرف ٢٢/٦ سال زمان محاسباتی) و شبکه‌ای از ٩٦ پردازندهٔ موازی Xeon 2.8 GHz در دانشکدهٔ مهندسی صنایع و سیستم‌های دانشگاه، جورجیا (با صرف ٨٤،٤ سال زمان محاسباتی) انجام شدند. شکل ۱ تور بهینه این دو مسأله را نشان می‌دهد.

جدول ۱. کاربردهای عملی مسألهٔ فروشندهٔ دوره‌گرد

نام مسأله	تعداد شهر	سال	مرجع
Dantzig42	49	1954	[٦و١٨]
Gr120	120	1977	[٦]
Att532	532	1987	[٦و٧]
Usa13509	13509	1998	[٦]
D15112	15112	2001	[٦]
Sw24798	24798	2004	[٦]

جدول ۲. مهم‌ترین تورهای همیلتونی یافت شده کشورها

زمینه کاربردی	مثال	مرجع
حمل‌ونقل	توزیع درب به درب محصولات، مسیریابی وسائل نقلیه، زمان بندی خدمه، برنامه‌ریزی تخصیص لوکوموتیو، زمان‌بندی حرکت قطار، مسألهٔ فروشندهٔ دوره‌گرد راه آهن	[٤و٨و٩و١٠و١١و١٢]
تولید صنعتی	زمان‌بندی تولید کارگاهی[١١]، زمان‌بندی کارگاه جریانی[١٢]، تولید مدارت مجتمع[١٣]	[٥و٦و٨و١٣]
بیو انفورماتیک	ایجاد دنباله‌های DNA، مسألهٔ همترازی چندگانه دنباله‌ها (MSA)، ایجاد درخت‌های تکاملی	[٦و١٤و١٥و١٦]
سایر زمینه‌ها کاربردی	بهینه‌سازی ترتیب تصویر برداری از اشیای سماوی، مسیریابی خطوط انتقال نیرو، مسیریابی خطوط انتقال داده، کریستالوگرافی با اشعه ایکس	[١و٦و١٧]



شکل ۱. نمایش تور بهینه مسألهٔ Sw24798 (سمت راست) و
مسألهٔ D15112 (سمت چپ)(برگرفته از[٦])

۳. مسألهٔ فروشندهٔ دوره‌گرد

۳-۱ مدل‌سازی

۳-۱-۱ مدل‌سازی عدد صحیح

مدل‌سازی مسألهٔ فروشندهٔ دوره‌گرد بر اساس برنامه‌ریزی عدد صحیح به این شکل است[۱۹] :

فرض کنیم n شهر به شکل رئوس گراف $G=(V,E)$ وجود دارند و فاصله بین دو شهر i و j با d_{ij} نشان داده می‌شود. شهر آغازین با شمارهٔ ۱ و سایر شهرها به ترتیب با شماره‌های ۲ و ۳ و ... شماره‌گذاری می‌شوند. متغیر دودویی x_{ij} را طوری تعریف می‌کنیم که $x_{ij}=1$ باشد. اگر فروشنده بلافاصله پس از شهر i به شهر j برود و در غیر این صورت صفر باشد. به علاوه، برای این که متغیر x_{ii} حتماً صفر شود فرض می‌کنیم که d_{ii} عدد مثبت بسیار بزرگی است. از آنجا که می‌خواهیم کل مسافت پیموده شده توسط فروشندهٔ دوره‌گرد حداقل شود، تابع هدف را به شکل زیر تعریف می‌کنیم:

$$Min\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}x_{ij}d_{ij} \qquad (۱)$$

برای اینکه از هر شهر دلخواه j فقط یک بار خارج شویم (شکل۲) و فقط یکبار وارد شویم(شکل۳)، روابط ۲و۳ را به این شکل تعریف می‌کنیم:

$$\sum_{i=1}^{n}x_{ji}=1 \qquad (۲)$$

$$\sum_{i=1}^{n}x_{ij}=1 \qquad (۳)$$

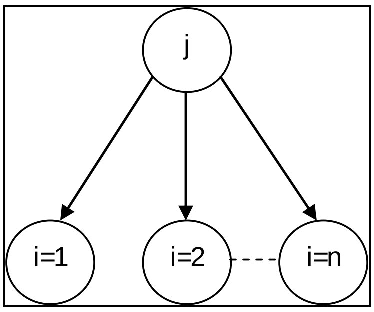
اگر چه در این دو رابطه x_{ii} و x_{jj} ظاهر می‌شوند، اما مطابق توضیحات داده شده مقدار آنها به دلیل حداقل بودن تابع هدف صفر خواهد شد. مسألهٔ برنامه‌ریزی عدد صحیح که تا اینجا با روابط ۱، ۲ و۳ توصیف شده است، همان مسأله تخصیص است که الگوریتم های مؤثری (مانند الگوریتم مجارستانی) برای حل آن وجود دارند. روابط ۲ و ۳ به تنهایی نمی‌توانند امکان ایجاد یک زیر تور یا حلقه را که در شکل٤ دو نمونه از آن نشان داده شده است، از بین ببرند. یک زیر تور Q دارای این ویژگی است که هیچ یال (i,j)وجود ندارد که شهر i از Q را به شهر j از $\overline{Q}=V-Q$ متصل کند. برای از بین بردن امکان به وجود آمدن زیر تورها، محدودیت چهارم را به این شکل اضافه می‌کنیم که به ازای هر زیر مجموعهٔ Q از V، باید حداقل یک یال (i,j) وجود داشته باشد تا Qرا به $\overline{Q}$ متصل کند. به عبارت بهتر خواهیم داشت :

$Q=\{1,2,3\}$ و $\overline{Q}=\{4,5,6\}$

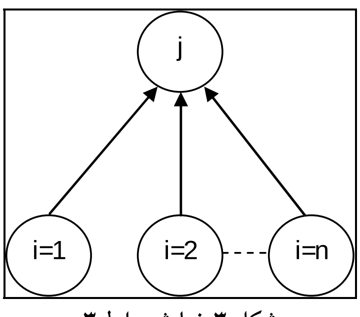
به عنوان مثال در شکل٤ هیچ یالی بین این دو زیر مجموعه وجود ندارد. محدودیت دیگری که می‌توان آن‌را به‌جای محدودیت چهارم بکار برد این است که در هر زیر مجموعه Q از Vتعداد یال‌ها باید کمتر از تعداد رئوس باشد تا امکان ایجاد حلقه در آن زیرمجموعه از بین برود. در شکل٤ مشخص است که در هر دو زیرمجموعه تعداد رئوس و یال‌ها مساوی هستند. بنابراین اگر $|Q|$ تعداد رئوس یک زیرمجموعه از رئوس باشد، تعداد یال‌های آن حداکثر می‌تواند $|Q|-1$ باشد. این محدودیت را می‌توان به این شکل نوشت:

$$\sum_{i\in Q}\sum_{j\in\overline{Q}}x_{ij}\geq 1,\forall Q\subset V \qquad (٤)$$

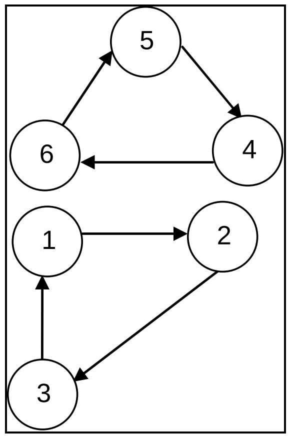
$$\sum_{i\in Q}\sum_{j\in Q}x_{ij}\leq |Q|-1 \qquad (۵)$$



شکل۲. نمایش رابطه ۲



شکل ۳. نمایش رابطه۳



شکل ٤. زیرتورهای یک مسألهٔ فروشندهٔ دوره‌گرد

۳-۱-۲ مدل‌سازی در نظریه گراف

در این بخش با استفاده از اصطلاحات و مفاهیم نظریه گراف مسألهٔ فروشندهٔ دوره‌گرد مدل‌سازی می شود[۲].

فرض کنیم $G=(V,A)$ یک گراف(جهت‌دار یا بدون جهت) است که V مجموعهٔ رئوس و A مجموعهٔ یال‌های آن است. برای هر یال $e\in A$ یک هزینه(وزن) c_e وجود دارد. بدون از دست دادن کلیت مدل‌سازی، می‌توانیم فرض کنیم گراف G یک گراف کامل است (هزینه یال‌هایی که برای تبدیل G به گراف کامل باید اضافه شوند را عدد مثبت بسیار بزرگی قرار می‌دهیم) آنگاه، مسألهٔ فروشندهٔ دوره‌گرد عبارت است از یافتن یک تور همیلتونی(توری که از هر رأس G یک بار عبور کرده و به رأس آغازین برگردد) در گراف G به طوری که مجموع هزینه یال‌های آن حداقل باشد.

در پایان، باید اشاره کرد که مدل‌سازی‌های متعددی از مسألهٔ فروشندهٔ دوره‌گرد ارائه شده که برخی از آنها از کاربرد این مسأله در یک زمینه خاص نتیجه شده است. برای آشنایی با سایر مدل‌سازی‌های این مسأله، خوانندگان علاقه‌مند را به مراجع[۲] و [۲۰] ارجاع می‌دهیم.

۳-۲- روش‌های حل

مسألهٔ فروشندهٔ دوره‌گرد، مسأله‌ای شناخته شده در بهینه‌سازی ترکیباتی است که دارای مدل‌سازی ساده اما حلی دشوار است. یک رویکرد ناآگاهانه به این مسأله، شمارش تمام حالت‌های آن است. در یک مسأله با n رأس(شهر)، از آنجایی که $(n-1)!$ حالت برای ایجاد تور وجود دارد و هر تور هم به زمان $O(n)$ نیاز دارد، الگوریتم از مرتبهٔ $(n-1)!\times O(n)=O(n!)$ است که کاملاً بازدارنده و نا امیدکننده است.

با توجه به گستردگی فضای جواب این مسأله، نیاز به روش‌های آگاهانهٔ شمارش برای احتراز از شمارش تمام فضای جواب ضروری است. این روش‌های آگاهانه بر دو دسته هستند. روش‌های قطعی و روش‌های تقریبی.

۳-۲-۱- روش‌های قطعی

الگوریتم‌های قطعی در حل این مسأله مبتنی بر مدل‌سازی برنامه‌ریزی خطی مخلوط، روش‌های انشعاب و تحدید[۱۴]، و انشعاب و برش[۱۵] هستند. این روش‌ها با بهره‌گیری از قدرت محاسباتی رایانه ها و صرف زمان و هزینهٔ فراوان به یافتن جواب بهینهٔ قطعی می‌پردازند. تمام مسائل بیان شده در جدول۲، با این روش‌ها حل شده‌اند. الگوریتم‌های متعدد انشعاب و تحدید برای حل این مسأله پیشنهاد شده و تحقیقات در این زمینه ادامه دارد [۱ و ۲].

۳-۲-۲- روش‌های تقریبی

یکی از اشکالات الگوریتم‌های قطعی در حل مسألهٔ فروشندهٔ دوره‌گرد، زمان‌گیر و پرهزینه بودن آنها است (به زمان و هزینه صرف شده در حل مسائل D15112 و Sw24798 در بخش دو توجه کنید). این در حالی است که الگوریتم‌های ابتکاری[۱۶] یا تقریبی، جواب‌هایی نزدیک به بهینه را در مسائلی با ابعاد بزرگ در زمان قابل قبول ایجاد می‌کنند. الگوریتم‌های ابتکاری در حل این مسأله را به سه دستهٔ کلی می توان تقسیم کرد[۱] و [۲]:

۱) الگوریتم‌های ابتکاری ایجاد کنندهٔ تور: یک تور را به تدریج با اضافه کردن یک رأس در هر مرحله ایجاد می‌کنند.

۲) الگوریتم‌های ابتکاری بهبود دهندهٔ تور : یک تور ایجاد شده را با تعویض جایگاه رئوس و کاهش هزینه، بهبود می بخشند.

۳) الگوریتم‌های ابتکاری ترکیبی: ابتدا یک تور را ایجاد کرده و سپس آنرا بهبود می‌دهند.

دسته‌ای دیگر از روش‌های تقریبی در حل این مسأله، الگوریتم‌های فوق ابتکاری[۱۷] هستند.

مهم‌ترین الگوریتم‌های فوق ابتکاری استفاده شده برای حل این مسأله عبارتند از :

- الگوریتم حریصانه[۱۸] [۲و۲۱]

- الگوریتم‌های ژنتیک[19] [٤و٢٢و٢٣]
- جستجوی ممنوع[20] [٢و٢٤]
- اجتماع مورچه‌ها[21] [٢٥و٢٦و٢٧]
- شبیه‌سازی آنیلینگ[22] [٢٨]
- شبکه‌های عصبی مصنوعی[23] [٢٩]

٤. الگوریتم فوق ابتکاری اجتماع مورچه‌ها

....

....

....

....

....

....

....

.... +- رفتار مورچه‌ها

حشراتی که زندگی اجتماعی دارند مانند مورچه‌ها، موریانه‌ها و زنبورها وقتی به صورت یک گروه عمل می‌کنند با استفاده از قوانینی ساده مانند تماس، صدا و مواد شیمیایی قادر به برقراری ارتباط و حل مسائل پیچیده می‌شوند. چنین رفتارهایی که در گروه‌های خاصی از حشرات وجود دارد به هوش جمعی[24] معروف شده است. در مورد مورچه‌ها، گونه‌های مختلفی از آنها می‌توانند ماده‌ای شیمیایی به نام فرمون[25] ترشح کنند و با آن اثری را در مسیری که پیموده‌اند باقی گذارند. مورچه‌های بعدی با حس کردن این ماده و دنبال کردن اثر آن، از مسیری که مورچه‌های قبلی در یافتن غذا طی کرده‌اند استفاده می‌کنند. این موضوع با گذشت زمان باعث دستیابی به کوتاه‌ترین مسیر به سوی غذا خواهد شد[٢٧]. به عنوان مثال در شکل ٥ در قسمت A، مورچه‌ها به محلی می‌رسند که در آن باید مسیر حرکت خود را انتخاب کنند. از آنجا که در آغاز هیچ فرمونی وجود ندارد، آنها به صورت تصادفی یکی از دو مسیر بالایی یا پایینی را انتخاب می‌کنند. فرض می‌کنیم که نیمی از آنها مسیر بالا و نیمی دیگر هم مسیر پایین را انتخاب کنند. با فرض یکسان بودن سرعت تمام مورچه‌ها، قسمت‌های C و D نشان می‌دهند که در ادامه چه اتفاقی خواهد افتاد. از آنجا که مسیر پایینی کوتاه‌تر از مسیر بالایی است، در یک دورهٔ زمانی مفروض تعداد مورچه بیشتری می‌توانند از آن عبور کرده، به غذا برسند و مجدداً به سمت لانه برگردند. در نتیجه پس از گذشت مدتی، مقدار بیشتری از فرمون بر روی این مسیر باقی خواهد ماند.

این موضوع باعث می‌شود که مورچه‌های بعدی هنگامی که به این محل می‌رسند تحت تأثیر مقدار بیشتر فرمون در مسیر پایینی قرار گرفته و مسیر پایینی را انتخاب کنند. این تمایل خود باعث افزایش بیش از پیش فرمون روی مسیر پایینی شده و سرانجام تمام مورچه‌ها در این محل از مسیر پایینی عبور خواهند کرد.

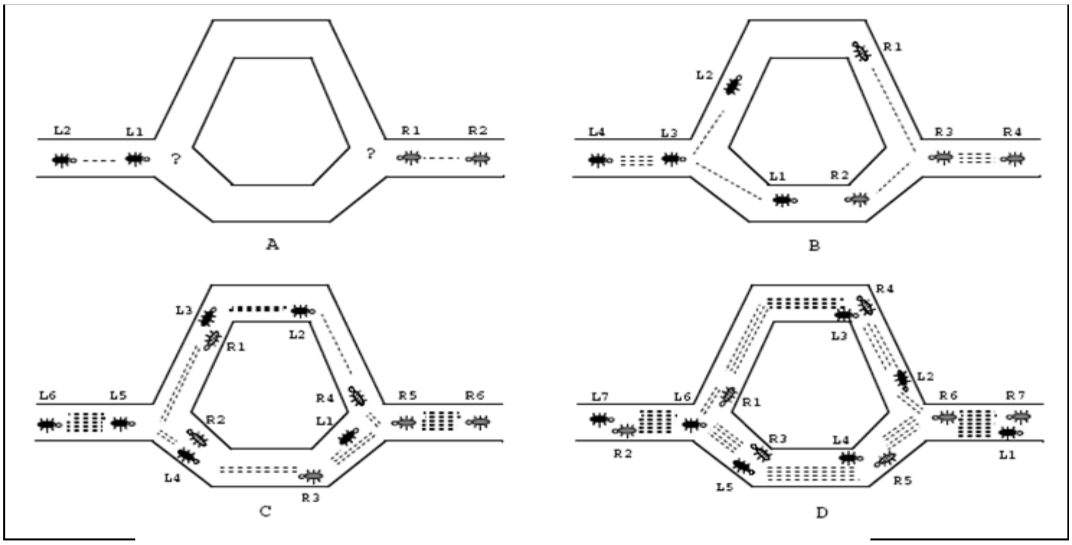
٤-١ سیستم مصنوعی اجتماع مورچه‌ها

یک سیستم مصنوعی اجتماع مورچه‌ها، سیستمی شبیه‌سازی شده از رفتار مورچه‌ها است که از سازوکار همکاری و یادگیری آنها استفاده می‌کند. در این سیستم، از مورچه‌های مصنوعی استفاده می‌شود که پیروی کنندهٔ رفتار مورچه‌های واقعی هستند. مورچه‌های مصنوعی از یک سو دارای ویژگی‌های مورچه‌های واقعی هستند و از سوی دیگر با خصوصیات اضافی که در مورچه‌های واقعی دیده نمی‌شوند، تقویت شده‌اند. مهم‌ترین تفاوت‌های مورچه‌های مصنوعی با مورچه‌های واقعی عبارتند از:

- مورچه‌های مصنوعی دارای حافظه هستند.
- زمان برای آنها از اهمیت بالایی برخوردار است.
- حرکات آنها بصورت گسسته و از حالتی به حالت دیگر صورت می‌گیرد.
- مقدار فرمونی که برجای می‌گذارند می‌تواند متناسب با کیفیت جواب ساخته شده باشد.
- برنامه زمانی برجایگذاری فرمون در آنها مانند مورچه‌های واقعی نیست.
- برای کارآیی بیشتر الگوریتم می‌توانند توانایی‌های بیشتری مانند بهینه‌سازی محلی داشته باشند.

اما مهم‌ترین شباهت‌های مورچه‌های مصنوعی با مورچه‌های واقعی عبارتند از:

- مسیرهایی با فرمون بیشتر را ترجیح می‌دهند.
- در مسیرهایی با طول(هزینه) کمتر، فرمون بیشتری برجای می‌گذارند.
- از یک سیستم ارتباط غیر مستقیم به کمک فرمون استفاده می‌کنند.
- عملیات صورت گرفته در اجتماع در نتیجهٔ همکاری تمام مورچه‌ها است.



شکل ۵. چگونگی رفتار اجتماع مورچه‌ها در مسیریابی(برگرفته از[۲۷])

۲-٤ چگونگی ساخت جواب توسط مورچه‌ها

مورچه‌ها روال‌های سازنده جواب هستند که با حرکت تصادفی بر روی گراف $G(C,L)$ به ساخت جواب می پردازند و در حین حرکت خود باید سیاست‌ها یا محدودیت‌های مسأله را هم رعایت کنند. به هر رأس $c_i \in C$ و هر یال $l_{ij} \in L$ می‌توان مقدار فرمون τ و یک عدد هیوریستیک دیگر مانند η نسبت داد که اگر به رأس $c_i \in C$ نسبت داده شده باشند با τ_i و η_i و اگر به یال $l_{ij} \in L$ نسبت داده شده باشند با τ_{ij} و η_{ij} نمایش داده می‌شوند. τ یا اثر فرمون با گذشت زمان توسط مورچه‌ها بهنگام می‌شود و نقش حافظه را بازی می‌کند و η حاوی اطلاعاتی است که توسط خود مسأله تعریف می‌شود یا در حین اجرای الگوریتم به دست می‌آید. در بسیاری از مواقع η هزینه یا تابعی از هزینه مثل معکوس هزینه است. در ادامه، روند ساخت جواب توسط مورچه‌ها یا چگونگی حرکت آنها را در گراف $G(C,L)$ به دقت توضیح می‌دهیم.

هر مورچهٔ دلخواه k، دارای یک حالت شروع(مبداء حرکت) x_s^k و یک حالت پایانی e^k است. ارتباط مورچه‌ها هم به صورت غیر مستقیم از طریق اطلاعات ذخیره شده در فرمون‌ها برقرار می‌شود. مورچهٔ k در فرآیند انتخاب رأس از حافظه خود یا M^k استفاده می‌کند. به علاوه از این حافظه برای ردیابی مسیر برگشت، برجایگذاری فرمون، ساخت جواب موجه و ارزیابی جواب‌های ایجاد شده هم استفاده می‌شود. به این ترتیب با جمع‌آوری اطلاعات لازم برای تصمیم‌گیری(از طریق فرمون و حافظه)، هر مورچه با یک تصمیم گیری احتمالی رأس بعدی خود را انتخاب می‌کند. یک مورچه زمانی که در حالت $x_r = \{x_{r-1}, i\}$ (حالتی‌که دارای r رأس است و رأس فعلی آن c_i است) قرار گرفت به یک رأس j از همسایگی موجه N_i^k حرکت می‌کند تا حالت $x_{r+1} = \{x_r, j\}$ ایجاد شود. در این الگوریتم ابتکاری و مشتقات آن به جابجایی از یک رأس به رأس دیگری در همسایگی آن، براساس معیاری مشخص اصطلاحاً تغییر حالت[۲۶] و به آن معیار، قانون تغییر حالت[۲۷] گفته می شود. پس از اینکه گره c_j به گره فعلی تبدیل شد، مورچه می‌تواند به بهنگام سازی اثر فرمون برجای مانده بپردازد. به این تغییر در مقدار فرمون که پس از اضافه کردن یک گره رخ می‌دهد، اصطلاحاً بهنگام سازی گام به گام فرمون[۲۸] گویند. در نهایت، مورچه k زمانی متوقف می‌شود که یکی از حالت‌های پایانی e^k آن رخ دهد. به این ترتیب یک اجتماع از مورچه‌ها به صورت غیرهمزمان بر روی گراف مسأله حرکت می‌کنند. این حرکت همراه با تصمیم‌گیری‌های احتمالی است. زمانی‌که یک جواب ساخته شد، مورچه آنرا ارزیابی کرده و مقدار فرمون را در مسیری که استفاده کرده است، بهنگام می‌کند. این فرمون در مراحل بعد اطلاعاتی را در اختیار مورچه‌های دیگر قرار می‌دهد. گذشته از این فعالیت‌ها، دو دستهٔ دیگر از فعالیت‌ها هم در اجتماع مورچه‌ها رخ می‌دهند: تبخیر فرمون[۲۹] و فعالیت‌های خودکار[۳۰]. فرآیند تبخیر بدان معنا است که با گذشت زمان مقدار

فرمون در رئوس(τ_i) و یا یال‌ها(τ_{ij}) کاهش پیدا می‌کند. تبخیر فرمون برای جلوگیری از همگرایی سریع به بهینهٔ محلی طراحی شده است به طوری که با ایجاد یک فراموشی باعث ادامه جستجو در نواحی جدیدی از فضای جواب می‌شود. فعالیت‌های خودکار برای اجرای فعالیت‌های متمرکزی بکار می‌روند که یک مورچه به تنهایی قادر به انجام آن نیست. یک نمونه از این فعالیت‌ها این است که مورچه در حین جستجو قبل از انتخاب مسیر بداند که مسیری‌که قصد انتخاب آن‌را دارد توسط مورچه‌ای که بهترین جواب را ساخته است انتخاب شده است یا خیر. بهنگام‌سازی‌هایی که توسط فعالیت‌های خودکار در مقدار فرمون صورت می‌گیرند بهنگام‌سازی منفصل نامیده می‌شوند. بر اساس چگونگی برجای‌گذاری فرمون، چگونگی تبخیر آن، چگونگی انتخاب رأس بعدی بر اساس رئوس قبلی، الگوریتم‌های متعدد اجتماع مورچه‌ها ایجاد شده است که از جمله می‌توان به الگوریتم سیستم مورچه[۲۵] [۳۱]،الگوریتم سیستم اجتماع مورچه‌ها[۲۷] [۳۲]، الگوریتم سیستم ماکزیمم- مینیمم مورچه[۳۰] [۳۳]، و ..... اشاره داشت که از بین آنها به توضیح الگوریتم سیستم اجتماع مورچه‌ها خواهیم پرداخت.

۴-۳ الگوریتم سیستم اجتماع مورچه‌ها

یکی از الگوریتم‌های مشتق شده از اجتماع مورچه‌ها است که در سال ۱۹۹۶ توسط دریگو و گامباردلا ارائه شد و نسبت به الگوریتم‌های قبل از خود نتایج بهتری ایجاد کرده است. مدل‌سازی مسألهٔ فروشندهٔ دوره‌گرد با این الگوریتم به شکل زیر است[۲۷] :

در حل مسالهٔ فروشندهٔ دوره‌گرد، در ابتدا m مورچه به تصادف بر روی تعدادی رأس قرار می‌گیرند(یک مورچه روی یک رأس). مورچه‌ها به صورت موازی با هم اقدام به ساخت تور می‌کنند. زمانی‌که یک مورچه بر روی رأسی قرار گرفت، بر اساس قانون تغییر حالت به انتخاب رأس بعد و در نهایت ایجاد تور می‌پردازد. به عنوان مثال زمانی‌که مورچه k ام در رأس i قرار دارد، بر اساس فرمول ٦ ابتدا عدد تصادفی q در فاصله $[0,1]$تولید می‌شود و با q_0 (یکی از پارامترهای الگوریتم) مقایسه می‌شود. اگر $q \le q_0$ باشد، رأسی که حداکثر کنندهٔ $(\tau_{ij})^{\alpha}(\eta_{ij})^{\beta}$ باشد از مجموعه همسایگی‌های رأس i انتخاب می‌شود. در غیر این‌صورت رأس بعد با احتمال S انتخاب می‌شود.

در رابطه ٦، $\eta_{ij} = \frac{1}{d_{ij}}$ و α, β پارامترهایی از مسأله هستند که اهمیت نسبی مقدار فاصله و فرمون دو شهر i, j را نشان می‌دهند. $\tau_{ij}(t)$میزان فرمون در یال اتصال دهندهٔ دو رأس i, j در تکرار یا مرحله t ام و N_i^k هم همسایگی‌هایی بازدید نشده توسط مورچهٔ k است زمانی‌که این مورچه در رأس i قرار دارد. با قرار دادن $\alpha = 0$، احتمال انتخاب رأس بعدی تنها به فاصله آن از رأس فعلی منوط می‌شود و الگوریتم کاملاً به یک الگوریتم حریصانه تبدیل می‌شود، در حالی‌که با انتخاب $\beta = 0$ مقدار فرمون در انتخاب رأس بعدی تنها عامل تعیین کننده خواهد بود و این موضوع باعث همگرایی سریع به یک بهینه محلی و توقف جستجو می‌شود. S متغیری تصادفی تولید شده از روی توزیع احتمال فرمول ۷ است. به قانون تغییر حالت به دست آمده از این دو فرمول اصطلاحاً انتخاب شبه تصادفی[۳۴]گفته می‌شود. پس از اینکه یک مورچه رأس بعدی خود را انتخاب کرد، نوبت به مورچه بعدی می‌رسد تا آن هم رأس بعدی خود را انتخاب کند. این عمل آنقدر ادامه می‌یابد تا تمام مورچه‌ها رأس بعدی خود را انتخاب کنند. سپس، نوبت به بهنگام سازی محلی فرمون می‌رسد که بر اساس فرمول۸ انجام می‌شود و در آن τ_0 و ξ مقادیری ثابت هستند.

$$s = \begin{cases} Max(\tau_{ij})^{\alpha} \times (\eta_{ij})^{\beta} & q \le q_0 \\ S & q > q_0 \end{cases} \qquad (٦)$$

$$P_{ij}^{k} = \frac{(\tau_{ij}(t))^{\alpha} \times (\eta_{ij})^{\beta}}{\sum_{l \in N_{ki}} (\tau_{il}(t)) \times (\eta_{il})^{\beta}} \qquad (۷)$$

$$\tau_{ij_k}(t) = (1-\xi) \times \tau_{ij_k}(t-1) + \zeta \times \tau_0 \qquad (۸)$$

در این فرمول i, j رئوسی هستند که به ترتیب توسط مورچه k بازدید شده‌اند یعنی نخست رأس i و سپس(بر اساس انتخاب شبه تصادفی) رأس j . به این ترتیب مقدار فرمون در یال‌هایی که توسط مورچهٔ k پیموده شده است کاهش می‌یابد. این امر به طور نسبی باعث افزایش احتمال انتخاب یال‌هایی می‌شود که تاکنون بازدید نشده‌اند. پس از اینکه مورچه k در یالی‌که به این ترتیب بین دو رأس i, j ساخت، مقدار فرمون را بهنگام کرد، نوبت به سایر مورچه‌ها می‌رسد که در یال‌هایی‌که به این ترتیب

ساخته‌اند مقدار فرمون را بهنگام کنند. این کار ادامه می‌یابد تا تمام مورچه‌ها به این ترتیب تورهای خود را بسازند (به این ترتیب یک تکرار به پایان می‌رسد). در این هنگام بهنگام سازی عمومی فرمون بر اساس فرمول ۹ انجام می‌شود. مقدار $\Delta\tau_{ij}$ بر اساس فرمول ۱۰ تعیین می‌شود که در آن $\cos t_{gb}$ طول(هزینه) بهترین توری است که تاکنون ساخته شده است.

شبه کد الگوریتم ACS هم در شکل٦ نشان داده شده است.

```
Procedure Ant colony system (one iteration)
Set pheromone trails to small constant
While termination condition does not meet do
 Place each ant on initial node randomly
 For i=1 to n do (#nodes)
 For k=1 to m do (#ants)
 Apply state transition rule
 End (ants)
 Apply local update
 End for (one Iteration)
 Global update
End (while)
```

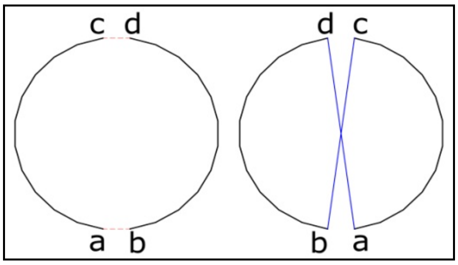
شکل٦. شبه کد الگوریتم ACS

$$\tau_{ij}(t) = (1-\rho)\times\tau_{ij}(t-1) + \rho\times\Delta\tau_{ij} \qquad (٩)$$

$$\Delta\tau_{ij} = \begin{cases} \dfrac{1}{\cos t_{gb}} & (i,j)\in\psi^{gb} \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \qquad (١٠)$$

۵. الگوریتم پیشنهادی: ترکیب الگوریتم سیستم اجتماع مورچه‌ها و جستجوی محلی (ACS + 2-OPT)

ترکیب الگوریتم‌های فوق ابتکاری سیستم اجتماع مورچه‌ها و الگوریتم جستجوی محلی[۳۵] رویکردی موفقیت آمیز در حل مسائل دشوار بهینه‌سازی ترکیباتی و از جمله مسألهٔ فروشندهٔ دوره‌گرد است. این رویکرد با استفاده از قابلیت‌های هر دو روش به موفقیت‌های فراوانی در حل مسائل معیار فروشندهٔ دوره‌گرد نائل آمده است [۲۲ و ۲۳]. الگوریتم جستجوی محلی بکار رفته در این ترکیب، الگوریتم 2-OPT است. در این الگوریتم ابتدا، تور در محل دو یال شکسته می‌شود. لبه‌های این دو یال به صورت ضربدری به هم متصل می‌شوند. اگر این تغییر منجر به بهبود(کاهش) در تابع هدف شود، به تور اعمال می‌شود. در غیر این‌صورت، این تغییر در نظر گرفته نمی‌شود و به دنبال شکستن دو یال دیگر از این تور می‌رویم. این کار آنقدر تکرار می‌شود تا با شکستن هیچ دو یالی دیگر نتوان تابع هدف را کاهش داد. در این حالت به کمینهٔ محلی رسیده‌ایم[۲۱]. شکل۷ چگونگی عملکرد الگوریتم ابتکاری 2-OPT را نشان می‌دهد. شبه کد ترکیب الگوریتم سیستم اجتماع مورچه‌ها و جستجوی محلی در شکل۸ نشان داده شده است.



شکل۷. الگوریتم جستجوی محلی 2-OPT

در الگوریتم پیشنهادی (ترکیب الگوریتم سیستم اجتماع مورچه‌ها و جستجوی محلی)، برای نخستین بار در ادبیات موضوع، پس از اینکه تمام مورچه‌ها جواب‌ها (تورهای) خود را ساختند (زمانی که یک تکرار به پایان می‌رسد) از الگوریتم جستجوی محلی 2-OPT برای تبدیل آنها به بهینه محلی استفاده می‌شود. در ادامه، از جواب‌های بهینه محلی برای بهنگام سازی عمومی فرمون استفاده می‌شود. استفاده از جواب‌های بهینه محلی برای بهنگام سازی عمومی فرمون باعث می‌شود که فرمون بیشتری بر روی یال‌های جواب‌های بهینه محلی باقی بماند و جستجو به سوی چنین جواب‌هایی هدایت شود. اگر چه این امر می‌تواند باعث همگرایی زود هنگام مورچه‌ها به سوی جواب‌های بهینه محلی شود، اما به دلیل ماهیت احتمالی انتخاب رأس بعد (که بر اساس فرمول‌های ٦ و ۷ انجام می‌شود) عملاً خطر همگرایی زودهنگام به جواب‌های بهینه محلی از بین می‌رود. شکل ۸ شبه کد الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد.

```
Procedure Ant colony system (one iteration)
Set pheromone trails to small constant
While termination condition does not meet do
 Place each ant on initial node
 For i=1 to n do (#nodes)
 For k=1 to m do (#ants)
 Apply state transition rule
 End (ants)
 Apply local update
 End for (one Iteration)
 Local Search (for all tours made by ants)
 Global update
End while
```

شکل ۸. الگوریتم ترکیبی ACS و جستجوی محلی

جدول۳. طول و عرض جغرافیایی ۵ نقطه منتخب

	ACS	ACS + 2-OPT
میانگین طول تور (کیلومتر)	۲٦۵۳۸,۷۳۲۰۳	۱۹۰۸۷,٤۳٤٤۵
کوتاه‌ترین طول تور (کیلومتر)	۲٤۸٦۸,۷۹۸۵	۱۸۹۳۲,٦۱۱۳
زمان حل (ثانیه)	٤۵٦۲	۵۵۲۳

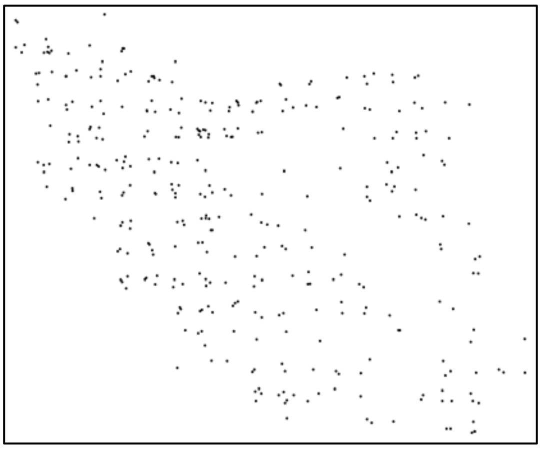
جدول٤. ماتریس فاصله ۵ نقطه منتخب(کیلومتر)

شماره	۱	۲	۳	٤	۵
۱	–	۷,۱۳٦۱	٤۹۰,۸۳	۸٤۳,۹۲	٦۱۱,۰۹
۲	۷,۱۳٦۱	–	٤۸۳,۸۱	۸۵۰,۸۹	٦۱۸,۰۳
۳	٤۹۰,۸۳	٤۸۳,۸۱	–	۱۳۱۰,۳	۱۰۷۸,۷
٤	۸٤۳,۹۲	۸۵۰,۸۹	۱۳۱۰,۳	–	۲۳۳,۱۳
۵	٦۱۱,۰۹	٦۱۸,۰۳	۱۰۷۸,۷	۲۳۳,۱۳	–

٦. مسألهٔ ۳٦۰ شهر ایران

با توجه به مباحث مطرح شده در قسمت۲، مسألهٔ یافتن کوتاه‌ترین تور همیلتونی در بین ۳٦۰ شهر ایران به عنوان نمادی از توانایی در حل این مسأله و برای آزمودن الگوریتم پیشنهادی در مقابل الگوریتم شناخته شده سیستم اجتماع مورچه‌ها ارائه و حل شده است. بدیهی است که انتخاب ۳٦۰ نقطه برای محاسبه تور همیلتونی ایران بر اساس محدودیت‌های زمان و به ویژه منابع محاسباتی در دسترس صورت گرفته است و در صورت فراهم بودن منابع محاسباتی بیشتر و به ویژه امکان استفاده از پردازش‌های موازی، می‌توان تورهای همیلتونی با تعداد بیشتری شهر را برای ایران حل کرد. در این مسأله، ابتدا ۳٦۰ نقطه در ایران بر اساس پارامترهای اقتصادی و اجتماعی (موقعیت جغرافیایی، جمعیت، وضعیت اقتصادی و صنعتی، موقعیت سیاسی) انتخاب شده‌اند. سپس طول و عرض جغرافیایی این نقاط استخراج شده [۳۱] و در نهایت فاصلهٔ جغرافیایی[۳٦]– فاصله بر روی کره‌ای به شعاع۶۳۷۸,۳۸۸ کیلومتر– این نقاط با هم(برحسب کیلومتر) در قالب یک ماتریس ۳٦۰ در ۳٦۰ محاسبه شده است. جدول ۳ طول و عرض جغرافیایی یک نمونهٔ ۵ تایی از ۳٦۰ شهر ایران را نشان می‌دهد.

در جدول ٤، ماتریس فاصلهٔ ۵ در ۵ برای آن ۵ شهر نشان داده شده است. در شکل۹، ۳٦۰ نقطهٔ منتخب ایران در مختصات دو بعدی نمایش داده شده‌اند.



شکل۹. نمایش ۳٦۰ نقطه منتخب ایران در مختصات دو بعدی

۷. حل مسأله

برای حل این مسأله، از دو روش استفاده شده است. در روش اول از الگوریتم فوق ابتکاری سیستم اجتماع مورچه‌ها[۲۷] و در روش دوم از الگوریتم پیشنهادی (ترکیب الگوریتم فوق ابتکاری سیستم اجتماع مورچه‌ها و جستجوی محلی) استفاده شده است.

۸. نتایج حاصل از حل مسأله

برای حل مسأله، الگوریتم سیستم اجتماع مورچه‌ها و الگوریتم پیشنهادی در زبان برنامه‌نویسی MATLAB پیاده‌سازی شده‌اند. سپس پارامترهای الگوریتم فوق ابتکاری سیستم اجتماع مورچه‌ها براساس نتایج [۲۷] به شرح زیر تنظیم شده است:

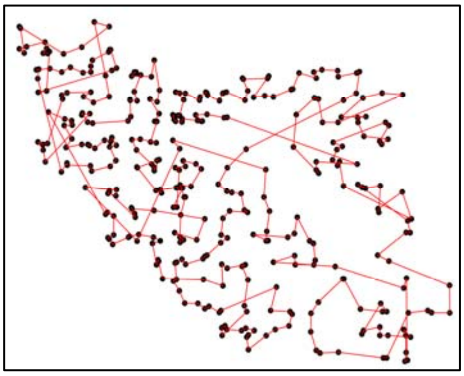
$$\alpha = 1 \quad \beta = 2$$
$$q_0 = 0.9 \quad \xi = 0.1$$
$$\tau_0 = \frac{1}{n \times L_{nn}} \quad m = 20 \quad \rho = 0.1$$

(L_{nn} طول تور ایجاد شده با یک الگوریتم ابتکاری ایجاد کننده تور به نام نزدیکترین همسایه[۲۱] است). نتایج حاصل از حل مسألهٔ فروشندهٔ دوره‌گرد متقارن در قالب میانگین طول تور (برحسب کیلومتر)، کوتاه‌ترین طول تور (برحسب کیلومتر) و همچنین میانگین زمان حل(برحسب ثانیه) برای ۳٦۰ شهر ایران با هر یک از دو روش فوق پس از ۲۰ بار اجرا در جدول ۵ نشان داده شده است. تور حاصل از این دو روش در شکل‌های ۱۰ و

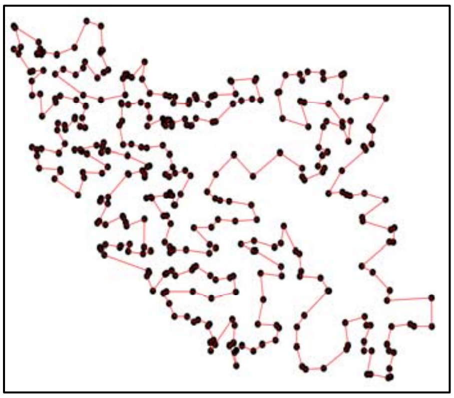
۱۱ نشان داده شده است. همان طور که در این دو شکل مشخص است، در تور حاصل از الگوریتم سیستم اجتماع مورچه‌ها یال‌های متقاطع زیادی وجود دارد. وجود هریک از این تقاطع‌ها نشان دهندهٔ این است که امکان بهبود این تور وجود دارد. هر اندازه یک تور به تور بهینه نزدیک‌تر باشد تعداد چنین تقاطع‌هایی کمتر شده به‌طوری‌که در تور بهینه هیچ تقاطع‌هایی وجود ندارد. در واقع برای تشخیص بصری یک تور با کیفیت از یک تور بی کیفیت می‌توان از این روش استفاده کرد. تور حاصل از الگوریتم پیشنهادی (ترکیب الگوریتم سیستم اجتماع مورچه‌ها و جستجوی محلی) دارای تقاطع‌های بسیار کمتری است و به تبع (همان طور که در جدول ۵ مشخص است) دارای کیفیت بهتری هم است.

جدول۵. نتایج حل مسألهٔ ۳۶۰ شهر ایران با دو روش

شماره	نام	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
١	بابل	٥٢,٥'	٣٦,٤'
٢	بابلسر	٥٢,٤٥'	٣٦,٤٥'
٣	بیله سوار	٤٨,٢٠'	٣٩,٢٢'
٤	بردسیر	٥٦,٣٥'	٢٩,٥٣'
٥	بافق	٥٥,٢٥'	٣١,٤'



شکل۱۰. نمایش بهترین تور حاصل از ACS



شکل۱۱. نمایش بهترین تور حاصل از ACS + 2-OPT

۹. نتیجه‌گیری

مسألهٔ فروشندهٔ دوره‌گرد از مهم‌ترین و پرکاربردترین مسائل در حوزه بهینه‌سازی ترکیباتی است که روش‌های متعدد برای حل آن پیشنهاد شده است. از آنجا که موفقیت در حل این مسأله نشانهٔ توانمندی در استفاده از آن در حوزه‌های مختلف علوم و مهندسی (از جمله حمل‌ونقل) است، در این مقاله برای نخستین بار به حل مسألهٔ فروشندهٔ دوره‌گرد متقارن برای ۳۶۰ نقطهٔ منتخب ایران با ترکیب الگوریتم سیستم اجتماع مورچه‌ها و جستجوی محلی و مقایسه نتایج حاصل با نتایج الگوریتم سیستم اجتماع مورچه‌ها پرداخته شد. این مقایسه نشان دهندهٔ برتری قابل ملاحظهٔ کیفیت نتایج ترکیب الگوریتم سیستم اجتماع مورچه‌ها و جستجوی محلی بر نتایج الگوریتم سیستم اجتماع مورچه‌ها بود. بر اساس نتایج [۲۷]، الگوریتم سیستم اجتماع مورچه‌ها به تنهایی در حل مسائلی با ابعاد کوچک در مقایسه با سایر الگوریتم‌های تقریبی بسیار موفق بوده است. اما در مورد مسائلی با ابعاد بزرگ تر (مانند مسألهٔ ۳۶۰ شهر ایران) حتماً این الگوریتم باید به کمک سایر ایده‌ها و روش‌های حل تقویت شود. برتری قابل ملاحظهٔ الگوریتم پیشنهادی بر الگوریتم سیستم اجتماع مورچه‌ها موید موفق بودن رویکرد ترکیبی اتخاذ شده در حل این مسألهٔ دشوار بهینه‌سازی ترکیباتی است. دشواری این مسأله (علی‌الخصوص مسائلی با ابعاد بزرگ) استفاده از نقاط قوت روش‌های متعدد (در قالب یک الگوریتم ترکیبی) در حل آن را ضروری می‌سازد.

در انجام تحقیقات آتی پیشنهادات زیر ارائه می‌شوند :

۱. استفاده از زبان‌های برنامه‌نویسی سطح پایین‌تر مانند C++ برای دستیابی به سرعت بیشتر در حل مسأله.

۲. استفاده از الگوریتم‌های جستجوی محلی قوی‌تر مانند لین- کرنیگان[۳۲] در ترکیب الگوریتم سیستم اجتماع مورچه‌ها و جستجوی محلی برای دستیابی به کیفیت بالاتر جواب.

۳. آزمایش سایر روش‌های ارتباط و تبادل اطلاعات میان مورچه‌ها (مانند روش‌های توالی سری و یا ترکیب سری و موازی بین مورچه‌ها).

٤. استفاده از سایر روش‌ها در تنظیم پارامترهای الگوریتم سیستم اجتماع مورچه‌ها.

٥. استفاده از سایر روش‌ها- قطعی، ابتکاری و فوق ابتکاری- در حل مسألهٔ ۳۶۰ شهر ایران و مقایسهٔ نتایج حاصل از آنها با نتایج حاصل در این مقاله.

۱۰. تشکر و قدردانی

در پایان، جا دارد از داوران محترم ناشناس کـه نظراتـشان باعـث بهبود و پربارتر شدن این مقاله گردید قدردانی کنیم.

۱۱. پانویس‌ها

1- Traveling Salesman Problem
2- Combinatorial Optimization
3- Symmetric
4- Asymmetric
5- Traveling Salesman Problem with Time Windows
6- Period Traveling Salesman Problem
7- Black and White Traveling Salesman Problem
8- Selective Traveling Salesman Problem
9- Moving Target Traveling Salesman Problem
10- TSPLIB
11- Job Shop Scheduling
12- Flow Shop Scheduling
13- Integrated Circuits
14- Branch and Bound
15- Branch and Cut
16- Heuristics
17- Metaheuristics
18- Greedy Algorithm
19- Genetic Algorithms
20- Tabu Search
21- Ant Colonies
22- Simulated Annealing
23- Artificial Neural Networks
24- Stigmergy
25- Pheromone
26- State Transition
27- State Transition Rule
28- Step by Step Pheromone Update
29- Pheromone Evaporation
30- Daemon
31- Ant System(AS)
32- Ant Colony System(ACS)
33- MAX-MIN Ant System(MMAS)
34- Pseudo Random Proportional Rule
35- Genetic Local Search
36- Geometric Distance

۱۲. مراجع

1. Paralos P.M, Resende M.G.C. (2002) "Handbook of applied optimization" , Oxford University Press, pp.616-624

2. Gutin, G. and Punnen, A. P. (2002) "The traveling salesman problem and its variations", Combinatorial Optimization, Vol. 12, Kluwer Academic.

3. Garey, M. R., Johnson, D. S. (1979) "Computers and intractability : A guide to the theory of NP-Completeness ", Freeman

4. Chong, Y.N. (2001) "Heuristic algorithms for routing problems ", Ph.D Thesis, School of Mathematics and Statistics, Curtin University of Technology, Australia

5. Tapan, P. B, Gupta , J. N.D, Kandarajah, C. S (2006) "A review of TSP based approaches for flowshop scheduling", European Journal of Operational Research, 169, pp. 816-854.

6. www.tsp.gatech.edu, visited in 2005-6

7. Padberg, M., Rinaldi, G (1987) "Optimization of a 532-city symmetric traveling salesman problem by branch and cut", Operations Research Letters, 6, pp. 1-7

8. Lenstra, J. K., Rinnooy Kan, A. H. G. (1975) " Some simple applications of the traveling salesman problem", Operational Research Quarterly, Vol. 126, No.4, Part 1, pp. 717-733

9. Chi-Kong Lee, Chao-Hui, Chen (2003), "Scheduling of train driver for Taiwan Railway Administration", Journal of the Eastern Asia Society of Transportation Studies, Vol. 5,pp.292-306.

10. Kocjan, W. (2001) "Heuristic methods for routing and scheduling "SICS Technical Report T2001-17

11. Ghoseiri, K., Morshedsolouk, F. (2006) "ACS-TS: train scheduling using ant colony system," Journal of Applied Mathematics and Decision Sciences.

12. Hadjicharalambous, G., Pop, P., Pyrga, E. Tsaggouris, G. and Zaroliagis, C. (2007) "The railway traveling salesman problem", Algorithmic methods for railway optimization ,Proc. ATOMS, 2004, Lecture Notes in Computer Science ,Springer Verlag, Vol. 4359.

13. Picard, J. C, Queyranne, M. (1978) "The time-dependant traveling salesman problem and its application to the tardiness problem in One- machine Scheduling", Operations Research, Vol. 26, No.1, Scheduling, pp. 86-110

14. Agrawala, R., Applegate ,D. L., Maglott, D., Schuler, G. D. and Schaffer, A.A. (2000) "A fast and scalable radiation hybrid map construction and integration strategy", Genome Research, Vo.10, Issue 3, pp. 350-364.

15. Korostensky, C. and Gonnet, G. (1999) "Near optimal multiple sequence alignments using a traveling salesman problem approach", Proceedings of the String Processing and Information Retrieval Symposium & International Workshop on Groupware.

16. Korostensky, C. and Gonnet, G. H. (2000) "Using traveling salesman problem algorithms for evolutionary tree construction", Bioinformatics, Vol.16, no.7, pp. 619-627

17. Bailey, C.A., Maclain, T.W. and Beard , R.W. (2000) "Fuel saving strategies for separated spacecraft Interferometry", AIAA Guidance, Navigation and Control Conference.

18. Dantzig, G., Fulkerson, R., Johnston, S. (1954) "Solution of a large-scale traveling salesman problem", Operations Research, 2, pp. 393-410

19. Salkin, M., Mathur, K. and Has, R. (1989) "Foundations of integer programming", Prentice Hall, pp. 91-104

20. Orman, A.J. and William, H.P. (2007) "A survey of different integer programming formulations of the traveling salesman problem", Advances in Computational Management Science, Springer, Berlin.

21. Johnson, D. S. and McGeoch, L. A. (1997) "The traveling salesman problem: A case study in local optimization", Local Search in Combinatorial Optimization.

22. Freisleben, B., Merz P. (1996) "A genetic local search algorithm for solving symmetric and asymmetric traveling salesman problems", International Conference on Evolutionary Computation, pp. 616-62

23. Freisleben B., Merz P. (1996) "New genetic local search operators for the traveling salesman problem," Conference on Parallel Problem Solving from Nature, pp. 890-899

24. Fiechter, C. N. (1994) "A parallel tabu search algorithm for large traveling salesman problem," Discrete Applied Mathematics and Combinatorial Operations Research and Computer Science, 51, pp. 243-267

25. Gambardella, L. M. and Dorigo, M. (1996) "Solving symmetric and asymmetric TSPs by ant colonies", in Proc. IEEE Conf. On Evolutionary Computation, ICEC96, pp. 622-627, IEEE Press

26. Dorigo, M. and Di Caro, G. (1999) "Ant algorithms for discrete optimization", Artificial Life 5, no.2, pp. 73-81

27. Dorigo, M. and Gambardella, L. M. (1997) "Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem" IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 1, pp. 53-66

28. Kirkpatric, S. and Gelatt, C. D. and Vecchi, M. P. (1983) "Optimization by simulated annealing", Science, Vol. 220, pp.671-680.

29. Aarts, E.H.L. and Stehouwer, H.P. (1993) "Neural networks and the traveling salesman problem", in Proc. Int. Conf. on Artificial Neural Networks", pp. 950-955, Springer-Verlag

30. Stutzle, T., Hoos, H. H. (2000) " MAX-MIN Ant System", Future Gen. Comput. Systems 16, pp. 889-914.

۳۱. "اطلس راه‌های ایران" (۱۳۸۵)، انتشارات گیتاشناسی.

32. Lin, S. , Kernighan, B. (1973) “ An effective heuristic algorithm for the traveling salesman problem", Operation Research, Vol. 21, pp. 498-516.