

## Modified Ant Colony Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Time Windows

M. Taghavifard\*, K. Sheikh & A. Shahsavari,

M. Taghavifard, Assistant Prof., Allame Tabatabaei Univ., Tehran-Iran, dr.taghavifard@gmail.com

K. Sheikh, Industrial Engineering Dept., Faculty of Graduate Studies, Azad Univ., Tehran South Branch, keyvansheikh@gmail.com

A. Shahsavari, Industrial Engineering Dept., Faculty of Graduate Studies, Azad Univ., Sharian61@gmail.com

### Keywords

Vehicle Routing Problem with Time Windows, Ant Colony Algorithm, Solomon test-problems

### ABSTRACT

*Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW) is an NP-Complete Optimization Problem. Even finding an optimal solution for small size problems is too hard and time-consuming. The objective of VRPTW is to use a fleet of vehicles with specific capacity to serve a number of customers with dissimilar demands and time window constraints at minimum cost, without violating the capacity and time window constraints. This problem has been solved with a number of heuristic and meta-heuristic solution algorithms and optimal or near optimal solutions gained. In this paper, a modified Ant Colony algorithm is proposed. In this algorithm we tried to simplify the solution procedure and computational complexities of ant colony meta-heuristic. To gain this capability, we sacrificed some computational accuracy. Testing the solution procedure on the Solomon test-problems showed that this algorithm is capable of generating relatively good solutions.*

© (نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید) شماره ۲، جلد ۲۰، ناستان ۱۳۸۸

## ارائه روش اصلاح شده کلونی مورچگان جهت حل مسئله مسیریابی وسایل نقلیه به همراه پنجره های زمانی

محمد تقی تقی فرد، کیوان شیخ و آرین شهسواری

### چکیده:

مسئله مسیریابی وسایل نقلیه به همراه پنجره های زمانی، در زمرة مسائل NP-Complete می باشد، بگونه ای که حتی یافتن یک جواب بهینه برای ابعاد کوچک آن بسیار دشوار و زمانبر است. هدف این مسئله بکارگرفتن ناوگانی از وسایل نقلیه با ظرفیت های معین جهت خدمت دهی به تعداد معینی از مشتریان با تقاضاهای متفاوت و محدودیت های زمانی متفاوت می باشد، بگونه ای که هزینه کمینه شده و ظرفیت ها و نیز پنجره زمانی نقض نگردد. این مسئله تاکنون توسط بسیاری از روش های حل ابتکاری و فرالبتکاری مورد حل واقع شده و جوابهای بهینه یا نزدیک به جواب بهینه

### کلمات کلیدی

مسئله مسیریابی  
وسایل نقلیه به همراه  
پنجره های زمانی،  
کلونی  
مورچگان، نمونه  
Solomon  
مسائل

تاریخ وصول: ۸۶/۸/۲۲  
تاریخ تصویب: ۸۷/۱۰/۱۵

دکتر محمد تقی تقی فرد، استادیار دانشگاه علامه طباطبائی، dr.taghavifard@gmail.com  
کیوان شیخ، کارشناس ارشد مهندسی صنایع، دانشکده تحصیلات تکمیلی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، keyvansheikh@gmail.com  
آرین شهسواری، کارشناس ارشد مهندسی صنایع، دانشکده تحصیلات تکمیلی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، Sharian61@gmail.com

حاصل شده است. در این مقاله نوع اصلاح شده الگوریتم کلونی مورچگان پیشنهاد گردیده و در آن سعی شده تا حد ممکن از پیچیدگی های محاسباتی اجتناب و سهولت روش حل فراهم گردد؛ البته درنظر گرفتن چنین قابلیتی منجر به از دست دادن مقدار کمی از دقت محاسباتی شده است. با این حال اجرای الگوریتم پیشنهادی بر روی تعدادی از نمونه مسائل Solomon آشکار نمود که این الگوریتم توانایی تولید جواب های نسبتاً خوب را دارد می باشد.

تعداد معینی از مشتریان با تقاضاها و محدودیت های زمانی متفاوت، و شبکه ای که دپو مرکزی را به تمامی این مشتریان ارتباط می دهد، می باشد. برای سادگی، دپو مرکزی را به عنوان "مشتری شماره صفر" درنظر گرفته و با این حساب تعداد کل مشتریان برابر با  $N+1$  می باشد. رویکرد مسیریابی هر وسیله نقلیه بدین صورت است: از دپو حرکت را آغاز می نماید، مشتریان را ملاقات می کند و در نهایت به دپو مرکزی باز می گردد.

هر مشتری  $i$  دارای تقاضای  $m(i)$  می باشد و تنها می تواند یکبار و توسط تنها یک وسیله نقلیه ملاقات شود. وسیله نقلیه  $k$  دارای ظرفیت  $q(k)$  می باشد و  $(k)$  باید بزرگتر و یا مساوی با مجموع کل تقاضای تمامی مشتریانی باشد که این وسیله آنها را ملاقات می نماید. اضافه بار منوع می باشد. پنجره زمانی بدین معنا است که هر مشتری دارای یک بازه زمانی از پیش تعريف شده است که شامل زودترین زمان ورود  $(i)e(i)$  و دیرترین زمان ورود  $(i)l(i)$  برای وسایل نقلیه، جهت ملاقات آن مشتری می باشد. وسایل نقلیه می باشند قبل از دیرترین زمان ورود  $(i)l(i)$  به محل مشتری برسند و اگر قبل از زودترین زمان ورود  $(i)e(i)$  به محل مشتری برسند، آنگاه باید منتظر بمانند و در اینجا زمان انتظار  $(i)w(i)$  بوجود می آید. هر مشتری دارای زمان سرویس  $(i)f(i)$  می باشد که در برگیرنده زمان تخلیه بار بارگیری کالاها می باشد. پنجره زمانی دپو بدین معناست که هر وسیله که زمان  $(0)e(0)$  از دپو خارج می شود، باید قبل از زمان  $(0)l(0)$  به آن بازگردد.

مسافت بین تمامی مشتریان براساس فاصله مستقیم الخط اقلیدوسی محاسبه می شود و سرعت حرکت هر وسیله برابر با یک واحد مسافت در هر واحد زمان می باشد. این فرض باعث سهولت حل مسئله می شود. مدل ریاضی مسئله مسیریابی وسائل نقلیه به همراه پنجره های زمانی ذیلاً ارائه شده است [۲، ۴]:

$$\text{Minimize} \quad \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N \sum_{k=1}^K c(i,j) * X_{ijk}$$

Subject to:

$$\sum_{j=1}^N X_{0jk} \leq 1, \quad \text{for } k \in \{1, 2, \dots, K\} \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^N X_{i0k} \leq 1, \quad \text{for } k \in \{1, 2, \dots, K\} \quad (2)$$

## ۱. مقدمه

مسئله مسیریابی وسایل نقلیه به همراه پنجره های زمانی یک نوع مسئله تصمیم گیری است و کاربردهای گوناگونی از جمله تحويل نامه و روزنامه، مسیریابی اتوبوس مدرسه، مراکز توزیع و ... دارد. این مسئله مشکل از ناوگانی از وسایل نقلیه با ظرفیت های معین، یک دپو (ترمینال) مرکزی و مجموعه ای از مشتریان با تقاضاها و پنجره های زمانی متفاوت می باشد. هر یک از وسایل نقلیه از دپو مرکزی حرکت خود را آغاز و کالاها را بدون تخطی از محدودیت های زمانی، حمل می نمایند و در نهایت مجدداً به دپو مرکزی باز می گردند. هر یک از مشتریان می توانند تنها یکبار و توسط تنها یک وسیله نقلیه ملاقات شوند. هدف، کمینه نمودن تعداد کل وسایل نقلیه و نیز کل مسافت طی شده می باشد [۱].

مسئله مورد نظر در زمرة مسائل بهینه سازی NP-Complete بندی می گردد بگونه ای که حتی یافتن یک جواب بهینه برای ابعاد کوچک آن بسیار دشوار و زمانبر است [۲]. تعدادی از محققان روشهای حل ابتدکاری برای حل این مسئله ارائه نموده اما بعلت پیچیدگی این مسئله، عموماً جواب های آنها رضایت بخش نبوده اند. علاوه بر آن روشهای حل فرابتکاری از جمله الگوریتم ژنتیک، جستجوی ممنوع، شبیه سازی تبرید و نیز برای حل این مسئله بکار گرفته شده اند [۱]. این روشهای فرابتکاری توانایی یافتن جواب های بهینه و یا نزدیک به بهینه را در زمان معقول دارا می باشند.

الگوریتم بهینه سازی کلونی مورچگان که برای اولین بار توسط مارکو دوریگو در تز دکتری ایشان معرفی شد، یکی از جدیدترین روشهای فرابتکاری بوده و می تواند بر بررسی رفتار مورچه های واقعی در جستجوی غذا می باشد. این روش اولین بار بر روی دروشنده دوره گرد بکار گرفته شد [۳]. در این مقاله نوع اصلاح شده الگوریتم کلونی مورچگان جهت حل مسئله مسیریابی وسائل نقلیه به همراه پنجره های زمانی ارائه شده است. از آنجاکه الگوریتم کلونی مورچگان، الگوریتمی بسیار پیچیده می باشد، هدف این الگوریتم جدید پیشنهادی، کاهش پیچیدگی های محاسباتی الگوریتم کلونی مورچگان و ارائه الگوریتمی ساده و قابل فهم می باشد.

## ۲. بیان ریاضی مسئله

مسئله مسیریابی وسائل نقلیه به همراه پنجره های زمانی، مشکل از ناوگانی از وسایل نقلیه با ظرفیت های معین، یک دپو مرکزی،

تنها یک وسیله نقلیه محدود می‌کنند. معادله ۵ محدودیت ظرفیت وسیله نقلیه می‌باشد. معادلات ۶ الی ۸ محدودیتهای پنجره زمانی برای مشتریان و دپو مرکزی می‌باشد.

### ۳. الگوریتم کلونی مورچگان

الگوریتم کلونی مورچگان (ACO) یک روش فراابتکاری جدید برای حل مسائل بهینه سازی می‌باشد و برای اولین بار توسط مارکو دوریگو مطرح شد [۵]. این الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر رفتارهای کلونی مورچه‌های واقعی است. در واقع مورچه‌های واقعی نایابنا هستند اما توانایی یافتن کوتاهترین مسیر بسته منبع غذایی را دارا می‌باشند و اینکار را به کمک برگای گذاری اثر فرمون انجام می‌دهند. مورچه‌های مصنوعی از قوانین انتقال (معادلات ۹ و ۱۰) استفاده نموده و این رفتار مورچه‌های طبیعی را تقلید و مقصد بعدی را می‌بینند. همچنین مورچه‌های مصنوعی از قوانین بروزرسانی اثر فرمون (معادلات ۱۱ و ۱۲) استفاده می‌نمایند و از آن برای بروزرسانی اثر فرمون روی مسیرها استفاده می‌کنند.

$$j = \begin{cases} \arg \max_{r \in T_k(i)} \{\lambda(i, r) \cdot [v(i, r)]^\beta\} & \text{if } q \leq q_0 \\ J & \text{o.w.} \end{cases} \quad (9)$$

فرض کنید  $k$  یک مورچه مصنوعی باشد که وظیفه آن ایجاد یک مسیر است. این مورچه تمامی مشتریان را ملاقات می‌نماید و به نقطه اولیه باز می‌گردد. همراه با مورچه  $k$  ام لیستی تحت عنوان  $T_k(i)$  شامل تمامی مشتریانی که هنوز ملاقات نشده‌اند، وجود دارد. مورچه  $k$  ام که در محل مشتری  $i$  ام قرار دارد براساس معادله ۳-۱ به محل مشتری  $j$  ام می‌رود.  $\lambda(i, r)$  نشان دهنده مقدار اثر فرمون بر روی کمان بین دو مشتری  $i$  و  $r$  می‌باشد.  $v(i, r)$  یک مقدار ابتکاری است و از معکوس فاصله بین دو مشتری  $i$  و  $r$  حاصل می‌شود و  $\beta$  یک پارامتر می‌باشد که اهمیت نسبی  $v(i, r)$  را نشان می‌دهد.  $q$  مقداری است که بطور تصادفی بین ۰ و ۱ تولید می‌شود و  $q_0$  نیز پارامتری است که توسط کاربر تعیین می‌شود و بین ۰ و ۱ می‌باشد.  $J$  نیز یک متغیر تصادفی است و براساستابع توزیع احتمال ارائه شده در معادله ۱۰ تولید می‌شود. در معادله  $P_k(i, j) = \text{احتمال}(i, j)$  احتمال انتخاب مشتری  $j$  ام می‌باشد.

$$P_k(i, j) = \begin{cases} \frac{[\lambda(i, j)] \cdot [v(i, j)]^\beta}{\sum_{r \in T_k(i)} [\lambda(i, r)] \cdot [v(i, r)]^\beta} & \text{if } j \in T_k(i) \\ 0 & \text{o.w.} \end{cases} \quad (10)$$

معادله ۱۱ برای بروزرسانی محلی اثر فرمون استفاده می‌شود. این بروزرسانی محلی زمانی اتفاق می‌افتد که مورچه  $k$  ام از محل مشتری  $i$  به محل مشتری  $j$  می‌رود. در این معادله  $\rho$  پارامتر محو

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^N X_{ijk} = 1 \quad \text{for } j \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=0}^N X_{ijk} = 1 \quad \text{for } i \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (4)$$

$$\sum_{i=0}^N \left( m_i \sum_{j=0}^N X_{ijk} \right) \leq q(k) \quad \text{for } k \in \{1, 2, \dots, K\} \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=0}^N X_{ijk} (t(i) + t(i, j) + f(i) + w(i)) = t(j) \quad \text{for } j \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (6)$$

$$t(0) = f(0) = w(0) = 0$$

$$\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N X_{ijk} (t(i, j) + f(i) + w(i)) \leq l(0) \quad \text{for } k \in \{1, 2, \dots, K\} \quad (7)$$

$$e(i) \leq (t(i) + w(i)) \leq l(i) \quad \text{for } i \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (8)$$

بطوری که

$k \in \{1, 2, \dots, K\}$  : وسیله نقلیه  $k$  ام

$i \in \{1, 2, \dots, N\}$  : مشتری  $i$  ام

$C(0)$  : دپو مرکزی

$d(i, j)$  : فاصله مستقیم الخط اقلیدسی بین  $C(i)$  و  $C(j)$

$i, j \in \{1, 2, \dots, N\}$

$c(i, j)$  : هزینه جابجایی از  $C(i)$  به  $C(j)$

$i \neq j$

$t(i, j)$  : زمان سفر بین  $C(i)$  و  $C(j)$

$i \neq j$

$m(i)$  : تقاضای مشتری  $i$  ام

$q(k)$  : ظرفیت وسیله نقلیه  $k$  ام

$e(i)$  : زودترین زمان ورود به محل مشتری  $i$  ام

$l(i)$  : دیرترین زمان ورود به محل مشتری  $i$  ام

$f(i)$  : زمان سرویس در محل مشتری  $i$  ام

$t(i)$  : زمان ورود به محل مشتری  $i$  ام

$w(i)$  : زمان انتظار در محل مشتری  $i$  ام

$X_{ijk} = 1$  or  $0$  ، یک برای زمانی که یک وسیله نقلیه از گره  $i$  به گره  $j$  حرکت کرده باشد و صفر در غیر اینصورت.

هدف کمینه نمودن هزینه کل می‌باشد. معادلات ۱ و ۲

محدودیتهایی می‌باشند که اجازه می‌دهند در بیشترین حالت،  $k$

وسیله نقلیه دپو مرکزی را ترک نموده و در نهایت مجدداً به همان

دپو باز گردند. معادلات ۳ و ۴ هر مشتری را به ملاقات شدن توسط

مشتریان (گره‌ها) و مختصات  $(x, y)$  آنها بصورت ستونی یادداشت کنید. از گره دپو آغاز کنید. فاصله تمامی گره‌ها را از این گره محاسبه نمایید. کمترین فاصله را در نظر بگیرید و نام گره را در یک لیست بنویسید. فاصله تمامی گره‌ها را از گره مرحله قبل پیدا کنید. مجدداً کمترین فاصله را یافته و به لیست اضافه کنید. اینکار را ادامه داده تا تمامی گره‌های موجود، در لیست وارد شوند و دیگر گره‌ای باقی نماند. به ترتیب از گره‌ای که از آن شروع نموده‌اید تا آخرین گره، کمترین فاصله‌ها را با هم جمع نمایید. این مقدار همان کوتاهترین مسیر (موجه یا غیر موجه) اولیه می‌باشد. پس از یافتن کوتاهترین مسیر اولیه، طول آنرا در نظر گرفته و مقدار فرمان اولیه برای تمامی مسیرهای مسئله برابر با رابطه زیر قرار می‌گیرد، که در آن  $L$  طول کوتاهترین مسیر و  $n$  تعداد مشتریان (گره‌های) موجود در حل می‌باشد.  $\lambda_0$  نیز مقدار فرمان اولیه روی مسیر است.

$$\lambda_0 = \frac{1}{nL}$$

این الگوریتم به دفعات تکرار می‌شود. در هر تکرار الگوریتم تمامی  $k$  نوع مورچه (وسیله) مسئله مورد نظر را حل می‌کنند. منظور از حل کردن مسئله این است که مثلاً مورچه اول پس از قرار گرفتن در دپو، با محاسبه مطلوبیت رفتن به گره‌های مجاور، بهترین گره را برای حرکت بعدی یافته و بدین ترتیب گره‌ها را یکی پس از دیگری پشت سر می‌گذارند، تا زمانی که دیگر گره‌ای باقی نماند و مورچه به دپو باز گردد (البته ممکن است مورچه بخاراط پر شدن ظرفیت یا نقص پنجره‌های زمانی، بارها وبارها به گره دپو بازگردد). پس از آنکه تمامی  $k$  نوع مورچه (وسیله) مسیرهای خود را تشکیل دادند، این مسیرها براساس معیارهایی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند و بهترین مسیر برای بروزرسانی مقدار فرمان مسیرهای مسئله مورد استفاده قرار می‌گیرد. یعنی در واقع در این الگوریتم تنها یکبار بروزرسانی انجام می‌گیرد و آن هم در پایان هر تکرار از الگوریتم است.

بنظرور اتمام الگوریتم باید معیاری برای توقف آن تعريف نمود. نمونه‌هایی از معیارهای قابل تعريف در زیر ارائه شده اند:

۱. تعداد تکرارهای معین سپری شود (بطور مثال ۱۰۰۰ تکرار الگوریتم)

۲. زمان محاسباتی معینی سپری شود (بطور مثال ۲ ساعت اجرای الگوریتم)

۳. پس از گذشت تعداد معینی از تکرارها، هیچ بهبودی در حل حاصل نشود.

هر یک از  $k$  نوع مورچه پس از قرار گرفتن در گره دپو، برای یافتن گره‌های موجهی که می‌توانند در مرحله بعد به آنها بروند از الگوریتم فیلترینگ استفاده می‌کنند. مراحل این الگوریتم ذیلاً ارائه شده است:

گام‌های الگوریتم فیلترینگ (جهت انتخاب مشتری بعدی):

شدن اثر فرمان محلی روی مسیر می‌باشد و مقدار آن بین  $0$  و  $1$  تعريف می‌شود و  $\lambda_0$  مقدار فرمان اولیه بر روی مسیرها می‌باشد.

$$\begin{aligned} \lambda(i, j) &= (1 - \rho)\lambda(i, j) + \rho\Delta\lambda(i, j), \\ \Delta\lambda(i, j) &= \lambda_0 \end{aligned} \quad (11)$$

پس از آنکه مورچه‌ها مسیرهای خود را تولید نمودند، بروزرسانی کلی اثر فرمان<sup>۱</sup> انجام می‌گیرد. اینکار براساس معادله ۱۲ صورت می‌پذیرد که در آن  $\alpha$  پارامتر محو شدن اثر فرمان کلی. روی مسیر می‌باشد و مقدار آن بین  $0$  و  $1$  تعريف می‌شود. همچنین  $L_{gb}$  طول بهترین مسیر از ابتدای حل است.

$$\lambda(i, j) = (1 - \alpha)\lambda(i, j) + \alpha \frac{1}{L_{gb}} \quad (12)$$

#### ۴. الگوریتم کلونی مورچگان اصلاح شده

محاسباتی در این الگوریتم برگرفته از بهینه سازی کلونی مورچگان می‌باشد. درواقع نوع اصلاح شده الگوریتم بهینه سازی کلونی مورچگان مطرح می‌شود. در این الگوریتم نوع ناوگان بصورت ناهمگن<sup>۲</sup> درنظر گرفته شده است [۷-۶]. در این رویکرد چون مورچه‌ها عنوان نمایندگانی برای وسائل نقلیه قرار داده شده‌اند، پس با داشتن  $k$  نوع وسیله نقلیه،  $k$  نوع مورچه خواهیم داشت. یعنی در کل  $n$  وسیله ( $n$  مورچه) از  $k$  نوع خواهیم داشت. هر یک از این  $k$  نوع مورچه (وسیله) دارای یک ظرفیت معین می‌باشد و مسئله را حل خواهد نمود. در شکل ۱ (پیوست مقاله) فلوچارت الگوریتم تولید جواب ارائه شده است.

در ابتدا باید براساس صورت مسئله، ماتریس فاصله تشکیل شود، این ماتریس از فاصله مستقیم خط اقلیدسی استفاده می‌کند، یعنی  $(x_i, y_i)$  و  $(x_j, y_j)$  می‌باشند، عبارت است از  $d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$  و

ماتریس مربعی با بعدی برابر تعداد مشتریان  $+ 1$  حاصل می‌نماید. پس از تشکیل ماتریس فاصله، نوبت به یافتن یک حل اولیه می‌باشد. علت یافتن حل اولیه این است که از طول مسافت طی شده در آن، جهت محاسبه مقدار فرمان اولیه بر روی مسیرها استفاده می‌شود. حل اولیه در اینجا با استفاده از روش ابتکاری نزدیکترین همسایه<sup>۳</sup> حاصل می‌شود. البته این حل ممکن است موجه یا غیر موجه باشد. (حل موجه به حلی گفته می‌شود که در آن تمامی گره‌ها تنها یکبار ویزیت شده و مقدار بار در کل مسیر از ظرفیت وسیله نقلیه فراتر نرفته و پنجره‌های زمانی نقض نشده باشند).

گام‌های الگوریتم ابتکاری نزدیکترین همسایه:

<sup>1</sup> Global Pheromone Trail Update

<sup>2</sup> Heterogeneous

<sup>3</sup> Nearest Neighbor Heuristic

تصادفی  $q$  تولید شده و با مقدار  $q_0$  مقایسه می‌گردد؛ البته باید توجه داشت که برای هر نوع مورچه (وسیله) به تعداد گام‌هایی که در هر تکرار طی می‌نماید تا حل کامل حاصل شود، مقدار تصادفی  $q$  تولید می‌گردد. در معادلات مذکور  $\lambda(i, r)$  نشانگر مقدار فرمون موجود بر روی کمان  $(i, r)$  می‌باشد.  $v(i, r)$  یکتابع ابتکاری است و برابر با معکوس فاصله بین دو گره  $i$  و  $r$  بوده و از آن تحت عنوان نزدیکی (Closeness) نیز یاد می‌شود و اولویت بالاتری به مشتریانی که نزدیکتر هستند اختصاص می‌دهد.  $WC$  نیز یکتابع ابتکاری است و از معکوس طول پنجره زمانی موجود در محل مشتری  $r$  حاصل می‌شود و سبب می‌گردد اولویت بالاتری به مشتریانی که طول پنجره زمانی کوتاهتری دارند، داده شود.  $\gamma$  پارامتری است که سطح اهمیت نسبی  $WC$  و  $\beta$  نیز سطح اهمیت نسبی  $v(i, r)$  را نشان می‌دهد. پس از آنکه تمامی  $k$  نوع مورچه مسیرهای خود را تولید نمودند، حال نوبت بروزرسانی مقدار فرمون مسیرها می‌باشد. بنمنظور بروزرسانی اثر فرمون دو رویکرد وجود دارد. یکی اینکه براساس تمامی مسیرهای تولید شده توسط تمامی  $k$  نوع مورچه بروزرسانی انجام شود و دیگر اینکه براساس بهترین مسیر تولید شده توسط تمامی  $k$  نوع مورچه، بروزرسانی انجام گیرد. رویکردی که در اینجا مورد استفاده قرار گرفته رویکرد دوم است. یعنی برای بروزرسانی اثر فرمون بر روی مسیرها، در انتهای هر تکرار از بهترین حل تولید شده در آن تکرار استفاده شود. البته فرض شده که تمامی  $k$  نوع مورچه به یک میزان فرمون مسیر را تغییر می‌دهند. یعنی مثلاً مقدار تغییر اثر فرمون در اثر حرکت مورچه نوع ۱ از یک گره به گره دیگر با اثر فرمون مورچه نوع ۲ برابر است. بعنوان مثال فرض می‌کنیم سه نوع وسیله (مورچه) داشته باشیم: سواری، مینی بوس و اتوبوس. در انتهای تکرار اول، هر کدام از این سه نوع وسیله نقلیه مسیری را تولید می‌کنند. حال باید این مسیرهای تولید شده را با هم مقایسه نمود. برای مقایسه می-توان از یکسری معیار استفاده نمود. معیاری که در اینجا مورد استفاده قرار گرفته کل طول مسافت طی شده است. پس از یافتن بهترین مسیر تولید شده، از آن برای بروزرسانی اثر فرمون استفاده می‌کنیم و طبق رابطه زیر مقدار اثر فرمون بروز می‌گردد:

$$\lambda(i, j) = (1 - \alpha)\lambda(i, j) + \alpha \frac{1}{L_{gb}} \quad (15)$$

طول بهترین مسیر تولید شده در هر تکرار بوده و  $\alpha$  هم یک پارامتر است و میزان زوال اثر فرمون را تعیین می‌کند. در این الگوریتم بجای دو بار بروزرسانی اثر فرمون (بروزرسانی محلی و بروزرسانی کلی)، بروزرسانی اثر فرمون تنها یکبار و توسط بهترین حل تولید شده در هر تکرار صورت می‌گیرد و این خود حجم زیادی از محاسبات را کاهش داده و سرعت پاسخگویی الگوریتم را بالا می‌برد.

۱. لیست تمامی مشتریانی که هنوز ملاقات نشده‌اند را تهیه کنید.  $(i)$   $T_k$  لیست تمامی مشتریان ملاقات نشده.

۲. برای تمامی مشتریان لیست، محاسبات زیر را انجام دهید:

۲-۱.  $Load := Load + k$  مورچه + (تلاضعی مشتری فعلی (در این بند، بار تجمعی هر مورچه (وسیله) با اضافه نمودن تقاضای مشتری  $n$  ام محاسبه می‌شود)

۲-۲.  $Arrival\ time = k$  زمان مورچه + زمان سفر از مشتری فعلی به مشتری جدید (در این بند، زمانی که مورچه (وسیله)  $k$  ام به مشتری  $n$  ام می‌رسد، محاسبه می‌شود)

۳. اگر مقدار  $Load$  وسیله  $k$  ام کوچکتر یا مساوی ظرفیت آن باشد و مقدار  $Arrival\ time$  نیز کوچکتر و یا مساوی با دیرترین زمان ورود به مشتری جدید باشد، (در این بند محدودیت‌های مربوط به ظرفیت مورچه (وسیله)  $k$  ام و پنجره زمانی مشتری  $n$  ام بررسی می‌شود)

۴. اگر مجموع چهار مقدار  $Arrival\ time$ ، زمان انتظار در محل مشتری جدید، زمان سرویس به مشتری جدید و زمان سفر از مشتری جدید به دپو، کوچکتر و یا مساوی با دیرترین زمان ورود به دپو باشد، (در این بند بررسی می‌شود که آیا مورچه (وسیله)  $k$  ام می‌تواند دیرترین زمان ورود به دپو را پس از اضافه نمودن مشتری  $n$  ام، ارضاء نماید) آنگاه:

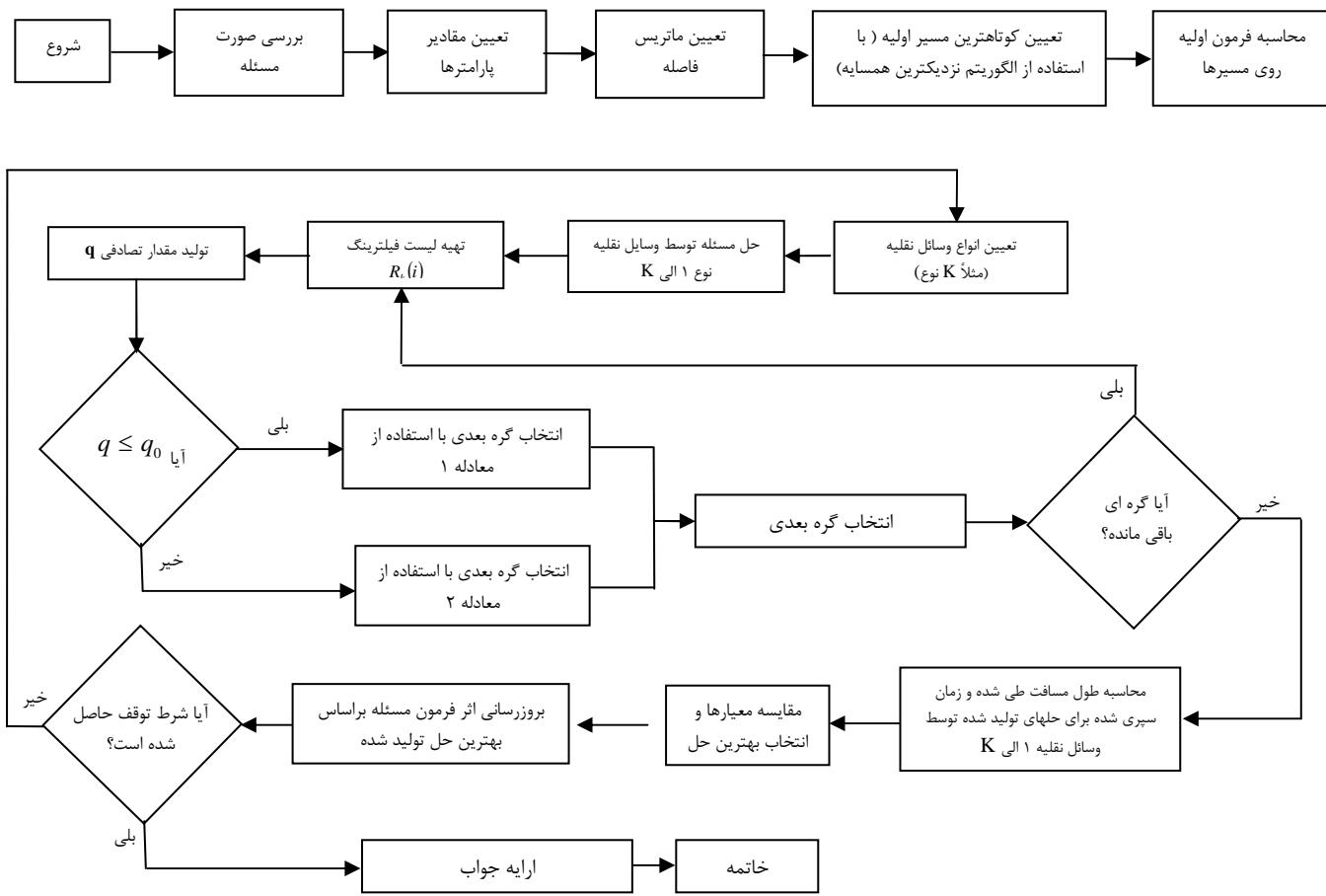
۵. مشتری جدید به لیست  $R_k$  مورچه  $k$  ام اضافه می‌شود. (لیست مشتریان موجهی که دو محدودیت فوق را ارضاء می‌کنند، مربوط به مورچه  $k$  ام)

۶. اگر لیست خالی بود، گره دپو را به آن اضافه کن (بدین معنی که اگر مشتری دیگری برای اضافه نمودن به لیست  $R_k$  وجود ندارد، آنگاه گره دپو  $(C_0)$  را به لیست  $(i)$   $R_k$  اضافه نماید) در نتیجه این الگوریتم، لیست تمامی مشتریانی که محدودیت‌ها را ارضاء می‌کنند حاصل می‌شود. حال باید از گره دپو این لیست و محاسبه و تحلیل روابط زیر، مشتری احتمال بالاتر را برای حرکت بعدی انتخاب نمود.

$$j = \begin{cases} \arg \max_{r \in R_k(i)} \{\lambda(i, r) \cdot [v(i, r)]^\beta \cdot [WC]^\gamma\} & \text{if } q \leq q_0 \\ J & \text{o.w.} \end{cases} \quad (13)$$

$$P_k(i, j) = \begin{cases} \frac{[\lambda(i, j)] \cdot [v(i, j)]^\beta \cdot [WC]^\gamma}{\sum_{r \in R_k(i)} [\lambda(i, r)] \cdot [v(i, r)]^\beta \cdot [WC]^\gamma} & \text{if } j \in R_k(i) \\ 0 & \text{o.w.} \end{cases} \quad (14)$$

با تعریف یک مقدار  $(1 \leq q_0 \leq q)$  و تولید یک مقدار تصادفی  $q$ ، بررسی می‌کنیم که آیا  $q \leq q_0$  می‌باشد یا خیر؟ اگر  $q \leq q_0$  باشد از معادله ۱۳ و در غیر اینصورت از تابع احتمال موجود در معادله ۱۴ برای یافتن گره بعدی استفاده می‌کنیم. یعنی در واقع در هر تکرار برای هر نوع از مورچه‌ها (وسیله‌ها) بطور مجزا مقدار



شکل ۱. فلوچارت الگوریتم پیشنهادی

استفاده از آن، شبیه سازی فضای محاسباتی مطابق با شرایطی است که در مقالات دیگر به آن اشاره شده است. جهت تست این نرم افزار Marius Solomon از نمونه مسائل معروف Solomon که توسط تولید شده، استفاده شده است [۸]. این مسائل براساس ویژگی‌ها و خصوصیاتی که دارا می‌باشند دسته بندی شده‌اند. بطورکلی این مسائل در سه گروه کلی قرار گرفته‌اند. هر گروه شامل ۱۲ تا ۱۲ مسئله و شامل حداقل ۱۰۰ مشتری می‌باشد. این ۸ تا ۱۲ مسئله دارای اختلافات جزئی در ۴ خصوصیت مختصات، میزان تقاضا، پنجه‌های زمانی و زمان سرویس می‌باشند.

## ۵. نتایج محاسباتی

کدنویسی در نرم افزار Visual Basic 6.0 انجام شده است. در این کد می‌توان ورودی‌های ابتدایی مسئله از جمله: مختصات، میزان تقاضا، پنجه‌های زمانی و مدت زمان سرویس برای هر مشتری، را وارد نموده و جوابها شامل تعداد وسائل نقلیه، بهترین مسافت و مورچه‌ای که بهترین مسافت را تولید نموده حاصل می‌شود. برنامه تهیه شده بر روی یک دستگاه رایانه شخصی اینتل با قدرت CPU ۸۰۰ مگاهرتز و ۲۵۶ مگابایت حافظه RAM اجرا گردید. البته سیستم مذکور حداقل سیستم مورد نیاز برای اجرای رایانه می‌باشد و علت

جدول ۱. جدول مقایسه‌ای جوابهای الگوریتم پیشنهادی و جوابهای بهینه

مسئله	جواب های بهینه			جوابهای الگوریتم جدید			٪ خطأ
	تعداد مشتریان	تعداد انواع وسایل نقلیه	مسافت بهینه	تعداد انواع وسایل نقلیه	بهترین مسافت		
C101	25	3	191/3	3	191/81	0/27%	
C101	50	5	362/4	5	387/25	6/42%	
C101	100	10	827/3	10	852/94	3/01%	
R101	25	8	617/1	8	656/11	5/95%	
R101	50	12	1044	13	1176/67	11/28%	
RC101	25	4	461/1	4	494/14	6/69%	
RC101	50	8	944	9	1054/44	10/47%	

متفاوتی از وسائل نقلیه با ظرفیت‌های متفاوت، که این خود بر پیچیدگی محاسبات افزوده و نیز سبب افزایش زمان محاسباتی می‌گردد. در این الگوریتم جدید، هر یک از انواع وسائل نقلیه موجود در ناوگان وسائل نقلیه، مسئله را بطور مجزا حل نموده و از بهترین و کوتاهترین حل حاصل شده توسط بهترین نوع از وسائل، برای بروزرسانی اثر فرمون استفاده می‌شود، یعنی تنها یکبار بروزرسانی اثر فرمون صورت می‌گیرد؛ البته می‌توان با در نظر گرفتن آمیخته‌ای از وسائل نقلیه بعنوان ناوگان وسائل نقلیه، بطور همزمان از تمامی آنها برای تولید جواب استفاده نمود.

نتایج حاصله نشان داد که الگوریتم ارائه شده از روایی و پایایی مناسبی برخوردار می‌باشد. گام بعدی در تکمیل این الگوریتم حل، می‌تواند بکارگیری الگوریتم‌های جستجوی محلی جهت بهبود جوابهای حاصل شده باشد.

## مراجع

- [1] Rizzoli, A.E., Oliverio, F., Montemanni, R., Gambardella, L.M., *Ant Colony Optimisation for Vehicle Routing Problems: From Theory to Applications*, Istituto Dalle Molle di Studi sull'Intelligenza Artificiale (IDSIA) Galleria 2, CH-6928 Manno, Switzerland, AntOptima, via Fusoni 4, CH-6900 Lugano, Switzerland.
- [2] Wesley Changchien, S., Chih-Sheng Wu, *An Ant Colony System for Vehicle Routing Problems with Time Window*, Department of Information Management, Chaoyang University of Technology, 2001.
- [3] Luca Maria Gambardella, Éric Taillard and Giovanni Agazzi, *MACS-VRPTW A Multiple Ant Colony System For Vehicle Routing Problems With Time Windows*, IDSIA, Corso Elvezia 36, 6900 Lugano, Switzerland, New Ideas in Optimization McGraw-Hill, London, UK, 1999, pp. 63-76.
- [4] Chia-Ho CHEN, Ching-Jung TING, *A Hybrid Ant Colony System for Vehicle Routing Problem with Time Windows*, Department of Industrial Engineering and Management, Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 6, 2005, pp. 2822 - 2836.
- [5] Dorigo, M., Maniezzo, V., Colorni, A., *The Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agent*, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B 26 (1), 1996, pp. 29-41.
- [6] Toth, P., Vigo, D., *The Vehicle Routing Problem*, Universita deli Studi di Bologna, Bologna, Italy, 2001.
- [7] Cordeau, J.F., Guy Desaulniers, Guy Desaulniers, Marius M., Solomon, Fran,cois Soumis, *The VRP with Time Windows*, February, 1999, Revised: June, 2000.
- [8] Alberto, V., Donati, Roberto Montemanni, Norman, Casagrande, Andrea, E., Rizzoli, Luca, M., Gambardella, *Time Dependent Vehicle Routing Problem*

معنای اسمی این ۳ دسته بصورت زیر است:

- مجموعه C شامل مشتریانی است که براساس موقعیت جغرافیایی و یا پنجره زمانیشان دسته بندی شده اند

- مجموعه R شامل مشتریانی است که بطور تصادفی و یا بطور یکنواخت توزیع شده اند

- مجموعه RC شامل ترکیبی از مشتریان دو مجموعه R و C می‌باشند

هر یک از این سه نوع کلی از مسائل به نوبه خود به دو دسته فرعی نیز تقسیم می‌شوند. مسائل نوع ۱ و نوع ۲. مسائل نوع ۱ دارای پنجره‌های زمانی کوچک می‌باشند و ظرفیت وسائل نقلیه در آنها کم است اما در مسائل نوع ۲، پنجره‌های زمانی بزرگ و ظرفیت وسائل نقلیه نیز زیاد می‌باشد. ترکیب‌هایی که از این سه دسته کلی و دو دسته فرعی حاصل می‌شوند عبارتند از:

$$(R_1, R_2, C_1, C_2, RC_1, RC_2)$$

از دسته C و نوع ۱، سه مسئله با ابعاد ۵۰ و ۱۰۰، از دسته R و نوع ۱، دو مسئله با ابعاد ۲۵ و ۵۰ و از دسته RC و نوع ۱، دو مسئله با ابعاد ۲۵ و ۵۰ انتخاب شد. پس از بررسی و تخصیص مقادیر گوناگون به پارامترهای موثر بر مسئله، بهترین جوابهای حاصل شده در جدول ۱ ارائه شده‌اند. الگوریتم پیشنهادی جوابهای نزدیک به بهینه را در زمان نسبتاً کوتاهی تولید می‌نماید. همانگونه که در جدول ملاحظه می‌شود، در خصوص بهترین مسافت حاصل شده میزان خطای محاسباتی حداقل به میزان 10% می‌باشد. درخصوص تعداد وسائل نقلیه نیز که یکی از معیارهای ارزیابی جواب‌ها می‌باشد، بجز مسئله R101 و RC101 با ۵۰ مشتری، که تعداد وسائل نقلیه تنها یک واحد متفاوت است، در سایر موارد تعداد وسائل نقلیه الگوریتم پیشنهادی با تعداد وسائل نقلیه حل بهینه برابر است.

## ۶. نتیجه گیری

در این مقاله نوع اصلاح شده الگوریتم کلونی مورچگان معرفی و برای مسئله مسیریابی وسائل نقلیه به همراه پنجره‌های زمانی بکار گرفته شد. این الگوریتم توانست برای مسائل نمونه‌ای با ابعاد حداقل ۱۰۰ مشتری، جوابهای قابل قبول و نزدیک به بهینه تولید نماید. در مورد برخی از این مسائل، درصد خطای حل به حدود 10% نسبت به حل بهینه می‌رسد که این امر به علت بزرگ بودن فضای حل مسئله، حجم محاسبات زیاد و گیر افتادن الگوریتم در بهینه‌های محلی می‌باشد. البته با افزودن ملاحظات دیگر، می‌توان این میزان خطای را کاهش داده و جوابهایی نزدیک‌تر به جوابهای بهینه ایجاد نمود که این موضوع به محققین آتی واگذار می‌شود. نوآوری که در این مقاله صورت گرفته، در نظر گرفتن ناوگانی ناهمگن از وسائل نقلیه می‌باشد، یعنی ناوگانی متشکل از انواع

*with a Multi Ant Colony System, Istituto Dalle Molle di Studi sull'Intelligenza Artificiale (IDSIA), Galleria 2, 6928 Manno, Switzerland, Received 1 June 2005; accepted 1 June 2006, European Journal of Operational Research 185, 2008, pp. 1174–1191.*