مهندسی صنایع و مدیریت شریف
دوره‌ی ۱ - ۲۶، شماره‌ی ۲، ص. ۶۵-۷۰

طراحی یک مدل پویای مسیریابیِ حمل‌ونقل، و حل آن توسط الگوریتم AntNet

جعفر رزمی (دانشیار)
پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران
حسن حاله (استادیار)
دانشکده‌ی مهندسی صنایع و سیستم، دانشگاه صنعتی اصفهان
بهزاد عزتی (کارشناسی ارشد)
پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

بدون شک در دنیای مدرن امروز، زمان به‌عنوان عاملی با اهمیت نقشی به‌سزا در بازارهای رقابتی دارد. مسائل و مدل‌های مسیریابی فراوانی با توجه به نیاز انسان‌ها به وجود آمده است و به تناسب این مدل‌ها و مسائل، راهکارها و الگوریتم‌های فراوانی نیز شکل گرفته است. در این نوشتار به ارائه‌ی مدلی جدید (مدل پویا با در نظرگرفتن تعداد دوره‌های مختلف برای انواع مشتریان) از مسائل مسیریابی وسائل حمل‌ونقل[1] می‌پردازیم. برای حل چنین مدلی از الگوریتم AntNet استفاده می‌کنیم که تاکنون در این حوزه مورد استفاده قرار نگرفته است. الگوریتم AntNet یک روش عامل مبنا[2] است، که برای حل این مسائل مورد استفاده قرار می‌گیرد تا جواب‌های بهتری حاصل شود. برای اثبات اعتبار مدل و روش حل آن، از مقایسه‌ی جواب‌های مدل با دیگر مدل‌های منتشرشده استفاده شده است.

jrazmi@ut.ac.ir
haleh24@hotmail.com
behzad.ezzati@gmail.com

واژگان کلیدی: الگوریتم AntNet، مساله مسیر یابی وسائل حمل و نقل پویا.

مقدمه

در عصر حاضر، هیچ‌کس منکر اهمیت زمان در هیچ نقطه‌یی از دنیا نیست. یکی از مواردی که در آن انسان‌ها واقعاً مفهوم زمان را درک می‌کنند، مسیرهای رسیدن به مقصدشان است. در این بین نمی‌توان از انتخاب درست و هوشمندانه‌ی مسیر در امور حمل‌ونقل چشم پوشید. در طراحی سیستم‌های حمل‌ونقل، تعیین مسیر و تعیین مکان ایستگاه‌های مبداء ـ مقصد آن مورد توجه است. در این فرایند، شخص تصمیم‌گیرنده با یک تابع چندهدفه، تعداد زیادی محدودیت، معیارهای کیفی، هزینه‌های سرمایه‌یی بسیار زیاد و مشکلات فراوان روبه‌رو است. مسیر مناسب ازجمله گزینه‌هایی است که می‌تواند زیربنای مناسبی برای دیگر کارهای اساسی (مانند کاهش هزینه، افزایش کیفیت حمل و...) را برای چنین سیستمی فراهم آورد. این موضوع زمانی اهمیت دوچندان پیدا می‌کند که بدانیم بخش حمل‌ونقل به‌عنوان بزرگ‌ترین مصرف‌کننده‌ی فراورده‌های نفتی، سالانه حدود ۴۰ درصد ازکل فراورده‌های نفتی را مصرف می‌کند؛ بدون شک نمی‌توان به‌راحتی از نقش مهم انتخاب مسیر در این خصوص گذشت.

انتخاب مسیر می‌تواند هم در مسائل عادی و روزمره‌ی درون‌شهری و برون‌شهری و هم در مسائل بنیادی حمل‌ونقل مورد استفاده قرارگیرد، به‌طور مثال در سال‌های اخیر درمورد تحویل روزنامه، تحویل غذای رستوران کاربرد داشته است.[1و2] اما درمورد دوم (یعنی مسائل زیربنایی شهری و حمل‌ونقل) به کاربرد این نمونه از مسائل در طراحی مسیرها، در بخش‌های زیربنایی درون‌شهری یا برون‌شهری می‌پردازد.

تاریخ: دریافت ۱۳۸۷/۹/۳، داوری ۱۳۸۸/۱۲/۲۵، پذیرش ۱۳۸۹/۶/۲.

این نوع کاربرد نسبت به مورد اول کم‌تر مورد استفاده قرارگرفته، و به‌ندرت می‌توان مسائلی از این دست را در این حوزه یافت.[3] به‌طور عام، مسائلی از این نوع هرچه به عالم واقع نزدیک می‌شوند، به‌علت وجود محدودیت‌های متنوع، پیچیده‌تر می‌شوند تا جایی که در زمره‌ی مسائلی با پیچیدگی زیاد[3] قرار می‌گیرند.

در ادامه‌ی مطلب توضیحاتی درمورد ماهیت و مفاهیم مسائل مسیریابی وسایل حمل‌ونقل درج شده، و پس از آن مدل پیشنهادی ارائه شده است. سپس به معرفی الگوریتم AntNet و مراحل آن اشاره شده و با حل یک مثال عددی و نتایجی که از این مثال منتج می‌شود، در انتها نتیجه‌گیری کلی از چنین رویکردی ثبت شده و پیشنهادهای مربوط به ارتقاء مدل و بهبود روش حل آورده شده است.

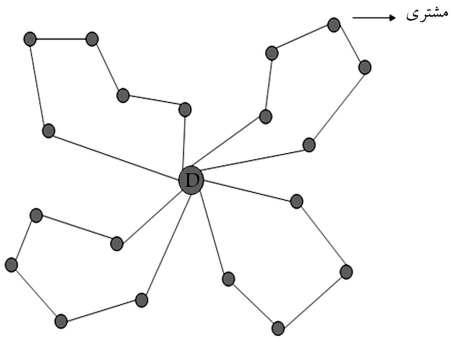
مسئله‌ی مسیریابی وسائل حمل‌ونقل

هنگامی که عمل انتقال انجام می‌شود و انسان، کالا و یا هر چیز دیگر را از نقطه‌ی A به نقطه‌یی دیگر (نظیر نقطه‌ی B) انتقال می‌دهد، باید مسیر وسیله یا وسایل حمل‌ونقل از نقطه‌ی A به نقطه‌ی B تعیین شود. مسئله‌ی مسیریابی وسائل حمل‌ونقل شامل طراحی بهینه جهت «تحویل کالا» یا «مجموعه‌ی مسیرها[4]»، از یک انبار کالا[5] به مجموعه‌یی از مشتریان است که در یک سطح جغرافیایی پخش شده‌اند. با توجه به محدودیت‌های متنوع نظیر ظرفیت وسایل نقلیه، طول مسیر، پنجره‌های زمانی[6]

(سخت و نرم)، ارجحیت یک مشتری بر مشتری دیگر، و مواردی از این دست می‌توان تابع هدف‌های گوناگونی را تعریف کرد.

مثال‌های عمده در این زمینه تحویل روزنامه‌ها به خرده‌فروشان، تحویل مواد غذایی به فروشنده‌ها، و جمع‌آوری شیرهای دامداران است.[۱و۲] این مسئله چیزی حدود ۵۰ سال پیش معرفی شد[۴] و از آن پس، در زمینه‌ی تحقیقات دانشمندان رشد چشم‌گیری داشته است. با این همه، برای تعدادی از مسائل بهینه‌ی ترکیبی مشهور تعریفی از VRP که مورد پذیرش جهانی باشد وجود ندارد، و این بدان سبب است که محدودیت‌هایی که در عمل با آن مواجه هستیم بسیار متنوع‌اند. تلاش اکثر محققین به ارائه‌ی یک مدل استاندارد از مسئله به «مسئله‌ی کلاسیک مسیریابی وسایل حمل‌ونقل[۷]» منجر شده است. باید توجه داشت که بیشتر الگوریتم‌های توسعه‌یافته در این حوزه اکثراً ابتکاری‌اند و قابلیت مطابقت با موقعیت‌های واقعی پیچیده را دارند. مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد[۸] را می‌توان از حالات ساده‌شده‌ی مسائل VRP دانست، زیرا زمانی که درمسئله‌ی VRP تعداد وسائل حمل‌ونقل برابر ۱ ($m = ۱$) و دارای ظرفیت نامتناهی باشد ($Q = \infty$)، مسئله‌ی VRP تبدیل به مسئله‌ی TSP می‌شود. در عمل در شرایط مساوی و مسائل هم‌اندازه، حل یک VRP بسیار مشکل‌تر از TSP است. برای مثال یک TSPبا ۱۰۰ و یا حتی ۱۰۰۰ رأس (مشتری) را به‌شکل روتین به‌وسیله‌ی الگوریتم‌های branch-and-cutو price می‌توان حل کرد.[۵] در مقابل، الگوریتم‌های بسیار پیچیده برای حل VRP برای مثال نهایتاً تا ۱۰۰ مشتری را در زمان معقول حل می‌کنند.[۶] طیف وسیعی از مسائل VRP را می‌توان در رده‌ی مسائل NP-Hard دانست.[۷و۸] درنتیجه از الگوریتم‌های ابتکاری برای حل این مسائل استفاده می‌شود،[۹] زیرا الگوریتم‌های بسیار پیچیده‌ی قطعی[۹] برای حل VRP برای مثال نهایتاً تا ۱۰۰ مشتری را در زمانی معقول می‌توانند حل کنند.[۶] این نکته می‌تواند علت تأکید محققین بر استفاده از الگوریتم‌های ابتکاری باشد. علت دیگر را می‌توان در انعطاف‌پذیری بیشتر این الگوریتم‌ها نسبت به الگوریتم‌های قطعی دانست. با توجه به ماهیت پیچیده‌ی مسائل VRP معمولاً محققین برای پرداختن به انواع این مسائل حالت استاتیک آن را در نظر می‌گیرند، اما به‌خوبی مشخص است که در حالت طبیعی آنچه رخ می‌دهد بیشتر شبیه به حالات پویاست. به‌طور مثال، یک مرکز پخش به‌سختی می‌تواند طوری برنامه‌ریزی کند که همه‌ی مشتریانش را در یک روز معین سرویس دهد و در صورتی‌که ظرفیت شرکت از میزان زمان لازم برای کل مشتریان کم‌تر باشد این کار غیر ممکن می‌شود. در این نوع مسائل در بازار رقابتی آنچه بیش از پیش اهمیت دارد انعطاف‌پذیری بالای پخش‌کننده‌ی کالاست. در این نوشتار سعی شده است با تکیه بر این موضوع که در عالم واقع تک‌تک مشتریان یا مجموعه‌های مشخصی از مشتریان می‌توانند یک برنامه معین برای تحویل کالا داشته باشند، مدلی پویا با تعدد دوره‌های زمانی ارائه شود.

الگوریتم VRP کلاسیک بر روی یک گراف غیر جهت‌دار $G = (V, A)$ تعریف می‌شود که در آن $V = \{۰, ۱, ..., n\}$ مجموعه نقاط رأسی و $A = \{(i, j) : i, j \in V, i \neq j\}$ مجموعه‌ی کمان‌هاست. رأس صفر نشان‌دهنده‌ی انبار کالاست. همچنین Q نماد ظرفیت وسیله‌ی حمل‌ونقل است. هر مشتری $i \in V/\{۰\}$ دارای یک میزان تقاضای غیرمنفی است $q_i \leq Q$ و ماتریس هزینه(c_{ij}) بر روی A تعریف می‌شود، هنگامی که ماتریس قرینه است $(c_{ij} = c_{ji})$،برای همه‌ی i, jها. معمول است که مسئله را روی یک گراف غیرجهت‌دار $G = (V, A)$ تعریف می‌کنند، که در آن $E = \{[i, j] : i, j \in V, i < j\}$ یال مجموعه است. ما از بخش‌های هزینه‌ی سفر و طول و زمان مسافرت که قابل تعویض‌اند استفاده می‌کنیم.



شکل ۱. حل VRP کلاسیک با ۱۹ مشتری و ۴ وسیله‌ی حمل‌ونقل با ظرفیت $Q=۱۰$.

این نوع مسئله شامل تعیین یک مجموعه‌ی m مسیری از وسیله‌ی حمل‌ونقل است به‌طوری که: ۱. هر مسیر نشان‌گر آغاز و پایان انبار کالاست؛ ۲. هر مشتری دقیقاً توسط یک وسیله‌ی نقلیه سرویس داده می‌شود؛ ۳. مجموع تقاضا در هر مسیر نباید از مقدار Q (حداکثر ظرفیت یک وسیله‌ی نقلیه) بیشتر باشد؛ ۴. هزینه‌ی کل مسیرها باید کمینه شود.

تعاریف فوق جملگی برای VRP کلاسیک صدق می‌کند؛ از آنجا که مسئله‌ی مربوط به این نوشتار در حوزه‌ی مسیریابی سیستم حمل‌ونقل تعریف می‌شود و ضمن جذابیت این نوع مدل، می‌توان به تناسب نیاز یک مسئله موارد مورد نیاز را به آن اضافه کرد. در شکل ۱ یک راه حل VRP کلاسیک نشان داده شده است. دقت کنید که این راه حل شامل دو مسیر متقاطع است و همچنین یک مسیر جلو و عقب میان انبار کالا (Depot) و مشتری است.

ارائه‌ی مدل پیشنهادی

مدلی که در این نوشتار ارائه می‌شود، تعمیم‌یافته‌ی مدلی است[۱۰] که خود تعمیم‌یافته‌ی مدل TSP کلاسیک است.[۱۱] در این نوشتار تلاش شده است با رویکردی پویا[۱۰]، مدل ارائه‌شده هرچه بیشتر به واقعیت نزدیک شود. این مسئله دارای بازه‌های زمانی بازدید است که به‌صورت دوره‌یی انجام می‌گیرد. با اضافه‌شدن عامل دوره (پریود)، مدل پیشنهادی هرچه بیشتر به واقعیت نزدیک شده است.

نماد X_{ij} یک متغیر عدد صحیح است و برابر تعداد دفعاتی است که لبه (کمان) در حل بهینه ظاهر می‌شود. اگر $i, j \in V/\{۰\}$، سپس X_{ij} متغیری دودویی[۱۱] خواهد بود؛ و اگر $i = ۰$، سپس X_{ij} ممکن است برابر ۰ و ۱ شود. در مورد بعدی با مسافرت بازگشتی میان انبار کالا و مشتری، $F.j$ هزینه‌ی ثابت وسیله‌ی حمل‌ونقل است. مدل به‌شرح زیر است:

مجموعه‌ها:

T: مجموعه‌ی روزها $T = \{۱, ..., t\}$؛

t: طول دوره؛

E: مجموعه کمان‌های شبکه.

متغیر:

X_{ij}^{d}: این متغیر برابر ۱ است اگر وسیله‌ی نقلیه در دوره‌ی d از گره[۱۲] I به گره j برود؛ در غیر این صورت برابر صفر است.

پارامترها:

F: هزینه‌ی ثابت راه‌اندازی حمل‌ونقل؛

c_{ij}: هزینه‌ی حمل روی کمان $[i,j] \in E, [i,j]$.

$$Minimize \sum_{d \in T} \sum_{[i,j] \in E} c_{ij} x_{ij}^{d} + Fm \qquad (۱)$$

$$Subject\ to:$$

$$\sum_{d \in T} \sum_{j \in v \backslash \{۰\}} x_{۰j}^{d} = ۲m \qquad (۲)$$

$$\sum_{i<k} x_{ik}^{d} + \sum_{j>k} x_{kj}^{d} = ۲ \quad (k \in V \backslash \{۰\}) \qquad (۳)$$

$$\sum_{\substack{i \in s, j \notin s \\ j \in s, i \notin s}} x_{ij}^{d} \geq ۲b \quad (S \subset V \backslash \{۰\}) \qquad (۴)$$

$$x_{ij} = ۰ \ or \ ۱ \quad (i,j \in V \backslash \{۰\}) \qquad (۵)$$

در این فرمول تابع هدف هزینه‌ی کل مسیریابی را کمینه می‌کند. محدودیت ۲ درجه‌ی رأس صفر را در دوره زمانی d تعریف می‌کند. باید توجه داشت که سمت راست معادله می‌تواند مقداری ثابت بگیرد اگر m یا متغیر دیگر مقدم شناخته شوند. محدودیت ۳ تضمین می‌کند که در هر دوره زمانی به‌ازای هر کمان ورودی به یک مشتری (یا گره) یک کمان از همان مشتری (یا گره) خارج شود. در محدودیت ۴، $b(s)$ حد پایین تعداد وسایل حمل‌ونقل مورد نیاز برای سرویس‌دهی به همه‌ی مشتریان (s) است. این محدودیت‌ها نقشی دوگانه ایفا می‌کنند:

۱. از شکل‌گیری «زیرمسیر[۱۳]» ها در مجموعه‌یی از مشتریان ممانعت می‌کند؛

۲. از این نکته که ظرفیت هر قید از حد مجاز فراتر نرود دفاع می‌کنند. در عالم واقع تعریف $b(s)$ به‌صورت فرمول ۶ معمول است:

$$[\sum_{i \in S} q_i / Q] \qquad (۶)$$

ارائه‌ی الگوریتم

با توجه به این که AntNet الگوریتم عامل مبناست[۱۴] است، برای آشنایی بیشتر به معرفی برخی ضرایب اساسی می‌پردازیم.

۱. هوش گروهی

«هوش گروهی» صفت گروه زیادی از عامل‌های غیر هوشمند است که توانایی فردی زیادی ندارند و به‌صورت جمعی با تعامل با یکدیگر رفتار هوشمندانه‌یی از خود نشان می‌دهند. رفتار هوشمندانه به‌طور تناوبی به‌وسیله‌ی ارتباطات غیرمستقیم بین عامل‌ها ایجاد می‌شود. عامل‌ها به‌طور فردی هیچ‌گونه دانشی درمورد حل مسئله ندارند، و با اعمال اجتماعی یک رفتار هوشمندانه ایجاد می‌شود.

الف) خواص این گروه‌ها

- کاملا توزیع شده‌اند و نیاز به هیچ کنترل‌کننده‌ی مرکزی ندارند؛
- عامل‌ها هیچ دید کلی از محیط ندارند؛
- عامل‌ها می‌توانند محیط اطراف‌شان را احساس کنند و به تفسیر آن بپردازند؛
- عامل‌ها می‌توانند در محیط تغییر کنند؛
- نمونه‌های زیادی از هوش گروهی در طبیعت وجود دارند.ازجمله زندگی باکتری‌ها، مورچه‌ها، زنبورها و... این موجودات با کمک هوش گروهی کارهای مشکل زیادی را انجام می‌دهند. از جمله؛
- همکاری در جابه‌جایی اجسام بزرگ؛
- ساختن لانه و محافظت از آن؛
- یافتن کوتاه‌ترین مسیر بین لانه و منبع غذایی؛
- ...

از این مدل برای حل مسائل زیادی استفاده شده است که مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد (TSP)، Asymmetric TSP، رنگ‌آمیزی گراف، مسیریابی و... از آن جمله‌اند.

ب) تقابل غیرمستقیم[۱۵]

در این گروه‌ها معمولاً عامل‌ها به‌طور غیرمستقیم با هم در تعامل و ارتباط‌اند. این گونه‌ی مخصوص ارتباط غیرمستقیم عامل‌ها در محیط، که نیاز به هیچ هماهنگ‌سازی صریحی ندارد، تقابل غیرمستقیم نامیده می‌شود و خود بر دو نوع است:

۱. نوع اول شامل تغییر فیزیکی محیط است. مثلاً درساختن لانه، مورچه‌ها با داشتن این قانون که باید دانه‌ی خود را در بالاترین قسمت قرار دهند با مشاهده‌ی تغییرات محیط و ساختار ایجادشده متوجه می‌شوند، دانه‌شان کجا باید قرار گیرد. با این شرایط، به مرور لانه به‌طور منظم شکل می‌گیرد.

۲. نوع دوم براساس علامت‌گذاری است. در این حالت یک سری مواد شیمیایی در محیط گذاشته می‌شود که در کاری که می‌خواهیم انجام دهیم و متعهد شده‌ایم نقشی ندارد ولی بر یک سری وظایف مربوط اثر می‌گذارد.

۲. مورچه‌ها و مسیریابی

ایده‌ی اصلی این است که می‌توان با کمک روشی که مورچه‌ها برای یافتن کوتاه‌ترین مسیر دارند الگوریتم‌های جدیدی برای مسیریابی در شبکه‌ها ایجاد کرد.[۱۲-۱۵] مدل دوم در زندگی مورچه‌ها زیاد دیده می‌شود. آنها یک ماده‌ی شیمیایی به‌نام فرومون[۱۶] در محیط می‌گذارند. فرومون‌ها بعد از مدت زمان مشخص از بین می‌روند (خاصیت فرار بودن). از طرفی این مواد شیمیایی می‌توانند روی هم انباشته شوند. مثلاً اگر چند مورچه از مسیری عبور کنند فرومون‌های آن‌ها روی هم انباشته می‌شوند و اثرشان افزایش می‌یابد. مورچه‌ها با کمک این فرومون‌ها می‌توانند کوتاه‌ترین مسیر بین لانه و منبع غذایی را بیابند. پس از رسیدن به حالت پایداری همه‌ی مورچه‌ها مسیر کوتاه‌تر را انتخاب می‌کنند و مسیر انتخاب‌شده در حافظه‌ی آن‌ها به‌شدت باقی می‌ماند. در شکل ۲ می‌توان مراحل یافتن مسیر کوتاه‌تر را مشاهده کرد.

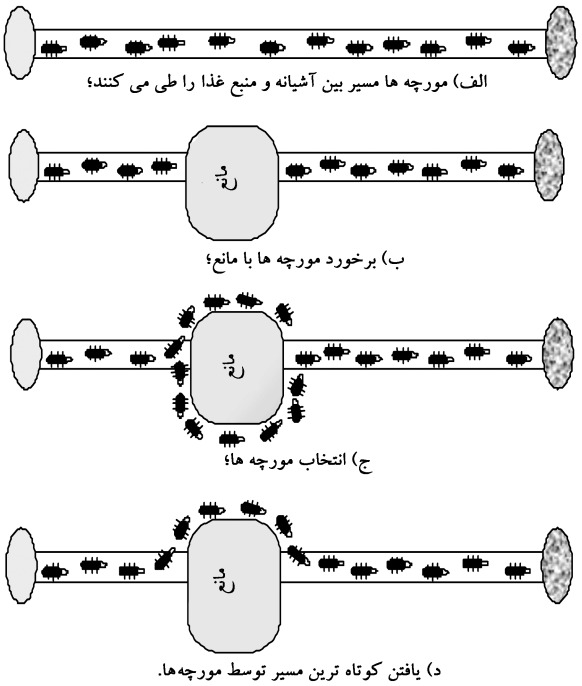
۳. الگوریتم AntNet

AntNet روشی هوشمند است که در سال ۱۹۹۷ ارائه شد.[۱۲] این الگوریتم از عامل‌های موبایل همکار استفاده می‌کند. در این مدل دو نوع عامل وجود دارد:

مورچه‌های پیش‌رو[۱۷]: این نوع عامل وظیفه دارد که در شبکه جست‌وجو کند و اطلاعات لازم را جمع آوری کند. وقتی به مقصد خود می‌رسد عامل نوع دوم را ایجاد می‌کند و خودش از بین می‌رود.

مورچه‌های پس‌رو[۱۸]: این مورچه‌ها از همان مسیری که مورچه‌های پیش‌رو طی کرده‌اند به عقب برمی‌گردند و در هنگام بازگشت به هر گره (نود) که می‌رسند جدول مسیریابی‌اش را تغییر می‌دهند. در این شیوه در هر گره i، از دو ساختار داده استفاده می‌شود که توسط عامل‌ها قابل تغییرند.

۱. جدول مسیریابی P ساختاری مشابه جداول در الگوریتم قبلی است.



شکل ۲. انتخاب کوتاه‌ترین مسیر توسط مورچه‌ها؛ رفتار مورچه‌های واقعی میان آشیانه و منبع غذا.

۲. آرایه‌یی به‌نام M_i که جزئیات آن در فرمول ۷ می‌آید.

$$M_i = [(\mu_j, \sigma_j^2, \omega_{best_j})] \qquad (۷)$$

اگر فرض کنیم N تعداد کل گره‌های شبکه باشد، گره i به‌ازای هر j $(j = 1, ..., N)$ اطلاعات آماری فوق را ثبت می‌کند، و آن میانگین، واریانس و کوتاه‌ترین زمانی است که تاکنون عامل‌ها برای رسیدن از i به j صرف کرده‌اند. این داده‌ها حافظه‌یی است از آنچه این گره تاکنون ازکل شبکه دیده است.

الف) مراحل مختلف الگوریتم AntNet

در دوره‌های زمانی منظم یک مورچه‌ی پیش‌رو از هرگره شبکه به سمت مقصدی مشخص به حرکت درمی‌آید تا یک مسیرکم‌هزینه را به آن مقصد کشف، و نیز حالت ترافیک شبکه را بررسی می‌کند. مقصدها براساس بار ترافیکی و فرمول ۸ به دست می‌آید:

$$p_d = \frac{f_{sd}}{\sum_{d'}^{N} f_{sd'}} \qquad (۸)$$

f_{sd} حجم داده‌یی است که از d به s رفته است. احتمال فرستادن مورچه‌ی پیش‌رو از گره s به مقصد d است. مورچه‌ی پیش‌رو هنگام حرکت شناسه‌ی گره‌های ملاقات‌شده و زمان صرف‌شده از ابتدای حرکت تا ملاقات این گره‌ها را در یک حجم انباره (استک[۱۹]) ذخیره می‌کند.

هر عامل برای یافتن گره بعدی از اطلاعاتی که در جدول مسیریابی گره جاری ذخیره شده و همچنین طول صف در لینک‌های مختلف استفاده می‌کند. در هرگره k، مورچه‌ی پیش‌رو گره بعدی را از بین همسایه‌هایی که تا به‌حال ملاقات نشده‌اند، و درصورتی که تمام همسایه‌ها ملاقات شده باشند از بین تمام همسایه‌های گره kام انتخاب می‌کند. هر همسایه با احتمال p'_{nd} به‌عنوان گره بعدی انتخاب می‌شود. p'_{nd} براساس فرمول ۹ محاسبه می‌شود:

$$p'_{nd} = \frac{p_{nd} + \alpha l_n}{1 + \alpha(N_k - 1)} \qquad (۹)$$

l_n مقداری هنجارشده بین [۰ , ۱] است که به q_n، طول صفی لینکی که گره kام را به همسایه‌اش n متصل می‌کند، بستگی دارد. فرمول ۱۰ این ارتباط را نشان می‌دهد. α نیز عددی است $(0.2 < \alpha < 0.5)$ برای وزن‌دادن به l_n در محاسبه‌ی p'_{nd}.

$$l_n = 1 - \frac{q_n}{\sum_{n'=1}^{N_k} q_{n'}} \qquad (۱۰)$$

- اگر یک حلقه[۲۰] تشخیص داده شد، مورچه گره‌های موجود در حلقه را از انباره خارج کرده و تمام حافظه‌یی را که برای آنها اشغال شده بود آزاد می‌کند، و گره دیگری برای حرکت انتخاب می‌کند.
- وقتی عامل پیش‌رو به گره مقصد رسید، عامل دیگری که مورچه‌ی پس‌رو نامیده می‌شود تولید می‌کند و تمام حافظه‌ها و داده‌هایش را به او منتقل کرده و خودش از بین می‌رود.
- مورچه‌ی پس‌رو مسیری مشابه مورچه‌ی پیشرو، اما در جهت عکس طی می‌کند.
- مورچه‌ی پس‌رو هنگام ورود به هرگره، در دو ساختار داده‌ی آن گره تغییر ایجاد می‌کند.
- پس از رسیدن به مقصد، مورچه‌ی پس‌رو هم از بین می‌رود.

به‌روز درآوردن جداول مسیریابی تنها از طریق سیگنال‌های فیدبکِ موجود صورت می‌گیرد. انتخاب مسیر بهینه مبتنی است بر طول فیزیکی (تعداد گره‌هایی که از آنها عبور می‌کند)، ظرفیت لینک‌ها، سرعت پردازش گره‌ها و همچنین با دیدگاه جلوگیری از تراکم. مورچه‌های پیش‌رو از همان صف داده‌ها استفاده می‌کنند و هیچ تقدمی بر آنها ندارند. اما مورچه‌های پس‌رو اولویت بالاتری دارند و سریع‌تر می‌رسند.[۱۶و۱۷]

چگونگی به‌روزکردن جداول مسیریابی در منابع مختلف در دسترس است. در این منابع می‌توان به‌روشنی روش به‌روزکردن جداول را آموخت. به‌راحتی می‌توان دید که این روش، روش هوشمندی است تولید جواب‌های نسبتاً خوب را ممکن می‌سازد.

طراحی و نتایج آزمایش

با توجه به جدیدبودن مدل پیشنهادی، لازم است مدل فوق صحه‌گذاری بشود. برای اثبات اعتبار مدل پیشنهادی جواب‌های به دست آمده با مدل‌های معتبر منتشرشده مقایسه شده‌اند. با توجه به این‌که مدل پیشنهادی برای اولین‌بار مفهوم پویایی را مورد توجه قرار داده، لذا برای صحه‌گذاری مجبور شده‌ایم تا بخش‌هایی از مدل پیشنهادی را غیرفعال کنیم. فرض‌های شرح داده شده درمورد الگوریتم AntNet درمورد هر سه مسئله‌ی C_1, C_2, C_3 که در جدول ۱ آمده است، به اجرا درآمده است. در جدول ۱، سعی شده حالات مختلفی از الگوریتم را که به جواب بهتری در مسئله‌ی مسیریابی می‌رسد (مانند جایگشت‌های قابل قبول مکان‌های انتخاب‌شده) آزمایش شود.

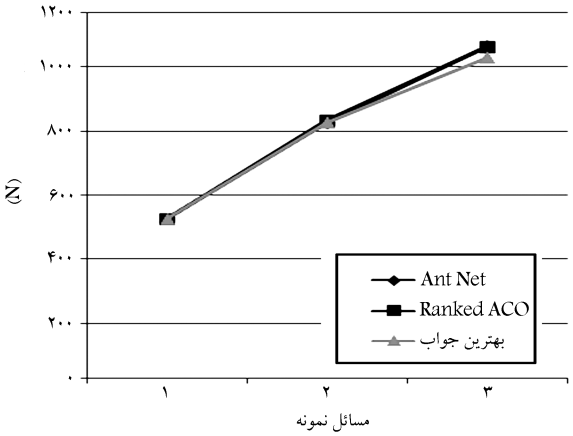
در ستون پنجم جدول ۱، کسری از مکان‌های کاندیدشده در مسیر ارائه شده که با آزمایش کسرهای مختلف، جواب‌های گوناگون را می‌سنجد. در این نوشتار برای به‌کارگیری AntNet اولیه تلاش شده است. در منابع موجود[۱۸و۱۹] بهترین جواب برای مسئله‌ی اول در مقاله فیشر[۲۰] و بهترین جواب برای هر سه مسئله با کمک Tabu search در مقاله‌ی تایلارد[۲۱] قابل دسترسی است.

جدول ۱. جواب‌های AntNet.

رویکرد	مساله	کسری از مکان‌های کاندید شده	حداقل لیست	میانگین لیست	انحراف استاندارد	بهبود جواب (٪)
AntNet	C_1	۱٫۳	۵۰۴٫۳	۵۵۱٫۹۸	۳٫۸۴	۲٫۹۹
		۱٫۵	۵۲۴٫۸	۵۲۸٫۹	۲٫۸۹	۰٫۰۴
		۱٫۷	۵۲۸٫۶	۵۳۲٫۸۵	۱٫۹۱	۰٫۷۷
		۱٫۹	۵۳۹٫۸	۵۴۸٫۱۸	۴٫۹۵	۲٫۹۱
	C_3	۱٫۳	۸۷۱٫۳	۸۹۱٫۲۱	۹٫۴	۵٫۴۷
		۱٫۵	۸۵۶٫۸	۸۷۶٫۷۱	۷٫۲۴	۳٫۷۲
		۱٫۷	۸۵۴٫۲	۸۶۸٫۱۹	۶٫۵۳	۳٫۳۹
		۱٫۹	۸۵۴٫۲	۸۶۵٫۶۵	۵٫۳۱	۳٫۴۱
	C_4	۱٫۳	۱۱۷۸٫۶۱	۱۱۹۷٫۴۳	۸٫۵۲	۱۴٫۶
		۱٫۵	۱۱۵۴٫۱۵	۱۱۷۰٫۴۷	۹٫۸۹	۱۲٫۲۲
		۱٫۷	۱۱۳۶٫۱۶	۱۱۵۴٫۴	۸٫۳۸	۱۰٫۴۸
		۱٫۹	۱۱۳۱٫۸۳	۱۱۴۳٫۴۳	۶٫۲۹	۱۰٫۰۶

جدول ۲. مقایسه‌ی نتایج مقاله با دیگر متدها.

مسائل	تعداد ماشین‌ها	ظرفیت ماشین‌ها	δ	بهترین جواب[۱۱]	Ranked ACO[۹]	Ant Net	تفاوت جواب به‌دست آمده با بهترین جواب
C_1	۵۰	۱۶۰	۰	۵۲۴٫۶۱	۵۲۴٫۶۱	۵۲۴٫۶۱	۰
C_3	۱۰۰	۲۰۰	۰	۸۲۶٫۱۴	۸۳۲٫۳۲	۸۲۴٫۳۴	۱٫۸
C_4	۱۵۰	۲۰۰	۰	۱۰۲۸٫۴۲	۱۰۶۱٫۵۵	۱۰۶۳٫۵۵	−۳۵٫۱۳



شکل ۳. مقایسه‌ی نتایج حاصل از AntNet با دیگر متدها.

برای ارزیابی بهتر مدل و جواب آن، نتایج حاصله را علاوه بر بهترین جواب با متد ACO رتبه‌بندی شده نیز مقایسه کرده‌ایم.[۹] با توجه به داده‌های جدول ۲، به نظر می‌رسد خروجی الگوریتم AntNet قادر است نتایج قابل رقابتی را با دیگر الگوریتم‌ها به وجود آورد. یادآوری این نکته لازم به نظر می‌رسد که علت جواب‌های بهینه‌نشده را می‌توان ناشی از غیرفعال شدن قسمت‌هایی از مدل پیشنهادی جدید دانست. طبیعی است که واردکردن محدودیت‌های جدید در مسئله به کاهش بهینگی منجر شود. به‌طور مثال برای مسئله‌ی C_1 جواب تولیدشده به‌مقدار تقریبی ۱٪ کم‌تر از حل بهینه‌ی دیگر منابع است. برای دیگر مسائل نیز حدوداً چنین نتایجی حاصل شده است. در شکل ۳ مقایسه‌ی روش‌ها و الگوریتم AntNet به‌صورت شماتیک نمایش داده شده است. چنان که از قبل پیش‌بینی می‌شد با افزایش تعداد کاندیداها (مقدار N)، جواب تولیدشده با الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با بهترین جواب موجود فاصله‌یی افزایشی دارد.

نتیجه‌گیری

در یک سیستم حمل‌ونقل، انتخاب درست یا نادرست مسیر تبعات افزایش فاحش هزینه را نشان می‌دهد. با توجه به نوع کار، سرمایه و زمان صرف‌شده، انتخاب مسیر مناسب می‌تواند به پیروزی در بازار رقابتی حاضر منجر شود. در این نوشتار مدلی جدید از مسائل مسیریابی وسائل حمل‌ونقل ارائه شد. در مدل ارائه‌شده سعی بر این بود که با اعمال ضرایب دوره‌ی تحویل کالا برای تک‌تک مشتریان (که می‌توانند به‌صورت جداگانه یا گروهی سرویس بگیرند)، مدل کلاسیک آن را که برای اولین بار در سال ۱۹۸۵ ارائه شد[۱۰] و سپس تعمیم یافت، هرچه بیشتر به شرایط دنیای واقعی نزدیک کنند. حل چند مسئله‌ی از قبل انتشاریافته نشان داد که الگوریتم AntNet با درصد بسیار نزدیکی به جواب بهینه، به جواب مناسب می‌رسد. می‌توان با ترکیب این روش با دیگر روش‌ها به جواب‌های بهتر و کاراتری نیز (حتی مسائلی با ابعاد بزرگ‌تر) دست یافت. به نظر می‌رسد پیاده‌سازی این الگوریتم در حل مسئله‌ی مسیریابی (VRP) به تولید جواب بهتر می‌انجامد.

تقدیر و تشکر

بدینوسیله نویسندگان این مقاله از پشتیبانی مالی دانشگاه تهران، پردیس دانشکده‌های فنی به شماره پرونده ۸۱۰۸۰۲۳/۱/۱۱ در انجام مطالعه فوق تشکر و قدردانی می‌نمایند.

پانوشت

1. vehicle routing problem (VRP)
2. agent based
3. high complex
4. tour sets
5. depot
6. time window
7. classical VRP
8. traveling salesman problem
9. exact
10. dynamic
11. binary
12. node
13. subrouts
14. agent based
15. stigmergy
16. pheromone
17. forward ant
18. backward ant
19. stack

۲۰. در مسائل مسیریابی، احتمال اینکه عامل‌ها(مورچه‌ها) نتوانند به انتهای مسیر برسند و تنها بین چند نود مشخص به‌طور مداوم حرکت نمایند، زیاد است، به چنین حالتی حلقه (loop) می گویند.

منابع

1. Shen, Z.M. "Production, manufacturing and logistics incorporating inventory and routing costs in strategic location models", *European Journal of Operational Research,* **179**, pp. 372-389 (2007).
2. Dantzig, G.B. and Ramser J.H. "The truck dispatching problem", *Management Science,* **6**, pp. 80-91 (1959).
3. Golden, B.L.; Assad, A.A. and Wasil, E.A. "Routing vehicles in the real world: Applications in the solid waste beverage, food, dairy and newspaper industries", in: P. Toth and D.Vigo (Eds.), The vehicle routing problem, SLAMMonographs on discrete mathematics and applications, Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, pp. 245-286 (2002).
4. Dorigo, M. and Gambardella, L.M. "Ant colonies for the traveling salesman problem", *BioSystem,* **43**(1), pp. 73-81 (1997).
5. Applegate, D.L; Bixby, R.E.; Chvtal, V. and Cook, W.J. *The Traveling Salesman Problem,* A computational study, Princeton University Press, Princeton, NJ (2007).
6. Baldacci, R.; Christofides, N. and Mingozzi, A. "An exact algorithm for the vehicle routing problem based on the set partitioning formulation with additional cuts", Math Program Ser A. 115:351-385 (2008)
7. Lenstra, J.K. and Rinnooy Kan, A. "Complexity of vehicle routing and scheduling problems", *Networks,* **11**, pp. 221- 227 (1981).
8. Goodman, S. and Hedetniemi, S. *Introduction to the Design and Analysis of Algorithms,* McGraw-Hill, New York (1976).
9. Bullnheimer, B.; Hartl, R.F. and Strauss, C. "An improved ant system algorithm for the vehicle routing problem", *Ann Operational Research,* **89**, pp. 319-28 (1999).
10. Laporte, G.; Nobert, Y. and Desrochers, M. "Optimal routing under capacity and distance restrictions", *Operational Research,* **33**, pp. 1058-1073 (1985).
11. Dantzig, G.B.; Fulkerson, D.R. and Johnson, S.M. "Solution of a large-scale traveling-salesman problem", *Operational Research,* **2**, pp. 393-410 (1954).
12. Caro, G.D. and Dorigo, M. *Mobile Agent for Adaptive Routing,* Technical Report IRIDIA / University Libre-Bruxelles, Belgium, pp. 97-112 (1997).
13. Guoying, L.u.; Subing, Z.H. and Zemin, Liu. "Distributed dynamic routing using ant algorithm for telecommunication networks", *Communication Technology Proceedings*, 2000. WCC - ICCT 2000, International Conference on **2**, pp. 1607-1612 (2000).
14. Michalareas, T. and Sacks, L. "Link-state and ant-like algorithm behaviour for singleconstrained routing", High Performance Switching and Routing, IEEE Workshop on , pp. 302-305 (2001).
15. Schoonderwoerd, R.; Holl, O. and Bruten, J. "Ant-Like agent for load balancing in telecommunications network", *in proceeding of the first international conference on autonomous agents,* ACM press, pp.209-216 (1997).

۱۶. سلطانی، آزاده «توسعه الگوریتم مسیریابی AntNet و ارزیابی نتایج با شبیه‌سازی در محیط NS۲»، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد (۱۳۸۳).

17. Garey, M.R. and Johnson, D.S. *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness,* W.H. Freeman & Co, New York (1979).
18. Christofides, N.; Mingozzi, A.; Toth, P. and Sandi C. (eds.), *Combinatorial Optimization,* Chichester: Wiley, pp. 315-38 (1979).
19. Baran, B. and Sosa, R. "AntNet routing algorithm for data networks based on mobile agents", *Inteligencia Artificial, Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial,* **12**, pp. 75-84 (2001).
20. Fisher, M.A. "Optimal solution of vehicle routing problems using minimum k-trees", *Operational Research,* **42**, pp. 626-42 (1994).
21. Taillard, E. "Parallel iterative search methods for vehicle routing problems", *Networks,* **23**, pp. 661-73 (1993).