مسیریابی بهینه سیستم‌های حمل‌ونقل در انبارهای اتوماتیک

محمد مهدی سپهری، دانشیار، دانشکده فنی - مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
سید مهدی حسینی مطلق، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده فنی - مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
E-mail: mehdi.sepehri@modares.ac.ir

چکیده

سیستم‌های نگهداری مواد و کالا از جمله سیستم‌هایی هستند که در سال‌های اخیر پیشرفت چشمگیری داشته‌اند. این پیشرفت‌ها هم در زمینه سخت‌افزاری مانند سیستم‌های قفسه‌بندی، ماشین‌های ذخیره‌سازی و بازیابی مواد و هم در زمینه نرم‌افزاری نظیر مدل‌های زمان سفر و استراتژی بکارگیری تجهیزات رخ داده اند. توسعه سیستم ذخیره‌سازی و بازیابی اتوماتیک (AS/RS) یکی از مهم ترین پیشرفت‌ها در مسیر مدرن کردن مکانیزم صنایع است. یک سیستم حمل‌ونقل در انبار اتوماتیک که گاهی اوقات به انبار مرتفع اطلاق می‌شود، ترکیبی از تجهیزات و کنترل‌هاست که مواد را سریع تر و با امنیت بیشتر و کارآتر از روشهای سنتی جابجایی، ذخیره، بازیابی و یا جابجا می‌کند. در این مقاله مدل جدیدی در حوزه مسأله فروشنده دوره‌گرد (TSP) ارائه شده که در آن مسأله مسیریابی حمل‌ونقل اقلام و قطعات از یک AS/RS بر اساس یک سفارش متشکل از چند قلم کالای متنوع مدل‌سازی شده است. این مدل نشانگر ساختار ریاضی مسأله‌ای جدید است که بر پایه تعمیم مسأله فروشنده دوره‌گرد (GTSP) بنا شده است. مسأله جدید "مسأله فروشنده دوره‌گرد تعمیم‌یافته تو در توی مرتبه ۲ (2-nested GTSP)" نامیده شده است. در این مقاله ضمن ارائه مدل ریاضی این مسأله جدید، نشان داده شده که با استفاده از این مدل می‌توان مسأله ترتیب برداشت اقلام یک سفارش از یک AS/RS را که در آن هر قلم کالا در بیش از یک مکان نگهداری می‌شود، حل کرد. چگونگی حل مسأله به روش بهینه و همچنین یک الگوریتم فرا ابتکاری مورچگان که آنرا ACSrank نامیده‌ایم طراحی شده و محاسبات مقایسه‌ای برای دوازده مسأله نمونه نشان داده شده است.

واژه‌های کلیدی: AS/RS، بهینه‌یابی، مسیریابی، تعمیم مسأله فروشنده دوره‌گرد تو در توی مرتبهٔ دو، الگوریتم مورچگان

۱. مقدمه

در این به بخش به بررسی مرور ادبیات موضوع در دو حوزه سیستم ذخیره‌سازی و بازیابی اتوماتیک، تعمیم مسأله فروشنده دوره‌گرد، در نهایت تعریف مسأله و نوآوری تحقیق می‌پردازیم.

۱-۱ سیستم ذخیره‌سازی و بازیابی اتوماتیک

AS/RS توسط انجمن حمل‌ونقل مواد به صورت زیر تعریف شده است [۱]: AS/RS ترکیبی از کنترل‌ها و تجهیزات است که مواد را با دقت، صحت و سرعت، تحت یک درجه مشخص از اتوماسیون، حمل، ذخیره و بازیابی می‌کند.

برداشت کالاها طبق فهرست، یکی از فعالیت‌های زمان‌بر، وقت‌گیر و پرکار سیستم برداشت سفارشات (OPS) به شمار می‌رود. در یک انبار، ٦٥ درصد هزینه‌های عملیاتی برای عملیات برداشت سفارش مصرف می‌شود. به همین دلیل راهبردهای مختلفی برای بهبود بهره‌وری فرآیند برداشت، مورد استفاده قرار گرفته است. در میان آنها می‌توان توالی سفارشات، دسته‌بندی، ناحیه‌بندی و فاکتورهای انسانی را نام برد.

توالی سفارشات: یکی از مسائلی که در کارآیی عملکرد AS/RS نقش بسیار مهمی ایفا می‌کند. روش تعیین توالی سفارشات است.

*تاریخ دریافت: ۸۵/۵/۱۰ - تاریخ پذیرش: ٨٦/٨/٦

هدف از تعیین روش بهینه جهت توالی سفارشات این است که سفارشات رسیده در اسرع وقت ارائه خدمت شوند یا به عبارت ساده‌تر زمان‌های انتظار سفارشات و طول صف در این سیستم به حداقل خود برسد.

اخیراً توجه زیادی به مدیریت عملیاتی سیستم‌های نگهداری معطوف شده است. از نتیجهٔ کارهای وایت و بوزر در سال ۱۹۸٤، این سؤال پیش می‌آید که آیا عملکرد سیستم توسط بکارگیری قانون‌های توالی مختلف بهبود می‌یابد [۲]؟ هان و همکارانش در سال ۱۹۸۷ در حالتی که نظم اولین وارده، اولین سرویس‌گیرنده توسط روش ابتکاری نزدیک‌ترین همسایه جایگزین می‌شود، به مقایسه خروجی (خروجی یعنی تعداد خدمات در واحد زمان) AS/RS پرداختند [۳]. همچنین سدمن در سال ۱۹۸۸ همان مسأله توالی سفارش‌ها در محیط‌های دینامیکی را مورد بحث قرار داد [٤]. در مطالعات بعدی روش ابتکاری نزدیک ترین همسایه برای توالی بازیابی‌ها در سیستم‌های ظرفی توسط هان و مک‌گینس در سال ۱۹۸٦ و در سیستم‌های قفسه بندی دوار، توسط مک‌گینس در سال ۱۹۸۷ مورد استفاده قرار گرفته و نتایج مشابه نیز گزارش شده است [٥].

دسته‌بندی و ناحیه‌بندی: دسته‌بندی و ناحیه‌بندی مشخص می‌کند که کدام سفارش/ قلم کالا توسط کدام کاربر بازیابی شده است؛ توالی برداشت، ترتیب بازیابی اقلام را تعیین می‌کند. سیاست‌های دسته‌بندی در برداشت سفارش یک بعدی، توسط جتچالکس در سال ۱۹۸۳ مورد آزمایش قرار گرفت. الساید و همکارانش در سال ۱۹۸۰ و الساید در سال ۱۹۸۱، زنجیره‌ای از مطالعات را روی مسأله دسته‌بندی بهینه چندین سفارش در یک انبار دو بعدی با ساختار نردبانی به وجود آوردند [٦]. السايد و استرن در سال ۱۹۸۳ با دریافتن اینکه روش‌ها و راه‌حل‌های دقیق حل مسأله دشوار و وقت‌گیر است، تعدادی الگوریتم ابتکاری ارائه، اما گزارش کردند که هیچ یک از آنها در طول آزمایش‌ها نتایج برتری به طور پیوسته به وجود نیاوردند [۷]. هوآنگ و همکارانش در سال ۱۹۸۸ مسأله برداشت سفارش در یک AS/RS تک راهرویی شبیه مسأله فوق را مورد مطالعه قرار دادند و الگوریتم ابتکاری ارائه دادند که دسته‌بندی مؤثر سفارشات در هر تور ماشین S/R تعیین می‌کند [۸]. السايد و لی در سال ۱۹۹٦ رویهٔ دسته‌بندی در یک سیستم تک راهرویی را با هدف کمینه کردن زمان دیرکرد شرح دادند [۹].

۱-۲ تعمیم مسأله فروشنده دوره‌گرد

یکی از تعمیم‌های معروف TSP، مسأله GTSP است که نخستین بار در اواخر دهه شصت میلادی توسط لابوردر، ساسکنا و اسریواستاوا در ادبیات تحقیق در عملیات مطرح شد [۱۰-۱۲]. هدف از حل مسأله یافتن مسیر بسته‌ای با حداقل هزینه است که از هر خوشه حداقل یکبار دیدار کند [۱۳]. در حالت خاصی از GTSP شرط دقیقاً یکبار دیدار از خوشه جایگزین می‌شود که به آن Exact-GTSP گفته می‌شود [١٤]. آشکار است هم در GTSP و هم در E-GTSP تعدادی از رأس‌ها می‌توانند دیدار نشده باقی بمانند.

دامنه وسیعی از مسائل بهینه‌یابی ترکیبی قابل تبدیل به GTSP هستند [١٥]. اولین کاربرد GTSP توسط لابوردر در تعیین توالی فایل‌های کامپیوتری معرفی شد [۱۰]. تقریباً همزمان با لابوردر، ساسکنا مسیر حرکت ارباب رجوع در ادارات دولتی را به صورت یک GTSP متقارن مدل کرد [۱۱]. همچنین به کاربردهای بالقوه‌ای از GTSP مانند توالی برداشت اقلام از یک انبار چند بخشی، تعیین مسیر پرواز و فرودگاه برای هواپیماها و انواع خاصی از برنامه‌ریزی تولید انعطاف‌پذیر [١٦] پرداخته شده است.

برخی دیگر از کاربردهای مهم GTSP عبارتند از:

الف- مسأله تور پوششی [١٥]

ب- طراحی سیستم جریان مواد [١٦]

ج- مسأله صندوق‌های پستی [١٥]

د- TSP با رأس‌های خاص [۱۷]

نخستین الگوریتم‌ها برای حل GTSP برمبنای برنامه‌ریزی پویا بودند و فقط برای مسائل اقلیدسی کاربرد داشتند [۱۷]. این الگوریتم‌ها مشابه روش‌هایی از TSP که بر مبنای برنامه‌ریزی پویا بودند، عمل می‌کردند [۱۸] و در آنها حالت به صورت مجموعه‌ای از رأس‌ها که قبلاً دیدار شده‌اند، تعریف می‌شد. یکی از نقاط ضعف این قبیل روش‌ها رشد سریع تعداد حالات همراه با افزایش تعداد رأس‌ها بود [۱۹]. برای اولین بار لاپورته و همکاران، از برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح (ILP) برای مدل‌سازی و حل GTSPهای اقلیدسی و نااقلیدسی متقارن استفاده کردند و توانستند برای مسائلی که قبلاً با برنامه‌ریزی پویا و یا روش شمارش مستقیم قابل حل نبودند، جواب بهینه به دست آورند [۲۰]. بزرگ‌ترین مسأله‌ای که در آن زمان حل شد شامل ٥۰ رأس و ۱۰ خوشه بود. لاپورته و همکاران در ادامه

تحقیقاتشان موفق شدند GTSP اقلیدسی نامتقارن را نیز با استفاده از برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح و روش انشعاب و تحدید حل کنند [۲۱]. در این روش محدودیتهای حذف تور فرعی و محدودیتهای بقای جریان رأس‌ها، آزاد شده و در تابع هدف آورده می‌شوند. سپس مسأله آزاد شده در قالب یک مسأله جریان شبکه حل شده و به عنوان یک حد پایین عمل می‌کند [۱۹]. سرانجام در سال ۱۹۸۷، لاپورته و مرکیور الگوریتمی ارائه کردند که برای تمام GTSPها (اقلیدسی، نااقلیدسی، متقارن و نامتقارن) پاسخگو بود. در این الگوریتم دقیق مجدداً از برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح برای فرموله کردن مسأله استفاده شده، ولی شیوه آزاد سازی آن متفاوت است [۱۷]. به عبارت دقیق‌تر، در این روش محدودیت‌های حذف دور فرعی و محدودیت‌هایی که منجر به دیدار از تمام خوشه‌ها می‌شود، آزاد شده و مسأله آزاد شده در قالب یک مسأله تخصیص |N|*|N| حل می‌شود که در آن N مجموعه رأس‌های مسأله است [۱۹]. با استفاده از این الگوریتم حتی مسائلی با ۱۰۰ رأس و ۸ خوشه نیز حل شده‌اند [۱۷].

مسأله GTSP یک مسأله NP-hard است. بنابراین، برای مسائلی با ابعاد بزرگ به ناچار باید از روش‌های ابتکاری با درجه پیچیدگی چند جمله‌ای استفاده شود. در همین ارتباط امروزه از روشهای جستجوی جدولی برای حل GTSP استفاده شایانی می‌شود. اما دسته دیگری از روشها به نام روشهای تبدیلی وجود دارند که در آن هر GTSP روی گراف G به یک (یا چند) TSP روی گراف G_1 چنان تبدیل می‌شود که بین هر جواب بهینه TSP و جواب بهینه GTSP یک تناظر وجود داشته باشد. سپس به راحتی از الگوریتم‌های ابتکاری یا دقیق متعددی که برای TSP وجود دارد، یاری جسته و جواب بهینه GTSP را تعیین می‌کنند [۱۳].

۲. تعریف مسأله و مدل ریاضی

مجموعه N متشکل از n گره را در نظر بگیرید که به m زیر مجموعه غیر تهی S_i دو به دو ناسازگار با مشخصات زیر تفکیک شده‌اند.

$$S_i \cap S_j = \phi \qquad \forall i,j \in \{1,..m\}, i \neq j \tag{۱}$$

$$|S_i| \geq 1 \qquad \forall i \tag{۲}$$

$$N = \bigcup_{i=1}^{m} S_i \qquad |N| = n \tag{۳}$$

هر یک از گره‌های عنصر N از طریق یک یا چند یال عضو مجموعه یال‌های E به یک یا چند گره دیگر وصل شده‌اند به طوری که هر یال دو گره از دو زیر مجموعه متفاوت را به هم می‌پیوندد. به عبارت دیگر:

$$\forall (i,j) \in E \quad , i \in S_i \quad , j \in S_j \quad , i \neq j \tag{٤}$$

دو مجموعه N و E تشکیل شبکه $G=(N,E)$ را می‌دهند. می‌خواهیم کوتاه ترین گردشی را به دست آوریم که از یک گره درون یک زیر مجموعه آغاز شده و تنها از یک گره از هر یک از دیگر زیر مجموعه‌ها گذشته و دوباره به همان گره آغازین باز گردد. چنین مسأله‌ای را $GTSP$ نامیده می‌شود. حال یک $GTSP$ را در نظر بگیرید که در درون هر زیرمجموعه آن، زیرمجموعه‌های دیگری که دو به دو ناسازگار هستند، شکل گرفته باشد.

زیر مجموعه‌های لایه اول را زیر مجموعه‌های مرتبه اول و زیر مجموعه‌های شکل گرفته در هر زیر مجموعه از مجموعه‌های مرتبه اول را زیر مجموعه مرتبه دوم می‌نامیم. از علامت S_i^1 برای نشان دادن زیر مجموعه مرتبه اول i و از علامت S_{ij}^2 برای نشان دادن زیر مجموعه مرتبه دوم j که در درون زیر مجموعه مرتبه اول i قرار دارد استفاده می‌کنیم. بنابراین، ساختار تشکیلاتی گره‌های مسأله مورد نظر، که آن را $2-nested\ GTSP$ می‌نامیم به شرح زیراست:

$$N = \{1,2,..,n\} \quad \text{مجموعه گره‌ها} \tag{۵}$$

$$M = \{1,2,...,m\} \quad \text{اندیس زیر مجموعه‌های مرتبه اول} \tag{٦}$$

$$S_i^1 \cap S_j^1 = \phi \qquad \forall i,j \in M \quad , i \neq j \tag{۷}$$

$$|S_i^1| \geq 1 \qquad \forall i \in M \tag{۸}$$

$$N = \bigcup_{i=1}^{m} S_i^1 \tag{۹}$$

اندیس زیر مجموعه‌های مرتبه دوم برای هر زیر مجموعه مرتبه اول

$$L_m = \{1,2,...,l_m\} \qquad m \in M \quad m \tag{۱۰}$$

$$S_{mi}^2 \cap S_{mj}^2 = \phi \qquad \forall i,j \in L_m \quad , i \neq j \quad , \forall m \in M \tag{۱۱}$$

$$|S_{mi}^2| \geq 1 \qquad \forall i \in L_m \quad , \forall m \in M \tag{۱۲}$$

$$S_m^1 = \bigcup_{i=1}^{l_m} S_{mi}^2 \qquad \forall m \in M \tag{۱۳}$$

$$N = \bigcup_{i=1}^{m} \bigcup_{j=1}^{l_i} S_{ij}^2 \tag{١٤}$$

مـــشابه ســـــاختار ارتبـــاطی $GTSP$ ســــاختار ارتبــــاطی $2-nested\ GTSP$ به این صورت است که بین هر دو گـره می‌تواند یک یال ارتباطی برقرار باشد، مگر آنکه ایـن دو گـره در یک زیر مجموعه مرتبه دوم قرار گرفته باشند.

در مسأله $2-nested\ GTSP$ هدف یافتن کوتاه‌ترین گردشی است که از یک گره درون زیر مجموعه‌های مرتبه دوم آغاز شده، از یک گره از هر یک از دیگر زیر مجموعه‌های مرتبه دوم گذشته و دوباره به همان گره آغازین باز گردد به شرطی که تا یـک گـره از تمام زیر مجموعه‌های مرتبه دوم موجود در هر زیـر مجموعـه مرتبه اول دیده نشده باشند امکان خروج از زیر مجموعـه مرتبـه اول مربوطه وجود نخواهد داشت.

۲-۱ تعریف علائم، متغیرها و پارامترها

علائم، متغیرها و پارامترهای متعددی در مدل ریاضی مورداستفاده قرار گرفته است که تعریف هر یک از آنها به شرح ذیل است:

E : $E=\{1,2,...,e\}$ مجموعه خوشه‌های سطح یک.

e : تعداد خوشه‌های سطح یک

F_k : $F_k=\{1,2,...,\ f_k\}$ مجموعه خوشه‌های سطح دو واقـع در خوشه سطح یک k، $k\in E=\{1,2,...,e\}$.

f_k : تعداد خوشه‌های سطح دو واقع در خوشه سطح یک k.

G_{kl} : $G_{kl}=\{1,2,...,g_{kl}\}$ مجموعه گره‌های واقع در خوشه سطح دو l، $l\in F_k=\{1,2,...,\ f_k\}$، واقع در خوشـه سـطح یک k، $k\in E=\{1,2,...,e\}$ می‌باشد.

g_{kl} : تعداد گره‌های واقع در خوشه سطح دو l کـه در خوشـه سطح یک k قرار دارد.

c_{ijklmn} : معرف هزینه ارتباط بین دو گره y_{ijk} و گره y_{lmn}

y_{ijk} : معرف گرهٔ kام خوشه سطح دوم j واقع در خوشـه سـطح یک i

(۱۵)

$$y_{ijk}=\begin{cases}1 & \text{اگر گرهٔ } k \text{ام خوشه سطح دوم } j \text{ واقع در خوشه سطح یک } i \text{ دیده شود}\\ 0 & \text{در غیر این صورت}\end{cases}$$

x_{ijklmn} : معرف سویه مرتبط‌کننده دو گره y_{ijk} و گره y_{lmn}

(۱۶)

$$x_{ijklmn}=\begin{cases}1 & \text{اگر از گره } y_{ijk} \text{ به گره } y_{lmn} \text{ عزیمت شود}\\ 0 & \text{در غیر اینصورت}\end{cases}$$

z_{il} : معرف سویه مرتبط‌کننده خوشه سطح یک i و خوشه سطح یک l

(۱۷)

$$z_{il}=\begin{cases}1 & \text{اگر از خوشه سطح یک } i \text{ به خوشه سطح یک ۱ عزیمت شود}\\ 0 & \text{در غیر این صورت}\end{cases}$$

p_{ijlm} : معرف سویه مرتبط‌کننده خوشه سطح دو j واقع درخوشه سطح یک i و خوشه سطح دو m واقع در خوشه سطح یک l

q_{ij} : معرف خوشه سطح دو j واقع درخوشه سطح یک i

u_{ij} : معرف ترتیب قرار گرفتن خوشه سطح دو q_{ij} در تور شکل گرفته

n : تعداد کل خوشه‌های سطح دو

۲-۲ مدل ریاضی مسأله

با توجه به علائم، پارامترها و متغیرهای تعریف شده، مدل ریاضی مسأله متشکل از یک تابع هدف و پنج دسته محدودیت می‌باشـد. پس از معرفی مدل ریاضـی توضـیحات بیـشتری در مـورد تـابع هدف و محدودیت‌ها ارائه می‌شود.

$$Min \quad W=\sum_{n=1}^{g_{lm}}\sum_{k=1}^{g_{ij}}\sum_{m=1}^{f_l}\sum_{j=1}^{f_i}\sum_{l=1}^{e}\sum_{i=1}^{e} c_{ijklmn}\, x_{ijklmn} \tag{۱۸}$$

$$Subject\ to:\quad \sum_{k=1}^{g_{ij}} y_{ijk}=1 \qquad for\quad \begin{cases} i=1,2,...,e\\ j=1,2,...,\ f_i\end{cases} \tag{۱۹}$$

$$\sum_{n=1}^{g_{lm}}\sum_{\substack{m=1\\ m\neq j}}^{f_l}\sum_{l=1}^{e} x_{ijklmn} = y_{ijk} \qquad for\quad \begin{cases} i=1,2,...,\ e\\ j=1,2,...,\ f_i\\ k=1,2,...,\ g_{ij}\end{cases} \tag{۲۰}$$

$$\sum_{k=1}^{g_{ij}}\sum_{\substack{j=1\\ j\neq m}}^{f_i}\sum_{i=1}^{e} x_{ijklmn} = y_{lmn} \qquad for\quad \begin{cases} l=1,2,...,e\\ m=1,2,...,\ f_l\\ n=1,2,...,g_{lm}\end{cases} \tag{۲۱}$$

$$\sum_{n=1}^{g_{lm}}\sum_{k=1}^{g_{ij}}\sum_{m=1}^{f_l}\sum_{j=1}^{f_i} x_{ijklmn} = z_{il} \qquad for\quad i,l=1,2,...,e \tag{۲۲}$$

$$\sum_{\substack{l=1\\ l\neq i}}^{e} z_{il}=1 \qquad for \quad i=1,2,...,e \tag{۲۳}$$

$$\sum_{n=1}^{g_{lm}}\sum_{k=1}^{g_{ij}} x_{ijklmn}=p_{ijlm} \qquad for \quad \begin{cases} i,l=1,2,...,e \\ j,m=1,2,...,f_e \end{cases} \tag{۲۴}$$

$$\sum_{k=1}^{g_{ij}} y_{ijk}=q_{ij} \qquad for \quad \begin{cases} i=1,2,...,e \\ j=1,2,...,f_e \end{cases} \tag{۲۵}$$

$$u_{lm}\geq u_{ij}+1-n(1-p_{ijlm}) \qquad for \quad \begin{cases} i,l=1,2,...,e \\ j,m=1,2,...,f_e \end{cases} \tag{۲۶}$$

$$y_{ijk}\in\{0,1\} \tag{۲۷}$$

$$x_{ijklmn}\in\{0,1\} \tag{۲۸}$$

$$z_{il}\in\{0,1\} \tag{۲۹}$$

$$p_{ijlm}\in\{0,1\} \tag{۳۰}$$

$$q_{ij}\in\{0,1\} \tag{۳۱}$$

$$u_{ij}\in\{0,1,...,n-1\} \tag{۳۲}$$

۲-۳ شرح مدل ریاضی

تابع هدف، یک چند جمله‌ای مرتبه اول است که از حاصلضرب هزینه بین هر دو گره y_{ijk} و y_{lmn}، در سویه ارتباطی بین دو گره y_{ijk} و y_{lmn} تشکیل شده است.

اگر در جواب مسألهٔ حل‌شده سویه x_{ijklmn} وجود داشته باشد در نتیجه داریم $x_{ijklmn}=1$ و این به این معنی است که هزینه مربوط به این سویه در تابع هدف تأثیرگذار بوده و در غیر این صورت داریم: $x_{ijklmn}=0$، بنابراین هزینهٔ آن تأثیری بر تابع هدف نخواهد داشت.

با لحاظ محدودیت‌های (۱۹)، (۲۰) و (۲۱) به هر خوشه سطح دو الزاماً یک سویه وارد و یک سویه خارج می‌شود.

و اما در محدودیت شماره (۲۲) و (۲۳)، بنا بر تعریف 2-nested GTSP داریم که تا تمام خوشه‌های سطح دو یک خوشه سطح یک دیده نشده‌اند حق خروج از خوشه سطح یک مربوطه را نخواهیم داشت. این توضیح به این مفهوم است که باید فقط یک سویه وارد خوشه سطح یک شود و فقط یک سویه از خوشه سطح یک خارج شود. برای اضافه کردن این محدودیت به مدل ریاضی یک متغیر جدید به نام z_{il} تعریف کرده‌ایم که ارتباط میان خوشه‌های سطح یک را نشان می‌دهد.

محدودیت‌های (۲۴)، (۲۵) و (۲۶) محدودیت‌های حذف زیرتور (sub tour) است. به مانند مسأله TSP همان طور که در مسأله 2-nested GTSP نیز ذکر شد نباید زیرتور تشکیل شود. به همین علت باید به سه محدودیت بالا محدودیتی اضافه شود که از تشکیل زیرتور جلوگیری کند. به وضوح می‌توان یک تور کامل در مسأله 2-nested GTSP را به وسیله لیست کردن خوشه‌های سطح دو به ترتیبی که دیده شده‌اند تعریف کرد. اگر S_i بیانگر i امین خوشه سطح دو دیده شده در تور باشد آنگاه داریم:

تعداد کل تورهای امکان‌پذیر برابر تعداد جابجایی‌های (n-1) خوشه سطح دو است که برابر است با (n-1)!. به همین دلیل متغیر تصمیم p_{ijlm} تعریف می‌شود. اگر $p_{ijlm}=1$ به این مفهوم است که از خوشه سطح دو q_{ij} به خوشه سطح دو q_{lm} رفته‌ایم و در صورتی که بین دو خوشه سویه‌ای وجود نداشته باشد داریم $p_{ijlm}=0$.

متغیر $for \begin{cases} i=1,2,...,e \\ j=1,2,...,f_e \end{cases}$ u_{ij} به این ترتیب تعریف می‌شود که ترتیب خوشه سطح دو q_{ij} در تور شکل گرفته را بر می‌گرداند.

$u_{11}=0$ یا $u_{S_0}=0$ و $u_{S_1}=1$ و ...

لذا در یک تور واجد شرایط داریم:

$$u_{lm}=u_{ij}+1 \qquad if \quad p_{ijlm}=1 \tag{۳۳}$$

در ضمن متغیر u_{ij} یک متغیر عدد صحیح بین صفر و n-1 است.

بنابراین u_{lm} محدودیتهای زیر را ارضا می‌کند.

$$u_{lm}\geq\begin{cases} u_{ij}+1-n & if \quad p_{ijlm}=0 \\ u_{ij}+1 & if \quad p_{ijlm}=1 \end{cases} \tag{۳۴}$$

محدودیت بالا را به‌طور خلاصه می‌توان به این صورت نوشت:

$$u_{lm}\geq u_{ij}+1-n(1-p_{ijlm}) \tag{۳۵}$$

محدودیت‌های (۲۷) تا (۳۲) مربوط به نوع متغیرها هستند.

۲-٤ چگونگی مدلسازی برداشت سفارشها با استفاده از 2-nested GTSP

مسأله برداشت سفارشها در AS/RS با ویژگی چند جایگاهی هر محصول را می‌توان به سادگی با استفاده از 2-nested GTSP مدل کرد. به این صورت که خوشه‌های سطح اول مبین سفارشهای مختلف است و خوشه‌های سطح دوم واقع در هر خوشه سطح اول نشان‌دهنده اقلامی است که در هر سفارش باید جمع‌آوری شوند. گره‌ها در هر خوشه سطح دو مکان‌هایی را نشان می‌دهند که آن قلم کالا در آن مکان‌ها موجود است. بنابراین با استفاده از حل این مسأله مسیر بهینه جمع‌آوری سفارشها مشخص می‌شود. تصویر کلی شبکه این مسأله در شکل ۱ نشان داده شده است.

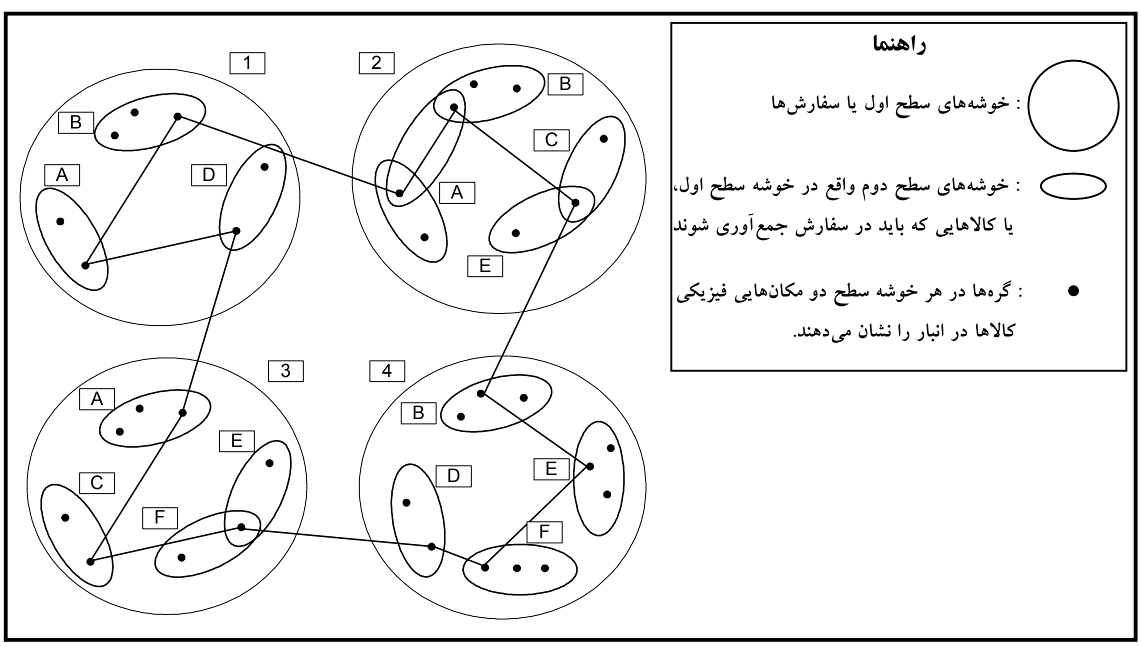
در این شکل ٤ خوشه سطح اول موجود است که با شماره‌های ۱ الی ٤ مشخص شده‌اند و بیانگر ٤ سفارش موجود است. همان طور که در شکل ۱ مشخص است، در هر خوشه سطح اول چندین خوشه سطح دو وجود دارد که بیانگر اقلامی است که برای آن سفارش باید برداشت شوند. به عنوان مثال سفارش یک شامل سه قلم کالای A، B و D است. درضمن مکان فیزیکی هر قلم کالا در نقاط مختلف از انبار با نقاط موجود در خوشه‌های سطح دو نشان داده شده‌اند.

همان طور که در شکل فوق مشخص است ماشین برداشت تمام اقلام یک سفارش را برداشت می‌کند و سپس برای تکمیل سفارش بعدی اقدام می‌کند. خطوط متصل‌کننده گره‌ها مسیر حرکت ماشین برداشت را نشان می‌دهد. به عنوان مثال اگر جمع‌آوری سفارشات را از کالای A سفارش ۱ فرض کنیم، پس از آنکه ماشین اقلام B و D را برداشت کند، اقدام به جمع‌آوری اقلام سفارش ۳ می‌کند، به این صورت که ابتدا کالای A سپس کالای C و در نهایت اقلام E و F را که هر دو در یک نقطه از انبار هستند برمی‌دارد. آنگاه برای تکمیل سفارش ٤ و بعد هم سفارش ۲ اقدام می‌کند و در نهایت به نقطه اول که فرآیند برداشت را از آنجا آغاز کرده است یعنی کالای A سفارش ۱ بازمی‌گردد.

نحوه نمایش مکانیزم برداشت اقلام سفارشات به ترتیبی که در بالا توضیح داده شد در واقع همان تعریف مسأله 2-nested GTSP است که در ابتدای بخش ۲ توضیح داده شد.

در این مقاله هدف یافتن مسیر بهینه برداشت اقلام توسط ماشین برداشت است، به گونه‌ای که ماشین حداقل مسیر را طی کند.

در ادامه مسأله با استفاده از مدل ریاضی حل شده است. در مواقعی که تعداد سفارشها، تعداد اقلام هر سفارش یا تعداد مکان‌های فیزیکی اقلام در انبار زیاد شود مدل ریاضی در زمان منطقی قادر به یافتن جواب بهینه نخواهد بود. بنابراین برای در این مواقع از نسخه جدیدی از الگوریتم فراابتکاری مورچگان که در این مقاله معرفی شده است، پاسخی نزدیک به پاسخ بهینه ارائه شده است.



شکل ۱. شبکه مسأله برداشت سفارشات در AS/RS

۳. الگوریتم پیشنهادی ACS_{rank}

۳-۱ مرور اجمالی بر الگوریتم مورچگان

در سالهای اخیر یکی از مهم‌ترین زمینه‌های تحقیقاتی، کشف روشهای ابتکاری از طبیعت بوده است که از آنها برای به دست آوردن نتایج خوب در مسائل بهینه‌یابی ترکیبی استفاده شده است. روشهای ابتکاری با کاربرد یک تعداد تکرار مشخصی از آزمایش‌ها یا بکارگیری ویژگیهای یک یا چندین عامل نظیر عصب‌ها، کروموزوم‌ها، مورچه‌ها و مانند آن به دست می‌آیند. یکی از مهم‌ترین روشهای ابتکاری برگرفته از طبیعت بهینه‌یابی کلونی مورچگان یا ACO است. الگوریتمهای ACO از آزمایشی که توسط گاس و همکارانش [۲۲] با استفاده از یک کلونی از مورچه‌های واقعی ترتیب داده بودند، الهام گرفته شد.

اولین بار الگوریتم مورچگان توسط دوریگو و همکارانش [۲۳] و خود او [۲٤] به عنوان یک نگرش با چندین عامل برای حل مسایل بهینه‌یابی ترکیبی مانند مسأله دوره‌گرد یا TSP و مسأله تخصیص کوادراتیک یا QAP پیشنهاد و ارائه شد.

در الگوریتم مورچگان حرکت از شهر i به شهر j بر اساس احتمال P_{ij} انجام می‌شود. P_{ij} احتمال انتخاب شهر i توسط مورچه حاضر در شهر j است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

(۳٦)

$$P_{ij}=\begin{cases}\dfrac{(\tau_{ij})^{\alpha}(\eta_{ij})^{\beta}}{\sum\limits_{j\in N_i}(\tau_{ij})^{\alpha}(\eta_{ij})^{\beta}} & if\ j\in N_i\\ 0 & othewise\end{cases}$$

مجموعه تمام شهرهای مجاور شهر i است که می‌توان از شهر i به آنها سفر کرد. α و β دو پارامتری هستند که ارتباط وزنی اثر فرومونی و مقادیر روش ابتکاری را کنترل می‌کنند. در رابطه فوق دو پارامتر τ_{ij} و η_{ij} در احتمال انتخاب شهر j توسط مورچه‌ای که در i قرار دارد مؤثرند. پارامتر η_{ij} متناسب با فاصله دو گره i و j است و در ادبیات موضوع به عنوان قابلیت مرئی بودن مطرح است. پارامتر τ_{ij} متناسب با میزان حرکت مورچه‌ها در مسیر (i, j) است و به عنوان میزان غلظت اثر فرومون شناخته می‌شود.

در سال ۱۹۹۵ گامباردلا و دوریگو الگوریتم ANT-Q را معرفی کردند [۲۵] که در طریقه محاسبه قانون احتمال انتخاب شهر بعدی با AS متفاوت بود. دوریگو و گامباردلا در سال ۱۹۹۷ الگوریتم جدیدی به نام ACS ارائه کرد [۲۷،۲٦] که از سه جنبه با اما الگوریتم AS متفاوت است که این سه مورد عبارتند از:

۱) قانون تحول وضعیت، یک راه صریح برای بالانس بین کاوش سویه‌های جدید و بهره‌برداری از اطلاعات مجتمع شده (اثرات فرومونی) در نظر می‌گیرد.

۲) قانون به روز کردن عمومی تنها برای سویه‌هایی اعمال می‌شود که متعلق به بهترین تور مورچه است.

۳) هنگامی که مورچه‌ها یک جواب می‌رسانند، قانون بهنگام‌سازی محلی اعمال می‌شود.

در سال ۱۹۹۷ استوتزل و هوس الگوریتم دیگری به نام MAX-MIN Ant System معرفی کردند [۲۸]. در این الگوریتم به‌وسیله بهره‌برداری قوی‌تر از بهترین جواب‌های به دست آمده در طی مدت فرآیند جستجو،عملکرد الگوریتم مورچگان بهتر می‌شود. این الگوریتم دارای سه ویژگی کلیدی متفاوت با AS است که عبارتند از:

- برای بهره‌برداری از بهترین جواب به دست آمده در طی مدت یک تکرار و یا طی مدت اجرای الگوریتم، پس از هر تکرار صرفاً تنها یک مورچه فرومون از خود بر جای می‌گذارد، حال این مورچه می‌تواند مورچه‌ای باشد که بهترین جواب را در تکرار جای الگوریتم (iteration-best ant) به دست آورده و یا مورچه‌ای باشد که بهترین جواب را از ابتدای شروع آزمایش (global-best ant) به دست آورده است.
- برای اجتناب از رکود جستجو، دامنه اثرات فرومونی روی هر عنصر جواب به یک فاصله $\left[\tau_{\min},\tau_{\max}\right]$ محدود می‌شود.
- اثرات فرومونی را در ابتدای شروع الگوریتم روی تمام سویه‌ها برابر $\tau_{\max}$ قرار می‌دهیم. این امر باعث جستجوی بیشتر در هنگام شروع الگوریتم می‌شود.

و اما در سال ۱۹۹۹ بولهیمر [۲۹] ایده استراتژی نخبه‌گرایی در سیستم مورچگان را معرفی کرد که به بهترین مسیر به دست آمده در هر تکرار توجه خاصی می‌شود. هنگامی که سطوح اثرات فرومونی بهنگام‌سازی می‌شوند، بر روی سویه‌هایی که در تورهای ایجاد شده توسط مورچه‌های نخبه، قرار دارند فرومون اضافی ریخته می‌شود. فرض بر اینست که احتمالاً برخی از سویه‌های تورهای ایجاد شده توسط مورچه‌های نخبه جزئی از مسیر بهینه می‌باشند و هدف راهنمایی و جهت‌دهی فرایند جستجو در تکرارهای بعدی است.

۳-۲ پارامترها و استراتژیهای روش ACS_{rank}

در ایده استراتژی نخبه‌گرایی در الگوریتم AS_{rank} به بهترین مسیر به دست آمده در هر تکرار توجه خاصی مـی‌شـود. هنگـامی کـه سطوح اثرات فرومونی بهنگام‌سازی می‌شوند، بر روی سویه‌هایی که در تورهای ایجاد شده توسط مورچه‌هـای نخبـه، قـرار دارنـد فرومون اضافی ریخته می‌شود. فرض بر اینست که احتمالاً برخی از سویه‌های تورهای ایجاد شده توسط مورچه‌های نخبه جزئی از مسیر بهینه هستند و هدف راهنمایی و جهت‌دهی فرایند جـستجو در تکرارهای بعدی است. رتبه‌بندی برای سیـستم مورچگـان بـه صورت زیر می‌تواند استفاده شود: پس از آنکه تمام m مورچـه تور مربوط به خود را ایجاد کردند، مورچـه‌هـا بـر اسـاس طـول تورشـان مرتـب مـی‌شـوند: $L_1 \le L_2 \le \ldots \le L_m$ نقـش هـر مورچه در بهنگام‌سازی سطح اثـرات فرومـونی بـر اسـاس رتبـه مورچه (μ)وزن‌دهی مـی‌شـود. عـلاوه بـر آن صـرفاً w تـا از بهترین مورچه‌ها در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین از خطـر تأکیـد زیادی بر اثرات فرومونی به وسیله خیلی از مورچه‌هـا کـه مـسیر بهینه جزئی را انتخاب کرده‌اند، جلوگیری می‌شود. از آنجائی کـه σوزنی است که سهم اثر فرومونی بهترین تور پیدا شده را نشان می‌دهد، نباید به وسیله هیچ وزن دیگری افزایش یابد. به عبـارت دیگر مناسب‌ترین وزن به عنوان کمینه وزن «یک» است. به همین منظور برای μ امین بهتـرین مورچـه وزن $(\sigma-\mu)$ اسـتفاده می‌شود و قرار می‌دهیم $w=\sigma-1$ که به ایـن موضـوع اشـاره دارد که تعداد مورچه‌های در نظر گرفته شد یکی بیشتر از تعـداد مورچه‌های نخبه است.

همچنـین در الگـوریتم ACS بـه دو مقولـه جـستجوی جدیـد Exploration و بهره‌برداری Exploitation توجه شده است. در اولی مورچه از تصمیمات و راههای گذشته که توسط مورچه‌های دیگر استفاده شده بهره می‌برد، ولی در کاوش خـود راه جدیـدی را که تاکنون انتخاب نشده، برمی‌گزینند. مورچه‌ها در این الگوریتم برای هر بار انتخاب شهر جدید با انتخاب q_0 و سـپس انتخـاب عددی تصادفی و مقایسه آن با q_0 مسیر خود را مشخص می‌کنند. در این مقاله الگوریتم جدید به نام ACS_{rank} معرفی شـده اسـت که از هر دو استراتژی الگـوریتم‌هـای AS_{rank} و ACS بـه طـور همزمان استفاده می‌کند.

بنابراین با ترکیب نخبه‌گرایی و رتبه‌بندی به بهنگام‌سازی سـطوح اثرات فرومونی طبق روابط زیر انجام خواهد پذیرفت:

۳-۲-۱ قابلیت مرئی بودن

در این الگوریتم به پیروی از مقالات ارائه شـده η_{ij} بـه صـورت ذیل تعریف می‌شود:

$$\eta_{ij} = \frac{1}{d_{ij}} \tag{۳۷}$$

۳-۲-۲ به روز رسانی میزان غلظت اثر فرومون

$$\tau_{ij}(t+1) = \rho\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij} + \Delta\tau^*_{ij} \tag{۳۸}$$

$$\Delta\tau_{ij} = \sum_{\mu=1}^{\sigma-1} \Delta\tau^{\mu}_{ij}$$

(۳۹)

$$\Delta\tau^{\mu}_{ij} = \begin{cases} (\sigma-\mu)\dfrac{Q}{L_\mu} & \text{if } \mu-\text{the best ant travels on edge (i,j)} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

(٤٠)

$$\Delta\tau^*_{ij} = \begin{cases} \sigma\dfrac{Q}{L^*} & \text{if edge (i,j) is part of the best solution found} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

μ: رتبه مورچه‌هـا بـر اسـاس مرتـب‌سـازی طـول تـوری کـه پیموده‌اند.

$\Delta\tau^{\mu}_{ij}$: افزایش سطح اثر فرومونی سویه (i, j) توسط μ امـین بهترین مورچه

L_μ: طول تور μ امین بهترین مورچه

$\Delta\tau^*_{ij}$: افـزایش سـطح اثـر فرومـونی سـویه (i, j) توسـط مورچگان نخبه

σ: تعداد مورچه‌های نخبه، این مقدار را معادل ٦ مورچه فرض می‌کنیم.

L^*: طول بهترین تور پیدا شده

۳-۲-۳ قانون تحول وضعیت

در این روش همانند ACS از این قانون استفاده کـردیم بـه ایـن ترتیب که بـا انتخـاب q_0 و سـپس انتخـاب عـددی تـصادفی و مقایسه آن با q_0 به دو مقوله جستجوی جدیـد Exploration و بهره‌برداری Exploitation پرداخته می‌شود.

q_0 عددی است که هر چه به یک نزدیک‌تر باشد امکان بهره‌برداری از دستاوردهای جواب‌های پیش را بیشتر می‌کند و چنانچه به صفر نزدیک‌تر باشد امکان جستجوی جواب‌های جدید را میسر می‌سازد.

ابتدا q_0 را معادل ۰/۵ و سپس معادل ۰/٦، ۰/۷، ۰/۸ و ۰/۸۵ در نظر گرفتیم که ۰/۸ جواب‌های مناسب‌تری ارائه می‌کرد.

۳-۲-٤ تعداد مورچگان

در این روش تعداد مورچه‌ها برابر با درصدی از تعداد شهرها در نظر گرفته می‌شود. ابتدا تعداد مورچه‌ها را معادل تعداد شهرها به عبارتی n و سپس معادل $\frac{n}{2}$ در نظر گرفتیم که $\frac{n}{2}$ جواب‌های مناسب‌تری ارائه می‌کرد.

۳-۲-۵ α و β

α و β میزان برتری η و τ را نسبت به یکدیگر مشخص می‌کنند. ترکیبهای مختلفی از این دو پارامتر بر روی مسأله ۵۰ شهری آزمایش شد که بدین صورت می‌باشد: $(\alpha=1,\beta=1)$، $(\alpha=2,\beta=1)$، $(\alpha=3,\beta=1)$، $(\alpha=4,\beta=1)$، $(\alpha=1,\beta=2)$، $(\alpha=2,\beta=2)$. در نهایت جواب‌های مسأله با $(\alpha=1,\beta=1)$ بسیار بهتر از سایر مقادیر بود.

۳-۲-٦ تعداد تکرار الگوریتم

در این روش $I^{\max}$ نیز برابر با مضربی از تعداد شهرها در نظر گرفته می‌شود. با اجرای برخی مسایل آزمون از جمله مسأله‌هایی با ٦۰ گره، از جایی به بعد بهبودهای قابل توجهی در جواب‌های بدست آمده توسط مورچه‌ها حاصل نمی‌شود. بنابراین تعداد تکرار ۵۰ تا ۱۵۰ به تناسب اندازه مسأله بکار گرفته شد.

٤. ساختار مسایل و نتایج حل

بکارگیری یک الگوریتم یا روش در حل یک مسأله، مبتنی بر بررسی‌های تحلیلی و انجام مقایساتی با دیگر روش‌ها است. در این بخش به بیان برخی معیارها و ویژگی‌هایی که در بررسی روشها و الگوریتم‌ها برای مسائل آزمون (Test Problem) تعریف شده، خواهیم پرداخت.به دلیل جدید بودن مسأله مورد تحقیق، در ادبیات موضوع به مسائل نمونه‌ای دسترسی پیدا نشد که مدل ریاضی و الگوریتم‌ها نسبت به آنها مورد بررسی قرار گیرند بنابراین، اطلاعات مورد نیاز با توجه به طبیعت مسأله تولید شدند. برای این که بتوانیم مسائل با اندازه‌های مختلف را مورد تجزیه و تحلیل قرار دهیم به پارامترهای تعداد خوشه‌های سطح اول، تعداد خوشه‌های سطح دوم موجود در هر خوشه سطح اول و تعداد گره‌های هر خوشه سطح دوم مقادیر اولیه فرضی داده شده و اطلاعات مربوط به پارامتر هزینهٔ بین گره‌ها به صورت تصادفی تولید شده است.

برای مقایسه کیفیت جواب‌های الگوریتم مورچگان نسبت به جواب‌های بهینه حاصل از مدل ریاضی، مطابق جدول ۱، تعداد کل گره‌ها بین ۸ تا ۱۰۰، تعداد خوشه‌های سطح یک و سطح دو بین ۲ تا ۵ در نظر گرفته شده‌اند. تولید مقادیر تصادفی برای هزینه بین گره‌ها به این صورت است که با استفاده از نرم‌افزار Excel مقادیری بین صفر تا ۱۰۰ برای تعیین x و y هر یک از گره‌ها تولید شد که مسافت مستقیم بین گره‌ها از روی همان مقادیر x و y مربوط به هر گره بدست می‌آید. مسافت مستقیم بین گره‌ها در حقیقت همان هزینه‌ایست که در این مسأله بعنوان هزینه بین گره‌ها معرفی شد.

جدول ۱. مقایسه جوابهای حاصل از مدل ریاضی و الگوریتم $\mathbf{ACS_{rank}}$

ردیف	نام مسأله	تعداد گره	الگوریتم ACS_{rank} Best	الگوریتم ACS_{rank} CPU-T	مدل ریاضی Best	مدل ریاضی CPU-T	درصد خطا
1	P8-1	8	10.59	1 s	10.59	1 s	0
2	P8-2	8	27.50	1 s	27.50	1 s	0
3	P8-3	8	33.14	1 s	33.14	1 s	0
4	P8-4	8	22.79	1 s	22.79	1 s	0
5	P9-1	9	101.94	1 s	101.94	1 s	0
6	P9-2	9	363.01	1 s	361.18	1 s	0
7	P12	12	142.02	1 s	142.02	1 s	0
8	P20	20	272.98	1s	272.98	2 s	0
9	P30	30	389.9	1s	389.8	36 s	0.0002
10	P50	50	490	4 s	471.121	135 m	0.040
11	P75	75	189.38	6 s	188.71	567 m	0.003
12	P100	100	250.75	10 s	257	263 h	----------

در این قسمت لازم است توضیحاتی در مورد علائم و پارامترهای مورد استفاده در جدول داده شود که اهم آن به شرح زیر است:

- زمان لازم برای اجرای برنامه CPU-T
- زمان محاسبات بر حسب ثانیه
- بهترین جواب در ۱۰ بار اجرای الگوریتم Best
- از آنجا که داده‌های مسأله بصورت تصادفی تولید شده‌اند، در مسائلی که تعداد گره‌های آنها با هم برابر است، لزوماً دارای داده‌های مساوی نیستند.
- اعداد پررنگ موجود در هر سطر بهترین عدد مربوط به معیار را نشان می‌دهد.

٤-١ معیارهای مقایسه‌ای

دو معیار برای مقایسه کیفیت جواب‌ها مورد استفاده قرار گرفته است که شامل کمترین هزینهٔ تور انجام شده و مدت زمان لازم جهت اجرای برنامه می‌باشند. برای مقایسه کیفیت جواب‌های حاصل از مدل ریاضی و الگوریتم ACS_{rank} ابتدا معیار هزینه و سپس معیار زمان لازم جهت اجرای برنامه مورد توجه قرار گرفته است.

٤-٢ مشخصات نرم‌افزارها و کامپیوتر مورد استفاده

جواب‌های مدل ریاضی با استفاده از نرم‌افزار LINGO 8.0 به دست آمده است. برنامه کامپیوتری الگوریتم‌ها نیز با استفاده از زبان برنامه‌نویسی Borland C++ نوشته شده‌اند. کلیه برنامه‌ها و مدل ریاضی بر روی رایانه شخصی Pentium 4 با پردازنده 2.4 MHz و 512 مگابایت حافظه اصلی اجرا شده است.

٤-٣ نتایج محاسبات مدل ریاضی و الگوریتم ACS_{rank}

جدول ۱ جواب‌های حاصل از مدل ریاضی و الگوریتم ACS_{rank} را نمایش می‌دهد. مدل ریاضی از نظر مقدار هزینه انجام تور جواب بهینه می‌دهد، اما زمان لازم برای اجرای برنامه هنگامی که ابعاد مسأله کمی بزرگ شود، بسیار افزایش می‌یابد. به همین دلیل از الگوریتم ACS_{rank} استفاده شده است. الگوریتم ACS_{rank} از الگوریتم‌های فراابتکاریست که جواب بهینه محلی نسبتاً خوبی ارائه می‌کند. بنابراین در مسائلی که مدل ریاضی جواب نمی‌دهد (افزایش لگاریتمی زمان محاسبات) این الگوریتم بکار گرفته شده است.

جواب‌های ۱۲ مسأله آزمون با استفاده از مدل ریاضی و الگوریتم ACS_{rank} به دست آمدند. همان طور که مشاهده می‌شود الگوریتم ACS_{rank} در ۸ مسأله آزمون ابتدایی عیناً همان جواب مدل ریاضی را ارائه می‌کند، در ۳ مسأله بعدی جوابی با خطایی بسیار کم نسبت به مدل ریاضی ارائه می‌کند. در مسأله ۱۰۰ گره‌ای مدل ریاضی در زمان ۲٦۳ ساعت نتوانست جواب بهینه را پیدا کند در حالی که الگوریتم مورچگان در زمان ۱۰ ثانیه جوابی بهتر از جواب نزدیک به بهینه مدل ریاضی در مدت زمان اجرای ۲٦۳ ساعت ارایه می‌کند.

٥. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری، دستاوردهای تحقیق و تحقیقات آتی

برداشت کالاها در AS/RS، یکی از فعالیت‌های زمان‌بر، وقت‌گیر و پرکار سیستم برداشت سفارش‌ها (OPS) به شمار می‌رود. به همین دلیل راهبردهای مختلفی جهت بهبود بهره‌وری فرآیند برداشت، مورد استفاده قرار گرفته است. در این میان تعیین توالی سفارشها و دسته‌بندی سفارشات از راهبردهایی است که بسیار به آنها پرداخته شده است. در این مقاله با توجه به اهمیت و ضرورت بهره‌وری حمل‌ونقل در AS/RS مدلی ارائه شده است که به هر دو مورد توالی سفارشات و دسته‌بندی آنها به طور همزمان پرداخته شده است. در این مدل که آنرا 2-nested GTSP نامیده‌ایم و تعمیم مسأله GTSP است، به کاوش مسیریابی حمل‌ونقل بهینه و در نتیجه ترتیب تکمیل سفارش و ترتیب برداشت اقلام هر سفارش پرداخته می‌شود. این مدل تمام کاربردهای مسأله GTSP را در حالتی که ابعاد مسأله با وجود محدودیتهایی بزرگ شود و نتوان با آزادسازی محدودیتها به وسیله GTSP مسأله را حل کرد، پوشش می‌دهد. با توجه به ادبیات موضوع، این تحقیق از زمره اولین تحقیقات آکادمیک در زمینه فوق است. در ادامه، مدل ریاضی مسأله نیز ارائه شده است. به دلیل اینکه مدل ریاضی مسأله خطی است بنابراین جواب حاصل از این مدل بهینهٔ کلی است. اما با توجه به اینکه مسأله GTSP از جمله مسائل پیچیده (NP-Hard) محسوب می‌شود، وقتی ابعاد مسأله بزرگ شود مدل ریاضی در زمان معقول قادر به یافتن پاسخ بهینه کلی نخواهد بود.

به منظور به دست آوردن جواب‌های بهینه، مدل ریاضی مسأله ارائه شد که برخی از محدودیت‌های آن در ادبیات موضوع موجود بوده و بسیاری از محدودیت‌هایی کلیدی نیز به آن اضافه شده است. مدل ریاضی فوق برای ابعاد بزرگ تر مسأله و حالت‌هایی که گره‌ها تقاضای مختلفی داشته باشند و... کاربرد

دارد. مدل ریاضی از نظر کمترین هزینه تور انجام شده جواب بهینه می‌دهد، ولی زمان لازم برای اجرای برنامه در ابعاد بزرگ‌تر مسأله بسیار زیاد است. به همین دلیل از الگوریتم فراابتکاری اجتماع مورچگان برای حل مسأله استفاده شده است.

در ادبیات موضوع نگارش‌های مختلفی از الگوریتم مورچگان توسعه داده شده است که از آن بین می‌توان به AS، ACS، MMAS و AS_{rank} اشاره کرد. در این مقاله نگارش جدیدی از الگوریتم مورچگان ارائه شده که آنرا ACS_{rank} نام نهاده‌ایم. این نگارش جدید علاوه بر ویژگی‌های الگوریتم ACS از سیستم رتبه‌بندی در مورچگان نخبه که در نگارش AS_{rank} وجود دارد، استفاده می‌کند.

به طور خلاصه دستاوردهای عمده این تحقیق را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد.

۱- مدل‌سازی فرآیند برداشت در AS/RS بر اساس مدل 2-nested GTSP.

۲- دسته‌بندی کردن روند تحقیقات انجام شده و الگوریتم‌های مورد استفاده در مورد مسأله GTSP و ترسیم زمینه‌های تحقیقات آتی در زمینه مسأله فوق.

۳- مورد توجه و کنکاش قرار دادن حوزهٔ جدیدی از مسأله GTSP به نام 2-nested GTSP.

٤- معرفی و طراحی مسأله 2-nested GTSP و ارائه مدل ریاضی آن.

۵- توسعه نگارش جدیدی از الگوریتم مورچگان که آنرا ACS_{rank} نامیده‌ایم در حل مسأله 2-nested GTSP.

نتیجه این تحقیق می‌تواند پایه‌ای برای انجام تحقیقات بعدی هم در زمینهٔ کاربردهای جدیدی که با GTSP قابل حل نبوده‌اند و هم لحاظ حالتهای جدید به مسأله 2-nested GTSP باشد. همان طور که در بالا اشاره شد راهبردهای مختلفی جهت بهبود بهره‌وری فرآیند برداشت، مورد استفاده قرار گرفته است که یکی دیگر از آن موارد ناحیه‌بندی در AS/RS است. با استفاده از تکنیک‌های داده‌کاوی و در نهایت استفاده از مدل ارائه شده می‌توان ناحیه‌بندی AS/RS را نیز بهینه کرد.

٦. مراجع

1. Weiss, D.J. and Cramer, M. (1988) "The warehouse management handbook ".

2. Bozer, Y.A. and J.A. White, J. A. (1984) "Travel time models for automated storage/retrieval systems", IIE Transactions, 1984. 16(4): p. 329-338.

3. Han, M.H., et al.(1987) "On sequencing retrievals in an automated storage/retrieval systems", IIE Transactions,. 19(1): p. 56-66.

4. Seidmann, A.(1988) "Intelligent control schemes for automated storage and retrieval systems". International Journal of Production Research", 26(5): p. 931-952.

5. Chaime, M.E.(*1992) "Operation sequencing in automated warehousing systems". ,Int. J. Prod. Res, 30(10): p. 2401-2409.

6. Choe, K. and Sharp, G. P.(1991) "Small parts order picking: Design and operation".

7. Elsayed, E. A. and Stern, R. G. (1983) "Computerized algorithm for order processing in automated warehousing systems", Int. J. Prod. Res., 21, p. 579-586.

8. Hwang, H., Baek, W. and Lee, M.K. (1988) "Clustering algorithms for order picking in an automated storage and retrieval system". Int. J. Prod. Res, 26, p. 189-201

9. Ruben, R.A. and Jacobs, F. R. (1999) "Batch construction heuristic and storage assignment strategies for Walk/Ride ". Management Science, 45(4), p. 575-596.

10. Labordere, H.(1969) "The Record balancing problem: A dynamic programming solution of a generalized traveling salesman problem", RIRO B2, p. 43-49.

11. Saskena, J.P. (1970) "Mathematical model for scheduling clients through welfare agencies", CORS J., 8, p. 185-200.

12. Srivastava, S.S. [et al.] (1969)"Generalized traveling salesman problem through n sets of nodes", Journal of the Canadian Operational Research Society, 7, p. 97-101.

13. Lien, Y.N., Ma, E. and Wah, B.W.S. (1993)"Transformation of the generalized traveling-salesman problem into the standard traveling-salesman problem. Information Sciences, 74(1-2): p. 177-189.

14. Fischetti, M., Toth, P. and Salazar, J. (1995) "The symmetric generalized traveling salesman Polytope". to appear in Networks 26.

15. Laporte, G., Asef-Vaziri, A and Sriskandarajah, C. (1996) "Some application of the generalized travelnig salesman Problem". J. Opnl. Res. Soc., 47: p. 1461-1467.

16. Noon, C.E. (1988) "The generalized traveling salesman problem", n.p.

17. Laporte, G., Mercure, H. and Nobert, Y. (1987) "Generalized traveling salesman problem through n sets of nodes: The asymmetrical case". Discrete Appl. Math, 18: p. 185-197.

18. Gonzalez, R.H. (1962) "Solutions of the traveling salesman problem", Dynamic Programming on the Hypercube. Interim Technical Report, 1962(18)

19. Noon, C.E. and Bean, J. C. (1991) "A Lagrangian based approach for the asymmetric generalized traveling salesman problem". Opns. Res, 39: p. 623-632.

20. Laporte, G. and Nobert, T. Y (1983) "Generalized traveling salesman problem through n sets of nodes: An integer programming approach". Infor, 21: p. 61-75

21. Laporte, G., Mercure, H. and Y. Nobert, Y."Finding the shortest Hamiltonian circuit through n clusters: A Lagrangian approach. Congressus Numerantium, 1985. 48: p. 277-290

22. Goss, S. [et al.] (1989) "Self-organized shortcuts in the Argentine ant. Naturwissenschaften", 76: p. 579-581.

23. Dorigo, M., Maniezzo, V. and Colorni, A. (1991) "Positive feedback as a search strategy". Technical Report 91-016, Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Milano, IT.

24. Dorigo, M. (1992) "Optimization, learning and natural algorithms (in Italian)". PhD thesis, Dipartimento di Elettronica e Informazione, Politecnico di Milano, IT

25. Gambardella, L.M. and Dorigo, M. (1995) "Ant-Q: A reinforcement learning approach to the traveling salesman problem". In Proceedings of the Twelfth International Conference on Machine Learning, ML-95, p. 252-260.

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

27. Dorigo, M. (1997) "Ant colonies for the traveling salesman problem", BioSystems, 43: p. 73-81.

28. Stützle, T. and Hoos, H. (1997) "The MAX-MIN ant system and local search for the traveling salesman problem". in Proc. IEEE International Conference on Evolutionary Computation.

29. Bullnheimer, B., Hartl, R. F. and C. Strauss, C. (1999) "A new rank-based version of the ant system: a computational study", Central European Journal for Operations Research and Economics, 7(1): p. 25-38.