طراحی روشی برای مسیریابی در سیستم‌های Tandem به کمک جستجوی ممنوع

رضا زنجیرانی فراهانی
استادیار دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه صنعتی امیرکبیر
farahan@aut.ac.ir
الناز میاندوآبچی
فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی صنایع دانشگاه صنعتی امیرکبیر
miando_el@Yahoo.com
بهروز کریمی
استادیار دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه صنعتی امیرکبیر
b.karimi@aut.ac.ir

واژه‌های کلیدی
باربران خودکار–مسیریابی–چند حلقه–جستجوی ممنوع.

چکیده

طراحی مسیرهای حمل‌ونقل در سیستم‌های تاندم، بر پایه افراز مجموعه ایستگاه‌ها در قالب مسیرهای حلقوی بسته تک وسیله غیرمتداخل بنا شده است. هر حلقه حداقل دارای یک ایستگاه اضافی تخلیه و بارگیری به عنوان نقطه انتقال، برای تبادل جریان بین حلقه‌های مجاور است. در این مقاله، به توسعه روش حلی بر پایه روش جستجوی ممنوع، برای طراحی سیستم‌های تاندم پرداخته شده است. الگوریتم جستجوی ممنوع با داشتن جواب اولیه تعدیل شده حاصل از خوشه بندی k_means، سعی می‌کند ایستگاه‌ها را در حلقه‌ها طوری افراز کند که حداکثر بارکاری حلقه‌ها، ضمن جلوگیری از ایجاد تقاطع مسیر در حلقه‌ها، حداقل شود. الگوریتم مزبور و الگوریتم مبنای Bozer (1992) و Srinivasan، با حل مسائل آزمایشی تصادفی تولید شده مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهد در مسائل بزرگ، الگوریتم مبنا علی‌رغم زمان حل کمتر، در بیشتر موارد، جواب‌های ناموجه با حلقه‌های متقاطع را نتیجه می‌دهد. در حالیکه الگوریتم توسعه داده شده، ضمن جلوگیری از ایجاد هر گونه تقاطع، در اکثر موارد جواب‌های بهتری را نتیجه می‌دهد.

مقدمه

طراحی سیستم‌های انتقال مواد از بحث‌های مهم مطرح در زمینه طراحی تسهیلات است. هزینه انتقال مواد در سیستم‌های تولیدی، رقمی در حدود ۲۰ تا ۵۰ درصد کل هزینه‌های عملیاتی را شامل می‌شود [۱]. وسایل نقلیه خودکار[1] وسایلی هستند که بدون نیاز به راننده قادر به حمل‌ونقل مواد هستند. آنها توسط سیستم کنترل از راه دور و بطور خودکار بر روی مسیرهای از پیش تعیین شده بصورت نوارهای الکترومغناطیسی یا مسیرهای رنگ شده حرکت می‌کنند [۲]. در یک تقسیم بندی کلی، ۵ نوع سیستم حمل‌ونقل برایAGVها قابل طرح است [۲]: Bidirectional Shortest Path Systems، Conventional Systems، Single Loop Design، Segmented Flow Topology و Tandem Configuration. سیستم تاندم برای اولین بار توسط Bozer و Srinivasan در سال ۱۹۸۹ به دنیا معرفی شد. طراحی مسیرAGVها در این سیستم بر پایه فلسفه "Divide & Conquer" بنا شده است. مجموعه مسیرهای انتقال مواد در آن، از چندین مسیر حلقوی بسته مستقل از هم تشکیل می‌شود. در هر مسیر تنها یک AGV جابجایی بارها را به عهده داشته و ارتباط مسیرهای حلقوی توسط ایستگاه‌هایی به نام نقاط انتقال برقرار می‌شود.

از مزایای این سیستم‌ها، می‌توان به منتفی شدن مسئله ترافیک در حلقه‌ها، سادگی در سیستم کنترلی و انعطاف پذیری بیشتر به دلیل ماهیت غیر متمرکز آن اشاره نمود. برخی از معایب آن عبارتند از: نیاز به جابجایی بار توسط بیش از یک AGV برای رسیدن به مقصد، که این خود زمان حمل بار را افزایش می‌دهد، فضا و هزینه اضافی برای ایجاد نقاط انتقال و کانوایرهای ارتباط دهنده آنها و ایجاد اختلال در حمل‌ونقل، در صورت خرابی هر یک از AGVها در درون حلقه‌ها.

مطالعات انجام شده در زمینه سیستم‌های تاندم در دو گروه قابل بررسی هستند. گروه اول مربوط به مطالعاتی است که در زمینه طراحی مسیرها در سیستم‌های تاندم انجام شده است. Bozer و Srinivasan به عنوان معرفی کنندگان این سیستم به دنیا، در اولین مقالات خود [۳,۴] پس از معرفی سیستم‌های تاندم، به ارائه یک مدل تحلیلی[2] برای محاسبه بارکاری یک تک حلقه پرداخته‌اند. آنها در [۵]، به توسعه روشی ابتکاری برای افراز ایستگاه‌ها در مسیرهای حلقوی برای این نوع سیستم پرداخته‌اند. Hsieh و Sha در [۶] مسئله طراحی چیدمان و طراحی مسیرهای تاندم را بطور همزمان، مورد بررسی قرار داده‌اند. Aarab و همکارانش در [۷] روشی برای طراحی مسیرها در چیدمان بلوکی به کمک خوشه بندی سلسله مراتبی و جستجوی ممنوع ارائه کرده‌اند. Yu و Egbelu در [۸] مسئله طراحی سیستم‌های تاندم را براساس مفهوم جدید مسیرهای متغیر[3] مطرح نموده‌اند.

گروه دوم، مطالعاتی هستند که به طرح مسائل و فرضیات جدید در زمینه سیستم‌های تاندم پرداخته‌اند. Bozer و Lee در [۹] به مسئله حذف نقاط انتقال و کانوایرهای ارتباط دهنده آنها و استفاده از ایستگاه‌های کاری به عنوان نقاط انتقال پرداخته‌اند. Ventura و Lee در [۱۰] مسئله سیستم‌های تاندم با بیش از یک AGV در هر حلقه را مورد بررسی قرار داده‌اند. Huang در [۱۱] به مسئله استفاده از مرکز حمل‌ونقل برای ارتباط نقاط انتقال جهت جابجایی بارهای بین حلقه‌ای پرداخته است.

در این مقاله به مسئله طراحی مسیرها در سیستم‌های تاندم به کمک روش جستجوی ممنوع[4]، براساس فرضیات مطرح شده در [۵] توسط Bozer و Srinivasan پرداخته شده است. الگوریتم جستجوی ممنوع با داشتن طرح چیدمان نقطه‌ای، برگ مسیر و تعداد حلقه‌ها به عنوان ورودی، ایستگاه‌ها را طوری به حلقه‌ها تخصیص می‌دهد که بدون ایجاد تداخل، حداکثر بارکاری[5] حلقه‌ها حداقل شود. الگوریتم جستجوی ممنوع و الگوریتم Bozer و Srinivasan توسط مسائل آزمایشی طراحی شده مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

مطالب موجود در مقاله به این صورت طبقه بندی شده‌اند. در بخش ۲ به تعریف مسئله و فرضیات مورد استفاده در مسئله پرداخته شده است. بخش ۳ به شرح الگوریتم توسعه داده شده بر پایه جستجوی ممنوع می‌پردازد. نتایج محاسباتی در بخش ۴ آورده شده‌اند و در نهایت

---

[1] AGV
[2] Analytical Model
[3] Variable Path
[4] Tabu Search
[5] Workload

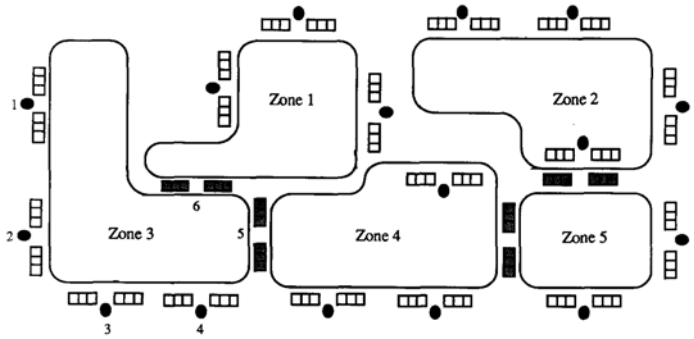
بخش‌های ۵ و ۶ به نتیجه‌گیری و پیشنهادات آتی اختصاص دارند.

۲. تعریف مسئله

سیستم‌های حمل نقل تاندم یا سیستم‌های چند حلقه‌ای، اولین بار توسط Y. Bozer و M. Srinivasan در [۲] معرفی شدند. این سیستم‌ها، هم در مورد حمل‌ونقل درون کارخانه و هم در مورد حمل‌ونقل درون انبار قابل پیاده‌سازی هستند. ولی اساسا از ابتدا برای کاربرد در سطح کارخانه تعریف شده‌اند. مفهوم سیستم‌های تاندم، طراحی مسیر AGVها بر پایه فلسفه "Divide & Conquer" بنا شده است. در این سیستم‌ها، مجموعه مسیرهای انتقال مواد از چندین مسیر حلقوی بسته (حلقه) مستقل از هم تشکیل می‌شوند، که هیچگونه تداخل مسیر یا همپوشانی با یکدیگر ندارند. در هر حلقه، تنها یک AGV مسئول جابجایی بارها است. ارتباط حلقه‌ها با یکدیگر توسط نقاط انتقال برقرار می‌شود که این نقاط برقرار کننده ارتباط بین حلقه‌ها، جهت انتقال بارها از حلقه‌ای به حلقه دیگر می‌باشند. نقاط انتقال می‌توانند توسط نقاله‌ها به همدیگر مرتبط شوند. نمونه‌ای از این سیستم در شکل ۱ نشان داده شده است.

فرضیات مورد استفاده توسط Bozer و Srinivasan برای طراحی الگوریتم ابتکاری افراز، مبنای طراحی الگوریتم TS در این مقاله قرار گرفته‌اند که در اینجا به آنها اشاره می‌شود.

چیدمان بصورت نقطه‌ای بوده و هر ایستگاه می‌تواند نمایانگر یک یا چند ماشین (مثلا به عنوان سلول‌های تولیدی و یا دپارتمان) باشد. بطور کلی دو نوع ایستگاه در این سیستم موجود است. ایستگاه‌های پردازش کننده[1] که بر روی بارها عملیات تولیدی انجام می‌دهند و ایستگاه‌های ورودی/ خروجی[2]، که بار از طریق آنها از سیستم خارج یا به آن وارد می‌شود. با این اوصاف ایستگاه‌هایی که نقش نقاط انتقال را دارند نیز در مجموعه ایستگاه‌های ورودی خروجی قرار می‌گیرند. نقاط تخلیه و بارگیری بر ایستگاه‌ها منطبق هستند. هر ایستگاه دارای یک صف ورودی[3] و یک صف خروجی[4] است. بارهایی که باید وارد ایستگاه شوند در صف ورودی و بارهایی که از آن خارج می‌شوند، در صف خروجی قرار می‌گیرند.



شکل ۱. نمونه‌ای از سیستم تاندم [۴]

AGV از نوع واحد بار است. زمانی که AGV فاصله بین دو صف را طی می‌کند، قابل اغماض است. حرکت AGVها در درون حلقه-

[1] Processor Stations
[2] Input / Output Stations
[3] Input Queue
[4] Output Queue

ها در هر دو جهت انجام می‌شود. به این معنی که AGV می‌تواند از کوتاه‌ترین مسیر برای جابجایی بارها در حلقه استفاده کند. هنگامیکه AGV در وضعیت خالی باشد، از قانون حرکت FEFS[1] تبعیت می‌کند. یعنی براساس ترتیب قرارگیری ایستگاه‌ها در حلقه، صف‌های خروجی را بازرسی می‌کند. تا وقتی باری در صف خروجی ایستگاه‌های مورد بازرسی موجود نباشد، AGV همچنان به حرکت خود ادامه می‌دهد. پس در این وضعیت، AGV مگر برای تخلیه و یا بارگیری توقف نکرده و بلا وقفه در حال حرکت خواهد بود.

۲. توسعه الگوریتم جستجوی ممنوع

در این بخش به معرفی مختصر جستجوی ممنوع و شرح الگوریتم توسعه داده بر پایه آن پرداخته خواهد شد.

۲,۱. معرفی TS

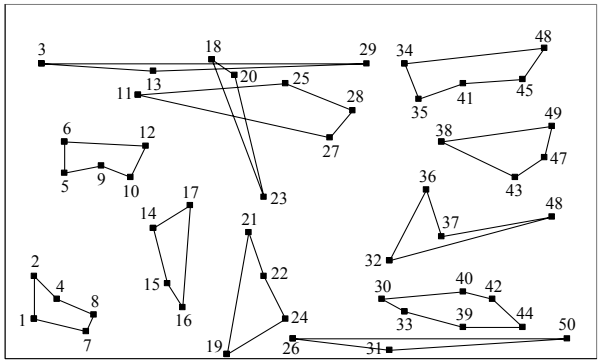
TS برای اولین بار توسط F.Glover در سال ۱۹۸۶ ارائه شد. البته در همان سال روش مشابهی نیز با عنوان " steepest ascent/deepest descent" توسط Hansen ابداع شد. الگوریتم TS این قابلیت را دارد که در هر مرحله از حل مسئله از سایر روش-های ابتکاری برای یافتن جواب استفاده کند. پایه و اساس TS روشی است به نام روش شیب ساده کاهنده. این روش از یک جواب اولیه قابل قبول در فضای حل مسئله جستجو را آغاز می‌کند و سعی می‌کند در هر مرحله با انجام یک حرکت در تابع هدف بهبود ایجاد کند.این الگوریتم به محض رسیدن به یک جواب بهینه محلی متوقف می‌شود، الگوریتم TS با مجاز دانستن انتخاب جواب‌های بدتر، از توقف در بهینه محلی جلوگیری می‌کند.

۲,۲. موجه بودن جواب

جوابی موجه است که بارکاری هیچکدام از حلقه‌های آن از حد تعیین شده بیشتر نباشد، حلقه‌های تولید شده با یکدیگر تقاطع و تداخل نداشته باشند و هر ایستگاه تنها یک بار توسط حلقه‌ها پوشانده شود.

الگوریتم مبنا مسئله تقاطع حلقه‌ها را مستقیماً و بطور صریح بررسی نمی‌کند. بجز اینکه به این مسئله اشاره شده که استفاده از تکنیک باند[2] و مسئله TSP برای مرتب نمودن ایستگاه‌ها در مرحله اول، احتمال تولید حلقه‌های متقاطع را کاهش می‌دهد. در الگوریتم توسعه داده شده، در هر حرکت تقاطع کلیه حلقه‌ها با حلقه‌های تغییر یافته بررسی می‌شود. جهت ساده سازی، مسیرهای حرکت در حلقه در هنگام بررسی تقاطع، بصورت خطوط مستقیم متصل کننده ایستگاه‌ها براساس مسیر TSP به فواصل پله‌ای در نظر گرفته می‌شوند. شکل ۲ نمونه‌ای از تداخل حلقه‌ها را طبق فرض صورت گرفته برای مسیرها نشان می‌دهد.

[1] First - Encountered - First - Served
[2] Band Technique



شکل ۲- نمونه‌ای از تداخل بین حلقه‌ها

۲,۳. همسایگی

فضای همسایگی تعریف شده در این مسئله، به سادگی از برداشتن ایستگاه از یک حلقه و اضافه نمودن آن بـه حلقـه‌ای دیگـر بدسـت می‌آید. با این فرض که تقاطع بین حلقه‌ها ایجاد نشود و بارکاری حلقه‌ها از حد تعیین شده است تجاوز نکند. جـواب فعلـی S را کـه شـامل افرازی از مجموعه ایستگاه‌ها در L حلقه است، به شکل زیر در نظر می‌گیریم:

$$S = \{LP_1, LP_2, \ldots, LP_L\} \ , i = 1,\ldots,L \qquad (۱)$$

ایستگاه st را از حلقه LP_i در نظر می گیریم که $st \in LP_i$.

و جواب 'S را که در مجموعه همسایگی جواب S قرار دارد، به صورت زیر نشان می‌دهیم:

$$S = \{LP'_1, LP'_2, \ldots, LP'_L\} \ , i = 1,\ldots,L \qquad (۱)$$

در این صورت جواب 'S ، از انتقال ایستگاه st از حلقه LP_i به حلقه LP_j در جواب S بدست می‌آید. به بیان دیگر:

$$LP'_i = LP_i - st \qquad (۳)$$

$$LP'_j = LP'_j \cup st \qquad (۴)$$

بطوریکه $j \neq i$ باشد. حرکت موجه m قابل اعمال روی جواب S را که ایستگاه st را از حلقه i به حلقه j منتقل می‌کند، به صـورت تـابع زیر می‌توان تعریف کرد:

$$m_{ij} = trans(LP_i, st, LP_j),\ j \neq i,\ i,j = 1,\ldots,L \qquad (۵)$$

به شرطی که بین حلقه‌ها تقاطع ایجاد نشود و $\omega(LP'_j) < \omega_l$ که ω تابع بارکاری هر حلقه است. منظـور از ω_l حـدی اسـت کـه بـرای بارکاری حلقه‌ها در نظر گرفته شده است. پس مجموعه حرکات موجه قابل اعمال روی S به اینصورت قابل تعریف است:

$$M(S) = \bigcup m_{ij} \qquad (۶)$$

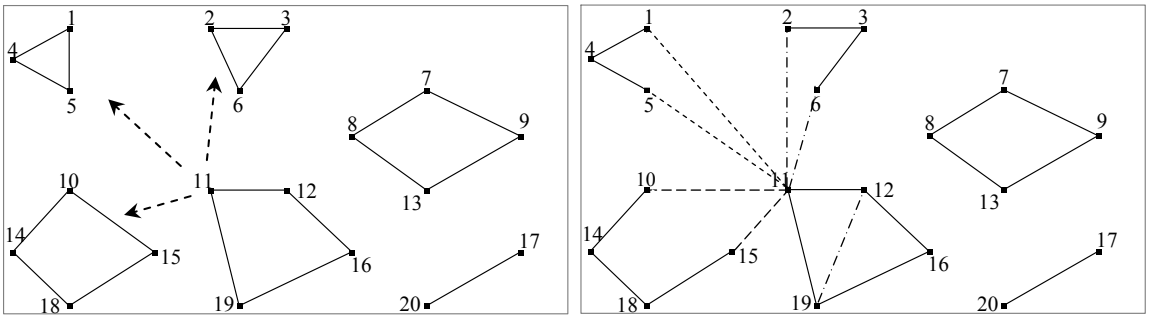
اگر عملگر $\oplus$ را نشانگر انجام حرکت m روی جواب S بدانیم که:

$$S' = S \oplus m \qquad (۷)$$

آنگاه، فضای همسایگی جواب S بدین صورت است:

$$N(S) = \{S' | \exists m \in M(S), S' = S \oplus m\} \qquad (۸)$$

شکل ۳ نمونه‌ای از جواب‌های همسایگی را که می‌تواند از انتقال ایستگاهی از یک حلقه به حلقه‌های دیگر ایجاد شود نـشان مـی‌دهـد. ایستگاه ۱۱ می‌تواند به ۳ حلقه بدون ایجاد تقاطع منتقل شود.



شکل ۳. نمونه‌ای از جواب‌های همسایگی حاصل از انتقال یک ایستگاه

معیار ارزیابی جواب‌ها، براساس تابع هدف موجود در مدل صفر و یک الگوریتم Bozer و Srinivasan انتخاب شده است. هدف حداقل نمودن حداکثر بارکاری حلقه‌ها ($\min\max(\omega)$) است. بنابراین، اساس جستجو در هر مرحله، انتخاب حلقه با بیشترین بارکاری و سعی در کاهش آن است. کاهش در بارکاری در هر مرحله بوسیله برداشتن یکی از ایستگاه‌ها از حلقه انتخاب شده که حلقه با بیشترین بارکاری است و افزودن آن به حلقه‌ای دیگر صورت می‌گیرد. این فرآیند به افزایش بارکاری در یک حلقه دیگر منجر می‌شود.

بر این اساس، به نظر می‌رسد بهترین انتخاب حرکتی باشد که منجر به بیشترین کاهش در بارکاری حلقه مبدا و کمترین افزایش در بارکاری حلقه مقصد شود. برای این منظور از رابطه ساده‌ای استفاده شده است که عبارت است از: "میزان کاهش در بارکاری حلقه مبدا منهای میزان افزایش در بارکاری حلقه مقصد".

حرکتی که کمترین مقدار محاسبه شده را داشته باشد، به عنوان بهترین حرکت انتخاب می‌شود. این معیار تضمین می‌کند در عین اینکه بارکاری حلقه مبدا تا حد ممکن کاهش پیدا کند، بارکاری حلقه مقصد نیز حتی الامکان کمترین افزایش را داشته باشد.

۲,۴. تعداد حلقه‌ها (L)

در الگوریتم مبنا، تعداد حلقه‌ها توسط کاربر انتخاب شده و در یکی از محدودیت‌های مدل صفر و یک وارد می‌شود. در الگوریتم TS انتخاب مقدار L از ابتدا توسط تصمیم گیرنده انجام شده و مقدار آن در طول حل مسئله ثابت می‌ماند.

۲,۵. تولید جواب اولیه

روشی که برای تولید جواب اولیه انتخاب شده از سه مرحله مستقل از هم تشکیل شده است:

- خوشه‌بندی ایستگاه‌ها به کمک روش خوشه‌بندی k_means، در L خوشه
- در صورت ناموجه بودن جواب بدست آمده، استفاده از یک روش جستجوی ساده براساس تابع هدف و معیار ارزیابی شرح داده شده، برای کاهش بارکاری حلقه‌های ناموجه تا جایی که اولین جواب موجه بدست بیاید.
- کاهش تعداد ایستگاه‌های منفرد در صورتی که تعداد ایستگاه‌های منفرد جواب بیش از ۱ عدد باشد.

در مرحله اول، از روش خوشه‌بندی k_means استفاده شده است. حداقل مزیت اینکار عدم ایجاد حلقه‌های متقاطع است که در این روش امکان بروز آن مطلقا وجود نخواهد داشت. از طرف دیگر معمولا (البته نه همیشه) مناسب‌ترین حلقه‌ها از انتخاب بهترین ایستگاه‌های مجاور هم در یک ناحیه بدست می‌آیند. در این روش از انتخاب تصادفی مکان اولیه مراکز خوشه‌ها و تخصیص کلیه ایستگاه‌ها به نزدیکترین مرکز براساس فاصله پله‌ای استفاده شده است.

در صورتی‌که جواب حاصل از مرحله اول، از لحاظ بارکاری حلقه‌ها موجه باشد (کلیه حلقه‌ها دارای بارکاری کمتر از حد تعیین شده باشند)، الگوریتم در همین‌جا متوقف می‌شود. حد بارکاری برای توقف برابر عدد ۱ در نظر گرفته شده است. در غیر این صورت، یک فرآیند جستجو براساس تابع هدف و معیار ارزیابی تعریف شده، شروع به کاهش بارکاری حلقه با بیشترین بارکاری در هر محله از طریق برداشتن ایستگاه‌ها از آن می‌کند. الگوریتم تا زمانی ادامه پیدا می‌کند. بارکاری هیچ حلقه‌ای بیشتر از حد مجاز (۱) نباشد. در مرحله آخر، جواب بدست آمده از لحاظ تعداد ایستگاه‌های منفرد موجود بررسی می‌شود. اگر تعداد ایستگاه‌های منفرد آن بیش از یک عدد باشد، الگوریتم دیگری برای کاهش تعداد آنها اجرا می‌شود.

۲,۶. تعریف حرکت‌های موجه و انجام حرکت

طبق فضای همسایگی تعریف شده، در این الگوریتم حرکت به مفهوم برداشتن یک ایستگاه از حلقه مبدا و اضافه کردن آن به حلقه دیگر (حلقه مقصد) است. براساس تابع هدف minimax، فضای همسایگی در هر مرحله تنها شامل ایستگاه‌های حلقه با بیشترین میزان بارکاری است. از میان حرکت‌های ممکن، تنها حرکت‌هایی ارزیابی می‌شوند که ممنوع نبوده، یا ممنوع بوده و شرایط آرمانی را برآورده کنند و یا اینکه منجر به جواب‌های ناموجه نشوند.

برای جلوگیری از انجام محاسبات زاید و برای سرعت بخشیدن به کار الگوریتم، پس از انجام بررسی‌های لازم انتخاب حلقه‌های مقصد، به حداکثر ۶ تا ۷ حلقه که مرکز هندسی آنها نزدیک‌ترین فاصله را از مرکز هندسی حلقه مبدا داشته باشد محدود شده است. همچنین از میان ایستگاه‌های حلقه مبدا، حداکثر ۴ ایستگاه که برداشتن آنها بیشترین کاهش را در بارکاری داشته باشد، انتخاب می‌شود. اما در صوریتکه تعداد حلقه‌های جواب کمتر از ۴ عدد باشد، کلیه ایستگاه‌های حلقه مبدا انتخاب می‌شوند.

با نوضیحات داده شده، مجموعه حرکت‌های ممکن را می‌توان به شکل زیر نشان داد:

فرض کنیم LP_O نشان دهنده حلقه‌ای باشد که باید ایستگاهی از آن به حلقه دیگر منتقل شود. بطوریکه :

$$\omega = \max(\omega_i),\ i = 1,\ldots,L \qquad (۹)$$

ST_O زیر مجموعه‌ای انتخاب شده از ایستگاه‌های حلقه LP_O است، بنابراین $ST_O \subset LP_O$. همچنین حلقه‌هایی که می‌توان ایستگاهی را از حلقه LP_O به آن‌ها افزود، با مجموعه LP_{Dj} نشان داده می‌شوند، که: $j = 1,\ldots,L_D$ و $j \neq i$ و L_D نشان دهنده حلقه‌هایی است که به عنوان حلقه مقصد برای انتقال ایستگاه انتخاب شده‌اند.

همانطور که در تعریف همسایگی عنوان شد، افزودن ایستگاه به حلقه‌ای دیگر به شرطی قابل قبول است که ایجاد جواب ناموجه نکرده و بارکاری حلقه مورد نظر را از حد مجاز افزایش ندهد. حد مجاز بارکاری یا ω_l در طی حل مسئله تغییر می‌کند. بدین معنی که این حد همواره برابر تابع هدف بهترین جواب یافت شده قرار داده می‌شود.

$$\omega_l = \max(\omega_i^*),\ i = 1,\ldots,L \qquad (۹)$$

در حقیقت با محدود کردن انتخاب حلقه‌های مقصد کاندید، سعی می‌شود افزایش در بارکاری ناشی از افزودن ایستگاه به حلقه جدید طوری محدود شود که حرکت حتی الامکان در محدوده بهترین جواب یافت شده انجام شود.

به منظور بررسی حرکت‌ها، ماتریسی تولید می‌شود که انتقال هر عضو ST_O را بررسی می‌کند. برای هر $st \in ST_O$ و هر LP_{Dj} مقادیر زیر محاسبه می‌شوند:

$$\Delta\omega_{D_j} = \omega(LP'_{D_j}) - \omega(LP_{D_j}),\quad j = 1,\ldots,L_D \qquad (۱۱)$$

$$\Delta\omega_O = \omega(LP_O) - \omega(LP'_O) \qquad (۱۲)$$

با داشتن این دو مقدار برای هر حرکت، ماتریس $\Delta\omega_{OD}$ که شامل مقدار معیار محاسبه شده برای حرکت‌های مختلف است، قابل تشکیل است. سطرهای این ماتریس معرف اعضای ST_O بوده و ستون‌های آن معرف L_D عدد حلقه انتخاب شده است. هر آرایه آن به این صورت بدست می‌آید:

$$\Delta\omega_{OD_j} = \Delta\omega_O - \Delta\omega_{D_j} \quad (۱۳)$$

در نهایت سطر و ستون عنصری که بیشترین مقدار را در ماتریس داشته باشد، به عنوان بهترین حرکت انتخاب می‌شود. تعریف حرکات موجه به صورت پیش فرض براساس حد ω_I صورت می‌گیرد. حد تعیین شده بیشتر برای بهبود عملکرد الگوریتم قرار داده شده، اما همیشه این امکان وجود دارد که حرکتی با شرایط مورد نظر وجود نداشته باشد. در چنین مواقعی، کلیه حرکت‌های موجه بدون توجه به شرط حد بارکاری در نظر گرفته می‌شوند.

۲,۷. لیست ممنوع

در الگوریتم توسعه داده شده از یک لیست ممنوع با اندازه ثابت، براساس حرکت‌های تعریف شده استفاده شده است. اگر $|TL|$ برابر اندازه لیست ممنوع در نظر گرفته شود، براساس شرط ممنوعیت حرکت ایستگاهی که از حلقه‌ای برداشته می‌شود تا $|TL|$ تکرار نمی‌تواند به آن حلقه بازگردد. با این وصف مجموعه TL که معرف لیست ممنوع است، شامل ایستگاه‌های منتقل شده در آخرین $|TL|$ تکرار و حلقه‌ای است که در هر تکرار به آن اضافه شده یا از آن برداشته شده‌اند. با توجه به تعریف حرکت m از فرمول شماره (۵)، در تکرار kام از الگوریتم، با اضافه شدن زوج $\{st_k, LP_{jk}\}$ بروز می‌شود.

۲,۸. سطح آرمانی

براساس تعریف معمول برای سطح آرمانی، حرکت ممنوعی که منجر به جوابی بهتر از بهترین جواب یافت شده شود، یعنی سطح آرمانی را ارضاء کند، از شرایط ممنوعیت خارج شده و به لیست حرکت‌های موجه اضافه می‌شود.

۲,۹. استراتژِی تنوع‌بخشی

تنوع بخشی یکی از استراتژی‌های معمول مورد استفاده در جستجوی ممنوع است. در الگوریتم طراحی شده استراتژی تنوع بخشی بیشتر به عنوان روشی برای فرار از بن بست‌های حرکتی احتمالی قرار داده شده است. در این گونه موارد محتویات لیست ممنوع حذف شده و فرآیند جستجو با داشتن بهترین جواب یافت شده تا آن تکرار به عنوان جواب اولیه، ادامه پیدا می‌کند.

۲,۱۰. شرط توقف

به دلیل عدم وجود مدل ریاضی بهینه، جواب بهینه مسئله شناخته شده نیست. لذا براساس شرط توقف قرار داده شده، در صورتیکه الگوریتم نتواند تا تعدادی تکرار معین به جواب بهتری دست پیدا کند، متوقف می‌شود.

۲,۱۱. مجاز نمودن انتخاب جواب‌های ناموجه

همانطور که بخش ۶,۳ اشاره شد، امکان دارد در مواردی بارکاری کلیه حلقه‌های مقصد نه تنها از حد تعیین شده که از مقدار ۱ نیز

تجاوز کند. در چنین مواردی هر حرکتی منجر به جواب ناموجه می‌شود. در این مواقع بهترین حرکت با توجه به معیار موجود انتخاب شده و به الگوریتم اجازه داده می‌شود که وارد منطقه ناموجه شده و با گذر از آن به جواب‌های بهتری در فضای قابل قبول مسئله وارد شود. به محض اینکه جواب موجهی بدست آمد، انتخاب حرکت‌های کاندید دوباره براساس همان همسایگی تعریف شده انجام می‌شود. به این معنی که الگوریتم در حالت عادی تنها مجاز به انتخاب جواب‌هایی است که مقدار تابع هدف آنها از حد تعیین شده تجاوز نکند و فقط در صورتیکه هیچ حرکتی قابل انتخاب نباشد به آن اجازه انتخاب جواب‌های ناموجه داده می‌شود.

۲,۱۲. کنترل تعداد ایستگاه‌های منفرد

در الگوریتم، کنترل بر روی تعداد ایستگاه‌های منفرد به دو شکل اعمال می‌شود. یکی در انتهای تولید جواب اولیه و دیگری در خلال اجرای الگوریتم. پس از تولید جواب اولیه، در صورت حضور ایستگاه‌های منفرد در جواب، یک الگوریتم مجزا کاهش تعداد آنها اجرا می‌شود. الگوریتم مزبور ابتدا ایستگاه‌های منفرد را یافته و سپس سعی می‌کند یک ایستگاه را از حلقه‌های مجاور برداشته و به آن اضافه کند. معیار مورد نظر برای انتخاب ایستگاه این است که، ایستگاه از حلقه‌ای برداشته شود که حداقل دارای ۳ ایستگاه باشد، انتقال ایستگاه مقدار تابع هدف را افزایش ندهد و ایجاد تقاطع نکند.

دومین شکل کنترل ایستگاه‌های منفرد، در شرط پذیرش بهترین جواب اعمال می‌شود. در هر مرحله، جواب تولید شده از نظر تعداد ایستگاه‌های منفرد کنترل می‌شود. اگر تعداد آنها بیش از ۱ عدد باشد، الگوریتم کاهش تعداد ایستگاه‌های منفرد که در مورد آن توضیح داده شد، اجرا می‌شود و گر نه جواب به همان شکل قبلی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

اگر تعداد ایستگاه‌های منفرد بهترین جواب بیشتر یا برابر ۲ عدد باشد، جواب جدید در صورت داشتن ایستگاه‌های منفرد کمتر، جایگزین بهترین جواب می‌شود. اگر تعداد ایستگاه‌های منفرد بهترین جواب کمتر یا برابر ۱ باشد. در صورتی که تعداد ایستگاه‌های منفرد جواب جدید نیز کمتر یا برابر ۱ بوده و مقدار تابع هدف آن نیز از بهترین جواب کمتر باشد، آنگاه جایگزین جواب قبلی می‌شود.

۲,۱۳. الگوریتم جستجوی ممنوع

براساس تعریف‌های انجام شده، الگوریتم جستجوی ممنوع طراحی شده به شرح ذیل خواهد بود:

قدم اول:

- جواب اولیه S_0 را تولید کن و قرار بده: $S=S^*, f(S)=f(S^*)$
- قرار بده :$best_itr = 0$.(best_itr معرف شماره تکراری است که در آن بهبود حاصل شده است.)
- شمارنده تکرارها را برابر صفر قرار بده: $itr = 0$

قدم دوم: تا وقتیکه $itr - best_itr < 20$، تکرار کن:

- $itr = itr+1$
- حلقه با بزرگترین مقدار ω را انتخاب کن. (LP_O)
- ماتریس حرکت‌های موجه را تولید کن، بطوریکه:
  - زوج $\{st, LP_j\}$ در مجموعه لیست ممنوع $\{TL\}$ نباشد.(ممنوعیت حرکت)
  - زوج $\{st, LP_j\}$ در لیست ممنوع باشد ولی $f(S') < f(S)$ باشد.(سطح آرمانی)
  - جواب غیر موجه تولید نکند.
- اگر حرکتی با در نظر گرفتن $\omega_1 = f(S^*)$ وجود دارد، بهترین حرکت را انتخاب کرده و S و $f(S')$ را بروز کن.
- اگر حرکتی بدون در نظر گرفتن ω_1 وجود دارد، بهترین بهترین حرکت را انتخاب کرده و S و $f(S')$ را بروز کن.
- اگر بدون در نظر گرفتن ω_1 نیز حرکتی وجود ندارد، قرار بده:$S=S^*, f(S)=f(S^*)$ و $TL=\{\}$(تنوع‌بخشی)

- زوج {st, LP_j} مربوط به حرکت انجام شده را به لیست ممنوع TL اضافه کن و اگر |TL| > ntl باشد، اولین عضو TL را حذف کن.
- در صورتیکه تعداد ایستگاه‌های منفرد S بیشتر یا برابر ۱ باشد، الگوریتم کاهش تعداد ایستگاه‌های منفرد را اجرا کن.
- اگر تعداد ایستگاه‌های منفرد *S بیش از ۱ عدد باشد، در صورتی که تعداد ایستگاه‌های منفرد S کمتراز *S باشد، قرار بده: S=S*, f(S) = f(S*)
- اگر تعداد ایستگاه‌های منفرد *S کمتر یا برابر۱ باشد، در صورتیکه تعداد ایستگاه‌های منفرد S کمتر یا برابر ۱ بوده و همچنین f(S') <f(S) قرار بده:S=S*, f(S) = f(S*)

۳. نتایج محاسباتی

با مراجعه به ادبیات مسئله، مشاهده می‌شود الگوریتم مورد بحث، تنها برای دو مثال با تعداد ایستگاه ۸ و ۲۰ حل شده است [۴]، و مسائل آزمایشی استاندارد در مراجع مشابه وجود ندارد. بنابراین به منظور مقایسه دو الگوریتم، تعدادی مسئله آزمایشی تصادفی تولید شده است. علاوه بر آن، دو الگوریتم با دو مثال فوق نیز حل شده‌اند. با توجه به اینکه ورودی‌های مسئله شامل طرح چیدمان نقطه‌ای و جدول از- به جریان بین ایستگاه‌ها و مشخصات AGV می‌شود، مشخصات مسائل آزمایشی تولید شده به شرح ذیل است:

- چیدمان نقطه‌ای: برای تولید چیدمان نقطه‌ای، ایستگاه‌ها بطور تصادفی و با رعایت فاصله مناسب در داخل طرحی با ابعاد ثابت۱۰۰×۸۰ مربع واحد انتخاب شده‌اند. چیدمان برای ۵ نوع تعداد ایستگاه ۱۰، ۲۰ ،۳۰،۴۰ و ۵۰ تایی تولید شده است.
- جدول از/ به جریان: برای تولید جداول از-به جریان، از سه چگالی معمول ۰/۲، ۰/۲۵ و ۰/۵ استفاده شده است. جداول از- به طوری ساخته شه‌اند که هر ایستگاه حداقل یک جریان ورودی یا خروجی داشته باشد. مقادیر جریان به صورت اعداد تصادفی بین ۰/۰۵ و ۰/۳ (واحد جریان در ساعت) با فواصل ۰/۰۱ انتخاب شده‌اند.
- مشخصات حرکتیAGV: مشخصات AGV، برابر مقادیر داده شده در مرجع [۴] انتخاب شده‌اند. سرعت حرکت AGV در هر دو وضعیت پر و خالی برابر ۱۵ واحد مربع در هر دقیقه بوده و زمان لازم برای برداشتن یا قرار دادن بار برابر ۰/۲ قیقه است.

برای هریک از حالت‌های فوق، ۴ مسئله نمونه تولید شده است، بنابراین تعداد کل مسائل آزمایشی ۶۰ عدد است. هر مسئله آزمایشی برای سه اندازه مختلف L حل شده است. مقادیر L، ابتدا با حل الگوریتم مبنا (Bozer, Srinivasan 1992) مشخص شده و سپس برای الگوریتم TS با آن مقادیر حل شده است. این سه مقدار به روش ذیل بدست آمده‌اند:

- L_{max}: بزرگ‌ترین مقداری که می‌توان برای L در نظر گرفت. با در نظرگرفتن این نکته که هر ایستگاه معمولا می‌تواند با ایستگاه‌های مجاور خود تشکیل حلقه بدهد، این مقدار برابر [0.5*N] است.
- L_{min}: کوچک‌ترین مقدار ممکن برای L که مقدار تابع آن از ۰/۷ بیشتر نباشد. برای تعیین این محدوده، ابتدا حداکثر اندازه حلقه‌ها موجود تعیین شده و با تقسیم تعداد ایستگاه‌ها بر آن عدد مشخص می‌شود که حد پایینی برای اندازه L چه عددی می‌تواند باشد.
- $L_{average}$: برابر میانگین L_{min} و L_{max}

برای تست الگوریتم مبنا، حداکثر بارکاری مجاز برابر ۰/۷ در نظر گرفته شده است. برای کاهش زمان حل مدل IP، براساس پیشنهاد ارائه شده توسط Bozer و Srinivasan در [۴] از حد تخمینی Z_H برای حذف حلقه‌های زاید استفاده شده است. این حد برای L_{min} برابر همان ۰/۷، برای L_{max} از روی مقدار متوسط و حداکثر بارکاری حلقه‌های دارای ۲ یا ۳ ایستگاه و برای $L_{average}$ بین دو مقدار Z_H قبلی و همچنین با بدست آوردن متوسط بارکاری حلقه‌های با اندازه [N/L]، انتخاب شده است.

با توجه به مجاز بودن حداکثر ۱ ایستگاه منفرد برای الگوریتم TS، برای ایجاد شرایط مساوی، این شرط برای الگوریتم مبنا نیز قرار داده شده است. دو بخش ابتدایی الگوریتم مبنا که شامل تولید زیر مجموعه‌های ممکن از ایستگاه‌ها و سپس حذف تعدادی از آنهاست، در محیط Matlab 6.5 و بخش سوم که شامل حل مدل IP برای یافتن بهترین ترکیب حلقه‌هاست، در نرم افزار LINGO 6.0 کد شده‌اند.

الگوریتم TS ابتدا برای تعدادی مسئله آزمایشی حل شده و مقدار مناسب برای اندازه لیست ممنوع انتخاب شده است. اگر N تعداد ایستگاه‌های مسئله باشد، به نظر می‌رسد بهترین محدوده برای انتخاب پارامتر،2±[N/5] باشد. از آنجاییکه استفاده از روش خوشه‌بندی در

تولید جواب اولیه، به جواب‌های تصادفی منجر می‌شود. برای هر حالت از مسائل آزمایشی ۳ جواب اولیه تصادفی تولید شده و الگـوریتم TS با آن حل شده است. الگوریتم TS بطور کامل در Matlab 6.5 کد شده است.

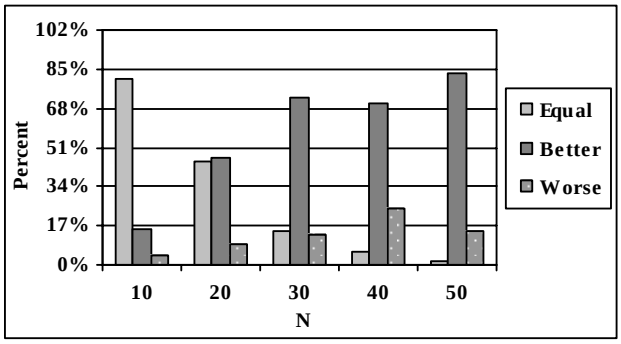
کلیه تست‌ها توسط یک رایانه مدل Pentium 4 با پردازنده 2.00GHz و با RAM 256 MB انجام شده‌اند، خلاصه نتایج تست‌ها در جدول (۱) آورده شده است.

نوع حالت	تعداد رخداد	درصد رخداد	متوسط انحراف از تابع هدف	بیشترین انحراف از تابع هدف
جواب‌های بهتر	۳۰۳	٪ ۶۰	٪ -۶/۳	٪ -۲۲/۵
جواب‌های بدتر	۶۸	٪ ۱۳	٪ ۳/۶	٪ ۱۳/۳
جواب‌های برابر	۱۳۷	٪ ۲۷	_	_
مجموع	۵۰۸	٪ ۱۰۰	_	_

جدول ۱. آمار رخداد حالات سه گانه و میزان انحراف از تابع هدف

مسئله دیگری که باید مورد توجه قرار گیرد، میزان انحراف تابع هدف الگـوریتم TS از الگـوریتم مبنـا، بـسته بـه ابعـاد مـسئله (تعـداد ایستگاه‌ها) است. در شکل ۴ آمار موجود برای حالات سه گانه به تفکیک ابعاد مسئله آورده شده است.

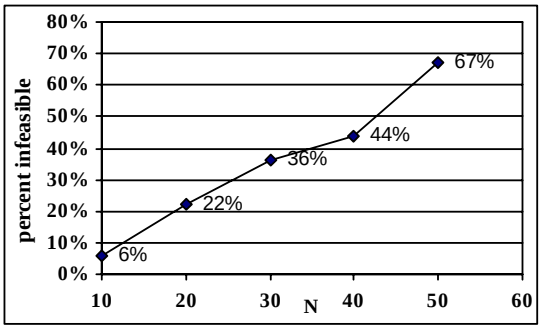
در N=10، هر دو الگوریتم در اکثر موارد جواب‌های برابر می‌دهند که می‌تواند نشانه دست یافتن هر دو الگوریتم به جواب بهینه باشـد. اما با افزایش تعداد ایستگاه‌های مسئله، متوسط موارد با جواب‌های بهتر توسط الگوریتم TS، بطور قابل ملاحظه‌ای افـزایش پیـدا مـی‌کنـد. بطور مثال از N=20 به بعد، تقریبا در بیش از ۶۸٪ موارد قادر به یافتن جواب‌های بهتر است. می‌توان گفت بطور کلی در مسائل با N>20، الگوریتم جدید از نظر کیفیت جواب بهتر از الگوریتم مبنا عمل می‌کند.



شکل ۴. نمودار درصد وقوع حالات سه گانه به تفکیک تعداد ایستگاه‌ها

مسئله دیگری که می‌توان به آن پرداخت، متوسط انحراف‌های مثبت و منفی تابع هدف الگوریتم TS نسبت به تابع هدف الگوریتم مبنا، در اندازه‌های مختلف مسئله است. از نتایج بدست آمده، مشاهده شده که انحراف منفی (بهبود) بیشتری در تـابع هـدف، نـسبت بـه انحـراف مثبت از آن داشته است. بطور مثال در N=50، در ازای متوسط ۸٪ بهبود، جواب‌های آن تنها ۳٪ بدتر از جـواب‌هـای الگـوریتم مبنـا بـوده است.

مهم‌ترین مزیت الگوریتم TS نسبت به الگوریتم مبنا، علاوه بر بهبود حاصل شده در کیفیت جواب، موجه بودن آن است. الگـوریتم TS از هرگونه تداخل مسیر در حلقه‌ها جلوگیری می‌کند. ولی این مسئله در الگوریتم مبنا چندان صادق نیست. با اینکه در تولید زیرمجموعه‌های مجاز سعی شده که حتی‌الامکان ایستگاه‌های مجاور در زیر مجموعه قرار گیرند، ولی در مرحله حل مدل IP که شامل انتخاب نهایی حلقه-هاست، از لحاظ ریاضی هیچ کنترلی روی وضعیت قرارگیری حلقه‌ها نسبت به هم اعمال نمی‌شود. همین مسئله در برخـی مـوارد منجـر بـه تولید جواب‌های با حلقه‌های متقاطع می‌شود. احتمال تولید جواب‌های ناموجه در الگوریتم مبنا، تقریبا در هر انـدازه از مـسئله وجـود دارد. در نمودار شکل ۵، نسبت تولید جواب‌های ناموجه به تعداد کل جواب‌ها به تفکیک اندازه مسئله آورده شده است.



شکل ۵. درصد جواب‌های ناموجه الگوریتم مبنا برای اندازه مسائل مختلف

با افزایش اندازه مسئله، نسبت تولید جواب‌های متقاطع توسط الگوریتم مبنا بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. این مسئله $N\geq20$ کاملا مشهود است. مثلا در بزرگ‌ترین اندازه مسئله حل شده، در بیش از ۶۰٪ موارد، جواب‌های تولید شده ناموجه هستند. از این رو به نظر می‌رسد که الگوریتم Bozer و Srinivasan، همیشه در حل مسائل با $N\geq20$ نمی‌تواند موفق نیست. چرا که در هر حال احتمال تولید جواب‌های متقاطع، حتی در مسائل کوچک‌تر نیز وجود دارد.

اگر چه مسائلی از نوع طراحی مسیرهای حمل‌ونقل، از مسائل روتین و تکرار شونده در طول دوره زمانی نبوده و مسئله زمان در حل آنها به اندازه مسائلی چون برنامه‌ریزی تولید از اهمیت برخوردار نیست، اما در هر حال زمان صرف شده برای حل آن باید در حد معقولی باشد. با بررسی‌های انجام شده روی زمان حل الگوریتم TS، مشخص شد که پارامتر L، روی زمان حل تاثیر بسزایی دارد. نتایج نشان می‌دهند که با کاهش اندازه L، زمان حل مسئله نیز افزایش پیدا می‌کند. به نظر می‌رسد منطقی‌ترین دلیل، افزایش تجمع ایستگاه‌ها در حلقه‌ها با کاهش تعداد حلقه‌ها باشد. همین مسئله، موجب افزایش زمان محاسبه بارکاری حلقه‌ها می‌شود. محاسبه بارکاری، بخش عمده‌ای از محاسبات الگوریتم TS را شامل می‌شود.

همچنین از بررسی زمان‌های حل مسئله توسط دو الگوریتم، می‌توان نتیجه گرفت که در $d=0.2$، الگوریتم TS در مقادیر L_{max} (یا نزدیک به آن)، در تمامی موارد سریع‌تر و همچنین در مقادیر $L_{average}$ و یا نزدیک به آن، برای N از ۱۰ تا ۴۰، سریع‌تر از الگوریتم مبنا عمل کرده است. با افزایش چگالی ۰/۲۵، الگوریتم جدید باز در L_{max} و $L_{average}$ سریع‌تر عمل کرده است، منتهی این بار به ترتیب تا N برابر با۴۰ و ۳۰ این وضعیت صدق می‌کند. در نهایت در $d=0.5$، الگوریتم تنها در $N=10$ سریع‌تر بوده است. اما در هر حال به نظر می‌رسد که بطور کلی با افزایش N، سرعت عمل الگوریتم مبنا نسبت به الگوریتم جدید افزایش پیدا می‌کند. بنابراین کیفیت جواب و زمان حل در جهت عکس یکدیگر عمل می‌کنند. بدین معنی که با افزایش اندازه مسئله، اختلاف در زمان حل بیشتر می‌شود، در حالیکه برخلاف آن هر چه مسئله بزرگ‌تر می‌شود، کیفیت جواب‌های الگوریتم مبنا نسبت به الگوریتم جستجوی ممنوع چه از نظر مقدار تابع هدف و چه از نظر موجه بودن آن کاهش پیدا می‌کند.

۴. جمع بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله، به ارائه روش حلی برای مسئله طراحی مسیرها در سیستم‌های حمل‌ونقل تاندم برای وسایل نقلیه خودکار، توسط الگوریتم TS پرداخته شده است. الگوریتم مزبور برمبنای فرضیات و تعاریف ارائه شده توسط بوزر(Bozer) و سرینیواسان(Srinivasan) توسعه داده شده است. الگوریتم طراحی شده، با فرض داشتن چیدمان نقطه‌ای ایستگاه‌ها، جریان بین آنها و تعداد حلقه‌های مورد نظر، ایستگاه‌ها را طوری به حلقه‌ها تخصیص می‌دهد که بدون ایجاد همپوشانی و تداخل، حداکثر بارکاری داخل حلقه‌ها حداقل شود. این الگوریتم با شروع از جواب اولیه حاصل از خوشه بندی k-means، در هر تکرار حلقه با بیشترین بارکاری را انتخاب کرده، و سعی می‌کند با انتقال یکی از

ایستگاه‌های آن به حلقه‌ای دیگر، بارکاری آنرا طوری کاهش دهد که بهترین بهبود در بارکاری حلقه مورد نظر و کمترین افزایش در بارکاری حلقه دوم ایجاد شود. طبق شرایط ممنوعیت، ایستگاهی که از حلقه‌ای انتقال داده می‌شود، نمی‌تواند تا تعداد معینی تکرار دوباره به آن بازگردد. در این الگوریتم از شرایط سطح آرمانی و نوعی استراتژی تنوع‌بخشی استفاده شده است.

الگوریتم طراحی شده و الگوریتم مبنا، براساس ۶۰ مسئله آزمایشی طرح شده، با ۳ اندازه مختلف برای تعداد حلقه‌ها و نیز ۲ مثال عددی ارائه شده در مرجع حل شده و نتایج حاصل از نظر کیفیت جواب و زمان حل مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

از بررسی نتایج تست‌ها می‌توان به این نتیجه رسید که بطور کلی الگوریتم TS قادر بوده است در اغلب موارد به جواب‌های بهتری دست پیدا کند و با افزایش اندازه مسئله، به مقدار بهبود و تعداد جواب‌های بهتر افزوده شده است. مهم‌ترین مزیت الگوریتم TS نسبت به الگوریتم مبنا، جلوگیری از ایجاد هر گونه تداخل بین حلقه‌هاست. همانطور که نتایج تست‌ها نشان می‌دهد، با افزایش اندازه مسئله احتمال تولید جواب‌های با حلقه‌های متقاطع توسط الگوریتم مبنا، افزایش پیدا می‌کند. بطوریکه در مسائل بزرگ، اینگونه جواب‌ها بیش از ۶۰٪ کل جواب‌های تولید شده را شامل می‌شوند. به عبارت دیگر، به موازات افزایش اندازه مسئله، از کیفیت جواب‌های الگوریتم مبنا و موجه بودن آنها کاسته می‌شود. الگوریتم TS در مسائل کوچک، بیشتر در بهبود زمان موفق بوده است ولی الگوریتم مبنا در مسائل بزرگ سریع‌تر عمل کرده است.

۵. تحقیقات آتی

پیشنهاداتی که می‌توانند به عنوان مبنای برای تحقیقات آتی در مورد طراحی سیستم‌های تاندم قرار گیرند، در چند زمینه قابل طرح هستند. مهمترین مسئله‌ای که در این زمینه می‌توان به آن اشاره نمود، عدم وجود یک مدل ریاضی برای حل مسائل سیستم‌های تاندم است. توسعه یک مدل ریاضی برای حل مسائل تاندم به نظر ضروری می‌رسد. به نظر می‌رسد که توسعه مدل ریاضی برای چیدمان نقطه-ای، به دلیل نیاز به لحاظ نمودن محل عبور حلقه‌ها و شکل آنها بسیار مشکل و شاید غیر عملی باشد. ولی این کار لااقل برای چیدمان بلوکی می‌تواند قابل انجام باشد.

مسئله دیگر، توسعه‌های ممکن برای الگوریتم TS است. الگوریتم توسعه داده شده در این مقاله برای تعداد حلقه‌های ثابت طراحی شده است، در قدم بعدی برای توسعه این الگوریتم، می‌توان آن را برای تعداد حلقه‌های متغیر طراحی نمود. بطور مثال می‌توان الگوریتم را طوری طراحی نمود که با شروع از بیشترین تعداد حلقه و کاهش تعداد حلقه‌ها در طی حل مسئله با ادغام حلقه‌های مختلف و یا تغییر دادن آنها، به یک حداکثر بارکاری تعیین شده برسد. بدین ترتیب دیگر نیازی به حل الگوریتم برای تعداد حلقه‌های مختلف نخواهد بود.

به نظر می‌رسد به دلیل ماهیت مسئله سیستم‌های تاندم و محدود و مشکل بودن امکان انتخاب جمعیت‌های بزرگ از جواب‌های تصادفی، الگوریتم‌های فوق ابتکاری از نوع تک جوابی برای حل اینگونه مسائل مناسبتر باشند.البته این به این مفهوم نیست که سایر روش-های فوق ابتکاری تک جوابی مناسب حل این مسائل نیستند، چه بسا روش‌های دیگری باشند که عملکرد بهتری از دو الگوریتم ذکر شده داشته باشند.

منابع و مراجع

1. Tompkins. J.A., White Y.A., Bozer Y.A., Frazelle E.H., J.M.A. Tanchoco, J. Trevino, "Facilities Planning", New York , Wiley, 1996.
2. Farahani. R, Laporte. G, Sharifyazdi. M, "A Practical Exact Algorithm for the Shortest Loop Design Problem in a Block Layout", working paper, Les Cahiers du GERAD, May 2003.
3. Bozer Y.A., Srinivasan M.M., "Tandem Configurations for AGV Systems Offer Simplicity and Flexibility", Industrial Engineering, no.21, 1989, p.23-27.
4. Bozer Y.A., Srinivasan M.M., "Tandem Configuration for Automated Guided Vehicle Systems

and the Analysis of Single Vehicle Loops", IIE Transactions, no.23, 1991, p.72–82.
5. Bozer Y.A., Srinivasan M.M., "Tandem AGV systems: A Partitioning Algorithm and Performance Comparison with Conventional AGV Systems", European Journal of Operational Research, no.63, 1992, p.173-191.
6. Hsieh L.F., Sha D.Y., "A Design Process for Tandem Automated Guided Vehicle Systems: the Concurrent Design of Machine Layout and Guided Vehicle Routes in Tandem Automated Guided Vehicle Systems", Integrated manufacturing Systems, no.7/6, 1996, p.30-38.
7. Aarab A., Chetto H., Radouance L., "Flow Path Design for AGV Systems", http://www.ici.ro/ici/revista/sic99_2/art02.html, 2001.
8. Yu W., Egbelu P., "Design of a Variable Path Tandem Layout for Automated Guided Vehicle Systems", Journal of Manufacturing Systems, no.20, 2001, p.305-319.
9. Bozer Y.A., Lee C.G., "Using Existing Workstations as Transfer Stations in Tandem AGV Systems", submitted to Journal of Manufacturing Systems, 2004.
10. Ventura J.A., Lee C., "Tandem Loop with Multiple Vehicles Configuration for Automated Guided Vehicle Systems", fie.engrng.pitt.edu/iie2002/proceedings/ierc/papers/2222.pdf, 2001.
11. Huang C., "Design of Material Transportation System for Tandem Automated Guided Vehicle Systems", International Journal of Production Research, no.35, 1997, p.943-953.