مسأله مسیریابی وسیله‌نقلیه متصل به حمل‌ونقل چندوجهی رویکرد یکپارچه

یوسف ربانی، استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه هرمزگان، بندر عباس، ایران
محمدمهدی سپهری، دانشیار، دانشکده فنی – مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
سیدحسام‌الدین ذگردی، دانشیار، دانشکده فنی – مهندسی دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
e-mail: mehdi.sepehri@modares.ac.ir

چکیده

ایران دارای بنادر فراوان در خلیج فارس و دریای عمان است که بسیاری از آنها به دلایل گوناگون قادر به پذیرش کشتی‌های بزرگ نیستند. ایده استفاده از بنادر بزرگ موجود در منطقه به عنوان مراکز واسط برای دریافت کالا از کشتی‌های بزرگ و ارسال آن توسط کشتی‌های کوچک‌تر به سایر بنادر و از آنجا به داخل کشور می‌تواند در جهت فعال کردن بنادر کوچک‌تر و نیز کشتیرانی خصوصی در منطقه بسیار کارآمد باشد. در این مقاله علاوه بر طرح این ایده، یک سیستم کلی حمل‌ونقل متناسب با آن طرح شده و به صورت یک شبکه متشکل از مسیرهای وسایل نقلیه و مسیرهای حمل‌ونقل چند وجهی برای اولین بار مدل شده است. در این مقاله برای حل مدل این شبکه، برای مسائل با ابعاد کوچک، از روش انشعاب و تحدید استفاده شده و برای حل مدل‌های دارای تعداد گره بیشتر، روشی ابتکاری به نام SB-RAB بر اساس روش سیمپلکس با ورود محدود متغیرها توسعه داده شده است. از بعد محاسباتی، روش SB-RAB برای حل دو سری از مسائل مبنای موجود در ادبیات مسیریابی وسیله نقلیه مورد استفاده قرار گرفته و نتایج آنها گزارش شده است. همچنین، این مسائل مبنا از روش مرسوم در ادبیات حمل‌ونقل یعنی روش تفکیک شبکه به دو زیر بخش مسیریابی وسیله نقلیه و حمل‌ونقل چند وجهی نیز حل و نتایج مربوطه گزارش شده‌اند. در انتها، با مقایسه همه نتایج، نشان داده شده که روش SB-RAB می‌تواند جواب‌هایی برتر در مدت زمانی قابل قبول ارایه دهد.

واژه‌های کلیدی: حمل‌ونقل چند وجهی، مسأله مسیریابی وسیله‌نقلیه، حمل‌ونقل دریایی، مسیریابی وسیله نقلیه چند تحویلی

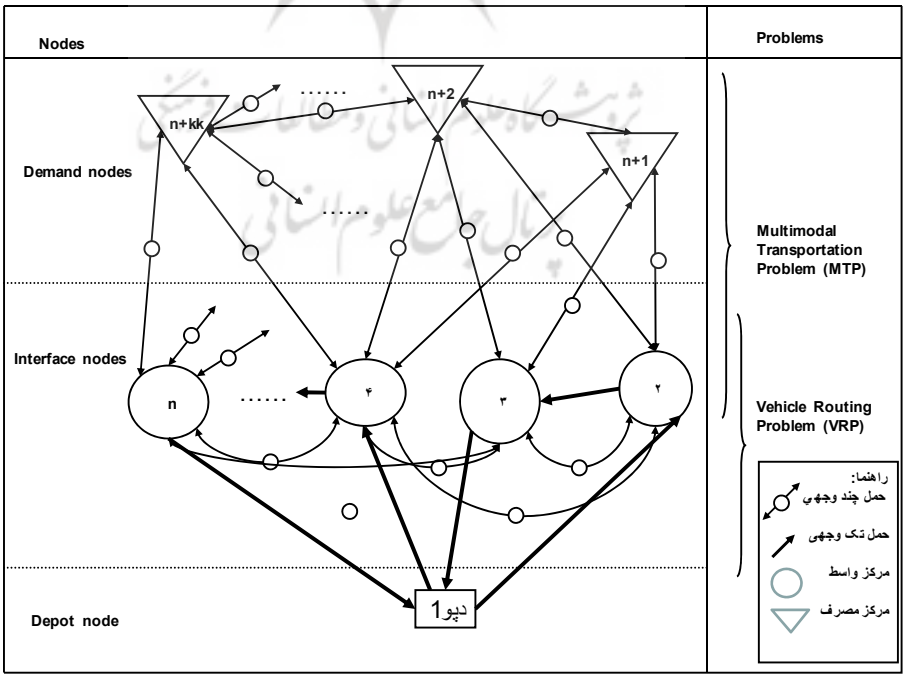
پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

۱. مقدمه

آنچه که باعث شکل‌گیری ایده اولیه مسأله شده، وضعیت حمل‌ونقل دریایی، ریلی و زمینی در جنوب ایران است. در حال حاضر معدودی از بنادر جنوبی ایران ظرفیت و امکانات پذیرائی از کشتی‌های بزرگ را دارند، در حالی که تعداد زیادی از آنها یا توسعه نیافته‌اند و یا محدودیت‌های جغرافیایی آنها این اجازه را نمی‌دهد. مثلاً بنادر خرمشهر و آبادان که تا قبل از شروع جنگ تحمیلی در سال ۱۳۵۹ عمده‌ترین مبادی ارسال و دریافت کالای کشور بودند، در حال حاضر به دلیل افزایش ابعاد و ظرفیت کشتی‌ها و محدودیت عمق آبراه اروندرود، قادر به پذیرفتن کشتی‌های بزرگ نیستند. در نتیجه، سیستم‌های حمل‌ونقل ریلی و جاده‌ای منتهی به این بنادر نیز ظرفیت‌های بلا استفاده فراوانی دارند. از طرف دیگر، به دلیل اجرای برنامه‌های توسعه اقتصادی و توجهات معطوف شده به چشم‌انداز بیست‌ساله، نیاز روز افزون به ظرفیت‌های حمل‌ونقل جدید و بهره‌گیری بهتر از تمامی ظرفیت‌های موجود بیش از پیش ضرورت می‌یابد. در این رابطه، برای افزایش ظرفیت حمل‌ونقل و ترانزیت کشور، ممکن است با سرمایه‌گذاری بر روی بنادر مستعد موجود (اعم از توسعه یافته یا توسعه نیافته) امکان پذیرایی از کشتی‌های بزرگ‌تر و یا تعداد بیشتری از کشتی‌ها را به وجود آورد. اما از یک طرف با ورود کشتی‌های بزرگ‌تر و حتی کشتی‌های غول‌پیکر (Mega-ships)

*تاریخ دریافت: ۸۶/۱۰/۲ - تاریخ پذیرش: ۸۷/۳/۱۱

و نیز کشتی‌های سریع‌تر و فوق سریع (Rapid-ships) به ناوگان دریایی جهانی، که پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۲۰ اتفاق بیافتد[۱]، نیاز به سرمایه‌گذاری مرتباً بیشتر می‌شود. از طرف دیگر بعضی از بنادر از نظر موقعیت جغرافیایی خود قادر نخواهند بود در این سرمایه گذاری‌ها سهمی داشته باشند. در نتیجه باید در پی راهی برای استفاده از ظرفیت بنادر کوچک‌تر بود. ایده قابل بررسی در این خصوص این است که از بنادر بزرگ موجود در منطقه، به عنوان مراکز واسط برای تغذیه شبکه حمل‌ونقل دریایی (شامل کشتی‌ها و بنادر کوچک‌تر) استفاده شود. به این ترتیب فرض بر این است که کشتی های بزرگ از یک مرکز (دپو) واقع در خارج از منطقه خلیج فارس (مثلاً جنوب شرق آسیا) روانه منطقه می‌شوند و کالاهای خود را در چند بندر بزرگ واسط (ایرانی و یا غیر ایرانی واقع در منطقه) تخلیه کرده و سپس به دپو بر می‌گردند. این کالاها سپس توسط یک شبکه حمل‌ونقل چندوجهی (با وجوه حمل دریایی توسط کشتی‌های کوچک‌تر؛ حمل ریلی؛ و حمل زمینی) به مراکز مصرف مورد نظر (مراکز مصرف استانی در ایران، و مقاصد ترانزیتی کالا از ایران مانند افغانستان، عراق، ترکیه، روسیه و کشورهای مستقل شده از شوروی سابق) ارسال می‌شوند. این وضعیت فرصت مناسبی را برای رونق کشتیرانی خصوصی و نیز بنادر کوچک‌تر و کمتر توسعه یافته ایران فراهم می‌کند. به علاوه، همسایگان ایران مانند امارات و پاکستان با سرمایه‌گذاری زیاد بنادر بزرگی را به وجود آورده‌اند که از ظرفیت آنها می‌توان برای این منظور و رونق‌دهی به کشتیرانی و بنادر ایران در خلیج فارس و نیز برای افزایش ظرفیت حمل‌ونقل و ترانزیت ناوگان کشور بهره گرفت. به این ترتیب امکان بهره‌گیری از سرمایه دیگران در جهت فعال کردن بیش از پیش بنادر و ناوگان خصوصی ایران به وجود می‌آید. البته استفاده از این فرصت، نیازمند مطالعات امکان‌پذیری و اقتصادی و دیگر جنبه‌های سیاسی و اجتماعی است. آن چه که در این مقاله به آن پرداخته می‌شود توجه به ابعاد شبکه‌ای حمل‌ونقل این طرح در قالبی یکپارچه و کلی است، که بر این پایه مدلی از آن ساخته می‌شود که ابزار سنجش اقتصادی هزینه‌ها و حل مسأله بهینه‌یابی در این شبکه خواهد بود. از نظر طرح این شبکه، شبکه بین دپو تا بنادر بزرگ به شکل یک شبکه از مسیرهای وسائل نقلیه یا Vehicle Routing Problem (VRP) قابل مدل کردن است و شبکه ارتباطی بین بنادر بزرگ و مراکز مصرف، به صورت یک حمل چند وجهی یا Multimodal Transportation Problem (MTP) مدل می‌شود. در شبکه اخیر، امکان تبدیل روش‌های حمل کالا به یکدیگر با صرف هزینه در بعضی از مراکز مصرف و واسط وجود دارد. شکل ۱ شبکه حمل‌ونقل یکپارچه متشکل از VRP , MTP را نشان می‌دهد.



شکل ۱. شبکه یکپارچه متشکل از VRP و MTP

با وجود اینکه ایده اولیه مسأله از شرایط واقعی در جنوب ایران گرفته شده است، این مسأله به شکل کلی در دنیای واقعی کاربردهای زیادی دارد که چند نمونه از آنها عبارتند از:

- ترکیب حمل‌ونقل عمده و خرده فروشی
- ترکیب حمل‌ونقل مواد اولیه در سیستم‌های تولیدی
- حمل آذوقه و مهمات نظامی
- ترکیب مسأله توزیع سوخت

در این مقاله به ساخت و مدل کردن یک شبکه حمل‌ونقل کلی به صورت یک شبکه یکپارچه متشکل ازVRPوMTP پرداخته شده و روشی ابتکاری به نام SB-RAB برای حل آن توسعه داده شده است. در ادامه، ادبیات موضوع‌های VRP, MTP و نیز موارد خاص ترکیب آنها بررسی شده است. سپس یک مدل BMIP (Binary Mixed Integer Programming) برای حالت یکپارچه برای اولین بار در ادبیات حمل‌ونقل ارایه شده و آنگاه روش SB-RAB ارایه شده است. سپس دو سری مسأله مبنا با استفاده از مسائل مبنای موجود در ادبیات تولید شده‌اند که متناسب با وضعیت یکپارچه اتصال MTP,VRP هستند. در نهایت، این مسائل مبنا با استفاده از روش SB-RAB حل شده و نتایج به دست آمده با نتایج استخراجی از روش ابتکاری "تفکیک" که در ادبیات ارایه شده، مقایسه گردیده‌اند.

۲. مرور ادبیات موضوع

در بررسی ادبیات موضوع، ابتدا به بررسی VRP و جایگاه آن در ادبیات مسائل حمل‌ونقل و نیز آخرین پیشرفت ها و مشکلات در حل آن پرداخته و سپس MTP مورد بررسی قرار می‌گیرد. در انتهای این قسمت به بررسی جایگاه ترکیب این دو پرداخته شده و ضعف‌های ادبیات از لحاظ مدلسازی و روش‌های حل آن بررسی می‌شود.

مسأله VRP برای اولین بار در دهه ۱۹۶۰ تحت عنوان توزیع کامیون (Truck Dispatching) توسط دنتزیک و رامسر مطرح شد[۲]. VRP سپس توسط گری و جانسون [۳] در سال ۱۹۷۹، لنسترا و رینوی کان در سال ۱۹۸۱ [٤] یانو و مک گتینگ [٥] در سال ۱۹۸۷ و نیز لاپورته و دجاکس[٦] در سال ۱۹۸۹، مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که این مسأله به رده مسائل NP-hardتعلق دارد و از این رو ارایه الگوریتمی که بتواند با یک پیچیدگی زمانی از درجه چند جمله‌ای مسأله را حل کند امکان‌پذیر نیست. به همین علت الگوریتم‌های ابتکاری و فرا ابتکاری بسیاری برای حل این مسأله توسعه داده شده‌اند (برای دیدن نمونه‌ای از الگوریتم‌های ابتکاری و فرا ابتکاری به ترتیب به کار لاپورته و نوبرت در سال ۱۹۸۷ [۷] و کار آرتیچی و اسپرینزا در سال ۲۰۰٦ [۸] رجوع کنید.) افزون بر این بسیاری از تنوع‌های این مسأله و از جمله حالت ارسال چند وسیله نقلیه به یک گره (Split Delivery VRP- SDVRP) نیز مورد بررسی بوده‌اند که برای نمونه می‌توان به کارهای [۱۲-۹] رجوع کرد. جمع‌بندی و خلاصه‌ای از تحقیقات انجام شده در حوزه‌های مسائل VRP را کرینیک و لاپورته در سال ۱۹۹۷ و تات و ویگو در سال ۲۰۰۱ آورده‌اند [۱۳،۱٤]. با مطالعه این جمع‌بندی‌ها و نیز آخرین کارهای انجام شده [۲]، قابل ملاحظه است که در حال حاضر الگوریتم‌های فراابتکاری اجازه حل مسائل VRP با بزرگی ۲۰۰ گره را نیز داده و جواب‌های قابل قبولی برای آنها تولید می‌کنند. اگر چه برای مسائل با بیش از ۷۵ گره، به دست آوردن جواب خوب چندین ساعت به طول می‌انجامد [۸]. همچنین در آنها نیاز به برنامه‌نویسی و تنظیم پارامترهای متعدد است که کیفیت جواب‌های به دست آمده بستگی زیادی به این تنظیم‌ها دارد[۱۳] و این خود سبب صرف زمان زیادی می‌شود.

در مقایسه،MTP بسیار کمتر مورد بررسی قرار گرفته است، چرا که در طی دهه‌های گذشته در جهان و در آمریکا دید و تمرکز برنامه‌ریزان حمل‌ونقل روی توسعه شبکه‌های حمل‌ونقل تک‌وجهی بوده است [۱٥]. به همین علت، در سال ۱۹۹۱ کنگره آمریکا کلیه ایالت‌ها را به برنامه‌ریزی چند وجهی که بیشتر کلی‌نگر باشد ملزم کرد [۱٦]. با این حال هنوز کمبود زیادی از نظر ابزارهای تحلیلی که اجازه ارزیابی شبکه‌های حمل‌ونقل چند وجهی را داده و در عین حال نسبت به همه وجه‌ها نیز خنثی باشند، وجود دارد[۱۷]. بررسی مدل‌های موجود در این زمینه نشان می‌دهد که دو نوع روش مدل‌سازی در ادبیات حمل‌ونقل چند وجهی وجود دارد که به نام‌های روش سنتی و روش جدید معروفند.برنامه‌ریزی چندوجهی به شیوه سنتی شامل چهار مرحلهٔ: تولید جریان؛ توزیع جریان؛ شکستن جریان بین وسایل؛ و تخصیص جریان به وسائل می‌شود که همگی به صورت بخش‌های مجزا دیده می‌شوند [۱۸]. مشکل این روش، درنظر نگرفتن همزمان جریان کالا و نوع وسیله حمل‌ونقل است که باعث افزایش هزینه‌ها می‌شود [۱۹]. از این رو، ارایه شبکه چند وجهی به صورت یک شبکه

تک‌وجهی رویکرد جایگزین برای روش سنتی است. در این رویکرد، هر کدام از عملیات حمل‌ونقل (مثل بارگیری، تخلیه، انتقال کالا بین وسائل و ...) به وسیله یک کمان مجازی نشان داده می‌شوند. این رویکرد جواب‌های بهتری (با هزینه کل کمتر) می‌دهد، ولی نقطه ضعف آن این بوده که شبکه‌ای با تعداد زیاد از گره‌ها و کمان‌ها ایجاد می‌کند [۲۰،۲۱] اگرچه به اعتقاد ما در حال حاضر با پیشرفت رایانه‌ها این نقطه ضعف تا حدود زیادی در عمل برطرف شده است.

در مورد ترکیب MTP , VRP در ادبیات حمل‌ونقل هر چند مثالی یافت نشد، اما ترکیب آنها یک مسأله ترکیبیBMIP خواهد بود. حل این مسأله در ادبیات و یا حتی یافتن جواب اولیه امکان‌پذیر برای آن با اهمیت است (NP-Complete) و در عمل می‌تواند بسیار مشکل باشد[۲۲]. هر چند میزان سختی حل مسأله بستگی به نوع ترکیب مورد نظر دارد، حل این مسأله خصوصاً برای ترکیب مسیریابی وسیله نقلیه بسیار مشکل و زمان‌بر است. برای مثال پدروسو ۲۰۰٤ [۲۳] در مسائل استانداردی که حل کرده، گزارش داده که بیشترین وقت را حل مسأله مسیریابی وسیله نقلیه به خود تخصیص داده است. به علت زمان بر بودن روش‌های دقیق در حل این نوع مسأله، از روش‌های ابتکاری و فرا ابتکاری استفاده شده است. در روش‌های ابتکاری به دو شیوه با مسأله برخورد می‌شود:

۱) مسأله را به دو بخش مجزا تفکیک کرده، هر بخش را جداگانه بهینه‌سازی نموده و از ترکیب مسیرهای به دست آمده یک جواب امکان‌پذیر تولید می‌شود. به طور مثال هووانگ ۲۰۰۲ برای یافتن محل مراکز واسط در یک مسأله زنجیره تأمین کالا ابتدا با تعیین حداقلی برای سطح سرویس‌دهی به مشتریان این محل‌ها را تعیین کرده و سپس جریان کالا را، در شبکه مشخص شده، بهینه کرده است[۲٤]. این روش جواب‌هایی تولید می‌کند که هزینه‌های بیشتری نسبت به هزینه‌های بهینه دارند و علت این امر نیز یکپارچه نبودن بهینه‌سازی است.

۲) جواب‌های امکان‌پذیر اولیه‌ای تولید شده و با روش‌هایی از قبیل جستجوی محلی، بهبود شاخه زنی در روش شاخه و کرانه(Branch and Bound-B&B) و نظایر اینها بهبود داده می‌شوند [۲۲،۲٦]. اشکال عمده این روش‌ها تولید هزینه‌های ببیشتر نسبت به هزینه‌های بهینه است.

در خصوص روش‌های فرا ابتکاری،از دو دهه قبل Tabu Search برای حل مسأله MIP مورد امتحان قرار گرفته است[۲۷]. از آن زمان تا کنون تلاش‌هایی برای بکارگیری روشهای فرا ابتکاری در حل مسأله MIP صورت گرفته است [۲۸،۲۹]. اما این تلاش‌ها تا کنون موفقیت زیادی نداشته‌اند تا آنجا که جایگاه توسعه TS در حل مسائل MIP را با شروع استفاده از روش شاخه و کرانه در ٤۰ سال قبل قیاس می‌کنند [۲۸].

به طور خلاصه می‌توان از مرور ادبیات چنین نتیجه گرفت که شبکه VRP متصل به MTP در ادبیات، یک شبکه بکر است که مدل کردن و ارائه روشی برای حل آن می‌تواند بدیل محسوب شود. این شبکه به همراه مدل و روشی برای حل آن در ادامه این مقاله ارایه شده است.

۳. یک مدل ترکیبی از VRP وMTP

یک شبکه مرکب را روی یک گراف G=(V,E) با گوشه‌های متعلق به مجموعه V={1,2,…,n+kk} فرض کنید که در آن دپو گره ۱ است و سایر گره‌ها مشتریان و یا مصرف کننده‌ها هستند. در ضمن گره‌های ۲ تا n مراکز واسط هستند که سرویس‌دهی به وسائل نقلیه‌ای که از دپو (گره ۱) می‌آیند را بر عهده دارند. سایر پارامترها در جدول شماره ۱ تعریف شده‌اند.

جدول ۱. پارامترهای مدل ترکیبی از VRP وMTP

پارامتر	تعریف پارامتر
n	تعداد گره‌ها در زیرشبکهVRP
n+kk	تعداد گره‌ها در زیرشبکهMTP
C^k_{ij}	هزینه حمل‌ونقل برای طی کردن یال $E \in (i,j)$ است که غیر منفی است
T^i_{kq}	هزینه انتقال واحد کالا از وسیله نوع k به نوع q در گره j به صورت یک عدد غیر منفی است
d_j	تقاضا (مصرف) گره j که یک مقدار عدد صحیح است $j \in V-\{1\}$
m	تعداد وسیله نقلیه در زیر شبکه VRP است
Q_k	ظرفیت هر وسیله در زیر شبکه VRP است $Z^+ \in Q_k$
kv	تعداد انواع وسیله نقلیه در زیر شبکه MTP است که روی گره های V-{1} فعال هستند

به علاوه، سایر فرضیات عبارتند از:

هر وسیله در زیر شبکه VRP باید سفر خود را از دپو شروع کرده و به آن نیز ختم نماید.

کل کالای خارج شده از دپو باید برابر کل تقاضای موجود باشد.

تعداد نامحدودی از هر نوع وسیله در هر گره قابل استفاده‌اند.

هدف کمینه کردن کل هزینه‌های حمل‌ونقل کالا و انتقال کالا بین وسائل حمل‌ونقل است

در ذیل یک مدل خطی شامل دو نوع متغیر پیوسته و گسسته (۱-۰) برای مسأله شبکه مرکب و یکپارچه ارایه شده است. در این مدل از متغیرهای زیر استفاده می‌شود:

X^k_{ij} یک متغییر صفر و یک است. این متغییر چنانچه وسیله k یال (i,j) را طی کند برابر یک می‌شود و در غیر این صورت صفر خواهد بود.

$$\{(i,j,k) \mid i,j = 1,2,...,n; \quad \& \quad k \le m\}$$

W^k_{ij} عبارت است از مقدار کالائی که توسط وسیله نقلیه k در یال(i,j) جریان می‌یابد.

$$\{(i,j,k) \mid i,j = 1,2,...,n; \ \& \ k \le m\}$$

Z^k_j عبارت از مقداری از تقاضای گره j، $j \in V - \{1\}$ که توسط وسیله k تأمین می‌شود.

Y^j_{kq} عبارت از مقدار کالای منتقل شده در گره j، $j \in V - \{1\}$ از وسیله k به وسیله q است.

X^k_{ij} عبارت از مقدار کالایی است که توسط وسیله نقلیه k بین گره‌های (i,j) منتقل می‌شود.

$$\{(i,j,k) \mid i,j = 2,...,n; \quad \& \quad k > m\}$$

با توجه به تعاریف فوق، مسأله ترکیبی را می‌توان به صورت زیر فرموله کرد (مدل P1).

$$MIN \quad Z = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1,\, i\#j}^{n} \sum_{k=1}^{m} C^k_{ij} X^k_{ij} + \sum_{i=2}^{n+kk} \sum_{j=2,\, i\#j}^{n+kk} \sum_{k=m+1}^{m+kv} C^k_{ij} X^k_{ij} + \sum_{j=2}^{n} \sum_{k=1}^{m+kv} \sum_{q=1,\, k\#q}^{m+kv} T^j_{kq} Y^j_{kq}$$
$$+ \sum_{j=n+1}^{n+kk} \sum_{k=m+1}^{m+kv} \sum_{q=m+1,\, k\#q}^{m+kv} T^j_{kq} Y^j_{kq}$$

$$\sum_{i=1,\, i\#j}^{n} W^k_{ij} + \sum_{q=1,\, q\#k}^{m+kv} Y^j_{qk} = Z^k_j + \sum_{i=2,\, i\#j}^{n} W^k_{ji} + \sum_{q=1,\, q\#k}^{m+kv} Y^j_{kq} \quad , j = 2,3,...,n; \quad k = 1,2,...,m \qquad (۱)$$

$$\sum_{i=2,\, i\#j}^{n+kk} X^k_{ij} + \sum_{q=1,\, q\#k}^{m+kv} Y^j_{qk} = Z^k_j + \sum_{i=2,\, i\#j}^{n+kk} X^k_{ji} + \sum_{q=1,\, q\#k}^{m+kv} Y^j_{kq} \quad , j = 2,3,...,n; \quad k = m+1, m+2, ..., m+kv \qquad (۲)$$

$$\sum_{i=2,\, i\#j}^{n+kk} X^k_{ij} + \sum_{q=m+1,\, q\#k}^{m+kv} Y^j_{qk} = Z^k_j + \sum_{i=2,\, i\#j}^{n+kk} X^k_{ji} + \sum_{q=1,\, q\#k}^{m+kv} Y^j_{kq} \quad , j = n+1,...,n+kk; \ k = m+1, m+2, ..., m+kv \qquad (۳)$$

$$\sum_{i=1,\, i\#j}^{n} X^k_{ij} = \sum_{i=1,\, i\#j}^{n} X^k_{ji} \quad , j = 1,2,...,n; \ k = 1,2,...,m \qquad (٤)$$

$$\sum_{k=1}^{m+kv} Z^k_j = d_j \quad , j = 2,...,n \qquad (٥)$$

$$\sum_{k=m+1}^{m+kv} Z^k_j = d_j \quad , j = n+1, n+2, ..., n+kk \qquad (٦)$$

$$\sum_{j=2}^{n} Z^k_j + \sum_{j=1}^{n} \sum_{q=1}^{m+kv} Y^j_{kq} \le Q_k \quad , k = 1,2,...,m \qquad (٧)$$

$$W^k_{ij} \le M \, X^k_{ij} \quad , i,j = 1,2,...,n; \quad k = 1,2,...,m \qquad (٨)$$

$$X^k_{ij} = 0,1; \quad W^k_{ij} \ge 0 \quad , M \in R^+; \ i,j = 1,2,...,n; \ k = 1,2,...,m \qquad (٩)$$

$$X^k_{ij} \ge 0, \quad i,j = 2,...,n+kk; \quad k = m+1, m+2, ..., m+kv \qquad (١٠)$$

$$Y^j_{kq} \ge 0, \quad i,j = 2,...,n+kk; \quad k,q = 1,2,...,m+kv \qquad (١١)$$

در این مدل تابع هدف حاصل جمع هزینه‌های حمل‌ونقل کالا و انتقال کالا بین وسایل نقلیه است. محدودیت‌های (۱)-(۳) معادلات تعادل برای هر نوع وسیله در هر گره هستند. محدودیت (٤) معادلات تعادل برای تعداد وسائل نقلیه فعال در زیر شبکه VRP است. معادلات (٥)-(٦) ارضاء تقاضاهای موجود در گره‌ها را تضمین می‌کنند. محدودیت‌های(۷) ظرفیت وسایل موجود در زیر شبکه VRP را در نظر می‌گیرند. محدودیت‌های (۸)-(۹) تواماً تضمین‌کننده آنند که فقط درصورتی که یالی بین دو گره انتخاب شده باشد، جریان مواد در داخل آن جاری شود.

از مدل P1 می‌توان هریک از دو مسأله VRP , MTP را استخراج کرد. برای مثال، برای رسیدن به مدل VRP از مدل P1 ، می‌توان مراحل زیر را انجام داد:

۱) حذف عبارتهای ۲و۳و٤ از تابع هدف.

۲) حذف عبارت‌های $\sum_{q=1\ q\#k}^{m+kv} Y_{kq}^{j}$ و $\sum_{q=1,q\#k}^{m+kv} Y_{qk}^{j}$ از محدودیت‌های سری ۱ مدل.

۳) حذف کامل محدودیت‌های سری ۲ و۳ از مدل.

٤. روش‌های حل مسأله

مدل یکپارچه توسعه یافته در بخش قبل برای شبکه‌های تا ۸ گره‌ای با استفاده از روش شاخه و کرانه (انشعاب و تحدید) قابل حل است. اما اگر تعداد گره‌های شبکه بیشتر از ۸ شود زمان حل افزایش می‌یابد تا جایی که در زمان قابل قبول نمی‌توان مسأله را حل کرد. بنابراین در این مقاله روش جدیدی برای حل آن توسعه داده شده که در ذیل تشریح می‌شود. در این روش در مدل P_1 تغییراتی داده شده و از متغیرهای جدیدی استفاده شده است.

٤-۱ روش ابتکاری حل مسأله

در این بخش، ابتدا تغییر متغییر زیر را می‌دهیم:

$X^{k}_{ij} = \forall V^{k}_{ij}$ و $\{(i,j,k) \mid i,j = 1,2,...,n \ \ \& \ \ k \le m\}$

آنگاه مدل P_1 با متغیرهای جدید، بازنویسی شده و به علاوه محدودیت‌های سری (۸)-(۹) نیز به شکل جدیدی نوشته و مسأله مجدداً فرموله می‌شود (مدل P_2).

$$MAX \quad Z1 = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1,i\#j}^{n}\sum_{k=1}^{m} C_{ij}^{k} V_{ij}^{k} - \sum_{i=2}^{n+kk}\sum_{j=2,i\#j}^{n+kk}\sum_{k=m+1}^{m+kv} C_{ij}^{k} X_{ij}^{k} - \sum_{j=2}^{n}\sum_{k=1}^{m+kv}\sum_{q=1,k\#q}^{m+kv} T_{kq}^{j} Y_{kq}^{j}$$
$$- \sum_{j=n+1}^{n+kk}\sum_{k=m+1}^{m+kv}\sum_{q=m+1,k\#q}^{m+kv} T_{kq}^{j} Y_{kq}^{j}$$

$$\sum_{i=1,i\#j}^{n} W_{ij}^{k} + \sum_{q=1,q\#k}^{m+kv} Y_{qk}^{j} = Z_{j}^{k} + \sum_{i=2,i\#j}^{n} W_{ji}^{k} + \sum_{q=1\ q\#k}^{m+kv} Y_{kq}^{j} \quad , j = 2,3,...,n; \quad k = 1,2,...,m \qquad (۱)$$

$$\sum_{i=2,i\#j}^{n+kk} X_{ij}^{k} + \sum_{q=1\ q\#k}^{m+kv} Y_{qk}^{j} = Z_{j}^{k} + \sum_{i=2,i\#j}^{n+kk} X_{ji}^{k} + \sum_{q=1\ q\#k}^{m+kv} Y_{kq}^{j} \quad , j = 2,3,...,n; \quad k = m+1, m+2,..., m+kv \qquad (۲)$$

$$\sum_{i=2,i\#j}^{n+kk} X_{ij}^{k} + \sum_{q=m+1,q\#k}^{m+kv} Y_{qk}^{j} = Z_{j}^{k} + \sum_{i=2,i\#j}^{n+kk} X_{ji}^{k} + \sum_{q=1,q\#k}^{m+kv} Y_{kq}^{j} \quad , j = n+1,...,n+kk; \ k = m+1, m+2,..., m+kv \qquad (۳)$$

$$\sum_{i=1,i\#j}^{n} V_{ij}^{k} = \sum_{i=1,i\#j}^{n} V_{ji}^{k} \quad , j = 1,2,...,n; \ k = 1,2,...,m \qquad (٤)$$

$$\sum_{k=1}^{m+kv} Z_{j}^{k} = d_{j} \quad , j = 2,...,n \qquad (٥)$$

$$\sum_{k=m+1}^{m+kv} Z_{j}^{k} = d_{j} \quad , j = n+1, n+2,..., n+kk \qquad (٦)$$

$$\sum_{j=2}^{n} Z_{j}^{k} + \sum_{j=1}^{n}\sum_{q=1}^{m+kv} Y_{kq}^{j} \le Q_{k} \quad , k = 1,2,..., m \qquad (۷)$$

$$W_{ij}^{k} V_{ij}^{k} = 0 \quad , i,j = 1,2,...,n; \ i\#j; \ k = 1,2,...,m \qquad (۸)$$

$$V_{ij}^{k} \le 1; \quad W_{ij}^{k} \ge 0 \quad i,j = 1,2,...,n; \ k = 1,2,...,m \qquad (۹)$$

$$X_{ij}^{k} \ge 0, \quad i,j = 2,..., n+kk; \ k = m+1, m+2,..., m+kv \qquad (۱۰)$$

$$Y_{kq}^{j} \ge 0, \quad i,j = 2,..., n+kk; \ k,q = 1,2,..., m+kv \qquad (۱۱)$$

در مدل P_2 محدودیت های (۸)-(۹) همراه با تابع هدف، تضمین‌کننده آن است که اگر جریان کالا بخواهد در یالی جریان یابد، بایستی آن یال با مقدار X=1 قبلاً انتخاب شده باشد. به علاوه این سری از معادلات تضمین‌کننده آن است که V_{ij}^k حتماً مقادیر ۰-۱ را بپذیرند.

اعتبارسنجی مدل P_2

برای اعتبارسنجی مدل نحوه کارکرد مورد انتظار آن تشریح شده و چگونگی تأثیر تابع هدف و محدودیت‌ها در تضمین این کارکرد تشریح و یا اثبات ریاضی می‌شوند که در ذیل آمده‌اند.

• نحوه کارکرد مورد انتظار مدل

معادلات سری (۸) و (۹) به طور توأم با معادله صفر (تابع هدف) تضمین کننده این است که اگر جریان کالا بخواهد در کمانی جریان یابد، بایستی آن کمان با مقدار یک انتخاب شود. به علاوه همین سری معادلات تضمین کننده این است که V_{ij}^v حتماً مقادیر ۰ یا ۱ را انتخاب کنند.

• اثبات ریاضی چگونگی تأثیر تابع هدف و محدودیت‌ها در تضمین کارکرد مدل

برای اثبات اینکه مدل، جوابی مطابق شرایط VRP می‌دهد لازم است اثبات کنیم که محدودیت شماره (۱) آن اجازه تشکیل زیر تور را نمی‌دهد. به این منظور برهان زیر ارایه می‌شود:

ابتدا محدودیت ۱ از مدل را در نظر بگیرید.

(۱)

$$\sum_{i=0}^{n} W_{ij}^v - \sum_{i=1}^{n} W_{ji}^v = Y_j^v \qquad \forall j > 0, \forall v$$

با وجود محدودیت فوق، فرض کنید زیر توری به شکل زیر تشکیل شده است که شامل دپو نیست:

$\{i_1, i_2, \ldots, i_r, i_1\}$

اگر مقدار f را به $W_{i_1 i_2}^v$ تخصیص دهیم آنگاه از محدودیت (۱) داریم:

$$W_{i_2 i_3}^v = f - Y_{i_2}^v$$
$$W_{i_3 i_4}^v = f - (Y_{i_2}^v + Y_{i_3}^v)$$
$$W_{i_4 i_5}^v = f - (Y_{i_2}^v + Y_{i_3}^v + Y_{i_4}^v)$$
$$\vdots$$
$$W_{i_r i_1}^v = f - (Y_{i_2}^v + Y_{i_3}^v + \ldots + Y_{i_r}^v)$$

و برای مثلاً گره i_1 در محدودیت (۱) داریم:

$$f - (Y_{i_2}^v + Y_{i_3}^v + \ldots + Y_{i_r}^v) - f = Y_{i_1}^v$$

که نتیجه می‌دهد:

$$-(Y_{i_2}^v + Y_{i_3}^v + \ldots + Y_{i_r}^v) = Y_{i_1}^v$$

که الزام می‌کند یکی از دو مورد زیر را:

(۱) یا $Y_{i_2}^v = Y_{i_3}^v = \ldots Y_{i_r}^v = 0$ که در این صورت زیر توری تشکیل نشده است.

(۲) یا $Y_{i_1}^v < 0$ که امکان ندارد و برطبق محدودیت‌های سری ۱۱ مجاز نیست.

بنابراین هیچ زیر توری که شامل دپو نباشد نمی‌تواند تشکیل شود و قضیه اثبات است.

افزون بر این لازم است اثبات کنیم که محدودیت‌های شماره (۸) و (۹) آن تواما" باینری تولید می‌کنند و اجازه نمی‌دهند که V_{ij}^kعددی بین صفر و یک بگیرد. به این منظور برهان زیر ارایه می‌شود:

اول آن که، مدل بدون محدودیت‌های سری (۸) آن مشابه یک مدل جریان در شبکه است که در صورتی که تقاضاها عدد صحیح باشند، الزاماً دارای جواب صحیح است[۳۰]. دوم آن که، در صورت حل این مدل (بدون محدودیت‌های سری (۸)) با روش سیمپلکس، چون ضریب ۱ از هر سطر با سایر سطرها جمع شده و یا از آنها کسر می‌گردد، بنابراین ضرایب سمت راست همواره اعداد صحیح خواهند بود. به علاوه، محدودیت‌های سری (۹) جلوگیری می‌کنند از اینکه V_{ij}^kها بزرگ‌تر از ۱ شوند و از طرف دیگر، محدودیت‌های غیر منفی بودن V_{ij}^kها از کمتر از ۰ شدن آنها جلوگیری خواهند کرد. پس V_{ij}^kها فقط می‌توانند مقادیر ۰ یا ۱ را بگیرند. در نهایت، با اضافه شدن محدودیت‌های سری (۸) این شرایط هیچ گونه تغییری نخواهند کرد، زیرا از رابطه $W_{ij}^k \times V_{ij}^k = 0$ این گونه برداشت می‌شود که یا V_{ij}^k باید ۰ یا یک عدد مثبت باشد. از طرف دیگر، آز آن جهت که تابع هدف به صورت MAX است، خود به خود دنبال تخصیص بیشترین مقدار ممکن به V_{ij}^k است که در محدودیت‌های مدل صدق کند و این مقدار عدد۱ خواهد بود (زیرا فقط محدودیت‌های سری (٤) شامل V_{ij}^kها هستند و آنها هم با بزرگ شدن V_{ij}^k ها مغایرتی ندارند و فقط مسئول برقراری تعادل بین آن‌ها هستند و نه مسئول کنترل بزرگی V_{ij}^kها). در نتیجه مقدار تخصیصی به

V_{ij}^k همواره یکی‌از دو عدد ۰ یا ۱ خواهد بود و قضیه اثبات است.

در این حال، حل مدل P_2 با استفاده از روش سیمپلکس (البته با تغییراتی) امکان‌پذیر می‌شود. تنها محدودیتی که به الگوریتم سیمپلکس افزوده می‌شود محدودیت‌های سری (۸) خواهد بود. خوشبختانه اعمال این محدودیت به صورت غیر مستقیم به الگوریتم سیمپلکس امکان‌پذیر است، به این شکل که اجازه داده نشود که هر دو متغیر W^k_{ij} و V^k_{ij} با هم وارد پایه شوند. افزون بر این برای کوچک شدن حجم مدل و کم کردن از تعداد محدودیت‌های آن، می‌توان محدودیت‌های سری (۹) را از مدل حذف و از روش سیمپلکس حد فوقانی (Upper Bound Simplex Method) استفاده کرد. با اعمال این محدودیت‌ها و با شروع از یک نقطه ابتدایی، الگوریتم در فضای جواب از گوشه‌ای به گوشه‌ای دیگر حرکت کرده و جواب را بهبود می‌دهد.

برای تولید یک حد **اولیه از** تابع هدف، که بتوان با آن جواب‌های به دست آمده توسط روش SB-RAB را مقایسه کرد، از ادبیات مسائل مشابه، که در مقدمه آمده، روش ابتکاری دو بخشی کردن انتخاب و استفاده شده است. این روش به دلیل سرعتش در تولید جواب و نیز سادگی آن در حل مسأله انتخاب شده است. به علاوه، سایر روش‌های ابتکاری و فرا ابتکاری در حل این مسأله، به این دلیل که هنوز تست نشده‌اند، از نظر ما ارجحیتی بر روش دوبخشی کردن ندارند. این روش در ذیل تشریح شده است.

٤-۲ روش تفکیک (دو بخشی کردن)

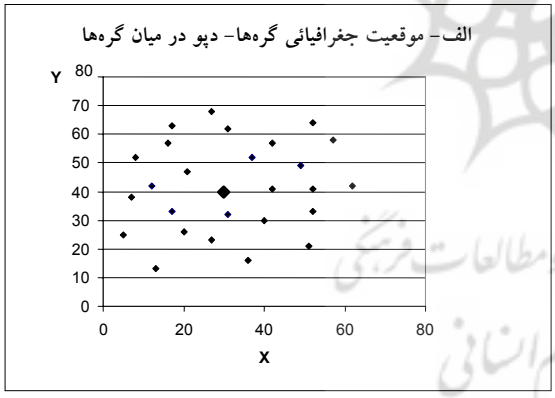
در اینجا مسأله مرکب، به دو مسأله VRP , MTP به این صورت شکسته می‌شود که در زیر شبکه MTP،دپو به وسیله یال‌هایی با هزینه صفر به گره‌های واسط وصل شده و در نتیجه مسأله تبدیل به حل یک شبکه MTP می‌شود. آنگاه این مسأله با الگوریتم سیمپلکس حل شده و مسیرهای بهینه در زیر شبکه MTP تعیین می‌شوند. به‌علاوه، مقادیر کالای عبوری از هر گره واسط به عنوان تقاضای آن گره در نظر گرفته می‌شود که بایستی در زیر شبکه VRP از طریق دپو تأمین شوند. در ادامه، با حل مسأله VRP به‌وجود آمده، بهترین مسیرها در زیر شبکه VRP تعیین می‌شود. به این ترتیب دو بهینه‌سازی تقریباً مجزا انجام می‌شود که حاصل جمع هزینه‌های هر دو، به‌عنوان هزینه کل در نظر گرفته می‌شود.

۵. نتایج محاسبات کامپیوتری

عملکرد روش SB-RAB را می‌توان با حل یکسری از مسائل مبنا ارزیابی کرد. این بخش شامل نتایج محاسبات کامپیوتری است که برای این ارزیابی انجام شده‌اند. این روش با نرم افزار Matlab7 روی PC با مشخصات (Pentium 4, 256 MB RAM, CPU 2.4 GHz) برنامه‌نویسی و اجرا شده است. برای اجراء این روش دو سری مسأله مبنا تولید شده که در ذیل روش تولید آنها تشریح شده است.

۵-۱ روش تولید مسائل مبنا

برای تولید مسائل مبنا، از مسأله شماره ۱ موجود در سری مسائل مبنای موجود در[۳۱] استفاده شده است. در این مسأله تعداد ۵۰ گره وجود دارد که موقعیت جغرافیایی دپو در میان آنهاست (شکل الف- ۲). در این مقاله، یک بار از این مسأله برای تست روش SB-RAB استفاده شده و بار دیگر، برای نزدیک‌تر کردن توزیع جغرافیایی محل گره‌ها به شرایط حمل‌ونقل دریائی در جنوب ایران، با انتقال دپو به خارج از محل تمرکز گره‌ها، مسأله جدیدی تولید شده است (شکل ب- ۲).



شکل ۲. موقعیت گره‌ها و دپو در هر سری از مسائل

در تولید هزینه‌ها نیز از روش زیر استفاده شده است:

- هزینه حمل‌ونقل در شبکه برابر فواصل هندسی گره‌ها از یکدیگر در نظر گرفته شده است.
- واحد هزینه انتقال کالا از وسیله k به وسیله q در گره j برابر kqj^2 در نظر گرفته شده است.

با استفاده از پراکندگی گره‌های نشان داده شده در شکل ۲ و هزینه‌های فوق یکسری از مسائل مبنا برای تعداد گره‌های ۳ تا ۲۵ ($3<n<25$) تولید شده‌اند. سپس، این مسائل با سه روش شاخه و کرانه (Branch & Bound)، SB-RAB و روش تفکیک حل شده‌اند. در این مسائل، دو نوع وسیله نقلیه در شبکه VRP ($m=2$) هر کدام به تعداد نامحدود در نظر گرفته شده‌اند. نتایج حاصله از راه‌حل‌ها در جداول شماره ۳ و ۲ آورده شده‌اند.

این دامنه از گره‌ها تعمداً انتخاب شده‌اند چرا که در مسأله حمل‌ونقل دریائی جنوب ایران تعداد معدودی بندر (کمتر از ۱۵ بندر) در منطقه موجود هستند که باید در این مدل قرار گیرند و عملاً نیازی به کار با گره‌های بیشتر نیست.

در جداول ۳ و ۲ توابع هدف، متناسب با جمع میزان هزینه مسیرهایی هستند که انتخاب نشده‌اند. بنابراین حداکثر کردن این توابع مطلوب خواهد بود. به علاوه، در هر دو جدول ستون مربوط به روش تفکیک، مقدار این توابع هدف را، وقتی که از روش تفکیک به دست آمده باشند، نشان می‌دهد. این ستون به عنوان مبنا برای مقایسه نتایج حاصله از روش SB-RAB مورد استفاده قرار گرفته است. در حقیقت مقادیر این ستون حد اولیه‌ای برای مقایسه توابع هدف هستند.

جدول ۲. نتایج حاصله با داده‌های شکل ۲-الف

پارامتر های اولیه (جدول۱)					روش SB-RAB		روش انشعاب و تحدید		روش تفکیک
n	**kk**	**m**	**kv**	**Q_K**	**Zbest**	**Comp. Time (Sec)**	**Zbest**	**Comp. Time (Sec)**	**Zbest**
3	2	2	2	45	-1197.3	1	-1197.3	1	-1197.3
4	2	2	2	45	-1310.626	6	-1310.626	2	-1310.626
5	2	2	2	50	-819.9183	14	-809.4695	3	-1241.49
6	2	2	2	60	-289.5914	25	-287.4565	19	-789.268
6	2	2	2	60	-298.4594	25	N.A.	N.A.	N.A.
7	2	2	2	70	106.9186	60	132.7838	36	-371.22
7	2	2	2	70	133.4486	60	N.A.	N.A.	N.A.
7	2	2	2	70	127.9678	60	N.A.	N.A.	N.A.
8	2	2	2	80	1346.3	122	1352.193	573	944.189
9	2	2	2	90	2461.6	304	2455.05	15266	2226.49
9	2	2	2	90	2445.8	124	N.A.	N.A.	N.A.
10	2	2	2	100	3396.9	243	N.A.	N.A.	3127.353
10	2	2	2	100	3364.3	185	N.A.	N.A.	N.A.
11	2	2	2	110	3659.4	265	N.A.	N.A.	3106.737
12	2	2	2	120	3126.8	305	N.A.	N.A.	2533.692
13	2	2	2	130	4241.6	676	N.A.	N.A.	3803.2
14	2	2	2	140	7104.6	805	N.A.	N.A.	7133.13
15	2	2	2	150	12241	905	N.A.	N.A.	10316.94
20	2	2	2	220	18045.3	8435	N.A.	N.A.	17578.13
25	2	2	2	250	32721.1	13245	N.A.	N.A.	31168.39

N.A. یعنی مقدار مربوطه در دسترس نبوده است.

جدول ۳ . نتایج حاصله با داده‌های شکل ۲- ب

پارامتر های اولیه (جدول۱)					روش SB-RAB		روش انشعاب و تحدید		روش تفکیک
n	kk	m	kv	Q_K	Zbest	Comp. Time(Sec.)	Zbest	Comp. Time(Sec.)	Zbest
3	2	2	2	45	-900.5725	1	-900.573	1	-1029.67
4	2	2	2	45	-716.0407	6	-714.31	2	-883.84
5	2	2	2	50	-109.4126	14	0.844	3	-431.05
6	2	2	2	60	764.3	25	766.915	19	358.91
7	2	2	2	70	1434.8	60	1487.732	123	983.27
8	2	2	2	80	2783.6	122	N.A.	N.A.	2603.41
9	2	2	2	90	3564.4	304	N.A.	N.A.	4207.77
10	2	2	2	100	3396.9	243	N.A.	N.A.	5327.86
11	2	2	2	110	5659.4	265	N.A.	N.A.	5426.92
12	2	2	2	120	5126.8	305	N.A.	N.A.	4686.26
13	2	2	2	130	7241.6	676	N.A.	N.A.	6552.59
14	2	2	2	140	11104.6	805	N.A.	N.A.	10147.95
15	2	2	2	150	13241	950	N.A.	N.A.	12359.94
20	2	2	2	220	19045.3	9250	N.A.	N.A.	17640.33
25	2	2	2	250	31637.1	16250	N.A.	N.A.	31168.39
N.A. یعنی مقدار مربوطه در دسترس نبوده است.									

۵-۲ ارائه نتایج محاسبات

نتایج حاصله از حل‌ها نشان از آن دارند که روش انشعاب و تحدید فقط برای حل مسائل کوچک (حداکثر با ۸ گره) جواب بهینه را تولید می‌کند (بهترین جواب‌ها در بین هر سه روش درشت خط- Bold شده‌اند). اما زمان مورد نیاز این روش به صورت نمایی رشد می‌کند تا جایی که برای مسأله‌ای با بیش از ۸ گره، زمان حل مسأله در عمل بی‌نهایت زیاد می‌شود. در مقایسه، زمان مورد نیاز در روش SB-RAB حداکثر به صورت حداکثر توان دوم از تعداد گره‌ها افزایش یافته است. به علاوه اینکه روش SB-RAB قادر به یافتن جواب برای مسائلی با تعداد گره بیشتر از ۸ و با صرف زمانی کمتر از ۵ ساعت است. این نتایج برای هر دو سری از داده‌ها (جداول ۳و۲) مشابهند و بنابر این می‌توان امیدوار بود که به سایر مسائل (با ویژگی‌های مشابه) نیز قابل تسری باشند.

٦. خلاصه و نتیجه‌گیری

در این مقاله ابتدا برای فعال کردن بنادر و ناوگان کشتی‌های کوچک ایران در منطقه خلیج فارس و دریای عمان، این ایده مطرح شد که از بنادر بزرگ واقع در منطقه به عنوان مراکز واسط برای دریافت کالا از کشتی‌های بزرگ و ارسال کالا توسط کشتی‌های کوچک‌تر به سایر بنادر استفاده شود. سپس برای پشتیبانی این ایده، یک سیستم کلی حمل‌ونقل متناسب با آن طرح و مدل شد. این سیستم به صورت یک شبکه یکپارچه اتصال مسیرهای وسائل نقلیه (Vehicle Routing) به مسیرهای حمل‌ونقل چند وجهی (Multimodal Transportation) طرح و مدل شد. آنگاه برای حل مدل این سیستم، روشی ابتکاری به نام SB-RAB توسعه داده شد که بر اساس قاعده سیمپلکس با ورود محدود عمل می‌کند و از گوشه‌ای به گوشه‌ای دیگر حرکت می‌نماید. به این ترتیب پس از مدتی جستجو در میان گوشه‌ها،

بهترین جوابی کـه یافتـه اسـت را گـزارش مـی‌کنـد. در نهایـت، عملکرد روش SB-RAB در حل دو سری از مسائل مبنـا تـست شد و نتایج محاسبات رایانه‌ای آن ارایه گردید. ایـن نتـایج نـشان می‌دهند که روش ابتکاری SB-RAB امکـان حـل و رسـیدن بـه جواب‌های قابل قبول برای مـسائل یکپارچـه متـشکل از VRP و MTP با بزرگی ۲۵ گره در مدت زمانی کمتر از ۵ ساعت را دارد و از این جهت نسبت به الگوریتم‌های موجود کارآتر است.

در انتها، برای ادامه تحقیقات، با توجه به این که در ایـن پـژوهش مسأله جدیدی طرح شد که امکان بهبود راه‌های حل و نیز توسعه آن وجود دارد، پیشنهاد می‌شود هر دو جنبـه مـورد تحقیـق قـرار گیرند. به طـور مثـال در حـل مـسأله ممکـن اسـت از الگـوریتم سیمپلکس شبکه (به جای سیمپلکس معمولی) استفاده شود که به علت شکل مسأله، قابل استفاده بـوده و سـرعت حـل را افـزایش خواهد داد و یا اینکه از الگوریتم‌های فـرا ابتکـاری، کـه در حـل مسائل VRP با موفقیت بکـار بـرده شـده‌انـد[۱۳] بهـره گرفـت. به علاوه امکان توسعه مسأله بـا ایجـاد تغییـرات در فرضـیات آن وجود دارد. مثلاً با در نظر گرفتن امکان احداث مراکـز واسـط بـا صرف هزینه، و یا در نظر گرفتن بیش از یک دپو، مـسأله توسـعه داده شده و می‌تواند مورد تحقیق قرار گیرد.

۷. مراجع

1. Bomba M. S. (2001) "Planning for mega containerships – statewide transportation planning approach", Transportation Research Record (1777), pp. 129-137.

2. Dantzig, G. and Ramser, J. (1959) "The truck dispatching problem", Management Science, V. 6, pp. 80-91.

3. Gary, M., and Johnson, D. (1979) "Computers and intractability: A guide to the theory of NP completeness", Freeman, San Francisco.

4. Lenstra, J. and Rinooy, Kan A. (1981) "Complexity of vehicle routing and scheduling problems", Networks, V. 11, N.2, PP. 221-227.

5. Yano, C. and McGetting, D. (1987) "Vehicle routing at quality stores", Interfaces, V. 17, N. 2, pp. 52-63.

6. Laporte, G. and Dejax, J. (1989) "Dynamic location-routing problem", Journal of Operation Research Society, V 40, No. 5, pp.471-482.

7. Laporte, G. and Nobert, Y. (1987) "Exact algorithms for the VRP", Annals of Discrete Mathematics, 31, pp. 147-184.

8. Archetti, C. and Speranza, M.G. (2006) "A Tabu search algorithm for the split delivery VRP", Transportation Science, Vol. 40, No. 1, pp. 64-73.

9. Feillet, D., Dejax, P. and Gendreav, M. (2001) "Traveling salesman problem with profits", http://www.univie.ac.at/bwl/prod/STUDY/ptsp.pdf.

10. Grünert, Tore, Sebastian, Hans-Jürgen and Thärigen, Michael (1999) "The design of a letter-mail transportation network by intelligent techniques", Proceedings of the 32nd Hawaii International Conference on System Sciences – 1999.

11. Liu, Kai, (2005) "A study on the split delivery vehicle routing problem", PhD, Department of Industrial Engineering, Mississippi State, Mississippi, USA, December.

12. Oppen, Johan and Arne, Løkketangen (2006) "Arc routing in a node routing environment", Computers & Operations Research, Volume 33, Issue 4, April, pp. 1033-1055.

13. Toth, P. and Vigo, D. [Editors] (2002) "The vehicle routing problem", Siam Monographs on Discrete Mathematics and Applications, Philadelphia, USA.

14. Crainic, G. and Laporte, G, (1997) "Planning models for freight transportation", European Journal of Operational Research, pp.409-438.

15. Eatough, C. (1998) "A methodology for statewide intermodal freight transportation planning", http://www.virginiadot.org/vtrc/main/online_reports/pdf/99-r12.pdf.

16. Pederson, N (2005) "Multimodal transportation planning at the state level of the practice and future issues", http://www.gulliver.trb.org/publications/millennium /00076.pdf.

17. Macharis, C. and Bonetekoning, Y. (2004) "Opportunities for OR in intermodal freight transport research: A review", EU Journal of OR 153, pp. 400-416.

18. Bart, Jourquin and Limbourg, Sabine (2003) "Assignment techniques on virtual networks performance considerations on large multi-modal networks", European Regional Science Association, ERSA 2003 Congress – University of Jyväskylä – Finland.

19. Warsing, D., Souza, G. and Greis, N. (2001) "Determining the value of dedicated multimodal cargo facilities in a multi-region distribution network", EU Journal of OR 133, pp. 81-93.

20. Oduwole, O. (1995) "Multimodal transport network systems interface, interaction coordination: A specification for control systems integration", Mathematical Computer Modeling, V 22, N. 4-7, pp. 415-429.

21. Gedeon, C., Florian, M. and Crainic, T. (1993) "Determining origin destination matrices and optimal multiproduct flows for freight transportation over multimodal networks", Transportation Research B., V27B, N. 5., pp.351-368.

22. Bertacco, L., Fischettic, M. and Lodid, A. (2007) "A feasibility pump heuristic for general mixed-integer problems", Discrete Optimization, 4, pp. 63–76.

23. Pedroso, P. (2004) " Tabu search for mixed integer programming", Technical Report Series: DCC-2004-02, Universidade do Porto, Rua do Campo Alegre 823, Portugal.

24. Hwang, Heung-Suk (2002) "Design of supply-chain logistics system considering service level", Computers & Industrial Engineering, Volume 43, Issues 1-2 , 1 July, pp. 283-297.

25. Fischetti, M. and Andrea, Lodi (2006) "Repairing MIP infeasibility through local branching", Computers & Operations Research , DOI 10.1016/j.cor.2006.08.004.

26. Eckstein, J. and Mikhail, Nediak (2007) "Pivot, cut, and dive: a heuristic for 0-1 mixed integer Programming" J. Heuristics, DOI 10.1007/s10732-007-9021-7.

27. Glover, F. (1986) "Future paths for integer programming and links to artificial intelligence", Computers and Operations research, Vol. 13, No.5, pp. 533-549.

28. Glover, F. (2006) "Parametric tabu-search for mixed integer programs", Computers & Operations Research 33, pp.2449–2494.

29. Dkketangen, A. and Glover, Fred (1998) "Solving zero-one mixed integer programming problems using tabu search", European Journal of Operational Research 106 , pp. 624-658.

30. Hillier, F. and Lieberman, Gerald J. (1995) "Introduction to mathematical programming" McGraw-Hill Inc.,USA.

31. Gendreau, M., Hertz, A. and Laporte, G. (1994) "A tabu search heuristic for the vehicle routing problem", Management Science, Vol. 40, pp. 1276-1290.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی