@ORchannel

@ORchannel

عنوان

یک الگوریتم فراابتکاری برای حل مساله مکان‌یابی فازی پایانه اتوبوس‌رانی

@ORchannel

فهرست مطالب

فهرست جدول‌ها IV

فهرست شکل‌ها VI

فهرست الگوریتم‌ها VII

پیشگفتار VIII

۱ آشنایی با مساله‌ی مکان‌یابی پایانه‌ی اتوبوس‌رانی ۱

۱.۱ نگاهی به سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی ۱

۱.۱.۱ گرایش به حمل‌ونقل عمومی ۳

۲.۱.۱ سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی ۴

۳.۱.۱ سیستم‌های حمل‌ونقل اتوبوس‌رانی ۵

۲.۱ مفاهیم اولیه ۶

۱.۲.۱ مساله‌ی مکان‌یابی تسهیلات ۷

۲.۲.۱ مساله‌ی $p-$میانه ۸

۳.۲.۱ مساله‌ی پوشش ۱۰

۴.۲.۱ مساله‌ی مکان‌یابی پایانه‌ی اتوبوس‌رانی ۱۲

@ORchannel

۲ مدل پیشنهادی مساله‌ی مکان‌یابی پایانه‌ی اتوبوس‌رانی ۲۱

۱.۲ تعریف داده‌ها ۲۲

۲.۲ تعریف همسایگی‌ها ۲۲

۳.۲ تعریف متغیرها ۲۳

۴.۲ مدل برنامه‌ریزی عددصحیح پیشنهادی مساله ۲۳

۳ الگوریتم‌های جستجوی ممنوع و جستجوی همسایگی متغیر ۲۷

۱.۳ الگوریتم ابتکاری جستجوی محلی ۲۹

۲.۳ الگوریتم جستجوی ممنوع ۳۰

۳.۳ الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر ۳۵

۱.۳.۳ تعریف همسایگی ۳۶

۲.۳.۳ کاهش همسایگی متغیر ۳۷

۳.۳.۳ جستجوی همسایگی متغیر کاهش یافته ۳۷

۴.۳.۳ جستجوی همسایگی متغیر پایه و سراسری ۳۸

۴.۳ ترکیب VNS و TS ۴۳

۴ الگوریتم‌های پیشنهادی برای حلBTLP ۴۵

۱.۴ تعریف فضای جواب ۴۵

۲.۴ تعریف حرکت ۴۶

۳.۴ تعریف همسایگی ۴۶

۴.۴ جواب اولیه ۴۷

۵.۴ الگوریتم TS پیشنهادی برای حل BTLP ۴۹

۱.۵.۴ حافظه‌ی کوتاه مدت در الگوریتم TS پیشنهادی ۵۱

۲.۵.۴ معیار آرمان در الگوریتم TS پیشنهادی ۵۲

۶.۴ الگوریتم BVNS پیشنهادی برای حل BTLP ۵۳

@ORchannel

۵ مطالعه‌ی رفتار عددی الگوریتم‌های پیشنهادی ۵۷

۱.۵ پارامترهای الگوریتم TS پیشنهادی ۵۸

۲.۵ پارامترهای الگوریتم BVNS پیشنهادی ۵۹

۳.۵ نتایج عددی ۵۹

۴.۵ نتایج آزمون‌های آماری ۶۲

۶ الگوریتم پیشنهادی برای حل BTLP در حالت فازی ۶۴

۱.۶ اعداد فازی ۶۷

۲.۶ تابع رتبه‌بندی ۷۱

۳.۶ روش کر بهبود یافته ۷۲

۴.۶ الگوریتم BVNS پیشنهادی برای حل FBTLP ۷۴

۵.۶ نتایج عددی ۷۵

۶.۶ نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۷۸

مراجع ۸۰

واژه‌نامه فارسی به انگلیسی ۸۶

واژه‌نامه انگلیسی به فارسی ۹۳

نمایه ۹۸

@ORchannel

فهرست جدول‌ها

۱.۲ مختصات ایستگاه‌های شبکه ۲۵

۲.۲ مختصات پایانه‌های کاندید شبکه ۲۵

۱.۵ مقایسه میانگین جواب‌ها روی نمونه $(n = ۲۰۰۰ - m = ۱۰۰۰)$ ۶۱

۲.۵ مقایسه میانگین جواب‌ها روی نمونه $(n = ۱۵۰۰ - m = ۷۵۰)$ ۶۱

۳.۵ مقایسه میانگین جواب‌ها روی نمونه $(n = ۱۰۰۰ - m = ۵۰۰)$ ۶۱

۴.۵ مقایسه میانگین جواب‌ها روی نمونه $(n = ۷۰۰ - m = ۳۵۰)$ ۶۱

۵.۵ مقایسه میانگین جواب‌ها روی نمونه $(n = ۵۰۰ - m = ۲۵۰)$ ۶۱

۶.۵ مقایسه بهترین جواب‌ها روی نمونه $(n = ۲۰۰۰ - m = ۱۰۰۰)$ ۶۱

۷.۵ مقایسه بهترین جواب‌ها روی نمونه $(n = ۱۵۰۰ - m = ۷۵۰)$ ۶۲

۸.۵ مقایسه بهترین جواب‌ها روی نمونه $(n = ۱۰۰۰ - m = ۵۰۰)$ ۶۲

۹.۵ مقایسه بهترین جواب‌ها روی نمونه $(n = ۷۰۰ - m = ۳۵۰)$ ۶۲

۱۰.۵ مقایسه بهترین جواب‌ها روی نمونه $(n = ۵۰۰ - m = ۲۵۰)$ ۶۲

۱۱.۵ نتایج آزمون Mann–Whitney روی مقدار جواب‌های الگوریتم‌های TS و VNS پیشنهادی برای مجموعه داده‌های تصادفی ۶۳

۱۲.۵ نتایج آزمون Mann–Whitney روی زمان‌های اجرای الگوریتم‌های TS و VNS پیشنهادی برای مجموعه داده‌های تصادفی ۶۳

@ORchannel

۱.۶ نتایج روی نمونه $(n = ۲۰۰۰ - m = ۱۰۰۰)$ ۷۶
۲.۶ نتایج روی نمونه $(n = ۱۵۰۰ - m = ۷۵۰)$ ۷۶
۳.۶ نتایج روی نمونه $(n = ۱۰۰۰ - m = ۵۰۰)$ ۷۷
۴.۶ نتایج روی نمونه $(n = ۷۰۰ - m = ۳۵۰)$ ۷۷
۵.۶ نتایج روی نمونه $(n = ۵۰۰ - m = ۲۵۰)$ ۷۷

@ORchannel

فهرست شکل‌ها

۱.۲ شبکه اتوبوس‌رانی ۲۵

۱.۳ بررسی رفتار الگوریتم جستجوی ممنوع ۳۳

۲.۳ طرح الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر پایه ۴۰

۱.۶ عدد فازی مثلثی ۶۹

۲.۶ عدد فازی ذوزنقه‌ای ۷۰

@ORchannel

فهرست الگوریتم‌ها

۱ گام‌های الگوریتم بهترین بهبود ۳۰
۲ گام‌های الگوریتم اولین بهبود ۳۱
۳ گام‌های الگوریتم جستجوی ممنوع پایه ۳۴
۴ گام‌های الگوریتم کاهش همسایگی متغیر [۳۷] ۳۸
۵ گام‌های الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر کاهش یافته [۳۷] ۳۹
۶ گام‌های الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر پایه [۳۷] ۴۱
۷ گام‌های الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر سراسری [۳۷] ۴۲
۸ الگوریتم جستجوی محلی پیشنهادی ۵۴
۹ الگوریتم جستجوی ممنوع پیشنهادی برای حل BTLP ۵۵
۱۰ الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر پیشنهادی برای حل BTLP ۵۶

@ORchannel

پیشگفتار

جهت حل مشکلات ترافیکی و مسایل اقتصادی-اجتماعی و زیست محیطی ناشی از آن در شهرهای بزرگ، نیازمند یک سیستم حمل‌ونقل عمومی مجهز و کارآمد هستیم. از آن‌جایی که عمده‌ترین قسمت سیستم حمل‌ونقل عمومی در کشورهای در حال توسعه را شبکه‌ی اتوبوس‌رانی شهری تشکیل می‌دهد. بنابراین، طراحی بهینه‌ی شبکه‌ی اتوبوس‌رانی با هدف بهبود وضعیت حمل‌ونقل عمومی از اهمیت فراوانی برخوردار است. یکی از اصلی‌ترین گام‌ها در این طراحی، تعیین تعداد و مکان پایانه‌های اتوبوس‌رانی است. در این‌جا، توجه ویژه‌ی ما به مساله‌ی مکان‌یابی پایانه‌ی اتوبوس‌رانی (BTLP) با هدف تعیین مکان پایانه‌های مورد نیاز و تخصیص ایستگاه‌های متقاضی به آن‌ها است. با توجه به شرایط مساله و بررسی‌های انجام شده، در این پایان‌نامه برای هر پایانه ۳ همسایگی تعریف شده و متناظر با هر همسایگی یک مطلوبیت سرویس‌دهی پایانه به ایستگاه‌ها در نظر گرفته شده است، که این مدل به نوعی تصحیح مدل ارایه شده توسط قنبری و مهدوی امیری [۲۸] است. از طرفی با توجه به NP-سخت بودن BTLP، که به عنوان حالت خاصی از مساله‌ی مکان‌یابی تسهیلات شناخته شده است، معمولا حل دقیق آن برای شهرهای بزرگ بسیار پیچیده و زمان‌بر است. بنابراین برآن شدیم تا برای حل BTLP، الگوریتم‌های فراابتکاری بر مبنای جستجوی ممنوع و جستجوی همسایگی متغیر طراحی کنیم، و در نهایت با مقایسه الگوریتم‌های پیشنهادی با نرم‌افزار ILOG OPL، کارایی الگوریتم‌های پیشنهادی خود را بسنجیم.

BTLP، همانند مسایل مکان‌یابی آژیرهای هشدار دهنده، ایستگاه‌های رادیو، نورپردازها برای روشن کردن منطقه و ... نمونه‌ای از مسایل در دنیای واقعی است، لذا وجود شرایطی چون توپوگرافی منطقه، شرایط آب و هوایی و فاکتورهای دیگری که متناسب با زمان تغییر می‌کنند، باعث می‌شود بسیاری از

@ORchannel

پارامترهای این مسایل را نتوان به صورت دقیق بیان کرد و عموما به صورت غیر دقیق یا فازی هستند. یکی از این پارامترها در BTLP، تعداد مسافران هر ایستگاه متقاضی است که در این پایان‌نامه به صورت عدد فازی مثلثی فرض شده است. برای حل مدل فازی BTLP (FBTLP)، الگوریتمی بر مبنای جستجوی همسایگی متغیر ارایه شده برای حالت قطعی BTLP، پیشنهاد می‌کنیم.

این پایان‌نامه به صورت زیر سازمان‌دهی شده است:

در فصل اول، به معرفی سیستم حمل‌ونقل عمومی و بیان تعاریف و مقدماتی جهت آشنایی با مساله‌ی مکان‌یابی پایانه‌ی اتوبوس‌رانی می‌پردازیم.

در فصل دوم، ابتدا مدل پیشنهادی خود برای BTLP را ارایه می‌کنیم، و در مثالی برتری این مدل را نسبت به مدل قنبری و مهدوی امیری نشان می‌دهیم.

در فصل سوم، به توضیح الگوریتم‌های فراابتکاری جستجوی ممنوع و جستجوی همسایگی متغیر در حالت کلی می‌پردازیم.

در فصل چهارم، الگوریتم‌های فراابتکاری جستجوی ممنوع پیشنهادی و جستجوی همسایگی متغیر پیشنهادی خود را برای حل BTLP بیان می‌کنیم.

در فصل پنجم، نتایج عددی الگوریتم‌های پیشنهادی خود را روی مجموعه داده‌های تصادفی ارایه خواهیم کرد. همچنین کارایی الگوریتم‌های پیشنهادی را با نتایج نرم‌افزار ILOG OPL مقایسه می‌کنیم.

در فصل ششم، ابتدا مقدماتی از اعداد فازی را بیان می‌کنیم و پس از بررسی روش‌های مقایسه اعداد فازی، الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر برای حل BTLP در حالت فازی را ارایه می‌کنیم.

@ORchannel

فصل ۱

آشنایی با مساله‌ی مکان‌یابی پایانه‌ی اتوبوس‌رانی

۱.۱ نگاهی به سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی

با رشد شتابان شهرنشینی در چند دهه اخیر، شهرها به عنوان بزرگ‌ترین مجموعه‌های زیستی جهان، پذیرای بیش از ۶۱ درصد جمعیت جهان تا سال ۲۰۳۰ خواهند بود[1]. با گسترش این روند، نهایتا کره زمین به سمت تبدیل شدن به یک جهان شهری می‌رود. این روند در حالی به پیش می‌رود که در دهه‌های اخیر جابه‌جایی و حمل‌ونقل در شهرها، به ویژه شهرهای پرجمعیت، همواره به عنوان یکی از اصلی‌ترین چالش‌های شهری مطرح بوده است. چرا که حمل‌ونقل و جابه‌جایی کالا و انسان فعالیتی مهم برای هر جامعه انسانی به شمار می‌آید و تاثیرات عمده‌ای بر الگوهای زندگی و تعاملات اجتماعی مردم خواهد داشت. لذا براساس این اهمیت، مطالعات حمل‌ونقل شهری در طول ۵۰ سال گذشته تغییرات بسیاری داشته است. در دهه‌های اولیه‌ی توسعه‌ی مدل‌های تقاضای سفر، تاکید اصلی مطالعات امور حمل‌ونقل،

[1] www.ram.parsiblog.com (26/4/2016)

@ORchannel

بر افزایش ظرفیت برای پاسخ‌گویی به روند افزایش تقاضای سفر با وسایل نقلیه موتوری استوار بوده است [۵]. مطالعات پس از آن، در پی نگرانی‌ها از تاکید بر توسعه‌ی ظرفیت معابر، نشان داد نه تنها تعریض خیابان‌های شهری برخلاف تصور عموم به کاهش حجم و شدت ترافیک نمی‌انجامد، بلکه به موازات افزایش و بهبود معابر، تقاضای سفر با خودروهای شخصی نیز افزایش می‌یابد. طبق مطالعه‌ی جالبی که در ارتباط با ۸۵ شهر آمریکا انجام شده، به اثبات رسیده که همواره رشد "تقاضای سفر" از رشد "شبکه‌ی معابر" پیشی می‌گیرد. پس تعریض خیابان‌ها راه حل مشکل ترافیک نیست [۴]. همچنین مطالعه‌ی نیومن و کنت ورسی[۱] (۱۹۸۹) روی شهرهای مختلف دنیا نشان می‌دهد که هر چه میزان زیر ساخت‌های جاده‌ای و مقدار فضای تخصیص یافته به حمل‌ونقل درون شهری بیشتر باشد به همان اندازه میزان استفاده از اتومبیل، مصرف بنزین و آلودگی بیشتر خواهد شد. مشکل ترافیک مانند بیماری سرطان است. کوچکترین غفلتی از آن، باعث فراگیر شدن مشکل و تحت‌الشعاع قرار دادن زندگی روزمره می‌شود و هرچه جلوتر می‌رود حل آن مشکل‌تر می‌شود. امروزه آن‌چه که متخصصین حمل‌ونقل جهان بر روی آن اتفاق نظر دارند دستیابی به الگوی حمل‌ونقل پایدار در شهرها است تا بتواند چشم‌انداز شهر سالم، آرام، دارای حمل‌ونقل سریع، ایمن و کارآمد برای عموم شهروندان را تامین کند. پایداری در حمل‌ونقل چنین معنا می‌پذیرد که توسعه‌ی حمل‌ونقل بر مبنای الگویی باشد که با وجود گسترش جمعیت و شهر و توسعه‌ی فعالیت‌های اقتصادی، اجتماعی و ...، که طبیعتا از عوامل ترافیک‌زا هستند، شهرها هم‌چنان بدون بروز مشکل ترافیک پاسخ‌گوی جابه‌جایی کالا و انسان به نحو مطلوب باشند و با گسترش این فعالیت‌ها سیستم حمل‌ونقل به مشکل بر نخورده و پایدار باقی بماند. حال که حمل‌ونقل پایدار تا این حد مهم است که می‌تواند دست‌یابی یا عدم دست‌یابی به آن برای یک شهر و آینده‌ی آن سرنوشت‌ساز باشد، باید به این نکته توجه کرد که استراتژی نوین حمل‌ونقل شهرها مبتنی بر سیاست حمل‌ونقل پایدار بر: توسعه‌ی کیفی و کمی حمل‌ونقل عمومی، افزایش قابلیت پیاده‌روی یا افزایش پتانسیل استفاده از سیستم‌های غیر موتوری شامل پیاده‌روی و دوچرخه سواری، مدیریت تقاضای سفر، کاهش استفاده از خودروی شخصی و ارتقا فرهنگ ترافیک تاکید دارد [۴].

[1] Newman and Ken Worthy

@ORchannel

۱.۱.۱ گرایش به حمل‌ونقل عمومی

ورود اتومبیل به جامعه‌ی شهری، ضمن ایجاد سهولت و افزایش سرعت سفر، خود موجب توسعه‌ی فضاهای شهری، احداث کاربری‌های مختلف و کاهش زمان سفرها بین نقاط و فضاهای مختلف شده و ساخت معابر و شبکه‌های ارتباطی را به عنوان بدنه‌ی اصلی شهرها در برنامه توسعه‌ی آن‌ها قرار داده است. این توسعه، خواه ناخواه، افزایش تقاضا و نرخ سفر را در پی دارد و در مواردی که با سیاست‌های کنترل و مدیریت عرضه و تقاضا همراه نشده باشد، ضمن تشدید گسترش سطحی شهر، به چرخه‌ی نامطلوبی در تامین ارتباط ارکان درونی شهر (کار، سکونت و فراغت) منجر می‌شود که از آن به عنوان "مشکل ترافیک" نام برده می‌شود [۳]. در دهه‌های اخیر همواره با افزایش جمعیت، نرخ استفاده از اتومبیل شخصی، به ویژه در کشورهای در حال توسعه، افزایش یافته است. به طوری که بررسی‌ها نشان داده است، به گزارش روزنامه کریستین ساینس مانیتور در سال ۲۰۱۴، با آن که آمار کل تعداد خودروهای جهان چندان دقیق نیست اما این تعداد به سرعت در حال افزایش است. پیش بینی شده بود که تعداد خودروهای جهان در سال ۲۰۱۰ به یک میلیارد دستگاه برسد و اکنون این شماره به یک میلیارد و دویست میلیون رسیده است. براساس آمار در سال ۲۰۱۳، انتظار می‌رود تا سال ۲۰۳۵ میزان فروش آن به ۱۲۷ میلیون دستگاه و تعداد خودروها به بیش از ۲ میلیارد دستگاه برسد، که براساس گزارش پایگاه اینترنتی "کنفرانس خودرو با انرژی جدید" تنها یک دهم از آن‌ها خودروهای برقی، گازی و دوگانه سوز خواهند بود[1]. در پیامد این رشد شتابان در کنار عدم توان سرویس‌دهی شبکه معابر شهری، مشکل ترافیک را به عنوان یکی از چالش‌های شهری امروزه مطرح کرده است. مشکلات ناشی از ترافیک نه تنها موجب ایجاد اختلال در سیستم حمل‌ونقل شهری، بلکه موجب آلودگی محیط، بحران مدیریتی شهری، افزایش تنش‌های روحی، جسمی، اجتماعی و ... نیز شده است. بررسی کارشناسان ترافیک نشان می‌دهد در صورتی که تنها ۵ دقیقه وقت برای جستجوی پارکینگ توسط خودروهای موجود در سطح شهر صرف شود، روزانه بیش از ۱۰۰ تن منوکسید کربن در هوا وارد می‌شود. در تهران، به عنوان نمونه بارز از کلان شهرهایی که یکی از اصلی‌ترین چالش‌های آن ترافیک است، روزانه ۱۲ میلیون ساعت وقت مردم در ترافیک تلف

[1] www.persian.cri.cn (2/5/2016)

@ORchannel

می‌شود[1]. اگر این ۱۲ میلیون ساعت را با کمترین میزان دستمزد محاسبه کنیم، متوجه می‌شویم که چه هزینه‌ی نجومی‌ای روزانه به این شهر تحمیل می‌شود. پیامدهای اقتصادی، زیست محیطی، مدیریتی، اجتماعی و روانی ناشی از ترافیک در دهه‌های اخیر سبب تغییر رویکرد در نگرش به مدیریت و کنترل ترافیک در شهرها شده و رویکردهای اتومبیل محور مبتنی بر عرضه‌ی بیشتر زیر ساخت‌ها (تعریض و توسعه معابر و بزرگ‌راه‌ها) را به رویکرد مبتنی بر مدیریت تقاضای سفر، توسعه‌ی حمل‌ونقل عمومی و حمل‌ونقل غیر موتوری تغییر داده است. بسیاری از کشورهای توسعه یافته در یکی دو دهه اخیر با توجه به مزیت‌های فراوان سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی از جمله: جابه‌جایی انبوه مسافران در زمان کم، کاهش مصرف سوخت و ایجاد صرفه‌جویی اقتصادی در مقیاس ملی، کاهش آلودگی هوا (کاهش گسیل کربن) و آلودگی صوتی، ایمنی مناسب و پایداری بیشتر، تقویت و توسعه‌ی حمل‌ونقل عمومی و به کارگیری اشکال نوین آن را در کنار راهبردهای مبتنی بر مدیریت تقاضا به عنوان راهبردهای اصلی نظام حمل‌ونقل جامع شهرها برگزیده‌اند. امروزه در کشورهای در حال توسعه با توجه به مزیت‌های ویژه حمل‌ونقل عمومی، رویکرد به کارگیری انواع سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی در صدر راهبردهای نظام حمل‌ونقل شهرها قرار گرفته است.

۲.۱.۱ سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی

حمل‌ونقل عمومی[2]، تمام سیستم‌های حمل‌ونقلی را در بر می‌گیرد که، مسافران در ماشین‌های شخصی خودشان سفر نکنند، سفر به صورت جمعی انجام شود نه انحصاری و حرکت وسایل نقلیه براساس زمان‌بندی بسیار دقیق انجام شود.

موفقیت‌های به کارگیری حمل‌ونقل عمومی در کشورهای توسعه یافته، ناشی از استفاده از نوع خاصی از حمل‌ونقل عمومی به صورت تک بعدی نبوده، بلکه ناشی از نظام یکپارچه و هماهنگ از انواع سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی است که یکدیگر را پشتیبانی کرده و مکمل یکدیگرند. مزیت‌ها و نتایج مفید حمل‌ونقل عمومی در شهرها، برآیندی از کارکرد بهینه‌ی تمامی سیستم‌های سنتی و نوین حمل‌ونقل

[1] www.ilna.ir (15/4/2016)

[2] Public Transportation

@ORchannel

عمومی در کنار یکدیگر است. از میان دسته‌بندی‌های متنوعی که در تبیین سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی شهری وجود دارد، یکی از رایج‌ترین آن‌ها، سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی را به دو دسته اتوبوس محور و ریلی تقسیم می‌کند. سیستم‌های گوناگونی مبتنی بر اتوبوس و ریلی (حمل‌ونقل سریع اتوبوسی، اتوبوس‌های برقی، مترو، منوریل و ...) به منظور افزایش کارایی در حمل‌ونقل عمومی به وجود آمده است. با توجه به این سیستم‌های گسترش یافته، سیستم حمل‌ونقل اتوبوس‌رانی در راس آن‌ها قرار دارد. به عبارت دیگر، تمام سیستم‌های حمل‌ونقلی ریلی به نوعی مکمل سیستم حمل‌ونقل اتوبوس‌رانی هستند، به طوری که در کنار هر ایستگاه سیستم ریلی یک ایستگاه اتوبوس باید احداث شده باشد.

۳.۱.۱ سیستم‌های حمل‌ونقل اتوبوس‌رانی

از دیرباز جابه‌جایی تعداد بسیار زیادی از مردم در یک روز کاری به وسیله اتوبوس، آن را به عنوان یک وسیله‌ی حمل‌ونقل عمومی مطرح کرده است. اتوبوس‌رانی یکی از مهمترین سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی شهری محسوب می‌شود. این سیستم به علت برخورداری از خصوصیات مثبت چون قابلیت انعطاف نسبت به وسایل حمل‌ونقل عمومی و همچنین نزدیکی به اتومبیل از لحاظ خدمت‌رسانی، موجب خواهد شد که در آینده دور این نقش را در اکثر شهرهای دنیا به عهده داشته باشد. هر چند که اتوبوس نسبت به وسایل حمل‌ونقل عمومی مثل تراموا و مترو از ظرفیت جابه‌جایی مسافر کمتری برخوردار است اما ارزان بودن خدمات و هزینه‌های زیر ساخت آن باعث شده تا به طور وسیعی مورد استفاده قرار بگیرد.

وجود مشکلات و اختلالاتی در سیستم حمل‌ونقل اتوبوس‌رانی باعث کاهش سطح خدمت در این سیستم و در نتیجه کاهش تقاضا برای آن خواهد شد. از جمله این مشکلات می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

عدم دسترسی مناسب به سیستم، عدم تطابق خطوط با مسیرهای خواسته شده، زیاد بودن تعداد تعویض خطوط، زمان انتظار طولانی و در نتیجه ایجاد صف‌های طولانی، فاصله زمانی نامنظم بین ورود اتوبوس‌ها و به دنبال آن افزایش انتظار، عدم وجود ظرفیت کافی متناسب با تقاضای خطوط.

این مشکلات را می‌توان ناشی از کمبود امکانات و منابع، برنامه‌ریزی نامناسب برای تخصیص منابع و

@ORchannel

زمان‌بندی و مدیریت دانست. اما از طرفی اضافه کردن امکانات و منابع به تنهایی راه بهبود سیستم و افزایش تقاضای آن نیست، بلکه در کنار آن، اصلاح سیستم و استفاده‌ی بهینه از منابع، می‌تواند در بهبود سیستم موثر باشد. لازمه‌ی این بهبود، یک روش برنامه‌ریزی مناسب برای طراحی سیستم حمل‌ونقل اتوبوس‌رانی است. مساله‌ی طراحی سیستم حمل‌ونقل اتوبوس‌رانی یکی از مسایل پیچیده در برنامه‌ریزی حمل‌ونقل عمومی است.

عملیات لازم به منظور طراحی این سیستم را می‌توان در دو بخش عمده طبقه‌بندی کرد:

۱. تعیین ساختار شبکه، که خود شامل دو بخش تعیین تعداد و مکان پایانه‌ها برای خدمت‌رسانی به ایستگاه‌های توقف تعبیه شده، و تعیین مسیرهای خطوط است.

۲. تعیین برنامه‌ی عملکردی سیستم، که شامل تخصیص ناوگان به مسیرها و زمان‌بندی و برنامه‌ریزی حرکت وسایل نقلیه است.

در این پایان‌نامه به مطالعه‌ی قسمتی از بخش اول، یعنی تعیین بهترین مکان پایانه‌ها، پرداخته خواهد شد. جهت تعیین بهترین مکان برای احداث پایانه‌ها، نیازمند ایستگاه‌های توقفی هستیم که از این پایانه‌ها سرویس دریافت می‌کنند. مکان بهینه‌ی تقریبی این ایستگاه‌ها، در مساله‌ی مکان‌یابی ایستگاه‌های توقف[1] [۴۴] بررسی شده است. در واقع این مساله پیش زمینه‌ای برای مساله‌ی تعیین مکان پایانه‌ها است. در راستای بهبود سیستم حمل‌ونقل عمومی، مدل‌های متفاوتی برای مساله‌ی مکان‌یابی ایستگاه‌های توقف، ارایه شده است، که هدف آن‌ها عموما حداقل کردن هزینه‌ها و یا حداکثر کردن پوشش و دسترسی به سیستم است. برای مطالعه‌ی بیشتر مدل‌های این مساله به [۶] مراجعه کنید.

۲.۱ مفاهیم اولیه

در این بخش، تعاریف پایه‌ای برای فهم راحت‌تر مساله‌ی مکان‌یابی پایانه‌ی اتوبوس‌رانی را توضیح می‌دهیم.

[1] Stop Location Problem

@ORchannel

۱.۲.۱ مساله‌ی مکان‌یابی تسهیلات

مکان‌یابی، فرآیندی است که از طریق آن می‌توان براساس شرایط تعیین شده، بهترین مکان مورد نظر را جهت سرویس‌دهی بهینه به مشتری‌ها تعیین کرد. هدف از مساله، کمینه کردن یا بیشینه کردن تابعی است که متناسب با شرایط مساله تعریف می‌شود.

تا جایی که می‌دانیم، زمان پیدایش مساله‌ی مکان‌یابی به اوایل قرن هفدهم و مساله‌ای که توسط فرما[۱] مطرح شد برمی‌گردد. مساله‌ای که فرما مطرح کرد بدین صورت است: فرض کنید سه نقطه در صفحه داده شده است، نقطه‌ی چهارم را به گونه‌ای بیابید که مجموع فاصله‌ی آن تا سه نقطه داده شده کمینه گردد. توریچلی[۲] در سال ۱۶۴۰ این مساله را حل کرد و از این رو نام نقطه‌ی بهینه را توریچلی گذاشتند. نظریه‌ی مکان‌یابی اولین بار توسط ون تانن[۳] در سال ۱۸۲۶ در زمینه‌ی فعالیت‌های کشاورزی کلید خورد، و با کار لانهارد[۴] در سال‌های ۱۸۸۲ تا ۱۸۸۵ در صنعت مطرح شد. اما آلفرد وبر[۵] آلمانی در سال ۱۹۰۹ [۵۵] به این نظریات رنگ و بوی علمی بخشید. در واقع نظریه‌ی مکان‌یابی مدرن به شکلی که امروزه مورد استفاده قرار می‌گیرد با انتشار کتاب معروف وبر مطرح شد. از آن پس دانشمندان بسیاری، مطالعاتی را در زمینه‌ی مکان‌یابی انجام دادند. حکیمی در سال ۱۹۶۴ [۳۳] تابع هدف را به صورت کمترین مجموع و مینیماکس طبقه‌بندی کرده و به مساله‌ی مکان‌یابی روی شبکه پرداخته است. در سال‌های اخیر، برمن[۶] و درنزر[۷] در سال ۲۰۰۷ [۱۵] مساله‌ی مکان‌یابی چند سرویس دهنده را با هدف مینیمم سازی مجموع زمان سفر و متوسط زمان صرف شده برای مشتری‌ها بررسی کردند، و در سال ۲۰۰۹ [۹] همین مساله را با هدف مینیمم سازی بیشترین زمان صرف شده به وسیله هر مشتری (شامل زمان سفر و زمان انتظار) مورد مطالعه قرار دادند.

از نظر تحلیلی، مسایل مکان‌یابی به دسته‌های متعددی تقسیم‌بندی می‌شوند [۲۱، ۴۵]. در ادامه این

[1] Fermat
[2] Torricelli
[3] VonThunen
[4] Lanhard
[5] Alfred Weber
[6] Berman
[7] Drenzer

@ORchannel

بخش به توضیح مختصر چند دسته از آن‌ها می‌پردازیم.

یکی از انواع مسایل مکان‌یابی، مساله‌ی مکان‌یابی تسهیلات با ظرفیت نامحدود[1] (UFLP) است. برای بیان مدل ریاضی UFLP [۵۸]، مجموعه‌ی I از تسهیلات بالقوه با هزینه‌ی تاسیس $C(i)$ برای هر $i \in I$، و مجموعه‌ی J، متقاضیانی (یا مشتریان) که توسط این تسهیلات سرویس‌دهی می‌شوند، را در نظر بگیرید. همچنین فرض کنید هزینه‌ی سرویس‌دهی تسهیل i به مشتری j، توسط فاصله‌ی c_{ij} بین آن‌ها مشخص می‌شود. هدف از UFLP، تعیین یک مجموعه $S \subseteq I$ از تسهیلات است به طوری که مجموع هزینه‌ها (شامل هزینه تاسیس و هزینه سرویس‌دهی) برای پوشش همه مشتریان مینیمم شود:

$$F(S) = \sum_{i \in S} C(i) + \sum_{j \in J} \min_{i \in S} c_{ij}, \tag{۱.۱}$$

$$S^* = \arg\min\{F(S); S \subseteq I\}. \tag{۲.۱}$$

۲.۲.۱ مساله‌ی $p-$میانه

مساله‌ی $p-$میانه[2](p-MP) یکی از گسترده‌ترین مدل‌های استفاده شده در تحلیل‌های مکان‌یابی و جزو بیشترین دسته مسایل پژوهش شده است. مساله‌ی مکان‌یابی- تخصیص[3] p-MP از نظر تئوریک و مدل‌بندی، هسته‌ی اصلی بسیاری از مسایل مکان‌یابی گسسته است و به این مفهوم است که، p تسهیل را مکان‌یابی کنیم به گونه‌ای که مجموع فاصله‌های بین گره‌های متقاضی و نزدیک‌ترین تسهیل اختصاص داده شده به آن‌ها، مینیمم شود.

حکیمی و کاریو[4] نشان دادند که مساله‌ی p-میانه یک مساله‌ی NP-سخت[5] است [۴۰]. نتیجه این خبر، دستیابی محققیق و پژوهش‌گران به بسیاری تقریب‌ها و الگوریتم‌های کارا برای حل p-MP است. علاقه‌مندان برای اطلاعات بیشتر در مورد p-MP می‌توانند به [۴۷] مراجعه کنند.

[1] Uncapacitated Facility Location Problem
[2] p-Median Problem
[3] Location-Allocation
[4] Kariv
[5] NP-hard problem

@ORchannel

برای بیان مدل عدد صحیح باینری p-MP، با در نظر گرفتن مفروضات مدل UFLP (که در بخش (۱.۲.۱) توضیح داده شده است)، تعریف می‌کنیم:

p، تعداد تسهیلاتی که باید تاسیس شوند، است.

تعریف متغیرهای مکان‌یابی و تخصیص به صورت زیر است:

$$y_i = \begin{cases} ۱, & \text{اگر یک تسهیل در گره کاندید } i \text{ مکان‌یابی شود}, \\ ۰, & \text{در غیر این صورت}. \end{cases} \qquad (۳.۱)$$

همچنین متغیر تخصیص x_{ij} برابر با یک است اگر گره j به تسهیل باز i اختصاص یابد در غیر این صورت صفر است.

حال داریم:

$$\min \quad \sum_{i\in I}\sum_{j\in J} c_{ij}x_{ij} \qquad (۴.۱)$$

$$s.t. \quad x_{ij} \le y_i, \qquad \forall i \in I, \forall j \in J, \qquad (۵.۱)$$

$$\sum_{i\in I} x_{ij} = ۱, \qquad \forall j \in J, \qquad (۶.۱)$$

$$\sum_{i\in I} y_i = p, \qquad (۷.۱)$$

$$x_{ij} \in \{۰, ۱\},\ y_i \in \{۰, ۱\}, \quad \forall i \in I, \forall j \in J. \qquad (۸.۱)$$

تابع هدف (۴.۱)، هزینه‌ی کل را مینیمم می‌کند. محدودیت (۵.۱) بیان می‌کند که گره‌های تقاضا تنها به تسهیل باز می‌توانند تخصیص داده شوند. محدودیت (۶.۱) به این معنی است که همه‌ی تقاضای گره j تامین می‌شود. در محدودیت (۷.۱) دقیقا p تسهیل باید مکان‌یابی شود. محدودیت (۸.۱) باینری بودن متغیرهای تخصیص و مکان‌یابی را تضمین می‌کند.

در فرمول‌بندی p-MP، با توجه به نمونه‌های عملی، برای مجموعه گره‌های کاندید فرض‌هایی وجود دارد. مجموعه گره‌های کاندید برای احداث تسهیلات می‌توانند یک زیر مجموعه‌ی سره از گره‌های متقاضی باشند ($I \subset J$)، یا همه گره‌های متقاضی را به عنوان گره‌های کاندید در نظر بگیریم ($I = J$)، که بدترین حالت از نظر محاسباتی است. همچنین مجموعه گره‌های کاندید می‌توانند یک مجموعه‌ی مجزا از مجموعه

@ORchannel

گره‌های متقاضی باشند. از طرفی محدودیت باینری متغیرهای تخصیص را می‌توان به صورت درصدی از تقاضای گره j که توسط تسهیل i تامین می‌شود (یعنی به صورت $x_{ij} \geq 0$) تعریف کرد. در این حالت با توجه به محدودیت‌های (۵.۱) و (۶.۱) هیچ کران بالایی برای متغیرها ضروری نیست.

۳.۲.۱ مساله‌ی پوشش

در این بخش به معرفی یکی دیگر از پرکاربردترین مدل‌های مکان‌یابی تسهیلات می‌پردازیم. در حالی که مدل‌های پوشش، جدید نیستند ولی به سبب کاربردهای فراوانی که در زندگی جهان واقعی، به ویژه در مکان‌یابی تسهیلات سرویس‌دهی و اورژانس دارند، برای محققین جذاب هستند. در مساله‌ی پوشش[۱]، مشتری از تسهیلی (نه الزاما نزدیک‌ترین تسهیل) سرویس دریافت می‌کند که فاصله‌اش تا آن تسهیل، کمتر یا مساوی یک عدد از پیش تعیین شده باشد. این عدد از پیش تعیین شده‌ی بحرانی، شعاع پوشش (همسایگی) یا فاصله‌ی پوشش نامیده می‌شود. مساله‌ی پوشش برای اولین بار توسط حکیمی معرفی گردید [۳۴]. این مدل به هدف تعین کمترین تعداد پلیس مورد نیاز، به منظور پوشاندن تمام گره‌های روی یک شبکه بزرگ‌راه به دست آمد و به صورت مساله‌ی پوشش راس در گراف فرمول‌بندی شد. اولین مدل ریاضی در مسایل پوشش نتیجه‌ی تلاش تورگاس[۲] و همکارانش بود [۵۴].

شیلینگ[۳] و همکارانش [۵۱] مدل‌هایی که از مفهوم پوشش استفاده می‌کنند را در دو بخش طبقه بندی کردند:

۱. مساله‌ی پوشش مجموعه[۴] (SCP).

۲. مساله‌ی مکان‌یابی بیشترین پوشش[۵] (MCLP).

هر بخش براساس ماهیت نقاط تقاضا، مشخصات تسهیلاتی که باید تاسیس شوند و کاربردشان در بخش‌های خصوصی و دولتی به صورت مجزا طبقه‌بندی شده‌اند. برای آشنایی بیشتر با گسترش‌های این

[1] Covering Problem
[2] Toregase
[3] Schilling
[4] Set Covering Problem
[5] Maximal Covering Location Problem

@ORchannel

دو مدل و کاربردهای آن‌ها در دنیای واقعی می‌توانید به [۵۹] مراجعه کنید.

از آن‌جایی که در بسیاری از کاربردهای عملی، موجودی منابع برای پوشش دادن همه‌ی نقاط تقاضا با فاصله پوشش مطلوب، کفایت نمی‌کند، بنابراین این موضوع انگیزه‌ای شد تا چرچ و رول[1] [۱۸] مدل مکان‌یابی بیشترین پوشش را توسعه دهند. در این مدل، میزان تقاضای پوشش داده شده توسط مکان‌یابی یک تعداد مشخص تسهیل، در فاصله پوشش قابل قبول (شعاع پوشش) r، ماکزیمم می‌شود.

قبل از بیان مدل عدد صحیح باینری MCLP، در ادامه‌ی متغیرها و پارامترهای دو مدل قبل (به بخش ۱.۲.۱ و ۲.۲.۱ نگاه کنید) تعریف می‌کنیم:

d_j، میزان تقاضای گره j است. متغیر پوشش z_j برابر با یک است اگر نقطه تقاضای j پوشش داده شود؛ در غیر این صورت صفر است. همچنین I_j^*، مجموعه گره‌های کاندید است که می‌توانند به گره تقاضای j سرویس دهند،

$$I_j^* = \{i \in I; c_{ij} \leq r\}. \tag{۹.۱}$$

حال می‌توان بیان کرد:

$$\max \quad \sum_{j \in J} d_j z_j \tag{۱۰.۱}$$

$$s.t. \quad z_j \leq \sum_{i \in I_j^*} y_i, \qquad \forall j \in J, \tag{۱۱.۱}$$

$$\sum_{i \in I} y_i \leq p, \tag{۱۲.۱}$$

$$z_j \in \{۰, ۱\},\ y_i \in \{۰, ۱\}, \quad \forall i \in I, \forall j \in J. \tag{۱۳.۱}$$

تابع هدف (۱۰.۱) تقاضای پوشش داده شده را ماکزیمم می‌کند. محدودیت (۱۱.۱) رابطه بین متغیرهای مکان‌یابی و پوشش را شرح می‌دهد و بیان می‌کند که، نقطه تقاضای j پوشش داده می‌شود اگر حداقل یک گره کاندید که توانایی سرویس‌دهی به گره j را دارد، مکان‌یابی شود.

[1] Church and Revell

@ORchannel

تا این‌جا با تعدادی از مسایل مکان‌یابی تسهیلات تا حدودی آشنا شدید. در ادامه، به معرفی یکی دیگر از حالت‌های خاص مساله‌ی مکان‌یابی تسهیلات می‌پردازیم، که این مساله به صورت ترکیب دو مساله‌ی p–میانه و MCLP (به ترتیب در بخش‌های ۲.۲.۱ و ۳.۲.۱ توضیح داده شدند) نیز در نظر گرفته می‌شود.

۴.۲.۱ مساله‌ی مکان‌یابی پایانه‌ی اتوبوس‌رانی

یکی از مسایل مطرح در طراحی سیستم اتوبوس‌رانی، مشخص کردن مکان مناسب برای ایجاد پایانه‌های اتوبوس‌رانی است. یک مجموعه از ایستگاه‌های حمل‌ونقل عمومی همانند ایستگاه اتوبوس، تحت این فرض که تعداد مسافران هر ایستگاه و همچنین فاصله بین هر ایستگاه و پایانه‌ی کاندید مشخص باشد در نظر بگیرید. در مساله‌ی مکان‌یابی پایانه‌ی اتوبوس‌رانی[1] (BTLP)، مراکز در نظر گرفته شده به عنوان کاندید برای احداث پایانه‌های اتوبوس‌رانی می‌توانند جزیی از ایستگاه‌های حاضر (زیر مجموعه ای از نقاط تقاضا) باشند یا یک پایانه که جدید احداث می‌شود. همچنین پایانه احداث شده تنها به ایستگاه‌هایی که در منطقه دسترسی خود (شعاع همسایگی تعریف شده) هستند، می‌تواند سرویس‌دهی کند. هدف در این مساله، انتخاب تعدادی از پایانه‌ها است، که با تاسیس آن‌ها تابع سرویس عمومی بیشینه شود. به منظور استفاده از یک سیستم حمل‌ونقل مناسب، مسافران هر ایستگاه به نزدیک‌ترین پایانه‌ی احداث شده، اختصاص داده می‌شوند.

مساله‌ی مکان‌یابی پایانه‌ی اتوبوس‌رانی یک حالت خاص از مساله مکان‌یابی تسهیلات است، و از این جهت هم که این مساله به صورت ترکیب دو مساله NP–سخت، یعنی مساله‌ی p–میانه و مساله‌ی مکان‌یابی بیشترین پوشش (به ترتیب در بخش‌های ۲.۲.۱ و ۳.۲.۱ توضیح داده شدند) فرمول‌بندی شده است، می‌توان NP–سخت بودن آن را نتیجه گرفت.

قنبری و مهدوی امیری در [۲۸] یک تعریف برای BTLP بیان کردند: یک شبکه با n گره به عنوان

[1] Bus Terminal Location Problem

@ORchannel

ایستگاه‌های اتوبوس[1] (نقاط تقاضا) و m گره به عنوان مراکز کاندید برای پایانه‌های اتوبوس[2] (مراکز سرویس دهنده) در نظر بگیرید. هدف، انتخاب تعدادی از پیش مشخص پایانه از میان m مرکز کاندید است به طوری که تابع سرویس ماکزیمم شود.

مبنای کار ما براساس این تعریف و فرضیات توضیح داده شده، است. در ادامه این بخش به بررسی و توضیح تحقیقات قبلی که روی BTLP صورت گرفته است، می‌پردازیم.

در مرجع [۱]، مساله‌ی تعیین مکان پایانه‌ها برای یک سیستم اتوبوس‌رانی به صورت یک مساله‌ی مکان‌یابی در قالب یک مدل برنامه‌ریزی مختلط فرمول‌بندی شده است. پارامترها و متغیرهای این مدل مشابه دو مدل (۴.۱)-(۸.۱) و (۱۰.۱)-(۱۳.۱) است، فقط به دلیل خاص‌تر شدن مساله، از لحاظ نام‌گذاری کمی مشهودتر شده‌اند. ما برای راحتی مقایسه این مدل با دو مدل قبل، از همان نمادها استفاده می‌کنیم و یک بار دیگر به تعریف آن‌ها می‌پردازیم:

فرض کنید J، مجموعه گره‌های شبکه برای ایستگاه اتوبوس (نقاط تقاضا)، $I \subset J$، مجموعه گره‌های کاندید برای احداث پایانه (تسهیلات بالقوه) و d_j، تعداد مسافران (پتانسیل) هر ایستگاه (میزان تقاضا) باشند. تعریف متغیرهای مکان‌یابی مشابه رابطه (۳.۱) است، و متغیر تخصیص x_{ij} به صورت سهم سرویس‌دهی گره i به گره j، بیان شده است. با فرض $f(c_{ij})$، تابع نمایی منفی از فاصله، که مطلوبیت سرویس‌دهی پایانه i به ایستگاه j را تعیین می‌کند، عدد بزرگ B (حداقل مقدار B برابر با تعداد ایستگاه‌ها است) و $J_i^* \subseteq J$، مجموعه گره‌های شبکه که می‌توانند از گره $i \in I$ سرویس دریافت کنند،

$$J_i^* = \{j \in J; c_{ij} \leq r\}, \qquad (۱۴.۱)$$

[1] Bus Stations

[2] Bus Terminals

@ORchannel

فرمول‌بندی BTLP به صورت زیر است:

$$\max \quad \sum_{i\in I}\sum_{j\in J_i^*} d_j f(c_{ij}) x_{ij} \tag{۱۵.۱}$$

$$s.t. \quad \sum_{j\in J_i^*} x_{ij} \le B y_i, \qquad \forall i \in I, \tag{۱۶.۱}$$

$$\sum_{i\in I: j\in J_i^*} x_{ij} \le ۱, \qquad \forall j \in J, \tag{۱۷.۱}$$

$$\sum_{i\in I} y_i = p, \tag{۱۸.۱}$$

$$x_{ij} \ge ۰,\ y_i \in \{۰, ۱\}, \quad \forall i \in I, \forall j \in J. \tag{۱۹.۱}$$

تابع هدف (۱۵.۱)، میزان سرویس‌دهی گره‌های کاندید به تمام گره‌ها را مشخص می‌کند. محدودیت (۱۶.۱) تاکید می‌کند تنها در صورتی گره کاندید i به گره‌های اطراف خود می‌تواند سرویس دهد که به عنوان پایانه انتخاب شود. محدودیت (۱۷.۱) بیان می‌کند که مجموع سهم سرویسی که هر گره j از گره‌های کاندید می‌گیرد باید برابر ۱ باشد.

برای حل این مدل از روش شاخه و کران[1] و به کارگیری نرم افزار GAMS استفاده کردند. ولی از آن جایی که این مدل مکان‌یابی از نوع بهینه‌سازی ترکیبیاتی در مقیاس بزرگ است، حل آن بسیار دشوار و وقت‌گیر است. کاهش تعداد متغیرها و در نتیجه ابعاد مساله می‌تواند کمک زیادی به حل مساله بکند. همان طور که می‌دانید مهمترین عامل مشکل‌کننده‌ی مساله تعداد متغیرهای صحیح آن، یعنی تعداد گره‌های کاندید (y_i) است. بنابراین هرچه این تعداد کمتر باشد حل مساله عملی‌تر خواهد بود. لذا در مرجع [۱] تنها گره‌هایی از شبکه که شانس بیشتری در انتخاب نهایی دارند به عنوان کاندید انتخاب شدند. در تحقیق مذکور دو عامل در انتخاب گره‌های کاندید مد نظر قرار گرفته است. یکی پتانسیل خود گره و دیگری حداکثر میزان سرویس‌دهی آن گره به تمام گره‌های شبکه. با استفاده از این دو کمیت مجموعه گره‌های شبکه تا حد ممکن کاهش می‌یابد. همچنین در انتخاب گره‌ها ملاحظات دیگری در نظر گرفته شده است. از جمله این که بین دو گره نزدیک به هم و با حداکثر خدمت‌دهی تقریبا برابر، آن گرهی که دارای پتانسیل بیشتری است به عنوان کاندید انتخاب شده است. روش دیگری که در این پژوهش

[1] Branch and Bound

@ORchannel

برای کاهش تعداد ابعاد مساله در نظر گرفته شده است کم کردن تعداد متغیرهای غیر صحیح مساله است. از آن‌جایی که گره‌هایی با پتانسیل کم یا دور از گره‌های کاندید، خدمت کمی دریافت می‌کنند، لذا در همسایگی گره‌های کاندید در نظر گرفته نشده است. با این کار مجموعه (۱۴.۱) به مجموعه زیر کاهش می‌یابد:

$$J_i^* = \{j \in J; d_j \geq d_{min}, c_{ij} \leq c_{max}\}, \qquad (۲۰.۱)$$

که d_{min} حداقل پتانسیل قابل قبول و c_{max} حداکثر فاصله برای سرویس‌گیری است.

آشتیانی و حجازی [۸] برای حل مدل (۱۵.۱)-(۱۹.۱) از روش فراابتکاری سرد کاری تدریجی[1] (SA) استفاده کرده‌اند، و نتایج حاصل از این روش را با نتایج حاصل از به کارگیری روش عمومی شاخه و کران و همچنین روش شمارش ضمنی برای شبکه‌ی اتوبوس‌رانی شهر مشهد مقایسه کردند.

در سال ۲۰۱۱، قنبری و مهدوی امیری [۲۸]، BTLP را به صورت مساله‌ی مکان‌یابی $p-$تسهیل با ظرفیت نامحدود[2] (p-UFLP) با قید فاصله در نظر گرفتند. از آن‌جایی که p-UFLP، NP-سخت است [۴۱]، آن‌ها الگوریتم‌های تکاملی[3] را به عنوان تکنیک حل پیشنهاد کردند. به منظور حل BTLP، قنبری و مهدوی امیری در [۲۸] الگوریتم‌های تکاملی جدید و ممتیک[4]، به نام الگوریتم جستجوی محلی ژنتیک[5] (GLS) طراحی کردند. به علاوه آن‌ها برای هر گره یک ویژگی که پتانسیل تابع هدف[6] (POF) نام دارد، تعریف کردند. از آن جایی که در GLS، جستجوی محلی[7] (LS) یک عمل‌گر زمان‌بر است لذا به منظور کنترل زمان CPU، برای جستجوی محلی معیارهای توقف خاصی در نظر گرفتند. همچنین به منظور ساختن الگوریتم ممتیک سریع‌تر، تغییرات تابع هدف در جستجوی محلی بر مبنای POF تخمین زده شده است. با توجه به کارایی عمل‌گر نو ترکیب حفظ تمایز[8](DPX) استفاده شده در [۳۹]، یک

[1] Simulated Annealing
[2] p-Uncapacitated Facility Location Problem
[3] Evoloutionary
[4] Memetic
[5] Genetic Local Search
[6] Potential Objective Function
[7] Local Search
[8] Distance Preserve Recombination Operator

@ORchannel

عمل‌گر نو ترکیب جدید ساختند که بعد از عمل‌گر انتخاب[1] در الگوریتم‌های پیشنهادی، به کار می‌رود. همچنین آن‌ها دو عمل‌گر جهش[2] برای حل BTLP طراحی کردند که برای طراحی یکی از عمل‌گرها از POF تعریف شده استفاده کردند و کارایی آن‌ها را با عمل‌گر ۲-swap مقایسه کردند. همان طور که انتظار داشتند عمل‌گر جهش بر مبنای POF به جواب بهتری دست یافت. براساس سه عمل‌گر طراحی شده و الگوریتم‌های ژنتیک (تکاملی) و ممتیک ساخته شده، سرانجام آن‌ها تعداد ۹ الگوریتم پیشنهادی را روی مسایلی که به صورت تصادفی ساخته شده بود، اجرا کردند و از میان آن‌ها، دو الگوریتم که کارایی بهتری داشت به عنوان نماینده در نظر گرفتند و ترکیب کردند. الگوریتم ترکیبی (HAGLS) را با الگوریتم سرد کاری تدریجی با چند نقطه شروع[3](MSSA) مقایسه کردند. نتایج عددی گواه این مطلب است که HAGLS از نقطه نظر زمان اجرا و تعداد جواب‌های خوب از MSSA بهتر است.

با توجه به نمادهای تعریف شده در مدل‌های قبلی، برای جواب شدنی $S \subseteq I$ فرض کنید که $J^* = \cup_{i \in S} J_i^*$ و تابع f مطلوبیت سرویس‌دهی پایانه i به ایستگاه j است (در [۲۸] مطلوبیت سرویس‌دهی برابر با $f(c_{ij}) = e^{-c_{ij}}$ در نظر گرفته شده است). قنبری و مهدوی امیری فرمول‌بندی ترکیبیاتی BTLP را به صورت زیر تعریف کردند [۲۸]:

$$F(S) = \sum_{j \in J^*} d_j \times f(\min_{i \in S} c_{ij}), \qquad (۲۱.۱)$$

$$S^* = \arg\max\{F(S); S \subseteq I, |S| = p\}. \qquad (۲۲.۱)$$

آن‌ها در [۲۸] بیان کردند: واضح است که BTLP یک حالت خاص از مساله مکان‌یابی تسهیلات است.

ولی همان طور که قبلا گفته شد، به بیان دقیق‌تر، BTLP نشان دهنده‌ی یک کلیتی از مسایل مکان‌یابی شناخته شده، مساله‌ی p-میانه و MCLP (به بخش ۲.۲.۱ و ۳.۲.۱ نگاه کنید)، است. اگر در فرمول‌بندی (۲۱.۱)، به جای تابع کاهشی f تابع $f(x) = -x$ قرار دهید، پتانسیل تمام گره‌ها مقدار ۱ و شعاع r یک عدد بزرگ (مثلا: $r = \max_{i \in I, j \in J}(c_{ij})$) باشد، آنگاه این فرمول‌بندی معادل مساله‌ی

[1] Selection Operator

[2] Mutation Operator

[3] Multi Start Simulated Annealing

@ORchannel

p–میانه خواهد بود. از طرف دیگر اگر تابع f تابع ثابت $f(x) = ۱$ باشد، فرمول بندی معادل MCLP خواهد بود.

در سال ۲۰۱۲، بابایی و همکارانش [۱۰] دو مدل برای BTLP با پارامترهای فازی (FBTLPs) پیشنهاد کردند. در فرمول‌بندی اول (FBTLP1) تعداد مسافران هر ایستگاه یک عدد فازی ذوزنقه‌ای فرض شده است. در فرمول‌بندی دوم (FBTLP2) یک فرض اضافی همسایگی فازی نیز در نظر گرفته شده است. آن‌ها همسایگی فازی را به صورت یک مجموعه فازی با تابع عضویت زیر تعریف کردند:

$$\mu_{ij} = \begin{cases} ۱, & c_{ij} \leq r, \\ g(c_{ij}), & c_{ij} > r, \end{cases} \qquad (۲۳.۱)$$

که $g(x) : [r, +\infty) \to [۰, ۱]$ یک تابع اکیدا کاهشی است. به این معنی که، هر گره با یک مقدار عضویتی به همسایگی هر پایانه تعلق دارد. با توجه به این تعریف مجموعه‌ی J_i^* (۱۴.۱) به مجموعه‌ی J_i^+ تبدیل می‌شود:

$$J_i^+ = \{j \in J; \mu_{ij} > ۰\}. \qquad (۲۴.۱)$$

آن‌ها همچنین به جای مجموعه $j \in J_i^* : i \in I$ در کران قید (۱۷.۱)، مجموعه I_j^* را مشابه (۹.۱) تعریف کردند، که با توجه به همسایگی فازی تعریف شده، در مدل FBTLP2 به صورت زیر تغییر می‌کند:

$$I_j^+ = \{i \in I; \mu_{ij} > ۰\}. \qquad (۲۵.۱)$$

فرمول‌بندی FBTLP مشابه با فرمول‌بندی قطعی ارایه شده برای مساله‌ی مکان‌یابی پایانه‌ی اتوبوس‌رانی (مدل (۱۵.۱)-(۱۹.۱)) است. تفاوت آن‌ها تنها در تابع هدف است. تابع هدف FBTLP1 برابر است با:

$$Z_۱(x, y) = R(\sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i^*} \tilde{d}_j f(c_{ij}) x_{ij}), \qquad (۲۶.۱)$$

که $\tilde{d}_j$ یک عدد فازی[۱] به عنوان پتانسیل هر گره و R تابع رتبه‌بندی[۲] است (در فصل ۶ با اعداد فازی و تابع رتبه بندی آشنا می‌شوید).

[1] Fuzzy Number

[2] Ranking Function

@ORchannel

با تعریف تابع عضویت (۲۳.۱) و ضرب آن در تابع هدف FBTLP1، تابع هدف FBTLP2 به صورت زیر است:

$$Z_۲(x,y) = R(\sum_{i\in I}\sum_{j\in J_i^+} \tilde{d}_j f(c_{ij})\mu_{ij}x_{ij}). \qquad (۲۷.۱)$$

توجه داشته باشید که اگر در (۲۳.۱) قرار دهیم $g(c_{ij}) = ۰$، پس FBTLP1 و FBTLP2 معادل هستند.

در این مدل‌ها متغیر تخصیص x_{ij} به صورت باینری تعریف شده است. یعنی اگر گره j به پایانه i تخصیص داده شود تمام تقاضای آن برطرف می‌شود (یعنی: $x_{ij} = ۱$).

آن‌ها برای محاسبه تابع هدف متناظر با هر جواب شدنی y، دو الگوریتم مجزا ارایه کردند. در الگوریتم اول به منظور محاسبه‌ی $Z_۱$، هر گره به نزدیک‌ترین پایانه‌ی باز در داخل همسایگی‌اش اختصاص داده می‌شود. اگر چنین پایانه‌ای وجود نداشت مقدار x_{ij} برای هر $i \in I$ صفر می‌شود. بعد از پایان تخصیص‌ها و با توجه به رابطه‌ی (۲۶.۱) مقدار $Z_۱$ به راحتی قابل محاسبه است. برای محاسبه‌ی $Z_۲$، یک پرتویی برای گره j در همسایگی پایانه‌ی باز i در نظر گرفتند. اگر $\mu_{ij} = ۱$، مشابه با روش محاسبه‌ی $Z_۱$ مقدار x_{ij} برحسب فاصله تعیین می‌شود؛ در غیر این صورت x_{ij} براساس مقدار عضویتش تعیین می‌شود (یعنی گره j به پایانه‌ی بازی در درون همسایگی‌اش اختصاص داده می‌شود که بیشترین مقدار عضویت را دارد).

با توجه به NP-سخت بودن FBTLPs، آن‌ها از الگوریتم ژنتیک (GA) و الگوریتم سرد کاری تدریجی برای حل استفاده کردند، و الگوریتم ترکیبی HGASA را پیشنهاد کردند که در آن SA به عنوان عمل‌گر جستجوی محلی GA روی همه اشخاص جمعیت به کار می‌رود. سپس با تغییر HGASA، آن‌ها الگوریتم ترکیبی جدید NHGASA را ارایه کردند. استراتژی در نظر گرفته در این تغییر به این صورت است که در الگوریتم HGASA، با یک احتمال ثابت P_{SA}، الگوریتم SA روی بهترین اشخاص جمعیت جدید به کار گرفته شود. در آخر، چهار الگوریتم پیشنهادی را روی مسایلی که به صورت تصادفی ساخته شده بود، پیاده سازی کردند، سپس برای مقایسه‌ی عمل‌کرد الگوریتم‌ها از آزمون آماری Mann-Whitney استفاده کردند. با توجه به نتایج آماری و عددی، آن‌ها به این نتیجه رسیدند که الگوریتم ترکیبی NHGASA قوی‌تر و کاراتر از الگوریتم‌های دیگر است.

@ORchannel

یکی دیگر از روش‌های بهینه‌سازی تکاملی،الگوریتم بهینه‌سازی فاخته[۱](COA) است. این الگوریتم با الهام از روش زندگی پرنده‌ای به نام فاخته در سال ۲۰۰۹ توسط شین او یانگ[۲] و دب ساوش[۳] توسعه یافته است، و بعدها در سال ۲۰۱۱ توسط رجبیون به طور کامل با جزییات بیشتر مورد مطالعه قرار گرفت [۵۰]. در سال ۲۰۱۴ این الگوریتم روی نمونه‌ی کوچک مدل (۱۵.۱)-(۱۹.۱) پیاده سازی شد [۲۳]. کد طراحی شده برای این الگوریتم را به آسانی می‌توان برای هر نمونه مساله و هر پارامتر الگوریتم به طور دلخواه اجرا کرد.

در سال ۲۰۱۶ جنک[۴] و همکارانش [۲۰]، یک الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر موازی[۵] (PVNS) برای حل BTLP پیشنهاد کردند. با توجه به این که BTLP مشخصات دو مساله‌ی p-میانه و بیشترین پوشش را ترکیب می‌کند، آن‌ها الگوریتم جستجوی محلی استفاده شده در الگوریتم پیشنهادی را با ترکیب تغییر همسایه‌ی کارای به کار رفته شده برای p-MP [۳۵] و کاهش اندازه‌ی همسایگی برای قسمت بیشترین پوشش مساله، از نظر محاسباتی بهبود دادند. همچنین آن‌ها برای قسمت‌های زمان‌بر الگوریتم، یک استراتژی موازی سازی کم سطح[۶] به کار بردند.

ایده‌ی اصلی این تغییر سریع بر مبنای تبادل (اولین بار در [۵۷] معرفی شده است) به این مفهوم است که به ازای باز شدن یک پایانه‌ی بسته کدام پایانه‌ی باز بهتر است (از نقطه نظر مقدار تابع هدف) تا بسته شود. برخلاف مساله‌ی p-میانه که همه‌ی گره‌ها در همسایگی هر پایانه هستند، در BTLP، باز شدن پایانه i تنها روی گره‌های همسایه‌اش (J_i^*) اثر دارد. لذا به منظور پیدا کردن بهترین پایانه‌ی باز برای بسته شدن، به ازای باز شدن پایانه‌ی بسته i، اثر این باز شدن را روی گره‌های J_i^* بررسی کردند و گره بازی که در صورت بسته شدن کمترین کاهش را روی تابع هدف دارد به عنوان نماینده برای بستن انتخاب کردند. این کار پیچیدگی زمانی پیدا کردن بهترین تبادل را از $O(\sum_{i\in I\setminus S}|J|)$ به $O(\sum_{i\in I\setminus S}|J_i^*|)$ کاهش می‌دهد. لذا زمان محاسباتی به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. سپس آن‌ها برای مشاهده‌ی کارایی

[1] Cuckoo Optimization Algorithm
[2] Yang,X.S
[3] Deb,S
[4] Djeni´c
[5] Parallel Variable Neighborhood Search
[6] Low-Level Parallelism

@ORchannel

الگوریتم پیشنهادیشان، نتایج محاسباتی را با نتایج حاصل از نمونه‌های تولید شده در [۲۸] مقایسه کردند. همچنین آن‌ها این الگوریتم را روی نمونه‌های بزرگ rl از کتابخانه TSPLIB اجرا کردند. نتایج عددی نشان می‌دهد که نه تنها الگوریتم پیشنهادی، نتایج موجود را در زمان کمتر بهبود داد بلکه روی نمونه‌های بزرگ TSPLIB به خوبی عمل کرد.

اخیرا بابایی و همکارانش در گسترش از حالت مطالعه شده در [۱۰] به ارایه مدل و توسعه‌ی روش حل در [۱۱] پرداختند. آن‌ها تعداد پایانه‌ها را متغیر در نظر گرفتند و یک الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر ترکیبی برای حل آن پیشنهاد کردند.