





دانشکده مهندسی عمران
پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی راه و ترابری

بهینه سازی انتخاب مسیر و تخصیص ناوگان شبکه اتوبوس شهری با استفاده از یک روش فراابتکاری

نگارنده: محسن صادقی

استاد راهنما
دکتر ایمان آقایان

استاد مشاور
دکتر مهرداد غزنوی

بهمن ۱۳۹۶

شماره: ۹۲
تاریخ: ۱۵، ۱۱، ۹۲

باسمہ تعالیٰ



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسہ نہایی دفاع از پایان نامہ دورہ کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسہ دفاع از پایان نامہ کارشناسی ارشد خانم / آقای محسن صادقی با شماره دانشجویی ۹۴۱۰۹۱۴. رشتہ عمران گرایش راہ و ترابری تحت عنوان بہینہ سازی انتخاب مسیر و تخصیص ناوگان شبکہ اتوبوس شہری با استفادہ از یک روش فرا ابتکاری کہ در تاریخ ۱۳۹۶/۱۱/۳ با حضور ہیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید بہ شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجہ: عالی) ☒ ☐ مردود نوع تحقیق: نظری ☒ عملی ☐			
عضو ہیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبہ علمی	امضاء
۱- استادراہنمای اول	دکتر ایمان آقایان	استادیار	
۲- استادراہنمای دوم			
۳- استاد مشاور	دکتر مہرداد غزنوی	استادیار	
۴- نمایندہ تحصیلات تکمیلی	دکتر سیدعلی حسینی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر حسین قاسم زادہ طہرانی	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر عبدالاحد جویانی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکدہ:

تاریخ و امضاء و مہر دانشکدہ:

تبصرہ: در صورتی کہ کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامہ خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماہ برگزار شود).

تقدیم به:

پرو مادر عزیزم که همواره یآوری فداکار و تکیه گاهی مطمئن برایم بوده اند.

باتشکراز:

استاد گرامیم جناب آقای دکتر آقایان که صبورانه مرا در مراحل انجام این پژوهش راهنمایی نمودند و جناب آقای دکتر غزنوی که در این مسیر از هیچ کمکی دریغ نکردند.

تعهد نامه

اینجانب محسن صادقی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران-راه و ترابری دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بهینه‌سازی انتخاب مسیر و تخصیص ناوگان شبکه‌ی اتوبوس شهری با استفاده از یک روش فراابتکاری تحت راهنمایی دکتر ایمان آقایان به عنوان استاد راهنمای اول متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه / رساله توسط اینجانب انجام شده و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه/رساله تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرکی یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام << دانشگاه صنعتی شاهرود >> و یا <<Shahrood university of Technology >> به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افراد که در بدست آوردن نتایج اصلی پایان نامه / رساله تاثیر گذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه/رساله رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه/رساله، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه/رساله، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

تاریخ:

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق و نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحوی مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه / رساله بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیرشده پایان نامه / رساله وجود داشته باشد.

چکیده

وسایل نقلیه‌ی شخصی به دلیل داشتن مزایای خاص خود اولین انتخاب شهروندان برای سفرهای درون‌شهری هستند. کاهش زمان سفر و زمان انتظار در ایستگاه‌ها، پوشش حداکثری مناطق شهر و احساس راحتی از مهم‌ترین عواملی هستند که باعث می‌شوند شهروندان استفاده از شبکه‌ی حمل‌ونقل همگانی را به وسایل نقلیه‌ی شخصی خود ترجیح دهند. هدف از حل مسئله‌ی طراحی شبکه‌ی اتوبوس‌رانی و تعیین تواتر، یافتن مجموعه‌ای از مسیرهای بهینه در شبکه است که با توجه به محدودیت‌هایی مشخص، از جمله محدودیت بودجه‌ای سرویس‌دهنده، رضایت‌مندی مسافران را به دنبال داشته باشد. در این مطالعه روشی بر مبنای الگوریتم جستجوی فاخته برای حل مسئله‌ی طراحی شبکه‌ی اتوبوس‌رانی و تعیین تواتر پیشنهاد شد. در بخش اول به کمینه کردن هزینه‌ی مسافران و سرویس‌دهنده با استفاده از روش پیشنهادی پرداخته شد. در این بخش هزینه‌ی سرویس‌دهنده به تعداد ناوگان مورد نیاز برای بهره‌برداری در شبکه و هزینه‌ی مسافران به زمان انتظار، زمان سفر آنها درون اتوبوس و تعداد انتقال‌ها برای رسیدن به مقصد مرتبط بود. شبکه‌های بهینه‌ی به دست آمده با شبکه‌های حاصل از مطالعات قبلی در قالب پارمترهای عملکردی مقایسه شدند. در بخش دوم این مطالعه با در نظر گرفتن ناوگانی متشکل از اتوبوس‌های معمولی و اتوبوس‌های الکتریکی به عنوان راهی برای کاهش آلودگی‌های ناشی از شبکه‌ی اتوبوس شهری به حل مسئله پرداخته شد. تابع هدف این بخش علاوه بر هزینه‌های مسافران و سرویس‌دهنده شامل آلودگی تولید شده در شبکه‌ی اتوبوس‌رانی به عنوان هزینه‌ی جانبی بود. نتایج حاصل از مقایسه و بهینه‌سازی توابع هدف این مطالعه نشان‌دهنده‌ی کارکرد مناسب روش پیشنهادی بر اساس الگوریتم جستجوی فاخته در حل مسئله‌ی طراحی شبکه و تعیین تواتر بود.

کلمات کلیدی: حمل‌ونقل همگانی، طراحی بهینه‌ی شبکه‌ی اتوبوس‌رانی، تعیین تواتر، اتوبوس

الکتریکی، الگوریتم فراابتکاری

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه	۱
۱-۱ مقدمه	۲
۲-۱ ضرورت انجام تحقیق	۵
۳-۱ اهداف تحقیق	۶
۴-۱ نوآوری تحقیق	۷
۵-۱ ساختار تحقیق	۸
فصل دوم: مرور بر ادبیات موضوع	۹
۱-۲ تعاریف موجود و مسائل مرتبط	۱۰
۲-۲ روش‌های حل TNDSP	۱۱
۱-۲-۲ روش‌های معمولی	۱۳
۲-۲-۲ روش‌های ابتکاری و فراابتکاری	۱۳
۱-۲-۲-۲ حل TNDSP با ملاحظات زیست محیطی	۲۱
۳-۲ استفاده از الگوریتم جستجوی فاخته در مهندسی حمل و نقل	۲۴
۴-۲ جمع‌بندی	۲۵
فصل سوم: بیان مسئله و روش حل	۲۷
۱-۳ مقدمه	۲۸
۲-۳ تعاریف	۲۸
۳-۳ توابع هدف	۲۹
۱-۳-۳ تابع هدف شماره ۱	۲۹
۱-۳-۳-۱ فرض‌ها و محدودیت‌ها	۳۲
۲-۳-۳-۱ مؤلفه‌های تابع هدف شماره ۱	۳۳
۲-۳-۳-۲ تابع هدف شماره ۲	۳۴
۱-۲-۳-۳ فرض‌ها و محدودیت‌ها	۳۸

۳-۴	روش حل مسئله.....	۳۹
۳-۴-۱	تولید مجموعه مسیرهای اولیه.....	۴۰
۳-۴-۲	تخصیص سفر و محاسبه‌ی تواتر.....	۴۱
۳-۴-۲-۱	بررسی وجود مسیر مستقیم.....	۴۱
۳-۴-۲-۲	بررسی وجود گذرگاه با یک انتقال.....	۴۲
۳-۴-۲-۳	بررسی وجود گذرگاه با دو انتقال.....	۴۳
۳-۴-۲-۴	محاسبه‌ی تواتر.....	۴۶
۳-۴-۲-۵	محاسبه‌ی آلودگی.....	۴۷
۳-۴-۳	الگوریتم جستجوی فاخته.....	۴۸
۳-۴-۱	حل مسئله‌ی فروشنده دوره‌گرد.....	۵۰
۳-۴-۲	الگوریتم جستجوی فاخته برای حل TNDSP.....	۵۳
۳-۵	خلاصه.....	۵۶
فصل چهارم: نتایج حل مسئله		
۴-۱	مقدمه.....	۶۰
۴-۲	ورودی‌های مسئله.....	۶۰
۴-۳	اعتبار سنجی مدل تخصیص.....	۶۲
۴-۴	نتایج و بحث.....	۶۳
۴-۴-۱	تابع هدف شماره ۱.....	۶۳
۴-۴-۲	تابع هدف شماره ۲.....	۷۳
فصل پنجم: نتیجه‌گیری		
۵-۱	نتیجه‌گیری.....	۸۰
۵-۲	پیشنهاد برای مطالعه‌های بعدی.....	۸۰
پیوست		
مراجع		
		۸۶

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ رابطه‌ی بین سطح سرویس و تقاضای سفر برای خودروی شخصی و حمل‌ونقل همگانی..... ۳
- شکل ۱-۲ فرآیند طراحی اتوبوس همگانی (سیدر و ویسلون ۱۹۸۶)..... ۴
- شکل ۱-۳ ساختار مسائل مربوط به طراحی شبکه. (گویهایر و هاو، (۲۰۰۸))..... ۱۱
- شکل ۱-۳ نمونه‌ای از یک شبکه (گراف)..... ۲۹
- شکل ۲-۳ مثالی از یک شبکه‌ی متصل (سمت راست) و یک شبکه‌ی غیر متصل (سمت چپ)..... ۳۳
- شکل ۳-۳ فلوچارت روند کلی حل مسئله..... ۴۰
- شکل ۴-۳ فلوچارت تخصیص سفر و تعیین تواتر..... ۴۵
- شکل ۵-۳ نمایش کدگذاری کلیدی-تصادفی..... ۵۱
- شکل ۶-۳ نمایش کدگذاری جواب جدید..... ۵۱
- شکل ۷-۳ روند همگرایی الگوریتم در حل مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد (gr_17)..... ۵۲
- شکل ۸-۳ مثالی از روش ۱..... ۵۴
- شکل ۹-۳ فلوچارت روش ۱..... ۵۵
- شکل ۱۰-۳ مثالی از روش ۲..... ۵۵
- شکل ۱۱-۳ شبه‌کد روش پیشنهادی بر اساس الگوریتم جستجوی فاخته..... ۵۶
- شکل ۱۲-۳ فرآیند روش این مطالعه برای حل TNDSP..... ۵۷
- شکل ۱-۴ شبکه‌ی مبنای مندل..... ۶۰
- شکل ۲-۴ مجموعه مسیرهای بهینه‌ی مطالعه‌ی مندل (۱۹۸۰)..... ۶۲
- شکل ۳-۴ نمودار پراکنشی ناوگان مورد نیاز در برابر هزینه مسافر برای شبکه‌های بهینه‌ی سناریو ۶۸۱..... ۶۸
- شکل ۴-۴ مسیرهای بهینه برای شبکه‌ای با ۴ مسیر از سناریوی ۱..... ۶۹
- شکل ۵-۴ مسیرهای بهینه برای شبکه‌ای با ۶ مسیر از سناریوی ۱..... ۷۰
- شکل ۶-۴ مسیرهای بهینه برای شبکه‌ای با ۷ مسیر از سناریوی ۱..... ۷۱
- شکل ۷-۴ مسیرهای بهینه برای شبکه‌ای با ۸ مسیر از سناریوی ۱..... ۷۲
- شکل ۸-۴ نمودار پراکنشی ناوگان مورد نیاز در برابر هزینه مسافر برای شبکه‌های بهینه سناریو ۲... ۷۳
- شکل ۹-۴ شبکه‌ی مندل به همراه طول‌های فرض شده برای هر کمان..... ۷۴
- شکل ۱۰-۴ نمودار پراکنشی ناوگان مورد نیاز در برابر هزینه مسافر..... ۷۵
- شکل ۱۱-۴ نمودار پراکنشی ناوگان مورد نیاز در برابر آلودگی..... ۷۶
- شکل ۱۲-۴ نمودار پراکنشی آلودگی در برابر هزینه مسافر..... ۷۶
- شکل ۱۳-۴ آلودگی تولید شده نسبت به طول شبکه و تعداد اتوبوس‌های معمولی..... ۷۷
- شکل ۱۴-۴ تغییرات میانگین طول مسیر و ناوگان مورد نیاز در برابر تعداد مسیرها..... ۷۸

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲ خلاصه‌ی مطالعات انجام شده با روش‌های ابتکاری و فراابتکاری..... ۲۲
- جدول ۱-۳ عملکرد الگوریتم جستجوی فاخته در حل مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد..... ۵۲
- جدول ۱-۴ ماتریس مبدأ-مقصد برای ساعت اوج روزانه..... ۶۱
- جدول ۲-۴ نتایج مربوط به تخصیص سفر برای نتایج مطالعه‌ی مندل و مطالعه‌ی حاضر..... ۶۲
- جدول ۳-۴ جریمه‌های انتقال برای سناریوهای تعریف شده..... ۶۳
- جدول ۴-۴ جزئیات نتایج مربوط به مسیرهای بهینه‌ی مطالعه‌ی حاضر و مطالعات گذشته..... ۶۴
- جدول ۵-۴ جزئیات مربوط به شبکه‌ی ۸ مسیری از سناریوی ۱..... ۶۶
- جدول ۶-۴ اختلاف بین پارامترهای عملکردی شبکه‌های سناریوی ۱ و شبکه‌های مطالعات پیشین... ۶۷
- جدول ۷-۴ اختلاف بین پارامترهای عملکردی شبکه‌های سناریوی ۲ و شبکه‌های مطالعات پیشین... ۶۷
- جدول ۸-۴ پارامترهای فرض شده برای تابع هدف شماره ۲..... ۷۴
- جدول ۹-۴ پارامترهای ارزیابی شبکه‌های بهینه‌ی به‌دست آمده برای تابع هدف شماره‌ی ۲..... ۷۵
- جدول ۱۰-۴ جزئیات شبکه‌ی بهینه‌ی ۴ مسیری تابع هدف شماره‌ی ۲..... ۷۷

فهرست جدول‌های پیوست

۸۳	جدول پ-۱ جزئیات شبکه‌ی ۴ مسیری سناریوی ۱.....
۸۳	جدول پ-۲ جزئیات شبکه‌ی ۶ مسیری سناریوی ۱.....
۸۳	جدول پ-۳ جزئیات شبکه‌ی ۷ مسیری سناریوی ۱.....
۸۴	جدول پ-۴ جزئیات شبکه‌ی ۱۰ مسیری سناریوی ۱.....
۸۴	جدول پ-۵ جزئیات شبکه‌ی ۱۲ مسیری سناریوی ۱.....
۸۵	جدول پ-۶ جزئیات شبکه‌ی ۶ مسیری تابع هدف شماره‌ی ۲.....
۸۵	جدول پ-۷ جزئیات شبکه‌ی ۶ مسیری تابع هدف شماره‌ی ۲.....
۸۵	جدول پ-۸ جزئیات شبکه‌ی ۶ مسیری تابع هدف شماره‌ی ۲.....

فصل اول: مقدمه

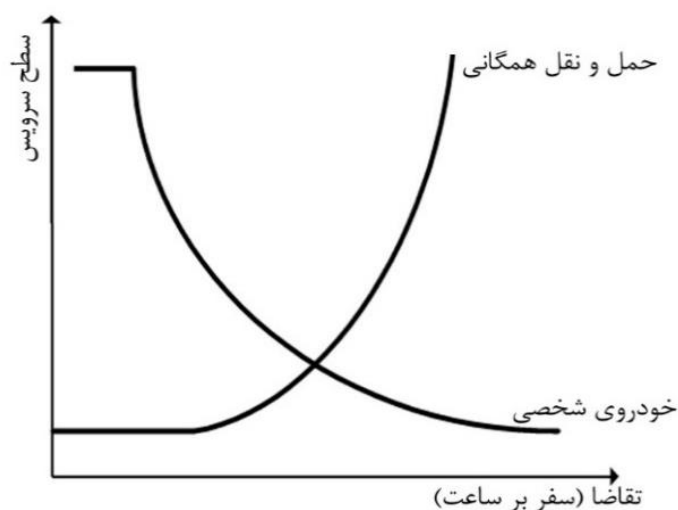
۱-۱ مقدمه

حمل و نقل یکی از عناصر اصلی ساختار اجتماعی، اقتصادی و فیزیکی یک محیط شهری است. حمل و نقل همگانی به عنوان یکی از بخش های اساسی حمل و نقل شهری همواره راه حلی مؤثر برای کاهش آلودگی هوا، کاهش مصرف انرژی، افزایش میزان جابه جایی کم کردن تراکم ترافیک بوده است. این موضوع به خصوص در کشورهایی که استفاده از وسایل نقلیه ی شخصی نسبت به حمل و نقل همگانی بیشتر است از اهمیت بالاتری برخوردار می باشد.

وسایل نقلیه ی شخصی به دلیل داشتن مزایای خاص خود اولین انتخاب شهروندان برای سفرهای درون شهری هستند. شهروندان برای سفر با اتومبیل شخصی منتظر رسیدن وسیله ی نقلیه برای شروع سفر خود نمی مانند. در اکثر موارد شبکه های مربوط به وسایل نقلیه ی شخصی نسبت به شبکه های حمل و نقل همگانی از توسعه یافتگی بیشتری برخوردارند در نتیجه افراد فاصله های کمتری را تا رسیدن به مقصد پیموده روی می کنند. از طرف دیگر آنها هنگام سفر با اتومبیل شخصی احساس راحتی بیشتری را نسبت به دیگر مدهای حمل و نقل شهری تجربه می کنند. بنابراین تا زمانی که سیستم حمل و نقل همگانی کارآمد، راحت و ارزان وجود نداشته باشد، نمی توان از شهروندان انتظار داشت که به جای خودروی شخصی از حمل و نقل همگانی استفاده کنند.

اتوبوس شهری به دلیل انعطاف پذیری و هزینه سرمایه گذاری اولیه بسیار پائین همواره مورد توجه برنامه ریزان شهری بوده است. به دلیل توسعه ی نامنظم شهرها میل مردم برای استفاده ی بیشتر از اتومبیل شخصی به منظور انجام سفرهای درون شهری به بحثی چالش برانگیز برای برنامه ریزان سیستم حمل و نقل همگانی تبدیل شده است. طبق آمار، اتوبوس شهری در جابه جایی سفرهای روزانه ی شهر تهران در سال ۱۳۹۴ سهمی ۲۰ درصدی را داشته در حالی که این عدد برای سواری شخصی معادل ۴۰ درصد بوده است (گزیده ی آمار حمل و نقل ترافیک تهران، ۱۳۹۵).

تفاوت اصلی بین حمل و نقل همگانی و خودروی شخصی را می توان در شکل ۱-۱ دید. با فرض قابل قبول بودن همیشگی سطح سرویس^۱ و کافی بودن گنجایش سیستم حمل و نقل همگانی (تواتر^۲ هر مسیر بر اساس تقاضای سفر آن تعیین شده باشد) انتظار می رود که با افزایش تقاضا، سطح سرویس ارائه شده توسط حمل و نقل همگانی بهبود یابد چرا که ممکن است سرفاصله ها^۳ کوتاه تر شوند و بنابراین امکان استفاده ی بیشتر از حمل و نقل همگانی به دلیل کاهش زمان انتظار فراهم شود. در طرف مقابل سطح سرویس وسایل نقلیه ی شخصی به دلیل بروز تراکم ترافیک ناشی از بالارفتن تقاضا کاهش می یابد. چنین خاصیتی سیستم حمل و نقل همگانی را از خودروهای شخصی متمایز می کند و اهمیت خود را به عنوان یک راه حل در حمل و نقل شهری به منظور داشتن توجه بیشتر به آن نمایان می کند.



شکل ۱-۱ رابطه ی بین سطح سرویس و تقاضای سفر برای خودروی شخصی و حمل و نقل همگانی

برای اولین بار سیدر و ویلسون^۴ (۱۹۸۶) فرآیند طراحی اتوبوس همگانی^۵ را به پنج سطح تقسیم کردند:

^۱ Level of service

^۲ Frequency

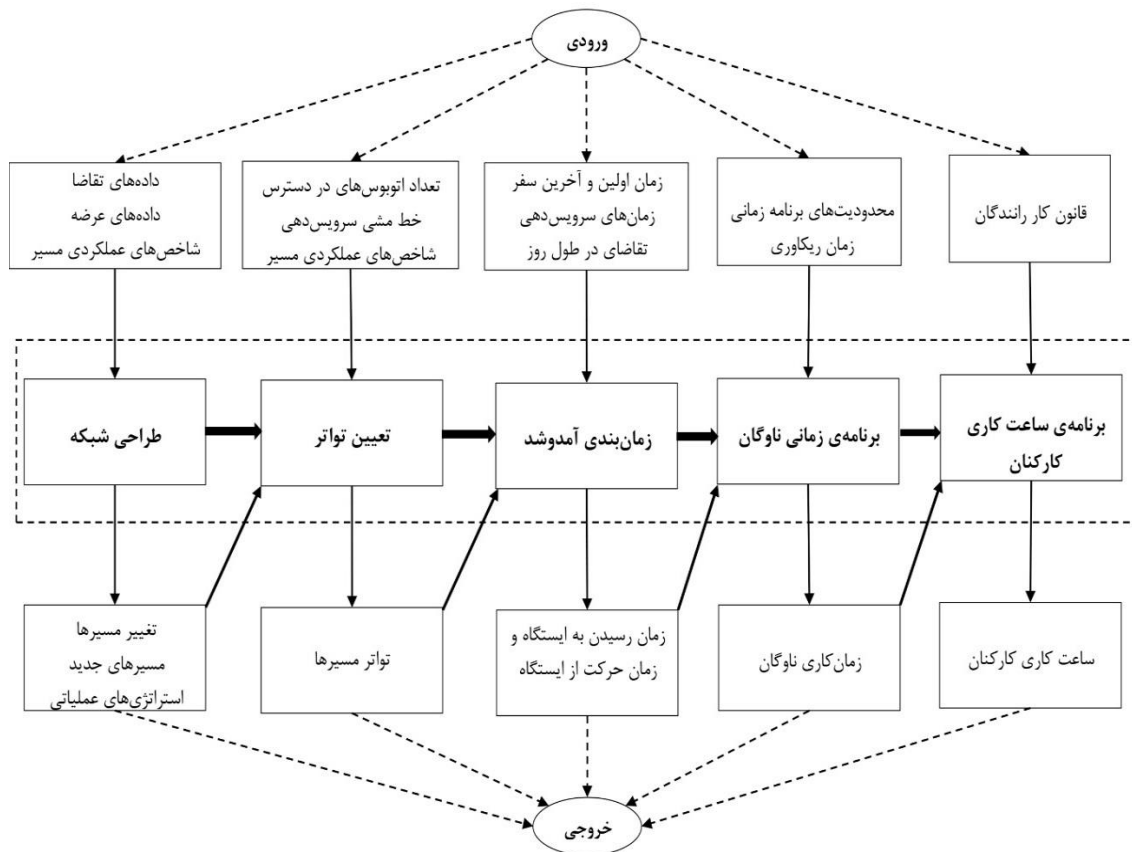
^۳ Headway

^۴ Ceder and Wilson

^۵ Bus planning process

(۱) طراحی شبکه^۱ (۲) تعیین تواتر^۲ (۳) زمان‌بندی آمودشد^۳ (۴) برنامه‌ی زمانی ناوگان^۴ (۵) برنامه‌ی ساعات کاری کارکنان^۵ بود.

مطابق شکل ۲-۱، خروجی سطح واقع شده در سمت چپ، ورودی سطح پایین‌تر در سمت راست خود است.



شکل ۲-۱ فرآیند طراحی اتوبوس همگانی (سیدر و ویسلون ۱۹۸۶)

بهترین شبکه زمانی به دست خواهد آمد که همه‌ی این سطوح به صورت همزمان بهینه شوند، اما به دلیل پیچیدگی مسئله مطالعه‌ای با در نظر داشتن همزمان تمام سطوح انجام نگرفته است.

^۱ Network design
^۲ Frequency setting
^۳ Timetable development
^۴ Vehicle scheduling
^۵ Crew scheduling

مسئله‌ی مورد بررسی در این مطالعه، طراحی مسیرهای شبکه و تعیین تواتر^۱ آنها است که به دو بخش اول فرآیند برنامه‌ریزی شبکه‌ی اتوبوس شهری مربوط می‌شود.

۱-۲ ضرورت انجام تحقیق

به طور کلی مسائل مربوط به طراحی شبکه‌ی حمل‌ونقل همگانی شامل کمینه‌سازی (یا بیشینه‌سازی) چند هدف مورد نظر با توجه به وجود انواعی از محدودیت‌ها می‌شود. این محدودیت‌ها بیانگر الزامات عملکردی سیستم و محدودیت منابع هستند. در دهه‌های گذشته محققان مطالعات متنوعی را در زمینه طراحی شبکه اتوبوس انجام داده‌اند که همچنان بسیاری از روش‌ها به انگیزه برنامه‌ریزان، تجربه و دانسته‌های آنان از شبکه موجود بستگی دارد.

مهمترین ویژگی‌های نشان‌دهنده‌ی کیفیت خدمت‌دهی اتوبوس شهری از نظر مسافران کم‌بودن زمان انتظار در ایستگاه و زمان سفر درون اتوبوس است که این موضوع نیازمند تعداد اتوبوس‌های بیشتر در شبکه برای خدمت‌دهی بهتر است. از طرف دیگر، به دلیل محدودیت‌هایی که سرویس‌دهنده^۲ از نظر مالی با آن‌ها مواجه است تعداد اتوبوس‌های مورد بهره‌برداری نمی‌تواند از حد مشخصی بیشتر باشد.

از طرف دیگر، یکی از منابع اصلی آلودگی هوا و گازهای گلخانه‌ای مربوط به بخش حمل‌ونقل شهری است. سهم منابع متحرک از کل آلودگی شهر تهران ۸۵/۱ درصد می‌باشد (گزارش کیفیت هوای تهران؛ ۱۳۹۵). وسایل نقلیه‌ی سنگین شهر تهران (مینی‌بوس، اتوبوس و کامیون) ۲/۴ درصد از کل ناوگان این شهر را تشکیل می‌دهند اما سهم آنها در تولید آلاینده‌های اکسیدهای نیتروژن^۳، اکسیدهای گوگرد^۴ و ذرات معلق^۵ به ترتیب ۴۱، ۶۵ و ۸۴ درصد است (شهبازی و همکاران؛ ۲۰۱۶). طبق آمار سازمان حفاظت محیط زیست^۶ که در سال ۲۰۱۴ منتشر شد، ۲۸ درصد از گازهای گلخانه‌ای تولید شده

^۱ Transit Network Design and Frequency Setting Problem (TNDFSP)

^۲ Operator

^۳ NO_x

^۴ SO_x

^۵ Particulate Matters (PM)

^۶ Environmental Protection Agency (EPA)

در کشور آمریکا مربوط به بخش حمل و نقل است که از این نظر رتبه دوم را بعد از بخش تولید نیروی برق دارد. بخش حمل و نقل همگانی در آمریکا حدود ۱۳ میلیون تن دی اکسید کربن در سال ۲۰۰۵ تولید کرده است داویس و هال^۱ (۲۰۰۷).

به منظور کاهش آلودگی تولیدی از حمل و نقل همگانی مسئولین شهری در انجمن UITP^۲ طرحی به نام ژئوس^۳ را ارائه دادند. طبق این طرح تعداد اتوبوس‌های درون‌شهری که از سوخت پاک استفاده می‌کنند افزایش و تعداد اتوبوس‌های سوخت فسیلی به همان تعداد کاهش می‌یابند. همچنین به دلیل هزینه‌ی زیاد خرید اتوبوس‌های الکتریکی و امکانات مورد نیاز آنها در طی دوره‌ی بهره‌برداری (مانند داشتن ایستگاه‌های شارژ) این موضوع اثر مستقیمی بر روی هزینه‌های سرویس‌دهنده دارد. بنابراین لازم است تخصیص ناوگان به گونه‌ای صورت گیرد که با توجه به بودجه‌ی سرویس‌دهنده و تعداد محدود اتوبوس‌های الکتریکی بهترین استفاده از آنها برای پوشش حداکثری سفرها و کاهش آلودگی در شبکه صورت گیرد.

با توجه به موارد اشاره شده، لازم است که مسیرهای یک شبکه‌ی اتوبوس‌رانی به گونه‌ای طراحی شوند که موجب تعادل بین هزینه‌های مسافر^۴، سرویس‌دهنده^۵ و هزینه‌های جانبی^۶ شود.

۳-۱ اهداف تحقیق

ساختار کلی این مطالعه به دو بخش تقسیم شده است. هدف از بخش اول بررسی کارآمدی روشی برپایه‌ی الگوریتم جستجوی فاخته^۷ (به عنوان یک روش فراابتکاری جدید) در حل مسئله‌ی طراحی شبکه‌ی اتوبوس‌رانی و تعیین تواتر به عنوان دو سطح اول از فرآیند برنامه‌ریزی شبکه‌ی اتوبوس شهری بود. تابع هدف مسئله در این بخش متشکل از هزینه‌ی سرویس‌دهنده (تعداد اتوبوس‌های سرویس

^۱ Davis and Hale

^۲ International Association of Public Transport

^۳ Zero Emission Urban Bus System (ZeEUS)

^۴ User costs

^۵ Operator costs

^۶ External costs

^۷ Cuckoo Search algorithm (CS algorithm)

دهنده) و هزینه‌ی مربوط به مسافران (زمان انتظار و زمان سفر) بود. هدف از بخش دوم در نظر گرفتن هزینه‌ی جانبی در تابع هدف دوم این مطالعه و کمینه‌کردن مجموع هزینه‌های این تابع بود. به این منظور در بخش دوم با فرض ناوگانی متشکل از اتوبوس‌های الکتریکی و اتوبوس‌های معمولی (سوخت فسیلی) آلودگی تولید شده در شبکه به عنوان هزینه‌ی جانبی^۱ در نظر گرفته شد.

۴-۱ نوآوری تحقیق

در مطالعات گذشته برای حل مسائل مربوط به حمل‌ونقل همگانی از الگوریتم‌های فراابتکاری^۲ به عنوان روش حلی مناسب استفاده شده است. یکی از ویژگی‌های اصلی این روش‌ها کاربرد آنها در مسائل مختلف بهینه‌سازی با محدودیت‌ها و توابع هدف متفاوت است. در این مطالعه روشی بر پایه‌ی الگوریتم جستجوی فاخته به عنوان یک الگوریتم فراابتکاری جدید پیشنهاد شد. با مروری بر کارهای گذشتگان مطالعات زیادی در مورد مسائل مربوط به طراحی شبکه‌ی حمل‌ونقل همگانی وجود دارد که با روش‌ها و توابع هدف مختلف به حل این مسئله پرداخته شده است. در این مطالعه برای حل TNDSP از الگوریتمی بر پایه‌ی الگوریتم جستجوی فاخته استفاده شد. به این منظور، روش پیشنهادی بر روی شبکه‌ی مندل (۱۹۸۰) به عنوان شبکه‌ای مبنا در مطالعات مربوط به حمل‌ونقل همگانی اعمال شد. همچنین، با در نظر گرفتن آلودگی تولید شده در شبکه به عنوان هزینه‌ی جانبی، با دیدگاهی زیست محیطی به طراحی مسیرهای شبکه و تعیین تواتر آنها پرداخته شد؛ موضوعی که در مطالعات گذشته در این حوزه کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور پرداختن به مؤلفه‌ی سوم تابع هدف (هزینه‌ی جانبی) ناوگانی متشکل از اتوبوس‌های الکتریکی و اتوبوس‌های معمولی (سوخت فسیلی) فرض شد. این تابع هدف به همراه یک ناوگان ترکیبی برای اولین بار است در این مطالعه بر روی شبکه‌ی مندل مورد بررسی قرار گرفت.

^۱ External cost

^۲ Metaheuristic algorithms

۵-۱ ساختار تحقیق

به منظور آشنایی با ساختار کلی پایان نامه، توضیح کوتاهی از هر فصل در زیر آورده شده است.

در فصل دوم مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه‌ی طراحی شبکه‌ی اتوبوس‌رانی ارائه شده است. تقسیم بندی مطالعات در این فصل اساس روش‌های مورد استفاده‌ی مطالعات به منظور حل مسائل مربوط به طراحی شبکه است. در بخش آخر این فصل به مطالعاتی اشاره شده است که در حوزه‌ی حمل‌ونقل و ترافیک از الگوریتم جستجوی فاخته برای حل مسئله مورد بررسی خود استفاده کردند.

فصل سوم به بیان مسئله و روش حل آن می‌پردازد. در این فصل پس از تشریح دو تابع هدف مورد مطالعه در این تحقیق به روش حل مسئله‌ی طراحی شبکه‌ی اتوبوس‌رانی و تعیین تواتر پرداخته شده است. روش حل مورد استفاده از سه بخش: تولید مجموعه مسیرهای اولیه، تخصیص سفر و محاسبه‌ی تواتر و روش فراابتکاری پیشنهادی تشکیل شده است.

فصل چهارم بحث و بررسی در مورد نتایج از حل مسئله است. در این فصل به مقایسه‌ی نتایج حاصل از حل TNDSP توسط روش پیشنهادی این تحقیق با نتایج حاصل از مطالعات قبلی پرداخته شده است. همچنین در این فصل، شبکه‌های بهینه‌ی حاصل از حل مسئله با تابع هدف دوم این تحقیق با یکدیگر مقایسه شده‌اند و فاکتورهای مختلفی که بر پارامترهای عملکردی این شبکه‌ها اثرگذار بودند مورد بررسی قرار گرفته است.

در فصل پنجم، نتیجه‌گیری‌های اصلی مدل‌سازی ذکر شده و در ادامه پیشنهاداتی برای انجام مطالعات در آینده ارائه شده است.

فصل دوم: مرور بر ادبیات موضوع

۲-۱ تعاریف موجود و مسائل مرتبط

در مطالعه‌ی انجام شده توسط فراهانی و همکاران (۲۰۱۳)، به مرور تعاریف، طبقه‌بندی‌ها، توابع هدف، محدودیت‌ها و روش‌های مورد استفاده در این حوزه پرداخته شده است. آنها پس از مرور بر تعاریف مختلف برای مسئله‌ی طراحی شبکه‌ی حمل‌ونقل همگانی شهری^۱ سه تعریفی که بیشتر در ادبیات موضوع مورد استفاده قرار گرفته است را ارائه دادند:

۱. UTNDP به ساخت مسیرهای جدید یا افزایش ظرفیت مسیرهای موجود مرتبط می‌شود

(دانتزیگ و همکاران^۲، ۱۹۷۹). این تعریف متدال‌ترین تعریف بیان شده در ادبیات

موضوع است اما مطالعات زیادی نیز از اسامی دیگری برای این مسئله از جمله: مسئله‌ی

طراحی شبکه‌ی راه‌ها^۳ (RNDP) استفاده می‌کنند.

۲. UTNDP تعیین بهینه‌ی موقعیت تسهیلاتی است که به شبکه‌ی حمل‌ونقل اضافه

می‌شوند، یا تعیین ظرفیت بهینه‌ی تسهیلات موجود در شبکه است (فریز^۴، ۱۹۸۵). این

تعریف از تعریف اول گسترده‌تر است.

۳. UTNDP یک فرآیند کامل سلسله‌مراتبی در تصمیم‌گیری برای برنامه‌ریزی حمل‌ونقل

است و شامل تصمیم‌های استراتژیک، تاکتیکی و عملیاتی است (مگنانتی و ونگ^۵،

۱۹۸۴).

گویه‌ایر و هاو^۶ (۲۰۰۸) شیوه‌ای را برای نام‌گذاری مسائل مربوط به مسئله‌ی طراحی شبکه‌ی

حمل‌ونقل همگانی^۷ بر اساس سطوح معرفی شده توسط سیدر و ویلسون (۱۹۸۶)، که در بخش قبل

معرفی شد، ارائه دادند. برای مثال در سه سطح اول از این فرآیند که اکثر مطالعات موجود در ادبیات

^۱ Urban Transit Network Design Problem (UTNDP)

^۲ Dantzig et al

^۳ Road Network Design Problem (RNDP)

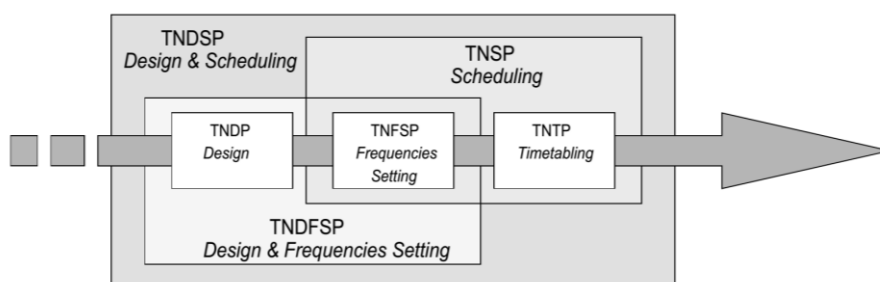
^۴ Friesz

^۵ Magnanti and Wong

^۶ Guihaire and Hao

^۷ Public Transit Network Design Problem (PTNDP)

موضوع مربوط به همین سطوح است؛ به این ترتیب نام‌گذاری شدند: مسئله‌ی طراحی شبکه‌ی حمل‌ونقل همگانی^۱ (TNDP)، مسئله‌ی تعیین تواتر شبکه‌ی حمل‌ونقل همگانی^۲ (TNFSP) و مسئله‌ی تعیین برنامه‌ی زمانی شبکه‌ی حمل‌ونقل همگانی^۳ (TNTP). ترکیب‌های این سطوح با هم نیز از قاعده‌ای برای نام‌گذاری پیروی کردند به طور مثال ترکیب دو سطح اول که مربوط به طراحی و تعیین تواتر است به این شکل نام‌گذاری شد (TNDFSP = TNDP+TNFSP). شکل ۱-۲ ساختار نام‌گذاری مسائل مربوط به طراحی شبکه را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۲ ساختار مسائل مربوط به طراحی شبکه. (گویه‌ایر و هاو، (۲۰۰۸))

۲-۲ روش‌های حل TNDFSP

در مطالعه‌ی جامعی که توسط کپاتسگلو و کارلفتیس^۴ (۲۰۰۹) انجام شد روش‌های حل مسئله‌ی طراحی شبکه‌ی حمل‌ونقل همگانی به دو دسته‌ی کلی تحت عنوان روش‌های معمولی^۵ (مدل‌های تحلیلی^۶ و فرمولاسیون برنامه‌ریزی ریاضی^۷) و روش‌های ابتکاری^۸ (الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری) تقسیم‌بندی شدند. در این پایان‌نامه نیز از همان تقسیم‌بندی برای بررسی مطالعات انجام شده در ادبیات موضوع

^۱ Transit Network Design Problem (TNDP)

^۲ Transit Network Frequency Setting Problem (TNFSP)

^۳ Transit Network Timetabling Problem (TNTP)

^۴ Kepaptsoglou and Karlaftis

^۵ Conventional Methods

^۶ Analytical Models

^۷ Mathematical programming formulations

^۸ Conventional and heuristic approaches

استفاده شد. علاوه بر دو دسته از مطالعات اشاره شده، به روش‌های مبتنی بر راهنماهای کاربردی و دستورالعمل‌های ویژه^۱ نیز پرداخته شده است.

برنامه‌ریزان و محققین حوزه‌ی حمل‌ونقل همگانی برای حل مسئله‌ی طراحی شبکه‌ی اتوبوس شهری برای تعیین محدودیت‌های مختلف که از نظر عملیاتی مناسب باشند به دستورالعمل‌ها و راهنماهای کاربردی مراجعه می‌کنند. گزارش شماره‌ی ۶۹ NCHRP^۲ پیشنهادهایی را برای برنامه‌ریزی خدمات ارائه داده است که برنامه‌ریزان می‌توانند برای حل مسئله از آن استفاده کنند. این پیشنهادها با توجه به الگوهای سرویس^۳ مواردی مانند: ناحیه‌ی سرویس‌دهی^۴ و پوشش مسیر^۵، ساختار و فاصله‌ی مسیر^۶، طول مسیر^۷ و با توجه به سطح سرویس^۸ مواردی مانند: بازه‌ی سرویس^۹، سرفاصله‌ی مطلوب^{۱۰} و حداقل تواتر^{۱۱}، استانداردهای بارگذاری^{۱۲} و سرعت را شامل می‌شود.

بسیاری از ارگان‌های تصمیم‌گیرنده حوزه‌ی حمل‌ونقل همگانی با تکیه بر تجربه‌ی متخصصین و استفاده از این راهنماها به جای استفاده از روش‌های تئوری راهکاری را برای حل مشکل در کوتاه مدت ارائه می‌دهند. هر چند استفاده از این راهنما برای حل بهینه‌ی مسئله کافی نیست اما عدم رعایت آنها باعث ناکارآمدی راه حل خواهد شد.

در سال‌های اخیر تمرکز محققین بر روی استفاده از روش‌های ریاضی برای حل مسئله طراحی شبکه‌ی اتوبوس بوده است.

^۱ Practical guidelines and ad hoc procedures

^۲ National Cooperative Highway Research Program

^۳ Service patterns

^۴ Service Period

^۵ Service Area and Route Coverage

^۶ Route Structure and Spacing

^۷ Route Length

^۸ Service Levels

^۹ Service Period

^{۱۰} Policy Headways Desirable

^{۱۱} Frequency

^{۱۲} Loading Standards

۲-۲-۱ روش‌های معمولی

روش‌های معمولی در اصل روش‌های بهینه‌سازی تحلیل هستند و با کمی تعمیم شامل فرمولاسیون‌های برنامه‌ریزی ریاضی^۱ می‌شوند. مدل‌های بهینه‌سازی تحلیلی در مراحل اولیه‌ی مطالعات مربوط به مسئله‌ی طراحی شبکه مورد استفاده قرار گرفتند. این روش‌ها به جای تعیین همزمان ساختار شبکه و پارامترهای طراحی، عمدتاً به منظور تعیین یک یا چند پارامتر (مانند محل ایستگاه‌ها، محل مسیرها، طول مسیر، اندازه‌ی اتوبوس، تواتر سرویس‌دهی) بر روی شبکه‌ای با ساختار از پیش مشخص شده مورد استفاده قرار می‌گرفتند. اولین مدل‌های تحلیلی برای حل مسئله‌ی طراحی شبکه توسط هالروید^۲ (۱۹۶۷) هاردل^۳ (۱۹۷۳)، بایرن^۴ (۱۹۷۵، ۱۹۷۶)، نویل^۵ (۱۹۷۹)، کوکور و هندریکسان^۶ (۱۹۸۲) و لبلانک^۷ (۱۹۸۸) مورد استفاده قرار گرفتند.

این مدل‌ها در مسائل بهینه‌سازی مربوط به شبکه‌های کوچک با یک یا دو متغیر تصمیم‌گیری بسیار کارآمد هستند. معایب این مدل‌ها توسط برخی از محققین بیان شده است، سیدر^۸ (۲۰۰۱) اشاره کرد که این مدل‌ها در مواردی که تخمینی از مقادیر پارامترهای طراحی نیاز باشد قابل استفاده هستند نه در مواردی که نیاز به انجام طراحی کامل باشد.

به دلیل پیچیدگی ذاتی این مسئله در مطالعات بعدی روش‌های ابتکاری و فراابتکاری برای حل مسئله مورد استفاده قرار گرفتند.

۲-۲-۲ روش‌های ابتکاری و فراابتکاری

روش‌های جستجوی ابتکاری روش‌هایی هستند که می‌توانند جواب مطلوب را (نزدیک به بهینه)

^۱ Mathematical Programming Formulation

^۲ Holroyd

^۳ Hurdle

^۴ Byrne

^۵ Newell

^۶ Kocur, and Hendrickson

^۷ Leblanc

^۸ Ceder

در زمانی محدود برای یک مسئله ارائه کنند. روش‌های جستجوی ابتکاری اغلب بر مبنای روش‌های شمارشی هستند، با این تفاوت که از اطلاعات اضافی برای هدایت جستجو استفاده می‌کنند. این روش‌ها به طور کامل عمومی هستند و می‌توانند مسائل بسیار پیچیده را حل کنند. عمده این روش‌ها، تصادفی بوده و از طبیعت الهام گرفته شده‌اند. در سال‌های اخیر یکی از مهم‌ترین و امیدبخش‌ترین تحقیقات، "روش‌های فراابتکاری برگرفته از طبیعت" بوده است؛ این روش‌ها شباهت‌هایی با سیستم‌های اجتماعی و یا طبیعی دارند. کاربرد آنها برگرفته از روش‌های ابتکاری پیوسته می‌باشد که در حل مسائل "مشکل ترکیبی"^۱ نتایج بسیار خوبی را به همراه داشته است. مسائل مشکل ترکیبی مسائلی هستند که همگام با افزایش ابعاد مسئله فضای شدنی^۲ به صورت چشم‌گیری افزایش یابد. (صمدزادگان و علیزاده نایینی، ۱۳۹۰)

. روش‌های فراابتکاری دارای ویژگی‌های مشترک زیر هستند (یقینی و اخوان کاظم‌زاده، ۱۳۹۰)

- این روش‌ها همگی تا حدودی احتمالی هستند، چنین رویکردی این امکان را می‌دهد که از قرار گرفتن الگوریتم در دام بهینه‌های محلی^۳ جلوگیری شود؛
- این روش‌ها معمولاً از مفاهیم زیست‌شناسی، رفتارشناسی جانوری و فیزیک الهام گرفته شده‌اند؛
- یکی از عیب‌های مشترک در این روش‌ها دشوار بودن تنظیم دقیق پارامترها است.

اولین بار لمپکین و سالمانز^۴ (۱۹۶۷) از الگوریتمی ابتکاری برای حل مسئله طراحی شبکه حمل‌ونقل همگانی استفاده کردند. آنها مدلی بهینه‌سازی را پیشنهاد دادند. در مرحله اول مطالعه‌ی آنها شبکه‌ی اتوبوس همگانی با استفاده یک روش ابتکاری و با هدف بیشینه‌کردن جابه‌جایی بیشترین تعداد مسافر تحت ماتریس O-D^۵ ثابت طراحی شد. در مرحله‌ی بعد سرویس‌دهنده‌ها به گونه‌ای به مسیرهای

^۱ NP-Hard

^۲ Feasible solution

^۳ Local optimum

^۴ Lampkin and Saalmans

^۵ Origin-Destination matrix (O-D matrix)

ایجاد شده اختصاص داده شدند که مجموع زمان سفر با توجه به تعداد مشخصی از اتوبوس‌های در دسترس، به حداقل برسد.

سیلمان و همکاران^۱ (۱۹۷۴) روشی را برای طراحی شبکه‌ی اتوبوس شهری با هدف کاهش مجموع زمان سفر (با در نظر گرفتن زمان انتقال‌ها^۲) و جریمه^۳ (برای عدم راحتی مسافرانی که صندلی برای نشستن ندارند) ارائه کردند.

مندل^۴ (۱۹۸۰) از روش تخصیص سفر تک مسیری با این فرض که مسافران هنگام سفر بین مبدأ و مقصدی مشخص از مسیر با کمترین زمان سفر وزندهی^۵ شده استفاده می‌کنند. او برای حل مسئله‌ی طراحی شبکه روشی دو مرحله‌ای ارائه داد. در مرحله اول از مطالعه‌ی او مجموعه‌ای از مسیرهای شدنی^۶ ساخته شد و سپس با اعمال روشی ابتکاری کیفیت مسیرهای اولیه بهبود یافت. در مطالعه‌ی مندل تنها فاکتور برای برآورد کیفیت مسیرها زمان سفر داخل وسیله نقلیه بود. شبکه‌ی مورد بررسی شامل ۱۵ شهر از کشور سوئیس بود که به طور گسترده در مطالعات محققان بعدی به عنوان یک شبکه مبنا مورد استفاده قرار گرفت.

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد سیدر و ویلسون (۱۹۸۶) طراحی شبکه‌ی اتوبوس‌رانی را به صورت زمینه‌ای برای دیگر عملکردهای سرویس دهی مثل تعداد ناوگان، زمان‌بندی رفت و آمد، برنامه‌ی کاری اتوبوس‌ها و رانندگان در نظر گرفتند. آنها روشی دو سطحی را برای طراحی شبکه‌ی اتوبوس‌رانی ارائه دادند که در سطح اول تنها دیدگاه مسافر را در نظر می‌گرفت و سطح دوم دیدگاه مسافر و سرویس‌دهنده را در نظر داشت. محدودیت‌های در نظر گرفته شده اتوبوس‌ها و اندازه ناوگان بود.

¹ Silman et al.

² Transfer times

³ Penalty

⁴ Mandl

⁵ The single least weighted cost path

⁶ Feasible routes

باچ و محمسانی^۱ (۱۹۹۱) روشی بر پایه هوش مصنوعی^۲ که توسط دانش و تجربه‌ی متخصص برای کاهش فضای جستجو همراه بود ارائه دادند. پتنائیک و همکاران^۳ (۱۹۹۸) مسئله طراحی شبکه اتوبوس شهری را با تقاضای ثابت به صورت مسئله‌ی بهینه‌سازی به منظور کمینه کردن مجموع هزینه‌ها (یعنی مجموع زمان سفر مسافر و هزینه‌های سرویس‌دهنده) فرمول‌بندی کردند. در مطالعه‌ی آنها از مدلی برپایه الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله استفاده شد.

بیلی و همکاران^۴ (۲۰۰۲) با استفاده از الگوریتم ژنتیک به بهینه‌سازی مسئله‌ای دوهدفه که شامل تقاضای سفر مسافرین و عرضه‌ی مناسب برای آنها بود پرداختند. آنها با استفاده از یک تحلیل چند معیاره (با در نظر گرفتن ۲۴ معیار مختلف) به محاسبه تابع برازندگی^۵ پرداختند. در مرحله بعد روش پیشنهادی خود را بر روی شبکه‌ی اتوبوس شهری پارما در ایتالیا پیاده کردند.

چاکرورتی و ویدی^۶ (۲۰۰۲) مسئله‌ی طراحی شبکه‌ی اتوبوس شهری را به دو بخش اصلی مسیریابی بهینه^۷ و زمان‌بندی^۸ تقسیم کردند. آنها در مطالعه‌ی اول خود با استفاده از روشی تکراری که شامل سه مرحله بود ابتدا مجموعه‌ای از شبکه‌های شدنی و سپس در مرحله‌ی ارزیابی، برازندگی هر یک از شبکه‌ی مسیرها تعیین شد. در مرحله‌ی سوم از الگوریتم ژنتیک به منظور بهبود شبکه‌ی مسیرها و ایجاد جواب‌های جدید استفاده شد. در مطالعه‌ی دیگر توسط چاکرabortی در سال ۲۰۰۳ هر دو مسئله‌ی مسیریابی و زمان‌بندی با اعمال بر روی شبکه‌ی مندل مورد بررسی قرار گرفت.

فاکسو و همکاران^۹ (۲۰۰۲) روشی را برای طراحی و تخصیص ناوگان اتوبوس شهری با هدف کمینه‌سازی

^۱ Baaj and Mahmassani

^۲ Artificial Intelligence

^۳ Pattnaik et al.

^۴ Bielli et al.

^۵ Fitness function

^۶ Chakroaborty and Wivedi

^۷ Urban transit routing problem

^۸ Urban transit scheduling problem

^۹ Fucso et al.

مجموع هزینه‌های سیستم پیشنهاد دادند. روش آنها که بر پایه الگوریتم ژنتیک، ترکیبی از روش‌های پیشنهادی توسط باج و محمسانی (۱۹۹۱) و پتایک و همکاران (۱۹۹۸) بود.

تام و موهان^۱ (۲۰۰۳) از روشی دو مرحله‌ای برای کمینه کردن زمان سفر مسافری و هزینه‌ی سرویس‌دهنده در شبکه‌ی اتوبوس شهری استفاده کردند. در مرحله‌ی اول روش حل آنها از الگوریتمی برای تولید انبوهی از جواب‌های (شبکه‌ی مسیرها) اولیه استفاده شده و در فاز دوم توسط الگوریتم ژنتیک شبکه‌ی مسیرها انتخاب شدند. روش پیشنهادی آنها بر روی شبکه‌ای در شهر چنای^۲ که متشکل از ۷۵ گره و ۱۲۵ کمان بود اعمال شد.

به منظور بیشینه‌سازی پوشش سرویس‌دهی و در نظر گرفتن قیدهایی مانند اندازه‌ی ناوگان، زمان سفر و زمان انتظار مسافران نامچای و لول^۳ (۲۰۰۳) به حل مسئله‌ی پیدا کردن بهترین مسیرهای شبکه‌ی اتوبوس‌رانی پرداختند. هدف اصلی آنها یافتن بهترین عملگر برای الگوریتم ژنتیک در این مسئله‌ی بهینه‌سازی بود، به همین منظور آنها از هفت عملگر مختلف در الگوریتم ژنتیک به منظور ایجاد مسیرهای جدید استفاده کردند و با انجام بررسی‌های عددی به مقایسه‌ی اثربخشی این عملگرهای پرداختند.

فن و مکمه‌ل^۴ (۲۰۰۴) روشی سه مرحله‌ای را برای حل مسئله طراحی و تخصیص ناوگان شبکه اتوبوس شهری پیشنهاد دادند. در مطالعه‌ی آنها از پنج الگوریتم فراابتکاری مختلف (ژنتیک، تبرید شبیه‌سازی شده^۵، جستجوی ممنوعه^۶، جستجوی همسایگی^۷ و جستجوی تصادفی^۸) برای حل مسئله استفاده شد. مقایسه‌ی نتایج نشان داد که تمام الگوریتم‌ها به جز الگوریتم جستجوی تصادفی برای حل این مسئله مناسب بوده‌اند. آنها در مطالعه‌ی بعدی خود در سال ۲۰۰۶ با در نظر گرفتن تابع هدف و

^۱ Tom and Mohan

^۲ Chennai

^۳ Ngmchai and Lovell

^۴ Fan and Machemehl

^۵ Simulated Annealing (SA)

^۶ Tabu Search (TS)

^۷ Neighborhood Search

^۸ Random Search

محدودیت‌های استفاده شده در مطالعه‌ی سال ۲۰۰۴، با استفاده از الگوریتم ژنتیک به بررسی شبکه اتوبوس شهری با تقاضای متغیر^۱ پرداختند.

ژائو^۲ (۲۰۰۶) با هدف کاهش تعداد انتقال‌ها و هزینه‌های مسافر و بیشینه کردن پوشش سرویس در شبکه‌ای بزرگ مقیاس، از الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده استفاده کرد. نتایج این مطالعه نشان داد الگوریتم استفاده شده نسبت به الگوریتم‌های ژنتیک مورد استفاده در مطالعات قبلی عملکرد بهتری داشته است. ژائو و ژنگ^۳ (۲۰۰۸) با ترکیب الگوریتم‌های تبرید شبیه‌سازی شده، جستجوی ممنوعه و جستجوی حریصانه^۴ روشی را برای بهینه‌سازی شبکه‌ای بزرگ مقیاس با در نظر داشتن طراحی مسیرها، سرفاصله‌ی اتوبوس‌ها و تخصیص برنامه زمانی ارائه دادند.

پاچکو و همکاران^۵ (۲۰۰۹) به منظور بهبود شبکه اتوبوس شهر برگوس^۶ در اسپانیا از دو الگوریتم جستجوی محلی و جستجوی ممنوعه استفاده کردند. هدف از این مطالعه کاهش زمان انتظار و زمان سفر در شبکه‌ی موجود با توجه به ثابت بودن تعداد مسیرها و ساعت خدمت دهی آنها و موقعیت ایستگاه‌های ابتدا و انتهای مسیر بود. نتایج نشان داد که هر دو الگوریتم عملکرد خوبی داشتند و بسیار بهتر از روش موجود مورد استفاده در ارگان‌های تصمیم‌گیرنده این شهر عمل کرده‌اند.

بگلویی و سیدر^۷ (۲۰۱۱) به مطالعه‌ی مسئله در ابعاد یک شبکه‌ی واقعی پرداختند. مطالعه‌ی آنها جنبه‌های مهمی مانند دسته‌بندی ایستگاه‌ها و وسایل نقلیه عمومی، برنامه‌ریزی سلسله مراتبی حمل‌ونقل^۸ و گنجایش سیستم را شامل می‌شد. روش پیشنهادی آنها بر روی شبکه مندل و همچنین

^۱ Variable demand

^۲ Zhao

^۳ Zhao and Zeng

^۴ Greedy Search

^۵ Pacheco et al.

^۶ Burgos

^۷ Bagloee and Ceder

^۸ Hierarchy transportation mode planning

شهر وینپگ کانادا اعمال شد. نتایج این مطالعه نشان داد که شبکه‌ی پیشنهادی در شرایط مشابه بررسی (بودجه و سایر محدودیت‌ها) موجب کاهش ۱۴ درصدی زمان سفر نسبت به شبکه‌ی اولیه شده است. مسئله‌ی پیدا کردن شبکه‌ی بهینه‌ی اتوبوس شهری با هدف کاهش تعداد انتقال‌ها و زمان کل سفر با استفاده از الگوریتم ژنتیک توسط سوزتو و وو^۱ (۲۰۱۱) حل شد. آنها در مطالعه خود با یک روش جستجوی همسایگی ابتکاری^۲ به بهینه‌سازی تعیین تواتر پرداختند.

بلام و متیو^۳ (۲۰۱۲) از یک سیستم بهینه‌سازی هوشمند^۴ برای مسئله طراحی مجدد شبکه‌ی حمل‌ونقل همگانی استفاده کردند. یکی از محدودیت‌های اصلی این مطالعه باقی ماندن مسیرهای شبکه‌ی موجود بود.

سیپریانی و همکاران^۵ (۲۰۱۲) کاربرد روش پیشنهادی خود را که بر اساس الگوریتم ژنتیک بود بر روی شهر رم با در نظر داشتن شبکه‌ی سیستم حمل‌ونقل همگانی چند منظوره (قطار تندرو، اتوبوس و تراموا) و تقاضای الاستیک^۶ بررسی کردند. روش آنها شامل یک الگوریتم برای تولید مسیرها و الگوریتم ژنتیک موازی^۷ برای تخصیص بهینه تعداد ناوگان بود. نتایج بررسی‌های عددی آنها نشان داد شبکه‌ی پیشنهاد شده در این مطالعه توانسته است تقاضای بیشتر و در عین حال با خدمت‌دهی بهتر نسبت به شبکه فعلی ارائه دهد.

افندی‌زاده و همکاران (۲۰۱۳) از الگوریتم ژنتیک برای حل TNDSP استفاده کردند. تابع هدف استفاده شده مواردی از جمله تخصیص خزانه‌های اتوبوس^۸، ضریب جریمه برای صندلی‌های خالی مانده و تقاضای برآورده نشده را در نظر داشت. در این مطالعه، تخصیص مسافران، در شرایطی که بیش از یک

¹ Szeto and Wu

² A neighborhood search heuristic

³ Blum and Mathew

⁴ Intelligent agent optimisation system

⁵ Ciprani et al.

⁶ Elastic demand

⁷ Parallel genetic algorithm

⁸ Depot assignment

مسیر حمل و نقل همگانی برای مبدأ و مقصدی یکسان وجود داشته باشد، با استفاده از تابع مطلوبیت زمان سفر صورت گرفت.

نیکولیچ و تئدرویچ^۱ (۲۰۱۳) مدلی را بر مبنای هوش جمعی^۲ با هدف بیشینه کردن تعداد مسافران سرویس‌دهی شده و کمینه کردن زمان سفر درون وسیله نقلیه و کاهش تعداد انتقال‌ها برای مسافران ارائه دادند. روش آنها برپایه‌ی الگوریتم کلونی زنبورها^۳ بود. آنها با پیاده‌سازی روش خود بر روی شبکه مندل با پارامترهایی که مربوط به تقاضای برآورده شده و زمان سفر بود به مقایسه با مطالعات مشابه قبلی پرداختند. بررسی‌های محاسباتی حاکی از مناسب بودن روش پیشنهادی برای این مسئله بود.

روشی بر مبنای الگوریتم ازدحام ذرات به منظور تعیین مجموعه‌ای از مسیرهای بهینه برای اتوبوس شهری در شبکه‌ی مندل (۱۹۸۰) توسط کچاگیوپولوس و بلیگیانیس^۴ (۲۰۱۴) ارائه شد. آنها از فرآیندی مشابه با مطالعه‌ی چاکرابورتی و ویدی برای تولید جواب‌های اولیه و ارزیابی جواب‌ها استفاده کردند. نتایج به دست آمده از مطالعه‌ی آنها قابل رقابت با نتایج مطالعات قبلی در این حوزه بود.

آربکس و داکونا^۵ (۲۰۱۵) با ایجاد تغییر در الگوریتم ژنتیک روشی را برای حل TNDSP پیشنهاد دادند. روش پیشنهادی آن‌ها از علمگرهای جستجوی محلی برای مواجه با جواب‌های ناشدنی^۶ و جواب‌های جهش یافته بهره می‌برد. آنها بررسی عددی جامعی بر روی نتایج حاصل از پیاده‌سازی الگوریتم بر روی شبکه مندل انجام دادند. نتایج نشان داد الگوریتم پیشنهادی در قیاس با الگوریتم‌های مشابه استفاده شده در مطالعات قبلی کارآمدتر بوده است.

¹ Nikolic and Teodrovic

² Swarm Intelligence

³ Bee Colony

⁴ Kechagiopoulos and Beligiannis

⁵ Arbex and da Cunha

⁶ Infeasible solutions

ژائو و همکاران^۱ (۲۰۱۵) با استفاده از الگوریتم ممیتیک^۲ که از جمله الگوریتم‌های تکاملی^۳ جدید است به حل این مسئله پرداختند. به منظور کارایی بیشتر محاسباتی روش، الگوریتم ممیتیک با عملگرهای جستجوی محلی، که بر پایه الگوریتم ژنتیک کلاسیک بودند، ادغام شد. مقایسه‌ی نتایج به دست آمده توسط الگوریتم پیشنهادی آنها بر روی شبکه مندل با نتایج مطالعات گذشته نشان داد که الگوریتم ممیتیک از عملکرد مناسبی در حل این مسئله برخوردار است.

مارتینز و همکاران^۴ (۲۰۱۷) مدلی را براساس الگوریتم ژنتیک به منظور طراحی و تعیین تواتر یک کریدور اصلی از اتوبوس سریع شهری (BRT) در کلمبیا پیشنهاد دادند. مدل پیشنهادی آنها محدودیت‌های شبکه‌ی واقعی در حال بهره‌برداری را که تا آن زمان در مدل‌های قبلی در نظر گرفته نشده بود را نیز شامل می‌شد. روش پیشنهادی آنها با استفاده از داده‌های موجود صحت‌سنجی و مدل‌سازی آنها موجب بهبود کارکرد شبکه‌ی فعلی شد. در جدول ۱-۲ خلاصه‌ی مطالعات انجام شده با روش‌های ابتکاری و فراابتکاری ارائه شده است.

۲-۲-۱-۲ حل TNDSP با ملاحظات زیست محیطی

با مرور بر مطالعات با موضوع طراحی شبکه‌ی حمل‌ونقل همگانی می‌توان دریافت که به مسئله‌ی آلودگی هوا و اثر زیست‌محیطی حمل‌ونقل همگانی کمتر پرداخته شده است. در این بخش به محدود مطالعاتی هزینه‌های جانبی را در طراحی شبکه‌ی حمل‌ونقل همگانی در نظر داشته‌اند اشاره می‌شود.

^۱ Zhao et al.

^۲ Memetic Algorithm

^۳ Evolutionary Algorithm

^۴ Martínez et al.

جدول ۱-۲ خلاصه‌ی مطالعات انجام شده با روش‌های ابتکاری و فراابتکاری

نویسنده / نویسندگان	محدودیت‌ها	اهداف تابع	روش حل
لمپکین و سالمنز (۱۹۶۷) Lampkin and Saalmans (1976)	- تعداد اتوبوس	- بیشینه سازی سفرهای مستقیم - کمینه‌سازی تعداد اتوبوس‌ها - کمینه سازی مجموع زمان سفر	ابتکاری
سیلمان و همکاران (۱۹۷۴) Silman et al. (1974)	- بودجه	- کمینه‌سازی اندازه ناوگان - کمینه‌سازی زمان سفر - کمینه‌سازی تراکم	ابتکاری
مندل (۱۹۸۰) Mandl (1980)	- تواتر ثابت - سطح پوشش	- کمینه‌سازی زمان سفر - بیشینه‌سازی مسیرهای مستقیم	ابتکاری
سیدر و ویلسون (۱۹۸۶) Ceder and Wilson (1986)	- حداقل تواتر	- کمینه‌سازی زمان سفر، زمان انتظار و تعداد انتقال - کمینه‌سازی هزینه‌های وسایل نقلیه	ابتکاری
باچ و محمسانی (۱۹۹۱) Baaj and Mahmassani (1991)	- سرفاصله - تعداد اتوبوس - ظرفیت	- بیشینه‌سازی سفرهای مستقیم - کمینه‌سازی زمان انتظار، تعداد انتقال	ابتکاری
پتنائیک و همکاران (۱۹۹۸) Pattnaik et al. (1998)	- سرفاصله - ضریب بار	- کمینه سازی زمان سفر - کمینه سازی هزینه‌های سرویس‌دهنده	الگوریتم ژنتیک
چاکروورتی و ویدی (۲۰۰۲) Chakroborty and Wivedi (2002)	- معیارهای امکان‌پذیری مسیرها	- کمینه‌سازی زمان سفر - کمینه‌سازی تقاضای ارضا نشده - بیشینه‌سازی سفرهای مستقیم	الگوریتم ژنتیک
بیلی و همکاران (۲۰۰۲) Beilli et al. (2002)	- استفاده از مسیرهای از پیش تعیین شده	- کمینه‌سازی زمان سفر - کمینه‌سازی تعداد اتوبوس‌ها - افزایش عملکرد شبکه با توجه به معیارهای تعریف شده	الگوریتم ژنتیک
فاسو و همکاران (۲۰۰۲) Fucso et al. (2002)	- سطح سرویس - تقاضای ارضا شده - پیکربندی خطوط - تواتر	- کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های سیستم	الگوریتم ژنتیک
تام و موهان (۲۰۰۳) Tom and Mohan (2003)	- تواتر - ضریب بار	- کمینه‌سازی هزینه‌های سرویس دهنده - کمینه‌سازی زمان سفر	الگوریتم ژنتیک
نامچای و لول (۲۰۰۳) Ngmchai and Lovell (2003)	- ناحیه‌ی پوشش	- کمینه‌سازی زمان سفر و زمان انتظار - کمینه‌سازی اندازه و هزینه‌های ناوگان	الگوریتم ژنتیک
فن و مکمهیل (۲۰۰۴) / (۲۰۰۶) Fan and Machemehl (2004,2006)	- طول مسیر - تعداد اتوبوس	= کمینه‌سازی زمان انتظار، زمان سفر و طول پیاده روی - کمینه‌سازی اندازه‌ی ناوگان - کمینه‌سازی تقاضای ارضا نشده	- الگوریتم ژنتیک، - الگوریتم جستجوی ممنوعه - الگوریتم جستجوی محلی - الگوریتم تبرید شبیه سازی شده، - الگوریتم جستجوی تصادفی
ژائو (۲۰۰۶) Zhao (2006)	- معیارهای امکان‌پذیری مسیرها	- کمینه‌سازی تعداد انتقال‌ها - بیشینه‌سازی پوشش تقاضا	تبرید شبیه‌سازی شده
ژائو و ژنگ (۲۰۰۸) Zhao and Zeng (2008)	- سرفاصله - اندازه ناوگان - طول مسیر	- کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های مسافرو سرویس‌دهنده	الگوریتم‌های ابتکاری و تبریدی شبیه‌سازی شده

جدول ۱-۲ ادامه		
پاچکو و همکاران (۲۰۰۹) Pacheco et al. (2009)	- تعداد مسیرها - تعداد اتوبوس - موقعیت ایستگاه‌ها	- کمینه‌سازی مجموع زمان سفر و زمان انتظار
بگلویی و سیدر (۲۰۱۱) Bagloee and Ceder (2011)	- بودجه - گنجایش اتوبوس - محدودیت‌های خاص - مربوط به طراحی شبکه با توجه به شبکه‌ی موجود - تعداد اتوبوس - زمان سفر	- بیشینه سازی راحتی مسافران - کمینه سازی زمان سفر و انتظار - بهبود شبکه موجود - کاهش تعداد انتقال‌ها - کاهش زمان سفر
سوز تو و وو (۲۰۱۱) Szeto and Wu (2011)		
سیپرانی و همکاران (۲۰۱۲) Cipriani et al (2012)	- تعداد اتوبوس - طول مسیر	- در نظر گرفتن تقاضای الاستیک - کاهش زمان سفر - کاهش تعداد انتقال - کاهش زمان انتظار - کاهش هزینه‌های جانبی
بلام و متیو (۲۰۱۲) Blum and Mathew (2012)	- تعداد اتوبوس - طول مسیر - باقی ماندن مسیرهای شبکه موجود	- کمینه‌سازی تعداد اتوبوس‌های مورد نیاز - کمینه‌سازی زمان سفر
افندی‌زاده و همکاران (۲۰۱۳) Afandizadeh et al (2013)	- تعداد ایستگاه‌های نگهداری اتوبوس - تعداد صندلی‌های خالی	- کمینه‌سازی زمان انتظار - کمینه‌سازی تقاضای برآورده نشده - کمینه‌سازی تعداد صندلی‌های خالی
نیکولیچ و تنودرویچ (۲۰۱۳) Nikolic and Teodrovic (2013)	- معیارهای امکان‌پذیری مسیرها	- بیشینه سازی تعداد مسافران سرویس‌دهی شده - کمینه سازی زمان سفر درون کمینه‌سازی تعداد انتقال‌ها
آربکس و داکونا (۲۰۱۵) Arbex and da Cunha (2015)	- طول مسیر - تعداد اتوبوس	- کمینه‌سازی زمان انتظار، زمان سفر - کمینه‌سازی اندازه‌ی ناوگان - کمینه‌سازی تقاضای ارضا نشده
ژائو و همکاران (۲۰۱۵) Zhao et al (2015)	- تعداد اتوبوس - جهت مسیر - تواتر	- کمینه‌سازی زمان سفر - کمینه‌سازی تقاضای برآورد نشده
مارتینز و همکاران (۲۰۱۷) Martínez et al (2017)	- محدودیت‌های موجود برای شبکه‌ی فعلی	- کمینه‌سازی زمان سفر - کمینه‌سازی اندازه و هزینه‌های ناوگان

بلتران و همکاران^۱ (۲۰۰۹) مسیرهای بهینه در یک شبکه‌ی واقعی را با تقاضای الاستیک به همراه تخصیص بخشی از ناوگان شبکه‌ی اتوبوس شهری به اتوبوس‌های پاک طراحی کردند. مسیرهای مختص به این اتوبوس‌ها مسیرهای سبز^۲ نام داشتند. فاکسو و همکاران^۳ (۲۰۱۳) به بررسی ارزیابی هزینه‌های وجود وسایل نقلیه‌ای که از دو منبع انرژی تغذیه می‌شدند (سوخت فسیلی و الکتریسیته) بر روی هزینه‌های سرویس‌دهنده‌ی شبکه و در نظر داشتن محدودیت مصرف انرژی پرداختند. جوانویچ و همکاران^۴ (۲۰۱۴) روشی بر مبنای عصبی-فازی^۵ برای تعیین مسیرهایی که به اتوبوس‌های الکتریکی اختصاص می‌یابد پیشنهاد دادند. در مطالعه‌ی آنها گازهای خطرناک و آلودگی صوتی به عنوان هزینه‌های جانبی شبکه در نظر گرفته شد. پترنا و همکاران^۶ (۲۰۱۵) به طراحی یک شبکه‌ی اتوبوس‌رانی پرداختند که ناوگان آن علاوه بر اتوبوس‌های معمولی شامل اتوبوس‌های الکتریکی بدون آلاینده بود. آنها در مطالعه‌ی خود از الگوریتم ژنتیک به برای تعیین مسیرهای بهینه در یک شبکه‌ی واقعی شهری استفاده کردند.

۲-۳ استفاده از الگوریتم جستجوی فاخته در مهندسی حمل و نقل

یکی از جدیدترین روش‌های فراابتکاری در حوزه‌ی بهینه‌سازی الگوریتم جستجوی فاخته است که توسط یانگ و دب در سال ۲۰۰۹ معرفی شد. در مطالعات انجام شده در مورد مسائل بهینه‌سازی مرتبط با مهندسی حمل و نقل و ترافیک استفاده از الگوریتم جستجوی فاخته انگشت شمار بوده است. از جمله‌ی این مطالعات می‌توان به حل مسئله فروشنده‌ی دوره‌گرد^۷ توسط اوراب و همکارانش^۸ (۲۰۱۴) اشاره کرد. علی‌عسگر و همکاران (۲۰۱۶) مسئله‌ی مسیریابی خودرو را توسط الگوریتم جستجوی فاخته

^۱ Beltran et al.

^۲ Green lines

^۳ Fucso et al.

^۴ Jovanic et al.

^۵ Neuro-fuzzy

^۶ Pternea et al.

^۷ Traveling Salesman Problem

^۸ Ouyang et al

حل کردند. ماجیما و همکاران^۱ (۲۰۱۶) به مقایسه الگوریتم جستجوی فاخته و الگوریتم ژنتیک در تولید شبکه‌ی قطب-اقماری^۲ در حمل و نقل همگانی پرداختند.

۴-۲ جمع‌بندی

مسائل مرتبط با طراحی شبکه‌ی حمل‌ونقل همگانی از دسته‌ی مسائل NP-hard با محدودیت‌های مختلف و پیچیدگی زیاد هستند که فضای جستجوی جواب آنها بسیار گسترده است. بر اساس مطالعات انجام شده بر ادبیات موضوع، تا کنون از الگوریتم جستجوی فاخته برای حل مسئله‌ی طراحی شبکه‌ی اتوبوس‌رانی و تعیین ناوگان موردنیاز آن استفاده نشده است. از این رو یکی از اهداف انجام این مطالعه بررسی کارآمدی روشی بر مبنای الگوریتم جستجوی فاخته در این زمینه بود. در بخش اول این مطالعه با استفاده از روشی بر مبنای الگوریتم جستجوی فاخته مسیرهای بهینه در شبکه‌ی اتوبوس شهری به منظور کاهش هزینه‌های مسافران و سرویس‌دهنده تعیین شدند. همان‌طور که اشاره شد در مطالعات قبلی به اثرات زیست‌محیطی و آلودگی در شبکه‌های حمل‌ونقل همگانی کمتر پرداخته شده است. در بخش دوم این مطالعه آلودگی تولید شده در شبکه به عنوان مؤلفه‌ی هزینه‌ی جانبی در تابع هدف در نظر گرفته شد و با اعمال روش پیشنهادی بر روی شبکه‌ی مندل به کمینه‌کردن مجموع هزینه‌های مسافران، هزینه‌ی سرویس‌دهنده و آلودگی پرداخته شد.

^۱ Majima et al.

^۲ Hub-Spoke Network

فصل سوم: بیان مسئله و روش حل

۱-۳ مقدمه

مسئله‌ی طراحی مسیرهای شبکه و تعیین تواتر به دو بخش اول فرآیند برنامه‌ریزی اتوبوس شهری مربوط می‌شود. حل این مسئله شامل تعیین ساختار شبکه و تعداد اتوبوس‌های موردنیاز هر مسیر است و به واسطه‌ی به دست آوردن مقدار مطلوبی از تابع هدف با توجه به محدودیت‌هایی مشخص صورت می‌گیرد. ساختار شبکه متشکل از مسیرهای اتوبوس است که از ایستگاه‌هایی از پیش تعیین شده می‌گذرد. این مسیرها باید به گونه‌ای طراحی شوند که بهترین نتیجه را برای هزینه‌های در نظر گرفته شده در تابع هدف به دنبال داشته باشد.

۲-۳ تعاریف

به عنوان مقدمه‌ای برای بیان تابع هدف و بخش‌های بعدی مطالعه در این بخش به تعریف اصطلاحات متداول در حل مسئله‌ی طراحی شبکه پرداخته می‌شود.

- گره^۱ نشان‌دهنده‌ی محل بارگیری^۲، تخلیه^۳ و انجام انتقال در یک شبکه‌ی حمل‌ونقل است.
- کمان^۴ برقرار کننده‌ی ارتباط بین دو گره است.
- مسیر^۵ دنباله‌ای از گره‌ها است، هر دو گره پیاپی از این دنباله با یک کمان با هم ارتباط دارند.
- گراف^۶ مجموعه‌ای از N گره و A کمان برای برقراری هر دو گره است، $G = \{N, A\}$.
- گذرگاه انتقالی^۷، گذرگاهی که بیش از یک مسیر را شامل می‌شود.

^۱ Node

^۲ Loading

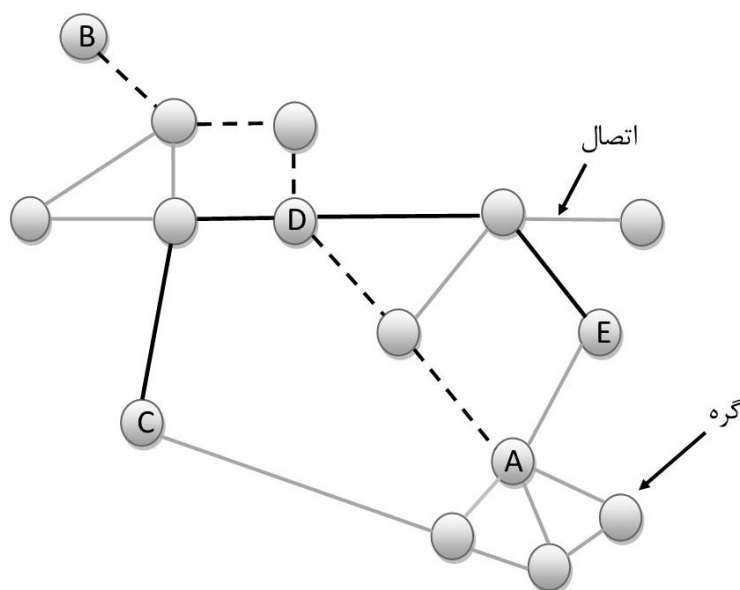
^۳ Unloading

^۴ Link

^۵ Route

^۶ Graph

^۷ Transfer path



شکل ۳-۱ نمونه‌ای از یک شبکه (گراف)

شکل ۳-۱ شبکه‌ای متشکل از ۱۵ گره و ۲۱ کمان را نشان می‌دهد. در این شبکه یک مسیر خط چین (از A تا B) و یک مسیر ممتد (از C تا E) وجود دارد. برای رفتن از گره C به گره B نیاز به استفاده از گذرگاه انتقالی است، انتقال بین دو مسیر این گذرگاه در گره D انجام می‌شود.

۳-۳ توابع هدف

در این مطالعه به کمینه کردن دو تابع هدف پرداخته شد، هر یک از این توابع هزینه‌های مختلف مرتبط با شبکه‌ی اتوبوسرانی را شامل می‌شوند.

۳-۳-۱ تابع هدف شماره ۱

طراحی مسیرهای مناسب برای شبکه موجب می‌شود که بیشترین تقاضای سفر پوشش داده شود و زمان سفر در کل شبکه کاهش یابد از طرف دیگر با توجه به محدودیت بودجه‌ی سرویس دهنده، تنها تعداد مشخصی اتوبوس برای جابه‌جایی مسافران در دسترس است. در تابع هدف شماره ۱، مؤلفه‌ی اول تابع به عنوان هزینه‌ی مسافر و مؤلفه‌ی دوم به عنوان هزینه‌ی سرویس‌دهنده است. این تابع از مطالعه‌ی فن و مکمهل (۲۰۰۴) استخراج شده است.

$$Z_1 = C_{time} \cdot \left(\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{r_m \in DR_{ij}} d_{ij}^{r_m} t_{ij}^{r_m} + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{r_m \in TR_{ij}} d_{ij}^{tr} t_{ij}^{tr} \right) \quad (۱-۳)$$

$$+ C_{UD} \cdot \left(\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} d_{ij} - \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{r_m \in DR_{ij}} d_{ij}^{r_m} - \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{r_m \in TR_{ij}} d_{ij}^{tr} \right)$$

$$Z_2 = C_{Bus} \cdot \sum_{m=1}^M B_{req_{r_m}} \quad (۲-۳)$$

مجموع هزینه‌های مسافر و سرویس‌دهنده:

$$\min Z = W_1 Z_1 + W_2 Z_2 \quad (۳-۳)$$

با توجه به

$$h_{\min} \leq h_{r_m} \leq h_{\max} \quad r_m \in R \quad (۴-۳)$$

$$LF_{r_m} = \frac{Q_{r_m}^{\max} * h_{r_m}}{P} \leq LF_{\max} \quad (۵-۳)$$

$$M \leq R_{\max} \quad (۶-۳)$$

$$\sum_{m=1}^M B_{req_{r_m}} \leq B_{av} \quad r_m \in R \quad (۷-۳)$$

مجموعه‌ها و اندیس‌ها

گره‌ها $i, j \in N$

مسیرها $r_k \in R$

$t_r \subset R$ گذرگاه‌های انتقالی که بیش از یک مسیر از مجموعه‌ی R را شامل می‌شوند

داده‌ها

$R_{\max}$: بیشترین تعداد مسیر اتوبوس در یک شبکه از مسیرها

N : تعداد گره‌های یک شبکه

d_{ij} : تقاضای سفر برای اتوبوس همگانی بین دو نقطه‌ی i و j

h_{max} : بیشترین سرفاصله‌ی هر مسیر

h_{min} : کمترین سرفاصله‌ی هر مسیر

LF : بیشترین ضریب بار^۱ برای هر مسیر

P : گنجایش نشیمن^۲ برای اتوبوس‌های مورد بهره‌برداری در شبکه (مسافر/اتوبوس)

B_{av} : بیشترین تعداد اتوبوس در دسترس

C_{time} : ارزش زمان مسافر (\$) / دقیقه

C_{UD} : ارزش تقاضای برآورده نشده (\$) / مسافر

C_{Bus} : ثابت بهره‌برداری اتوبوس (\$) / اتوبوس

W_1, W_2 : ضرایبی که نشان‌دهنده‌ی اهمیت نسبی هر یک از مؤلفه‌های تابع هزینه هستند

متغیرهای تصمیم

M : تعداد مسیرهای اتوبوس همگانی در شبکه‌ی پیشنهادی

r_m : مسیر m ام از شبکه‌ی پیشنهادی

DR_{ij} : مجموعه‌ای از مسیرهایی که به صورت مستقیم تقاضای بین گره‌های i و j را پوشش می‌دهند

TR_{ij} : مجموعه‌ای از گذرگاه‌های انتقالی برای پوشش تقاضای بین گره‌های i و j

$d_{ij}^{r_m}$: تقاضای سفر اتوبوس همگانی بین دو گره i و j بر روی مسیر r_m

d_{ij}^{tr} : تقاضای سفر اتوبوس همگانی بین دو گره i و j که بدون انتقال پوشش داده می‌شود

$t_{ij}^{r_m}$: مجموع زمان سفر بین دو گره i و j در مسیر r_m

t_{ij}^{tr} : مجموع زمان سفر بین دو گره i و j در گذرگاه انتقالی t_r

¹ Load factor

² Seating capacity

h_{r_m} : سرفاصله‌ی اتوبوس‌های مسیر r_m

LF_{r_m} : ضریب بار در مسیر r_m

$B_{req_{r_m}}$: تعداد اتوبوس‌های موردنیاز برای بهره‌برداری در مسیر r_m

$Q_{r_m}^{max}$: جریان^۱ در شلوغ‌ترین کمان از مسیر r_m (مسافر/ ساعت)

۳-۱-۱-۳ فرض‌ها و محدودیت‌ها

۱. شبکه‌ی اتوبوس‌رانی یک گراف بدون جهت^۲ است، $G = (N, A)$ ، که از N گره و A کمان تشکیل شده است.

۲. شبکه‌ی مسیرهای ایجاد شده باید یک شبکه‌ی متصل^۳ باشد به این معنا که قابلیت سفر از هر مبدأ دلخواه به مقصد دلخواه وجود داشته باشد (شکل ۳-۲).

۳. مسیرها دارای نقطه‌ی تکراری نیستند، این محدودیت موجب می‌شود که چرخه^۴ (دور) در مسیر ایجاد نشود.

۴. هر مسیر در شبکه منحصر به فرد است. وجود مسیر تکراری در شبکه به معنای وجود یک مسیر با تواتر بیشتر است.

۵. سرفاصله‌ی هر مسیر باید در یک بازه‌ی از پیش تعیین شده قرار بگیرد. کوتاه شدن سرفاصله منجر به شلوغی زیاد مسیر خواهد شد. از طرف دیگر سرفاصله‌ی طولانی موجب می‌شود که زمان انتظار مسافران در ایستگاه افزایش یابد (رابطه‌ی ۳-۴).

۶. ضریب بار اتوبوس باید کمتر از مقداری مشخص باشد، این محدودیت از جمعیت زیاد مسافران در اتوبوس جلوگیری می‌کند و راحتی آنها را به همراه دارد (رابطه‌ی ۳-۵).

^۱ Flow

^۲ Undirected graph

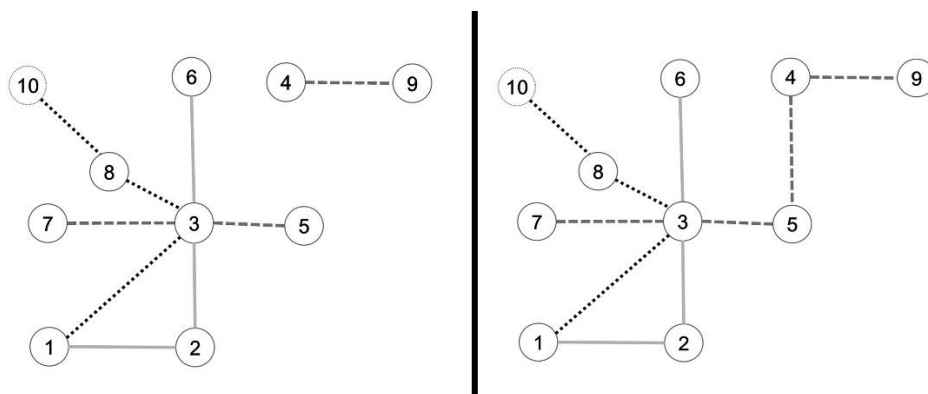
^۳ Connected Network

^۴ Cycle

۷. هر شبکه دارای تعداد مشخصی مسیر است که توسط تصمیم‌گیرنده تعیین می‌شود (رابطه‌ی ۳-۶).

۸. تعداد اتوبوس‌هایی که برای بهره‌برداری تعیین می‌شوند کمتر از حد مشخصی است تا محدودیت بودجه برای سرویس‌دهنده برآورده شود (رابطه‌ی ۳-۷).

۹. زمان انتظار مسافران در هر مسیر، نصف سرفاصله‌ی آن مسیر است.



شکل ۳-۲ مثالی از یک شبکه‌ی متصل (سمت راست) و یک شبکه‌ی غیر متصل (سمت چپ)

۳-۱-۲ مؤلفه‌های تابع هدف شماره ۱

همانطور که اشاره شد، تابع هدف شماره ۱ متشکل از دو مؤلفه‌ی هزینه‌های مسافر و هزینه‌ی سرویس‌دهنده است.

۳-۱-۲-۱ هزینه‌های مسافر

هزینه‌های مسافر خود از چند مولفه: زمان سفر درون اتوبوس^۱، زمان انتظار، زمان مربوط به انتقال‌ها و تقاضای پوشش داده نشده تشکیل شده است. زمان سفر درون اتوبوس، مجموع زمان سفر همه‌ی مسافران است که درون اتوبوس صرف شده است. این پارامتر وابسته به مسیرهای شبکه است و به صورت مجموع زمان کمان‌های موجود در یک مسیر محاسبه می‌شود.

^۱ In-vehicle travel time

زمان انتظار نیز پارامتری است که به مسیرها وابسته است و به زمانی که مسافران در ایستگاه برای رسیدن اتوبوس صرف می کنند اتلاق می شود. به طور کلی فرض می شود که رسیدن مسافران به ایستگاه به صورت تصادفی رخ می دهد و زمان انتظار آنها به اندازه ی نصف سرفاصله ی مسیر آن ایستگاه است. این فرض به خصوص در مواردی که سرفاصله ی مسیر کوتاه باشد (کمتر از ۱۰ دقیقه) فرضی معقول است (فن و مکمهل؛ ۲۰۰۴). اگرچه بنابر مطالعه ی فن و مکمهل (۲۰۰۲) در مواردی که سرفاصله ی مسیر طولانی باشد، مسافران زمان رسیدن خود را به ایستگاه براساس برنامه ی زمانی اتوبوس های تنظیم می کنند و کمتر از نصف زمان سرفاصله در ایستگاه منتظر می مانند. در این مطالعه برای سادگی در محاسبات زمان انتظار هر مسیر نصف سرفاصله ی آن مسیر در نظر گرفته شد.

با فرض این موضوع که مسافران ترجیح می دهند با کمترین انتقال به مقصد خود برسند. جریمه ای به ازای هر انتقال در طی سفر آنها در محاسبه ی تابع هدف در نظر گرفته شده است. در این مطالعه فرض شده است که مسافران در طی سفر خود حداکثر دو انتقال انجام دهند و در صورتی که مسیری با این شرایط وجود نداشته باشد تقاضای آنها به عنوان تقاضای پوشش داده نشده در نظر گرفته شود. جزئیات بیشتر در مورد تخصیص سفر مسافران در بخش ۳-۴-۲ ارائه خواهد شد.

۳-۳-۱-۲ هزینه های سرویس دهنده

همان طور که پیش تر بیان شد، هزینه ی سرویس دهنده به صورت مستقیم با اندازه ی ناوگان مورد نیاز شبکه ارتباط دارد. جزئیات بیشتر در مورد محاسبه ی هزینه ی سرویس دهنده در بخش ۳-۴-۲-۴ ارائه شده است.

۳-۳-۲ تابع هدف شماره ۲

مطابق آنچه که در فصول یک و دو بیان شد، در مطالعات انجام شده در حوزه ی طراحی شبکه و طراحی تواتر کمتر به اثرات زیست محیطی شبکه های حمل و نقل همگانی پرداخته شده است. بر این اساس در این مطالعه به وجود اتوبوس های الکتریکی (اتوبوس بدون آلاینده) در ناوگان شبکه به عنوان

راه‌حلی در کاهش آلودگی پرداخته شد. تابع هدف شماره ۲ به آلودگی تولید شده در شبکه به عنوان هزینه‌ی جانبی می‌پردازد. در این تابع، هزینه‌های مسافر همان هزینه‌های تعریف شده در تابع شماره ۱ است. این مؤلفه تابع زمان انتظار، زمان سفر درون اتوبوس، تعداد انتقال‌ها و تقاضای پوشش داده نشده است.

هزینه‌های سرویس‌دهنده علاوه بر اتوبوس‌های معمولی، شامل اتوبوس‌های الکتریکی و ایستگاه‌های شارژ این اتوبوس‌ها می‌شود.

تابع هدف شماره ۲ این مطالعه به صورت زیر است:

$$\min Z = \sum_{i=1}^3 W_i Z_i = W_1 \cdot \text{User cost}(WT, IVTT, N1T, N2T, UD) \quad (8-3)$$

$$+ W_2 \cdot \text{Operator cost}(B_{req,c}, B_{req,e}, CS) + W_3 \cdot \text{External cost}(R, B_{req,c})$$

$$\text{User cost} = C_{time}(C_{wt} \cdot WT + TIVTT + C_{1t} \cdot N1T + C_{2t} \cdot N2T) + C_{UD} \cdot UD \quad (9-3)$$

$$\text{Operator cost} = C_{bus,c} \cdot B_{req,c} + C_{bus,e} \cdot B_{req,e} + C_{chst} CS \quad (10-3)$$

$$\text{External cost} = \sum_{i=1}^n E_i = C_{emission} = \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^n B_{req,c} r_m \cdot TL_{r_m} \cdot EF_j \quad (11-3)$$

که در آن:

WT : مجموع زمان انتظار برای همه‌ی مسافران

C_{WT} : وزن زمان انتظار

$TIVTT$: مجموع زمان سفر سپری شده درون اتوبوس

$N1T$: مجموع تعداد اولین انتقال

C_{1t} : جریمه‌ی اولین انتقال

$N2T$: مجموع تعداد دومین انتقال

C_{2t} : جریمه‌ی دومین انتقال

UD : تقاضای پوشش داده نشده

C_{time} : ارزش زمان مسافر (\$ / دقیقه)

C_{UD} : ارزش تقاضای برآورده نشده (\$ / مسافر)

$C_{bus,c}$: ثابت بهره‌برداری اتوبوس معمولی (\$ / اتوبوس معمولی)

$C_{bus,e}$: ثابت بهره‌برداری اتوبوس الکتریکی (\$ / اتوبوس الکتریکی)

C_{chst} : ثابت بهره‌برداری ایستگاه شارژ (\$ / ایستگاه شارژ)

$B_{req,c}$: مجموع اتوبوس‌های معمولی مورد نیاز شبکه

$B_{req,e}$: مجموع اتوبوس‌های الکتریکی مورد نیاز شبکه

CS : تعداد ایستگاه‌های شارژ مورد نیاز شبکه

$C_{emission}$: ارزش مقدار آلودگی تولید شده (\$ / g)

E : مقدار آلودگی آلاینده‌ی i (g)

M : تعداد مسیرهای اتوبوس همگانی در شبکه‌ی پیشنهادی

n : تعداد آلاینده‌های مورد بررسی

$B_{req,c r_m}$: تعداد اتوبوس‌های معمولی مورد نیاز در مسیر r_m

TL_{r_m} : مسافت طی شده هر اتوبوس (km/veh)

EF_j : فاکتور آلودگی^۱ (g/km) برای آلاینده j

W_i : وزن نسبی مؤلفه‌ی i تابع هدف

^۱ Emission factor

با توجه به

$$G_{r_m,p} \geq G_{r_m} \quad \forall r_m \in R \quad (12-3)$$

$$h_{\min} \leq h_{r_m} \leq h_{\max} \quad (13-3)$$

$$L_{\min} \leq L_{r_m,c} \leq L_{\max,c} \quad \forall r_m \in R : G_{r_m} = 0 \quad (14-3)$$

$$L_{\min} \leq L_{r_m,e} \leq L_{\max,e} \quad \forall r_m \in R : G_{r_m} = 1 \quad (15-3)$$

$$B_{\text{req},c} \leq B_{\text{av},c} \quad (16-3)$$

$$B_{\text{req},e} \leq B_{\text{av},e} \quad (17-3)$$

$$M \leq R_{\max} \quad (18-3)$$

R : مجموعه‌ی مسیرهایی که شبکه‌ی اتوبوس شهری را تشکیل می‌دهند

r_m : مسیر m ام از شبکه‌ی پیشنهادی

G_{r_m} : متغیری دودویی^۱ که نشان می‌دهد مسیر r_m با اتوبوس الکتریکی ($G_{r_m} = 1$) سرویس‌دهی می‌شود یا اتوبوس معمولی ($G_{r_m} = 0$)

$G_{r_m,p}$: متغیری دودویی که نشان می‌دهد مسیر r_m قابلیت سرویس‌دهی با اتوبوس الکتریکی ($G_{r_m,p} = 1$) را دارد یا اتوبوس معمولی ($G_{r_m,p} = 0$)

$h_{\max}$: بیشترین سرفاصله‌ی هر مسیر

$h_{\min}$: کمترین سرفاصله‌ی هر مسیر

h_{r_m} : سرفاصله‌ی مسیر r_m

$L_{\max,c}$: بیشترین طول مسیر مخصوص اتوبوس معمولی

^۱ Binary

$L_{max,e}$: بیشترین طول مسیر مخصوص اتوبوس الکتریکی

L_{min} : کمترین طول هر مسیر

$L_{r_{m,c}}$: طول مسیری که توسط اتوبوس معمولی سرویس‌دهی می‌شود

$L_{r_{m,e}}$: طول مسیری که توسط اتوبوس الکتریکی سرویس‌دهی می‌شود

$B_{req,c}$: اتوبوس‌های معمولی مورد نیاز

$B_{av,c}$: اتوبوس‌های معمولی موجود

$B_{req,e}$: اتوبوس‌های الکتریکی مورد نیاز

$B_{av,e}$: اتوبوس‌های الکتریکی موجود

R_{max} : بیشترین تعداد خط اتوبوس مجاز برای یک شبکه

۳-۲-۱ فرض‌ها و محدودیت‌ها

۱. شبکه‌ی اتوبوس‌رانی یک گراف بدون جهت است، $G = (N, A)$ ، که از N گره و A کمان تشکیل شده است.

۲. شبکه‌ی مسیرهای ایجاد شده باید یک شبکه‌ی متصل باشد به این معنا که قابلیت سفر از هر مبدأ دلخواه به مقصد دلخواه وجود داشته باشد (شکل ۳-۲).

۳. مسیرها دارای نقطه‌ی تکراری نیستند، این محدودیت موجب می‌شود که چرخه^۱ (دور) در مسیر ایجاد نشود.

۴. هر مسیر در شبکه منحصر به فرد است. وجود مسیر تکراری در شبکه به معنای وجود یک مسیر با تواتر بیشتر است.

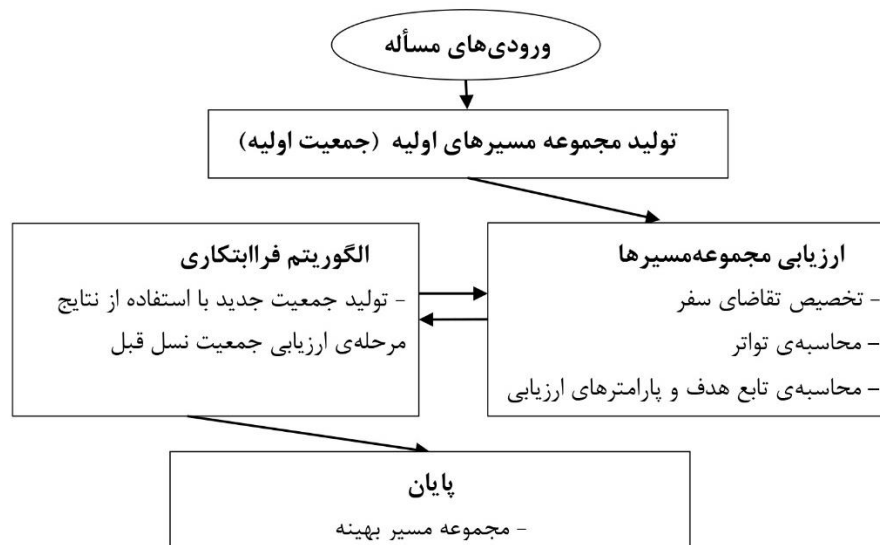
۵. اتوبوس‌های الکتریکی تنها در مسیرهایی از پیش تعیین شده فعالیت می‌کنند (رابطه‌ی ۳-۱۲)

^۱ Cycle

۶. سرفاصله‌ی هر مسیر باید در یک بازه‌ی از پیش تعیین شده قرار بگیرد. کوتاه شدن سرفاصله منجر به شلوغی زیاد مسیر خواهد شد. از طرف دیگر سرفاصله‌ی طولانی موجب می‌شود که زمان انتظار مسافران در ایستگاه افزایش یابد (رابطه‌ی ۳-۱۳).
۷. طول مسیرهایی که اتوبوس‌های معمولی و اتوبوس‌های الکتریکی در آن‌ها فعالیت می‌کنند باید در بازه‌ای مشخص قرار داشته باشد (رابطه‌ی ۳-۱۴ و ۳-۱۵)
۸. تعداد اتوبوس‌های معمولی و الکتریکی به دلیل محدودیت بودجه از تعداد مشخصی نباید بیشتر باشد (رابطه‌ی ۳-۱۶ و ۳-۱۷).
۹. هر شبکه دارای تعداد مشخصی مسیر است که توسط تصمیم‌گیرنده تعیین می‌شود (رابطه‌ی ۳-۱۸).
۱۰. زمان انتظار مسافران در هر مسیر، نصف سرفاصله‌ی آن مسیر است.

۳-۴ روش حل مسئله

روند کلی حل مسئله با استفاده از یک روش تکراری صورت گرفته است. در این روش تکراری، ابتدا مجموعه‌ای جواب‌ها که معیارهای لازم را برای صدق کردن در محدودیت‌های مسئله را داشته باشند تولید می‌شوند (تولید جمعیت اولیه). پس از آن در هر تکرار، با تخصیص تقاضای سفر به هریک از مجموعه مسیرها، تواتر و مقدار تابع هدف آنها، محاسبه می‌شود (ارزیابی جواب‌ها). پس از مشخص شدن بهترین جواب به دست آمده، روش فراابتکاری برپایه‌ی الگوریتم جستجوی فاخته به تولید جواب‌های جدید می‌پردازد (تولید جمعیت جدید با استفاده از جمعیت نسل قبل). شکل ۲ فلوچارت روند کلی حل مسئله را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۳ فلوجارت روند کلی حل مسئله

۳-۴-۱ تولید مجموعه مسیرهای اولیه

الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل هر مسئله در ابتدا نیاز به یک سری از جواب‌های اولیه^۱ (جمعیت اولیه) دارند تا با بهبود آنها در هر تکرار به جواب مطلوب دست یابند. به منظور تولید مجموعه مسیرهای اولیه و ارائه‌ی آنها به روش برپایه‌ی جستجوی فاخته، از الگوریتم فلویید وارشال^۲ استفاده شد. کاربرد این الگوریتم در پیدا کردن کوتاه‌ترین مسیر بین دو گره در یک گراف است.

در این مرحله، به تعداد میسرهای از پیش تعیین شده برای یک مجموعه مسیر عملیاتی تکراری انجام می‌شود. در هر تکرار دو گره از شبکه‌ی مورد مطالعه به دلخواه انتخاب شده و به کمک الگوریتم فلویید وارشال کوتاه‌ترین مسیر بین این دو گره پیدا می‌شود. مجموعه مسیر تشکیل شده باید معیارهایی را که برای یک مجموعه مسیر امکان‌پذیر^۳ را از جمله: عدم وجود نقطه‌ای تکراری در یک مسیر، نبود مسیر تکراری در کل مجموعه و شرط متصل بودن شبکه مسیر را داشته باشد. در صورتی که مجموعه

^۱ Initial solutions

^۲ Floyd-Warshall algorithm

^۳ Feasible route set

مسیر ایجاد شده معیارهای امکان‌پذیری را نداشته باشد روند تکرار الگوریتم تا رسیدن به مجموعه مسیری که این شرایط را داشته باشد ادامه می‌یابد.

۳-۴-۲ تخصیص سفر و محاسبه‌ی تواتر

تخصیص تقاضای سفر شبکه به مسیرهای آن یکی از بخش‌های اصلی حل مسئله‌ی طراحی شبکه و تعیین تواتر است. این بخش از مطالعه بر روی مدل تخصیص سفر شبکه‌ی اتوبوس‌رانی به عنوان هسته‌ی مرکزی بخش ارزیابی مسیرها تمرکز دارد.

در این مطالعه از مدل تخصیص سفری بر اساس مطالعه‌ی باج و محمسانی (۱۹۹۵) و آربکس و داکونا (۲۰۱۳) استفاده شده است. مدل تخصیص استفاده شده بر این فرض استوار است که مسافران در شبکه‌ی اتوبوس همگانی برای رسیدن به مقصد خود همیشه دنبال مسیری هستند که با کمترین تعداد انتقال و عوض کردن مسیر در طول سفر به مقصد برسند. در نتیجه آنها ابتدا مسیر یا مسیرهای مستقیم را انتخاب می‌کنند، در صورت نبود مسیر مستقیم از گذرگاه‌هایی انتقالی که حداکثر یک بار مجبور به انجام انتقال باشند استفاده می‌کنند. در مرحله‌ی بعد اگر چنین مسیری وجود نداشت مسیری که با دو انتقال به مقصد می‌رسند را انتخاب خواهند کرد و در نهایت در صورت نبود هیچ یک از این گزینه‌ها تقاضای سفر آنها به عنوان تقاضای پوشش داده نشده در نظر گرفته می‌شود. در ادامه به چگونگی بررسی وجود این مسیرها در شبکه پرداخته می‌شود.

۳-۴-۲-۱ بررسی وجود مسیر مستقیم

برای بررسی وجود مسیر مستقیم بین دو جفت گره (i, j) از شبکه لازم است که دو مجموعه تعریف شود. تمام مسیرهایی که از گره i می‌گذرند در مجموعه‌ی RS_i و تمام مسیرهایی که از گره j عبور می‌کنند در مجموعه‌ی RS_j قرار می‌گیرند. در صورتی که $RS_i \cap RS_j \neq \emptyset$ ، آنگاه حتماً مسیری وجود دارد که هر دو گره i و j در آن قرار گرفته باشند. به عبارت دیگر مسیری برای سفر مستقیم مسافرانی که قصد رفتن از i به j را داشته باشند وجود دارد. در صورتی که چند مسیر مستقیم بین دو

گره i و j وجود داشته باشد، احتمال انتخاب هر مسیر توسط مسافران نسبتی مستقیم با تواتر آن مسیر دارد. به عبارت دیگر تواتر بیشتر یک مسیر موجب می‌شود که سرفاصله‌ی مسیر کاهش یابد و این موضوع کاهش زمان انتظار مسافران را در پی دارد در نتیجه مسافران تمایل بیشتری به انتخاب آن خواهند داشت.

۳-۲-۴-۲ بررسی وجود گذرگاه با یک انتقال

همان‌طور که اشاره شد، در صورت نبود مسیری مستقیم بین مبدأ و مقصد، مسافران گذرگاهی را انتخاب خواهند کرد که با یک انتقال به مقصد خود برسند. با در نظر گرفتن تعاریف زیر به بررسی وجود گذرگاهی با یک انتقال در شبکه پرداخته می‌شود:

- NLR_{it} : لیست گره‌های موجود در RS_i r_t یکی از مسیرهایی که از گره i عبور می‌کند

- $NLR_{jt'}$: لیست گره‌های موجود در RS_j $r_{t'}$ یکی از مسیرهایی که از گره j عبور می‌کند

با بررسی لیست گره‌ها از هر ترکیب مختلف r_t و $r_{t'}$ به بررسی وجود گرهی مشترک بین این مسیرها پرداخته می‌شود. در صورتی که اشتراکی بین این دو لیست از گره‌ها وجود داشته باشد، آنگاه گذرگاهی با یک انتقال بین دو گره i و j وجود خواهد داشت. به طور مثال اگر اشتراک بین r_t و $r_{t'}$ مجموعه‌ای به صورت $\{n_1, n_1, \dots, n_k\}$ باشد، آنگاه k گذرگاه با یک انتقال بین i و j وجود دارد. در این حالت مسافران از گره i بر روی مسیر r_t سوار اتوبوس می‌شوند و تا گره n در این مسیر به سفر خود ادامه می‌دهند، پس از انتقال در گره n ؛ به مسیر $r_{t'}$ منتقل شده تا به گره j برسند.

در صورتی که چند گزینه برای انجام سفر با یک انتقال بین i و j وجود داشته باشد، هر گزینه براساس تابع مطلوبیت خود توسط مسافران انتخاب می‌شود.

$$P_r = \frac{e^{u_r}}{\sum e^{u_{r_i}}} \quad (۱۹-۳)$$

$$u_r = WT.C_{wt} + IVT + C_{1t} \quad (۲۰-۳)$$

که در آن

P_r : احتمال انتخاب گزینه‌ی r از میان گزینه‌های ممکن برای انجام سفر

u_r : تابع مطلوبیت گزینه‌ی r

WT : مجموع زمان انتظار

C_{wt} : ضریب زمان انتظار

IVT : مجموع زمان سفر سپری شده در اتوبوس

C_{1t} : ضریب جریمه‌ی اولین انتقال

۳-۴-۲-۳ بررسی وجود گذرگاه با دو انتقال

در این بخش گذرگاهی مورد بررسی قرار می‌گیرد که در آن برای رسیدن از مبدأ به مقصد نیاز به دو انتقال باشد. به این منظور ابتدا می‌بایست مسیری پیدا شود که نه از گره i و نه از گره j بگذرد، اما این مسیر دارای یک گره مشترک با مسیر r_t که از گره i می‌گذرد ($r_t \in RS_i$) و یک گره مشترک دیگر با مسیر $r_{t'}$ که از گره j می‌گذرد ($r_{t'} \in RS_j$) باشد. مسیر یا مسیرهایی با این شرایط در مجموعه‌ی SR قرار می‌گیرند.

با فرض $(n_k, n_{k'})$ به عنوان یک جفت گره از گره‌هایی که برای یک گذرگاه با دو انتقال مناسب

هستند و $TR_{i, k_1, n_k, k_2, n_{k'}, k_3, j}$ به عنوان یک گذرگاه با دو انتقال، مسافران برای رفتن از i به j :

- در گره i سوار اتوبوس فعال در مسیر k_1 می‌شوند و تا رسیدن به گره n_k در این مسیر

می‌مانند

- با انجام انتقال در گره n_k به مسیر k_2 منتقل می‌شوند

- در گره n_k سوار اتوبوس فعال در مسیر k_2 می‌شوند و تا رسیدن به گره $n_{k'}$ در این

مسیر می‌مانند

- با انجام انتقال در گره $n_{k'}$ به مسیر k_3 منتقل می‌شوند
- در گره $n_{k'}$ سوار اتوبوس فعال در مسیر k_3 می‌شوند و تا رسیدن به گره j در این مسیر می‌مانند

در صورتی که چند گزینه برای انجام سفر با یک انتقال بین i و j وجود داشته باشد، هر گزینه براساس تابع مطلوبیت خود توسط مسافران انتخاب می‌شود.

$$P_r = \frac{e^{u_r}}{\sum e^{u_{ri}}} \quad (21-3)$$

$$u_r = WT \cdot C_{wt} + IVT + C_{1t} + C_{2t} \quad (22-3)$$

که در آن:

P_r : احتمال انتخاب گزینه‌ی r از میان گزینه‌های ممکن برای انجام سفر

u_r : تابع مطلوبیت گزینه‌ی r

WT : مجموع زمان انتظار

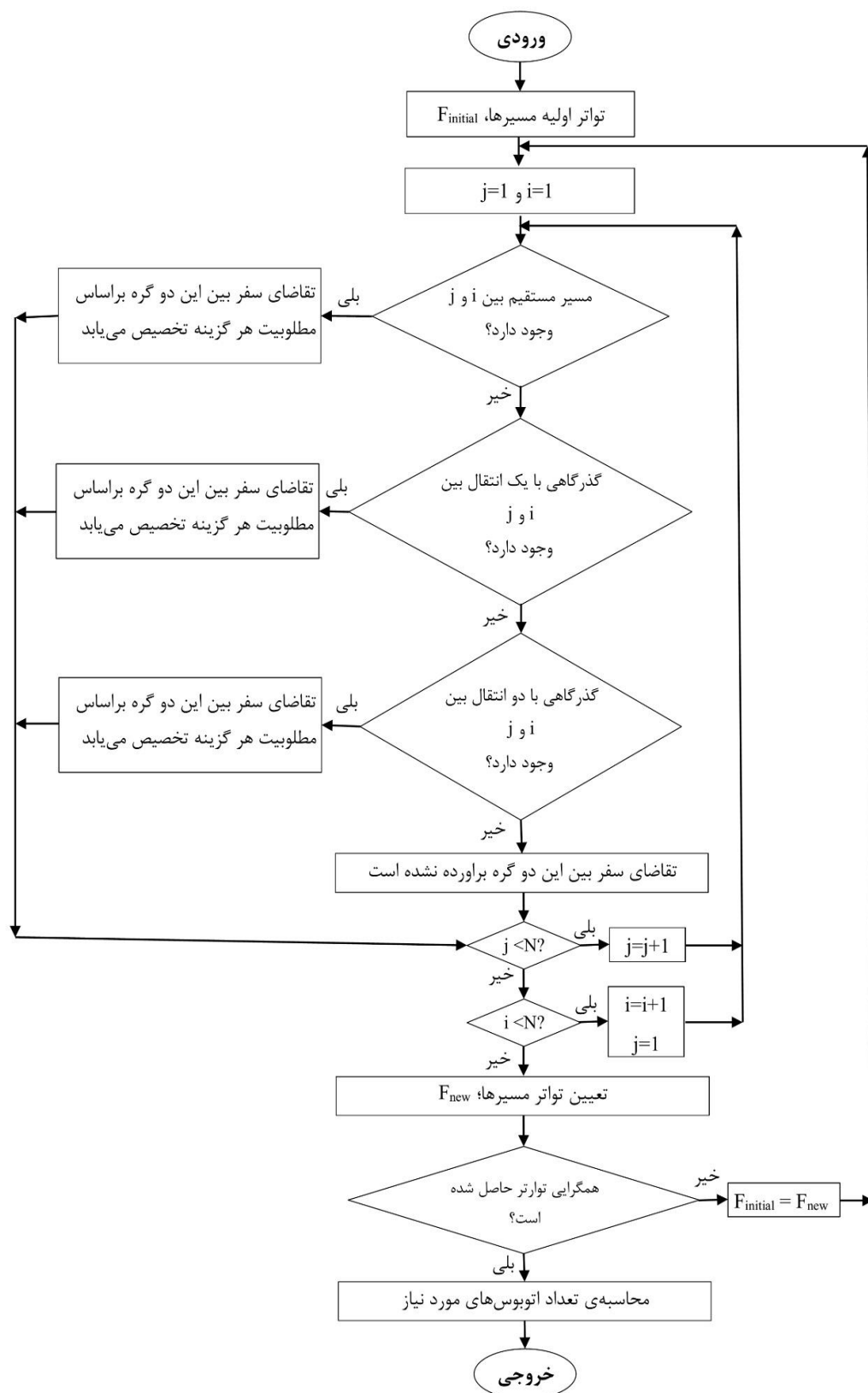
C_{wt} : ضریب زمان انتظار

IVT : مجموع زمان سفر سپری شده در اتوبوس

C_{1t} : ضریب جریمه‌ی اولین انتقال

C_{2t} : ضریب جریمه‌ی دومین انتقال

در شکل ۳-۴ فلوچارت تخصیص سفر و تعیین تواتر ارائه شده است.



شکل ۳-۴ فلوچارت تخصیص سفر و تعیین تواتر

۳-۴-۲-۴ محاسبه‌ی تواتر

پس از تخصیص سفر به مسیرها لازم است تواتر هر مسیر برای سرویس‌دهی متناسب با تقاضا محاسبه شود. در مطالعه‌ی سیدر (۱۹۸۷) چهار روش برای محاسبه‌ی تواتر ارائه شد. که دو روش بر اساس بررسی نقطه‌ای^۱ و دو روش براساس بررسی جمعی^۲ بودند. در روش‌های بررسی نقطه‌ای ظرفیت مطلوب اتوبوس‌ها از تعداد مسافران در شلوغ‌ترین بخش از یک مسیر تجاوز نمی‌کند. در مطالعه‌ی او بین بار^۳ (تعداد مسافران) در طول روز و بار در بازه زمانی مشخص تمایز در نظر گرفته شده بود. این به ترتیب روش‌های بیشینه‌ی بار روزانه^۴ و بیشینه‌ی بار بازه‌ای^۵ نام دارند. در این مطالعه از بیشینه‌ی بار بازه‌ای برای محاسبه‌ی تواتر استفاده شد. بر این اساس محاسبه‌ی تواتر مطابق رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$f_{r_m} = \frac{Q_{r_m}^{max}}{L F_{r_m} \cdot P} \quad (23-3)$$

P : گنجایش نشیمن برای اتوبوس‌های^۶ مورد بهره‌برداری در شبکه (مسافر/ اتوبوس)

f_{r_m} : تواتر مسیر r_m

L_{r_m} : ضریب بار در مسیر r_m

$Q_{r_m}^{max}$: جریان در شلوغ‌ترین کمان از در مسیر r_m (مسافر/ ساعت)

برای محاسبه‌ی تعداد اتوبوس‌های مورد نیاز هر مسیر از پارامتری به نام زمان چرخه^۷ استفاده

می‌شود. این پارامتر دو برابر زمان مجموع زمان سفر یک مسیر است، بنابراین:

$$B_{reqr_m} = \left[\frac{T_{r_m}}{h_{r_m}} \right]^+ \quad (24-3)$$

^۱ Point check

^۲ Ride check

^۳ Load

^۴ Daily max load methods

^۵ Period max load methods

^۶ Bus Seating Capacity

^۷ Cycle time

که در آن:

B_{reqrm} : تعداد اتوبوس‌های موردنیاز در مسیر r_m

T_{r_m} : زمان چرخه‌ی مسیر r_m

h_{r_m} : سرفاصله‌ی مسیر r_m

در مورد تابع هدف شماره ۲، برای محاسبه‌ی تعداد اتوبوس‌های الکتریکی در مسیرهایی که با این اتوبوس‌ها سرویس‌دهی می‌شوند (مسیرهای سبز^۱)، ۵ دقیقه به زمان چرخه‌ی مسیر برای در نظر گرفتن زمان شارژ اتوبوس‌ها در ایستگاه اضافه می‌شود.

۳-۴-۲-۵ محاسبه‌ی آلودگی

برای تخمین آلودگی منتشر شده در شبکه از راهنمای آلودگی^۲ (۲۰۰۹) (به‌روز رسانی شده در ماه می سال ۲۰۱۲) استفاده شد. روش استفاده شده در محاسبه‌ی آلودگی بر پایه‌ی فاکتور آلودگی و طول طی شده اتوبوس‌ها در مدت زمان مورد بررسی است.

$$E_i = N \cdot M \cdot EF_i \quad (3-25)$$

که در آن:

E_i : مقدار آلودگی آلاینده‌ی i (g)

N : تعداد اتوبوس‌هایی که در حال فعالیت هستند (veh)

M : مسافت طی شده هر اتوبوس (km/veh)

EF_i : فاکتور آلودگی (g/km) برای آلاینده i

با توجه به اینکه هر اتوبوس در هر ساعت به اندازه‌ی مقدار تواتر آن (f) از یک نقطه در هر مسیر

عبور می‌کند، کل آلودگی تولید شده توسط اتوبوس‌های معمولی یک مسیر مطابق رابطه‌ی (۳-۲۶) محاسبه می‌شود:

¹ Green routes

² EMEP/EEA emission inventory guidebook 2009

$$E_{r_m} = 2 \cdot f_{r_m} \cdot L_{r_m} \cdot \sum_{i=1}^n EF_i \quad (26-3)$$

که در آن:

E_{r_m} : مقدار کل آلودگی در مسیر r_m (g)

f_{r_m} : تواتر مسیر r_m (1/hr)

L_{r_m} : طول مسیر r_m (km)

EF_i : فاکتور آلودگی (g/km) برای آلاینده i

n : تعداد آلاینده‌های مورد بررسی

۳-۴-۳ الگوریتم جستجوی فاخته

یکی از جدیدترین روش‌های فراابتکاری الگوریتم جستجوی فاخته است که توسط یانگ و دب در سال ۲۰۰۹ معرفی شد. این الگوریتم از زندگی نوعی پرند به نام فاخته الهام گرفته است. نکته قابل تأمل در زندگی فاخته طریقه‌ی تخم‌گذاری و تغذیه این پرنده است. گونه‌هایی از این پرنده تخم‌های خود را در آشیانه‌ی پرندگان دیگر قرار می‌دهد تا پرندگان دیگر از تخم‌های آن‌ها نگهداری کنند. در صورتی که پرنده‌ی میزبان تخم فاخته را شناسایی کند یا آن را دورانداخته و یا آشیانه‌ی خود را ترک کرده و به آشیانه‌ی دیگر مهاجرت می‌کند. در صورتی که تخم فاخته شانس به دنیا آمدن و رشد کردن را داشته باشد به سمت مکان‌های مستعد برای تخم‌گذاری مهاجرت می‌کند. از نکات قابل ذکر در مورد این الگوریتم تفاوت قابل توجه آن با سایر الگوریتم‌ها تکاملی به ویژه الگوریتم‌های جمعیت محور مانند ژنتیک است. این الگوریتم به جای استفاده از جواب‌های بهتر در هر نسل برای تولید جواب‌های نسل بعد از توزیع لوی^۱ برای کنکاش در فضای جواب استفاده می‌کند. یکی دیگر از ویژگی‌های این الگوریتم، دوری از محاسبات پیچیده است که منجر به الگوریتمی ساده و سریع شده است که قابل تعمیم به اغلب مسائل بهینه‌سازی است. قوانین اصلی این الگوریتم به این شرح است:

^۱ Levy distribution

۱. هر فاخته در هر مقطع زمانی یک تخم می‌گذارد و به تصادف یک آشیانه را انتخاب

می‌کند

۲. جوجه‌ی رشد یافته در بهترین آشیانه می‌تواند برای تولید نسل جدید به محلی بهتر

مهاجرت کند

۳. تعداد آشیانه‌های میزبان ثابت است و تخم گذاشته‌شده توسط یک فاخته به احتمال

$$p_a \in [0,1] \text{ توسط پرنده‌ی میزبان شناسایی خواهد شد}$$

از نظر پیاده‌سازی الگوریتم، هر آشیانه (و همچنین هر تخم فاخته) به منزله‌ی یک جواب است.

این الگوریتم با ترکیبی از جستجوی محلی^۱ و جستجوی سراسری^۲، که با تغییر پارامتر p_a صورت می‌گیرد، به تولید جواب‌های جدید از روی بهترین جواب نسل قبل می‌پردازد (یانگ ۲۰۱۴). جستجوی محلی مطابق رابطه‌ی زیر انجام می‌شود:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \alpha s \otimes H(p_a - \epsilon) \otimes (x_j^t - x_k^t) \quad (27-3)$$

که در آن x_j^t و x_k^t جواب‌هایی هستند که به صورت تصادفی با جایگشت تصادفی انتخاب می‌شوند، $H(u)$ یک تابع هوی‌ساید^۳ است، ϵ عددی تصادفی است که از یک توزیع یکنواخت انتخاب می‌شود و s اندازه‌ی گام^۴ است.

جستجوی سراسری با استفاده از پرواز لوی^۵ صورت می‌گیرد

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \alpha L(s, \lambda) \quad (28-3)$$

به طوری که:

$$L(s, \lambda) = \frac{\lambda \Gamma(\lambda) \sin(\frac{\pi \lambda}{2})}{\pi} \frac{1}{s^{1+\lambda}} \quad (s \gg s_0 > 0) \quad (29-3)$$

¹Local random walk

²Global random walk

³Heaviside

⁴Step size

⁵Levy flight

α اندازه‌ی گام فاکتور اندازه^۱ است که با توجه به مسئله‌ی مورد نظر تعیین می‌شود.

اندازه‌ی گام s با استفاده از دو توزیع گاوسین^۲ U و V محاسبه می‌شود:

$$s = \frac{U}{|V|^{1/\lambda}} \quad (30-3)$$

که

$$U \sim N(0, \sigma^2), \quad V \sim N(0, 1) \quad (31-3)$$

که $U \sim N(0, \sigma^2)$ نمونه‌هایی استخراج شده از توزیع گاوسین نرمال با میانگین صفر و واریانس σ^2 است. واریانس مطابق رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود

$$\sigma^2 = \left[\frac{\Gamma(1 + \lambda)}{\pi \Gamma(\frac{1 + \lambda}{2})} \cdot \frac{\sin(\frac{\pi \lambda}{2})}{2^{(\lambda-1)/2}} \right]^{1/\lambda} \quad (32-3)$$

۳-۴-۱ حل مسئله‌ی فروشنده دوره‌گرد

به منظور اطمینان از پیاده سازی درست الگوریتم جستجوی فاخته ابتدا به حل مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد^۳ پرداخته شد.

در مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد یک فروشنده می‌خواهد از شهر خود (گره ابتدایی) شروع به سفر کند و کوتاهترین سفر ممکن را بین شهرهای مشتریان (گره‌های مشتریان) مفروض پیدا کند، به طوری که هر شهر را فقط یکبار قبل از بازگشت به خانه بازدید کرده باشد. داده‌های موردنیاز برای مسئله‌هایی با ۱۷ و ۲۹ شهر به ترتیب با نام‌های gr_17 و bays29 از سایت TSPLIB^۴ استخراج شد.

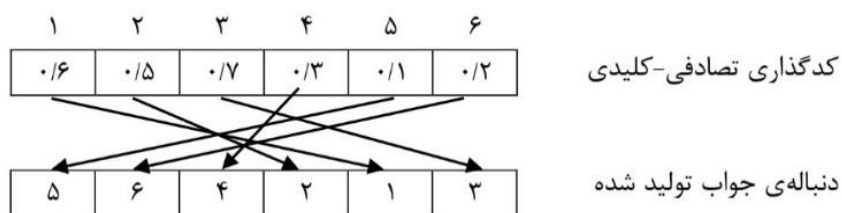
^۱ Step size scaling factor

^۲Gaussian distribution

^۳ Traveling salesman problem (TSP)

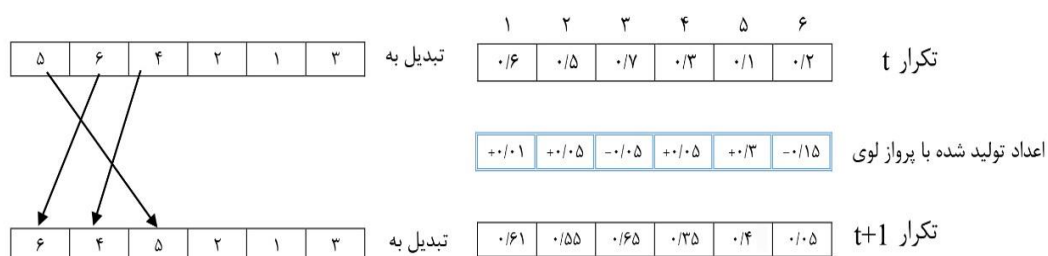
^۴ "http://comopt.ifl.uni-heidelberg.de/software/TSPLIB95/"

به دلیل اینکه الگوریتم جستجوی فاخته برای حل مسائل بهینه‌سازی پیوسته طراحی شده است، هدف دیگر از حل TSP، تعمیم الگوریتم به حل یک مسئله‌ی گسسته بود. به این منظور از روش کدگذاری تصادفی-کلیدی^۱ (بین^۲، ۱۹۹۴) استفاده شد. از این روش برای تبدیل فضای جستجوی پیوسته به فضای گسسته استفاده می‌شود. در این روش دنباله‌ای از اعداد حقیقی در بازه‌ی [۰،۱] تولید می‌شود. طول این دنباله به اندازه‌ی ابعاد مسئله‌ی مورد بررسی (در این مسئله: تعداد شهرها) است. اعدادی که نشان‌دهنده‌ی ترتیب این اعداد تولید شده در بازه‌ی صفر تا یک هستند نمایانگر یک جواب برای مسئله می‌شوند. برای مثال در شکل ۳-۵، عدد سلول ۵ کمترین مقدار را دارد و این عدد اولین سلول از دنباله‌ی جواب خواهد بود. پس از آن عدد سلول ۶ قرار می‌گیرد و به همین ترتیب دنباله‌ی جواب [۵،۶،۴،۲،۱،۳] خواهد بود.



شکل ۳-۵ نمایش کدگذاری کلیدی-تصادفی

در شکل ۳-۶ نحوه‌ی کدگذاری جواب جدید تولید شده توسط عملگر پرواز لوی نشان داده شده است.



شکل ۳-۶ نمایش کدگذاری جواب جدید

^۱ Random-key encoding

^۲Bean

مقادیر زیر برای حل مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد برای الگوریتم جستجوی فاخته فرض شد که

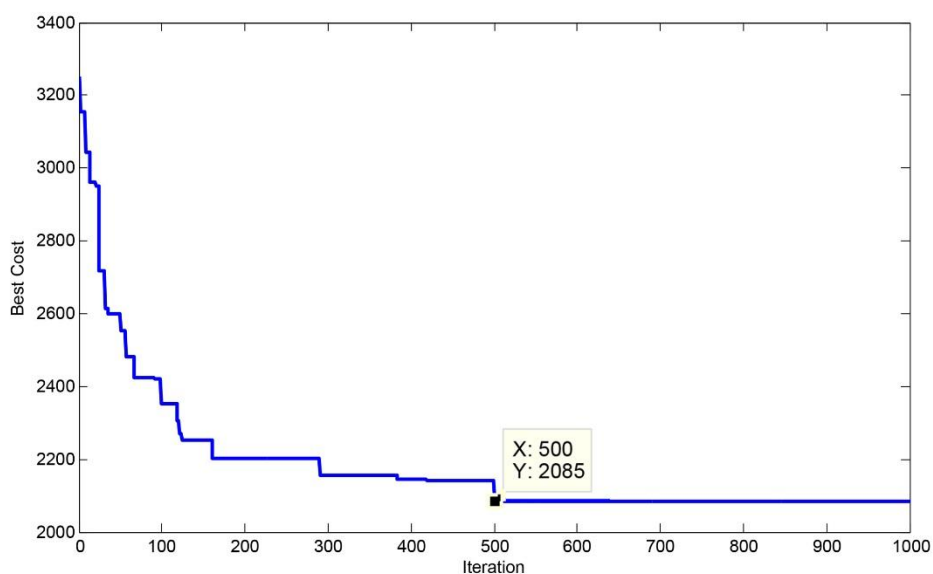
این مقادیر براساس توصیه‌ی یانگ (۲۰۱۴) تعیین شده‌اند:

- تعداد آشیانه‌ها: ۱۵
- تعداد تکرار الگوریتم تا توقف: ۱۰۰۰
- $\alpha: 0.01$
- $\lambda: 1.5$
- $p_a = 0.25$

شکل ۷-۳ نمودار همگرایی الگوریتم جستجوی فاخته را برای حل این مسئله نشان می‌دهد. در

جدول ۱-۳ عملکرد الگوریتم جستجوی فاخته در پیدا کردن جواب بهینه برای مسئله‌های مورد بررسی

ارائه شده است.



شکل ۷-۳ روند همگرایی الگوریتم در حل مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد (gr_17)

جدول ۱-۳ عملکرد الگوریتم جستجوی فاخته در حل مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد

مسئله	هزینه‌ی تور بهینه	هزینه‌ی تور به دست آمده با CS	انحراف از مقدار بهینه (%)
gr_17	۲۰۸۵	۲۰۸۵	۰.۰۰
bays29	۲۰۲۰	۲۰۳۴	۰.۶

۲-۳-۴-۳ الگوریتم جستجوی فاخته برای حل TNDFSP

اعمال یک الگوریتم با فضای جستجوی پیوسته بر روی مسئله‌ی گسسته پیچیدگی‌های خاص خود را به همراه خواهد داشت. مطالعاتی با تبدیل ساختار الگوریتم جستجوی فاخته از فضای پیوسته به فضای گسسته به واسطه‌ی استفاده از عملگرهایی در فضای گسسته انجام شده است (برنال و دب^۱؛ ۲۰۱۳، لی و یین^۲؛ ۲۰۱۳، اوراب و همکاران^۳؛ ۲۰۱۴). نوع عملگرها و کدگذاری‌های این مطالعات مختص به مسئله‌ی مورد حل آنها بوده است و نمی‌توان به عنوان روشی کلی برای هر مسئله استفاده کرد.

در این مطالعه با الهام از ساختار الگوریتم جستجوی فاخته و عملگرهای تغییر^۴ مطالعه‌ی کچاگیوپولوس و بلیگانیس (۲۰۱۴) روشی بر مبنای الگوریتم جستجوی فاخته برای حل TNDFSP پیشنهاد داده شد. اساس این عملگرها (روش یک و روش دو) بر پایه‌ی جابه‌جایی بخشی از بهترین جواب پیدا شده در هر تکرار با سایر جواب‌ها است.

۱-۲-۳-۴-۳ عملگرهای تغییر

در روش یک، ابتدا به تصادف یک مسیر از بهترین آشیانه^۵ (هر آشیانه یا جواب به منزله‌ی یک مجموعه مسیر امکان‌پذیر است) و یک مسیر از آشیانه‌ی کنونی^۶ (آشیانه‌ای که قرار است تغییر پیدا کند) انتخاب می‌شود. سپس این دو مسیر برای داشتن گره مشترک با یکدیگر، به ترتیب از گره ابتدایی تا انتها بررسی می‌شوند. گره‌های مشترک آنها در مجموعه‌ای جدا یادداشت می‌شود. مسیری که از بهترین آشیانه انتخاب شده بود از اولین عضو مجموعه یادداشتی (اولین گره مشترک) تا انتها جدا و جایگزین بخش متناظر در آشیانه‌ی کنونی می‌شود. این مسیر جدید برای وجود نبود گره تکراری در بین گره‌های تشکیل دهنده‌ی مسیر بررسی می‌شود تا از نبود چرخه (دور) در مسیر جدید اطمینان

^۱ Burnwal & Deb

^۲ Li & Yin

^۳ Ouaraab et al.

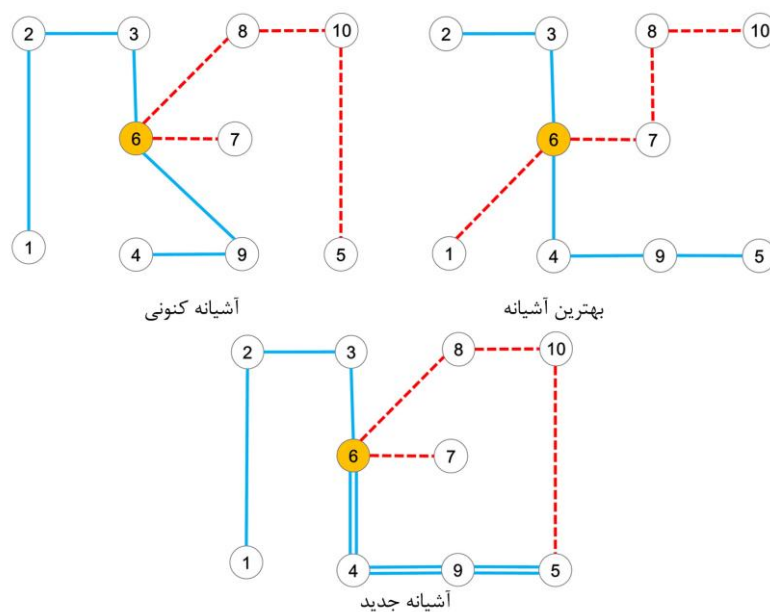
^۴ Modifying procedures

^۵ Best nest

^۶ Current nest

حاصل شود. در صورت وجود چرخه در مسیر، گره بعدی از مجموعه‌ی یادداشتی برای تولید مسیر جدید امتحان می‌شود. اگر پس از بررسی تمام گره‌های مشترک بین دو مسیر، همچنان در مسیرهای جدید تولید شده چرخه وجود داشته باشد یا به طور کلی گره مشترکی بین مسیرهای انتخاب شده‌ی تصادفی وجود نداشته باشد، مسیرهای دیگری انتخاب می‌شوند و این عمل تا ۹ مرتبه تکرار می‌شود. در شکل ۸-۳ مثالی از این روش ارائه شده است و شکل ۹-۳ فلوچارت روش ۱ را نشان می‌دهد.

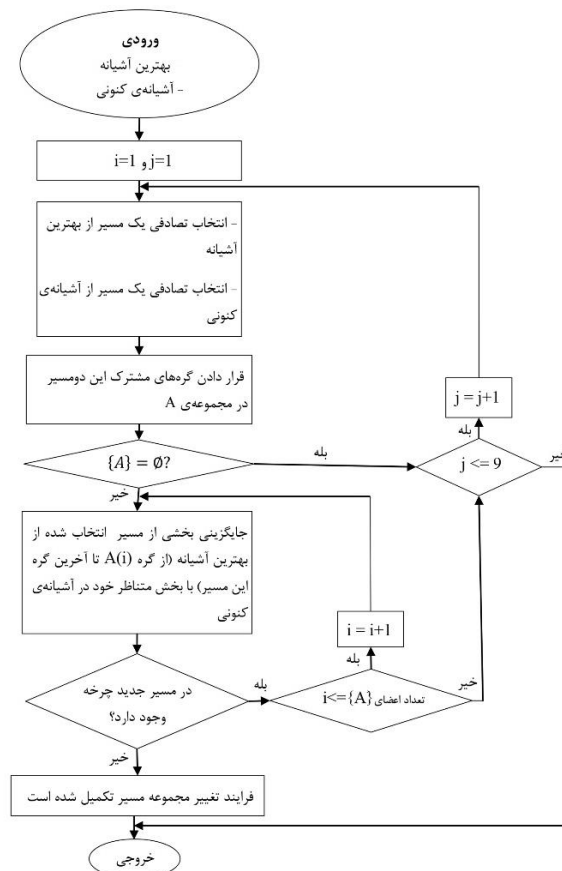
در شکل ۸-۳ مسیرهایی با خط ممتد نشان داده شده است برای تغییر انتخاب شدند. همان‌طور که مشخص است چندین گره مشترک بین این مسیرها در بهترین آشپانه و آشپانه‌ی کنونی وجود دارد. گره‌های مشترک در مجموعه‌ی $A = \{11, 10, 8, 6\}$ قرار می‌گیرند. با انتخاب نقطه‌ی شماره‌ی ۶، بخش ۱-۲-۳-۶ از بهترین لانه جایگزین بخش ۵-۴-۶ می‌شود. با بررسی بعدی مشخص می‌شود که این مسیر دارای دور نیست و یک مسیر قابل قبول است. مسیر جدید در آشپانه‌ی تغییر یافته با خط دوتایی نشان داده شده است.



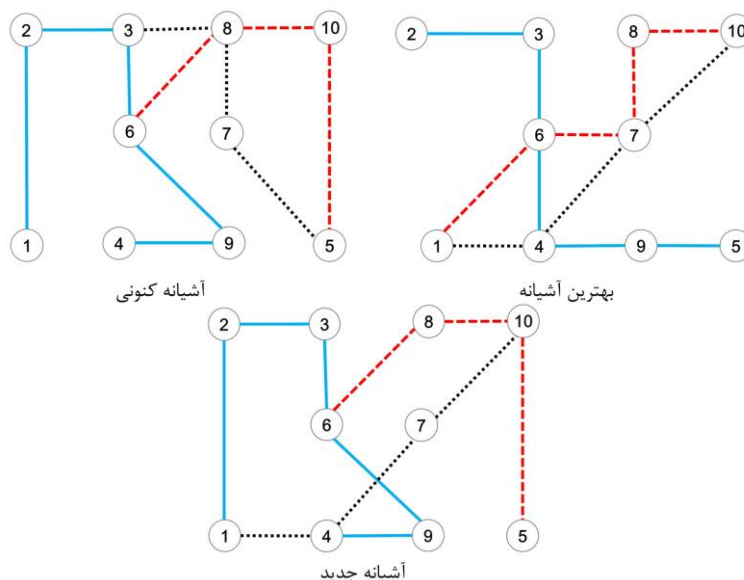
شکل ۸-۳ مثالی از روش ۱

روش ۲ ساده‌تر از روش قبلی است به این ترتیب که مسیری از بهترین آشپانه به تصادف انتخاب می‌شود و جایگزین یک مسیر تصادفی دیگر از آشپانه‌ای که قرار است تغییر کند می‌شود. به طور مثال

در شکل ۳-۱۰ بین مسیرهایی که با نقطه چین نشان داده شده اند جایگزینی صورت گرفته است.



شکل ۳-۹ فلوجارت روش ۱



شکل ۳-۱۰ مثالی از روش ۲

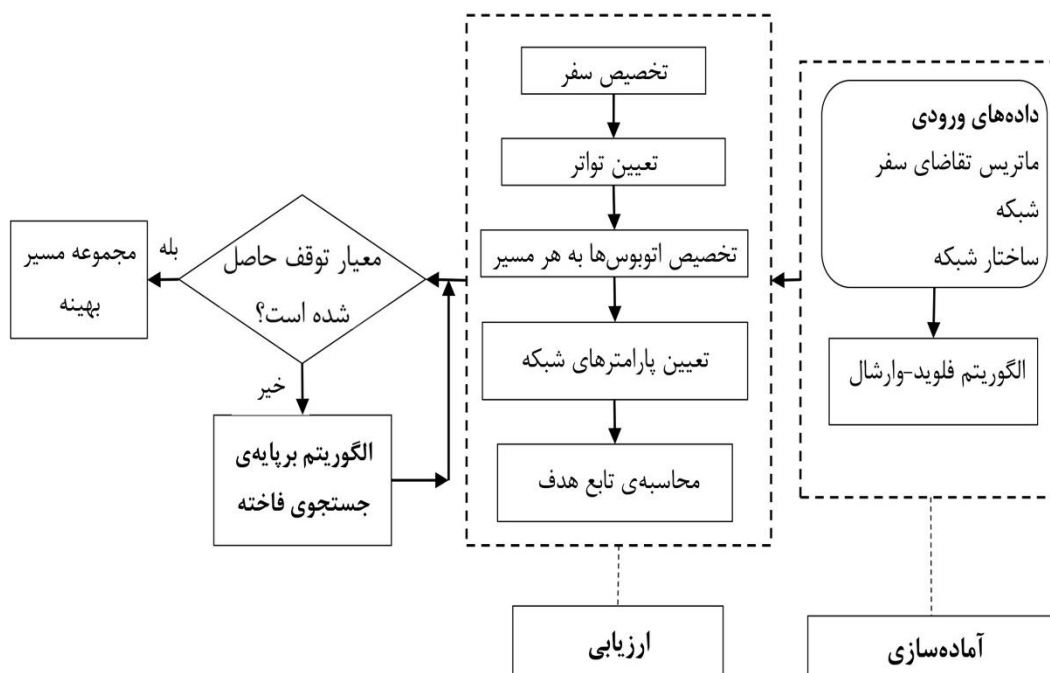
در شکل ۳-۱۱ شبه کد روش پیشنهادی بر مبنای الگوریتم جستجوی فاخته ارائه شده است.

تابع هدف مسئله $f(x), x = (x_1, \dots, x_d)^T$
تولید جمعیت اولیه به تعداد n آشیانه میزبان از روی x_i
مادامی که $(t < MaxGeneration)$ یا شرط توقف برآورده نشده است
انتخاب تصادفی یک فاخته
تولید جواب جدید با استفاده از روش ۱
ارزیابی مقدار تابع هدف آن
انتخاب یک آشیانه در میان n آشیانه به تصادف (آشیانه j)
اگر $(f_i < f_j)$
جواب جدید جایگزین جواب i می شود
پایان شرط اگر
درصدی از بدترین جواب ها (p_a) کنار گذاشته می شوند و آشیانه های جدید با استفاده از روش ۲ ساخته می شوند
آشیانه ها براساس تابع هدف خود مرتب می شوند
بهترین آشیانه انتخاب می شود
 $t \leftarrow t + 1$
پایان شرط تداوم
پیش پردازش جواب ها و نمایش خروجی

شکل ۳-۱۱ شبه کد روش پیشنهادی بر اساس الگوریتم جستجوی فاخته

۳-۵ خلاصه

در این فصل پس از بیان توابع هدف مطالعه، به جزئیات روش حل مسئله ی طراحی شبکه و تعیین تواتر پرداخته شد. تابع هدف شماره ۱ سعی در کمینه کردن هزینه های مربوط به مسافر و سرویس دهنده دارد و در تابع هدف دوم مطالعه هزینه ی دیگری تعریف شد که اثرات زیست محیطی شبکه ی اتوبوس رانی را در خود جای داده است. همچنین روشی تکراری بر مبنای الگوریتم جستجوی فاخته برای یافتن مقادیر بهینه توابع هدف ارائه شد. شکل ۳-۱۲ جزئیات فرآیند روش این مطالعه برای حل مسئله ی طراحی شبکه و تعیین تواتر را نشان می دهد.



شکل ۳-۱۲ فرآیند روش این مطالعه برای حل TNDISP

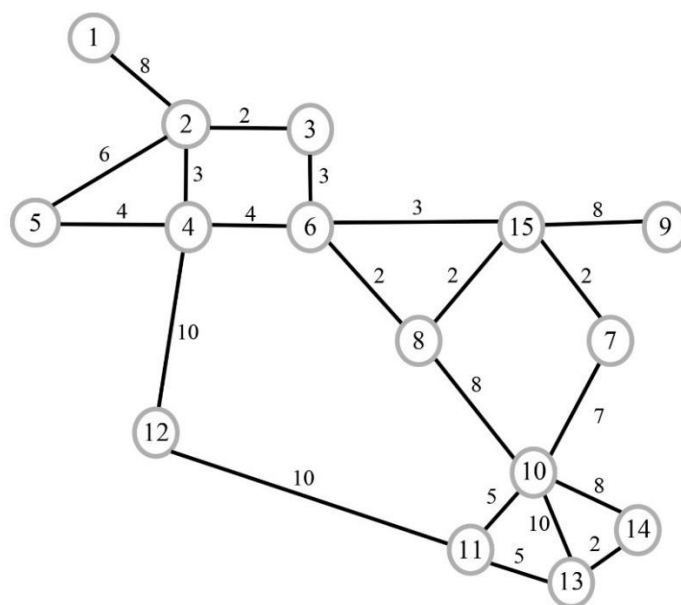
فصل چہارم: نتائج حل مسئلہ

۱-۴ مقدمه

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد هدف از حل مسئله‌ی طراحی شبکه‌ی اتوبوس‌رانی و تعیین تواتر، پیدا کردن مجموعه‌ای از مسیرهای بهینه با توجه به محدودیت‌های اقتصادی، بهره‌برداری و ... است. روش حل ارائه شده در فصل قبل بر روی هر دو تابع هدف تعریف شده در نرم‌افزار متلب^۱ پیاده‌سازی شد. در این فصل به بررسی نتایج حاصل از حل مسئله پرداخته می‌شود.

۲-۴ ورودی‌های مسئله

روش حل پیشنهادی بر روی شبکه‌ی مندل به عنوان شبکه‌ای مبنا در مطالعات مربوط به طراحی شبکه‌ی حمل‌ونقل همگانی، برای یافتن مسیرهای بهینه با توجه به توابع تعریف مورد نظر مطالعه اعمال شد. این شبکه متشکل از ۱۵ شهر در کشور سوئیس است که با ۲۱ کمان با یکدیگر در ارتباط هستند. ساختار شبکه و زمان سفر برای هر دو نقطه‌ی همسایه‌ی یکدیگر در شکل ۴-۱ نشان داده شده است. در جدول ۴-۱ داده‌های ارائه شده توسط مندل برای ماتریس مبدأ-مقصد^۲ شبکه ارائه شده است.



شکل ۴-۱ شبکه‌ی مبنای مندل

^۱ MATLAB

^۲ Origin-Destination O-D matrix

جدول ۴-۱ ماتریس مبدأ-مقصد برای ساعت اوج روزانه

j	i														
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵
۱	۰	۴۰۰	۲۰۰	۶۰	۸۰	۱۵۰	۷۵	۷۵	۳۰	۱۶۰	۳۰	۲۵	۳۵	۱۴	۰
۲	۴۰۰	۰	۵۰	۱۲۰	۲۰	۱۸۰	۹۰	۹۰	۱۵	۱۳۰	۲۰	۱۰	۱۰	۰	۰
۳	۲۰۰	۵۰	۰	۴۰	۶۰	۱۸۰	۹۰	۹۰	۱۵	۴۵	۲۰	۱۰	۱۰	۵	۰
۴	۶۰	۱۲۰	۴۰	۰	۵۰	۱۰۰	۵۰	۵۰	۱۵	۲۴۰	۴۰	۲۵	۱۰	۵	۰
۵	۸۰	۲۰	۶۰	۵۰	۰	۵۰	۲۵	۲۵	۱۰	۱۲۰	۲۰	۱۵	۵	۰	۰
۶	۱۵۰	۱۸۰	۱۸۰	۱۰۰	۵۰	۰	۱۰۰	۱۰۰	۳۰	۸۸۰	۶۰	۱۵	۱۵	۱۰	۰
۷	۷۵	۹۰	۹۰	۵۰	۲۵	۱۰۰	۰	۵۰	۱۵	۴۴۰	۳۵	۱۰	۱۰	۵	۰
۸	۷۵	۹۰	۹۰	۵۰	۲۵	۱۰۰	۵۰	۰	۱۵	۴۴۰	۳۵	۱۰	۱۰	۵	۰
۹	۳۰	۱۵۰	۱۵	۱۵	۱۰	۳۰	۱۵۰	۱۵	۰	۱۴۰	۲۰	۵	۰	۰	۰
۱۰	۱۶۰	۱۳۰	۴۵	۲۴۰	۱۲۰	۸۸۰	۴۴۰	۴۴۰	۱۴۰	۰	۶۰۰	۲۵۰	۵۰۰	۲۰۰	۰
۱۱	۳۰	۲۰	۲۰	۴۰	۲۰	۶۰	۳۵	۳۵	۲۰	۶۰۰	۰	۷۵	۹۵	۱۵	۰
۱۲	۲۵	۱۰	۱۰	۲۵	۱۵	۱۵	۱۰	۱۰	۵	۲۵۰	۷۵	۰	۷۰	۰	۰
۱۳	۳۵	۱۰	۱۰	۱۰	۵	۱۵	۱۰	۱۰	۰	۵۰۰	۹۵	۷۰	۰	۴۵	۰
۱۴	۰	۵	۵	۵	۰	۱۰	۵	۵	۰	۲۰۰	۱۵	۰	۴۵	۰	۰
۱۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

پارامترهای مورد نیاز در محاسبات برای این مطالعه به شرح زیر فرض شدند:

- تعداد صندلی‌های هر اتوبوس: ۴۰
- ضریب بار: ۱/۲۵
- حداقل سرفاصله‌ی زمانی: ۴ دقیقه
- حداکثر سرفاصله‌ی زمانی: ۱۵ دقیقه
- حداقل تعداد گره در هر مسیر: ۳ گره
- حداکثر تعداد گره در هر مسیر: ۸ گره
- تعداد لانه‌های الگوریتم پیشنهادی: ۵۰ عدد
- تعداد تکرار تا توقف الگوریتم پیشنهادی: ۲۰۰ تکرار
- درصدی از جواب‌های که کنار گذاشته می‌شوند: ۰/۳

۳-۴ اعتبار سنجی مدل تخصیص

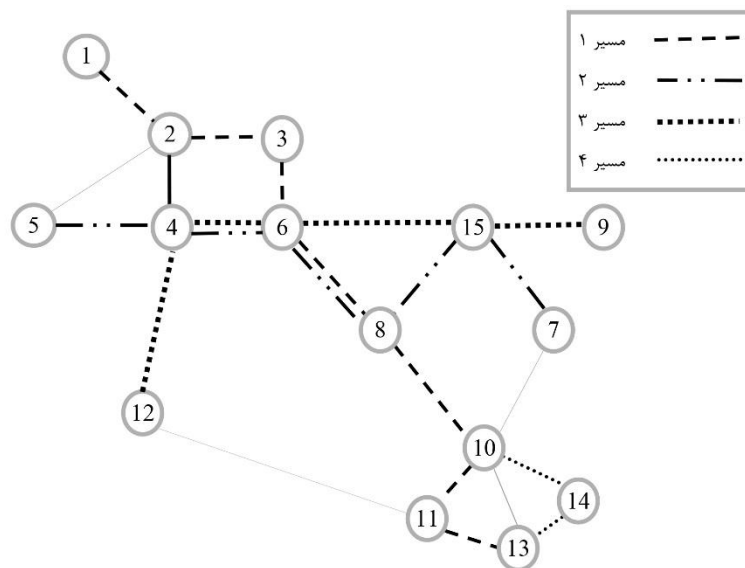
تخصیص تقاضای سفر شبکه‌ی حمل‌ونقل همگانی بخشی اساسی برای تعیین پارامترهای ارزیابی آن است. پارامترهایی که در اکثر مطالعات به عنوان پارامترهای عملکردی شبکه مورد بررسی قرار گرفته‌اند به شرح زیر هستند:

- d_0 : درصدی از تقاضای سفر به صورت مستقیم (بدون انتقال) پوشش داده می‌شود
- d_1 : درصدی از تقاضای سفر که با انجام یک انتقال پوشش داده می‌شود
- d_2 : درصدی از تقاضای سفر که با انجام دو انتقال پوشش داده می‌شود
- d_{un} : درصدی از تقاضای سفر که پوشش داده نمی‌شود

از آنجا که فرضیات مدل تخصیص مطالعه‌ی مندل (۱۹۸۰) با فرضیات مدل تخصیص استفاده شده در این مطالعه یکسان است، پارامترهای ارزیابی مدل تخصیص با نتایج این مطالعه به منظور اطمینان از عملکرد مدل تخصیص پیاده‌سازی شده مقایسه شد.

جدول ۲-۴ نتایج مربوط به تخصیص سفر برای نتایج مطالعه‌ی مندل و مطالعه‌ی حاضر

مطالعه	d_0 (%)	d_1 (%)	d_2 (%)	d_{un} (%)
مندل (۱۹۸۰)	۶۹/۹۴	۲۹/۹۳	۰/۱۳	۰/۰۰
مطالعه‌ی حاضر	۶۹/۹۴	۲۹/۹۳	۰/۱۳	۰/۰۰



شکل ۲-۴ مجموعه مسیرهای بهینه‌ی مطالعه‌ی مندل (۱۹۸۰)

۴-۴ نتایج و بحث

به منظور بررسی شرایط مختلف در پیدا کردن مجموعه مسیرهای بهینه‌ی شبکه‌ی اتوبوس‌رانی، در قالب دو تابع هدف و تعریف سناریوهای متفاوت به حل مسئله‌ی طراحی شبکه و تعیین تواتر پرداخته شد. نتایج حاصل از حل این مسئله و بحث در مورد آنها در بخش‌های بعدی ارائه می‌شود.

۴-۴-۱ تابع هدف شماره ۱

با تعریف دو سناریو که مربوط به جریمه‌های انتقال اول و دوم در مدل تخصیص سفر بودند و در نظر گرفتن شبکه‌هایی با ۴، ۶، ۷، ۸، ۱۰ و ۱۲ مسیر، مسئله‌ی طراحی شبکه و تعیین تواتر با تابع هدف شماره ۱ حل شد. سناریوی اول با هدف بهتر نشان دادن رفتار مسافری و مطابق مطالعه‌ی واردمن^۱ (۲۰۰۱) تعریف شد. طبق مطالعه‌ی او زمان درک شده توسط مسافری برای هر انتقال دارای میانگین ۱۷ دقیقه و انحراف معیار ۱۱ دقیقه‌ای است. جریمه‌های انتقال سناریوی دوم براساس اکثر مطالعاتی که در ادبیات موضوع موجود است انتخاب شد (جدول ۴-۳).

جدول ۴-۳ جریمه‌های انتقال برای سناریوهای تعریف شده

سناریو	جریمه‌ی انتقال اول	جریمه‌ی انتقال دوم
یک	۱۴	۲۲
دو	۵	۱۷

به منظور انجام مقایسه، تابع هدف مطالعه‌ی حاضر بر روی شبکه‌های بهینه‌ی به دست آمده مطالعات قبلی با استفاده از روش تخصیص و جریمه‌های انتقال سناریوی یک، به دلیل عملکرد بهتر این سناریو در پوشش سفرهای مستقیم، برآورد شد. در جدول ۴-۴ نتایج مربوط به مجموعه مسیرهای بهینه‌ی به دست آمده برای این مطالعه و مطالعات گذشته ارائه شده است.

^۱ Wardman

جدول ۴-۴ جزئیات نتایج مربوط به مسیرهای بهینه‌ی مطالعه‌ی حاضر و مطالعات گذشته

تعداد مسیر	مطالعه	هزینه مسافر (دقیقه)	اتوبوس	d_0 (%)	d_1 (%)	d_2 (%)	متوسط سرفاصله (دقیقه)	AIVTT (MPU)	AUC (MPU)
۴	مندل (۱۹۸۰)	۳۲۶۴۲۹/۹۹	۴۰	۶۹/۹۴	۲۹/۹۳	۰/۱۳	۴/۶۶	۱۱/۴۱	۲۰/۹۶
	چارک‌بورتی (۱۹۸۰)	۳۰۵۸۹۴/۶۴	۶۲	۸۹/۹۸	۱۰/۰۲	۰/۰۰	۵/۴۱	۱۳/۴۸	۱۹/۶۴
	مامفورد (۲۰۱۳)	۲۶۷۰۴۶/۵۵	۶۵	۹۱/۱۴	۸/۸۶	۰/۰۰	۵/۲۱	۱۱/۱۶	۱۷/۱۵
	چو و همکاران (۲۰۱۳)	۲۷۲۴۳۶/۹۰	۷۴	۹۲/۷۴	۷/۲۶	۰/۰۰	۴/۱۰	۱۲/۱۴	۱۷/۴۹
	نیکولیچ و تنودرویچ (۲۰۱۳)	۲۷۹۴۸۰/۹۳	۷۳	۹۱/۹۱	۸/۰۹	۰/۰۰	۴/۱۱	۱۲/۳۸	۱۷/۹۵
	کچاگیوپلوس و همکاران (۲۰۱۳)	۲۷۴۷۱۴/۹۸	۷۷	۹۲/۲۳	۷/۷۷	۰/۰۰	۴/۰۰	۱۲/۲۴	۱۷/۶۴
	سناریو ۱	۲۶۲۱۳۷/۸۱	۵۹	۹۴/۰۳	۵/۹۷	۰/۰۰	۴/۲۶	۱۱/۶۱	۱۶/۸۳
	سناریو ۲	۲۵۸۴۵۲/۹۴	۵۱	۸۳/۹۴	۱۶/۰۶	۰/۰۰	۴/۳۸	۱۰/۹۴	۱۶/۵۹
	مامفورد (۲۰۱۳)	۲۷۷۷۶۸/۸۰	۹۴	۹۶/۰۸	۳/۹۲	۰/۰۰	۴/۹۳	۱۲/۴۶	۱۷/۸۴
	چو و همکاران (۲۰۱۳)	۲۷۴۱۶۰/۰۰	۱۰۱	۹۸/۱۴	۱/۸۶	۰/۰۰	۵/۰۹	۱۲/۶۸	۱۷/۶۰
۶	نیکولیچ و تنودرویچ (۲۰۱۳)	۲۷۱۷۲۶/۷۴	۹۰	۹۷/۲۷	۲/۷۳	۰/۰۰	۶/۱۵	۱۲/۱۳	۱۷/۴۵
	کچاگیوپلوس و همکاران (۲۰۱۳)	۲۹۱۷۶۸/۴۷	۸۲	۹۶/۲۱	۳/۷۹	۰/۰۰	۸/۵۴	۱۳/۶۸	۱۸/۷۳
	سناریو ۱	۲۵۵۶۱۹/۸۵	۸۶	۹۶/۰۸	۳/۹۲	۰/۰۰	۴/۷۵	۱۱/۲۶	۱۶/۴۱
	سناریو ۲	۲۵۹۲۷۷/۶۹	۵۳	۸۴/۵۹	۱۵/۴۱	۰/۰۰	۴/۶۴	۱۰/۶۴	۱۶/۶۵
	مامفورد (۲۰۱۳)	۳۰۳۸۹۲/۰۶	۱۰۲	۹۸/۰۱	۱/۹۹	۰/۰۰	۵/۶۳	۱۳/۷۵	۱۹/۵۱
	چو و همکاران (۲۰۱۳)	۲۵۸۹۸۹/۵۸	۹۳	۹۹/۱	۰/۹	۰/۰۰	۶/۴۷	۱۱/۲۲	۱۶/۶۳
	نیکولیچ و تنودرویچ (۲۰۱۳)	۲۷۷۴۴۳/۶۷	۹۶	۹۸/۹۷	۱/۰۳	۰/۰۰	۷/۲۴	۱۲/۳۵	۱۷/۸۱
	کچاگیوپلوس و همکاران (۲۰۱۳)	۲۹۰۷۹۴/۴۳	۹۶	۹۸/۲	۱/۸	۰/۰۰	۶/۳۴	۱۳/۴۳	۱۸/۶۷
	سناریو ۱	۲۶۳۴۲۰/۸۵	۷۷	۹۵/۱۸	۴/۸۲	۰/۰۰	۷/۱۷	۱۱/۴۲	۱۶/۹۱
	سناریو ۲	۲۴۷۴۸۳/۱۵	۶۴	۹۱/۹۷	۸/۰۳	۰/۰۰	۷/۷۱	۱۰/۷۷	۱۵/۸۹
۷	مامفورد (۲۰۱۳)	۲۸۱۹۶۷/۲۶	۱۰۱	۹۸/۹۵	۱/۴۱	۰/۰۰	۷/۲۴	۱۲/۲۳	۱۸/۱۰
	چو و همکاران (۲۰۱۳)	۲۵۹۱۸۰/۳۴	۸۹	۹۹/۰۴	۰/۹۶	۰/۰۰	۷/۹۱	۱۰/۹۴	۱۶/۶۴
	نیکولیچ و تنودرویچ (۲۰۱۳)	۲۹۰۰۰۱۵/۷۱	۱۰۳	۹۸/۹۷	۱/۰۳	۰/۰۰	۸/۰۲	۱۳/۰۰	۱۸/۶۲
	کچاگیوپلوس و همکاران (۲۰۱۳)	۲۸۵۰۵۲/۴۱	۹۰	۹۸/۴۶	۱/۵۴	۰/۰۰	۸/۱۲	۱۱/۸۴	۱۸/۳۰
	سناریو ۱	۲۶۶۵۹۵/۸۱	۸۶	۹۷/۴۳	۲/۵۷	۰/۰۰	۸/۲۴	۱۱/۷۷	۱۷/۱۲
	سناریو ۲	۲۵۸۰۷۵/۶۱	۷۷	۹۶/۴	۳/۶	۰/۰۰	۱۳/۷۱	۱۰/۵۱	۱۶/۵۷
	سناریو ۱	۲۶۱۰۹۵/۹۸	۸۱	۹۶/۶۶	۳/۳۴	۰/۰۰	۷/۳۱	۱۰/۶۲	۱۶/۷۶
	سناریو ۲	۲۵۴۸۷۶/۵۱	۸۲	۹۶/۴۷	۳/۵۳	۰/۰۰	۸/۷۰	۱۰/۸۵	۱۶/۳۷
	سناریو ۱	۲۸۴۷۷۷/۶۶	۸۹	۹۵/۳۸	۴/۶۲	۰/۰۰	۱۰/۲۸	۱۱/۸۰	۱۸/۲۹
	سناریو ۲	۲۷۱۵۸۳/۵۰	۸۶	۹۴/۹۹	۵/۰۱	۰/۰۰	۹/۹۸	۱۱/۰۸	۱۷/۴۴
۱۰	سناریو ۱	۲۶۱۰۹۵/۹۸	۸۱	۹۶/۶۶	۳/۳۴	۰/۰۰	۷/۳۱	۱۰/۶۲	۱۶/۷۶
	سناریو ۲	۲۵۴۸۷۶/۵۱	۸۲	۹۶/۴۷	۳/۵۳	۰/۰۰	۸/۷۰	۱۰/۸۵	۱۶/۳۷
۱۲	سناریو ۱	۲۸۴۷۷۷/۶۶	۸۹	۹۵/۳۸	۴/۶۲	۰/۰۰	۱۰/۲۸	۱۱/۸۰	۱۸/۲۹
	سناریو ۲	۲۷۱۵۸۳/۵۰	۸۶	۹۴/۹۹	۵/۰۱	۰/۰۰	۹/۹۸	۱۱/۰۸	۱۷/۴۴

این نتایج شامل پارامترهایی می‌شوند که به درک بهتر از شبکه‌های بهینه کمک می‌کنند. در این جدول علاوه بر پارامترهای بیان شده در بخش ۳-۴ دو پارامتر AUC و $AIVTT$ نیز ارائه شده است. به این صورت که:

$AIVTT$: متوسط زمان سفر سپری شده در اتوبوس (دقیقه به ازای هر مسافر)^۱

AUC : متوسط هزینه‌ی مسافران (دقیقه به ازای هر مسافر)

در بین شبکه‌های بهینه‌ی به دست آمده در سناریوی یک، شبکه‌ی ۸ مسیری با پوشش ۹۷/۴۳ درصدی از سفرها به صورت مستقیم بهترین شبکه از این نظر بود. این شبکه به ۸۶ اتوبوس نیاز داشت و متوسط هزینه‌ی مسافران آن ۱۷/۱۲ دقیقه بود. جزئیات این شبکه در جدول ۴-۵ و جزئیات شبکه‌های بهینه‌ی دیگر در پیوست ارائه شده است. در مورد سناریوی دو، بهترین شبکه از نظر پوشش سفرهای مستقیم، شبکه‌ی ۱۰ مسیری با ۹۶/۴۷ درصد بود که ناوگان مورد نیاز آن ۸۲ اتوبوس بود و متوسط هزینه‌ی مسافران برای این شبکه ۱۶/۳۷ دقیقه بود. بیشترین درصد سفر مستقیم در مطالعات قبلی مربوط به شبکه‌ی ۷ مسیری مطالعه‌ی چوو و همکاران (۲۰۱۳) با ۹۹/۱ بود. این شبکه به ۹۳ عدد اتوبوس نیاز داشت و متوسط هزینه‌ی مسافران ۱۶/۶۳ دقیقه بود.

مقایسه‌ی بین سناریوی یک و دو نشان داد که در شبکه‌های طراحی شده با سناریوی یک سفرهای مستقیم بیشتری را پوشش داده‌اند. دلیل این موضوع را می‌توان کم بودن جریمه‌های انتقال در محاسبه‌ی هزینه‌ی مسافران برای سناریوی دو دانست. به عبارت دیگر در این سناریو، مسافران حساسیت زیادی نسبت به انتقال‌ها در طی سفر نشان نداده‌اند. البته اختلاف این عدد با بالا رفتن تعداد مسیرها در شبکه کم شده است. به گونه‌ای که برای شبکه‌ای با ۴ مسیر اختلاف درصد پوشش سفرهای مستقیم برای سناریوی یک و دو ۱۰/۰۹ درصد است و این اختلاف برای شبکه‌ای با ۱۰ مسیر به ۰/۱۹ درصد رسیده است. این موضوع نشان می‌دهد که افزایش تعداد مسیرها موجب شده است تا بین یک

^۱ Minute Per User (MPU)

مبدأ و مقصد مسیرهای بیشتری وجود داشته باشد. درمورد پارامترهای متوسط زمان سفر درون وسیله‌ی نقلیه و متوسط سرفاصله‌ی مسیرها تفاوت زیادی بین این دو سناریو دیده نشد.

جدول ۴-۵ جزئیات مربوط به شبکه‌ی ۸ مسیری از سناریوی ۱

شماره مسیر	مبدأ	مقصد	ترتیب گره‌ها	زمان سفر (دقیقه)	تواتر (ساعت/۱)	ناوگان	سرفاصله (دقیقه)	بیشینه‌ی جریان	شلوغ‌ترین کمان
۱	۵	۷	۵-۴-۶-۱۵-۷	۱۳	۴/۰۰	۲	۱۵/۰۰	۱۵۸	۶-۱۵
۲	۵	۱	۵-۴-۶-۳-۲-۱	۲۱	۹/۹۰	۷	۶/۰۵	۴۵۹	۶-۳
۳	۵	۱۱	۵-۴-۶-۸-۱۰-۱۴-۱۳-۱۱	۳۳	۱۵/۰۰	۱۷	۴/۰۰	۱۰۵۹	۸-۱۰
۴	۱۲	۹	۱۲-۱۱-۱۳-۱۰-۷-۱۵-۹	۴۲	۱۵/۰۰	۲۱	۴/۰۰	۸۹۷	۱۳-۱۰
۵	۱۲	۹	۱۲-۴-۶-۱۵-۹	۲۵	۴/۰۰	۴	۱۵/۰۰	۴۸	۴-۶
۶	۱۴	۱	۱۴-۱۰-۷-۱۵-۶-۳-۲-۱	۳۳	۱۵/۰۰	۱۷	۴/۰۰	۸۰۹	۶-۱۵
۷	۱	۹	۱-۲-۳-۶-۱۵-۹	۲۴	۴/۳۰	۴	۱۳/۹۴	۲۱۵	۳-۶
۸	۱۱	۱	۱۱-۱۰-۸-۶-۳-۲-۱	۲۸	۱۵/۰۰	۱۵	۴,۰۰	۸۸۹	۸-۶

در جدول‌های ۴-۶ و ۴-۷ نتایج مربوط به بهترین شبکه از مطالعات قبلی (با توجه به درصد سفرهای مستقیم) به همراه شبکه‌های بهینه‌ی سناریوی یک و دو این مطالعه ارائه شده است. در این جدول‌ها اختلاف پارامترهای عملکردی (سفرهای مستقیم، تعداد اتوبوس‌ها، متوسط هزینه‌ی مسافرتین و متوسط زمان سفر درون وسیله‌ی نقلیه به ترتیب از ستون ۷ تا ۱۰ جدول‌ها) بهترین شبکه از مطالعات پیشین با شبکه‌های این مطالعه آورده شده است.

علامت مثبت نشان‌دهنده‌ی افزایش هر پارامتر از شبکه‌ی این مطالعه نسبت به شبکه‌ی متناظر خود در مطالعات پیشین است. سلول‌هایی که به رنگ سبز هستند بیانگر مطلوبیت پارامترهای مربوط به شبکه‌های بهینه‌ی این مطالعه نسبت به شبکه‌های متناظر خود در مطالعات پیشین هستند. به طور مثال ستون هفتم جدول نشان می‌دهد که پارامتر d_0 برای شبکه‌ی بهینه‌ی ۴ مسیری این مطالعه نسبت به مطالعه‌ی چو و همکاران (۲۰۱۳) ۱/۲۹ درصد افزایش داشته است و این افزایش در راستای مطلوبیت بیشتر این شبکه نسبت به مطالعه‌ی چو و همکاران (۲۰۱۳) بوده است.

جدول ۴-۶ اختلاف بین پارامترهای عملکردی شبکه‌های سناریوی ۱ و شبکه‌های مطالعات پیشین

تعداد مسیرها	مطالعه	d_0 (%)	AIVTT	تعداد اتوبوس	AUC	اختلاف d_0 (%)	اختلاف AIVTT (%)	اختلاف تعداد اتوبوس (%)	اختلاف AUC (%)
۴	چو و همکاران (۲۰۱۳)	۹۲/۷۴	۱۲/۱۴	۷۴	۱۷/۴۹	+۱/۲۹	-۴/۳۷	-۲۰/۲۷	-۳/۷۷
	سناریو ۱	۹۴/۰۳	۱۱/۶۱	۵۹	۱۶/۸۳				
۶	چو و همکاران (۲۰۱۳)	۹۸/۱۴	۱۲/۶۸	۱۰۱	۱۷/۶۰	-۲/۰۶	-۱۱/۱۳	-۱۴/۸۵	-۶/۶۷
	سناریو ۱	۹۶/۰۸	۱۱/۲۶	۸۶	۱۶/۴۱				
۷	چو و همکاران (۲۰۱۳)	۹۹/۱	۱۱/۲۲	۹۳	۱۶/۶۳	-۳/۹۲	+۱/۷۸	-۱۷/۲	+۱/۶۸
	سناریو ۱	۹۵/۱۸	۱۱/۴۲	۷۷	۱۶/۹۱				
۸	چو و همکاران (۲۰۱۳)	۹۹/۰۴	۱۰/۹۴	۸۹	۱۶/۶۴	-۱/۶۱	+۷/۵۹	-۳/۳۷	+۲/۸۸
	سناریو ۱	۹۷/۴۳	۱۱/۷۷	۸۶	۱۷/۱۲				

مطابق جدول ۴-۶، در شبکه‌هایی با ۶، ۷ و ۸ مسیر، شبکه‌های بهینه‌ی مطالعه‌ی چو و همکاران (۲۰۱۳) از نظر پوشش سفرهای مستقیم به طور جزئی عملکرد بهتری را نسبت به سناریوی یک این مطالعه از خود نشان دادند. از طرفی تعداد اتوبوس‌های مورد نیاز برای شبکه‌های این سناریو همواره کمتر بوده است.

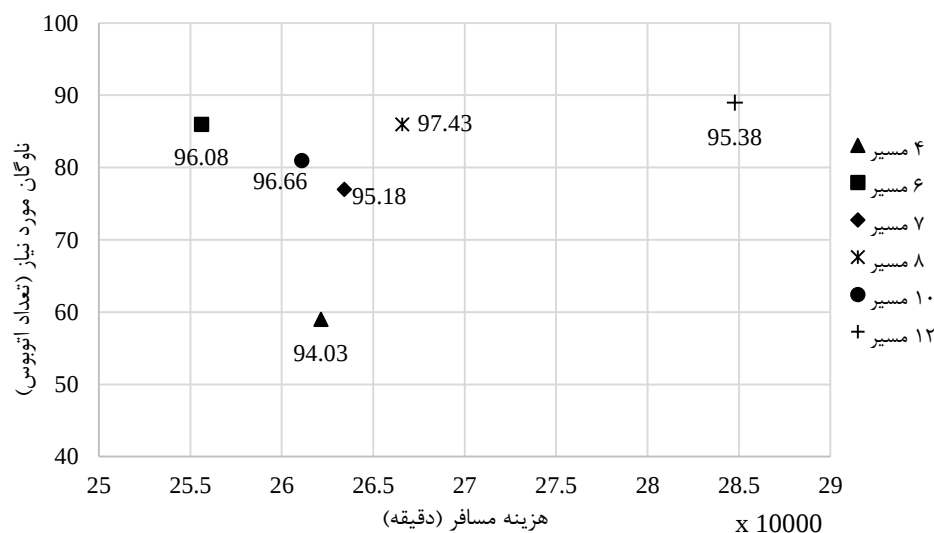
جدول ۴-۷ اختلاف بین پارامترهای عملکردی شبکه‌های سناریوی ۲ و شبکه‌های مطالعات پیشین

تعداد مسیرها	مطالعه	d_0 (%)	AIVTT	تعداد اتوبوس	AUC	اختلاف d_0 (%)	اختلاف AIVTT (%)	اختلاف تعداد اتوبوس (%)	اختلاف AUC (%)
۴	چو و همکاران (۲۰۱۳)	۹۲/۷۴	۱۲/۱۴	۷۴	۱۶/۸۴	-۸/۸	-۹/۸۸	-۳۱/۰۸	-۱/۴۸
	سناریو ۲	۸۳/۹۴	۱۰/۹۴	۵۱	۱۶/۵۹				
۶	چو و همکاران (۲۰۱۳)	۹۸/۱۴	۱۲/۶۸	۱۰۱	۱۷/۴۴	-۱۳/۵۵	-۱۶/۰۹	-۴۷/۵۲	-۴/۵۳
	سناریو ۲	۸۴/۵۹	۱۰/۶۴	۵۳	۱۶/۶۵				
۷	چو و همکاران (۲۰۱۳)	۹۹/۱	۱۱/۲۲	۹۳	۱۶/۵۵	-۷/۱۳	-۴/۰۱	-۳۱/۱۸	-۳/۹۹
	سناریو ۲	۹۱/۹۷	۱۰/۷۷	۶۴	۱۵/۸۹				
۸	چو و همکاران (۲۰۱۳)	۹۹/۰۴	۱۰/۹۴	۸۹	۱۶/۵۵	-۲/۶۴	-۳/۹۳	-۱۳/۴۷	+۰/۱۲
	سناریو ۲	۹۶/۰۴	۱۰/۵۱	۷۷	۱۶/۵۷				

بر اساس مقایسه‌ی انجام شده در جدول ۴-۷، مشاهده می‌شود که شبکه‌های سناریوی ۲ از نظر برآورده کردن تقاضا به صورت سفرهای مستقیم ضعیف‌تر عمل کرده‌اند که دلیل آن حساسیت کمتر

مسافران نسبت به عوض کردن مسیر در طول سفر بوده است. اما شبکه‌های این سناریو از نظر سرویس‌دهنده شبکه‌هایی مطلوب‌تر هستند چرا که ناوگان مورد نیاز آنها نسبت شبکه‌های مطالعه‌ی چو و همکاران (۲۰۱۳) بسیار کمتر است.

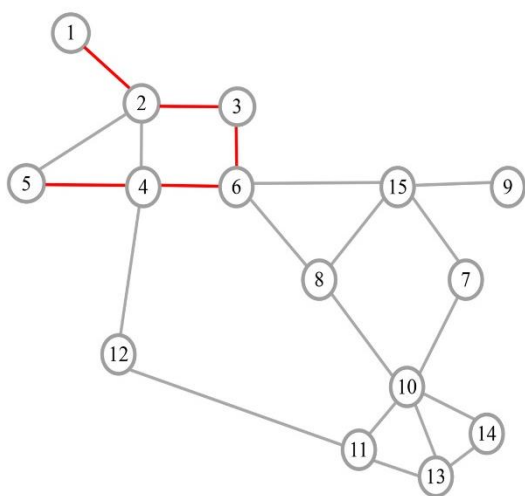
شکل ۳-۴ نمودار پراکنشی ناوگان مورد نیاز را در برابر هزینه‌ی مسافر به همراه درصد سفرهای مستقیم شبکه‌های مختلف را برای سناریوی یک نشان به می‌دهد. مطابق این نمودار شبکه‌ی ۸ مسیری با پوشش ۹۷/۴۳ درصد از سفرهای مستقیم از این نظر بهترین شبکه محسوب می‌شود. بهترین شبکه از نظر مسافران شبکه‌ای با ۶ مسیر است. از طرف دیگر مقرون به صرفه‌ترین شبکه از نظر سرویس‌دهنده شبکه‌ی ۴ مسیری است که با ۵۹ اتوبوس نیاز دارد.



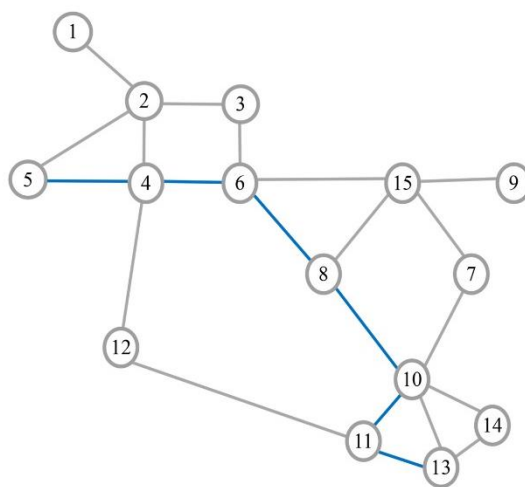
شکل ۳-۴ نمودار پراکنشی ناوگان مورد نیاز در برابر هزینه مسافر برای شبکه‌های بهینه‌ی سناریو ۱

توضیح: اعداد نوشته شده بر روی هر نقطه از نمودار درصد پوشش سفرهای مستقیم شبکه است.

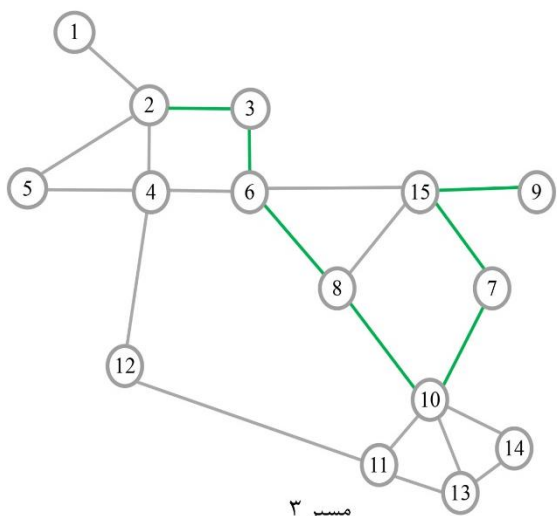
شکل‌های ۴-۴ تا ۷-۴ مسیرهای شبکه‌های بهینه‌ی ۴ تا ۸ مسیری از سناریوی یک را نشان می‌دهند.



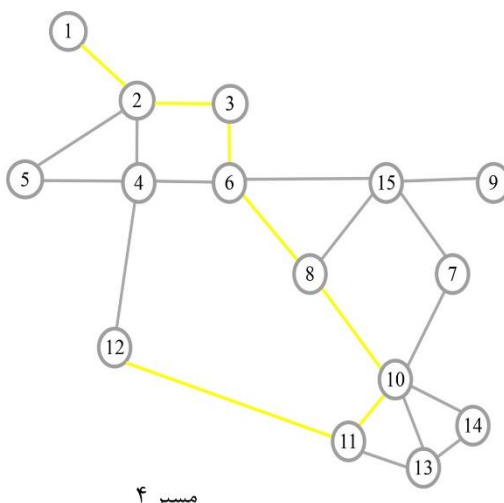
مسیر ۱



مسیر ۲

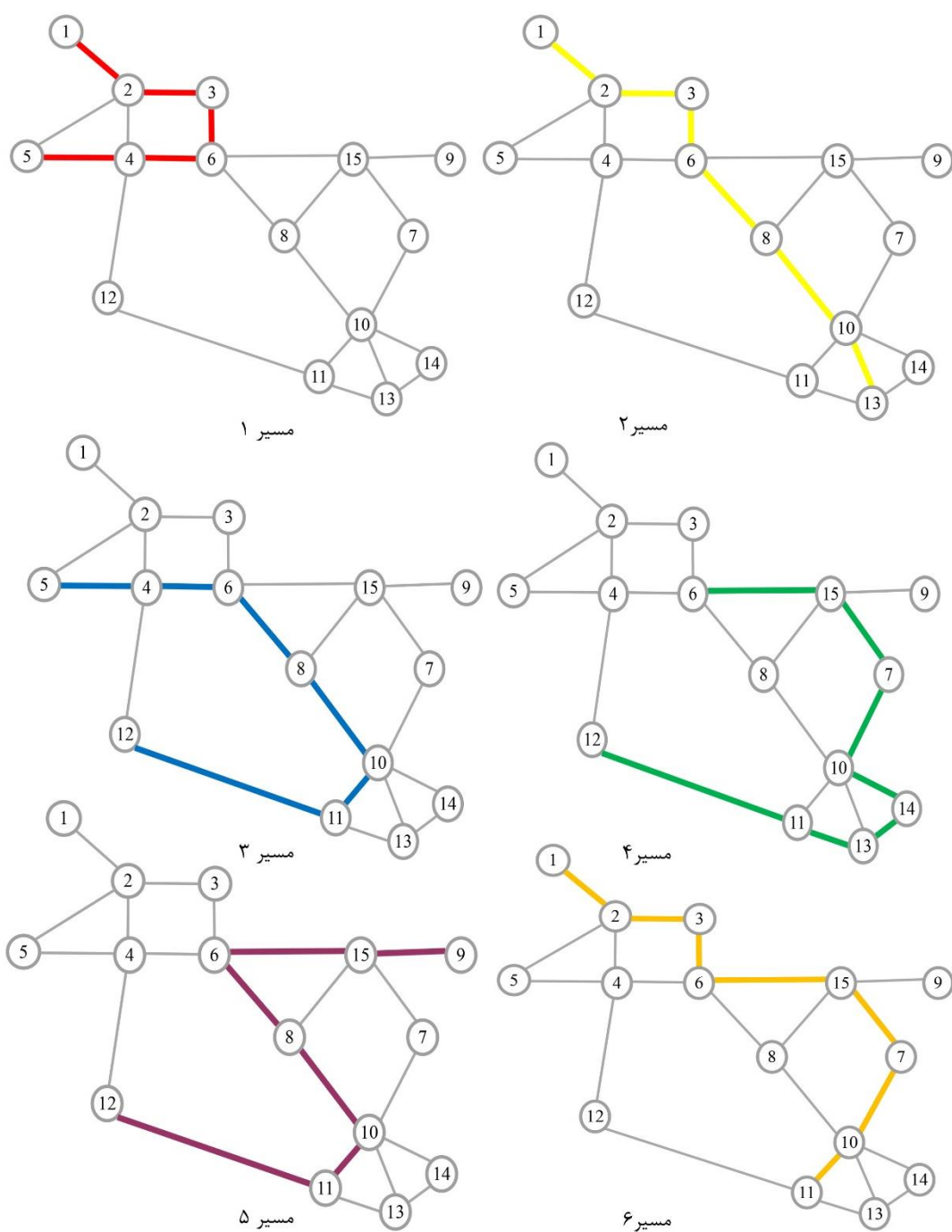


مسیر ۳

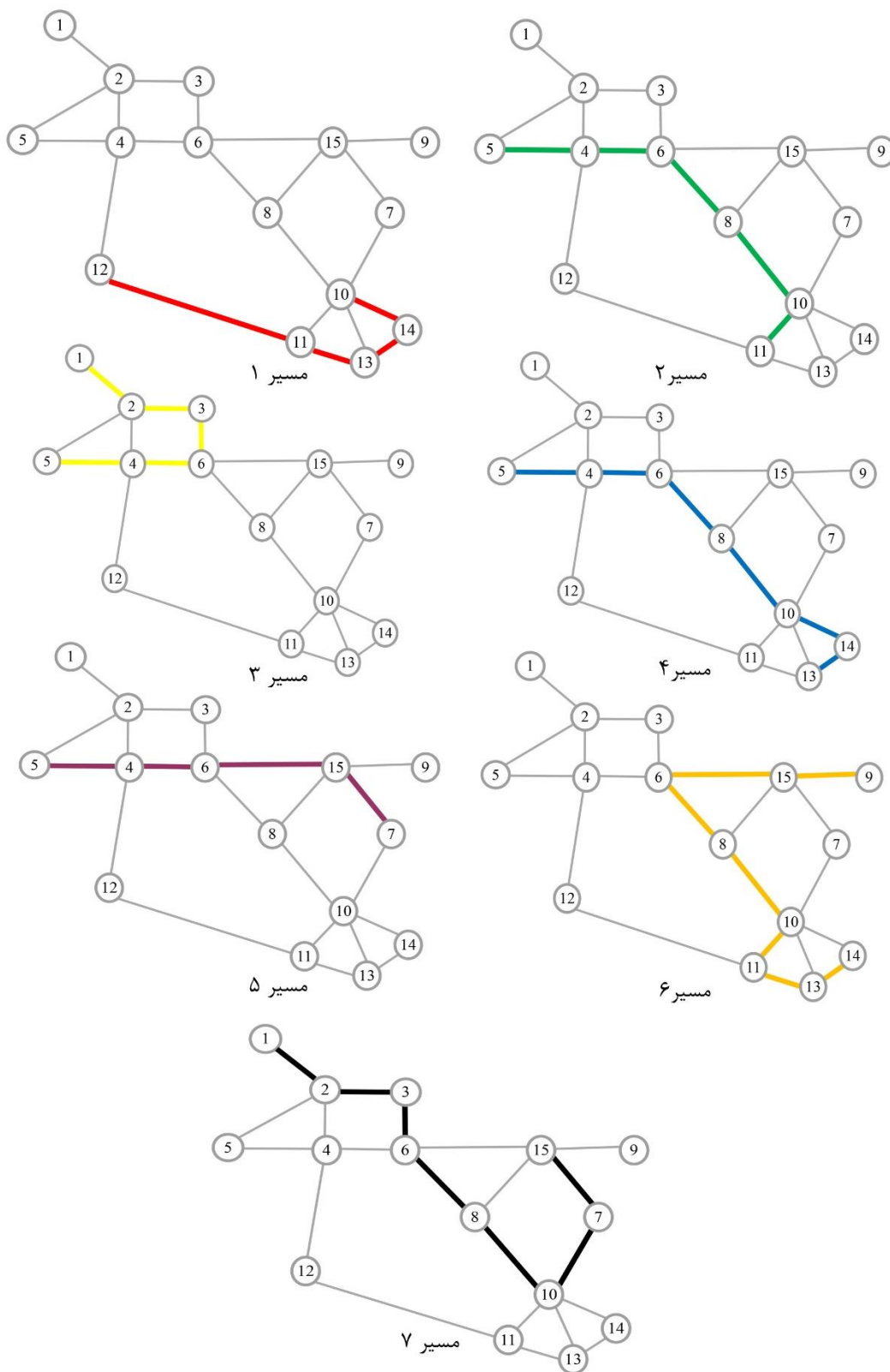


مسیر ۴

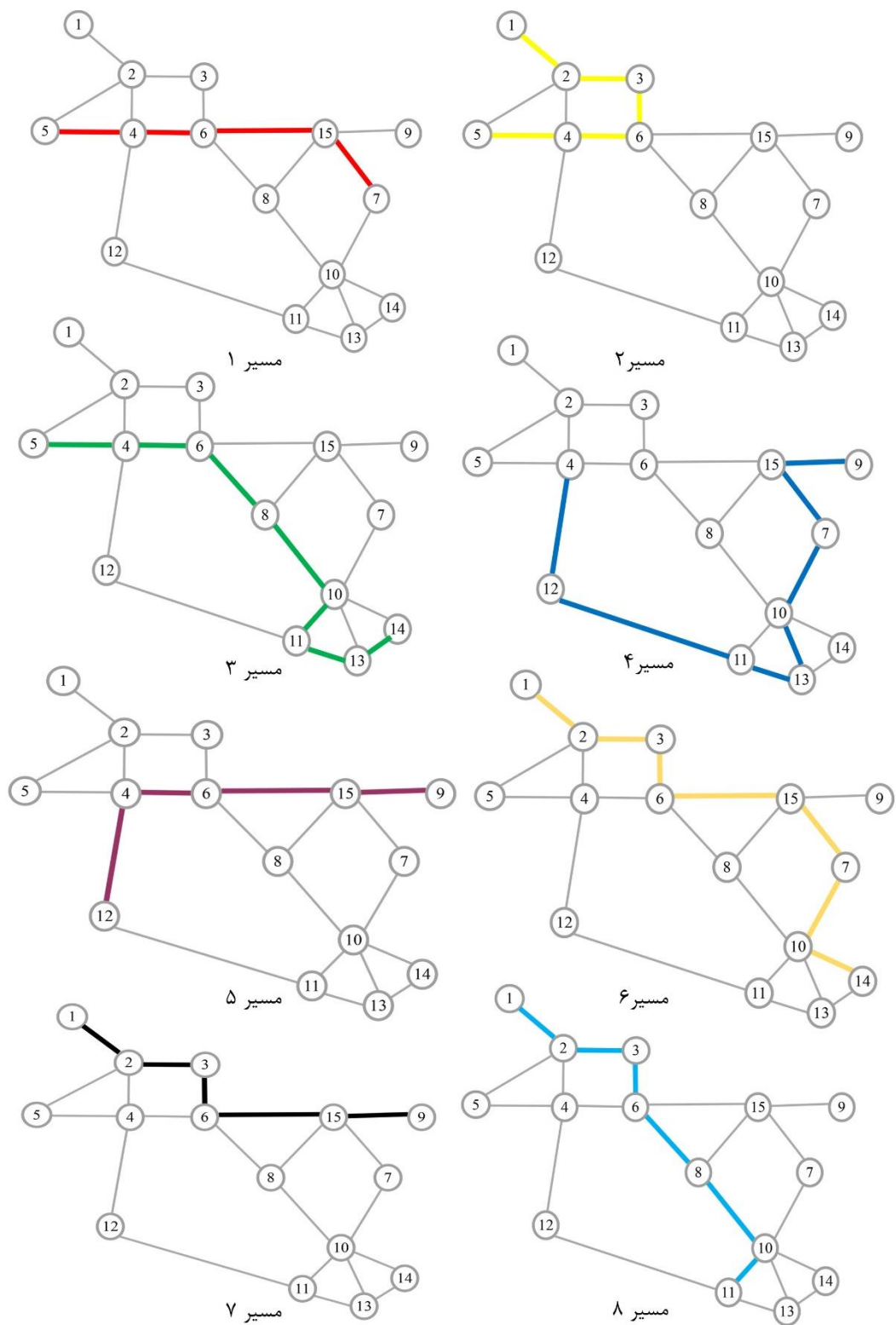
شکل ۴-۴ مسیرهای بهینه برای شبکه‌ای با ۴ مسیر از سناریوی ۱



شکل ۴-۵ مسیرهای بهینه برای شبکه‌ای با ۶ مسیر از سناریوی ۱

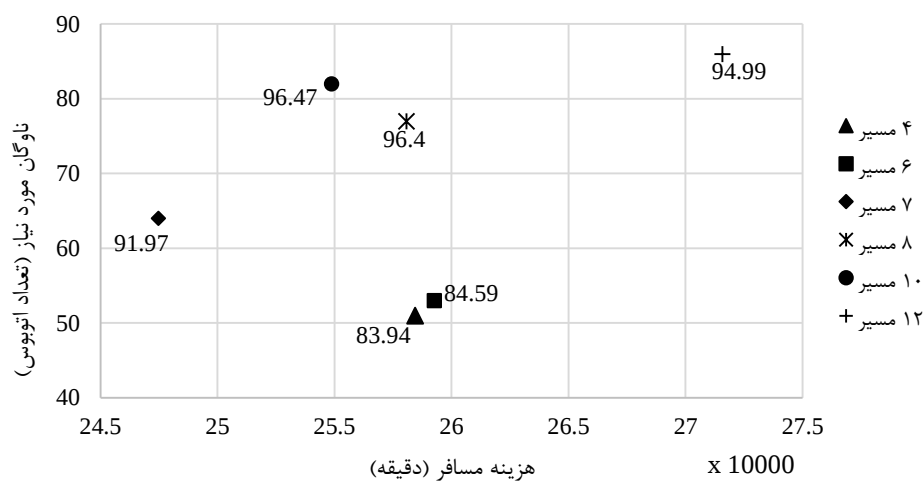


شکل ۴-۶ مسیرهای بهینه برای شبکه‌ای با ۷ مسیر از سناریوی ۱



شکل ۴-۷ مسیرهای بهینه برای شبکه‌ای با ۸ مسیر از سناریوی ۱

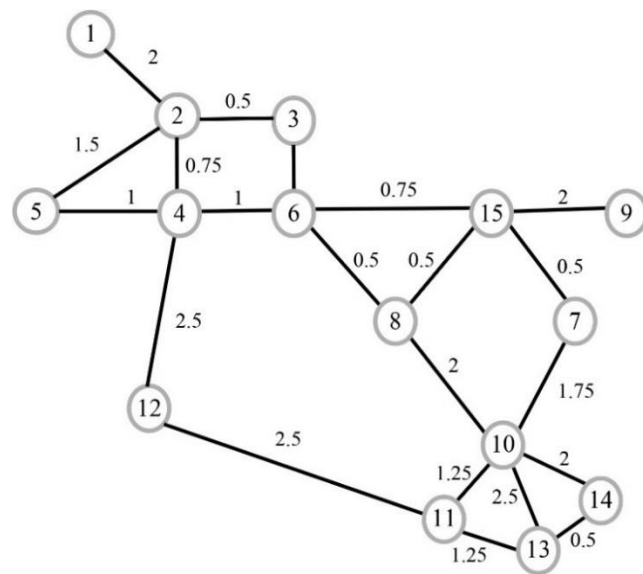
همان‌طور که در شکل ۴-۸ دیده می‌شود، در مورد نتایج سناریوی دو شبکه‌ی ۱۰ مسیری با پوشش ۹۶/۴۷ درصد از سفرهای مستقیم از این نظر بهترین شبکه محسوب می‌شود. شبکه‌ای که از هفت مسیر تشکیل شده است از نظر مسافران بهترین شبکه محسوب می‌شود که در آن هزینه‌ی مسافر ۲۶۳۴۲۰ دقیقه (متوسط هزینه‌ی هر مسافر: ۱۵/۸۹ دقیقه) است. از طرف دیگر بهترین شبکه از نظر سرویس‌دهنده‌ی شبکه‌ی ۴ مسیری با ۵۱ اتوبوس است.



شکل ۴-۸ نمودار پراکنشی ناوگان مورد نیاز در برابر هزینه مسافر برای شبکه‌های بهینه سناریو ۲
توضیح: اعداد نوشته شده بر روی هر نقطه از نمودار درصد پوشش سفرهای مستقیم شبکه است.

۴-۴-۲ تابع هدف شماره ۲

در تابع هدف دوم این مطالعه علاوه بر هزینه‌های در نظر گرفته شده برای تابع شماره ۱، به آلودگی تولید شده در شبکه در قالب هزینه‌های جانبی پرداخته شد. از آنجا که در شبکه‌ی معرفی شده توسط مندل (۱۹۸۰) تنها زمان سفر بین هر جفت گره از شبکه ارائه شده است و مطابق رابطه‌ی (۳-۲۵) آلودگی تولید شده تابعی از طول شبکه است، طول‌هایی فرضی برای هر کمان در نظر گرفته شد.



شکل ۴-۹ شبکه‌ی مندل به همراه طول‌های فرض شده برای هر کمان

در شکل ۴-۹ اعدادی که بر روی هر کمان نوشته شده است نشان‌دهنده‌ی طول فرض شده برای آن کمان است.

با در نظر گرفتن مقادیر ارائه شده در بخش ۴-۳ و جدول ۴-۸ به عنوان فرض‌ها و پارامترهای ورودی مطابق روش حل بیان شده در فصل سوم به حل تابع هدف شماره ۲ پرداخته شد. جدول ۴-۹ نتایج مربوط به شبکه‌های بهینه‌ی طراحی شده با توجه به هزینه‌های در نظر گرفته شده در تابع هدف شماره‌ی ۲ را نشان می‌دهد.

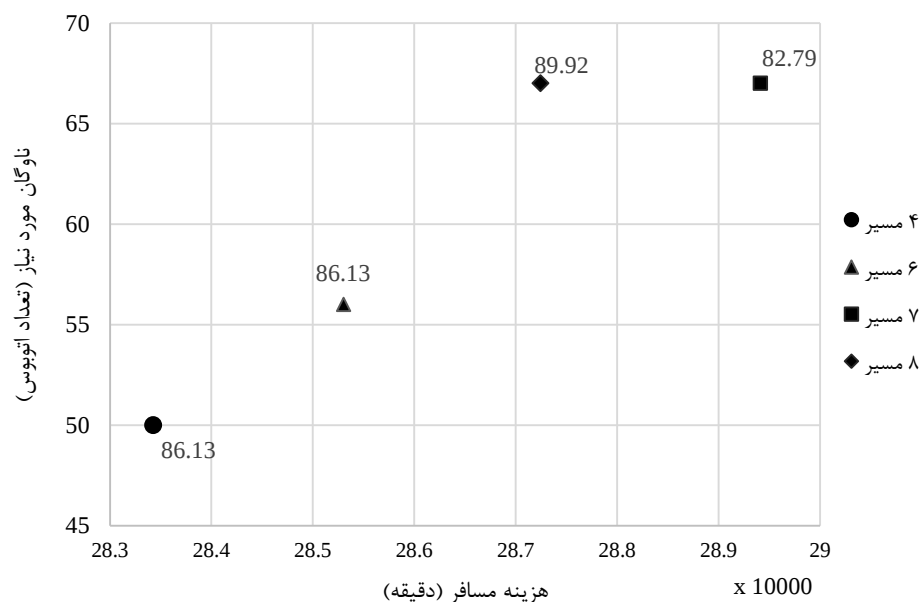
جدول ۴-۸ پارامترهای فرض شده برای تابع هدف شماره ۲

پارامتر	مقدار
تعداد مسیرهای اتوبوس همگانی	۴، ۶، ۷ و ۸
اتوبوس‌های الکتریکی موجود	۵۰
کمترین طول هر مسیر (کیلومتر)	۲/۵
بیشترین طول مسیر مخصوص اتوبوس معمولی (کیلومتر)	۱۰
بیشترین طول مسیر مخصوص اتوبوس الکتریکی (کیلومتر)	۸

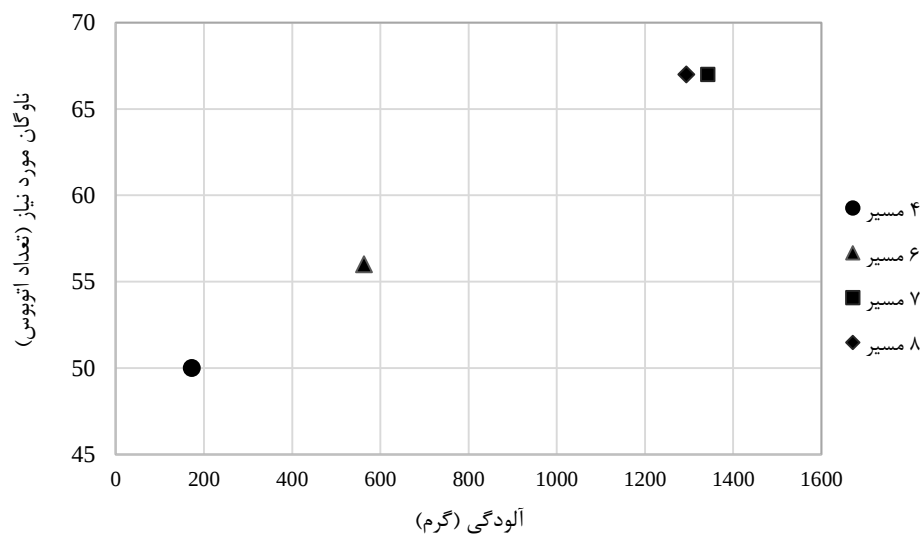
جدول ۹-۴ پارامترهای ارزیابی شبکه‌های بهینه‌ی به‌دست آمده برای تابع هدف شماره‌ی ۲

تعداد مسیر	هزینه‌ی مسافر (دقیقه)	آلودگی (گرم)	اتوبوس معمولی	اتوبوس الکتریکی	ایستگاه شارژ	d_0	d_1	d_2	میانگین طول مسیر (کیلومتر)	مجموع طول شبکه (کیلومتر)
۴	۲۸۳۴۲۴/۳۱	۱۷۲/۳۲	۲	۴۸	۳	۸۶/۱۳	۱۳/۸۷	۰/۰۰	۶/۶۹	۲۶/۷۵
۶	۲۸۵۳۰۰/۳۶	۵۶۲/۹۳	۸	۴۸	۳	۸۶/۱۳	۱۳/۸۷	۰/۰۰	۵/۸۸	۳۵/۲۵
۷	۲۸۹۴۱۰/۵۶	۱۳۴۲/۵۶	۱۷	۵۰	۳	۸۲/۷۹	۱۷/۰۸	۰/۱۳	۴/۶۱	۳۲/۲۵
۸	۲۸۷۲۴۲/۶۳	۱۲۹۳/۸۶	۱۸	۴۹	۳	۸۹/۹۲	۸/۸۶	۱/۲۲	۴/۱۶	۴۱/۲۵

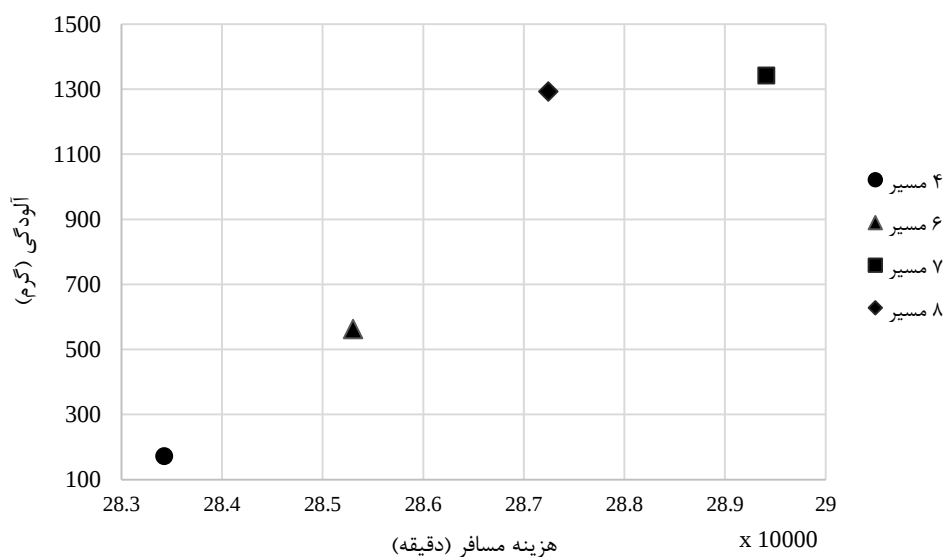
در شکل‌های ۴-۱۰ تا ۴-۱۲ نمودارهای پراکنشی مربوط به هزینه‌های مختلف شبکه‌های بهینه به دست آمده ارائه شده است تا نمایش بهتری از نتایج جدول ۹-۴ باشد و تصمیم‌گیرنده با توجه به خواسته‌ی خود شبکه‌ی مطلوب را انتخاب کند. اعداد نوشته شده بر روی نمودار شکل ۴-۱۰ نشان‌دهنده‌ی درصد سفرهای مستقیم هر شبکه است.



شکل ۴-۱۰ نمودار پراکنشی ناوگان مورد نیاز در برابر هزینه‌ی مسافر



شکل ۴-۱۱ نمودار پراکنشی ناوگان مورد نیاز در برابر آلودگی



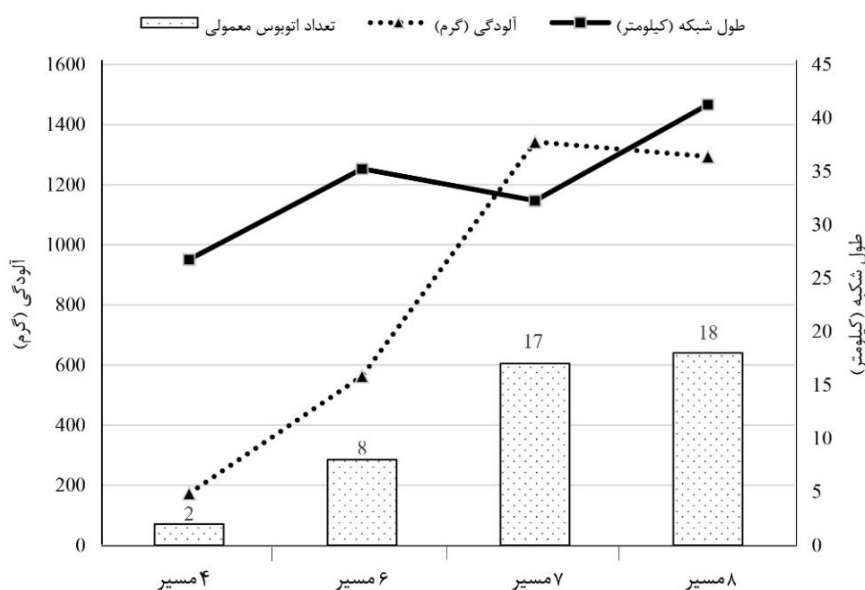
شکل ۴-۱۲ نمودار پراکنشی آلودگی در برابر هزینه مسافر

مطابق نمودارهای پراکنشی ارائه شده می‌توان گفت که شبکه‌ی طراحی شده با ۴ مسیر دست بهترین شبکه از نظر هر سه هزینه‌ی مورد بررسی بوده است. در جدول ۴-۱۰ جزئیات مربوط به این شبکه ارائه شده است. جزئیات شبکه‌های بهینه‌ی دیگر تابع هدف شماره ۲ در پیوست پایان‌نامه قابل دسترسی است.

جدول ۴-۱۰ جزئیات شبکه‌ی بهینه‌ی ۴ مسیری تابع هدف شماره‌ی ۲

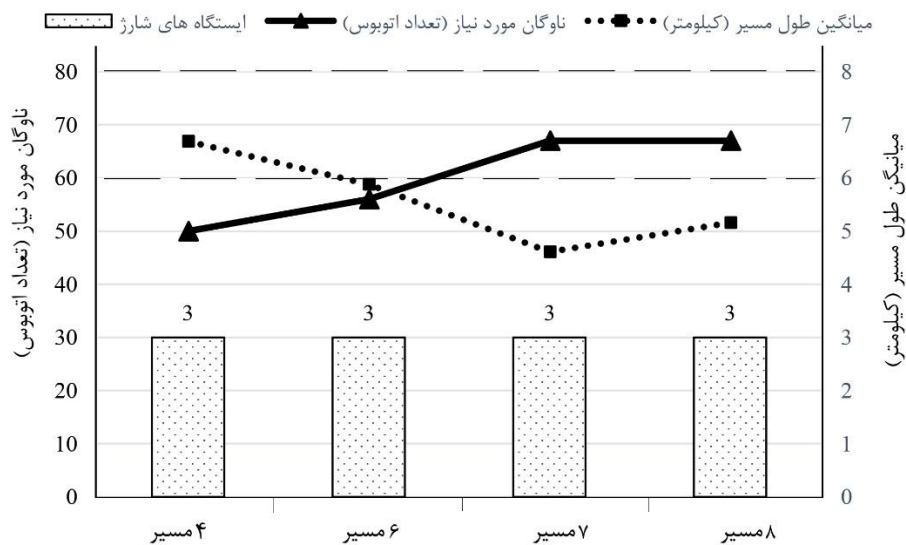
شماره مسیر	مبدأ	مقصد	ترتیب گره‌ها	زمان سفر (دقیقه)	طول (کیلومتر)	تواتر (ساعت/۱)	تعداد اتوبوس معمولی	تعداد اتوبوس الکتریکی	بیشینه‌ی جریان
۱	۱۳	۱۲	۱۳-۱۱-۱۲	۱۵	۳/۷۵	۴/۰۰	۲	۰	۱۹۷
۲	۵	۱۴	۵-۴-۶-۸-۱۰-۱۱-۱۳-۱۴	۳۰	۷/۵۰	۱۵/۰۰	۰	۱۷	۱۶۹۴
۳	۹	۱۲	۹-۱۵-۷-۱۰-۱۱-۱۲	۳۲	۸/۰۰	۱۱/۷۹	۰	۱۴	۵۸۹
۴	۱	۱۱	۱-۲-۳-۶-۱۵-۷-۱۰-۱۱	۳۰	۷/۵۰	۱۵/۰۰	۰	۱۷	۱۹۷۵

نمودار شکل ۴-۱۳ تغییرات آلودگی در برابر مجموع طول مسیرها و تعداد اتوبوس‌های معمولی نشان می‌دهد. مطابق این نمودار می‌توان گفت طول شبکه و تعداد اتوبوس معمولی هیچ‌یک به تنهایی موجب افزایش یا کاهش آلودگی نبوده‌اند. اگرچه با افزایش تعداد مسیرهای شبکه از ۴ تا ۷ اثر تعداد اتوبوس‌های معمولی نسبت به طول شبکه بر روی آلودگی تولید شده بیشتر بوده است که می‌توان دلیل آن را به اختلاف بیشتر تعداد اتوبوس‌های معمولی برای این شبکه‌ها دانست. در مورد شبکه‌ی ۸ مسیری، با وجود افزایش تعداد اتوبوس‌های معمولی و طول مسیر، آلودگی کاهش داشته است. دلیل این موضوع کاهش میانگین تواتر مسیرهای این شبکه نسبت به شبکه‌ی ۷ مسیری بوده است (جداول پ-۷ و پ-۸) که موجب شده است طول پیمایش اتوبوس‌ها در این شبکه کمتر باشد.



شکل ۴-۱۳ آلودگی تولید شده نسبت به طول شبکه و تعداد اتوبوس‌های معمولی

طبق شکل ۴-۱۴، تعداد ناوگان مورد نیاز با افزایش تعداد مسیرها از ۵۰ اتوبوس (تعداد اتوبوس‌های الکتریکی موجود) فاصله گرفته است. با توجه به اینکه مسیرهای با طول کمتر از ۸ کیلومتر پتانسیل تبدیل شدن به مسیرهای سبز را داشتند می‌توان گفت که با افزایش تعداد مسیرها، تعداد مسیرهای با این ویژگی افزایش داشته است و در صورت نبود محدودیت برای تعداد ایستگاه شارژ تعداد مسیرهای بیشتری به اتوبوس‌های الکتریکی اختصاص می‌یافت.



شکل ۴-۱۴ تغییرات میانگین طول مسیر و ناوگان مورد نیاز در برابر تعداد مسیرها

فصل پنجم: نتیجه گیری

۵-۱ نتیجه گیری

در این مطالعه روشی بر اساس الگوریتم جستجوی فاخته، به عنوان الگوریتمی جدید و کارآمد در مسائل بهینه‌سازی، برای حل مسئله‌ی طراحی شبکه‌ی اتوبوس‌رانی و تعیین تواتر پیشنهاد شد. با اعمال روش پیشنهادی بر روی شبکه‌ی مبنای مندل در قالب دو تابع هدف، مسیرهای بهینه‌ی شبکه‌ی اتوبوس‌رانی تعیین شدند. در تابع هدف شماره ۱ این مطالعه، مسیرهای بهینه براساس کاهش مجموع هزینه‌ی مسافر و هزینه‌ی سرویس‌دهنده تعیین شدند. تابع هدف شماره ۲ این مطالعه علاوه بر هزینه‌های در نظر گرفته شده در تابع هدف شماره ۱ شامل هزینه‌ی جانبی شبکه (آلودگی تولید شده در شبکه) نیز بود. به همین منظور ناوگان در نظر گرفته شده در تابع هدف شماره ۲ متشکل از دو نوع اتوبوس معمولی (اتوبوس با سوخت فسیلی) و اتوبوس الکتریکی (اتوبوس بدون آلاینده‌ی) در نظر گرفته شده بود.

هزینه‌ی هر یک از مولفه‌های تابع هدف شماره ۱ با استفاده از فرضیات و مدل تخصیص مشابه برای شبکه‌های بهینه‌ی مطالعات قبلی محاسبه و به مقایسه با نتایج حاصل از این مطالعه و مطالعات قبلی پرداخته شد. شبکه‌های بهینه‌ی طراحی شده با توجه به تابع هدف شماره ۲ با یکدیگر مقایسه شدند و به بررسی پارامترهای اثرگذار بر هزینه‌ی این شبکه‌ها پرداخته شد.

نتایج حاصل از مقایسه و بهینه‌سازی توابع هدف این مطالعه نشان‌دهنده‌ی کارکرد مناسب روش پیشنهادی بر اساس الگوریتم جستجوی فاخته در حل مسئله‌ی طراحی شبکه و تعیین تواتر بود.

۵-۲ پیشنهاد برای مطالعه‌های بعدی

در این مطالعه از روشی نو برای حل مسئله‌ی طراحی شبکه‌ی اتوبوس‌رانی و تعیین تواتر استفاده شد و علاوه بر آن هزینه‌های جانبی شبکه نیز در تابع هدف مطالعه وارد شد. در فرآیند حل مسئله فرض‌هایی در نظر گرفته شد که می‌تواند مبنای مطالعه‌های بعدی باشد از این رو موارد زیر به عنوان پیشنهاد برای مطالعه‌های آینده هستند:

- با توجه به عملکرد مناسب روش پیشنهادی بر پایه‌ی الگوریتم جستجوی فاخته، می‌توان از آن در بهینه‌سازی یک سیستم خط اصلی-تغذیه‌کننده^۱ استفاده کرد
- به منظور پیش‌بینی بهتر رفتار مسافران در انتخاب مسیرها مدل‌های دقیق‌تر تخصیص سفر مورد استفاده قرار گیرند.
- تقاضای سفر به صورت متغیر یا الاستیک در نظر گرفته شود
- از مدل‌های دقیق‌تری برای تخمین آلودگی در شبکه استفاده شود

^۱ Trunk-feeder system

پیوست

جزئیات مربوط به شبکه‌های بهینه‌ی به دست آمده از سناریوی ۱ (تابع هدف شماره ۱)

جدول پ-۱ جزئیات شبکه‌ی ۴ مسیری سناریوی ۱

شماره مسیر	مبدأ	مقصد	ترتیب گره‌ها	زمان سفر (دقیقه)	تواتر (ساعت/۱)	ناوگان	سرفاصله (دقیقه)	بیشینه‌ی جریان	شلوغ‌ترین کمان
۱	۵	۱	۵-۴-۶-۳-۲-۱	۲۱	۱۱/۸۵	۹	۵/۰۶	۵۹۲	۶-۳
۲	۱۴	۵	۱۳-۱۱-۱۰-۸-۶-۴-۵	۳۰	۱۵/۰۰	۱۵	۱۵/۰۰	۱۲۷۵	۱۱-۱۰
۳	۹	۲	۹-۱۵-۷-۱۰-۸-۶-۳-۲	۳۲	۱۵/۰۰	۱۶	۱۵/۰۰	۱۲۷۵	۷-۱۰
۴	۱۲	۱	۱۲-۱۱-۱۰-۸-۶-۳-۲-۱	۳۸	۱۵/۰۰	۱۹	۱۵/۰۰	۹۳۹	۸-۶

جدول پ-۲ جزئیات شبکه‌ی ۶ مسیری سناریوی ۱

شماره مسیر	مبدأ	مقصد	ترتیب گره‌ها	زمان سفر (دقیقه)	تواتر (ساعت/۱)	ناوگان	سرفاصله (دقیقه)	بیشینه‌ی جریان	شلوغ‌ترین کمان
۱	۱	۵	۱-۲-۳-۶-۴-۵	۲۱	۱۱/۸۳	۹	۵/۰۶	۵۹۱	۶-۳
۲	۱۳	۱	۱۳-۱۰-۸-۶-۳-۲-۱	۳۳	۱۴/۲۶	۱۶	۴/۲۰	۷۱۳	۸-۶
۳	۵	۱۲	۵-۴-۶-۸-۱۰-۱۱-۱۲	۳۳	۱۵/۰۰	۱۷	۴/۰۰	۸۷۶	۸-۱۰
۴	۱۲	۶	۱۲-۱۱-۱۳-۱۴-۱۰-۷-۱۵-۶	۳۷	۱۵/۰۰	۱۹	۴/۰۰	۸۸۰	۱۴-۱۰
۵	۹	۱۲	۹-۱۵-۶-۸-۱۰-۱۱-۱۲	۳۶	۸/۲۹	۱۰	۷/۲۳	۴۱۴	۸-۱۰
۶	۱۲	۱	۱۱-۱۰-۷-۱۵-۶-۳-۲-۱	۳۰	۱۵/۰۰	۱۵	۴/۰۰	۸۲۷	۷-۱۵

جدول پ-۳ جزئیات شبکه‌ی ۷ مسیری سناریوی ۱

شماره مسیر	مبدأ	مقصد	ترتیب گره‌ها	زمان سفر (دقیقه)	تواتر (ساعت/۱)	ناوگان	سرفاصله (دقیقه)	بیشینه‌ی جریان	شلوغ‌ترین کمان
۱	۱۲	۱۵	۱۲-۱۱-۱۳-۱۴	۱۷	۴/۰۰	۳	۱۵/۰۰	۱۶۵	۱۲-۱۱
۲	۱۱	۵	۱۱-۱۰-۸-۶-۴-۵	۲۳	۱۴/۹۴	۱۲	۴/۰۱	۷۴۷	۱۰-۸
۳	۱	۵	۱-۲-۳-۶-۴-۵	۲۱	۱۵/۰۰	۱۱	۴/۰۰	۷۵۵	۳-۶
۴	۱۴	۱۲	۱۴-۱۰-۸-۶-۴-۱۲	۳۲	۱۴/۲۰	۱۶	۴/۲۲	۷۱۰	۱۰-۸
۵	۷	۵	۷-۱۵-۶-۴-۵	۱۳	۴/۰۰	۲	۱۵/۰۰	۱۶۳	۷-۱۵
۶	۱۴	۹	۱۴-۱۳-۱۱-۱۰-۸-۶-۱۵-۹	۳۳	۱۵/۰۰	۱۷	۴/۰۰	۱۱۵۵	۱۱-۱۰
۷	۱	۱۵	۱-۲-۳-۶-۸-۱۰-۷-۱۵	۳۲	۱۵/۰۰	۱۶	۴/۰۰	۱۲۲۰	۳-۶

جدول پ-۴ جزئیات شبکه‌ی ۱۰ مسیری سناریوی ۱

شماره مسیر	مبدأ	مقصد	ترتیب گره‌ها	زمان سفر (دقیقه)	تواتر (ساعت/۱)	ناوگان	سرفاصله (دقیقه)	بیشینه‌ی جریان	شلوغ‌ترین کمان
۱	۹	۱۳	۹-۱۵-۷-۱۰-۱۴-۱۳	۲۷	۱۵/۰۰	۱۴	۴/۰۰	۷۶۳	۱۰-۱۴
۲	۵	۱	۵-۴-۶-۳-۲-۱	۲۱	۸/۲۲	۶	۷/۲۹	۴۱۱	۶-۳
۳	۱۱	۱	۱۱-۱۰-۷-۱۵-۶-۲-۲-۱	۳۰	۱۵/۰۰	۱۵	۴/۰۰	۸۵۰	۷-۱۵
۴	۱۴	۱۲	۱۴-۱۳-۱۱-۱۲	۱۷	۵/۱۹	۳	۱۱/۵۵	۲۵۹	۱۳-۱۱
۵	۱	۱۲	۱-۲-۴-۱۲	۲۱	۴/۰۰	۳	۱۵/۰۰	۱۵۹	۲-۴
۶	۱	۹	۱-۲-۳-۶-۱۵-۹	۲۴	۴/۰۰	۴	۱۵/۰۰	۱۱۰	۳-۶
۷	۵	۷	۵-۴-۶-۱۵-۷	۱۳	۴/۰۰	۲	۱۵/۰۰	۱۶۸	۶-۱۵
۸	۱	۱۱	۱-۲-۳-۶-۸-۱۰-۱۱	۲۸	۱۵/۰۰	۱۴	۴/۰۰	۸۵۴	۶-۸
۹	۹	۲	۹-۱۵-۶-۳-۲	۱۶	۴/۰۰	۳	۱۵/۰۰	۷۲	۱۵-۶
۱۰	۱۰	۱۲	۵-۴-۶-۸-۱۰-۱۱-۱۲	۳۳	۱۵/۰۰	۱۷	۴/۰۰	۱۰۸۲	۸-۱۰

جدول پ-۵ جزئیات شبکه‌ی ۱۲ مسیری سناریوی ۱

شماره مسیر	مبدأ	مقصد	ترتیب گره‌ها	زمان سفر (دقیقه)	تواتر (ساعت/۱)	ناوگان	سرفاصله (دقیقه)	بیشینه‌ی جریان	شلوغ‌ترین کمان
۱	۱۲	۱۴	۱۲-۱۱-۱۳-۱۴	۱۷	۴/۴۲	۳	۱۳/۵۵	۲۲۱	۱۱-۱۳
۲	۱۲	۳	۱۲-۴-۶-۳	۱۷	۴/۰۰	۳	۱۵/۰۰	۵۱	۴-۶
۳	۱۳	۱۲	۱۳-۱۰-۸-۶-۴-۱۲	۳۴	۱۵/۰۰	۱۷	۴/۰۰	۷۵۹	۸-۱۰
۴	۹	۲	۹-۱۵-۷-۱۰-۸-۶-۳-۲	۳۲	۱۵/۰۰	۱۶	۴/۰۰	۱۰۵۸	۱۰-۷
۵	۲	۱۳	۲-۳-۶-۸-۱۰-۱۳	۲۵	۴/۴۰	۴	۱۳/۶۰	۲۲۰	۸-۱۰
۶	۴	۷	۴-۶-۱۵-۷	۹	۴/۰۰	۲	۱۵/۰۰	۷۰	۱۵-۷
۷	۵	۱	۵-۴-۶-۳-۲-۱	۲۱	۱۱/۳۱	۸	۵/۳۰	۵۶۵	۱-۲
۸	۹	۱۲	۹-۱۵-۶-۴-۱۲	۲۵	۴/۰۰	۴	۱۵/۰۰	۴۴	۴-۶
۹	۱۱	۵	۱۱-۱۰-۸-۶-۴-۵	۲۳	۱۵/۰۰	۱۲	۴/۰۰	۸۰۴	۱۰-۱۱
۱۰	۷	۵	۷-۱۵-۶-۴-۵	۱۳	۴/۰۰	۲	۱۵/۰۰	۹۵	۷-۱۵
۱۱	۹	۴	۹-۱۵-۶-۴	۱۵	۴/۰۰	۲	۱۵/۰۰	۱۴	۴-۶
۱۲	۱۴	۱	۱۴-۱۰-۸-۶-۳-۲-۱	۳۱	۱۵/۰۰	۱۶	۴/۰۰	۷۵۴	۲-۱

جزئیات مربوط به شبکه‌های بهینه‌ی به دست آمده از تابع هدف شماره ۲

جدول پ ۶- جزئیات شبکه‌ی ۶ مسیری تابع هدف شماره‌ی ۲

شماره مسیر	مبدأ	مقصد	ترتیب گره‌ها	زمان سفر (دقیقه)	طول (کیلومتر)	تواتر (ساعت/۱)	تعداد اتوبوس معمولی	تعداد اتوبوس الکتریکی	بیشینه‌ی جریان
۱	۱۴	۱۲	۱۴-۱۳-۱۱-۱۲	۱۷	۴/۲۵	۴/۰۰	۳	۰	۷۲
۲	۱۵	۱۲	۱۵-۷-۱۰-۱۱-۱۲	۳۲	۸/۰۰	۱۱/۷۹	۰	۱۴	۵۸۹
۳	۱	۱۱	۱-۲-۳-۶-۱۵-۷-۱۰-۱۱	۳۰	۷/۵۰	۴/۰۰	۰	۱۷	۱۹۷۵
۴	۵	۱۴	۵-۴-۶-۸-۱۰-۱۱-۱۳-۱۴	۳۰	۷/۵۰	۱۵/۰۰	۰	۱۷	۱۶۸۰
۵	۱۲	۱۴	۱۲-۱۱-۱۳-۱۴	۱۷	۴/۲۵	۱۵/۰۰	۳	۰	۷۲
۶	۱۳	۱۲	۱۳-۱۱-۱۲	۱۵	۳/۷۵	۴/۰۰	۲	۰	۷۲

جدول پ ۷- جزئیات شبکه‌ی ۷ مسیری تابع هدف شماره‌ی ۲

شماره مسیر	مبدأ	مقصد	ترتیب گره‌ها	زمان سفر (دقیقه)	طول (کیلومتر)	تواتر (ساعت/۱)	تعداد اتوبوس معمولی	تعداد اتوبوس الکتریکی	بیشینه‌ی جریان
۱	۹	۱۴	۹-۱۵-۷-۱۰-۱۱-۱۳-۱۴	۲۹	۷/۵۰	۱۵/۰۰	۰	۱۶	۱۵۳۸
۲	۲	۷	۲-۳-۶-۱۵-۷	۱۰	۲/۵۰	۱۵/۰۰	۵	۰	۴۲۵
۳	۹	۷	۹-۱۵-۷	۱۰	۲/۵۰	۴/۰۰	۲	۰	۱۳
۴	۱	۳	۱-۲-۳	۱۰	۲/۵۰	۱۲/۷۴	۵	۰	۳۱۸
۵	۱۱	۱	۱۱-۱۰-۸-۶-۳-۲-۱	۲۸	۷/۰۰	۱۵/۰۰	۰	۱۶	۲۱۲
۶	۱۴	۳	۱۴-۱۳-۱۱-۱۲-۴-۲-۳	۳۲	۸/۰۰	۱۵/۰۰	۰	۱۸	۹۳۶
۷	۸	۵	۸-۶-۴-۵	۱۰	۲/۵۰	۱۵/۰۰	۵	۰	۶۰۱

جدول پ ۸- جزئیات شبکه‌ی ۸ مسیری تابع هدف شماره‌ی ۲

شماره مسیر	مبدأ	مقصد	ترتیب گره‌ها	زمان سفر (دقیقه)	طول (کیلومتر)	تواتر (ساعت/۱)	تعداد اتوبوس معمولی	تعداد اتوبوس الکتریکی	بیشینه‌ی جریان
۱	۲	۵	۲-۳-۶-۴-۵	۱۳	۳/۲۵	۹/۵۵	۵	۰	۴۷۷
۲	۱۵	۱	۱۵-۷-۱۰-۸-۶-۳-۲-۱	۳۲	۸/۰۰	۱۵/۰۰	۰	۱۸	۱۷۳۹
۳	۱۳	۱۲	۱۳-۱۰-۱۱-۱۲	۲۵	۶/۲۵	۱۵/۰۰	۰	۱۴	۱۴۳۵
۴	۵	۱۳	۵-۴-۶-۱۵-۷-۱۰-۱۴-۱۳	۳۰	۷/۵۰	۱۵/۰۰	۰	۱۷	۱۳۰۴
۵	۲	۷	۲-۳-۶-۱۵-۷	۱۰	۲/۵۰	۱۵/۰۰	۲	۰	۹۱
۶	۹	۱۴	۹-۱۵-۷-۱۰-۱۴	۲۵	۶/۲۵	۶/۶۵	۶	۰	۳۳۲
۷	۲	۹	۲-۳-۶-۱۵-۹	۱۶	۴/۰۰	۴/۰۰	۳	۰	۸۹
۸	۳	۹	۳-۶-۱۵-۹	۱۴	۳/۵۰	۴/۰۰	۲	۰	۳۶

مراجع

صمدزادگان، ف. علی‌زاده نایینی، ا؛ هوش جمعی محاسباتی: مبانی و کاربردها، انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ۱۳۹۰.

گزارش کیفیت هوای تهران ۱۳۹۵، شرکت کنترل کیفیت هوا، ۱۳۹۶.

گزیده‌ی آمار حمل‌ونقل و ترافیک تهران ۱۳۹۴، معاونت و سازمان حمل‌ونقل و ترافیک، تهران، ۱۳۹۵
یقینی، م. اخوان کاظم‌زاده، م.ر.؛ الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری، جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر، تهران، ۱۳۹۰.

- Afandizadeh, S., Khaksar, H., & Kalantari, N. (2013). Bus fleet optimization using genetic algorithm a case study of Mashhad. *International Journal of Civil Engineering*, 11(1), 43-52.
- Alsager, M., & Othman, Z. A. (2016). Cuckoo search algorithm for capacitated vehicle routing problem. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 88(1), 11.
- Arbex, R. O., & da Cunha, C. B. (2015). Efficient transit network design and frequencies setting multi-objective optimization by alternating objective genetic algorithm. *Transportation Research Part B: Methodological*, 81, 355-376.
- Baaj, M. H., & Mahmassani, H. S. (1991). An AI-based approach for transit route system planning and design. *Journal of advanced transportation*, 25(2), 187-209.
- Baaj, M. H., & Mahmassani, H. S. (1995). Hybrid route generation heuristic algorithm for the design of transit networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 3(1), 31-50.
- Bagloee, S. A., & Ceder, A. A. (2011). Transit-network design methodology for actual-size road networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(10), 1787-1804.
- Bean, J. C. (1994). Genetic algorithms and random keys for sequencing and optimization. *ORSA journal on computing*, 6(2), 154-160.
- Beltran, B., Carrese, S., Cipriani, E., & Petrelli, M. (2009). Transit network design with allocation of green vehicles: A genetic algorithm approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 17(5), 475-483.
- Bielli, M., Caramia, M., & Carotenuto, P. (2002). Genetic algorithms in bus network optimization. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 10(1), 19-34. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0968-090X\(00\)00048-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0968-090X(00)00048-6)
- Blum, J., & Mathew, T. (2012). Implications of the computational complexity of transit route network redesign for metaheuristic optimisation systems. *IET Intelligent Transport Systems*, 6(2), 124-131.

- Burnwal, S., & Deb, S. (2013). Scheduling optimization of flexible manufacturing system using cuckoo search-based approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-9.
- Byrne, B. F. (1975). Public transportation line positions and headways for minimum user and system cost in a radial case. *Transportation Research*, 9(2-3), 97-102.
- Byrne, B. F. (1976). Cost minimizing positions, lengths and headways for parallel public transit lines having different speeds. *Transportation Research*, 10(3), 209-214.
- Ceder, A. (1987). Methods for creating bus timetables. *Transportation Research Part A: General*, 21(1), 59-83.
- Ceder, A. (2001). Operational objective functions in designing public transport routes. *Journal of advanced transportation*, 35(2), 125-144.
- Ceder, A., & Wilson, N. H. M. (1986). Bus network design. *Transportation Research Part B: Methodological*, 20(4), 331-344. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/0191-2615\(86\)90047-0](http://dx.doi.org/10.1016/0191-2615(86)90047-0)
- Chakroborty, P. (2003). Genetic algorithms for optimal urban transit network design. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 18(3), 184-200.
- Chakroborty, P., & Wivedi, T. (2002). Optimal route network design for transit systems using genetic algorithms. *Engineering optimization*, 34(1), 83-100.
- Chew, J. S. C., Lee, L. S., & Seow, H. V. (2013). Genetic algorithm for biobjective urban transit routing problem. *Journal of Applied Mathematics*, 2013.
- Cipriani, E., Gori, S., & Petrelli, M. (2012). A bus network design procedure with elastic demand for large urban areas. *Public Transport*, 4(1), 57-76.
- Dantzig, G. B., Harvey, R. P., Lansdowne, Z. F., Robinson, D. W., & Maier, S. F. (1979). Formulating and solving the network design problem by decomposition. *Transportation Research Part B: Methodological*, 13(1), 5-17.
- Davis, T., & Hale, M. (2007). Public transportation's contribution to US greenhouse gas reduction.
- Environmental Protection Agency (EPA) (2014). Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2012 (EPA Publication No. 430-R-14-003). Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency.
- Fan, W., & Machemehl, R. B. (2002). *Characterizing bus transit passenger waiting times*. Paper presented at the 2nd Material Specialty Conference of the Canadian Society for Civil Engineering Montréal, Canada.
- Fan, W., & Machemehl, R. B. (2004). *Optimal transit route network design problem: Algorithms, implementations, and numerical results*. Retrieved from
- Fan, W., & Machemehl, R. B. (2006). Optimal transit route network design problem with variable transit demand: genetic algorithm approach. *Journal of Transportation Engineering*, 132(1), 40-51.
- Farahani, R. Z., Miandoabchi, E., Szeto, W. Y., & Rashidi, H. (2013). A review of urban transportation network design problems. *European Journal of Operational Research*, 229(2), 281-302.

- Friesz, T. L. (1985). Transportation network equilibrium, design and aggregation: key developments and research opportunities. *Transportation Research Part A: General*, 19(5-6), 413-427.
- Fusco, G., Gori, S., & Petrelli, M. (2002). *A heuristic transit network design algorithm for medium size towns*. Paper presented at the Proceedings of the 13th Mini-EURO Conference, Bari.
- Fusco, G., Alessandrini, A., Colombaroni, C., & Valentini, M. P. (2013). A model for transit design with choice of electric charging system. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 87, 234-249.
- Guihaire, V., & Hao, J.-K. (2008). Transit network design and scheduling: A global review. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 42(10), 1251-1273.
- Holroyd, E. (1967). *The optimum bus service: a theoretical model for a large uniform urban area*. Paper presented at the Proceedings of the Third International Symposium on the Theory of Traffic Flow Operations Research Society of America.
- Hurdle, V. (1973). Minimum cost locations for parallel public transit lines. *Transportation Science*, 7(4), 340-350.
- Jovanović, A. D., Pamučar, D. S., & Pejčić-Tarle, S. (2014). Green vehicle routing in urban zones—A neuro-fuzzy approach. *Expert Systems with Applications*, 41(7), 3189-3203.
- Kechagiopoulos, P. N., & Beligiannis, G. N. (2014). Solving the urban transit routing problem using a particle swarm optimization based algorithm. *Applied Soft Computing*, 21, 654-676.
- Kepaptsoglou, K., & Karlaftis, M. (2009). Transit route network design problem. *Journal of Transportation Engineering*, 135(8), 491-505.
- Kocur, G., & Hendrickson, C. (1982). Design of local bus service with demand equilibration. *Transportation Science*, 16(2), 149-170.
- Lampkin, W., & Saalmans, P. D. (1967). The Design of Routes, Service Frequencies, and Schedules for a Municipal Bus Undertaking: A Case Study. *Journal of the Operational Research Society*, 18(4), 375-397. doi:10.1057/jors.1967.70
- LeBlanc, L. J. (1988). Transit system network design. *Transportation Research Part B: Methodological*, 22(5), 383-390.
- Lee, Y.-J., & Vuchic, V. R. (2005). Transit network design with variable demand. *Journal of Transportation Engineering*, 131(1), 1-10.
- Li, X., & Yin, M. (2013). A hybrid cuckoo search via Lévy flights for the permutation flow shop scheduling problem. *International Journal of Production Research*, 51(16), 4732-4754.
- Magnanti, T. L., & Wong, R. T. (1984). Network design and transportation planning: Models and algorithms. *Transportation Science*, 18(1), 1-55.
- Majima, T., Takadma, K., Watanabe, D., & Katuhara, M. (2017). *Generating Hub-Spoke Network for Public Transportation: Comparison Between Genetic Algorithm and Cuckoo Search Algorithm*. Paper presented at the Intelligent and Evolutionary

- Systems: The 20th Asia Pacific Symposium, IES 2016, Canberra, Australia, November 2016, Proceedings.
- Mandl, C. E. (1980). Evaluation and optimization of urban public transportation networks. *European Journal of Operational Research*, 5(6), 396-404. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217\(80\)90126-5](http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217(80)90126-5)
- Martínez, F., Baldoquín, M. G., & Mauttone, A. (2017). AND SOLUTION METHOD TO A SIMULTANEOUS ROUTE DESIGN AND FREQUENCY SETTING PROBLEM FOR A BUS RAPID TRANSIT SYSTEM IN COLOMBIA. *Pesquisa Operacional*, 37(2), 403-434.
- Mumford, C. L. (2013). *New heuristic and evolutionary operators for the multi-objective urban transit routing problem*. Paper presented at the Evolutionary Computation (CEC), 2013 IEEE Congress on.
- NCHRP Synthesis of Highway Practice 69 (1980), Bus Route and Schedule Planning Guidelines, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
- Newell, G. (1979). Some issues relating to the optimal design of bus routes. *Transportation Science*, 13(1), 20-35.
- Ngamchai, S., & Lovell, D. J. (2003). Optimal time transfer in bus transit route network design using a genetic algorithm. *Journal of Transportation Engineering*, 129(5), 510-521.
- Nikolić, M., & Teodorović, D. (2013). Transit network design by bee colony optimization. *Expert Systems with Applications*, 40(15), 5945-5955.
- Ntziachristos, L., & Samaras, Z. (2012). EMEP/EEA Emission Inventory guidebook 2009, updated May 2012. *European Environmental Agency*.
- Ouaarab, A., Ahiod, B., & Yang, X. S. (2014). Discrete cuckoo search algorithm for the travelling salesman problem. *Neural Computing and Applications*, 24(7-8), 1659-1669.
- Pacheco, J., Alvarez, A., Casado, S., & González-Velarde, J. L. (2009). A tabu search approach to an urban transport problem in northern Spain. *Computers & Operations Research*, 36(3), 967-979.
- Pattnaik, S., Mohan, S., & Tom, V. (1998). Urban bus transit route network design using genetic algorithm. *Journal of Transportation Engineering*, 124(4), 368-375.
- Pternea, M., Kepaptsoglou, K., & Karlaftis, M. G. (2015). Sustainable urban transit network design. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 77, 276-291.
- Shahbazi, H., Reyhanian, M., Hosseini, V., & Afshin, H. (2016). The relative contributions of mobile sources to air pollutant emissions in Tehran, Iran: an emission inventory approach. *Emission Control Science and Technology*, 2(1), 44-56.
- Silman, L. A., Barzily, Z., & Passy, U. (1974). Planning the route system for urban buses. *Computers & Operations Research*, 1(2), 201-211. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/0305-0548\(74\)90046-X](http://dx.doi.org/10.1016/0305-0548(74)90046-X)
- Szeto, W., & Wu, Y. (2011). A simultaneous bus route design and frequency setting problem for Tin Shui Wai, Hong Kong. *European Journal of Operational Research*, 209(2), 141-155.

- Tassopoulos, I. X., & Beligiannis, G. N. (2012). Using particle swarm optimization to solve effectively the school timetabling problem. *Soft Computing*, 16(7), 1229-1252.
- Tom, V., & Mohan, S. (2003). Transit route network design using frequency coded genetic algorithm. *Journal of Transportation Engineering*, 129(2), 186-195.
- Wardman, M. (2001). A review of British evidence on time and service quality valuations. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 37(2), 107-128.
- Yang, X.-S. (2010). *Nature-inspired metaheuristic algorithms*: Luniver press.
- Yang, X.-S., & Deb, S. (2009). *Cuckoo search via Lévy flights*. Paper presented at the Nature & Biologically Inspired Computing, 2009. NaBIC 2009. World Congress on.
- Zhao, F. (2006). Large-scale transit network optimization by minimizing user cost and transfers. *Journal of Public Transportation*, 9(2), 6.
- Zhao, F., & Zeng, X. (2008). Optimization of transit route network, vehicle headways and timetables for large-scale transit networks. *European Journal of Operational Research*, 186(2), 841-855. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2007.02.005>
- Zhao, H., Xu, W., & Jiang, R. (2015). The Memetic algorithm for the optimization of urban transit network. *Expert Systems with Applications*, 42(7), 3760-3773. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2014.11.056>
- <http://comopt.ifl.uni-heidelberg.de/software/TSPLIB95/>

Abstract : Private cars are the first choice of citizens for urban trips because of their advantages compared to public transportation. The most important features of public transportation, that characterize their quality, are minimizing waiting and in-vehicle travel times and avoiding the need to change the route where possible. Transit Network Design and Frequency Setting Problem (TNDFSP) is a multi-objective optimization problem in which the routes of the public transportation network are determined by considering operational constraints. It is necessary for these routes to improve the efficiency of the network from passengers' perspective while minimizing the operator cost. In this study, an optimization algorithm based on cuckoo search algorithm was proposed to solve TNDFSP. In the first part of the study, perator cost included the number of vehicles required to operate on the network and users' costs consisted of waiting time, in-vehicle travel time and number of transfers. Results were compared on the basis of Mandl's network as an accepted benchmark network in the relevant literature. Another objective function was formulated in the second part of the study incorporated sustainable design objectives. To address this issue a limited number of emission-free (electric) buses were considered as a part of the fleet. The comparison of the results with similar pervious studies and optimization of the objective functions indicated the Cuckoo Search (CS) based algorithm had a good performance in finding the optimal routes for the urban bus network regarding the objectives considered in this study.

Keywords: Public transportation, Optimal transit network design, Service frequency, Electric buses, Metaheuristic algorithm



Shahrood University of Technology

Faculty of Civil Engineering

M.Sc. Thesis in Road and Transport Engineering

**Optimization of transit network design and frequencies
setting using a metaheuristic approach**

By: Mohsen Sadeghi

Supervisor

Dr. Iman Aghayan

Advisor

Dr. Mehrdad Ghaznavi

January 2018