

تحلیل اثر بهینه سازی تخصیص واگن‌ها بر کاهش هزینه حمل و نقل در شبکه

متروی تهران

رقیه نظری، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده اقتصاد و علوم سیاسی، دانشگاه شهید بهشتی تهران، تهران، ایران

علی اکبر عرب مازار (مسئول مکاتبات)، استاد، دانشکده اقتصاد و علوم سیاسی، دانشگاه شهید بهشتی تهران، تهران، ایران

رسام مشرفی، استادیار، دانشکده اقتصاد و علوم سیاسی، دانشگاه شهید بهشتی تهران، تهران، ایران

Email: a-arabmazar@sbu.ac.ir

پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۱۱

دریافت: ۱۳۹۷/۰۵/۲۱

چکیده

یک سیستم حمل و نقل ریلی درون شهری سیستمی است که در آن یک رام قطار در ایستگاه‌های مشخص و در مسیری بین مبدا و مقصد مشخص تردد می‌کند. در این مطالعه، اقدام به طراحی مدلی جهت بهینه سازی سیستم حمل و نقل ریلی درون شهری شده است. بهینه سازی روشی است که بوسیله آن بهترین جواب ممکن برای یک مسئله با توجه به هدف تعیین شده و قیدهای موجود، که همه با توابع و روابط ریاضی مشخص شده‌اند، تعیین می‌شود. مسئله بهینه دارای یک تابع هدف و احتمالاً چندین قید است که مجموعاً خصوصیات سیستم مورد نظر را در بر می‌گیرند. در این پژوهش یک مدل ریاضی خطی عدد صحیح به منظور بهینه نمودن تعداد واگن‌های تخصیص یافته به چهار خط مترو در شهر تهران که با استفاده از نرم افزار WinQSB حل شده، پیشنهاد شده است. هدف این مقاله کاهش هزینه‌های تعمیرات و برق مصرفی واگن‌ها در شبکه‌ی مترو، ارائه یک مدل برنامه‌ریزی شده در جهت تشویق افراد به استفاده از این نوع سیستم حمل و نقل و در راستای آن کاهش ترافیک و آلودگی هوا در کلان شهر تهران است. برای ارزیابی مدل پیشنهادی ابتدا وضع موجود با نتایج مدل پیشنهادی مقایسه شده است. نتایج نشان داده‌اند مدل پیشنهادی به طور متوسط باعث کاهش ۳۳ درصدی هزینه‌های وارد شده در مدل (هزینه برق مصرفی و هزینه تعمیرات واگن‌ها) در یک ماه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح، تخصیص بهینه واگن، سیستم حمل و نقل، هزینه‌ی واگن‌ها.

تحلیل اثر بهینه سازی تخصیص واگن‌ها بر کاهش هزینه حمل و نقل در شبکه متروی تهران

۱. مقدمه

غیرممکن شده و اقتصاد کشور بیش از این دچار رکود می‌شود. در نتیجه لزوم برنامه‌ریزی در بخش حمل‌ونقل عمومی بخصوص سیستم حمل‌ونقل ریلی درون‌شهری به وضوح احساس می‌شود. از جمله مواردی که می‌تواند ضرورت اجرا و به ثمر نشستن تحقیق حاضر را توجیه کند عبارت است اینکه می‌توان با تخصیص بهینه تعداد واگن‌ها و جلوگیری از اعزام یک قطار با تعداد واگن مشخص در بازه‌های زمانی تعریف شده در تمام ساعات پیک و غیرپیک تقاضا از بسیاری از هزینه‌ها از جمله هزینه‌ی انرژی مصرفی، تعمیرات و جلوگیری نمود. از طرف دیگر پاسخگویی به موقع احتیاجات حمل‌ونقل مسافر می‌تواند موجب تشویق آن‌ها به استفاده از خطوط ریلی شود و از بسیاری مزایای استفاده از این سیستم حمل‌ونقل مانند کاهش ترافیک، آلودگی و تصادفات بهره‌مند شد. از دیگر اهداف پژوهش ارائه راهکارهایی جهت استفاده پژوهشگران و برنامه‌ریزان اقتصادی، عمرانی، شهرداری و شرکت بهره‌برداری راه‌آهن شهری است. در پژوهش حاضر سیستم حمل‌ونقل ریلی درون‌شهری شهر تهران با وجود چهار خط فعال بررسی شده است و اطلاعات لازم برای مدل‌سازی و انجام پژوهش از شرکت بهره‌برداری مترو تهران و حومه برای سال ۱۳۹۵ جمع‌آوری شده است. هزینه تعمیرات و برق مصرفی واگن‌ها با هم برابر است همچنین هزینه‌ها برای یک ساعت کاری در نظر گرفته شده است. ظرفیت واگن‌ها در خطوط مختلف برابر و به اندازه ۱۸۵ نفر مسافر ایستاده و نشسته می‌باشد. همچنین فرض بر این است که توزیع تعداد واگن‌های تخصیص یافته به هر خط در بازه‌های زمانی مختلف با توجه با تقاضای مسافران بهینه نیست.

در ادامه این پژوهش ابتدا ادبیات نظری مرور و به طور مختصر شرحی از دیگر مطالعات صورت گرفته در این حوزه و جنبه نوآوری پژوهش آورده می‌شود. سپس در ادامه، به وضعیت شبکه حمل‌ونقل ریلی درون‌شهری تهران (مترو) اشاره

بخش حمل‌ونقل به دلیل اهمیت ویژه و جایگاه مهمی که در اقتصاد جوامع بشری دارد، یکی از شاخص‌های توسعه‌یافتگی کشورها محسوب می‌شود و پیشرفت و توسعه آن نقش مهمی در ایجاد تحول در سایر بخش‌های صنعتی، کشاورزی و تولیدی ایفا می‌کند تا جائیکه امروزه بیشتر اندیشمندان و صاحب‌نظران عرصه‌ی اقتصادی، رشد و توسعه همه جانبه کشورها را مشروط به توسعه بخش حمل‌ونقل می‌دانند و این صنعت را به عنوان محور فعالیت‌های اساسی و زیربنایی و لازمه تحول به حساب می‌آورند. علاوه بر آن سهم حمل‌ونقل در اقتصاد ملی نیز انکارناپذیر است، زیرا که هر واحد رشد اقتصادی در کشورها مستلزم ۱/۵ الی ۲ واحد رشد در بخش حمل‌ونقل است [یحیی‌آبادی و اکبران، ۱۳۹۴]. امروزه با توجه به افزایش بسیار زیاد هزینه‌های توسعه شبکه‌های خیابانی برای استفاده از وسایل نقلیه شخصی و پیامدهای منفی وسیع آن، توسعه سیستم‌های حمل‌ونقل همگانی به عنوان یک راه‌حل اصولی برای شهرهای بزرگ محسوب می‌شود. در بسیاری از شهرهای با بیش از یک میلیون نفر جمعیت، علاوه بر اتوبوس، از سیستم‌های دیگری از جمله سیستم‌های حمل‌ونقل ریلی نیز استفاده می‌شود. این سیستم‌ها برای نیل به اهداف متفاوتی از جمله افزایش راحتی و امنیت سفر، کاهش آلودگی هوا و حفظ محیط زیست، کاهش زمان سفر و حل مشکلات ترافیک ناشی از تردد وسایل نقلیه شخصی ایجاد می‌شوند [نورالهی و برک‌پور، ۱۳۹۲].

در حال حاضر مترو تهران، روزانه جمعیتی بالغ بر سه میلیون نفر را جابجا می‌کند که اگر این افراد بخواهند به جای استفاده از مترو از خودرو شخصی یا از وسایل نقلیه عمومی استفاده کنند، تهران که قطب اصلی اقتصادی کشور است دچار چنان ترافیکی می‌شود که اکثر مردم تمام وقت خود را در پشت ترافیک‌های شدید می‌گذرانند و حضور بموقع در محل کار

اطمینان کافی، موجب کاهش هزینه‌ها، توسعه اقتصادی، افزایش نرخ اشتغال و افزایش کیفیت زندگی شهری خواهد شد. [سجادی‌نژاد و حسن‌نابینی، ۱۳۹۵]. همچنین ارزش زمانی که افراد برای رفت و آمد به محل کار تلف می‌کنند می‌تواند در بهره‌وری انرژی، سرمایه‌گذاری شود که طبق مطالعه وینا و ماچادو در ریودوژانیرو^۱، ارزش ارزی آن در حدود ۳۵/۷ میلیارد دلار در سال ۲۰۱۴ بوده است که معادل ۸/۱ درصد تولید ناخالص داخلی^۲ در منطقه بوده است [اسدی و موحدی کلیبر، ۱۳۹۶]. در سال‌های اخیر، گسترش سریع شهر باعث ایجاد نیاز بیشتر به ساخت و ساز مترو شده است. از آنجایی که مراکز شهری اغلب با جریان روزانه تعداد زیادی از مردم روبرو می‌شوند، سیستم حمل‌ونقل مناسب ریلی به طور موثر می‌تواند شعاع حمل و نقل در سطح شهر را گسترش دهد، همچنین فشار ترافیک را در مرکز شهر کاهش دهد و به طور قابل توجهی در دسترس بودن حمل‌ونقل عمومی در مرکز شهر را بهبود بخشد [سان و دیگران، ۲۰۱۶]. بنابراین امروزه با توجه به شرایط اقتصادی - اجتماعی و زیست‌محیطی کلانشهرها، هرگونه مدیریت درست در برنامه‌ریزی و سرمایه‌گذاری برای توسعه و گسترش سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی، تاثیر بسزایی در حمل‌ونقل شهرها و به تبع آن حل مشکلات ناشی از ترافیک و آلودگی زیست‌محیطی خواهد داشت. در صورت عملکرد مناسب سیستم حمل‌ونقل عمومی، علاوه بر رضایتمندی بیشتر کاربران این سیستم‌ها، بخش عمده‌ای از استفاده کنندگان حمل‌ونقل شخصی نیز به آن جذب خواهند شد، و بدین وسیله بار ترافیکی موجود در شبکه و عوارض منفی ناشی از آن کاهش خواهد یافت [حیدری اناری و شجاعی، ۱۳۹۶].

مترو تهران با متوسط جابه‌جایی روزانه بیش از سه میلیون مسافر، حمل‌ونقلی پاک است که در عین سرعت هزینه کمی را برای مسافران به‌همراه دارد. حمل‌ونقلی پاک و ایمن که به رغم همه مشکلاتی که بر سر راه گسترش خطوطش وجود دارد همواره به‌عنوان بهترین راه‌حل برای کاهش ترافیک و آلودگی هوای کلان‌شهر تهران مطرح بوده است [شرکت بهره‌برداری

شده و با تشریح مدل و نتایج آن، به پیشنهاداتی که در راستای نتایج بدست آمده از تحقیق ارائه شده است، پرداخته می‌شود.

۲. مرور ادبیات تحقیق

حمل‌ونقل عمومی شامل سیستمی است که در آن یک وسیله مشخص در ایستگاه‌های مشخص و در مسیری بین مبدأ و مقصد مشخص تردد می‌کند. حمل‌ونقل عمومی با ویژگی‌های اجتماعی، اقتصادی، زیست‌محیطی، جغرافیایی و جمعیتی ارتباط دارد [پریزادی و دیگران، ۱۳۹۰]. سیستم حمل‌ونقل عمومی انواع مختلفی دارد که عبارتند از: ۱. "سیستم حمل‌ونقل عمومی ترانزیت: عبارت است از سیستمی که دارای مبدأ و مقصد معین است و در زمان معین به جابه‌جایی مسافران می‌پردازد. اتوبوس‌های منظم، اتوبوس‌هایی که در طول مسیرهای ثابت بر اساس جدول زمانی ثابت کار می‌کنند. اتوبوس‌های سریع‌السیر، اتوبوس‌هایی (BRT) نیمه سریع، قطار سبک شهری (مترو)، تراموا، مونوریل، سیستم‌های سریع ریلی، اتوبوس سریع‌السیر ترانزیت در زمره سیستم حمل‌ونقل عمومی قرار می‌گیرند. ۲. سیستم حمل‌ونقل عمومی پارا ترانزیت: این سیستم بر خلاف سیستم ترانزیت دارای مبدأ و مقصد ثابت و مشخص نیست و همچنین زمان جابه‌جایی مسافران این سیستم نیز ثابت و از پیش تعیین شده نیست. روش‌های متنوع حمل‌ونقل پارا ترانزیت عبارتند از: تاکسی، تاکسی گردشی دربستی، تاکسی تلفنی، تاکسی فرودگاه، تاکسی خطی، تاکسی ساعت اوج، ون، مسافرخش‌ها، اتوبوس‌های اجاره‌ای، خودرو اشتراکی، ون‌های اشتراکی، مینی بوس‌ها [کاکاوند و جباری، ۱۳۹۱]" در این تحقیق تمرکز بر روی حمل‌ونقل ریلی درون شهری (مترو) می‌باشد.

هرچقدر که سیستم حمل و نقل شهری ناکارآمدتر باشد، تمایل افراد به استفاده از وسایل نقلیه شخصی افزایش یافته و در نتیجه مدیریت امور شهری دشوارتر و در برخی موارد مختل می‌شود. به طور مشخص ثابت شده است که گسترش حمل‌ونقل عمومی و استفاده از سیستم‌های حمل‌ونقلی کارا و دارای قابلیت

تحلیل اثر بهینه سازی تخصیص واگن‌ها بر کاهش هزینه حمل و نقل در شبکه متروی تهران

یک مدل بهینه خطی برای خطوط متروی شهری در شهر تهران طراحی شود که ضمن حداقل نمودن هزینه‌ی واگن‌های اختصاص یافته به هر خط، تعداد بهینه واگن‌ها را در ساعات اوج تقاضا و دیگر ساعات تعیین گردد.

مترو یک نوع محرک جهش در حمل و نقل عمومی است یعنی سیستم ریلی مشوق استفاده از سایر مدهای حمل و نقل عمومی است. مترو نیاز اصلی جامعه ماست که در آینده جزء مطالبات و حقوق قطعی مردم شهرها خواهد شد. بنابراین علاوه بر افزایش آمار جابجایی می‌بایست اثربخشی و جذابیت خدمات آن نیز مورد توجه قرار گیرد. پرداخت ۶۵ میلیارد یارانه برای مصرف روزانه بنزین که حدود ۱۳ برابر کل بودجه حمل و نقل ریلی کشور است قابل باور و پذیرفتنی نیست، اینکه پنجاه و یک درصد این بنزین در ترافیک تهران هدر می‌رود، مشکلات زیست محیطی و تهدید سلامتی افراد، خسارت و تلفات ناشی از تصادفات و زمان تلف شده جنبه‌های دیگر تردد در کلان شهرهاست که باید کمی شده و به این عدد اضافه شود [رحمتی‌نژاد و خورشیدوند، ۱۳۹۲].

با توجه به حجم هزینه‌های صرف شده در سیستم حمل و نقل کشور در این پژوهش سعی شده است با بهینه‌سازی تخصیص واگن‌های مسافربری و بالا بردن کیفیت استفاده از مترو درصداً قابل توجهی از هزینه‌ها (هزینه برق مصرفی و هزینه تعمیرات واگن‌ها) را کاهش داد. همچنین با تأمین به موقع تقاضای مسافران در جهت تشویق از خطوط ریلی به مزایایی همچون کاهش ترافیک، آلودگی و تصادفات نائل آمد.

۱-۲ وضعیت شبکه ریلی درون‌شهری تهران

امکان انجام سفرهای درون‌شهری و ارتباط حومه با مرکز تهران با سرعت مناسب، تردد دقیق و ایمن با فناوری بالا، کاهش آلوده‌کننده‌های زیست‌محیطی، ایجاد و گسترش فرهنگ نظم و انضباط با توجه به ارزش بالای وقت در زندگی، ایجاد فضای اجتماعی آرام و آسوده، بهینه‌سازی حمل و نقل شهری، کاهش

تهران و حومه، ۱۳۹۵]. برخی از مزایای حمل و نقل ریلی نسبت به دیگر انواع حمل و نقل عبارتند از: کاهش مصرف انرژی، کاهش آلاینده‌های زیست محیطی، ترافیک، تلطیف محیط‌زیست و ایمنی بالا [نیکوکار و دیگران، ۱۳۹۵]. علی‌رغم مزایای بیان شده سهم این سیستم در جابجایی‌های درون شهری تهران در سال ۹۳ حدود ۱۶/۴ درصد بوده در حالی که این سهم برای جابجایی با اتوبوس و مینی‌بوس، تاکسی و ون به ترتیب ۲۰ و ۲۱/۸ درصد است. همچنین طبق آمار مرکز کنترل ترافیک تهران، تعداد افرادی که بر اثر تصادفات رانندگی در سطح شهر تهران در سال ۹۳ دچار خسارت، جرح و فوت شده اند به ترتیب ۲۵۲۸۶، ۳۱۹۰ و ۷۰ نفر بوده است که با توسعه حمل و نقل ریلی می‌توان تا حدودی از این آمار کاست [شرکت کنترل ترافیک تهران، ۱۳۹۳].

بهینه‌سازی روشی است که بوسیله آن بهترین جواب ممکن برای یک مسئله با توجه به هدف تعیین شده و قیدهای موجود، که همه با توابع و روابط ریاضی مشخص شده‌اند، تعیین می‌شود. مسئله بهینه دارای یک تابع هدف و احتمالاً چندین قید می‌باشد که مجموعاً خصوصیات سیستم مورد نظر را در بر می‌گیرند [مختاری مطلق و شریفیان، ۱۳۹۲]. از روش‌های دیگری که در بررسی موضوعات می‌توان نام برد: اقتصادسنجی، شبیه‌سازی و الگوریتم‌های ابتکاری پیشرفته بهینه‌سازی به عنوان روش حل تقریبی مانند الگوریتم ژنتیک، شبیه‌سازی تبرید و جستجوی ممنوع هستند. از بین ابزارهای موجود برای مدل‌سازی، روش‌های تحقیق در عملیات و از بین آن‌ها برنامه‌ریزی ریاضی از اولویت بالایی در انتخاب برخوردارند. علت این است که روش‌های برنامه‌ریزی ریاضی مانند برنامه‌ریزی خطی و عدد صحیح به جواب‌های بهینه منتهی می‌شود و نرم‌افزارهای مربوط مانند winQSB به خوبی توسعه داده شده اند [طراوتی، ۱۳۹۰]. از جمله فنون بهینه‌سازی، برنامه‌ریزی خطی است در این پژوهش سعی شده است با استفاده از این مدل و حل آن با نرم افزار winQSB

رقیه نظری - علی اکبر عرب مازار - رسام مشرفی

۸	خط ۲	۲۶
۹	خط ۳	۱۹
۱۰	خط ۴	۲۲
۱۱	خط ۵	۴۳
۱۲	تعداد ایستگاه های کل مترو	۹۰
۱۳	صرفه جویی سالانه مصرف بنزین و گازوئیل ناشی از جابجایی با مترو (میلیارد تومان)	۷۸۱۶
۱۴	طول کل خطوط - کیلومتر	۱۵۲
۱۵	وضعیت ناوگان فعال - عدد	۱۴۸
۱۶	کل جابجایی انجام شده از ابتدای بهره - برداری (میلیارد سفر)	۵/۶

منبع: (شرکت بهره برداری متروی تهران و حومه، ۱۳۹۵)

۲-۲ پیشنهاد تحقیق

تا کنون مطالعات خوبی در زمینه بهینه سازی انجام شده است که به مهمترین آن ها اشاره می شود.

یقینی، علی محمدیان و کریمی در مقاله ای تحت عنوان "بهینه سازی برنامه ریزی خطوط مسافری در راه آهن" یک روش پایه الگوریتم ایجاد ستون و یک روش مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله برنامه ریزی خطوط مسافری پیشنهاد شده است. مدل برنامه ریزی خطوط مسافری مورد استفاده در این مقاله، دارای تابع هدف بهینه سازی تعداد مسافری مستقیم با محدودیت های تقاضا، ظرفیت ایجاد شده توسط خطوط و حد بالای تعداد اعزام قطار روی هر کمان شبکه است. نتایج بدست آمده نشان دهنده کارایی و دقت بالای روش های حل پیشنهادی است [یقینی، علی محمدیان و کریمی، ۱۳۹۲].

یقینی و همکاران در مقاله ای تحت عنوان "تخصیص لگوموتیو و زمان بندی قطارهای باری در راه آهن ایران"،

فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال یازدهم / شماره سوم / بهار ۱۳۹۹

اتلاف وقت شهروندان و کاهش تصادفات رانندگی، از جمله مزیت های کیفی بکارگیری مترو است. مترو به عنوان پاک ترین، سالم ترین، سریع ترین، ایمن ترین و به طور کلی کارآمدترین شبکه حمل و نقل، نقش انکارناپذیری در حل مسائل اقتصادی، اجتماعی و محیط زیستی ناشی از معضل ترافیک دارد. براساس آمار و اطلاعات شرکت متروی تهران سفر با مترو باعث صرفه جویی سالانه ۳۵۰ میلیارد تومان در مصرف سوخت می شود که البته در کنار آن آلودگی هوا و خسارات ناشی از آن نیز کاهش می یابد. روزانه حدود سه میلیون سفر در تهران با مترو انجام می شود که به ازای هر سفر حدود ۶ دهم لیتر در مصرف سوخت و ۲۷ دقیقه در اتلاف وقت صرفه جویی می شود. در حال حاضر شبکه متروی تهران دارای ۴ خط درون شهری و یک خط برون شهری فعال می باشد. در جدول ذیل خلاصه ای از عملکرد خطوط متروی تهران آمده است [شرکت بهره برداری متروی تهران و حومه، ۱۳۹۵].

جدول ۱. خلاصه ای از عملکرد خطوط متروی تهران

ردیف	شرح	مقدار سالانه
۱	کل سفرهای انجام شده (میلیون سفر)	۶۷۱
	سهم جابجایی هر یک از خطوط از کل جابجایی (میلیون سفر)	
۲	خط ۱	۲۳۱
۳	خط ۲	۱۹۸
۴	خط ۳	۹
۵	خط ۴	۱۶۳
۶	خط ۵	۷۰
	وضعیت فیزیکی شبکه خطوط بهره برداری شده (طول مسیر) - کیلومتر	
۷	خط ۱	۴۲

تحلیل اثر بهینه سازی تخصیص واگن‌ها بر کاهش هزینه حمل و نقل در شبکه متروی تهران

و با زمان ورود دینامیک که قادر به برنامه‌ریزی هم‌زمان چند پایانه در یک بندر است، پیشنهاد شده است. برای ارزیابی مدل پیشنهادی ابتدا نتایج وضع موجود عملیات تخلیه و بارگیری بندر شهیدرجایی با نتایج حاصل از مدل پیشنهادی مقایسه شده است. نتایج نشان داده‌اند مدل پیشنهادی به‌طور متوسط باعث کاهش ۵۰ درصدی مقدار تأخیر خروج کشتی‌ها در بندر کانتینری می‌شود. به منظور ارزیابی مدل ارائه شده در این پژوهش، در یک آزمایش دیگر، به مقایسه این مدل با مدل گسسته پیشنهادی موجود در ادبیات موضوع پرداخته شده است. نتایج نشان داده‌اند مدل پیشنهادی می‌تواند مقدار تأخیر خروج کشتی‌ها را به مقدار فراوانی در مقایسه با مدل گسسته مذکور کاهش دهد. در نتیجه بندر مورد نظر می‌تواند با افزایش جلب رضایت شرکت‌های کشتیرانی در رقابت با بنادر نزدیک خود، موفق‌تر عمل نموده و بهره‌وری و سوددهی بالاتری داشته باشد [داداشی، شیخ‌الاسلامی و بابایی تیرکلامی، ۱۳۹۴].

اهوجا و همکاران^۴ در مقاله‌ای تحت عنوان حل مشکلات برنامه‌ریزی لوکوموتیو واقعی یک روش ریاضی با استفاده از تجزیه مسأله بر مبنای برنامه‌ریزی عدد صحیح و یک مقیاس همسایگی خیلی بزرگ، برای کمپانی راه‌آهن آمریکایی^۵ پیشنهاد کردند. زمان مورد نیاز برای حل مسأله در حدود ۳۰ دقیقه بود. آن‌ها توانستند با مدل ارائه شده از ۱۶۱۴ لوکوموتیو استفاده شده توسط شرکت، در حدود ۴۰۰ لوکوموتیو صرفه‌جویی نمایند. این روش در مقایسه با عملیات، که توسط شرکت استفاده می‌شده، هزینه قابل توجهی را کاهش داد [اهوجا و دیگران، ۲۰۰۵].

کو و نیکولز^۶ در مقاله، یک روش مدل‌سازی ریاضی برای بهبود استفاده از لوکوموتیو در یک راه‌آهن باربری، مدلی برای یک شرکت کلمبیایی ارائه کردند، مشکل این شرکت در مورد هزینه حمل و نقل سبک بود و در مدل ارائه شده سعی شد تا با ارائه فرمولی، هزینه جابه‌جایی‌های سبک به کمترین میزان

تخصیص و زمان‌بندی در دو فاز انجام داده‌اند. در فاز اول، تخصیص لوکوموتیو به رام‌های موجود با استفاده از الگوریتم ژنتیک صورت گرفته است. در فاز دوم، بهترین برنامه تخصیص لوکوموتیو که در فاز یک به دست آمده، در نظر گرفته شده و یک حد پایین برای زمان رسیدن قطارهای باری به مقصدشان محاسبه می‌شود. سپس مجدداً با استفاده از یک الگوریتم ژنتیک دیگر، زمانبندی قطارهای باری انجام می‌شود [یقینی و دیگران، ۱۳۹۲].

نعیمی، شورورزی و طالعی در مقاله "بهینه‌سازی سیستم حمل و نقل ادارات با خوشه‌بندی به روش k میانگین و ترکیب الگوریتم ذخیره^۳ و جستجوی ممنوع"، یکی از راه‌های کاهش حجم ترافیک و میزان مصرف سوخت، استفاده از سرویس‌های حمل و نقل برای کارکنان ادارات و شرکت‌های بزرگ و کارخانه‌هاست. برنامه‌ریزی و تخصیص خودروها به کارکنان سازمان‌ها و تعیین مسیرهای جمع‌آوری آن‌ها از مسائل اصلی این پژوهش است. هدف اصلی این مقاله ارائه روشی برای تجزیه این مسئله به چند مسئله تک هدفه و نیز ارائه روشی جدید برای مسیریابی است. بنابراین در این میانگین بهبود یافته، مسئله مورد تحقیق تبدیل به چند مسئله تک هدفه گردیده و سپس با تلفیق الگوریتم k مقاله ابتدا با استفاده از الگوریتم ذخیره و الگوریتم جستجوی ممنوع، کوتاه‌ترین مسیر محاسبه می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از تلفیق الگوریتم ذخیره و جستجوی ممنوع، نتایج بهتری نسبت به استفاده از الگوریتم جستجوی ممنوع به تنهایی دارد و الگوریتم تلفیقی سرعت بیشتری در رسیدن به پاسخ نهایی دارد [نعیمی، شورورزی و طالعی، ۱۳۹۴].

داداشی، شیخ‌الاسلامی و بابایی تیرکلامی در مقاله "برنامه‌ریزی تخصیص اسکله در پایانه کانتینری بندر شهید رجایی" از روش‌های بهینه‌یابی در صنعت حمل و نقل دریایی استفاده نموده‌اند. در این پژوهش یک مدل ریاضی خطی عدد صحیح مختلط به منظور برنامه‌ریزی پهلوگاه با رویکرد مرکب

فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال یازدهم / شماره سوم / بهار ۱۳۹۹

به معرفی متغیرها و پارامترهای مدل و سپس مدل ارائه شده پرداخته می‌شود.

خود برسد. این مدل مبتنی بر برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط خطی بود [کو و نیکولز، ۲۰۰۷].

۳-۱ معرفی مجموعه‌های بکار رفته در مدل

۱. خطوط فعال در سیستم حمل‌ونقل ریلی درون‌شهری تهران

$$i=1,2,3,4$$

۲. ساعات اوج $j=1,2$ و ساعات غیر اوج $k=1, 2$

۳. دوره مورد مطالعه (بهمن ماه ۹۵) t

۳-۲ پارامترها

جدول ۲. پارامترهای مساله

پارامتر	تعریف	واحد
d_{ij}	ظرفیت عرضه در خط i در بازه زمانی اوج j	واگن
e_{ik}	ظرفیت عرضه در خط i در بازه زمانی غیراوج k	واگن
a_{ij}	تقاضا خط i در ساعات اوج j	واگن
b_{ik}	تقاضا خط i در ساعات غیر اوج k	واگن
C_1	هزینه تعمیرات هر واگن در دوره t	ریال
C_2	هزینه برق مصرفی هر واگن در دوره t	ریال
A_i	حداقل تعداد واگن‌های لازم برای هر خط i	واگن
B_i	حداکثر واگن‌های موجود در هر خط i	واگن

منبع: (یافته‌های تحقیق)

کاسچیانی، کاپرار و توث^۶ در پژوهش خود تحت عنوان یک الگوریتم سریع اکتشافی برای مسئله تخصیص یک قطار، مشکل بهینه‌سازی راه‌آهن را به عنوان مسئله تخصیص یک قطار مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها در این مقاله بیان کرده‌اند یک قطار شامل قطار با موتور و مجموعه‌ای از واگن‌ها با صندلی‌های مسافری است. با وجود نیاز به مجموعه‌ای از سفرهای به موقع قطار با ظرفیت مشخص برای مسافران و از طرفی یک قطار با داشتن تعداد مشخصی صندلی ظرفیت ثابتی دارد احتمالاً مشکلی در تخصیص یک قطار به هر سفر وجود داشته باشد و شاید یک ترکیب بهینه از قطارهای احتیاج باشد. بنابراین یک الگوریتم اکتشافی با حل یک مدل برنامه‌ریزی صحیح خطی به دست آمده و راه‌حل بهینه را در ساعات پیک روز به ارمغان آورده است. عملکرد الگوریتم اکتشافی به صورت محاسباتی در نمونه‌های واقعی ثبت شده توسط یک اپراتور قطار ایتالیایی منطقه‌ای ارزیابی شده، نتایج با روش‌های موجود از ادبیات مقایسه شده‌اند و نشان داده شده که روش جدید می‌تواند راه‌حلی با کیفیت خوب را در کوتاه‌ترین زمان ممکن به دست آورد [کاسچیانی، کاپرار و توث، ۲۰۱۲].

۳. مدل‌سازی ریاضی

این پژوهش از نظر هدف، کاربردی و از لحاظ روش پژوهش توصیفی است. مدل با فرضیات و اهداف و محدودیت‌های دنیای واقعی و اطلاعات و ارقام و داده‌های خطوط ۱، ۲، ۳، ۴ در تمامی ایستگاه‌های فعال در این مسیرها برای بهمن ماه در سال ۹۵ که از شرکت بهره‌برداری متروی تهران و حومه اخذ شده ساخته شده است. در این بخش، به ارائه مدلی پرداخته شده است که تعداد واگن‌های بهینه در سیستم حمل‌ونقل ریلی درون‌شهری تهران با هدف حداقل کردن هزینه‌ها به روش برنامه‌ریزی خطی مدلسازی شده است. به این منظور در ادامه

۳-۳ متغیرهای تصمیم

X_{ij} : واگن اختصاص یافته به خط i در بازه زمانی j

X_{ik} : واگن اختصاص یافته به خط i در بازه زمانی k

۳-۴ ارائه مدل پیشنهادی

تحلیل اثر بهینه سازی تخصیص واگن‌ها بر کاهش هزینه حمل و نقل در شبکه متروی تهران

۱۰	۴	۱۵	۱۲	کل قطار های اعزام شده در یک ساعت (رام)
۷	۷	۷	۷	تعداد واگن قطارها در هر خط (عدد)
۷۰	۲۸	۱۰۵	۸۴	واگن های عرضه شده در هر ساعت (عدد)

منبع: (یافته های تحقیق)

در رابطه (۲) محدودیت ظرفیت عرضه واگن‌ها در خط i در بازه زمانی j (ساعات اوج) در نظر گرفته شده است. در هر خط با توجه به بازه زمانی تعریف شده برای اعزام هر رام قطار تعداد مشخصی واگن را می‌توان اختصاص داد. ساعات اوج بر اساس درصد استفاده شده از ظرفیت واگن تعریف شده است. در این تحقیق زمانی که بیشتر از ۵۰ درصد ظرفیت واگن استفاده شده ساعات اوج در نظر شده در این راستا برای $j=1,2$ به ترتیب ۵۰ تا ۷۵ درصد و ۷۵ تا ۱۰۰ درصد ظرفیت واگن استفاده شده است. در رابطه (۳) محدودیت ظرفیت عرضه واگن‌ها در خط i در بازه زمانی k (ساعات غیراوج) در نظر گرفته شده است. ساعات غیر اوج نیز را زمان‌هایی که کمتر از ۵۰ درصد ظرفیت واگن استفاده شده تعریف شده است. در این مدل برای ساعات غیر اوج $k=1,2$ که به ترتیب کمتر از ۲۵ و بین ۲۵ تا ۵۰ درصد ظرفیت هر واگن استفاده گردیده است.

۲. $(a_{ij}$ و $b_{ik})$ تقاضا خط i در ساعات اوج و غیراوج: بر اساس اطلاعات دریافتی از شرکت بهره‌برداری مترو تهران و مشخص بودن میانگین تعداد افراد ورودی از گیت به هر خط در بازه‌های یک ساعته شروع ساعت کار تا پایان اتمام ساعت کاری و مشخص بودن ظرفیت هر واگن می‌توان تقاضای هر خط را در بازه‌های اوج و غیراوج بر حسب واگن تعیین نمود. با توجه به اطلاعات موجود متوسط تقاضا در روزهای مختلف در بازه‌های تعریف شده تقریباً یکسان می‌باشد.

$$\text{تابع هدف:} \quad \text{Min. } Z = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^2 (c_1 + c_2)x_{ij} \quad (1)$$

$$+ \sum_{i=1}^4 \sum_{k=1}^2 (c_1 + c_2)x_{ik}$$

$$\sum_{j=1}^2 x_{ij} \leq d_{ij} \quad i = 1,2,3,4 \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^2 x_{ik} \leq e_{ik} \quad i = 1,2,3,4 \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^2 x_{ij} \geq a_{ij} \quad i = 1,2,3,4 \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^2 x_{ik} \geq b_{ik} \quad i = 1,2,3,4 \quad (5)$$

$$x_{ij}, x_{ik} \geq A_i \quad i = 1,2,3,4 \quad (6)$$

$$x_{ij}, x_{ik} \leq B_i \quad i = 1,2,3,4 \quad (7)$$

$$x_{ij}, x_{ik} \geq 0 \quad (8)$$

۳-۵ پارامترها، تابع هدف و محدودیت‌ها

۱. $(d_{ij}$ و $e_{ik})$: ظرفیت عرضه در خط i در بازه‌های j و k : ظرفیت عرضه واگن‌ها در هر خط بر اساس برنامه تعریف شده مهندسین مترو مشخص شده مثلاً برای خط یک بازه زمانی پنج دقیقه یکبار برای اعزام قطار تعریف شده است و با وجود قطارهای هفت واگنه، در هر ساعت ۸۴ واگن مشغول بکار هستند. میزان عرضه خطوط در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. محاسبه عرضه هر خط در هر ساعت

خطوط	یک	دو	سه	چهار
بازه زمانی اعزام قطار	هر ۵	هر ۴	هر ۱۵	هر ۶
	دقیقه	دقیقه	دقیقه	دقیقه
	یکبار	یکبار	یکبار	یکبار

هدف مساله، بهینه‌سازی هزینه‌های مصرفی واگن‌ها است؛ در این رساله هزینه‌های در نظر گرفته شده شامل: هزینه برق مصرفی و هزینه تعمیرات واگن‌ها است.

(C_1) هزینه تعمیرات هر واگن در بهمن ماه سال ۹۵: هزینه تعمیرات خود شامل چهار هزینه: هزینه تعمیر اساسی، هزینه تعمیر سالیانه، هزینه تعمیر جاری و هزینه تعمیر ویژه است.

"تعمیر اساسی: تعمیراتی است که پس از زمان مشخص یا کیلومتر از معینی براساس استانداردهای کارخانه سازنده روی وسیله نقلیه ریلی انجام شده است. تعمیر سالیانه: بازدید و تعمیراتی است که هر ساله بر روی قسمت‌های مشخصی از وسیله نقلیه ریلی انجام گردیده است. تعمیر جاری: بازدید، تعمیر و سرویسی است که به طور معمول روزانه و یا در صورت خرابی وسایل در مبادی حرکت روی وسیله نقلیه ریلی صورت پذیرفته است. تعمیر ویژه: تعمیراتی است که خارج از برنامه زمان‌بندی شده به طور اضطراری روی وسیله نقلیه ریلی صورت گرفته است [سالنامه آماری شرکت رجا، ۱۳۹۴]".

بر اساس اطلاعات دریافتی از شرکت بهره‌برداری متروی تهران و حومه هزینه خرید هر واگن در سال ۱۳۹۵، ۴۸ میلیارد ریال بوده و با در نظر گرفتن ۱۰ درصد ارزش خرید ناوگان به عنوان هزینه سالانه تعمیرات، به طور متوسط سالی ۴ میلیارد و ۸۰۰ میلیون ریال هزینه تعمیرات واگن‌ها است و هزینه تعمیر هر واگن برای هر ساعت کاری به طور متوسط ۷۴۰۷۴۰ ریال می‌باشد.

(C_2) هزینه برق مصرفی هر واگن در بهمن ماه سال ۹۵: برق مصرفی هر واگن، برقی است که توسط مولد برق، مولد بخار و تراکشن هر واگن مصرف شده است. "تراکشن: این سیستم جهت تأمین نیروی حرکتی و ترمزی قطار مورد استفاده قرار گرفته است. هر واگن دارای چهار تراکشن است. مولد بخار: وسیله نقلیه ریلی که در فصل سرما از طریق سیستم تولید بخار، گرمایش داخل واگن‌های مسافری را تأمین کرده است.

فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال یازدهم / شماره سوم / بهار ۱۳۹۹

با بررسی داده‌های جمع‌آوری شده از تقاضا افراد در ماه‌های مختلف از سال این نتیجه حاصل شد که الگوی تقاضای ماهانه یک الگوی ثابت و غیر تصادفی می‌باشد و بازه زمانی ساعات اوج و غیر اوج به علت یکی بودن شروع و اتمام ساعات کاری افراد، در ماه‌های مختلف ثابت است. با توجه به اینکه هدف اصلی رساله مینیمم ساختن هزینه‌ها در شبکه حمل و نقل ریلی درون‌شهری است، تخصیص تعداد بهینه واگن‌ها و جلوگیری از اختصاص یک رام قطار هفت‌واگنه می‌تواند بخش بزرگی از این هزینه را کاهش دهد. رابطه (۴) محدودیت برآوردن تقاضای مسافران در خط i در بازه زمانی J را نشان داده است که تعداد واگن‌های اختصاصی نباید کمتر از تقاضا باشد با وجود این محدودیت ضمن برآوردن به موقع تقاضای مسافران و تشویق آن‌ها برای استفاده از این نوع سیستم حمل و نقل می‌توان به یکی دیگر از اهداف تحقیق که کاهش آلودگی و ترافیک است، نایل آمد. aij با توجه به میزان تقاضای هر خط در بازه‌های زمانی مختلف و ظرفیت هر واگن برای مسافران بر حسب واگن‌های مورد نیاز مشخص شده است. در رابطه (۵) محدودیت برآوردن تقاضای مسافران در خط i در بازه زمانی k در نظر گرفته شده است.

۳. (C_1) و (C_2) : در این تحقیق هدف حداقل‌سازی هزینه واگن‌های اختصاص یافته به خطوط ریلی $(i=1,2,3,4)$ در شبکه متروی تهران است. به طوری که هزینه‌های سیستم حمل و نقل ریلی درون‌شهری تهران کمینه گردد. در واقع هدف اصلی آن است، ساعاتی که میزان عرضه بیشتر از تقاضاست را بهینه کرد تا از اختصاص واگن‌های اضافی به خطوط جلوگیری شود و بتوان هزینه‌ها را کاهش داد. "هزینه‌های ثابت شامل هزینه‌هایی هستند که در صورت استفاده و یا استفاده نکردن از واگن‌ها در نظر گرفته شده‌اند، به عنوان مثال هزینه خرید در طول دوره برنامه‌ریزی، جزو هزینه‌های ثابت محسوب شده است و هزینه‌های عملیاتی، هزینه‌هایی هستند که در صورت استفاده از واگن باید پرداخت شوند. مانند هزینه برق مصرفی و هزینه تعمیرات واگن‌ها [هاله، بخشی و حسینی، ۱۳۹۱]".

تحلیل اثر بهینه سازی تخصیص واگن‌ها بر کاهش هزینه حمل و نقل در شبکه متروی تهران

نشان داده که در هر ساعت باید تعداد واگن‌ها مقادیر مثبت باشند.

با توجه به مدل پیشنهادی و نحوه محاسبه پارامترها، مدل مورد نظر با برنامه winQSB حل شده است که خروجی برنامه مذکور تعداد بهینه واگن‌ها در خطوط ۱، ۲، ۳ و ۴ در بازه‌های اوج و غیراوج (X_{ik} و X_{ij}) را مشخص می‌نماید.

۴. یافته‌های تحقیق

۴-۱ نتایج خروجی مدل

نتایج بدست آمده از خروجی برنامه winQSB در شکل ۱، ۲، ۳ و ۴ نشان داده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده فرضیه پژوهش تایید شده و تعداد واگن‌های بهینه در جهت حداقل کردن هزینه‌های تابع هدف به صورت زیر می‌باشد:

۱. تعداد واگن‌های اختصاص یافته به خط یک در بازه زمانی $k=1$ (بازه غیراوج که ۲۵ درصد از ظرفیت قطار استفاده می‌شود از ساعات ۵ تا ۶ صبح و ۲۲ تا ۲۳) زمانی که بین صفر تا ۲۵ درصد قطار مورد استفاده قرار می‌گیرد در صورت بکارگیری قطارهای ۱ واگنه در دو ساعت کاری ($k=1$ ساعت غیراوج) و بر اساس بازه زمانی ۵ دقیقه تعریف شده برای اعزام در این خط، بجای استفاده از ۸۴ واگن از ۱۲ واگن در بازه‌های یک ساعته استفاده شده و به اندازه ۷۲ واگن در مصرف واگن‌ها صرفه جویی می‌شود. با توجه به اینکه هر واگن به طور میانگین برای هر ساعت به اندازه‌ی ۷۵۱۸۹۰ ریال (شامل هزینه برق مصرفی و هزینه تعمیرات واگن) هزینه دارد، با صرفه‌جویی واگن‌ها به اندازه ۷۲ واگن، ۵۴۱۳۶۰۸۰ ریال در هر ساعت در هزینه‌ها صرفه‌جویی می‌شود. همچنین در بازه زمانی $k=2$ در صورت بکارگیری قطارهای ۳ واگنه در مجموع از ۳۶ واگن به جای ۸۴ واگن استفاده می‌شود و به اندازه ۴۸ واگن صرفه‌جویی می‌شود که در مجموع ۲۷۰۶۸۰۴۰ ریال در یک بازه یک ساعته از هزینه‌ها کاسته می‌شود. به طور مشابه برای بازه زمانی که

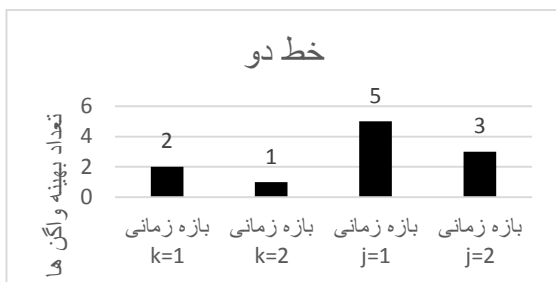
مولد برق: وسیله نقلیه ریلی که نیروی الکتریسیته مورد نیاز واگن‌ها را تأمین می‌نماید. از این مولد برای راه اندازی دستگاه‌های گرمایش، سرمایش، روشنایی و ... استفاده شده است [سالنامه آماری شرکت رجا، ۱۳۹۴].

بر اساس اطلاعات دریافتی از شرکت متروی تهران و حومه کل برق مصرفی بهمن ماه سال ۹۵ خطوط فعال مترو برابر ۳۳۹۷۹۰۸۱ کیلو وات ساعت بوده است که ۱۰ درصد از این برق صرف روشنایی ایستگاه‌ها و برق مصرفی پله‌های برقی و آسانسورها می‌شود و ۹۰ درصد مربوط به حرکت، روشنایی و راه‌اندازی سیستم‌های گرمایش و سرمایش واگن‌ها شده است که توسط تراکشن‌ها، مولد برق و مولد بخار هر واگن مصرف گردیده است. کل قطارهای سیستم ۱۰۱ رام قطار ۷ واگنه است در نتیجه برق مصرفی هر واگن به طور متوسط برابر ۷۹ کیلو وات ساعت و تعرفه برق مصرفی برای شرکت متروی تهران طبق تعرفه برق بخش کشاورزی محاسبه می‌شود. در نتیجه میانگین هزینه برق مصرفی ساعتی هر واگن برابر ۱۱۱۵۰ ریال برای هر کیلو وات ساعت بوده است.

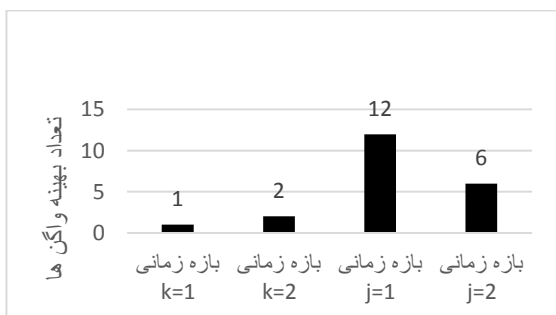
۴.۱: $(A_i$ و $B_i)$: رابطه (۶) به حداقل تعداد واگن‌های لازم برای هر خط در هر بازه زمانی اشاره کرده است که بر اساس حداقل تقاضا در این خطوط تعریف شده است. در این مدل مقدار A_i به عنوان حداقل واگن لازم برای هر خط تعریف شده است که از اختصاص همه‌ی واگن‌ها به یک بازه‌ی زمانی در جهت کاهش هزینه‌ها جلوگیری شود. از طرفی با فعال بودن خط در ساعات کاری مترو می‌توان نیاز مسافران را تأمین کرد و به یکی دیگر از اهداف تحقیق که تشویق به استفاده از حمل و نقل عمومی است دست یافت. در رابطه (۷) B_i به حداکثر تعداد واگن‌هایی را که می‌توان به هر ساعت کاری اختصاص داد اشاره نموده است، در هر خط مترو تعداد خاصی واگن وجود دارد که نمی‌توان بیشتر از این تعداد را به X_{ij} و X_{ik} اختصاص داد. در رابطه (۸) محدودیت‌های فنی روی متغیرهای تصمیم را



شکل ۱. تعداد بهینه واگن‌ها در خط یک



شکل ۲. تعداد بهینه واگن‌ها در خط دو



شکل ۳. تعداد بهینه واگن‌ها در خط سه



شکل ۴. تعداد بهینه واگن‌ها در خط چهار

با توجه به اطلاعات دریافتی از شرکت متروی تهران طراحی خطوط مترو و جانمایی ایستگاه‌های آن بر مبنای طرح جامع شهرسازی تهران و مراکز جمعیتی و مسافرپذیر انجام شده‌است. بر این مبنای ایستگاه‌های مترو و طول سکوی آن‌ها نیز

بین ۵۰ تا ۷۵ و ۷۵ تا ۱۰۰ درصد ظرفیت قطار استفاده شده می‌توان به ترتیب از قطارهای ۴ و ۸ واگنه استفاده نمود. در بازه زمانی که بجای استفاده از قطار ۷ واگنه از قطار ۸ واگنه استفاده می‌شود هزینه‌ها افزایش می‌یابد ولی میزان افزایش خیلی کمتر از کاهشی است که در سایر بازه‌ها در هزینه‌ها داشته‌ایم و در مجموع کل هزینه در این خط کاهش می‌یابد. در مجموع در این خط در طول یک روز کاری در یک خط رفت بجای استفاده از ۱۵۱۲ واگن از ۱۴۰۴ واگن استفاده می‌شود و ۱۰۸ واگن صرفه‌جویی می‌شود.

۲. تعداد واگن‌های بهینه برای خط ۲ در بازه‌های زمانی $k=1$ برابر ۲ واگن، در بازه زمانی $k=2$ برابر ۱ واگن، در بازه زمانی $j=1$ برابر ۵ واگن و در بازه زمانی $j=2$ برابر ۳ واگن است. با توجه به اینکه بازه اعزام قطار هر ۴ دقیقه یکبار می‌باشد در مجموع از بکارگیری ۸۵۵ واگن در طول ۱۸ ساعت کاری صرفه‌جویی شده‌است و باعث کاهش هزینه به مقدار ۶۴۲۸۶۵۹۵۰ ریال بصورت روزانه می‌شود.

۳. تعداد واگن‌های بهینه برای خط ۳ در بازه‌های زمانی $k=1$ برابر ۱ واگن، در بازه زمانی $k=2$ برابر ۲ واگن، در بازه زمانی $j=1$ برابر ۱۲ واگن و در بازه زمانی $j=2$ برابر ۶ واگن است. با توجه به اینکه بازه اعزام قطار هر ۱۵ دقیقه یکبار می‌باشد در مجموع به اندازه ۱۰۴ واگن در طول ۱۸ ساعت کاری صرفه‌جویی و باعث کاهش هزینه‌ها به اندازه ۷۸۱۹۶۵۶۰ ریال به صورت روزانه می‌شود.

۴. تعداد واگن‌های بهینه برای خط ۴ در بازه‌های زمانی $k=1$ برابر ۱ واگن، در بازه زمانی $k=2$ برابر ۲ واگن، در بازه زمانی $j=1$ برابر ۷ واگن و در بازه زمانی $j=2$ برابر ۵ واگن است. با توجه به اینکه بازه اعزام قطار هر ۶ دقیقه یکبار می‌باشد در مجموع به اندازه ۴۳۰ واگن در طول ۱۸ ساعت کاری صرفه‌جویی و باعث کاهش هزینه‌ها به اندازه ۳۲۳۳۱۲۷۰۰ ریال به صورت روزانه شده است.

تحلیل اثر بهینه سازی تخصیص واگن‌ها بر کاهش هزینه حمل و نقل در شبکه متروی تهران

نتایج حاصل از برنامه winQSB نشان می‌دهد برای ضرایب X_{11} , X_{21} , X_{23} , X_{31} و X_{41} در تابع هدف حدود بالا و پایینی (Allowable Max. C و Allowable Min. C) وجود دارد که در خارج از آن‌ها تعداد بهینه واگن‌ها تغییر خواهد کرد. برای متغیرهای ذکر شده این حدود بین صفر تا ۷۵۱۸۹۰ است، به این معنی که اگر هزینه یک ساعت کاری هر واگن از ۷۵۱۸۹۰ ریال بیشتر شود از تعداد واگن کمتری در این ساعات استفاده می‌شود.

برای متغیرهای X_{12} , X_{14} , X_{22} , X_{24} , X_{32} , X_{34} و X_{44} این محدوده بین ۷۵۱۸۹۰ تا بی‌نهایت می‌باشد. به این معنی که اگر هزینه هر واگن در یک ساعت کمتر از ۷۵۱۸۹۰ ریال شود تعداد بیشتری واگن به این متغیرها در تابع هدف اختصاص داده می‌شود. همچنین برای متغیرهای X_{13} , X_{33} و X_{43} این محدوده بین منفی بی‌نهایت تا ۷۵۱۸۹۰ می‌باشد به این معنی که اگر هزینه یک واگن در یک ساعت کاری از ۷۵۱۸۹۰ ریال بیشتر شود تعداد کمتری واگن به این ساعات کاری اختصاص داده می‌شود، همچنین منفی بی‌نهایت بودن حد پایین بدین معنی است که هر قدر هم این هزینه کاهش یابد تعداد بهینه این واگن‌ها زیاد نخواهد شد و این به دلیل محدودیت‌های لحاظ شده در مدل می‌باشد.

۴-۲-۴ تجزیه و تحلیل قیمت سایه‌ای محدودیت‌ها

قیمت سایه‌ای مقداری است که اگر سمت راست محدودیت (که با نماد RHS مشخص شده است)، یک واحد اضافه شود به آن اندازه جواب بهینه، بهبود می‌یابد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد تابع هدف، بیشترین حساسیت را به تغییر میزان عدد محدودیت تقاضا دارد به نحوی که یک واحد افزایش در مقدار محدودیت تقاضا (نیاز به تعداد واگن‌های بیشتر در هر خط) ۷۵۱۸۹۰ ریال در بهبود هزینه‌ها در تابع هدف موثر بوده است و سایر محدودیت‌ها که دارای قیمت‌های سایه‌ای صفر هستند بیشتر بر روی تعیین تعداد بهینه واگن‌ها موثر بوده و در تغییر

طراحی‌های متفاوتی دارند. اما در حال حاضر از همان قطارهای ۷ واگنه در تمام خطوط استفاده می‌شود. بر اساس آنچه در نتایج مدل ارائه شد می‌توان برای سایر خطوط نیز قطارهای مختلف با واگن‌های مختلف را تعریف نمود.

بر اساس اطلاعات دریافتی از مهندسين شرکت مترو مجموع هزینه‌های ذکر شده در مدل (مجموع هزینه‌های برق مصرفی و هزینه تعمیرات واگن‌ها) برای بهمن ماه ۱۳۹۵ برابر ۲۴۴۲۵۶/۰۵۴ میلیون ریال می‌باشد در حالی که در برنامه winQSB حداقل هزینه‌ها (مقدار بهینه تابع هدف) برای بهمن ماه برابر ۱۶۵۰۲۴/۸۱ میلیون ریال است و برای یک روز کاری برابر ۵۵۰۰/۸۲۷ میلیون ریال است و این نشان می‌دهد که در صورت بکارگیری جواب‌های بهینه بدست آمده این مدل، می‌توان در این ماه ۷۹۲۳۱/۲۴۴ میلیون ریال در هزینه‌ها صرفه‌جویی نمود.

۴-۲-۴ آنالیز حساسیت مدل

تحلیل حساسیت عبارتست از تحلیل و بررسی چگونگی تغییر پارامترهای یک مدل برنامه‌ریزی خطی و ارزیابی تأثیر آن در جواب بهینه. تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که ضرایب تابع تا چه میزان می‌توانند افزایش یا کاهش یابند بدون این که پایه بهینه مسئله عوض شود.

تحلیل حساسیت شامل دو بخش است، یکی مربوط به ضرایب تابع هدف و دیگری مربوط به محدودیت‌ها، که در هر کدام به تفکیک مقدار واقعی و مقادیر کاهش و افزایش قید شده است. آنالیز حساسیت مقادیر سمت راست به این مفهوم است که این مقادیر تا چه حد امکان افزایش یا کاهش برایشان وجود دارد بدون این که قیمت‌های سایه‌ای^۱ به دست آمده را تغییر دهند. تغییر در قیمت سایه‌ای باعث تغییر در جواب بهینه خواهد شد [اسدی و دیگران، ۱۳۹۳].

۴-۲-۴ تجزیه و تحلیل حساسیت ضرایب تابع هدف

هزینه‌ها ارائه شده‌است. که با استفاده از نرم‌افزار winQSB به حل مدل پیشنهادی پرداخته شده است.

پس از ارائه مدل می‌توان مدل را با تعداد مختلفی از قطارها (تعداد واگن‌های مختلف) که در ساعات مختلف تقاضا به شبکه ریلی وارد می‌شوند، تحلیل نمود. در ادامه نیز میزان کاهش در هزینه‌ها (برق مصرفی و هزینه تعمیرات واگن‌ها) مورد بررسی قرار گرفت نتایج مدل پیشنهادی نشان داده‌اند، مدل پیشنهادی به طور متوسط باعث کاهش ۳۳ درصدی هزینه‌ها در طول یک ماه می‌شود. در نتیجه شرکت متروی تهران می‌تواند با بکارگیری این مدل، هزینه‌ها را کاهش داده، موفق‌تر عمل نموده و بهره‌وری بالاتری داشته باشد. علاوه بر آن در این پژوهش به تعداد سفر انجام شده در ساعات اوج و غیراوج توجه شده است که باعث می‌شود تخصیص واگن‌ها بر مبنای نیاز مسافران انجام گیرد و به دنبال پاسخگویی به تقاضای سفر باشد.

پژوهشگران آتی در این زمینه می‌توانند مدل پیشنهادی ارائه شده در این پژوهش را برای سایر خطوط مترو و خطوط در دست احداث و همین‌طور برای سایر خطوط حمل‌ونقل مانند خطوط اتوبوس‌رانی و تاکسی‌رانی و انواع حمل‌ونقل هوایی و دریایی بکار گیرند. علاوه بر آن در مدل ارائه شده نیز می‌توان از برخی محدودیت دیگر نیز بر مبنای مطالعه موردی استفاده نمود.

۶. پی‌نوشت‌ها

1. Rio de Janeiro
2. Region's Gross Domestic Product (GDP)
3. Saving
4. Ahuja, Liu, Orlin, Sharma, and Shughart
5. CSX
6. Kuo and Nicholls

مقدار بهینه تابع هدف تأثیری ندارد به بیان دیگر در این محدودیت‌ها بیش از حداقل نیاز هر خط به واگن، در بازه‌های کاری تعریف شده واگن اختصاص داده شده است. به طور مثال در محدودیت‌های مربوط به عرضه که مقدار قیمت‌های سایه‌ای صفر است به این معنی است که میزان عرضه‌ای که در هر خط وجود دارد بیش از نیاز هر خط به تعداد بهینه واگن‌ها می‌باشد. در واقع این بیانگر این مسأله است که با اضافه کردن به عدد سمت راست این محدودیت‌ها (RHS) در جواب بهینه تغییری به وجود نخواهد آمد.

۵. نتیجه‌گیری

گسترش شهرها، باعث افزایش تقاضای سفر در ساعات اوج کار و تحصیل شده است. پاسخگویی به نیاز سفر جمعیت شهرهای بزرگ، از عهده وسایل نقلیه غیرجمعیتی ساخته نیست. بنابراین، روی آوردن به سمت استفاده از انواع سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی، جهت جابجایی مردم در شهرها، امری بدیهی و اجتناب‌ناپذیر است. این سیستم‌ها برای نیل به اهداف متفاوتی از جمله افزایش راحتی و امنیت سفر، کاهش آلودگی هوا و حفظ محیط‌زیست، کاهش زمان سفر و حل مشکلات ترافیکی ناشی از تردد وسایل نقلیه شخصی ایجاد می‌شوند.

هدف در مسئله مورد مطالعه تعیین تعداد بهینه ناوگان است، به طوری که اهداف سیستم مانند هزینه کمینه گردد. از مهمترین ویژگی‌ها در حل مسئله جهت رسیدن به جوابهای بهینه در جریان واگن‌ها در شبکه است که ضمن کاهش هزینه‌ها نیاز مسافران در ساعات اوج و غیراوج تقاضا تأمین گردد و افراد جامعه به استفاده از حمل‌ونقل ریلی به جای استفاده از خودروهای شخصی تشویق شوند. با عملی شدن این طرح علاوه بر کاهش هزینه‌ها در سیستم حمل‌ونقل ریلی و ارائه خدمات بهتر از طرف شرکت مترو، میزان تصادفات و آلودگی هوا نیز کاهش می‌یابد. بدین منظور یک مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح جهت بهینه نمودن واگن‌ها در راستای کاهش

تحلیل اثر بهینه سازی تخصیص واگن‌ها بر کاهش هزینه حمل و نقل در شبکه متروی تهران

- سجادی‌نژاد، الف و حسن‌نابینی، ع. (۱۳۹۵) "طراحی سامانه‌های عملیاتی در سیستم اتوبوسرانی به منظور ساماندهی حمل‌ونقل مسافر درون‌شهری"، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، سال سی و یکم، شماره چهارم، ص. ۶۰-۷۳.

- طراوتی، الهه (۱۳۹۰) "تحلیل اثر بهینه سازی شبکه توزیع کالا بر کاهش هزینه حمل و نقل (مطالعه موردی شرکت توزیع و پخش به پخش)"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده اقتصاد و علوم سیاسی، دانشگاه شهید بهشتی، شهر تهران.

- کاکاوند، الف. و جباری، س. (۱۳۹۱) "ارزیابی پایداری سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی درون‌شهری"، یازدهمین کنفرانس مهندسی حمل‌ونقل و ترافیک ایران، ص. ۱-۱۲.

- مختاری مطلق، پ. و شریفان، ح. (۱۳۹۲) "تعیین الگوی کشت بهینه محصولات زراعی با نرم افزار Lingo (مطالعه موردی: منطقه حنا-سمیرم)"، اولین همایش ملی چالش‌های منابع آب و کشاورزی، اصفهان، انجمن ملی آبیاری و زهکشی ایران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خوراسگان بهمن ماه سال ۱۳۹۲، ص. ۱-۷.

- شرکت حمل و نقل ریلی رجا (۱۳۹۴) "آشنایی با تعاریف و اصطلاحات راه‌آهن"، سالنامه آماری شرکت حمل‌ونقل ریلی رجا.

- شرکت بهره‌برداری راه‌آهن شهری تهران و حومه (۱۳۹۵) "مترو تهران از نگاه آمار و ارقام"، سایت شرکت بهره‌برداری راه‌آهن شهری تهران و حومه: (metro.tehran.ir)

- معاونت و سازمان حمل‌ونقل و ترافیک شهرداری تهران، (۱۳۹۳). گزیده آمار و اطلاعات حمل‌ونقل شهری تهران. سایت سازمان حمل‌ونقل و ترافیک شهرداری تهران

:- (www.trafficcontrol.tehran.ir)

- نعیمی، الف.، شورورزی، ح. و طالعی، م. (۱۳۹۴) "بهینه سازی سیستم حمل و نقل ادارات با خوشه بندی به روش k

7. Cacchiani, Caprara and Toth

8. Shadow price

۷. مراجع

- اسدی، ر.، ملکی‌نژاد، ح. و فتاحی، الف (۱۳۹۳) "بهینه‌سازی کاربری اراضی بر اساس منابع آب مصرفی با استفاده از برنامه‌ریزی خطی (مطالعه موردی: شهرستان یزد)"، فصلنامه مدیریت آب در مناطق خشک، جلد یک، شماره دو، ص. ۱۱-۲۶.

- اسدی، ش. و موحدی کلپیر، ر. (۱۳۹۶) "نقش استراتژیک توسعه پایدار و رفتار فردی بر ساختار حمل‌ونقل"، فصلنامه علمی تخصصی معماری سبز، سال سوم، شماره نه، ص. ۱۱۱-۱۳۴.

- پریزادی، ط.، مرصوصی، ن.، شعاع برآبادی، ع.، حسینی امینی، ح. و شهریاری، م. (۱۳۹۰) "تحلیل میزان گرایش اقشار مختلف اجتماع به استفاده از سیستم حمل‌ونقل عمومی پس از اجرای طرح هدفمندی یارانه‌ها"، مدیریت شهری، شماره ۲۸، ص. ۱۱۱-۱۲۲.

- حیدری اناری، ع. و شجاعی، الف. (۱۳۹۶) "رتبه‌بندی مدهای مختلف حمل‌ونقل مسافری درون‌شهری به کمک روش تاپسیس"، پژوهشنامه حمل و نقل، شماره ۵۲، ص. ۱۵۹-۱۶۷.

- داداشی، ع.، شیخ‌الاسلامی، ع. و بابایی تیرکلایی، ع. (۱۳۹۴) "برنامه‌ریزی تخصیص اسکله در پایانه کانتینری بندر شهید رجایی"، نشریه صنعت حمل و نقل دریایی، سال دوم، شماره ۱، ص. ۴۱-۴۷.

- رحمتی نژاد، م. و خورشیدوند، س. (۱۳۹۲) "افزایش قابلیت سیستم حمل و نقل ریلی شهری"، پانزدهمین همایش بین‌المللی حمل و نقل ریلی، مهر ماه ۱۳۹۲، ص. ۱-۱۱.

فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل / سال یازدهم / شماره سوم / بهار ۱۳۹۹

- میانگین و ترکیب الگوریتم saving و جستجوی ممنوع"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، سال هفتم، شماره چهارم، تابستان ۱۳۹۵، ص. ۶۶۵-۶۷۸.
- نورالهی، ح. و برکپور، ن. (۱۳۹۲) "ارزیابی آثار احداث سیستم ریلی درون-شهری بر کیفیت محیط شهری؛ مطالعه موردی: خط یک قطارشهری مشهد"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، سال پنجم، شماره سوم، ص. ۳۹۳-۴۱۲.
- نیکوکار، الف.، ناطق، ت. و غریبی، ج. (۱۳۹۵) "بهینه‌سازی مصرف انرژی در حمل‌ونقل ریلی شهری (مطالعه موردی: مترو تهران)"، فصلنامه علمی- پژوهشی اقتصاد و مدیریت شهری، شماره هجدهم، ص. ۵۷-۷۵.
- هاله، ح. بخشی، ح. و حسینی، ر. (۱۳۹۱) "تخصیص بهینه لوکوموتیوها به قطارهای برنامه ریزی شده در راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، سال سوم، شماره اول، ص. ۱۷-۲۷.
- یحیی‌آبادی، الف. و اکبران، ف. (۱۳۹۴) "تحلیل تاثیر زیرساخت‌های صنعت حمل‌ونقل بر رشد اقتصادی در ایران ۱۳۵۳-۱۳۹۰"، کنفرانس بین‌المللی دست‌آوردهای نوین پژوهشی مدیریت حسابداری اقتصاد، تهران، موسسه آموزش عالی نیکان، ص. ۱-۱۵.
- یقینی، م.، علی محمدیان، ع. و کریمی، م. (۱۳۹۲) "بهینه سازی برنامه ریزی خطوط مسافری در راه آهن"، نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، زمستان، جلد ۲۴، شماره ۴، ص. ۴۹۲-۵۰۱.
- یقینی، م.، غفرانی، ف.، اسمی زاده، م. و میرباقری، الف. (۱۳۹۲) "تخصیص لوکوموتیو و زمانبندی قطارهای باری در راه‌آهن ایران"، مهندسی حمل و نقل، پاییز، شماره ۱، ص. ۹۵-۱۱۶.
- Ahuja, R. K., Liu, J., Orlin, J. B., Sharma, D., and Shughart, L. A. (2005) "Solving real-life locomotive - scheduling problems. Transportation Science", vol. 39, No. 4, pp. 503-517.
- Cacchiani, V., Caprara, A. and Toth, P. (2012) "A fast heuristic algorithm for the train unit assignment problem. In OASICS-OpenAccess Series in Informatics", Schloss Dagstuhl-Leibniz-Zentrum fuer Informatik, Vol. 25, pp. 1-9.
- Kuo, C. C. and Nicholls, G. M. (2007) "A mathematical modeling approach to improving locomotive utilization at a freight railroad", Omega, Vol. 35, No. 5, pp. 472-485.
- Sun, H., Wang, Y. and Li, Q. (2016) "The impact of subway lines on residential property values in Tianjin: An empirical study based on hedonic pricing model", Discrete Dynamics in Nature and Society, vol. 2016, pp. 1-10.

تحلیل اثر بهینه سازی تخصیص واگن‌ها بر کاهش هزینه حمل و نقل در شبکه متروی تهران

علی اکبر عرب‌مازار، درجه کارشناسی مدیریت بازرگانی را در سال ۱۳۵۶ از مدرسه عالی بازرگانی تهران و درجه کارشناسی ارشد پژوهش عملیاتی و کارشناسی ارشد اقتصاد را در سال ۱۳۵۹ از دانشگاه ایالتی میشیگان اخذ نمود. وی در سال ۱۳۶۲ موفق به کسب درجه دکتری در رشته علم سیستم‌ها از همان دانشگاه شد. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان مباحث مرتبط با کاربرد روش سیستمی و مدل‌های OR در مسایل اقتصادی بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادی در دانشگاه شهید بهشتی است.



رسام مشرفی، درجه کارشناسی در رشته اقتصاد نظری را در سال ۱۳۷۷ از دانشگاه مازندران و درجه کارشناسی ارشد در رشته برنامه‌ریزی سیستم‌های اقتصادی را در سال ۱۳۸۱ از دانشگاه شهید بهشتی اخذ نمود و در سال ۱۳۸۹ موفق به کسب درجه دکتری در اقتصاد از دانشگاه شهید بهشتی گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان مباحث مرتبط به شبیه سازی سیستم‌های اقتصادی پیچیده در حوزه اقتصاد انرژی، اقتصاد حمل و نقل، بنادر و سیستم‌های لجستیکی، اقتصاد کلان و اقتصاد مالی بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیار در دانشکده اقتصاد و علوم سیاسی دانشگاه شهید بهشتی با زمینه تخصصی اقتصاد انرژی، اقتصاد حمل و نقل و دینامیک سیستمی است.



رقیه نظری، درجه کارشناسی در رشته اقتصاد نظری در سال ۱۳۸۹ از دانشگاه بوعلی سینا همدان و درجه کارشناسی ارشد در رشته برنامه‌ریزی سیستم‌های اقتصادی را در سال ۱۳۹۶ از دانشگاه شهید بهشتی تهران اخذ نمود. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان مباحث مرتبط به اقتصاد حمل و نقل، اقتصاد انرژی و کاربرد بهینه‌سازی در سیستم‌های اقتصادی با استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی ریاضی است.

