طراحی مدل بهینه‌یابی و سیستم پشتیبان تصمیم تعیین ظرفیت تعداد انواع وسایل حمل و نقل عمومی خطوط اتوبوسرانی شهری

مقاله پژوهشی

علیرضا پویا*، استاد، گروه مدیریت، دانشکده علوم اداری و اقتصادی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
مرتضی پاکدامن، استادیار، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، پژوهشکده اقلیم‌شناسی مشهد، ایران
سمیه فدائی، دانشجوی دکتری، گروه مدیریت، دانشکده علوم اداری و اقتصادی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
مرتضی چایچی مطلق، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران
سروش صدرایی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران، جنوب، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: alirezapooya@um.ac.ir

دریافت: ۹۹/۱۰/۱۸- پذیرش: ۱٤۰۰/۰٤/۲۵
صفحه ۲۰٦-۱۸۵

چکیده

سامانه حمل و نقل اتوبوس یکی از مهمترین سامانه‌های حمل و نقل همگانی به شمار می‌رود. بهبود این سامانه تأثیر به‌سزایی در عملکرد و افزایش کارایی سامانه حمل و نقل شهرها و به تبع آن رضایت بیشتر و جذب مسافران خواهد داشت. یکی از مسائل مهم در این حوزه تخصیص بهینه تعداد وسایل نقلیه به خطوط است که تحت عنوان مساله جدول زمانی حمل و نقل شناخته می شود. به طور مشخص تخصیص تعداد بیش از نیاز هر کدام از این وسایل به هر خط باعث ایجاد ظرفیت مازاد برای آن خط و برعکس تخصیص کمتر از نیاز باعث نارضایتی مسافر به عنوان خدمت گیرنده می‌شود. از اینرو هدف اصلی تحقیق، برآورد دقیق و بهینه تعداد وسیله و تعداد حرکت وسایل به تفکیک هر خط، هر بازه و هر نوع روز می باشد. در این پژوهش از مدل‌های ریاضی بهینه‌یابی برای حل مساله مذکور استفاده می‌شود. مدل پیشنهادی، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح است. برای ساخت مدل از پیشینه تحقیق و مصاحبه با دست اندرکاران، کارشناسان و مدیران سازمان اتوبوسرانی و خبرگان حمل و نقل عمومی استفاده شد. برای ارزیابی مدل طراحی شده علاوه بر حل چند مثال کوچک اقدام به پیاده‌سازی آزمایشی روی مجموعه خطوط پایانه آزادی شبکه اتوبوسرانی مشهد شد. نتایج حاصل از حل مدل با مقادیر واقعی مقایسه شد. نتایج پاسخ‌های بدست آمده از مدل نشان داد با تعداد وسیله کمتر نسبت به تعداد واقعی اتوبوس‌ها در روزهای مورد بررسی، کلیه محدودیت‌های سیستم به ویژه تقاضا تامین می‌شود.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی ظرفیت، برنامه‌ریزی عدد صحیح، خطوط اتوبوسرانی شهری، سیستم پشتیبان تصمیم

۱- مقدمه

حمل و نقل یکی از مهم‌ترین زیر ساخت‌های جوامع امروزی به شمار می‌آید که به منظور رفع نیازهای اجتماعی و اقتصادی ایجاد شده است. الگوی توسعه مبتنی بر حمل و نقل همگانی یکی از الگوهای توسعه شهری است که بر محوریت حمل و نقل عمومی استوار است. سامانه حمل و نقل اتوبوس یکی از مهمترین سامانه‌های حمل و نقل همگانی به شمار می‌رود. بهبود این سامانه تأثیر به‌سزایی در عملکرد و افزایش کارایی سامانه حمل و نقل شهرها و به تبع آن رضایت بیشتر و جذب مسافران خواهد داشت، که این امر به نوبه خود به کاهش ترافیک، آلودگی محیط زیست و مصرف انرژی می‌انجامد. مجموعه مسائل طراحی شبکه اتوبوس‌رانی، با یافتن مسیرهای بهینه اتوبوسرانی و تعداد اتوبوس در هر مسیر، از جمله مسایل

زیر بنایی در برنامه‌ریزی حمل و نقل همگانی به شمار می‌روند (چگینی و صفارزاده،۱۳۹۱). در مجموع می‌توان گفت که بهبود و برنامه‌ریزی برای سامانه حمل و نقل موضوعی بسیار حائز اهمیت است چرا که این مسئله با سه عامل اساسی، هزینه، زمان و از سویی حمل و نقل با میزان رضایت‌مندی شهروندان رابطه مستقیم دارد (فخرزاد،۱۳۸۱). در ایران و بالاخص در شهر مشهد نیز سامانه حمل و نقل اتوبوسرانی تحت حاکمیت مدیریت شهری بوده و شرکت‌های خصوصی در کنار سازمان اتوبوسرانی اجرای فعالیتهای حمل و نقل عمومی را برعهده دارند اما تمامی فعالیتهای اداره و پشتیبانی و مدیریت این سامانه برعهده سازمان اتوبوسرانی مشهد می‌باشد. سازمان اتوبوسرانی مشهد از دو نوع وسیله حمل و نقل اتوبوس و مینی بوس برای ارائه خدمات خود در خطوط مختلف استفاده می‌نماید. به طور مشخص تخصیص تعداد بیش از نیاز هر کدام از این وسایل به هر خط باعث ایجاد ظرفیت مازاد برای آن خط و برعکس تخصیص کمتر از نیاز باعث نارضایتی مسافر به عنوان خدمت گیرنده می‌شود. همچنین با توجه به ظرفیت متفاوت این دو نوع وسیله و الزامات اجتماعی، اقتصادی و فنی متفاوت آنها انتخاب آنها برای خطوط مختلف و تعیین تعداد بهینه آنها حائز اهمیت می‌باشد. برنامه‌ریزی حمل و نقل شهری همانند سایر برنامه‌ریزی‌ها، دارای فرآیندی بر اساس اهداف و افق برنامه‌ریزی و سایر فاکتورها است که مدت زمان برنامه‌ریزی نوع آن را مشخص می‌کند. مدل‌های زیادی برای حل مسائل حمل‌نقل استفاده می‌شود که از جمله ان می توان مدل‌های تاریخی، رگرسیونی، مدل‌های سری‌های زمانی، مدل‌های کالمن فیلتر و مدل‌های شبکه عصبی، مدل‌های شبیه‌سازی، مدل‌های مبتنی بر یادگیری و مدل‌های خطی و خطی عدد صحیح نام برد. هدف پژوهش حاضر طراحی مدلی ریاضی برای تعیین تعداد بهینه اتوبوس و مینی‌بوس مورد نیاز خطوط اتوبوسرانی با توجه به کلیه محدودیت‌های ظرفیتی، فنی و اجتماعی مترتب بر آن به تفکیک فاصله‌های زمانی تعیین شده، می‌باشد. همچنین اهداف جانبی تحقیق، تخصیص بهینه تعداد اتوبوس و مینی بوس به خطوط مختلف اتوبوسرانی شهر، کاهش هزینه‌های به کارگیری وسایل حمل و نقل مختلف سازمان اتوبوسرانی و افزایش رضایت خدمت گیرندگان (مسافرها) از خدمات حمل و نقل اتوبوسرانی است. لازم به ذکر است که استفاده از مدلهای ریاضی بهینه‌یابی برای مساله مذکور و با توجه به اهداف تحقیق، به ندرت در سازمان‌های اتوبوسرانی شهرهای ایران انجام شده است. همچنین در مدل تحقیق حاضر استراتژی برگشت کوتاه با تعریف یک خط به عنوان بخشی از یک خط دیگر و لحاظ کردن محدودیت تعادل رفت و برگشت و استراتژی برگشت بدون مسافر نیز با تعریف مجزای نیم راه رفت و برگشت (f) برای هر خط، در صورت عدم لحاظ محدودیت تعادل رفت و برگشت در آن خط محقق شده است. همچنین مدل امکان ملاحظات سیاسی در واگذاری یا عدم واگذاری وسیله ای خاص به یک خط را دارد، درحالیکه مدل‌های تحقیقات نومن و همکارانش در سال (۲۰۱۱)، مینگ و همکاران در سال (۲۰۱۳)، شو و همکاران (۲۰۱۵) و صفارزاده و مظلوم (۱۳۹٤)، دارای چنین ویژگی‌هایی نبوده و با توجه به پیشینه می‌توان گفت این ویژگی‌ها از نوآوری تحقیق حاضر بشمار می‌آید. ساختار مقاله بدین شرح است که بخش دوم به بررسی ادبیات پرداخته‌می‌شود. سپس پیشینه مطالعاتی مرتبط با موضوع و روش تحقیق حاضر آورده شده‌است. در بخش سوم روش‌شناسی تحقیق ابتدا طراحی مدل پیشنهادی تحقیق برای این مسئله که یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی است، آورده‌می‌شود. در بخش چهارم نتایج حاصل از اجرای مدل در مورد مطالعه پایانه آزادی مشهد و در ادامه نحوه اعتبارسنجی تشریح شده‌است. در بخش پایانی بحث و نتیجه‌گیری می‌شود.

۲- پیشینه تحقیق

حمل و نقل عمومی و نیمه عمومی: سیستم‌های حمل و نقل عمومی روزانه، تعداد کثیری از مسافران را در یک جهت جا به جا می‌کنند به طوری که گاه این تعداد در ساعات پیک ترافیک کاری (صبح و عصر) به صدها هزار نفر نیز می‌رسد که نمونه بارز آن قطارهای حومه‌ای است که جمعیت کثیری را از شهر به شهرک‌های اقماری منتقل می‌سازند. حمل و نقل عمومی، تمامی سیستم‌های حمل و نقلی را در بر می‌گیرد. حمل و نقل نیمه عمومی سیستم حمل و نقل خاصی است که مشخصات آن مشابه حمل و نقل عمومی باشد، اما ظرفیت آن کمتر باشد مثلا مینی‌بوس و ون جزو حمل و نقل نیمه عمومی می‌باشند (ایزدفر و همکاران،۱۳۹۵).

ظرفیت وسیله نقلیه: ظرفیت یک سیستم و یا در معنای گسترده‌تر آن، ماکزیمم توانایی عملکرد سیستم تحت شرایط

موجود است. برای سیستم‌های حمل و نقل عمومی دو ظرفیت متفاوت بسیار حائز اهمیت است، ظرفیت وسیله نقلیه عمومی که بصورت فضای موجود در هر وسیله نقلیه عنوان می‌شود و ظرفیت مسیر جابجایی با واحد ((فضا به ازای واحد ساعت)) ماکزیمم تعداد مسافر و یا جریان مسافر به ازای یک‌ساعت که بطور واقعی و حقیقی در طول مسیر جابجا شده‌اند (نواداد، ١٣٨٦).

فخرزاد (١٣٨١) یک مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح بر مبنای مسیرهای رفت و برگشت، و زمان و ساعات مورد نیاز برای سرویس دهی و فراوانی مسافرین ساخته‌است، با این هدف که هزینه کل را کمینه سازد. او مدل ساخته شده را در سیستم حمل و نقل توسط دانشجویان دانشگاه شهر یزد پیاده‌سازی نمود که منجر به کاهش ٦٤ درصدی هزینه و افزایش رضایت رانندگان و مسافران و همچنین کاهش زمان جلسات مابین مسئولین و رانندگان گردید. افندی‌زاده و میرزایی قمی (١٣٨٥) به برآورد تعداد ناوگان‌های مورد نیاز، برای تمام زیر سیستم‌های حمل و نقل همگانی، با بهره‌گیری از یک مدل ریاضی- رایانه‌ای پرداختند؛ ساختار مدل آن‌ها بگونه‌ای است، که در برگیرنده تمامی متغیر های اصلی مرتبط با تقاضا به عنوان ورودی مدل می‌باشد لذا می‌توان گفت ساختار مدل تا حدی پویا است. ناصری و برادران (١٣٨٩) عوامل بالقوه مؤثر بر زمان توقف اتوبوس شناسایی نمودند، و با استفاده از تحلیل رگرسیونی تأثیر آن عوامل اندازه‌گیری کردند. فینی در سال (١٣٨٨) به بررسی شاخص‌های عرضه و تقاضا پرداخته و سپس با استفاده از رابطه میان این دو شاخص، فرمولی جهت برآورد ناوگان ارائه داده است. صفارزاده و مظلوم (١٣٩٤) به ساخت مدل یکپارچه‌ای جهت اختصاص ناوگان و زمانبندی شبکه حمل و نقل اتوبوسرانی تندرو، به طور هم‌زمان پرداختند. احدی و اعتمادزاده (١٣٩١) جهت تدوین روشی برای تعیین ظرفیت خطوط اتوبوس، به ارائه یک متدولوژی جهت تعیین ظرفیت خطوط پرداختند و سپس جهت ارزیابی روش ارائه شده اقدام به آمارگیری میدانی از حوزه مطالعاتی شده و ضرایب عملکردی پهلوگاه‌ها تعیین نمودند. گیتنر و همکاران در سال (٢٠٠٥) مساله برنامه‌ریزی وسایل حمل و نقل عمومی با چند ایستگاه و چند نوع وسیله نقلیه مورد بررسی قرار گرفت. هدف، تخصیص اتوبوس‌های با ظرفیت‌های مختلف به یک برنامه زمانی از سفرهای مشخص با در نظر گرفتن نیازها و تقاضاهای متفاوت در ایستگاه‌های مختلف بود. نومن و همکارانش در سال (٢٠١١) یک مدل برنامه ریزی تصادفی در مورد خطوط اتوبوسرانی ارایه کردند. تابع هدف در این مدل کمینه سازی هزینه‌های از قبل برنامه‌ریزی شده و نیز کمینه سازی هزینه‌های اختلال در برنامه‌ها بود. از آنجا که مدل ارایه شده مبتنی بر شبکه بود، محدودیت‌های مدل نیز شامل قوانین بقای جریان در گره‌ها بوده است. مینگ و همکاران در سال (٢٠١٣) یک مدل برنامه ریزی دو سطحی برای زمانبندی خطوط اتوبوسرانی ارایه نمودند. در این مدل قیود مختلفی از جمله ظرفیت ایستگاه‌ها، سوختگیری و آلودگی هوا مد نظر قرار گرفتند. مدل پیشنهادی توسط الگوریتم ژنتیک حل گردید. تابع هدف مساله نیز شامل کمینه‌سازی هزینه‌های حمل و نقل در هر دو سطح بودند. چن در سال (٢٠١٤) مساله تنظیم پنجره‌های زمانی خطوط اتوبوسرانی، مطابق با دوره‌های زمانی و با توجه به حجم مسافران، مورد بررسی قرار داد. او فرض کرد که ورود مسافران و حرکت اتوبوس‌ها به صورت متعادل است و مساله تعیین تخصیص حرکت اتوبوس‌ها در هر دوره زمانی را با هدف کمینه سازی زمان انتظار مسافران در ایستگاه را بررسی نمود. شو و همکاران (٢٠١٥) مساله تخصیص وسایل نقلیه به سفرهای یک پنجره زمانی از قبل برنامه ریزی شده، مورد بررسی قرار دادند. برای تولید جواب‌های رضایت بخش از یک الگوریتم انتخاب کلونال استفاده کردند. نتایج روش برای یکی از شهرهای چین مورد استفاده قرار گرفت. سان و همکاران در سال (٢٠١٥)، یک روش ابتکاری برای بهینه‌سازی پنجره زمانی مبتنی بر اندازه وسایل حمل و نقل پیشنهاد دادند. روش پیشنهادی روی یک مجموعه داده از خطوط اتوبوسرانی شانگهای پیاده سازی گردید. طبق نتایج بدست آمده، وسایل نقلیه ترکیبی از نظر هزینه و زمانی به صرفه‌تر بوده و توانایی پاسخ به نوسانات تقاضا را در اوج تقاضا و نیز زمان‌های کم بودن تقاضا دارند. هورا و همکاران (٢٠١٦) یک مدل بهینه سازی برای بهبود عملکرد و مقاوم سازی برنامه زمانبندی موجود برای اتوبوس‌ها ارایه نمودند. این کار را با هدف توسعه خدمات اتوبوس عمومی با توجه به بهبود زمان، حفاظت از محیط زیست، کاهش هزینه پردازش و کاهش ترافیک و با حذف و بهینه سازی ایستگاههای اتوبوس در مسیرهای خاص انجام دادند. شی و همکاران (٢٠١٦) مطالعه ای با هدف به حداقل رساندن زمان انتظار مسافران

راه‌آهن انجام دادند. تمرکز تحقیق آنها در خطوط حلقه شکل بود که چندین شعاع را با یکدیگر متصل می‌کردند. آنها یک تابع دوهدفه با توجه به زمان انتظار در توقف خط همراه با زمان انتظار مربوط به انتقال مسافر با توجه به محدودیت‌ها مانند کل زمان سفر، زمان خروج، دور نگه داشتن، زمان ورود و زمان توقف طراحی نمودند. به دلیل غیرخطی و غیرمحدب بودن از الگوریتم ژنتیک استفاده نمودند که نتایج در کاهش زمان انتظار مسافر موثر بود. الیوداری و همکاران (۲۰۱۸) در تحقیقشان به دنبال کم کردن تعداد اتوبوس‌ها، تعداد مسیرها و مجموع مسافت پیموده شده توسط اتوبوس‌ها با استفاده از یک روش مبتنی بر الگوریتم ژنتیکی برای یک ناوگان اتوبوس در یک مساله مسیریابی مدرسه اکور در نیجریه بودند. آنها از الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله مسیریابی اتوبوس مدرسه استفاده نمودند. نتایج آنها نشان می‌دهد که تعداد کمتری از اتوبوس‌ها در حالت استفاده وجود دارد و تعداد مسیرهایی که به‌اتوبوس‌ها اختصاص داده می‌شوند کاهش می‌یابد. گیسلایتس و همکاران (۲۰۱۹) چارچوبی را برای تخصیص اتوبوس به خطوط اتوبوس‌های برنامه‌ریزی شده با هدف کاهش هزینه‌های مربوط به مسافر و هزینه‌های عملیاتی همراه با مجموعه‌ای از محدودیت‌های عملیاتی ایجاد نمودند. آنها این مسئله بهینه سازی مقید را با استفاده از نقاط جریمه بیرونی به مسئله بهینه سازی نامقید تقریب می‌زنند و سپس با الگوریتم ژنتیک آنرا حل می‌کنند. نتایج تجزیه و تحلیل حساسیت آنها نشان داد که پتانسیل کاهش قابل توجه در زمان انتظار مسافر و هزینه‌های عملیاتی با اضافه کردن تنها با اضافه کردن چند گزینه چرخش کوتاه و میانجی وجود دارد. با توجه به پیشینه و خلاصه توابع هدف و محدودیت‌ها که در جداول ۱ و ۲ آورده‌شده‌است، مشاهده می‌شود اکثر تحقیقات مانند تحقیقات فخرزاد (۱۳۸۱)، ترابی میرآبادی و سالاری (۱۳۹۲) نومن و همکاران (۲۰۱۱)، سان و همکاران (۲۰۱۵)، افندی‌زاده و همکاران (۲۰۱۲)، مینگ و همکاران (۲۰۱۳)، شفاهی و خانی (۱۳۸۸)، صفارزاده و مظلوم(۱۳۹٤)، چگینی و صفارزاده (۱۳۹۱)، چن (۲۰۱٤)، چن و یاوو (۲۰۱۵ با هدف‌های مانند کمینه‌سازی هزینه‌ها و کمینه‌سازی زمان انتظار مسافران انجام شده‌اند. در حالیکه مدل تحقیق حاضر با هدف حداقل کردن تعداد وسیله نقلیه بکار گرفته شده‌است. همچنین با توجه به جدول ۲ می‌توان گفت که مدل توانایی برآورده ساختن تقاضا که در تحقیقات فخرزاد (۱۳۸۱)، ترابی میرآبادی و سالاری (۱۳۹۲) اشاره شده را با استفاده از محدودیت های مربوط به پوشش تقاضا را دارد. همچنین محدودیت مینیمم زمان انتظار که در تحقیقات شفاهی و خانی (۱۳۸۸)، صفارزاده و مظلوم (۱۳۹٤) آورده شده‌است را مدل تحقیق حاضر نیز با توانایی در نظر گرفتن دو سر فاصله زمانی حداقل و حداکثر، در جهت ایجاد رضایت از انتظار مسافر و کاهش تزاحم را با لحاظ کردن محدودیت‌های مربوط به حداقل تواتر مجاز و حداکثر تواتر عملی دارد. علاوه بر این تحقیق حاضر توانسته‌است استراتژی برگشت کوتاه و استراتژی برگشت بدون مسافر را با استفاده از محدودیت تعادل رفت و برگشت ایجاد کند. همچنین امکان ملاحظات سیاسی در واگذاری یا عدم واگذاری وسیله ای خاص به یک خط را با لحاظ کردن محدودیت مربوطه دارد که این ویژگی‌ها در تحقیقات قبلی از جمله تحقیق نومن و همکارانش در سال (۲۰۱۱)، مینگ و همکاران در سال (۲۰۱۳)، شو و همکاران (۲۰۱۵) و صفارزاده و مظلوم (۱۳۹٤) مشاهده نشده‌است لذا یکی از جنبه‌های نوآوری تحقیق حاضر محقق ساختن استراتژی برگشت کوتاه و استراتژی برگشت بدون مسافر است.

۳- روش تحقیق

به‌منظور تجزیه‌وتحلیل داده‌های مسئله، پس از بررسی پیشینه تحقیقات انجام‌گرفته، اقدام به مدل‌سازی گردید. مدل ارائه‌شده در این پژوهش از منظر طبقه بندی مدل‌های ریاضی، از منظر رفتار توابع از نوع خطی می‌باشد که خصوصیت بارز این نوع مدل‌ها خطی بودن توابع معرف هدف و قیود، می‌باشد، از منظر رفتار متغیرها و پارامترها در مدل از نوع قطعی و از منظر رفتار متغیرها در جواب بهینه از نوع عدد صحیح است. در این بخش ابتدا مورد مطالعه بصورت اجمالی معرفی می‌شود سپس طراحی مدل پیشنهادی که یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی است ارایه می‌گردد.

جدول ۱. فهرست محدودیت‌های تحقیقات پیشین با تاکید بر موضوع تحقیق

محدودیت	مرجع	کاربرد پذیری در این طرح	دلیل
رعایت توالی اتوبوسها	هرناندز و همکاران (۲۰۱۵)، هورا و همکاران (۲۰۱٦)، چن (۲۰۱٤)	میتواند داشته باشد	برنامه ریزی زمانی
ظرفیت مجاز اتوبوسها	گرینتر و همکاران (۲۰۰۵)، سان و همکاران (۲۰۱۵)، افندی‌زاده و همکاران (۲۰۱۲)، مینگ و همکاران (۲۰۱۳)	دارد	توجه به تقاضای مسافران
هزینه محدود	گرینتر و همکاران (۲۰۰۵)، نومن و همکاران (۲۰۱۱)، مینگ و همکاران (۲۰۱۳)	دارد	برنامه ریزی منابع
محدودیت اتوبوسها	گرینتر و همکاران (۲۰۰۵)، نومن و همکاران (۲۰۱۱)	دارد	برنامه ریزی منابع
تخصیص به میزان تقاضا	سان و همکاران (۲۰۱۵)، افندی‌زاده و همکاران (۲۰۱۲)، وی و همکاران (۲۰۱۳)	دارد	برنامه ریزی منابع
محدودیت های مربوط به پوشش تقاضا	فخرزادد (۱۳۸۱)، ترابی میرآبادی و سالاری (۱۳۹۲)	دارد	ضرورت برآورده شدن تقاضا در این پروژه
تعداد ناوگان در دسترس	فخرزاد (۱۳۸۱)، صفارزاده و مظلوم (۱۳۹٤)، چگینی و صفارزاده (۱۳۹۱)	دارد	ضرورت در نظر گرفتن تعداد ناوگان های موجود در مدل به علت محدودیت سازمان و ظرفیت خط
محدودیت مربوط به تعداد اتوبوس کرایه ای	فخرزاد (۱۳۸۱)	می‌تواند داشته باشد	توجه به بودجه در دسترس و اهمیت برآورده کردن تقاضا
تعادل میان اتوبوس اعزامی و برگشتی	فخرزاد (۱۳۸۱)، ترابی میرآبادی و سالاری (۱۳۹۲)	می‌تواند داشته باشد	توجه به یکسان بودن پایانه‌ها برای برخی اتوبوس‌ها
محدودیت‌های مربوط به اندازه ناوگان	فخرزاد (۱۳۸۱)، صفارزاده و مظلوم (۱۳۹٤)، چگینی و صفارزاده (۱۳۹۱)	دارد	توجه به تعداد محدود اتوبوس‌ها
محدودیت مربوط به زمان چرخه	صفارزاده و مظلوم (۱۳۹٤)	می‌تواند داشته باشد	توجه غیر مستقیم به تعداد دستگاه در دسترس و وجود پایانه یکسان برای برخی اتوبوس‌ها
محدودیت مربوط به سر فاصله زمانی	صفارزاده و مظلوم (۱۳۹٤)، چگینی و صفارزاده (۱۳۹۱)، شفاهی و خانی (۱۳۸۸)	می‌تواند داشته باشد	
مینیمم زمان انتظار	صفارزاده و مظلوم (۱۳۹٤)، شفاهی و خانی (۱۳۸۸)	می‌تواند داشته باشد	توجه به استاندارد های رضایت مسافران
محدودیت مربوط به زمان گسیل اتوبوس	صفارزاده و مظلوم(۱۳۹٤)، شفاهی و خانی (۱۳۸۸)	می‌تواند داشته باشد	توجه به برآوردن تقاضا متناسب با توزیع آن
حداکثر ظرفیت مجاز اتوبوس	فخرزاد (۱۳۸۱)، ترابی میرآبادی و سالاری (۱۳۹۲)	دارد	توجه به تناسب عرضه و تقاضا

محدودیت	مرجع	کاربرد پذیری در این طرح	دلیل
محدودیت مربوط به برابری تقاضاهای هر بخش با تقاضای کل	ترابی میرآبادی و سالاری (۱۳۹۲)	می‌تواند داشته باشد	توجه به تناسب مدل با ودنیای واقعی
محدودیت جهت تضمین اینکه تنها در صورتی قسمتی از تقاضای سفر از/به یک ایستگاه مشخص به /از سایر ایستگاه‌ها می‌تواند از طریق یک سرویس انجام بگیردکه این سرویس در آن ایستگاه توقف کند.	ترابی میرآبادی و سالاری (۱۳۹۲)	می‌تواند داشته باشد	توجه به تناسب مدل با دنیای واقعی
محدودیت که تضمین کند هر سرویس فعال تنها یک نقطه پایان و شروع داشته باشد	فخرزاد (۱۳۸۱)، ترابی میرآبادی و سالاری (۱۳۹۲)	می‌تواند داشته باشد	وجود ایستگاه‌های مشخص برای هر خط در پایان و ابتدای کار
محدودیت مربوط به مسیر	ترابی میرآبادی و سالاری (۱۳۹۲)	ندارد	در این پروژه ما بدنبال اصلاح خطوط نیستیم
رابطه مربوط به تأخیر میانگین	نومن و همکاران (۲۰۱۱)	بنظر ندارد	در این پروژه مابدنبال زمانبندی دقیق نیستیم

جدول۲. فهرست توابع هدف تحقیقات پیشین با تاکید بر موضوع تحقیق

تابع هدف	مرجع	کاربرد پذیری در این طرح	دلیل
کمینه سازی انحراف از برنامه زمانی	هرناندز و همکاران (۲۰۱۵)، هورا و همکاران (۲۰۱٦)	کاربرد ندارد	عدم تطابق با طرح
کمینه سازی هزینه‌ها	نومن و همکاران (۲۰۱۱)، سان و همکاران (۲۰۱۵)، افندی‌زاده و همکاران (۲۰۱۲) و مینگ و همکاران (۲۰۱۳)، گینتر و همکاران (۲۰۰۵)	کاربرد دارد	کاهش هزینه
کمینه سازی زمان انتظار مسافران	چن (۲۰۱٤)، چن و یاوو (۲۰۱۵)، افندی‌زاده و همکاران (۲۰۱۲)	میتواند داشته باشد	افزایش رضایت
کمینه سازی تعداد اتوبوسهای درحال حرکت	شوئی و همکاران (۲۰۱۵)	میتواند داشته باشد	کاهش هزینه
کمینه سازی هزینه	فخرزاد (۱۳۸۱)، ترابی میرآبادی و سالاری (۱۳۹۲)	دارد	توجه به رضایت متصدی
کمینه سازی زمان انتظار	شفاهی و خانی (۱۳۸۸)، صفارزاده و مظلوم (۱۳۹٤)، چگینی و صفارزاده (۱۳۹۱)	دارد	توجه به رضایت مسافران
کمینه سازی ظرفیت بلااستفاده	ترابی میرآبادی و سالاری (۱۳۹۲)	دارد	با توجه به متن طرح پژوهشی ارائه شده

۳-۱- مورد مطالعه

مورد مطالعه تحقیق حاضر شبکه اتوبوسرانی مشهد است که اجرای آزمایشی مدل ریاض طراحی شده برای تعیین تعداد بهینه اتوبوس و مینی‌بوس مورد نیاز خطوط اتوبوسرانی شهر مشهد-پایانه آزادی انجام شد. پایانه آزادی در غرب شهر مشهد و حاشیه بلوار وکیل آباد روبروی پارک ملت قرار دارد و با مساحت ۵۰۰۰ متر مربع در منطقه یک اتوبوسرانی واقع شده است. این پایانه، ٤ رئیس خط با ۲۱ خط اتوبوس و یک خط برای مینی‌بوس دارد. از مجموع ۲۱ خط اتوبوس، ۹خط متعلق به اتوبوس‌های بخش سازمانی است و ۱۱ خط هم به اتوبوس‌های بخش خصوصی تعلق دارد. لازم به ذکر است که از خطوط پایانه آزادی هیچ کدام، شبکار نیستند.

۳-۲- روش جمع‌آوری داده‌ها

داده‌ها در دو مرحله از تحقیق جمع‌آوری شد. اول برای ساخت مدل که پس از بررسی پیشینه تحقیق و شناسایی توابع هدف و محدودیت‌های احتمالی، با کمک مصاحبه با دست اندرکاران، کارشناسان و مدیران سازمان اتوبوس‌رانی و خبرگان حمل و نقل عمومی معرفی شده از طرف سازمان مجموعا به تعداد حداکثر ۱۰ نفر حاصل شد. دوم برای پایلوت تست، داده‌های پارامترهای مدل از سامانه‌هایAVL و AFC، سالنامه آماری و کارشناسان سازمان اخذ شد.

٤- طراحی مدل بهینه‌یابی ظرفیت تعداد انواع وسایل حمل و نقل عمومی

برای این منظور ابتدا مفروضات مدل، اندیس‌ها، پارامترها، متغیرهای تصمیم، سپس طراحی مدل ریاضی آورده‌می‌شوند. تابع هدف این مدل با هدف حداقل کردن تعداد وسیله نقلیه بکار گرفته شده با رعایت محدودیت‌های موجود بود که با کمک نرم‌افزار گمز مدل ارائه‌شده حل و با روش‌های تحلیل حساسیت و مقایسه با شرایط واقعی، اعتبارسنجی گردید.

٤-۱-مفروضات مدل

۱) تقاضای ایستگاه‌ها در طول بازه زمانی یکنواخت و ثابت است.
۲) تقاضای پیاده شدن در ایستگاه‌ها از متوسط تقاضای سوار شدن ایستگاه‌های همان خط برآورد می‌شود.
۳) زمان در دسترس بازه‌ها در کلیه خطوط و در کلیه بازه‌ها (d) برابر است.
٤) تعداد وسایل نقلیه مختلف آماده بکار در طول دوره بهره‌برداری ثابت است.
٥) مدت زمان حرکت در خط (t) در دفعات متعدد حرکت در طول بازه زمانی (d) ثابت است.
٦) استراتژی سر فاصله زمانی حداقل و حداکثر (t^{max}, t^{min}) در طول بازه زمانی (d) تغییر نمی‌کند.
۷) وسیله نقلیه در تمامی ایستگاه‌های خط توقف دارد ("استراتژی توقف محدود وجود ندارد").
۸) تعداد وسایل نقلیه در دسترس سازمان برابر تعداد وسایل آماده به کار می‌باشد.
۹) برای هر اتوبوس تخصیص یافته در مدل، راننده‌ای وجود دارد.

٤-۲- اندیس‌ها

اندیس‌های استفاده شده در مدل به شرح جدول ۳ است.

٤-۳- بازه‌های زمانی و انواع روز

برای تعریف انواع بازه های زمانی و نیز انواع روز از تحلیل واریانس و آزمونهای تعقیبی استفاده شد. بدین منظور داده های تقاضای مسافر ٣٦٦ روز کاری به تفکیک هفت روز هفته به سهمیه برابر و همچنین به تفکیک روز تعطیل و غیر تعطیل توسط سازمان در اختیار تیم تحقیق قرار گرفت. تحلیل واریانس اجرا و نتیجه نشاندهنده تفاوت معنادار بین روز جمعه با سایر روزهای هفته بود. همچنین نتایج نشاندهنده تفاوت معنادار بین روز تعطیل با غیرتعطیل بود. همچنین تعداد ۱۲۸ داده مربوط به تقاضای مسافر به تفکیک ١٦ ساعت کاری به سهمیه متناسب ساعات مبنای اجرای تحلیل واریانس قرارگرفت. با توجه به نتایج و همچنین محدودیت لحاظ ساعات متوالی در هر بازه، بازه ها بصورت چهار ساعته از ساعت ابتدایی تا ساعت پایانی تعریف شد.

جدول۳. تعریف اندیسهای مدل پیشنهادی

تعریف	دامنه تغییر مجاز	اندیس
نوع وسیله نقلیه ۱ (اتوبوس) ۲ (مینی بوس)	1,2	i
شماره خط اتوبوس	$1,2,\dots,n$	j
۱(بازه اول زمانی) ۲(بازه دوم زمانی)..... m (بازه m ام زمانی)	$1,2,\dots,m$	k
۱ (روزهای شنبه تا پنج شنبه) ۲ (جمعه) ۳ (روزهای تعطیل غیر جمعه)	1,2,3	z
شماره ایستگاه	$1,2,\dots,L$	l
نوع نیمراه ۱ (نیمراه رفت) ۲ (نیمراه برگشت)	1,2	f

٤-٤- پارامترهای مدل

پارامترهای مدل پیشنهادی به شرح جدول ٤ است. در این جدول در ستون اول تعریف پارامتر و در ستون دوم واحد اندازه‌گیری آن آورده شده است.

جدول٤. پارامترهای مدل پیشنهادی

تعریف	واحد اندازه گیری	پارامتر
ظرفیت قابل استفاده و یا مجاز وسیله نوع i	نفر	a_i
تقاضای سوار شدن مسافر ایستگاه l خط j نیمراه f در بازه kام روز نوع z	نفر	$D_{l\in j,kzf}$
تقاضای پیاده شدن مسافر ایستگاه l خط j نیمراه f در بازه kام روز نوع z	نفر	$D'_{l\in j,kzf}$
زمان در دسترس بازه k ام	دقیقه	d
تعداد وسیله نقلیه نوع i در دسترس (آماده به کار)	دستگاه	s_i
حداکثر فاصله زمانی مجاز رسیدن دو وسیله نقلیه متوالی به یک ایستگاه در خط j در روز نوع z	دقیقه	t_{jz}^{max}
حداقل فاصله زمانی مجاز رسیدن دو وسیله نقلیه متوالی به یک ایستگاه در خط j در روز نوع z	دقیقه	t_{jz}^{min}
مدت زمان حرکت از مبدا تا مقصد بعلاوه زمان جابجایی های مجاز (مثل زمان جابجایی بین مبدا/مقصد با مبدا/ مقصد دیگر به دلیل عدم برگشت وسیله در نیمراه رفت) برای خط j	دقیقه	t_j
حداقل وسیله نوع i در نظرگرفته شده برای خط j در بازه k روز نوع z در نیمراه f	دستگاه	b_{ijkzf}
حداکثر وسیله نوع i در نظرگرفته شده برای خط j در بازه k روز نوع z در نیمراه f	دستگاه	B_{ijkzf}
سطح سرویس: ضریب سرویس تعیین شده با توجه به تقاضای ایستگاه با حداکثر تقاضا بین کلیه ایستگاه‌های هر خط	عددی بین صفر و یک	α

٤-٥- متغیرهای تصمیم

اولین گام برای ساختن یک مدل برنامه‌ریزی خطی تعریف و تدوین متغیرهای تصمیم است. در جدول ٥ متغیرهای تصمیم مساله مورد بررسی آورده شده است.

جدول٥. متغیرهای تصمیم مدل پیشنهادی

متغیر	واحد اندازه گیری	تعریف
x_{ijkzf}	تعداد دستگاه	تعداد وسیله نوع i ام که در بازه k ام روز نوع z به ایستگاه نخست نیمراه نوع f خط j اختصاص می یابد (به کار گرفته می‌شود)
x'_{ijkzf}	تعداد دستگاه	تعداد وسیله نوع i ام که در بازه k ام روز نوع z از ایستگاه نخست نیمراه f خط j حرکت می‌کنند
$M_{l\in j,kzf}$	نفر	تقاضای خالص مسافر ایستگاه l ام از خط j ام نیمراه f ام در بازه k ام در روز نوع z (تعداد مسافر جابجا شده بین ایستگاه l ام و ایستگاه $l+1$ ام از خط j ام نیمراه f ام در بازه k ام در روز نوع z)

٤-٦-فرموله کردن مدل ریاضی

یکی از مهم‌ترین مراحل تحقیق، طراحی مدل ریاضی است که تمام مراحل بعدی پژوهش بر اساس آن انجام می‌شود و اعتبار پاسخهای نهایی بستگی مستقیم به میزان اعتبار مدل ریاضی طراحی شده دارد. تابع هدف و محدودیت‌های مساله به صورت زیر است.

$$Min \quad Z=\sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{m}\sum_{z=1}^{3}\sum_{f=1}^{2} x_{ijkzf} \qquad (١) \qquad (مولف، ١٣٩٨)$$

$$\sum_{i=1}^{2} a_i x'_{ijkzf} \geq \alpha \max_{l\in j} M_{l\in j,kzf} \qquad \forall\, j,z,k,f \qquad (٢) \qquad (مولف، ١٣٩٨)$$

$$M_{l\in j,kzf} = M_{(l-1)\in j,kzf} + D_{l\in j,kzf} - D'_{l\in j,kzf} \qquad \forall\, l,z,k,f \qquad (٣) \qquad (مولف، ١٣٩٨)$$

$$\sum_{j=1}^{n}\sum_{f=1}^{2} x_{ijkzf} \leq s_i \qquad \forall\, i,z,k \qquad (٤) \qquad (مولف، ١٣٩٨)$$

$$\left(\frac{t_j}{d}\right) x'_{ijkzf} - x_{ijkzf} \leq 0 \qquad \forall\, i,j,z,k,f \qquad (٥) \qquad (مولف، ١٣٩٨)$$

$$\frac{d}{\sum_{i=1}^{2} x'_{ijkzf}} \leq t_{jz}^{max} \qquad \forall\, j,z,k,f \qquad (٦) \qquad (مولف، ١٣٩٨)$$

$$\frac{d}{\sum_{i=1}^{2} x'_{ijkzf}} \geq t_{jz}^{min} \qquad \forall\, j,z,k,f \qquad (٧) \qquad (مولف، ١٣٩٨)$$

$$x_{i=i',j=j',zkf} = 0 \qquad \forall\, i,j,z,k,f \qquad (٨) \qquad (مولف، ١٣٩٨)$$

$$x_{ijkz1} = x_{ijkz2} \qquad \forall\, i,j,z,k \qquad (٩) \qquad (مولف، ١٣٩٨)$$

$$x_{ijkzf} \geq b_{ijkzf} \qquad \forall\, i,j,z,k,f \qquad (١٠) \qquad (مولف، ١٣٩٨)$$

$$x_{ijkzf} \leq B_{ijkzf} \qquad \forall\, i,j,z,k,f \qquad (١١) \qquad (مولف، ١٣٩٨)$$

می‌توان رابطه (٦) را به صورت زیر نوشت:

$$\forall j,z,k,f \qquad (۱۲)$$

$$d \le t_{jz}^{max} \sum_{i=1}^{2} x'_{ijkzf}$$

و بطور مشابه از رابطه (۷) داریم:

$$\forall j,z,k,f \qquad (۱۳)$$

$$d \ge t_{jz}^{min} \sum_{i=1}^{2} x'_{ijkzf}$$

٤-۷-شرح محدودیتها و تابع هدف مدل

معادله (۱): مدل با هدف حداقل کردن تعداد وسیله نقلیه بکار گرفته شده، مسئله را حل می‌کند.

معادلات (۲) و (۳): تضمین کننده پوشش حداکثر تقاضای خالص مسافری خطوط اتوبوسرانی با لحاظ ضریب سطح سرویس(α) می‌باشد؛ بدین ترتیب که معادله (۳) تقاضای خالص هر ایستگاه خطوط را در شرایط مختلف بدست می‌آورد (تعداد مسافر جابجا شده بین دو ایستگاه) و (۲) تضمین می‌کند که تعداد وسیله حرکت کرده در نیم راه f خط jباتوجه به ظرفیت مجاز نوع وسیله پوشش دهنده حداکثر تقاضای خالص ایستگاه‌های خط در آن نیم راه (با ضریب سطح سرویس α) باشد.

معادلات (٤) و (٥): بیانگر محدودیت مربوط به تعداد وسایل در دسترس و آماده بکار سازمان اتوبوسرانی می‌باشد. بدین ترتیب که (٥) تعداد وسایل بکار گرفته شده با توجه به تعداد دفعاتی که یک وسیله می‌تواند با توجه به شرایط در آن نیم راه حرکت کند را بدست می‌آورد؛ و (٤) تضمین می‌کند، که تعداد وسایل بکار گرفته شده، از تعداد آماده به کار و در دسترس سازمان اتوبوسرانی بیشتر نشود.

معادلات (٦) و (۷): نشان دهنده محدودیت‌های مربوط به حداقل تواتر مجاز و حداکثر تواتر عملی است؛ بدین ترتیب که (٦) تضمین می‌کند تعداد وسایل حرکت کرده در یک خط به اندازه‌ای باشد که زمان انتظار مسافر در ایستگاه‌های آن خط از مقدار مشخصی بیشتر نشود؛ (۷) بیانگر آن است که تعداد وسایل حرکت کرده، حداکثر به اندازه‌ای باشد که باعث ایجاد ازدحام و تزاحم وسایل برای یکدیگر و ترافیک در مسیر نشود؛ بنابراین محدودیت‌ها، حداقل و حداکثر سرفاصله زمانی حدودا بین ۳ و ۲۰ دقیقه می‌باشد (که این اعداد نیز قابل تغییر و تنظیم هستند).

معادله (۸) : ملاحظه فنی یا سیاسی مربوط به عدم تخصیص نوع وسیله ای خاص (i') به خطی خاص (j') را در نظر می‌گیرد. با توجه به وجود دو نوع وسیله، در صورت نیاز به تعریف اختصاص وسیله نوع خاص (i'') به خط خاص (j'') می‌توان از این محدودیت با در نظر گرفتن وسیله مقابل (i') استفاده کرد.

معادله (۹): ملاحظه سیاسی تعادل میان وسیله اعزامی و برگشتی را اعمال می‌کند و تضمین می‌نماید که تعداد وسیله نوع i ام حرکت کرده از ایستگاه مبدأ با تعداد وسیله از نوع iام حرکت کرده از ایستگاه مقصد، با یکدیگر برابر باشند (به عبارتی دیگر بدین معناست که همان وسیله ای که از مبدأ حرکت کرده است، پس از رسیدن به مقصد باید در نیم راه برگشت به همان مبدأ برگردد).

معادلات (۱۰) و (۱۱): ملاحظات سیاسی مربوط به اختصاص حداقلی یا حداکثری حرکت وسیله نوع i ام در خط j ام را تضمین می‌کند.

۵- تجزیه و تحلیل داده‌ها

در این بخش، با احتساب تمام پارامترهای مساله، مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح پیشنهادی را به کمک نرم افزار گمز، بر روی یک کامپیوتر با پردازشگر Core i3-380M و شش گیگابایت رم اجرا نموده و نتایج در جدول ٦ ارایه می‌گردد. روی کامپیوتر با این مشخصات، زمان اجرا حدود ۱,۵ ثانیه بوده است. تمام اطلاعات و پارامترهای مساله از یک فایل اکسل فراخوانده می‌شوند. لذا برای اجرای مساله در حالتی که تقاضاها تغییر می‌کنند، می‌توان با بروزرسانی فایل اکسل و اجرای مجدد مدل، نتایج را بدست آورد.

جدول۶. جدول نتایج حاصل از حل مدل بصورت تعداد (مجموع رفت و برگشت) اتوبوس

	نوبت کاری	زمان۱				زمان۲				زمان۳				زمان٤			
	روز	روزنوع۱		روزنوع۲		روزنوع۱		روزنوع۲		روزنوع۱		روزنوع۲		روزنوع۱		روزنوع۲	
مقادیر متغیرهای تصمیم		x'_{ijkzf}	x_{ijkzf}	x'_{ijkzf}	x_{ijkzf}	x'_{ijkzf}	x_{ijkzf}	x'_{ijkzf}	x_{ijkzf}	x'_{ijkzf}	x_{ijkzf}	x'_{ijkzf}	x_{ijkzf}	x'_{ijkzf}	x_{ijkzf}	x'_{ijkzf}	x_{ijkzf}
خط ١٤	رفت	١٢	٦	١٠	٦	١٢	٦	١٠	٦	١٢	٦	١٠	٦	١٢	٦	١٠	٦
	برگشت	١٢		١٠		١٢		١٠		١٢		١٠		١٢		١٠	
خط ١٤/١	رفت	١٢	٦	١٠	٦	١٢	٦	١٠	٦	١٢	٦	١٠	٦	١٢	٦	١٠	٦
	برگشت	١٢		١٠		١٢		١٠		١٢		١٠		١٢		١٠	
خط ١٦/١	رفت	١٢	٦	١٠	٦	١٢	٦	١٠	٦	١٢	٦	١٠	٦	١٢	٦	١٠	٦
	برگشت	١٢		١٠		١٢		١٠		١٢		١٠		١٢		١٠	
خط ١٧	رفت	١٢	٤	١٠	٤	١٢	٤	١٠	٤	١٢	٤	١٠	٤	١٢	٤	١٠	٤
	برگشت	١٢		١٠		١٢		١٠		١٢		١٠		١٢		١٠	
خط ١٧/١	رفت	١٢	٤	١٠	٤	١٢	٤	١٠	٤	١٢	٤	١٠	٤	١٢	٤	١٠	٤
	برگشت	١٢		١٠		١٢		١٠		١٢		١٠		١٢		١٠	
خط ١٨	رفت	١٢	٦	١٠	٤	١٢	٦	١٠	٤	١٢	٦	١٠	٤	١٢	٦	١٠	٤
	برگشت	١٢		١٠		١٢		١٠		١٢		١٠		١٢		١٠	
خط ١٨/١	رفت	١٢	٦	١٠	٦	١٢	٦	١٠	٦	١٢	٦	١٠	٦	١٢	٦	١٠	٦
	برگشت	١٢		١٠		١٢		١٠		١٢		١٠		١٢		١٠	
خط ١٩	رفت	١٦	٦	١٢	٦	١٦	٦	١٢	٦	١٦	٦	١٢	٦	١٦	٦	١٢	٦
	برگشت	١٦		١٢		١٦		١٢		١٦		١٢		١٦		١٢	
خط ٢٠	رفت	١٦	٨	١٠	٦	١٦	٨	١٠	٦	١٦	٨	١٠	٦	١٦	٨	١٠	٦
	برگشت	١٦		١٠		١٦		١٠		١٦		١٠		١٦		١٠	
خط ٣١	رفت	١٦	٦	١٠	٤	١٦	٦	١٠	٤	١٦	٦	١٠	٤	١٦	٦	١٠	٤
	برگشت	١٦		١٠		١٦		١٠		١٦		١٠		١٦		١٠	
خط ٣٨/١	رفت	٣٠	١٢	١٦	٦	٣٠	١٢	١٦	٦	٣٠	١٢	١٦	٦	٣٠	١٢	١٦	٦
	برگشت	٣٠		١٦		٣٠		١٦		٣٠		١٦		٣٠		١٦	
خط ٦٢	رفت	٢٤	١٢	١٢	٦	٢٤	١٢	١٢	٦	٢٤	١٢	١٢	٦	٢٤	١٢	١٢	٦
	برگشت	٢٤		١٢		٢٤		١٢		٢٤		١٢		٢٤		١٢	
خط ٨٨	رفت	٢٤	١٠	١٦	٨	٢٤	١٠	١٦	٨	٢٤	١٠	١٦	٨	٢٤	١٠	١٦	٨
	برگشت	٢٤		١٦		٢٤		١٦		٢٤		١٦		٢٤		١٦	
خط ٩٤	رفت	٢٤	٦	٢٤	٦	٢٤	٦	٢٤	٦	٢٤	٦	٢٤	٦	٢٤	٦	٢٤	٦
	برگشت	٢٤		٢٤		٢٤		٢٤		٢٤		٢٤		٢٤		٢٤	
خط ٩٤/١	رفت	٢٠	٨	١٥	٦	٢٠	٨	١٥	٦	٢٠	٨	١٥	٦	٢٠	٨	١٥	٦
	برگشت	٢٠		١٥		٢٠		١٥		٢٠		١٥		٢٠		١٥	

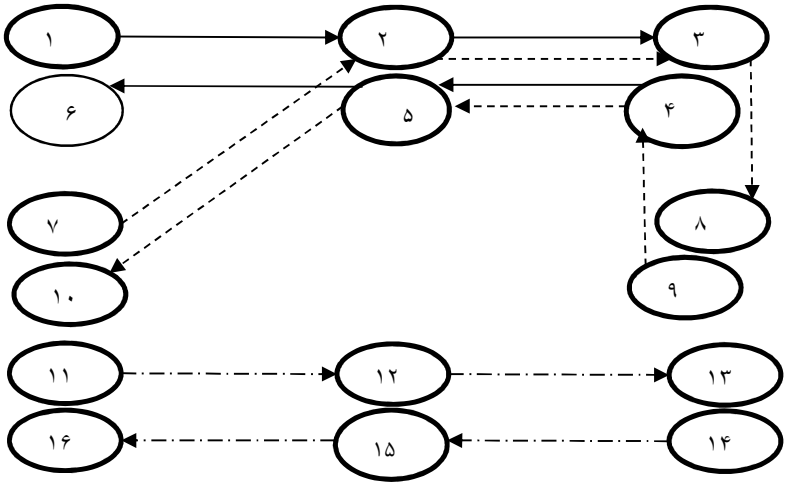
	نوبت کاری	زمان۱				زمان۲				زمان۳				زمان٤			
	روز	روزنوع۱		روزنوع۲		روزنوع۱		روزنوع۲		روزنوع۱		روزنوع۲		روزنوع۱		روزنوع۲	
مقادیر متغیرهای تصمیم		x'_{ijkzf}	x_{ijkzf}	x'_{ijkzf}	x_{ijkzf}	x'_{ijkzf}	x_{ijkzf}	x'_{ijkzf}	x_{ijkzf}	x'_{ijkzf}	x_{ijkzf}	x'_{ijkzf}	x_{ijkzf}	x'_{ijkzf}	x_{ijkzf}	x'_{ijkzf}	x_{ijkzf}
خط ۹۶	رفت	۲۰	٦	۱۰	٤	۲۰	٦	۱۰	٤	۲۰	٦	۱۰	٤	۲۰	٦	۱۰	٤
	برگشت	۲۰		۱۰		۲۰		۱۰		۲۰		۱۰		۲۰		۱۰	
خط ۹۷	رفت	۱۲	٤	۱۰	٤	۱۲	٤	۱۰	٤	۱۲	٤	۱۰	٤	۱۲	٤	۱۰	٤
	برگشت	۱۲		۱۰		۱۲		۱۰		۱۲		۱۰		۱۲		۱۰	
خط ۹۸/۱	رفت	۳۰	۸	۱٦	٤	۳۰	۸	۱٦	٤	۳۰	۸	۱٦	٤	۳۰	۸	۱٦	٤
	برگشت	۳۰		۱٦		۳۰		۱٦		۳۰		۱٦		۳۰		۱٦	
خط۱۰۰	رفت	۱٦	۸	۱۲	٦	۱٦	۸	۱۲	٦	۱٦	۸	۱۲	٦	۱٦	۸	۱۲	٦
	برگشت	۱٦		۱۲		۱٦		۱۲		۱٦		۱۲		۱٦		۱۲	
خط ۲۰۳	رفت	۱٦	٦	۱۲	٤	۱٦	٦	۱۲	٤	۱٦	٦	۱۲	٤	۱٦	٦	۱۲	٤
	برگشت	۱٦		۱۲		۱٦		۱۲		۱٦		۱۲		۱٦		۱۲	
خط ۱۰۹۳	رفت	۱۲	٤	۱۲	٤	۱۲	٤	۱۲	٤	۱۲	٤	۱۲	٤	۱۲	٤	۱۲	٤
	برگشت	۱۲		۱۲		۱۲		۱۲		۱۲		۱۲		۱۲		۱۲	
مجموع		۷۲۰	۱٤۲	۵۱٤	۱۱۰	۷۲۰	۱٤۲	۵۱٤	۱۱۰	۷۲۰	۱٤۲	۵۱٤	۱۱۰	۷۲۰	۱٤۲	۵۱٤	۱۱۰

٦- اعتبارسنجی

در این بخش برای بررسی اولیه مدل و قبل از اجرای آزمایشی اقدام به ارائه چهار مثال برای نشان دادن قابلیت و رفع ایرادات احتمالی گردید. همچنین برای بررسی بیشتر اعتبار مدل از دو روش مقایسه نتایج مدل با وضعیت واقعی و تحلیل حساسیت استفاده شد.

٦-۱- مثال عددی

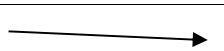
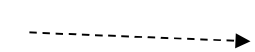
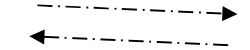
در این بخش برای نشان دادن قابلیت مدل مثال جامع‌تر آورده می‌شود. در این مثال سه خط در نظر گرفته می‌شود که از این بین دو خط اتوبوس و یک خط مینی‌بوس می‌باشد.



شکل۱. نمایش شبکه مثال مشتمل بر سه خط

راهنمای شکل۱ در جدول۷ آورده‌شده‌است.

جدول۷. راهنمای شکل ۱

خط	نیمراه	علامت	ایستگاه ها	نوع وسیله
خط۱	نیمراه رفت		۱-۲-۳	اتوبوس
	نیمراه برگشت		٤-٥-٦	اتوبوس
خط۲	نیمراه رفت		۷-۲-۳-۸	مینی بوس
	نیمراه برگشت		۹-٤-٥-۱۰	مینی بوس
خط۳	نیمراه رفت		۱۱-۱۲-۱۳	اتوبوس
	نیمراه برگشت		١٤-١٥-١٦	اتوبوس

پس از حل مدل، جوابهای بهینه در جداول ۸ و ۹ نمایش داده شده اند. مقدار بهینه تابع هدف ۳۵ است و کران پایین متغیرهای تصمیم (b_{ijkzf}) صفر و کران بالای آنها (B_{ijkzf}) مقدار ۳۰ در نظر گرفته شده است.

جدول ۸ مقادیر x'_{ijkzf} بهینه حاصل از حل مثال

		برگشت						رفت					
		نوع وسیله۱			نوع وسیله۲			نوع وسیله۱			نوع وسیله۲		
k	z	خط۱	خط۲	خط۳	خط۱	خط۲	خط۳	خط۱	خط۲	خط۳	خط۱	خط۲	خط۳
زمان ۱	روز۱	۱۳	۱۲				۱۹	۱۲	۱۲				۲٦
	روز۲	۱۲	۱۲				۱۸	۱۲	۱۲				۱۷
زمان۲	روز۱	۱۳	۱۳				۲٦	۱۳	۱۳				۲٦
	روز۲	۱۲	۱۲				۱۹	۱۲	۱۲				۱۹

جدول ۹. مقادیر x_{ijkzf} بهینه حاصل از حل مثال

		رفت						برگشت					
		نوع وسیله۱			نوع وسیله۲			نوع وسیله۱			نوع وسیله۲		
k	z	خط۱	خط۲	خط۳	خط۱	خط۲	خط۳	خط۱	خط۲	خط۳	خط۱	خط۲	خط۳
زمان ۱	روز۱	۲	۱				۱	۲	۱				۲
	روز۲	۲	۱				۱	۲	۱				۱
زمان۲	روز۱	۲	۱				۲	۲	۱				۲
	روز۲	۲	۱				۱	۲	۱				۱

٦-۲- مقایسه نتایج مدل با وضعیت واقعی

به منظور اعتبارسنجی نتایج حاصل از حل مدل با استفاده از روش اول، در این بخش ابتدا تعداد وسیله نقلیه نوعiام و تعداد حرکت های وسیله نقلیه نوعiام در وضعیت واقعی در جدول ۱۰ آورده‌می‌شود. سپس مقایسه‌ای بین نتایج مدل (جدول ٦) با نتایجی که در وضعیت واقعی گزارش شده، انجام می‌شود.

تعداد وسیله نقلیه نوعiام و تعداد حرکت های وسیله نقلیه نوعiام در وضعیت واقعی (A_{ijkzf} و A'_{ijkzf})

پارامتر A_{ijkzf} نشان دهنده تعداد وسیله نقلیه نوعi ام در بازه زمانی k ام روز نوع z در نیم‌راه نوع f خط j می‌باشد، که در واقعیت بکارگرفته‌شده‌است (یعنی مقدار واقعی x_{ijkzf}). پارامتر A'_{ijkzf} (مقدار واقعی x'_{ijkzf}) مربوط به تعداد حرکت‌های واقعی وسیله نقیله نوع i ام که در بازه k ام روز نوع z از ایستگاه نخست نیم‌راه f خط j است. پارامترهای A_{ijkzf} و A'_{ijkzf} از سامانه AVL اتوبوسرانی قابل استخراج است. اطلاعات به تفکیک خطوطی که در پایانه آزادی وجود دارند، برای روز عادی (۱۳۹٦/۰۸/۲۳) و روز جمعه(۱۳۹٦/۰۸/۲٦) از این سامانه بصورت فایل اکسل استخراج شد. تعداد اتوبوس‌ها در هر بازه زمانی با استفاده از کد اتوبوس بدست آمده است. تعداد حرکت‌های اتوبوس‌ها برای هر بازه زمانی در هر نیم‌راه نیز از همین فایل اکسل قابل استخراج است. تعداد اتوبوس‌ها و تعداد حرکت‌های هر خط در پایانه آزادی به تفکیک بازه زمانی و نیم‌راه رفت و برگشت برای روز عادی و روز جمعه بدست آمده‌است که در جدول ۱۱ نشان داده شده‌است.

به منظور ارائه مقایسات قابل ملموس‌تر خلاصه‌ای از نتایج مقایسات صورت گرفته با وضعیت واقعی در جدول ۱۲ نشان داده شده‌است. ملاحظه می‌گردد که تعداد اتوبوس تخصیص یافته و تعداد حرکت پیشنهادی توسط مدل بسیار کمتر از تعداد اتوبوس و تعداد حرکت آنها در حالت واقعی است.

جدول ۱۱. تعداد حرکت‌های وسیله نقلیه نوع i ام و تعداد وسیله نقلیه نوع i ام بکار گرفته شده در واقعیت

زمان۴				زمان۳				زمان۲				زمان۱				نوبت کاری	
روزنوع۲		روزنوع۱		روزنوع۲		روزنوع۱		روزنوع۲		روزنوع۱		روزنوع۲		روزنوع۱		روز	
A_{ijkzf}	A'_{ijkzf}	A_{ijkzf}	A'_{ijkzf}	A_{ijkzf}	A'_{ijkzf}	A_{ijkzf}	A'_{ijkzf}	A_{ijkzf}	A'_{ijkzf}	A_{ijkzf}	A'_{ijkzf}	A_{ijkzf}	A'_{ijkzf}	A_{ijkzf}	A'_{ijkzf}	مقادیر متغیرهای تصمیم	
۸	۱۳	۶	۸	۷	۱۸	۷	۱۲	۸	۱۲	۶	۱۴	۵	۱۱	۸	۱۴	رفت	خط
	۱۴		۹		۱۷		۱۳		۱۴		۱۳		۱۱		۱۳	برگشت	۱۴
۸	۱۱	۱۳	۱۵	۸	۱۵	۱۱	۲۱	۷	۱۲	۱۱	۱۶	۸	۱۴	۱۱	۱۹	رفت	خط
	۱۳		۱۶		۱۴		۱۸		۱۴		۱۸		۱۳		۱۹	برگشت	۱۴/۱
۸	۱۱	۷	۹	۸	۱۶	۸	۱۴	۷	۱۳	۸	۱۴	۷	۱۳	۹	۱۴	رفت	خط
	۱۱		۱۱		۱۵		۱۶		۱۳		۱۳		۱۰		۱۴	برگشت	۱۶/۱
۶	۱۳	۱۰	۱۶	۵	۱۵	۱۰	۲۲	۶	۱۴	۸	۲۲	۴	۱۰	۸	۲۰	رفت	خط
	۱۴		۲۱		۱۵		۲۱		۱۵		۲۱		۱۰		۲۱	برگشت	۱۷
۶	۱۳	۱۰	۱۷	۶	۱۵	۸	۲۰	۶	۱۶	۷	۱۶	۷	۱۷	۸	۲۰	رفت	خط
	۱۴		۲۰		۱۵		۱۹		۱۸		۱۹		۱۶		۲۱	برگشت	۱۷/۱
۵	۱۰	۹	۱۵	۷	۱۴	۹	۱۹	۶	۱۵	۸	۱۹	۶	۱۲	۸	۱۴	رفت	خط
	۱۰		۱۶		۱۴		۱۹		۱۶		۲۰		۱۳		۱۴	برگشت	۱۸
۸	۹	۱۱	۱۳	۹	۱۴	۱۱	۱۹	۸	۱۶	۱۰	۱۸	۸	۱۴	۱۱	۱۶	رفت	خط
	۱۲		۱۷		۱۵		۱۹		۱۷		۱۸		۱۲		۱۶	برگشت	۱۸/۱
۶	۱۵	۱۰	۲۱	۶	۱۶	۸	۲۰	۶	۱۴	۸	۱۸	۶	۱۳	۹	۱۸	رفت	خط
	۱۲		۱۸		۱۵		۲۰		۱۵		۲۱		۱۳		۲۰	برگشت	۱۹
۸	۱۲	۹	۱۰	۸	۱۵	۹	۱۶	۱۰	۱۵	۹	۱۶	۹	۱۵	۱۰	۱۷	رفت	خط
	۱۲		۱۱		۱۵		۱۶		۱۸		۱۶		۱۴		۱۷	برگشت	۲۰
۶	۱۱	۷.۵	۱۰	۶	۱۴	۶	۱۵	۷	۱۶	۵	۱۲	۶	۱۲	۷	۱۴	رفت	خط
	۱۳		۱۳		۱۵		۱۴		۱۵		۱۳		۱۱		۱۵	برگشت	۳۱
۱۱	۱۸	۱۳	۲۵	۱۱	۲۳	۱۱	۲۵	۱۰	۲۳	۱۵	۲۹	۱۰	۲۳	۱۴	۲۸	رفت	خط
	۱۸		۲۳		۲۲		۲۵		۲۰		۳۱		۲۲		۲۹	برگشت	۳۸/۱
۸	۱۴	۱۳	۱۶	۸	۱۶	۱۰	۲۰	۸	۱۷	۱۲	۲۰	۹	۱۷	۱۳	۲۳	رفت	خط
	۱۴		۱۸		۱۷		۲۰		۱۷		۲۲		۱۴		۲۱	برگشت	۶۲
۶	۱۰	۱۰	۱۴	۸	۱۲	۱۰	۱۸	۸	۱۴	۱۰	۱۸	۷	۱۳	۱۴	۲۳	رفت	خط
	۱۱		۱۶		۱۳		۱۷		۱۲		۱۸		۱۳		۱۹	برگشت	۸۸
۶	۱۹	۸	۲۵	۶	۲۴	۹	۳۱	۶	۲۲	۸	۲۷	۵	۱۶	۱۱	۳۱	رفت	خط
	۱۹		۲۴		۲۴		۳۰		۲۲		۲۷		۱۷		۳۶	برگشت	۹۴
۶	۱۱	۷	۱۴	۶	۱۵	۷	۱۷	۷	۱۳	۷	۱۷	۵	۱۱	۱۰	۲۰	رفت	خط
	۱۱		۱۱		۱۴		۱۶		۱۴		۱۸		۱۱		۲۲	برگشت	۹۴/۱
۷	۲۰	۷	۲۰	۸	۲۲	۸	۲۴	۸	۲۲	۶	۱۶	۸	۱۹	۷	۲۰	رفت	خط
	۲۰		۲۰		۲۲		۲۴		۲۴		۱۶		۲۱		۲۱	برگشت	۹۶
۴	۹	۴	۱۰	۴	۱۴	۴	۱۱	۴	۱۳	۴	۱۲	۵	۱۳	۴	۱۱	رفت	خط

	نوبت کاری	زمان۱				زمان۲				زمان۳				زمان٤			
	روز	روزنوع۱		روزنوع۲		روزنوع۱		روزنوع۲		روزنوع۱		روزنوع۲		روزنوع۱		روزنوع۲	
مقادیر متغیرهای تصمیم		A'_{ijkzf}	A_{ijkzf}	A'_{ijkzf}	A_{ijkzf}	A'_{ijkzf}	A_{ijkzf}	A'_{ijkzf}	A_{ijkzf}	A'_{ijkzf}	A_{ijkzf}	A'_{ijkzf}	A_{ijkzf}	A'_{ijkzf}	A_{ijkzf}	A'_{ijkzf}	A_{ijkzf}
۹۷	برگشت	۱۱		۱۳		۱۲		۱٤		۱۱		۱۳		۱۱		۸	
خط ۹۸/۱	رفت	۲٦	۹	۱٤	۵	۲٦	۹	۱٤	۵	۲۵	۹.۵	۱٦	۵	۲۰	۹.۵	۱۳	۵
	برگشت	۲۷		۱٤		۲٦		۱۵		۲۳		۱۵		۲۰		۱۳	
خط ۱۰۰	رفت	۱۵	۱۰	۱۳	۸	۱۵	۹	۱۱	۷	۱٦	۹	۱٦	۹	۱۱	۸	۱۰	۷
	برگشت	۱۷		۱٦		۱۷		۱۲		۱٦		۱٦		۱۳		۱۲	
خط ۲۰۳	رفت	۲۰	۱۱	۱۳	٦	۲۱	۱۱	۱۵	٦	۲۱	۱۱	۱٤	۷	۱٦	۱۰	۱۲	۷
	برگشت	۲۰		۱۳		۲۱		۱٤		۲۱		۱۵		۱۸		۱٤	
خط ۱۰۹۳	رفت	۱۹	۸	۱۰	٤	۱۸	۸	۱۲	۵	۱۸	۷	۱۲	٤	۱۵	۷	۱۰	٤
	برگشت	۲۰		۱۰		۲۰		۱۲		۱۸		۱۲		۱٤		۱۰	
مجموع		۸۱۵	۲۰۰	۵۸۰	۱۳۸	۷۸٤	۱۷۹	٦۵۰	۱٤۵	۸۰۰	۱۸۳	٦٦۹	۱٤٦	٦٦۰	۱۹۰	۵۳۹	۱٤۰

٦-۳- تحلیل حساسیت

در این بخش، برای بررسی بیشتر اعتبار مدل، برخی از پارامترهای مدل را تغییر داده و اثر این تغییر بر جواب بهینه بررسی می‌گردد. ابتدا برای مقادیر مختلف پارامتر سطح سرویس (α) مساله را حل شده‌است. نتایج این تحلیل حساسیت در جدول ۱۳ خلاصه گردیده است.

جدول ۱۲. خلاصه‌ای از مقایسه نتایج حاصل از حل مدل با واقعیت

	مجموع دو روز		روز عادی		روز جمعه	
	(تعداد اتوبوس) x_{ijkzf}	(تعداد حرکت) x'_{ijkzf}	(تعداد اتوبوس) x_{ijkzf}	(تعداد حرکت) x'_{ijkzf}	(تعداد اتوبوس) x_{ijkzf}	(تعداد حرکت) x'_{ijkzf}
مقادیر حاصل از مدل	۱۰۰۸	٤۹۳٦	۵٦۸	۲۸۸۰	٤٤۰	۲۰۵٦
مقادیر واقعی	۱۳۲۱	۵۴۹۷	۷۵۲	۳۰۵۹	۵٦۹	۲۴۳۸
تفاضل واقعیت از مدل	۲۹٤	۵٦۱	۱۸٤	۱۷۹	۱۲۹	۳۸۲
درصد بهبود	۲۴٪	۱۰٪	۲۴٪	۶٪	٪۲۳	۱۶٪
نسبت مقادیر واقعی به مقادیر حاصل از مدل	۱/۳۱	۱/۱۱	۱/۳۲	۱/۰٦	۱/۲۹	۱/۱۸

جدول ۱۳. تحلیل حساسیت نسبت به سطح سرویس

سطح سرویس (α)	مقدار تابع هدف
۰/۱	۱۰٤۸
۰/۲	۱۰٤۸
۰/۳	۱۰٤۸
۰/٤	۱۰٤۸
۰/۵	۱۰٤۸
۰/٦	۱۰٤۸
۰/۷	۱۰٤۸
۰/۸	۱۰٤۹
۰/۹	۱۰٤۹
۱	۱۰٤۹

مطابق جدول ۱۳ ملاحظه می‌گردد، تا زمانی که سطح سرویس ۷۰ درصد حداکثر تقاضای خالص است، مقدار تابع هدف (که مبین مجموع وسایل نقلیه تخصیص یافته به هر تمام خطوط در تمام روزها و بازه‌ها و نیز در هر دو مسیر رفت و برگشت است) برابر ۱۰٤۸ است. در صورتی که سطح سرویس به بیش از ۷۰ درصدافزایش یابد، این تعداد با افزایش یک واحدی به عدد ۱۰٤۹ می‌رسد. این تغییر اندک در تعداد حرکت نشاندهنده آن است مدل نسبت به تابع تقاضا حساسیت ناچیزی دارد. این بدین علت است که این محدودیت، محدودیت موثری نبوده و تعیین تعداد وسایل و حرکت‌ها تحت تاثیر محدودیت سرفاصله زمانی حداکثری می باشد. جدول ١٤ گویای تحلیل فوق با تغییر سرفاصله زمانی حداکثری به مقادیر کمتر یا بیشتر و نتیجه این تغییر بر تعداد وسایل و حرکات و متعاقبا تابع هدف می‌باشد. ابتدا فرض کنید تمام پارامترهای مدل در سطح مقادیر پیش‌فرض باشند و اقدام به تغییر مقادیر t_{jz}^{min} نماییم. در این‌صورت اثر تغییرات داده شده بر مقدار تابع هدف بصورت جدول ١٤ می‌باشد.

جدول ١٤. تحلیل حساسیت سرفاصله زمانی حداقلی

مقدار تابع هدف	Δt_{jz}^{min}
۱۰٤۸	۰
۱۰٤۸	۱
۱۰٤۸	۲
نشدنی	۲/۱
۱۰٤۸	-۱
۱۰٤۸	-۳
۱۰٤۸	-۵

مطابق جدول ١٤ ملاحظه می‌گردد که با اضافه نمودن Δt_{jz}^{min} به مقادیر اولیه t_{jz}^{min} مقادیر تابع هدف چه تغییری دارند. در مجموع می‌توان این‌گونه اظهار نظر نمود که با افزودن بیشتر از ۲ دقیقه به مقادیر t_{jz}^{min} ، به دلیل بیشتر شدن مقادیر t_{jz}^{min} از t_{jz}^{max} مساله غیر موجه می‌گردد و در بقیه موارد، تغییر پارامتر t_{jz}^{min} اثری بر مقدار تابع هدف ندارد. اکنون اثر تغییر در پارامتر t_{jz}^{max} را بر مقدارد تابع هدف، مورد ارزیابی قرار می‌دهیم. برای مشاهده جزییات تغییر، جدول ۱۵ را ملاحظه فرمایید.

جدول ۱۵. تحلیل حساسیت سرفاصله زمانی حداکثری

مقدار تابع هدف	Δt_{jz}^{max}	مقدار تابع هدف	Δt_{jz}^{max}
۳۷٤	٤۹	۱۰٤۸	۰
۳٦۲	۵۰	۱۰٤۸	۱
۳٦۲	۵۱	۱۰۱٦	۲
۳٦۲	٦۰	۸۸۸	۵
۳٦۲	۱۰۰	۷٦۰	۱۰
۱۲۳۲	-۱	٦۰۳	۲۰
۱۳۰٤	-۲	۳۹۸	٤۰
نشدنی	-۲/۱	۳۷٤	٤۵
		۳۷٤	٤۸

طبق جدول ۱۵ ملاحظه می‌گردد که با کاهش سرفاصله زمانی حداکثری، قاعدتا تعداد وسایل و حرکت‌های بیشتری نیاز است که مطابق جدول ۱۵ ملاحظه می‌گردد که مدل نیز افزایش مقدار تابع هدف را نشان می‌دهد. از سوی دیگر با کاهش ۲/۱ دقیقه ای در سر فاصله زمانی حداکثری، مساله نشدنی می‌گردد که این به دلیل کمتر شدن مقدار سرفاصله حداکثری از سرفاصله حداقلی است. از سوی دیگر، با افزایش سرفاصله حداکثری، بصورت معقول، مقدار تابع هدف کاهش می‌یابد که به معنای کمتر شدن تعداد وسایل مورد نیاز و به تبع، کاهش تعداد حرکت‌ها است. اما با افزودن مقادیری بیشتر از مقدار

$\Delta t_{jz}^{max} = 50$ به t_{jz}^{max} ملاحظه می‌گردد که قید مربوط به سرفاصله زمانی، زاید گردیده و دیگر اثری بر مقدار تابع هدف (مقدار ۳۶۲) نخواهد داشت. در این مرحله، در صورتی که تقاضا افزایش یابد، قطعا مقادیر بهینه تابع هدف دستخوش تغییر خواهد شد. فرض کنید، مقدار $\Delta t_{jz}^{max} = 100$ به t_{jz}^{max} افزوده گردد که منجر به مقدار تابع هدف ۳۶۲ خواهد شد. حال مقدار t_{jz}^{max} را در همین سطح نگه داشته و مقدار تقاضا را افزایش می‌دهیم. افزودن به تقاضا باعث افزایش مقدار $\overline{M} = \max_{l \in j} M_{l \in j,kzf}$ خواهد شد، لذا تحلیل حساسیت تقاضا را روی $\overline{M}$ انجام می‌دهیم. مطابق جدول ۱۶ فرض کنیم که مقادیر $\overline{M}$ در عددی مانند δ ضرب شده و در واقع δ برابر شوند.

جدول ۱۶. تحلیل حساسیت حداکثر تقاضای خالص

مقدار تابع هدف	δ
۳۶۲	۱
۳۹۴	۱/۵
۴۳۲	۲
۴۴۲	۲/۱
نشدنی	۲/۲

مطابق جدول ۱۶ ملاحظه می‌گردد که با افزایش سطح حداکثر تقاضای خالص سوار شدن، مقدار تابع هدف افزایش می‌یابد که کاملا منطقی به نظر می‌رسد. با افزایش این مقدار تا حدود ۲/۲ برابر شدن حداکثر تقاضای سوار شدن، دیگر مساله نشدنی می‌شود. در مجموع با توجه به نتایج اجرای مدل در یک مورد مطالعه واقعی و نتایج تحلیل حساسیت مدل، بررسی رفتار متغیرها و تابع هدف، نشاندهنده رفتار صحیح مدل طراحی شده‌می‌باشد.

۷- نتیجه‌گیری

هدف اصلی تحقیق پیش رو، برآورد دقیق و بهینه تعداد وسیله و تعداد حرکت وسایل به تفکیک هر خط، هر بازه و هر نوع روز می باشد. مدل پیشنهادی تحقیق حاضر، که یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح بود، بصورت آزمایشی روی مجموعه خطوط پایانه آزادی پیاده‌سازی گردید. مدل طراحی شده دارای ویژگی های زیر است:

۱- امکان عدم برگشت وسیله نقلیه اختصاص یافته به نیم راه رفت یک خط، و واگذاری آن به یک خط دیگر را دارد. ۲- سرویس، قطعات پوشش داده شده توسط خطوط مختلف را در نظر گرفته است. ۳- امکان ملاحظات سیاسی در واگذاری یا عدم واگذاری وسیله ای خاص به یک خط را دارد. ۴- علاوه بر تعیین تعداد وسیله نقلیه یک خط، تعداد دفعات حرکت در خط را نیز مشخص می‌کند. ۵- این مسئله مشخص نمی‌کند که در پایان هر بازه و برای شروع کار در بازه بعدی چه تعداد وسیله نقلیه از کدام مقصد به کدام مبدأ بایستی منتقل شود (مدت زمان این انتقال جزئی از t می‌باشد). این کار بایستی با توجه به تفاوت وسیله در دسترس در پایان بازه (k) و وسیله مورد نیاز برای حرکت در ابتدای بازه بعدی $(k+1)$ توسط فرایندهای انسانی انجام شود. ۶- مدل، توانایی در نظر گرفتن دو سر فاصله زمانی حداقل و حداکثر را در جهت ایجاد رضایت از انتظار مسافر و کاهش تزاحم را دارد. ۷- مدل دارای تابع هدف کمینه سازی تعداد وسایل نقلیه بکار رفته است. ۸- با تعریف یک خط به عنوان بخشی از یک خط دیگر و لحاظ محدودیت تعادل رفت و برگشت (معادله ۹) "استراتژی برگشت کوتاه" در مدل قابل تحقق است. ۹- با توجه به تعریف مجزای نیم راه رفت و برگشت (f) برای هر خط، در صورت عدم لحاظ محدودیت تعادل رفت و برگشت در آن خط (محدودیت ۹)، "استراتژی برگشت بدون مسافر" در مدل قابل تحقق است.

در مدل تحقیق حاضر استراتژی برگشت بدون مسافر و استراتژی برگشت کوتاه محقق شده‌است همچنین امکان عدم برگشت وسیله نقلیه اختصاص یافته به نیم راه رفت یک خط، و واگذاری آن به یک خط دیگر و در نظرگرفتن ملاحظات سیاسی در واگذاری یا عدم واگذاری وسیله ای خاص را دارد که این ویژگی‌ها در مدل‌های سایر تحقیقات مانند وی و همکاران در سال (۲۰۱۳)، شو و همکاران (۲۰۱۵) و صفارزاده و مظلوم(۱۳۹۴)، چگینی و صفارزاده (۱۳۹۱)، چن (۲۰۱۴)، چن و یاوو (۲۰۱۵) وجود ندارد لذا یکی از موارد نوآوری تحقیق حاضر داشتن ویژگی‌های مذکور می‌باشد. همچنین مدل تحقیق حاضر سایر ویژگی‌ها از جمله زمان انتظار مسافر در

تحقیق شفاهی و خانی (۱۳۸۸)، صفارزاده و مظلوم (۱۳۹٤)، چگینی و صفارزاده (۱۳۹۱)، چن (۲۰۱٤)، چن و یاوو (۲۰۱۵)، افندی‌زاده و همکاران (۲۰۱۲) اشاره شده است را را با داشتن ویژگی مربوط به توانایی در نظر گرفتن دو سر فاصله زمانی حداقل و حداکثر در جهت رضایت از انتظار مسافر برآورده کرده‌است. همچنین در مدل تحقیق حاضر اگر یک قطعه (راه بین دو ایستگاه) در چند خط مشترک باشد این قطعه توسط خطوط مختلف پشتیبانی می‌شود. همان‌طور که در بخش اعتبارسنجی نیز توضیح داده شد و نیز از نتایج مقایسه پاسخ‌ها مشخص گردید، بین پاسخ‌های بدست آمده از مدل و مقادیر واقعی تعداد اتوبوس‌های تخصیصی در روزهای مورد بررسی تفاوت قابل ملاحظه‌ای وجود دارد به این ترتیب که جواب‌های حاصل از مدل، تعداد اتوبوس‌ها و همچنین تعداد به مراتب کمتری را برای مجموع خطوط پیشنهاد می‌نماید. این یعنی می‌توان با هزینه به مراتب کمتر، تقاضای مسافری خطوط را در ساعات مختلف روز و در روزهای مختلف هفته پوشش داد. قابل مشاهده است که هر چند با مجموع تعداد کمتری وسیله و حرکت می توان تقاضای خطوط را برطرف نمود، در عین حال تعداد حرکت های تخصیص داده شده به برخی خطوط در بازه زمانی چهارم از آنچه در مدل با توجه به کلیه محدودیتها تعیین شده است کمتر است که این نشاندهنده آن است که این تعداد حرکت نمی‌تواند الزاماتی چون تقاضا خط و یا حداکثر سرفاصله زمانی را پوشش دهد، که با بکارگیری نتایج مدل این مشکل نیز مرتفع خواهدشد. علاوه بر مزیتهای فوق (تخصیص نه کمتر و نه بیشتر وسیله به خطوط در روزها و بازه های مختلف) مزیت و کاربرد دیگری که می‌توان برای مدل پیشنهادی بیان کرد، استفاده از مدل در جهت تعیین سیاست‌ها از طریق انجام تحلیل حساسیت روی مدل پیشنهادی است. در واقع با تغییر پارامترهای مدل (نظیر تغییر سطح سرویس، تغییر سرفاصله های زمانی حداکثری و حداقلی و نیز تغییر زمان‌های سفر و یا حتی افزایش یا کاهش تقاضای سوار و پیاده شدن) می‌توان مدل را اجرا و اثر تغییر مورد نظر را در جواب بررسی نمود. قاعدتا هزینه آزمایش و خطا با اجرای مدل ریاضی به مراتب از اجرای آزمایشی سیاست‌ها در دنیای واقعی به مراتب کمتر است. نتیجه این آزمایشات و تحلیل حساسیت‌ها می‌تواند سازمان را در جهت برنامه‌ریزی بهتر خطوط و حتی برنامه‌ریزی نیروی انسانی یاری نماید. به عنوان مثال می‌توان با کاهش دادن تعداد وسایل در دسترس و اجرای مدل برای مقادیر مختلف آن، تا مرز نشدنی بودن مدل، حداقل تعداد اتوبوس و مینی‌بوس لازم برای پاسخگویی به تقاضا را مشخص نمود. جدول ۱۷ انواع تحلیل حساسیت و کاربرد آن را برای سازمان اتوبوسرانی نشان می‌دهد. از دیگر کاربردهای مدل پیشنهادی استفاده از آن در سیستم پشتیبان تصمیم است. در این تحقیق سیستم پشتیبان تصمیم با بهره‌گیری از نرم افزار حلگر گمز به منظور شبیه‌سازی تردد اتوبوس‌های شهری شهر مشهد و ارائه بهترین وضعیت جهت استفاده از پتانسیل خودروهای آماده به کار سازمان اتوبوسرانی شهری طراحی شد. در سیستم پشتیبان تصمیم محاسبات برای دو پارامتر "تعداد خالص وسیله نقلیه اختصاص یافته به خط" و "تعداد حرکت برنامه‌ریزی شده برای خط" مورد بررسی قرار می‌گیرد. بنابراین کاربران این امکان را دارند تا با وارد کردن تقاضای سوار و پیاده شدن مسافرین برای خطوط انتخابی و سایر پارامترهای موردنیاز در سطح شهر تحلیل درستی از تعداد وسیله نقلیه مورد نیاز برای هر خط بدست آورده و نتیجه این تحلیل‌ها را جهت بهبود بخشیدن به سرویس‌دهی اتوبوس توسط این سازمان به صورت مرحله‌ای و در قالب پروژه‌های متعدد ذخیره کنند.

جدول ۱۷. تحلیل حساسیت مدل برای پارامترهای مختلف و کاربرد پیشنهادی آن

ردیف	نوع تحلیل حساسیت	کاربرد احتمالی انجام تحلیل حساسیت
۱	تغییر سطح سرویس	افزایش این پارامتر، در صورتیکه همراه با عدم تغییر در جواب مدل باشد نشان می دهد می توان با همان تعداد وسیله و حرکت سطح بیشتری از تقاضای ایستگاه‌های پر تقاضای خطوط را تامین نمود. همچنین با تغییر این پارامتر می توان مشخص کرد در چه سطح سرویسی می توان تعداد وسیله را مقدار دلخواه رساند.
۲	تغییر سرفاصله‌های زمانی حداکثری	این پارامتر نشاندهنده حداکثر مدت مجاز زمانی بین دو وسیله در یک خط می‌باشد که بیانگر حداکثر زمان انتظار مسافران می‌باشد. کاهش این مقدار نشاندهنده بهبود خدمات به مسافران می‌باشد. کاهش این مقدار در مدل در صورتیکه همراه با عدم تغییر در جواب مدل باشد نشاندهنده بهبود خدمات بدون افزایش هزینه‌ها می‌باشد و در صورت تغییر در جواب نشان می دهد بهبود این خدمت چه تغییراتی را در تعداد وسایل و حرکات ایجاد می‌کند.
۳	تغییر تعداد مسافر سوار و پیاده شده	این تحلیل حساسیت می‌تواند در مورد اینکه تعداد وسایل موجود تا چه مقدار می‌تواند تقاضای افزایش یافته را پشتیبانی نماید کمک نماید. همچنین می توان با تغییر آن که می تواند در نتیجه اصلاح خطوط

		پیشنهادی یا هر دلیل دیگری رخ دهد برآورد تعداد وسایل را انجام داد.
٤	تغییر زمان‌های سفر	تغییر زمان سفر به دلایلی چون اصلاح خطوط و تغییرات ترافیکی رخ می دهد. پس با تغییر این پارامتر نیز می‌توان در مورد اینکه وسایل در دسترس، اعم از مینی‌بوس یا اتوبوس، کفایت می کند و یا نیاز به تغییر تعداد آنها یا تغییر سرعت آنها می‌باشد تصمیم گیری کرد.
٥	تغییر ظرفیت وسایل	می‌توان با تغییر ظرفیت استاندارد وسایل، تاثیر آنرا بر تعداد وسایل موردنیاز بررسی نمود. این می تواند در سیاستگذاری های کلان در شرایطی خاص به عنوان راهکاری جایگزین افزایش تعداد وسایل قرارگیرد. می-توان با حفظ تعداد وسایل دردسترس و کاهش ظرفیت وسایل مشخص نمود تا چه حد می توان اسباب راحتمی مسافر با ایجاد محیطی غیر شلوغ در وسیله فراهم نمود.
٦	تغییر تعداد وسایل در دسترس	تغییر در این پارامتر می تواند با غیرموجه شدن مدل نشاندهنده حداقل تعداد وسایل موردنیاز برای برطرف کردن کلیه محدودیتهای سیستم باشد. درصورتیکه از کلیه وسایل دردسترس برای بدست اوردن نتایج مدل استفاده شده باشد، افزایش آن می تواند نشان دهد می تواند چقدر تقاضای مسافران را با حفظ سایر شرایط مدل پشتیبانی نماید.

در عین حال نتایج این طرح می‌تواند پیش‌نیازهای مطالعات دیگری را برای سازمان فراهم آورد برای مثال در تحقیقات آتی می‌تواند برنامه‌ریزی برآورد رانندگان و زمانبندی حضور آنها (کار، استراحت، اضافه کاری)، تخصیص وسایل به خطوط، بازه ها و زمانبندی‌کاری وسایل، ارزیابی عملکرد خطوط و پایانه های اتوبوس‌رانی با توجه و نتایج واقعی و نتایج محتمل در مدل، ارائه مدلی برای تخمین تقاضای پیاده شدن، پیش‌بینی تقاضای مسافر به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی، طرح‌ریزی اصلاح خطوط، مسیر، ایستگاه، پایانه، طرحریزی برون‌سپاری وسایل سازمان به بخش خصوصی و ارزیابی عملکرد منابع انسانی مورد بررسی قرار گیرند.

٨- سپاسگزاری

از همکاری صادقانه مدیران و کارشناسان مدیریت پژوهشی شهرداری و از مدیران و دست‌اندرکاران سازمان محترم اتوبوسرانی که با سعه صدر پاسخگوی نیازهای اطلاعاتی برای اجرای طرح بودند، تشکر و قدردانی کنند. این مقاله مستخرج از طرح انجام شده توسط دانشگاه فردوسی مشهد به کارفرمایی شهرداری مشهد به شماره کد 101309 می‌باشد.

٩- مراجع

-احدی، م.ر. و اعتمادزاده، س.ر.، (١٣٩١)، "تحلیل ظرفیت خطوط اتوبوسرانی، مطالعه موردی خط ویژه شماره ١ سامانه اتوبوسهای تندرو شهر تهران"، یازدهمین کنفرانس مهندسی حمل و نقل و ترافیک ایران، تهران، سازمان حمل و نقل و ترافیک شهرداری تهران، معاونت حمل و نقل و ترافیک شهرداری تهران.

-افندی زاده، ش. و میرزایی قمی، س. ع. ق.، (١٣٨٥)، "مدل عمومی برآورد تعداد ناوگان مورد نیاز سامانه حمل و نقل همگانی بر اساس شاخص تقاضا (مطالعه موردی: سامانه تاکسی رانی شهر تهران)"، هفتمین کنفرانس مهندسی حمل و نقل و ترافیک ایران، تهران، سازمان حمل و نقل و ترافیک تهران، معاونت حمل و نقل و ترافیک شهرداری تهران.

-ایزدفر، ا. صیدبیگی، ص. و ایزدفر، ن.، (١٣٩٥)، "بررسی راهکار های توانمند سازی خطوط اتوبوس‌رانیBRT شهر اسفهان با استفاده از تحلیل SWOFT"، فصلنامه پژوهش های نوین علوم جغرافیایی معماری و شهرسازی؛ شماره دوم، ص. ١١٥-١٥٦.

-ترابی میرآبادی، م. و سالاری، م.، (١٣٩٢)، "سرویس اتوبوس توقف محدود: راهکاری برای ارتقاء کارایی و سطح خدمت خطوط حملونقل عمومی با تقاضای بالا"، دهمین کنفرانس بین المللی مهندسی صنایع، تهران، انجمن مهندسی صنایع ایران، دانشگاه صنعتی امیر کبیر.

-چگینی، ف.، مصفارزاده، م.، (١٣٩١)، "امیرعلی زرین مهر و علی فغانی، طراحی شبکه اتوبوس رانی با هدف بیشینه سازی رضایت استفاده کنندگان"، دوازدهمین کنفرانس مهندسی حمل و نقل و ترافیک ایران، تهران، سازمان حمل و نقل و ترافیک تهران، معاونت حمل و نقل و ترافیک شهرداری تهران.

–شفاهی، ی. و خانی،ع. ر.، (١٣٩٤)، "زمانبندی هماهنگ خطوط حمل و نقل"، هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، شیراز، دانشگاه شیراز، دانشگاه صنعتی شریف.

–صفارزاده، م. و مظلوم، س. س.، (١٣٩٤)، "ارایه یک پارچه اختصاص ناوگان و زمانبندی شبکه حمل و نقل اتوبوسی تندرو"، مجله علمی–پژوهشی عمران مدرس، دوره پانزدهم، ص.٩٧–١٠٥.

–فخرزاد، م.ب.، (١٣٨١)، "تحلیل و بهینه سازی سیستم حمل و نقل با استفاده از برنامه ریزی عدد صحیح و مدلهای شبکه‌ای برنامه‌ریزی خطی"، دومین کنفرانس ملی مهندسی صنایع، یزد، انجمن مهندسی صنایع ایران، دانشگاه یزد.

–فینی، ا. و حبیبیان، م.، (١٣٨٨)، "ارایه محاسبه شاخص عرضه و تقاضا و تعادل سازی آن‌ها در سیستم های حمل و نقل همگانی"، فصلنامه مطالعات مدیریت ترافیک، شماره ١٢، ص.١٢٣–١٣٦.

–ناصری، ا. و برادران، و.، (١٣٨٩)، "بررسی عوامل موثربرزمان توقف اتوبوسهاه در ایستگاه‌ها و پیش بینی آن درسیستم حمل و نقل اتوبوسرانی شهرتهران، پژوهش‌نامه حمل و نقل، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی.

نواداد، و.، (١٣٨٦)، "ارائه مدل عرضه– تقاضای هوشمند برای نو ناوگان حمل و نقل عمومی ترکیبی (مترو و اتوبوس شهر تبریز)"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب.

–Chen, Q., (2014), "Global optimization for bus line timetable setting problem", Discrete Dynamics in Nature and Society.

–Chen q, Yao j., (2015), "Timetable setting of single bus line using dynamic programming," Proc. Inst. Civ. Eng. Transp., Vol. 168, No. 4, pp. 370–381.

-Gintner, V., Kliewer, N., & Suhl, L., (2005), "Solving large multiple-depot multiple-vehicle-type bus scheduling problems in practice", OR Spectrum, 27(4), pp.507-523.

-Gkiotsalitis, K., Wu., Z., & Cats, O., (2019), "A cost-minimization model for bus fleet allocation featuring the tactical generation of short-turning and interlining options. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 98, pp.14-36.

-Hora J., Dias T.G., Camanho A., (2016), "Improving the Service Level of Bus Transportation Systems: Evaluation and Optimization of Bus Schedules' Robustness. In: Borangiu T., Dragoicea M., Nóvoa H. (eds) Exploring Services Science, IESS 2016. Lecture Notes in Business Information Processing, Vol. 247, Springer, Cham.

-Hernández-Landa L.G., Morales-Marroquín M.L., Nigenda R.S., Ríos-Solís Y.Á., (2015), "Linear Bus Holding Model for Real-Time Traffic Network Control", In: Mujica Mota M., De La Mota I., Guimarans Serrano D. (eds) Applied Simulation and Optimization, Springer, Cham.

-Ming, W. E. I., Bo, S. U. N., & Wenzhou, J. I. N., (2013), "A bi-level programming model for uncertain regional bus scheduling problems", Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 13(4), 106-112.

-Naumann, M., Suhl, L., & Kramkowski, S., (2011), "A stochastic programming approach for robust vehicle scheduling in public bus transport", Procedia-Social and Behavioral Sciences, 20, pp.826-835.

-Sun, D. J., Xu, Y., & Peng, Z. R., (2015), "Timetable optimization for single bus line based on hybrid vehicle size model", Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2(3), pp.179-186.

-Shui, X., Zuo, X., Chen, C., & Smith, A. E., (2015), "A clonal selection algorithm for urban bus vehicle scheduling", Applied Soft Computing, 36, pp.36-44.

-Samuel A. Oluwadare, Iyanu P. Oguntuyi, John C. Nwaiwu., (2018), "Solving School Bus Routing Problem using Genetic Algorithm-based Model", International Journal of Intelligent Systems and Applications(IJISA), Vol.10, No.3, pp.50-58, 2018. DOI: 10.5815/ijisa.2018.03.06.

-Shi, R.J.; Mao, B.H.; Ding, Y. Bai, Y. Chen, Y., (2016), "Timetable optimization of rail transit loop line with transfer coordination", Discret. Dyn. Nat. Soc.

Designing an Optimization Model and Decision Support System to Determine the Capacity of the Number of Vehicles Types of Public Transport of City Bus Lines

Alireza Pooya, Professor, Management Department, Faculty of Economic and Administrative Sciences, Ferdowsi University of Mashhad (FUM), Mashhad, Iran.
Morteza Pakdaman, Assistant Professor, Atmospheric Science and Meteorological Research Center (ASMERC), Climatological Research Institute (CRI), Mashhad, Iran.
Somayeh fadaei, Ph.D., Student, Management Department, Faculty of Economic and Administrative Sciences, Ferdowsi University of Mashhad (FUM), Mashhad, Iran.
Morteza Chaichi Motlagh, M.Sc., Grad., Civil Engineering - Transportation Planning, Islamic Azad University, Science and Research Branch.
Soroush Sadraei, M.Sc., Grad., Transportation Planning, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

E-mail: Alirezapooya@um.ac.ir

Received: July 2021-Accepted: August 2021

ABSTRACT

The bus transport system is one of the most important public transportation systems. Improvement of this system has a significant effect on performance and increase the efficiency of cities' transportation systems and consequently it will have more satisfaction and attraction for passengers. One of the key issues in this field is the optimal allocation in number of vehicles, which is known as the transport timetable. Specifically, allocating each of these devices to each line more than needed will cause excess capacity for that line and conversely, allocation less than needed leads to passenger discontent as a service receiver. Therefore, the main purpose of the research is to estimate the precise and optimal number of vehicles and the number of bus commuting in each line, each time and any kind of day. In this research, mathematical optimization models are used to solve this problem. The proposed model is an integer programming model. Background of the research, interview with the practitioners, bus operating company directors and public transport experts were used for making the model. In order to evaluate the designed model, in addition to solving a few small examples, a pilot experiment was carried out on set of lines of the Azadi terminal of Mashhad Bus Network. The model results were compared with the actual values. The results of the responses obtained from the model showed that with the number of vehicles less than the actual number of buses in the days under investigation, all the constraints of the system, especially demand, are provided.

Keywords: Capacity Planning, Integer Programming, Urban bus lines, Decision Support System