# به‌کارگیری وسایل نقلیه متنوع در شبکه اتوبوس‌رانی شهری و کار آیی آن در بهبود مصرف سوخت

آرش رساءایزدی[1] ، منوچهر وزیری[2]
۱- دانشجوی کارشناسی ارشد برنامه ریزی حمل ونقل دانشگاه صنعتی شریف
۲- استاد دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شریف

## چکیده

حمل ونقل همگانی همواره به‌عنوان یکی از گزینه های دوستدارمحیط زیست شناخته شده است. استفاده بهینه از ناوگان در دسترس و عملکرد کاراتر سیستم های حمل‌ونقل عمومی می تواند نقش حمل و نقل همگانی را در کاهش آلودگی های زیست محیطی، پررنگ تر کند و علاوه بر آن هزینه های گردانندگان سیستم حمل ونقل همگانی را کاهش دهد. در این مطالعه به دنبال استفاده از وسایل نقلیه متفاوت ازنظر ظرفیت و مصرف سوخت در خطوط اتوبوس‌رانی بدون نیاز به توقف در ایستگاه های میانی (اکسپرس باس) هستیم،به طوری که در نهایت منجر به کاهش مصرف سوخت، هزینه های سیستم و صندلی خالی دقیقه برای کل شبکه اتوبوس‌رانی شود. تنوع وسایل نقلیه همگانی شامل اتوبوس دوتایی (دوبل)، اتوبوس عادی، مینی بوس و سواری می شود. کاهش مصرف سوخت در این مطالعه در اولویت قرار دارد و مبنای اصلی در زمان بندی حرکت وسایل نقلیه خواهد بود.درنهایت کاربرد این زمان بندی با ارائه یک مثال بررسی‌شده است. نتایج نشان می دهد که بدون نیاز به توسعه ناوگان و افزایش متوسط زمان انتظار مسافرین، می توان به‌طور قابل ملاحظه ای مصرف سوخت و تعداد صندلی های خالی را کاهش داد.

**کلید واژه:** حمل و نقل همگانی، شبکه اتوبوس رانی، بهبود مصرف سوخت، وسایل نقلیه متنوع

## ۱- مقدمه

امروزه در شهرهای بزرگ و آلوده ی دنیا بخش قابل‌توجهی از مصرف سوخت و تولید آلودگی هوا به بخش حمل و نقل مربوط می شود. افزایش تولید و استفاده از وسایل نقلیه شخصی بر وخامت اوضاع می افزاید. در چنین شرایطی ضرورت وجود یک سیستم حمل و نقل همگانی کارآمد، به‌وضوح احساس می شود، سیستم حمل و نقل همگانی ای که علاوه بر سطح خدمت رسانی و جذابیت بالا برای مسافرین، از نظر کاهش تولید آلودگی هوا و هزینه های اقتصادی هم قابل قبول باشد. مطالعات صورت گرفته اولیه در این زمینه بیشتر روی یکی از موارد افزایش سطح خدمت رسانی و جذابیت برای مسافرین و کاهش تولید آلودگی هوا و هزینه های اقتصادی تأکید کرده اند. باگذشت زمان اهمیت درنظرگیری توأمان این دو مسئله مورد توجه قرار گرفت. سدر[۱]مهم‌ترین عامل مؤثر بر جذابیت حمل و نقل همگانی برای مسافرین را سرفاصله ی زمانی وسایل نقلیه درنظر گرفته است. او در مطالعه خود نشان داد که هرچه متوسط سرفاصله زمانی و پراکندگی سرفاصله های زمانی بیشتر شود، زمان انتظار مسافرین هم بیشتر می شود و درنتیجه استقبال از حمل و نقل همگانی کاهش خواهد یافت. نول[۲] به‌منظور کاهش زمان انتظار مسافرین سیاست های اعزام وسیله نقلیه متفاوتی را بررسی کرده است. او با فرض این‌که نرخ ورود مسافر تابع یکنواختی از زمان است، بهینه ترین برنامه ی زمان بندی وسایل را تعیین کرد. نول نشان داد فراوانی و تعداد مسافرین خدمت داده‌شده با ریشه ی دوم نرخ ورود مسافرین رابطه دارد. اسونا و نول[۳] بهینه ترین زمان بندی را برای تابع های متفاوت نرخ ورود مسافرین پیدا کردند. هوردل[۴] در مطالعات خود با استفاده از ارزش ریالی زمان انتظار مسافرین، درصدد حداقل کردن هزینه ها که شامل هزینه ی انتظار مسافرین و هزینه عملکردی سیستم بود، برآمد. فورث و ویلسون[۵] مدل بیشینه کردن زمان انتظار ذخیره‌شده را پیشنهاد کردند. محدودیت های این مدل شامل محدودیت اندازه ی ناوگان،حداکثر

1- rasaizadi_arash@sharif.edu
2- vaziri@sharif.edu

سرفاصله ی زمانی و حداکثر بودجه ی ریالی می شود. این مدل برای سرفاصله زمانی ثابت و متغیر گسترش داده‌شده است. البرخت[۶] با استفاده از رویکرد دوسطحی برای یافتن شبکه ی زمان مکان و جدول زمان بندی، به دنبال کاهش هزینه های سیستم حمل و نقل بوده است. او این تخصیص را با الگوریتم های شاخه و کرانه و ژنتیک در دو مرحله انجام داده است.

این مطالعات بر مبنای کاهش زمان انتظار مسافرین و هزینه های اقتصادی صورت گرفته اند. مبنای این مقاله زمان بندی حرکت وسایل نقلیه خطوط اتوبوس‌رانی بدون نیاز به توقف در ایستگاه های میانی (حرکت از ایستگاه مبدا به ایستگاه مقصد) بر اساس کاهش زمان انتظار مسافرین و مصرف سوخت (که آلودگی هوا را در پی دارد) قرارگرفته است.

## ۲- تعریف مسئله و اهداف تحقیق

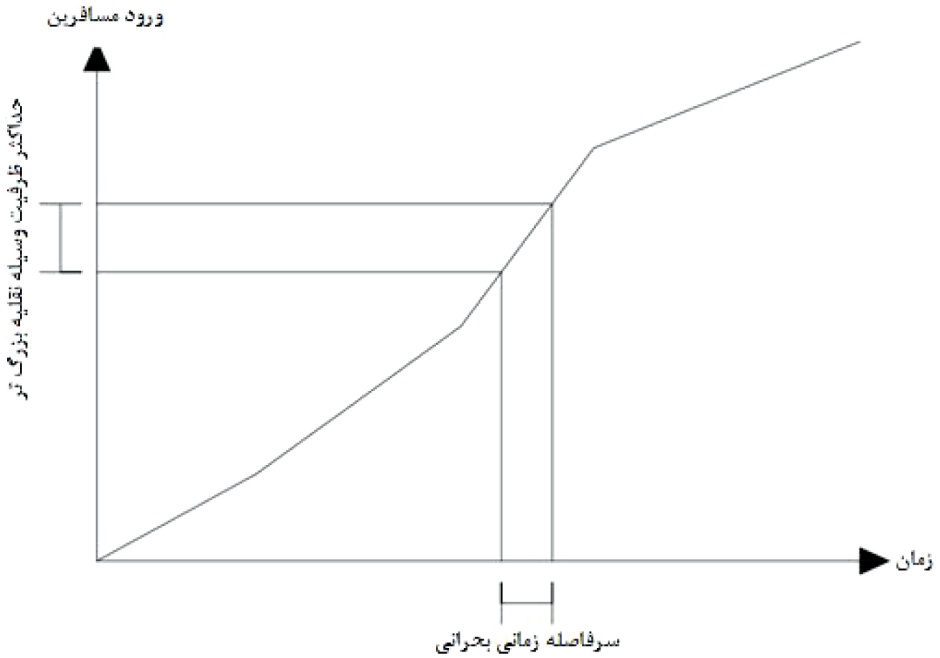
به طور کلی شبکه های اتوبوس‌رانی به دو نوع، با سرفاصله زمانی ثابت و با سرفاصله زمانی متغیر تقسیم‌بندی می شوند. در شبکه های اتوبوس‌رانی با سرفاصله زمانی ثابت ممکن است در برخی ساعات غیر اوج ظرفیت اتوبوس تکمیل نشود و اتوبوس با تعداد زیادی صندلی خالی در مسیر خود حرکت کند و در ساعات اوج تعداد مسافرین بیش از ظرفیت اتوبوس باشد. در شبکه های اتوبوس‌رانی با سرفاصله زمانی متغیر هم ممکن است زمان لازم برای تکمیل ظرفیت اتوبوس از زمان آستانه تحمل مسافرین بیشتر باشد و همین موضوع عاملی برای دور شدن مردم از حمل و نقل همگانی به حمل و نقل شخصی باشد. مزیت حائز اهمیت سرفاصله زمانی ثابت نسبت به سرفاصله متغیر این است که به مسافرین قابلیت برنامه ریزی طبق جدول زمان بندی حرکت وسایل نقلیه را می دهد. اگر مسافرین بدانند وسیله چه زمانی می رسد و چه زمانی حرکت می کند، می توانند خود را قبل از رسیدن وسیله نقلیه به ایستگاه برسانند و زمان کمتری را در انتظار رسیدن وسیله نقلیه سپری کنند. به همین دلیل در این مطالعه برای کاهش زمان انتظار و افزایش جذابیت حمل ونقل همگانی از سرفاصله زمانی ثابت استفاده می شود. برای جلوگیری از ازدحام مسافرین یا وجود صندلی خالی در وسیله نقلیه در طول مسیر سفر، از وسایل نقلیه متنوع ازنظر ظرفیت و مصرف سوخت استفاده می شود. معیار انتخاب وسیله نقلیه برای شبکه مصرف سوخت است.

در ادامه خواهیم دید که استفاده از مینی‌بوس با تعداد مسافر برابر با ۷۵ درصد ظرفیت صندلی ها، سرانه مصرف سوخت، کمتری نسبت به اتوبوس با تعداد مسافر برابر با ۵۰ درصد ظرفیت صندلی ها خواهد داشت. نحوه انتخاب وسیله نقلیه و زمان بندی حرکت وسایل نقلیه و بررسی چگونگی اثرگذاری آن بر مصرف سوخت از مواردی هستند که موردبحث قرار می گیرند.

## ۳- زمان بندی و تخصیص وسایل نقلیه

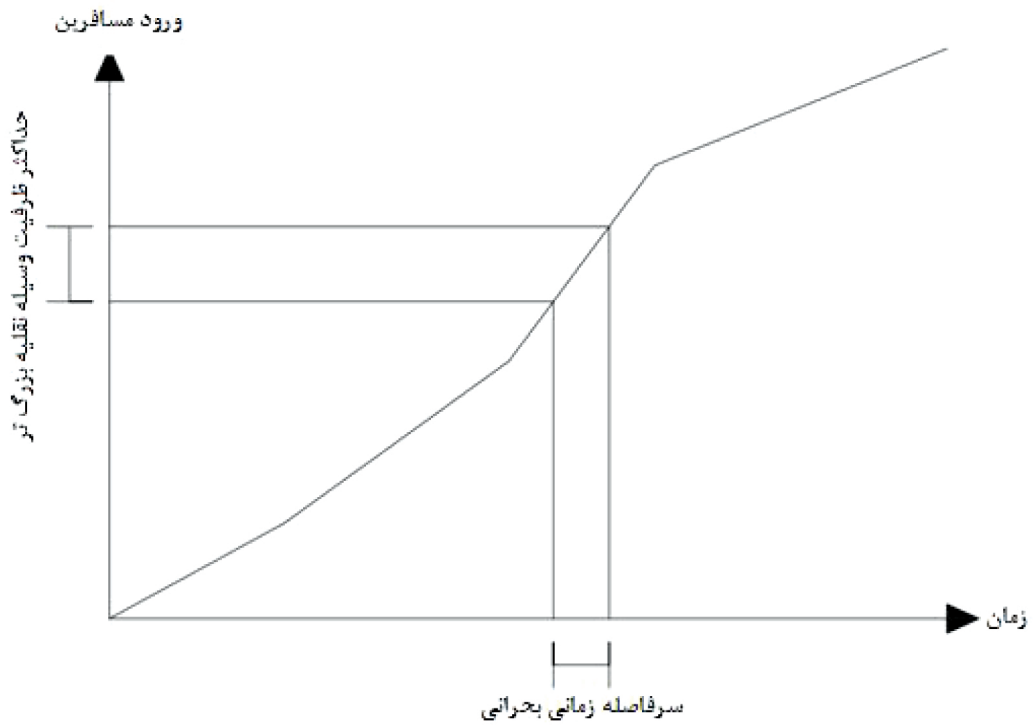
### ۳-۱- تعیین سرفاصله ی زمانی

سرفاصله ی زمانی ثابت با استفاده از تابع نرخ ورود مسافر و حداکثر ظرفیت بزرگ ترین وسیله نقلیه موجود در ناوگان تعیین می شود. اگر منحنی تجمعی نرخ ورود مسافر را برحسب زمان رسم کنیم، در قسمتی از نمودار که بیشترین شیب واقع شده است، به میزان حداکثر ظرفیت بزرگ‌ترین وسیله نقلیه موجود در ناوگان، روی محور نرخ ورود مسافر جدا می کنیم و تصویر این بخش از نمودار را روی محور زمان مشخص می کنیم. این بازه ی زمانی را سرفاصله زمانی بحرانی ($t_{cr}$) می نامیم. اگر سرفاصله ی زمانی از سرفاصله ی زمانی بحرانی بیشتر باشد، در ساعت اوج تعداد مسافری بیش از ظرفیت حداکثر بزرگ‌ترین وسیله نقلیه موجود در ناوگان در ایستگاه جمع می شوند و اگر سرفاصله ی زمانی از سرفاصله ی زمانی بحرانی کمتر باشد، از حداکثر ظرفیت بزرگ‌ترین وسیله موجود در ناوگان استفاده نکردیم و نمی توان گفت بهینه عمل کردیم.




شکل ۱:تعیین سرفاصله زمانی بحرانی با استفاده از منحنی تجمعی نرخ ورود مسافر-زمان

در مواردی که نمودار نرخ ورود مسافرین به‌گونه‌ای باشد که الگوی متفاوتی در برخی بازه های زمانی (مثلاً صبح و عصر) داشته باشد، می وان سرفاصله ی زمانی ثابتی برای هریک از بخش ها تعیین کرد و عملکرد را بهبود بخشید.




شکل ۲:تعیین سرفاصله زمانی بحرانی برای دو بخش مجزا با استفاده از منحنی تجمعی نرخ ورود مسافر-زمان

درنهایت به منظور اطمینان بیشتر از نرسیدن تعداد مسافرین به بیش از حداکثر ظرفیت وسیله نقلیه بزرگ تر در ناوگان، می وان سرفاصله‌ی زمانی بحرانی را به میزان مشخص $t_0$ کاهش داد.

$$h_t = t_{cr} - t_0$$

### ۳-۲- تعیین وسیله ی نقلیه

وسایل نقلیه مدنظر این مقاله شامل اتوبوس دوتایی، اتوبوس عادی، مینی بوس و سواری می شود. از آن جا که سوخت مصرفی این وسایل با هم فرق می کند (بنزین، گازوییل و ...) سوخت مصرفی را به انرژی مصرفی تبدیل می کنیم. همچنین فرض می شود ظرفیت هر وسیله نقلیه برابر با تعداد صندلی های آن وسیله نقلیه است و مسافر را به صورت ایستاده نمی پذیرد. هرچه تعداد مسافرین به ظرفیت وسیله نقلیه نزدیک تر شود، سرانه مصرفی انرژی برای مسافرین کمتر و سفر اقتصادی تر می شود. مصرف انرژی هر وسیله نقلیه تابعی از وزن جابجا شده در آن سفر است. وزن جابجا شده شامل وزن وسیله نقلیه و وزن مسافرین می شود. مصرف انرژی ناشی از وزن وسیله در هر سفر ثابت است و فرض می شود به ازای هر مسافر ۰/۰۱ مگاژول در هر کیلومتر به انرژی مصرفی افزوده شود.

انرژی مصرفی وسیله خالی + (تعداد مسافرین وسیله) ۰/۰۱ = انرژی مصرفی در هر کیلومتر

مشخصات وسایل نقلیه موجود در جدول ۱[۷] آورده شده است:

| نوع وسیله نقلیه | ظرفیت (تعداد صندلی) | انرژی مصرفی وسیله نقلیه خالی (MJ/km) | آلودگی $co_2$ (kg/km) |
|---|---|---|---|
| اتوبوس دوتایی | ۷۴ | ۱۶/۲ | ۱/۹ |
| اتوبوس عادی | ۴۹ | ۱۴/۲ | ۱/۶ |
| مینی بوس | ۲۰ | ۷/۱ | ۰/۸ |
| سواری | ۵ | ۳/۵ | ۰/۳۹ |

جدول ۱: مشخصات وسایل نقلیه

| نوع وسیله نقلیه | تعداد مسافر ۲۰ درصد ظرفیت وسیله | | تعداد مسافر ۵۰ درصد ظرفیت وسیله | | تعداد مسافر ۱۰۰ درصد ظرفیت وسیله | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | سرانه انرژی مصرفی (MJ/ seat-km) | سرانه آلودگی $CO_2$ (g/ seat-km) | سرانه انرژی مصرفی (MJ/ seat-km) | سرانه آلودگی $CO_2$ (g/ seat-km) | سرانه انرژی مصرفی (MJ/ seat-km) | سرانه آلودگی $CO_2$ (g/ seat-km) |
| اتوبوس دوتایی | ۱/۰۹ | ۱۲۸ | ۰/۴۶ | ۵۱ | ۰/۲۳ | ۲۶ |
| اتوبوس عادی | ۱/۵۹ | ۱۶۳ | ۰/۶۱ | ۶۵ | ۰/۳۱ | ۳۳ |
| مینی بوس | ۲/۳۸ | ۲۰۰ | ۰/۸ | ۸۰ | ۰/۳۶ | ۴۰ |
| سواری | ۳/۵۱ | ۳۹۰ | ۱/۴۷ | ۱۵۶ | ۰/۸۸ | ۷۸ |

جدول ۲: سرانه مصرف انرژی برای ظرفیت های متفاوت

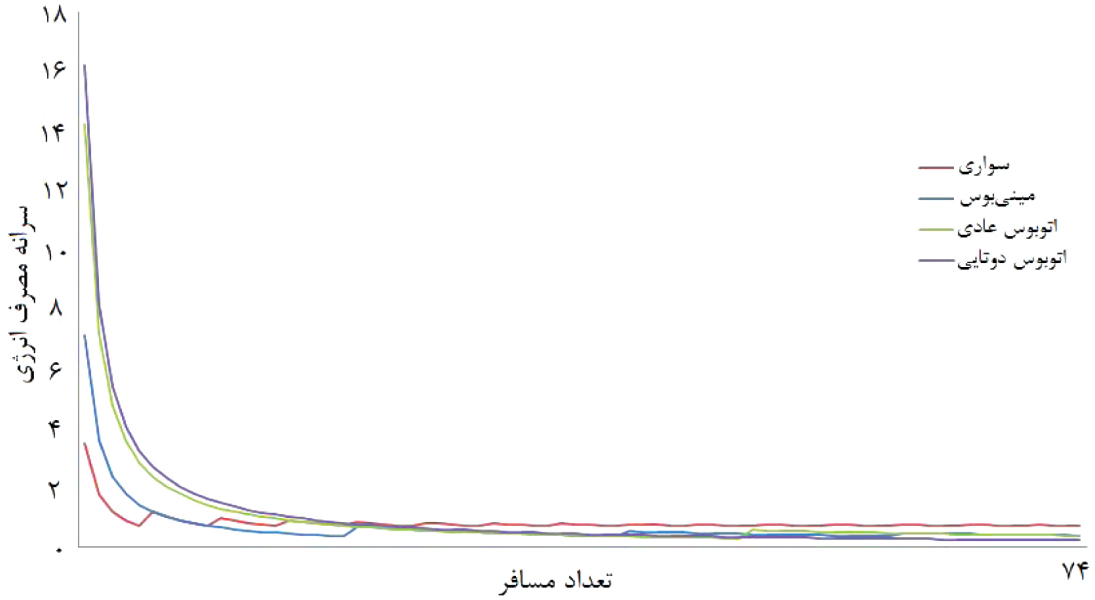
جدول ۲ سرانه مصرف انرژی هر مسافر را بر حسب درصدی از ظرفیت وسیله نقلیه نشان می دهد:

در این مرحله مرز انتخاب بین وسایل را تعیین می کنیم. یعنی به ازای چه تعداد مسافر سرانه مصرف انرژی وسایل نقلیه با هم برابر می شود و نیاز به تغییر وسیله نقلیه داریم؟ به دلیل اینکه سرفاصله زمانی را برمبنای ظرفیت وسیله نقلیه بزرگ تر تعیین کردیم، تعداد مسافرین بیش از ظرفیت این وسیله نخواهد شد. نتایج مرزبندی بین وسایل نقلیه در جدول ۳ نشان داده شده است.

| تعداد مسافر | سرانه مصرف انرژی سواری- (MJ/ seat-km) | سرانه مصرف انرژی مینی بوس- (MJ/ seat-km) | سرانه مصرف انرژی اتوبوس عادی (MJ/ seat-km) | سرانه مصرف انرژی اتوبوس دوتایی (MJ/ seat-km) | وسیله نقلیه انتخاب شده |
|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۳/۵۱ | ۷/۱۱ | ۱۴/۲۱ | ۱۶/۲۱ | یک سواری |
| ۵ | ۰/۷۱ | ۱/۴۳ | ۲/۸۵ | ۳/۲۵ | یک سواری |
| ۶ | ۱/۱۷۶ | ۱/۱۹۳ | ۲/۳۷۶ | ۲/۷۱ | دو سواری |
| ۱۰ | ۰/۷۱ | ۰/۷۲ | ۱/۴۳ | ۱/۶۳ | دو سواری |
| ۱۱ | ۰/۹۶۴ | ۰/۶۵۵ | ۱/۳ | ۱/۴۸۲ | یک مینی بوس |
| ۲۰ | ۰/۷۱ | ۰/۳۶۵ | ۰/۷۲ | ۰/۸۲ | یک مینی بوس |
| ۲۱ | ۰/۸۴۳ | ۰/۶۸۶ | ۰/۶۸۶ | ۰/۷۸۱ | دو مینی بوس یا یک اتوبوس عادی |
| ۴۰ | ۰/۷۱ | ۰/۳۶۵ | ۰/۳۶۵ | ۰/۴۱۵ | دو مینی بوس یا یک اتوبوس عادی |
| ۴۱ | ۰/۷۷۸ | ۰/۵۲۹ | ۰/۳۵۶ | ۰/۴۰۵ | اتوبوس عادی |
| ۴۹ | ۰/۷۲۴ | ۰/۴۴۴ | ۰/۲۹۹ | ۰/۳۴ | اتوبوس عادی |
| ۵۰ | ۰/۷۱ | ۰/۴۳۶ | ۰/۵۷۸ | ۰/۳۳۴ | اتوبوس دوتایی |
| ۷۴ | ۰/۷۱۹ | ۰/۳۹۳ | ۰/۳۸۳ | ۰/۲۲۸ | اتوبوس دوتایی |

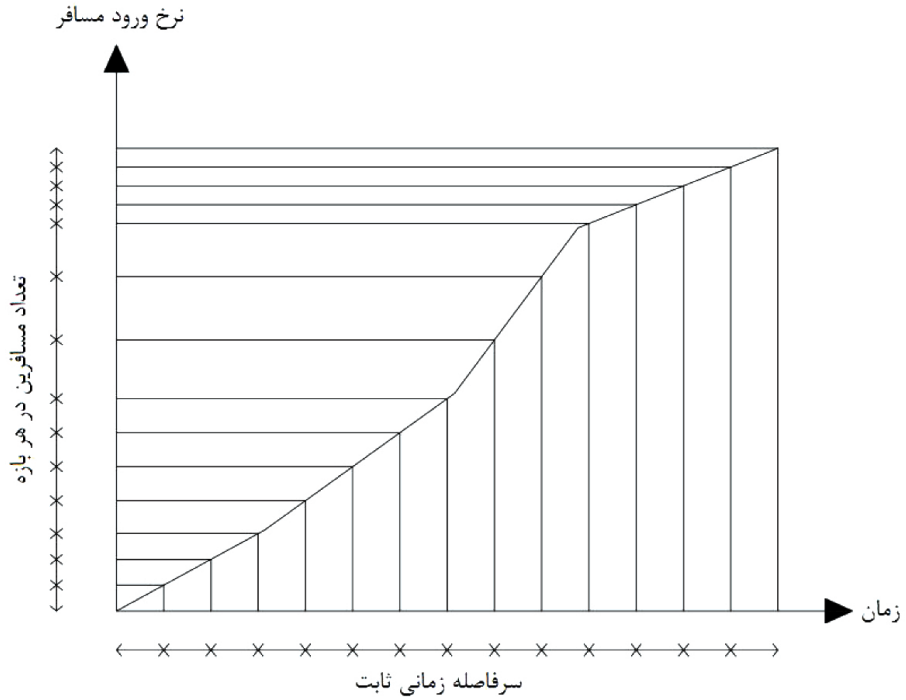
جدول ۳: مرزبندی بین وسایل نقلیه بر اساس سرانه مصرف انرژی

شکل ۳ نمودار مربوط به تعداد مسافر و سرانه مصرف انرژی برای وسایل نقلیه متفاوت را به تصویر می کشد. برای رسیدن به کمترین سرانه مصرف انرژی باید وسیله ای انتخاب شود که نمودار مربوط به آن پایین تر از سایر نمودارها قرار گرفته باشد. در نقاطی که نمودار پایین تر عوض شود وسیله نقلیه نیز عوض خواهد شد.




شکل ۳:نمودار سرانه مصرف انرژی-تعداد مسافر

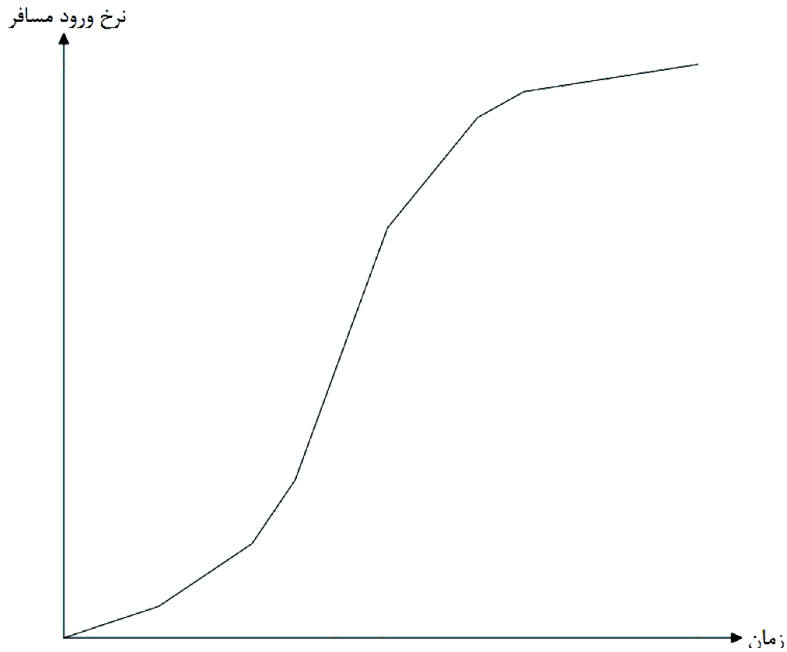
با داشتن نمودار نرخ ورود مسافرین بر حسب زمان و سر فاصله ی زمانی ثابت، تعداد مسافر در هر بازه را مشخص می کنیم. برای این کار محور زمان را به قطعات مساوی برابر با سرفاصله ی زمانی ثابت تقسیم می کنیم و تصویر نمودار را روی محور نرخ ورود مشخص می کنیم. طول هر بازه برابر با تعداد مسافرین خواهد بود. با توجه به جدول ۳ نوع وسیله نقلیه را مشخص می کنیم.




شکل ۴: یافتن تعداد مسافر با توجه به منحنی نرخ ورود مسافرین-زمان

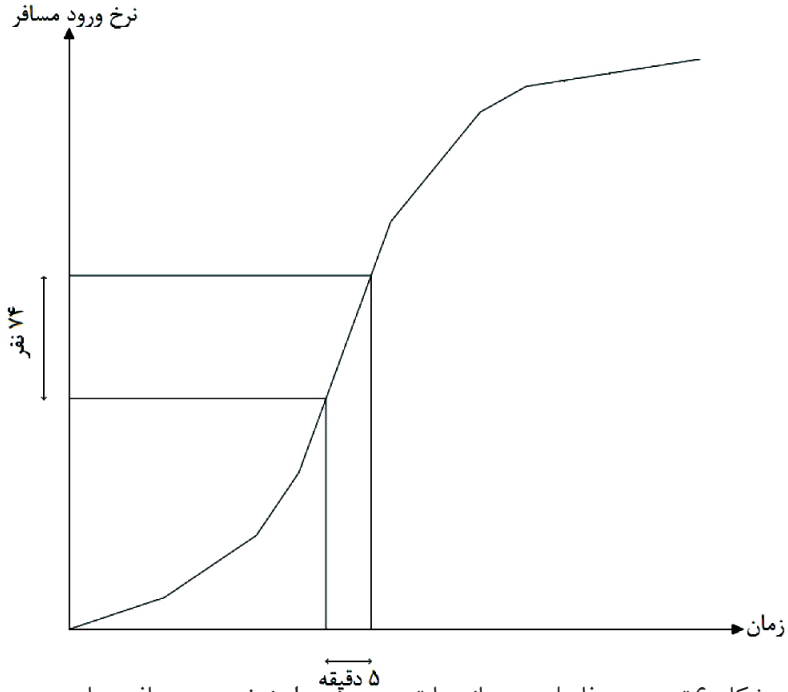
## ۴- مطالعه موردی

برای بررسی نتایج و مشخص شدن میزان کارآیی این روش از یک مثال استفاده می کنیم.
اگر نمودار نرخ ورود مسافر برحسب زمان برای مسیری به صورت شکل ۵ باشد خواهیم داشت:



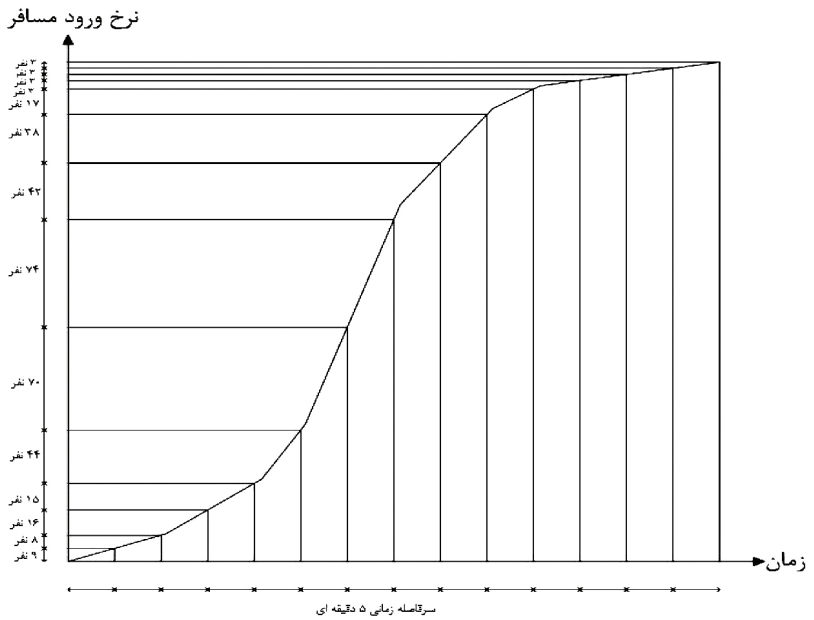

شکل ۵: نمودار نرخ ورود مسافر-زمان

سرفاصله زمانی طبق شکل ۶ تعیین می شود:




شکل ۶:تعیین سرفاصله ی زمانی با توجه به نمودار نرخ ورود مسافر-زمان

و تعداد مسافر در هر بازه زمانی توسط شکل ۷ تعیین می شود:
خلاصه نتایج در جدول ۴




شکل۷:تعیین تعداد مسافر با توجه به نمودار نرخ ورود مسافر-زمان

| زمان | تعداد مسافر | نوع وسیله |
|---|---|---|
| ۵-۰ | ۹ | دو سواری |
| ۱۰-۵ | ۸ | دو سواری |
| ۱۵ -۱۰ | ۱۶ | مینی بوس |
| ۲۰-۱۵ | ۱۵ | مینی بوس |
| ۲۵-۲۰ | ۴۴ | اتوبوس عادی |
| ۳۰-۲۵ | ۷۰ | اتوبوس دوتایی |
| ۳۵-۳۰ | ۷۴ | اتوبوس دوتایی |
| ۴۰-۳۵ | ۴۲ | اتوبوس عادی |
| ۴۵-۴۰ | ۳۸ | دو مینی بوس یا یک اتوبوس عادی |
| ۵۰-۴۵ | ۱۷ | مینی بوس |
| ۵۵-۵۰ | ۳ | سواری |
| ۶۰-۵۵ | ۳ | سواری |
| ۶۵-۶۰ | ۳ | سواری |
| ۷۰-۶۵ | ۳ | سواری |

جدول ۴: خلاصه نتایج مطالعه موردی

## ۵- نتیجه‌گیری

در این نوع تخصیص وسایل نقلیه، برای این مثال۱۲۵/۷۵ مگاژول انرژی برای هر کیلومتر مصرف می شود. اگر به جای این وسایل نقلیه متنوع فقط از اتوبوس دوتایی با سرفاصله زمانی ۵ دقیقه استفاده می کردیم، ۲۲۶/۸ مگاژول انرژی برای هر کیلومتر مصرف می شد، یعنی مصرف انرژی ۱/۸ برابر می شد و با این روش می توان مصرف انرژی را ۴۵ درصد کاهش داد. اگر فقط از اتوبوس معمولی استفاده می کردیم برای پاسخگویی تقاضا در زمان اوج باید سرفاصله زمانی را به ۳ دقیقه و ۲۰ ثانیه کاهش می دادیم. در چنین حالتی مصرف انرژی ۲۹۸/۲ مگاژول انرژی برای هر کیلومتر مصرف می¬شد. مصرف انرژی در این حالت ۴/۳۷ برابر می شد ولی با این روش می توان مصرف انرژی را تا ۹۵ درصد کاهش داد. اگر فقط از مینی بوس استفاده می کردیم، سرفاصله زمانی به ۱ دقیقه و ۲۰ ثانیه کاهش می یافت و مصرف انرژی برابر با ۳۶۷/۸ مگاژول انرژی برای هر کیلومتر یعنی ۲/۹ برابر می رسید ولی با این روش تا ۶۶ درصد مصرف انرژی کاهش می یابد.

اگرچه به نظر می رسد هزینه اولیه خرید وسایل نقلیه متنوع زیاد باشد، اما در دراز مدت با کاهش مصرف انرژی هزینه پرداخت شده جبران شده و در نهایت منافع گردانندگان سیستم حمل و نقل همگانی افزایش می یابد. علاوه بر این مصرف کمتر انرژی برابر با تولید کمتر آلودگی هوا خواهد بود و این روش از نظر زیست محیطی هم موثر و مفید عمل می کند.

## ۶- مراجع


1. Ceder, A., Public transit planning and operation: theory, modelling and practice.Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2007.

2. Newell, G. F., Dispatching policies for a transportation route. Transportation Science, Vol. 5,No. 1, 1971, pp. 91–105.

3. Osuna, E. E. and G. F. Newell, Control strategies for an idealized public transportation system. Transportation Science, Vol. 6, No. 1, 1972, pp. 52–72.

4. Hurdle, V. F., Minimum Cost Schedules for a Public Transportation Route ((I) Theory,(II)Examples). Transportation Science, Vol. 7, 1973, pp. 109–157.

5. Furth, P. G. and N. H. M. Wilson, Setting frequencies on bus routes: Theory and practice. Transportation Research Board, Vol. 818, 1981, pp. 1–7.

6. Albrecht, T., Automated timetable design for demand-oriented service on suburban railways.Public Transport, Vol. 1, No. 1, 2009, pp. 5–20.

7. Hassold, S. and A. Ceder, Public Transport Vehicle Scheduling featuring Multiple Vehicle Types, 2013, submitted to Transportation Research Journal Part B.