مدیریت شهری
شماره ۴۷ تابستان ۹۶
No.47 Summer 2017
۵۲۳-۵۳۰
زمان دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۸/۱۲ زمان پذیرش نهایی: ۱۳۹۶/۲/۱

زمانبندی حرکت اتوبوس های BRT با در نظر گرفتن محدودیت های ترافیکی حاصل از زمان های متغیر چراغ های راهنمایی و رانندگی

حامد طاهرخانی* - کارشناس ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران
آرش طاهریان - کارشناس مهندسی شهرسازی، دانشگاه بین المللی امام خمینی قزوین، قزوین، ایران

چکیده

سامانه اتوبوس تندرو BRT به عنوان راه حلی کارآمد برای سیستم حمل و نقل عمومی در کشورهای توسعه یافته شناخته می شود؛ لذا سعی بر آن است که این سامانه همزمان با گسترش فناوری با ارایه روش ها و سیستم ها پیشرفته، با کیفیت بالا به جابجایی مسافرین در شهرها بپردازد. نتیجه نهایی تمامی توابع هدفی که برای مدل کردن این مساله در نظر گرفته می شوند کاهش انتظار مسافر تا رسیدن اتوبوس و کاهش زمان سفر است، اما در مسیری که اتوبوس طی می کند با موانعی مانند گذر از تقاطع ها و رخدادهای غیرمترقبه ای که می تواند در مسیر حادث شود بر سرعت اتوبوس ها تاثیر می گذارد. در این تحقیق بهینه سازی زمانبندی حرکت اتوبوس ها از مبدا انجام می گیرد و تابع هدف مینیمم کردن زمان انتظار مسافر در ایستگاه و طول زمان سفر است، با لحاظ اینکه حجم تقاضای سفر در ایستگاه ها بسته به زمان های مختلف یک روز کاری متغیر و از توزیع پواسون تبعیت می کند و همچنین زمانی که اتوبوس مسیر بین دو ایستگاه را طی می کند نیز از یک توزیع خاص پیروی می کند. حل مدل با استفاده از نرم افزار GAMS صورت گرفت و با داده های خلاصه شده یک روز کاری مورد سنجش قرار گرفت.

واژگان کلیدی: اتوبوس تندرو، محدودیت ترافیکی، زمانهای متغیر چراغ راهنمایی و رانندگی.

BRT bus schedules and taking into account the limitations of time-varying traffic lights traffic

abstract

Bus System Extremist BRT as a solution efficient system of public transport in developed countries is known, so we tried that this system by development of technology by providing methods and systems for advanced, high-quality to carry passengers in the cities. The end result of all functions aim to model this is considered to be the reduction of waiting passengers to reach the bus and reduce travel time, but in a way that the bus goes through obstacles such as crossing intersections and events unexpected that can in the direction of the bus speed affects occur. In this study, optimization of scheduled bus departures from the source is done and the objective of minimizing the waiting time of passengers at the station and during the journey, taking into account the volume of travel demand in stations, depending on the time of a working day ranging from follows the Poisson distribution as well as when the bus route between two stations can also follow a particular distribution. Model using GAMS software and summarized data were evaluated one business day.

Keywords: Extremist bus, traffic restrictions, traffic lights changing times.

* نویسنده مسئول مکاتبات، شماره تماس: ۰۹۱۲۶۳۵۶۷۸۳؛ رایانامه: taher_886@yahoo.com

[Downloaded from ijurm.imo.org.ir on 2026-11-02]

مقدمه

با توجه به اینکه سامانه سریع اتوبوسرانی در مقایسه با سایر سیستم های مشابه حمل و نقل همگانی، یکی از با صرفه ترین آنها از نظر اقتصادی است؛ لذا می تواند هم از جهت قابلیت بالای خود در رقابت با کیفیت خدمات حمل و نقل همگانی با سیستم های ریلی و همینطور از حیث محدودیت های مالی، به عنوان راهکار مؤثر بخصوص در کشورهای در حال توسعه مطرح شود. همانطور که از عنوان سیستم سریع اتوبوسرانی سریع السیر برمی آید، این سیستم حمل و نقل همگانی به صورت یک سرویس سریع بر پایه اتوبوس استوار است که نسبت به سرویس های معمول اتوبوسرانی با مسیر عبور اختصاصی کامل ، ایستگاه ها و توقفگاه های پیوسته بسیار مشابه سیستم ریلی سبک متمایز یک مد حمل و نقل سریع است که در BRT می گردد. بر مبنای تعریف سازمان حمل و نقل فدرال ؛ سامانه آن کیفیت سیستم حمل و نقل ریلی با انعطاف پذیری سیستم اتوبوسرانی ترکیب شده است.

لذا می توان گفت؛ سیستم اتوبوس سریع، سیستمی کاملا یکپارچه از تسهیلات و خدماتی است که به منظور ارتقاء قابلیت اطمینان و هویت سیستم اتوبوسرانی و البته سرعت (که مهم ترین پارامتر در این تعریف می باشد) طراحی می شود. عملیاتی شدن سیستم های حمل و نقل سریع در این محدودهٔ خدمات، اغلب با سرمایه گذاری نسبتا اندک در مسیرهای تخصیص یافته صورت می گیرد. این شاخص را می توان در چند بعد تعریف می شود. درصورتی که طراحی و بهره برداری از اتوبوس ها: بر روی مسیرهای اختصاصی در سطح زمین، بالاتر.

علاوه بر زیرساخت های فیزیکی ویژگی اصلی دیگر سیستم سریع اتوبوسرانی فعالیت های مربوط به عملیات هستندکه عبارتند از:

۱. سرویس دهی متوالی و سریع بین مبادی و مقاصد اصلی

۲. ظرفیت بالا برای تقاضای مسافر در امتداد کریدور

۳. سوار و پیاده شدن سریع

۴. سیستم اخذ و کنترل کرایه پیش از سوار شدن

۵. یکسانی کرایه بین مسیرهای اصلی و سرویس های فرعی تغذیه کننده

تمامی عملیات فوق ارتباط مستقیم با زمان دارند و برای هر چه کاراتر کردن سیستم BRT باید راه حل هایی برای بهبود عملیات فوق صورت پذیرد. پژوهش ارایه شده چگونگی زمانبندی حرکت اتوبوس ها بگونه ای است که زمان انتظار مسافران را در ایستگاه ها کاهش دهد.

پیشینه تحقیق

عمده ترین پژوهش هایی که بر روی سیستم اتوبوس رانی سریع السیر انجام شده: ۱) مربوط به مسأله طراحی شبکه اتوبوسرانی که هدف آنها تعیین مسیر خطوط اتوبوسرانی و ۲) پیش بینی زمان رسیدن اتوبوس هستند که با تابع هدف های مختلف مورد بررسی قرار گرفته اند. در مساله پیش بینی زمان رسیدن اتوبوس هدف بهینه سازی وضعیت فعلی سیستم موجود است. تابع هدف های عمده ای که مورد مطالعه قرار گرفته اند کمینه کردن زمان انتظار مسافرین در ایستگاه هستند. در تمام پژوهش های پیشین فاصله بین ایستگاه ها یک عدد ثابت در نظر گرفته شده است، درحالی که نرخ ترافیک در ساعت های مختلف روز باعث تغییر زمان چراغ راهنمایی رانندگی می شود و این مساله بر مدت زمانی که یک اتوبوس فاصله بین دو ایستگاه را طی می کند تاثیر دارد. در ادامه به چند نمونه از مهمترین بررسی های صورت گرفته در زمینه زمانبندی حرکت اتوبوس اشاره می شود. «لامپکین و سالمنز» مساله های تعیین مسیر خطوط اتوبوس و اختصاص ناوگان را به صورت دو مساله مجزااز هم مطرح کرده اند و لذا مسائل به مراتب ساده ای را برای طراحی شبکه مورد بررسی قرا رداده اند. هاسلستروم نیز از یک روش دو مرحله ای بهینه سازی استفاده کرد.

[Downloaded from ijurm.imo.org.ir on 2026-11-02]

«کوکیـور و هندریکسـون» نیز مسـاله جامـع خدمات اتوبوسـرانی را ازنقطـه نظرهـای مختلفـی بـا دخیـل کـردن متغیرهایـی چون فاصله مسـیرها، زمـان بندی حرکـت اولیـه و نـرخ کرایـه، در صـورت وجـود و عـدم وجـود محدودیـت بزرگـی وسـیله نقلیه مورد بررسـی قـرار می دهند و سـطوح بهینه این متغیرهـا را در تابع هـدف هـای مختلف مـورد پژوهـش قـرار داده اند.

«تـام و مهـان» بـا تابع هـدف مینیمم کـردن مجموع هزینـه های اسـتفاده کنندگان و گردانندگان سیسـتم BRT مسـئله انتخـاب مسـیر خطـوط اتوبـوس هـا و تخصیـص نـاوگان بـه هر یـک از خطـوط را بـه صورت هـم زمان مـدل و آن را بـا اسـتفاده از الگوریتم ژنتیک حـل کـرده اند.

«جـاو و همـکاران» نیـز مسـئله تخصیـص نـاوگان در یـک شـبکه حمـل ونقـل عمومـی را بـه صـورت یـک مسـئله مجـزا از هـم مـدل و آن را از روش برنامه ریزی دو سـطحی حـل کـرده اند.

«چوانجیـااو و یوانکیـگ» بـا در نظـر گرفتـن حرکـت هـای بـا سـرعت ثابـت، فرکانـس خروجـی یکنواخت و نـرخ ورود مسـافر یکنواخـت بـه سیسـتم را فرموله و با الگوریتـم ژنتیـک حـل کردند.

«ایکسـومی چـان و همـکاران» ، اخیـرا مدلـی جهـت پیـش بینـی زمـان سـفر اتوبـوس هـای BRT را بـا اسـتفاده از ماشـین بـردار پشـتیبان (SVM) اسـتفاده کردنـد و از فیلتـر KALMAN بـرای بهبـود جـواب هـای اولیـه اسـتفاده کردند. وانـگ و همـکاران ، نیز به بررسـی پیـش بینـی زمان سـفر اتوبـوس ها بر اسـاس روش ماشـین بـردار پشـتیبان پرداختنـد.

«خطیبـی و همـکاران»، یک مدل ریاضـی برای کاهش زمان انتظار مسـافران در ایسـتگاه های متقاطع خطوط متـروی تهـران ارائـه کـرده انـد، بطوریکـه تابـع هدف آنهـا، یـک تابع مینیمم سـازی وزن داده شـده با هدف مینیمـم کردن زمان انتظار مسـافران در ایسـتگاه های تقاطعـی بـوده و بـرای هـر یـک از مسـیرها، ضریبی به عنـوان اولویت آن مسـیر بررسـی نموده و نشـان دادند کـه مدل بـه خوبی برآورد شـده اسـت.

در تمامـی ایـن پژوهـش هـا زمانی بـرای تاخیـر هایی کـه ممکن اسـت بـرای اتوبوس در مسـیر کـه از جمله مهمتریـن آنهـا نـرخ متفـاوت زمـان چـراغ راهنمایـی رانندگـی در مسـیر اسـت، لحـاظ نگردیـده اسـت

مدل بندی ریاضی

اگـر شـماره ایسـتگاه را بـا i و اندیـس اتوبـوس را بـا k نشـان دهیم و فرض شـود کـه نرخ ورود مسـافر از یک توزیـع پواسـون با میانیگیـن نرخ تقاضای سـفر تبعیت مـی کنـد و بـاλ_i نشـان مـی دهیـم و زمـان ورود دو اتوبـوس در ایسـتگاه را بـا $h_(k,i$) نمایش می دهیم. و لذا تعداد مسـافران $B_(k,i$) در ایسـتگاه i قبل از ورود اتوبـوس k ازتوزیـع زیـر پیـروی می کند:

$$B_{k,i} \sim P(\lambda_i, h_{k,i}) \quad (۱)$$

اگـر تأخیرهایـی که بـرای حرکت اتوبوس در مسـیر به وجـود آیـد و ناشـی از چـراغ راهنمایی رانندگی باشـد و در ایـن پژوهـش فرض شـود که بین هر دو ایسـتگاه تنهـا یـک چـراغ راهنمایـی بـا چـراغ بـه رنـگ قرمز با نشـانه ایسـت وجـود داشـته باشـد و همچنیـن فـرض می‌شـود محـل ایسـتگاه‌ها تقاطعـی بـا چهارراه‌هایـی کـه چـراغ راهنمایـی و رانندگی آن را کنتـرل می‌کند، ندارنـد. یعنـی حالتـی کـه اتوبـوس در یک‌زمـان و یـک وضعیـت، در پشـت چراغ‌قرمـز و هم در ایسـتگاه مشـغول خدمت‌رسـانی نباشـد. تأخیـر به‌صـورت زیـر بیـان می‌شـود:

c: سیکل را نشان می‌دهد

r: زمان قرمز چراغ را نشان دهد

$$=\frac{c-r}{c}\delta_o(t)+\frac{1}{c}l_{[o,r]}(t)$$

$$f_s(t,r,c) \quad (۲)$$

$\delta_o(t)$ بـرای ۱ اسـت اگـر t=۰ شـود و در غیـر ایـن صـورت برابـر صفـر اسـت، و $l_{[o,r]}$ برابـر ۱ اسـت اگـر $t \in [o,r]$ باشـد و در غیراینصـورت برابـر بـا صفـر است.

[Downloaded from ijurm.imo.org.ir on 2026-11-02]

یـک اتوبـوس در طـول سـفر خودبیـن دو ایسـتگاه متوالـی، می‌توانـد بـه خاطـر علائـم راهنمایـی و رانندگـی و جریـان ترافیـک موجـود در مسـیر دچـار تأخیرهایـی شـود. کاملاً واضح اسـت کـه در زمان‌های اوج ترافیـک سـنگین در چهارراه‌هـا زمـان چراغ‌هـای راهنمایـی و رانندگـی نیز افزایـش می‌یابد. لـذا در این پژوهـش فـرض می‌کنیـم کـه توزیع‌هـای احتمالاتـی قـادر بـه محسـوب کردن ایـن پدیـده در مدل شـوند. پـس مـا فـرض کنیم که زمـان سـفر t اتوبـوس از دو عنصر مسـتقل ساخته‌شـده اسـت: (الف) زمان وابسـته بـه رفتـار رانندگان بـا توزیع نرمـال و بـا پارامترهای μ و σ (ب) زمـان ازدسـت‌رفته بـه دلیـل تأخیرهایـی که در چـراغ راهنمایـی رانندگـی بـه وجـود می‌آیـد که با معادلـه فـوق شـناخته می‌شـود. بنابرایـن، زمان سـفر ترکیبـی از هـر دو توزیـع نرمـال و توزیـع تأخیر اسـت کـه بانـام توزیـع نرمال-سـیگنال (NS) شـناخته و بـه ایـن صـورت زیـر بیان می‌شـود:

$$=\frac{c-r}{c}\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2}+\frac{1}{2}\left(erf\left(\frac{t-\mu}{\sigma\sqrt{2}}\right)-erf\left(\frac{t-r-\mu}{\sigma\sqrt{2}}\right)\right)$$

$$(3) f_{NS}(t,\mu,\sigma,c,r)$$

بطوریکـه erf تابع خطا اسـت که به‌صـورت زیر تعریف می‌شود:

$$=\frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^t e^{x^2}\mathrm{dx}$$

$$(4) erf(t)$$

متغیرها

N: تعداد اتوبوس‌های موجود در سیستم

k: اندیس مربوط به اتوبوس

s : مجموعه مربوط به ایستگاه

i، j: اندیس ایستگاه‌ها

L={1,2,... ,s-1} : مجموعـه فواصـل بیـن هـر دو ایسـتگاه متوالی

$Maxt_{stop}$: کمترین زمان توقف در ایستگاه

$Mint_{stop}$: سقف زمان توقف در ایستگاه

g: نرخ جریان مسافر نفر در دقیقه

t_{saf} (i,k) : سـرفاصله زمانـی بعـد از حرکـت اتوبـوس k از ایسـتگاه i

t_i^k:زمان حرکت اتوبوس k از ایستگاه i

FS_i^k :ظرفیـت خالـی اتوبـوس k وقتـی ایسـتگاه i را تـرک مـی کند

CAP_k :ظرفیت مسافر اتوبوس k

t_{stop} (i,k):زمان توقف اتوبوس k در ایستگاه i

$N_{ij}^k = P(\lambda_i, h_{k,i})^{[t_i^{k-1}, t_i^k]}$:تعـداد مسـافرینی کـه بـه مقصـد ایسـتگاه j در فاصلـه زمانـی بیـن $[t_i^{k-1}, t_i^k]$ بـه ایسـتگاه i وارد می‌شـوند. درواقـع تعداد مسـافرین کـه بین زمـان عبـور دو اتوبـوس متوالی وارد ایسـتگاه می‌شـوند.

ND_i^k :مجمـوع مسـافرینی کـه در فاصلـه زمانـی $[t_i^{k-1}, t_i^k]$ بـه ایسـتگاه I وارد می‌شـوند.

NO_i^k :مجمـوع مسـافرینی کـه در فاصلـه زمانـی برای رفتـن بـه ایسـتگاه j بـه هـر ایسـتگاه بـا مبـدأ I وارد می‌شـوند.(i<j)

$(i < j)$: تعـداد مسـافرینی کـه در فاصلـه زمانـی $[t_i^{k-1}, t_i^k]$ وارد ایسـتگاه i می‌شـوند و سـوار اتوبـوس k می‌شـوند بـرای رفتـن بـه ایسـتگاه شـماره j.

ne_{ij}^k: تعـداد مسـافرینی کـه در فاصلـه زمانـی $[t_i^{k-1}, t_i^k]$ وارد ایسـتگاه i می‌شـوند و بـرای رفتـن بـه ایسـتگاه شـماره j بـه دلیـل نبـود جـا در اتوبـوس نمی‌تواننـد سـوار اتوبـوس k شـوند.

E_{ij}^k: تعـداد مسـافرینی که در فاصلـه زمانی $[0, t_i^{k-1}]$ وارد ایسـتگاه i می‌شـوند و بـرای رفتـن بـه ایسـتگاه شـماره j در ایستگاه منتظر سوارشـدن بر اتوبوس k+1 هستند .

EAD_i^k : تعـداد کل مسـافرینی کـه در فاصلـه زمانـی $[0, t_i^{k-1}]$ وارد ایسـتگاه i می‌شـوند و بـرای رفتـن بـه ایسـتگاه‌های بعدی در ایسـتگاه i منتظر سوارشـدن بر اتوبوس k+1 هسـتند.

EAO_j^k : تعـداد کل مسـافرینی کـه در فاصلـه زمانـی $[0, t_i^{k-1}]$ وارد ایسـتگاه‌های قبـل از i می‌شـوند و بـرای رفتن به ایسـتگاه شـماره j منتظر سوارشـدن بر اتوبـوس k+1 هسـتند.

مدیریت شهری
فصلنامه مدیریت شهری
Urban Management
شماره ۴۷ تابستان ۹۶
No.47 Summer 2017

[Downloaded from ijurm.imo.org.ir on 2026-11-02]

ee_{ij}^{k}: تعداد مسافرینی که در فاصله زمانی $[0, t_i^{k-1}]$ وارد ایستگاه i می‌شوند و برای رفتن به ایستگاه شماره j در ایستگاه نمی‌توانند سوار اتوبوس k شوند.

es_{ij}^{k}: تعداد مسافرینی که در فاصله زمانی $[0, t_i^{k-1}]$ وارد ایستگاه i می‌شوند و برای رفتن به ایستگاه شماره j سوار اتوبوس شماره k می‌شوند.

S_{ij}^{k}: تعداد افرادیکه برای رفتن به ایستگاه مشخص j، وارد ایستگاه i شده و سوار اتوبوس k می‌شوند.

SAD_i^k: مجموع تعداد افرادیکه برای رفتن به ایستگاه‌های بعدی، وارد ایستگاه i شده و سوار اتوبوس k می‌شوند.

SAO_j^k: مجموع تعداد افرادیکه برای رفتن به ایستگاه مشخص j، وارد ایستگاه‌های قبلی i شده و سوار اتوبوس k می‌شوند.

FS_i^k: ظرفیت خالی اتوبوس k بعد از رسیدن به ایستگاه i.

محدودیت‌ها

معادله (۵) نشان می‌دهد زمان حرکت اتوبوس k از ایستگاه i+۱ می‌بایست برابر بازمان حرکت از ایستگاه قبلی بعلاوه زمان توقف بعلاوه زمان طی

$$t_{i+1}^{k}=t_i^{k}+t_{stop}(i+1,k)+f_{NS}(t,\mu,\sigma,c,r) \qquad \forall k \in N, i=1,2,\dots,S-1$$
(5)

$$t_{i+1}^{k}-t_{stop}(i+1,k) \geq t_i^{k}+t_{saf}(i,k) \qquad \forall k \in N,\ i \in H$$
(6)

$$Mint_{stop} \leq t_{stop}(i,k) \leq Maxt_{stop} \qquad \forall k \in N,\ i \in H$$
(7)

$$ND_i^k=\sum_{j\in H,\ j>i} N_{ij}^k \qquad \forall k \in N,\ \forall i=1,\dots,S-1$$
(8)

$$NO_j^k=\sum_{j\in H,\ i>j} N_{ij}^k \qquad \forall k \in N,\ \forall j=2,\dots,S$$
(9)

$$N_{ij}^k=ns_{ij}^k+ne_{ij}^k \qquad \forall i,j \in H,\ i<j,\ k \in N$$
(10)

$$E_{ij}^k es_{ij}^k=+ee_{ij}^k \qquad \forall i,j \in H,\ i<j,\ k \in N$$
(11)

$$EAD_i^k=\sum_{j\in H,\ j>i} E_{ij}^k \qquad \forall k \in N,\ \forall i=1,\dots,S-1$$
(12)

$$EAO_j^k=\sum_{j\in H,\ i>j} E_{ij}^k \qquad \forall k \in N,\ \forall j=2,\dots,S$$
(13)

$$EAO_i^{k+1}=EAO_i^k+NO_i^k-SAO_i^k \qquad \forall k=1,\dots k-1,\ \forall i=2,\dots,S$$
(14)

$$EAD_i^{k+1}=EAD_i^k+ND_i^k-SAD_i^k \qquad \forall k=1,\dots k-1,\ \forall i=1,\dots,S-1$$
(15)

$$S_{ij}^k=ns_{ij}^k+es_{ij}^k \qquad \forall i,j \in H,\ i<j,\ k \in N$$
(16)

[Downloaded from ijurm.imo.org.ir on 2026-11-02]

$$SAD_i^k = \sum_{j\in H,\ j>i} S_{ij}^k \qquad \forall k \in N,\ \forall i = 1,\ldots,S-1 \qquad (17)$$

$$SAO_j^k = \sum_{j\in H,\ i>j} S_{ij}^k \qquad \forall k \in N,\ \forall j = 2,\ldots,S \qquad (18)$$

$$FS_i^k = FS_{i-1}^k + SAO_i^k - SAD_i^k \qquad \forall k \in N,\ \forall i = 1,\ldots,S-1 \qquad (19)$$

$$FS_1^k = CAP_k - SAD_1^k \qquad \forall k \in N \qquad (20)$$

$$t_{stop}(i,k) \le Mint_{stop} + gFS_{i-1}^k \qquad \forall k \in N,\ \forall i = 2,\ldots,S \qquad (21)$$

$$t_{stop}(1,k) \le Mint_{stop} + gCAP_k \qquad \forall k \in N \qquad (22)$$

$$t_{stop}(i,k) \le Mint_{stop} + gSAD_i^k \qquad \forall k \in N,\ \forall i = 2,\ldots,S \qquad (23)$$

$$N_{ij}^k = P(\lambda_i, h_{k,i})^{[t_i^{k-1}, t_i^k]} \qquad (24)$$

$$f_{NS}(t,\mu,\sigma,c,r) = \frac{c-r}{c}\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} + \frac{1}{2c}\left(erf\left(\frac{t-\mu}{\sigma\sqrt{2}}\right) - erf\left(\frac{t-r-\mu}{\sigma\sqrt{2}}\right)\right) \qquad (25)$$

نمودن فاصله بین دو ایستگاه (که از توزیع خاص توضیح داده‌شده در معادلات بالا به دست می‌آید) باشد. معادله (۶) بیان می‌کند زمان حرکت دو اتوبوس متوالی از یک ایستگاه حداقل به‌اندازه زمان سرفاصله زمانی مشخصی باشد. (این زمان باعث می‌شود اتوبوس‌های متوالی به‌طور به هم چسبیده حرکت نکنند). در معادله (۷) زمان توقف اتوبوس در ایستگاه در محدوده حداقل و حداکثر زمان مجاز توقف تعریف می‌شود. معادله (۸) و (۹) به ترتیب همه مسافرانی که مبدأ و مقصدشان یکسان است را نشان می‌دهد. معادله (۱۰) مجموعه افرادی که به ایستگاه وارد و با اتوبوس k حرکت کرده‌اند و آن‌هایی که موفق به سوارشدن بر اتوبوس k نشده‌اند و منتظر می‌مانند. سه معادله بعدی محدودیت‌ها مجموع مسافرینی را نشان می‌دهد که از اتوبوس k-۱ جامانده و منتظر اتوبوس بعدی هستند. در محدودیت‌های شماره (۱۴) و (۱۵) معادلات تعادلی تمام کسانی که اتوبوس‌های قبلی را ازدست‌داده‌اند و منتظر اتوبوس بعدی باقی می‌مانند تا به مقصد موردنظر خود برسند را نشان می‌دهد. افرادی که در ایستگاه i و به مقصد j، سوار بر اتوبوس k شده‌اند بر دودسته تقسیم می‌شوند؛ افرادی که بین زمان اتوبوس k-۱ و k وارد ایستگاه شده‌اند و سوار بر اتوبوس k شده‌اند و افرادی که قبل از حرکت اتوبوس k-۱ به ایستگاه i رسیده‌اند ولی اتوبوس k-۱ را ازدست‌داده‌اند و سوار اتوبوس k شده‌اند (۱۶). در محدودیت (۱۷) تمام مسافرین با مبدأ یکسان را نشان می‌دهد. در محدودیت (۱۸) تمامی مسافرین پیاده شده در مقصد مشترک را نشان می‌دهد. در محدودیت (۱۹) معادله تعادلی تعداد مسافرین حاضر در اتوبوس، آن‌هایی که در ایستگاه پیاده می‌شوند و آن‌هایی که در ایستگاه سوار می‌شوند را نشان می‌دهد. در محدودیت (۲۰) رابطه تعادلی رابطه (۱۹) را در ایستگاه مبدأ صدق

فصلنامه مدیریت شهری
Urban Management
شماره ۴۷ تابستان ۹۶
No.47 Summer 2017

[Downloaded from ijurm.imo.org.ir on 2026-11-02]

می‌دهد. در سه محدودیت (۲۱) و (۲۲) و (۲۳) زمان توقف اتوبوس در ایستگاه‌ها را نشان می‌دهد؛ همان‌طور که در فرضیات مدل گفتیم هیچ ایستگاهی در پشت چراغ‌قرمز قرار ندارد. در معادله (۲۴) ورود مسافرین به ایستگاه را که از توزیع برنولی تبعیت می‌کند نشان می‌دهد و در معادله (۲۵) زمان‌های حرکت بین دو ایستگاه که اتوبوس طی می‌کند و از توزیع نرمال-سیگنال تبعیت می‌کند را نمایش می‌دهد.

تابع هدف

هدف اصلی طرح این پژوهش در نظر گرفتن نرخ ورود متغیر مسافرین به ایستگاه و معرفی محدودیت‌ها و تأخیرهایی است که در مسیر اتوبوس پیش می‌آید. لذا تابع هدف را به‌صورت منفرد در نظر می‌گیریم اگرچه می‌توان زمان سفر تمام مسافرین و هزینه عملیات حرکت اتوبوس‌ها را نیز به‌عنوان توابع هدف و توأم باهم در نظر گرفت، ولی از این کار صرف‌نظر می‌کنیم و تابع هدف را به‌صورت منفرد و به‌صورت مجموع زمان انتظار افرادی که یک‌بار اتوبوس را ازدست‌داده‌اند و در ایستگاه انتظار اتوبوس بعدی را می‌کشند و زمان انتظار افرادی که در بازه قبل از رسیدن اتوبوس بعدی که با آن سفر خود را آغاز می‌کنند به انتظار رسیدن آن در ایستگاه هستند، محاسبه می‌کنیم.

$$\text{Min}\frac{\left[\sum_{i=1}^{S-1}\sum_{k=1}^{K}\left(t_i^k-t_i^{k-1}\right)EAD_i^k+\sum_{i=1}^{S-1}\sum_{k=1}^{K}\left(t_i^k-t_i^{k-1}\right)NAD_i^k\right]}{\sum_{k=1}^{K}\sum_{i=1}^{S-1}\sum_{j=i+1}^{S}\left(N_{ij}^k\right)}$$

تحلیل و اجرای مدل با نرم‌افزار GAMS

با استفاده از داده‌های آماری فرضی که متغیر ورود مسافر به هر ایستگاه از پواسون تعیین و برآورد گردید و زمان حرکت بین ایستگاه‌ها به خاطر زمان متغیر چراغ بارنگ قرمز در چراغ‌های راهنمایی رانندگی با پارامترهای تابع توزیع معرفی‌شده، با نرم‌افزار آماری انجام و سپس مدل در نرم‌افزار GAMS کد نویسی و پس از اعتبار سنجی نتایج که در ادامه آورده می‌شود حاصل گردید.

کل زمان مورد آزمودن را از ساعت ۸ تا ۱۰ برای دو ساعت کاری از یک روز را در نظر گرفتیم. با استفاده از نرم‌افزارهای آماری با تابع توزیع‌هایی که معرفی شدند تعداد مسافرهای ورودی به هر ایستگاه و زمانی که اتوبوس‌ها مسیر بین ایستگاه‌های متوالی را می‌پیمودند به دست آمد. سپس نوبت به زمان‌بندی حرکت اتوبوس‌ها که تعداد اتوبوس‌ها ۱۰۰ عدد و ظرفیت هر یک ۵۰ نفر در نظر گرفته‌شده بود را جزو ورودی‌های مدل در نظر گرفتیم. برای اینکه حل مدل با GAMS به دلیل وجود روابط بازگشتی پیچیده و طولانی نشود مسئله انتخابی طرح‌شده را کوچک در نظر گرفتیم. پس از حل‌های مکرر با ورودی‌های مختلفی که از نرم‌افزارهای آماری به دست می‌آوردیم نشان‌دهنده بهبود در تابع هدف در مقایسه باحالت دستی بودیم.

نتیجه‌گیری و جمعبندی

در این تحقیق بهینه‌سازی زمان‌بندی حرکت اتوبوس‌ها از ایستگاه مبدأ و با لحاظ قرار دادن حجم تقاضای متغیر مسافر به ایستگاه‌ها و زمان‌های متغیر پیمایش مسیر توسط ناوگان در ساعت‌های مختلف باهدف کمینه نمودن زمان انتظار مسافر در ایستگاه انجام گرفت. درواقع این پژوهش چند محدودیت دنیای واقعی را با مدل‌های ریاضی متعارف حل زمان‌بندی حرکت اتوبوس‌های BRT تلفیق کرد و به رویکردی واقعی‌تر برای حل چنین مسائلی پرداخت. درحرکت ناوگان در مسیرهای BRT وابسته به ساعت‌های مختلف روز زمان‌های رسیدن ناوگان به مقصدها نیز تغییر می‌کند و این به دلیل موانعی است که در مسیر اتوبوس‌ها بخصوص در چهارراه‌ها قرار دارد، به وجود می‌آید. با بهره‌گیری از چنین مدل‌هایی می‌توان به هدف‌های کاهش زمان انتظار مسافرین که در کل رضایت مسافرین از این سیستم حمل‌ونقل همگانی است، نزدیک‌تر شویم و با بهبود این سیستم جابجایی‌های زیادی را در سطح شهرها انجام دهیم. برای تحقیقات آینده می‌توان با استفاده از داده‌های GPS محل دقیق

[Downloaded from ijurm.imo.org.ir on 2026-11-02]

ناوگان را به‌عنوان ورودی وارد مدل کنیم و به‌صورت دقیق‌تر وارد پروژه ساخت یک سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری برای زمان‌بندی حرکت اتوبوس‌ها به‌صورت آنلاین شویم.

منابع و ماخذ

خطیبی اصغر، خاتمی فیروزآبادی سید محمدعلی، جوانشیر حسن (۱۳۹۲) مدلی برای کاهش زمان انتظار مسافران در ایستگاه‌های متقاطع خطوط متروی تهران، دوازدهمین اجلاس بین‌المللی مهندسی حمل‌ونقل و ترافیک.

حسن جوانشیر، گلشن نوری (۱۳۸۹) زمان‌بندی حرکت اتوبوس‌های تندرو با در نظر گرفتن معیار طول صف در ایستگاه‌ها، چهاردهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی حمل‌ونقل و ترافیک.

حمید طالبی، دکتر علیرضا رشیدی (۱۳۸۹) مدل‌سازی ریاضی برای زمان‌بندی اتوبوس‌های BRT باهدف کاهش زمان انتظار مسافر، پانزدهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی حمل‌ونقل و ترافیک.

Lampkin W., Salmans P. D. The Design Routs, Service Frequencies, and Schedules for a Municipal Bus Undertaking: A Case Study; Operational Research Quarterly, Vol. 18, No. 4, 1967, PP. 375-397.

Kocur, G. and Hendrikson, C., Design of Local Bus Service with Demand Equilibrium, Transportation Sciences, Vol. 16, 1982.

Tom, V. M. and Mohan, S. (2003). Transit Route Network Design Using Frequency Coded Genetic Algorithms, ASCE Journal of Transportation Engineering, Vol. 129, No.2, pp 186- 195.

Gao, Z. , H. Sun, and L. Shan, A Continuous Equilibrium Network Design Model and Algorithm for Transit Systems. Transportation Research Part B: Methodological, 2004. 38(3): p. 235-250.

SUN Chuanjiao et al., 2008. Scheduling Combination and Headway Optimizationof Bus Rapid Transit.Journal Of Transportation Systems Engineering and Information Technology.Volume 8,Issue 5.

Xumei CHEN, Huibo GONG, Jingnan Wang, (August 2012), BRT Vehicle Travel Time Prediction Based on SVM and Kalman Filter, Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, Volume 12, Issue 4, Pages 29-34.

Wang J N, Chen X M, Guo S X. (2009), Bus travel time prediction model with support vector regression. The 12th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, 655–660.

[Downloaded from ijurm.imo.org.ir on 2026-11-02]