

ارایه مدل یکپارچه اختصاص ناوگان و زمان بندی شبکه حمل- ونقل اتوبوسی تندرو

محمود صفارزاده^{۱*}، سید سجاد مظلوم^۲

۱. استاد گروه راه و ترابری دانشگاه تربیت مدرس

۲. کارشناس ارشد راه و ترابری دانشگاه تربیت مدرس

Saffar_m@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۳/۸/۲۵]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۲/۱۰/۲۸]

چکیده - در این مقاله، رویکردی جدید برای حل مسئله اختصاص ناوگان در شبکه حمل و نقل اتوبوسی تندرو، BRT، در نظر گرفته شده است و حل این مسئله به صورت هم زمان با زمان بندی ناوگان اختصاص یافته به خطوط صورت می گیرد. یعنی برنامه عملکردی سامانه به صورت هم زمان و یکجا ارائه می شود. زمان بندی وسایل نقلیه در هر خط با توجه به زمان انتظار مسافران در ایستگاه ها صورت می گیرد و به تبع آن الگوی حرکت وسایل نقلیه اختصاص یافته به خطوط در ایستگاه اول هر خط ارائه می شود. در طراحی مدل سعی بر آن بوده که امکان توسعه آن وجود داشته باشد و بتوان از آن برای کاربرد در مقیاس جهانی استفاده کرد. مدل مورد نظر برای شبکه BRT تهران دریافت شد و به وسیله الگوریتم حل ابتکاری و استفاده از نرم افزار Lingo و با توجه به اطلاعات گرفته شده از معاونت حمل و نقل و ترافیک شهرداری تهران حل شد و نتایج آن مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. از نتایج مهمی که از این پژوهش گرفته شد می توان به لزوم استفاده از اتوبوس های با ظرفیت بیشتر در خطوط BRT اشاره کرد. چنانچه مشاهده شد، استفاده از این اتوبوس ها نقش زیادی در کاهش چشم گیر زمان انتظار مسافران که در این مقاله به عنوان تابع هدف مد نظر است، دارد.

واژگان کلیدی: اختصاص ناوگان، زمان بندی، حمل و نقل اتوبوسی تندرو، شبکه BRT، الگوریتم حل ابتکاری.

مقدمه

تحمیل شده به سیستم تحقق می یابد تا آنجا که می توان با ارائه الگوی مناسب بهره برداری از ناوگان از هزینه های عملیاتی تا حد زیادی کاست. با توجه به اینکه حمل و نقل عمومی و به ویژه سیستم حمل و نقل تندرو در کشور رو به رشد است، باید برنامه ریزی صحیح در این زمینه صورت گیرد تا بتوان از ناوگان موجود استفاده مطلوب را در جابه جایی مسافر و ارائه سرویس مطلوب و دلخواه انجام داد. با این وجود این مقاله سعی دارد که مدلی ارائه شود تا نه تنها برای سیستم حمل و - نقل تندرو اتوبوسی بلکه برای شبکه های معمولی نیز کارا باشد.

حوزه انجام این پژوهش، شبکه اتوبوسرانی تندرو تهران است. با توجه به گستردگی داده های مورد نیاز، جمع آوری اطلاعات

در شهرهای امروزی حمل و نقل عمومی وسیله ای مهم برای دستیابی شهروندان به کالا و خدمات به شمار می رود. سیستم اتوبوسی سریع به عنوان یکی از اقتصادی ترین راهکارها در انواع سیستم های حمل و نقل عمومی شناخته شده است که می تواند به صورت شبکه ای کامل و با سرعت و کیفیت بالا مسافران را از نقطه ای به نقطه ای دیگر منتقل کند. با وجود آنکه زمان زیادی از پیاده سازی این ایده و سیستم نمی گذرد، مشخص شده است که این سیستم پتانسیل ایجاد تغییر اساسی در ساختار حمل و نقل شهری دارد [۲۱].

ضرورت انجام این پژوهش در تأثیر شگرف اختصاص بهینه ناوگان موجود به خطوط شبکه بر هزینه های عملکردی

۱۰- بدون توجه به چگونگی توزیع بار جهتی مسافر در خط، برنامه ریزی حرکت اتوبوس‌ها در هر دو مسیر رفت و برگشت صورت می‌گیرد.

این پژوهش به صورت زیر تنظیم شده است. پس از چکیده و مقدمه فوق، در قسمت دوم به مرور مطالعات قبلی می‌پردازیم. سپس، در قسمتهای سوم و چهارم محدوده مورد مطالعه و نتایج به دست آمده از مطالعه موردی بیان می‌شود و در انتها نتایج و پیشنهادات ارائه می‌شود.

مرور مطالعات قبلی

مسئله طراحی شبکه اتوبوسرانی از دو مرحله الف) تعیین ساختار شبکه و ب) تعیین برنامه عملکردی سیستم تشکیل می‌شود. این مراحل شامل دو مسئله عمده تعیین مسیر خطوط اتوبوسرانی (الف) و اختصاص ناوگان مناسب به آن‌ها (ب)، به منظور بهینه‌سازی وضعیت عملکرد سیستم است. وابستگی این دو مسئله ایجاب می‌کند که آن‌ها، به صورت هم‌زمان و در قالب یک مدل حل شوند.

از آنجا که این امر سبب بزرگ شدن ابعاد مسئله می‌شود عده‌ای از پژوهشگران با چشم‌پوشی از این وابستگی، مدل‌های انتخاب مسیر خطوط شبکه اتوبوسرانی و اختصاص ناوگان به خطوط را به صورت جداگانه مطرح و حل کرده‌اند. لامپکین و سالمنزا [۴] مسائل تعیین مسیر خطوط و اختصاص ناوگان را به صورت مجزا مطرح کرده‌اند. به همین دلیل مسائل ساده‌تری را برای طراحی شبکه حل کرده‌اند. هاسلستروم نیز از یک روش دو مرحله‌ای بهینه‌سازی استفاده می‌کند. کوکیور و هندریکسون [۵] نیز طراحی خدمات اتوبوسرانی را از نظرهای مختلفی چون فاصله مسیرها، زمان‌بندی حرکت و کرایه، در صورت وجود و عدم وجود محدودیت بزرگی وسیله نقلیه مورد بررسی قرار می‌دهند و سطوح بهینه این متغیرها را در چند تابع هدف بررسی و تعیین می‌کنند. سدر و استرن [۶] نیز کوشش‌های دیگری را برای بهبود وضع اتوبوسرانی از نظر کاهش سفرهای اتوبوس‌های بدون سرنشین، کاهش پیچیدگی شبکه اتوبوسرانی و تثبیت

و داده‌های معتبر از جمله مهم‌ترین محدودیت مربوط به این پژوهش پیش بینی می‌شود.

با توجه به نوع و چگونگی انجام پروژه فرضیات زیر ارائه می‌شود:

۱- طراحی صورت گرفته کنونی شبکه BRT برای اختصاص و گسیل ناوگان غیر اقتصادی است.

۲- با استفاده از روش انتخابی از ظرفیت موجود ناوگان تندرو بیشینه بهره‌وری صورت می‌گیرد.

۳- با استفاده از این مدل، از حجم مسافر منتظر در ایستگاه‌های محدود BRT کاسته شده و جابه‌جایی مسافر سریع‌تر صورت می‌گیرد.

و پیش فرض‌ها عبارتند از:

۱- در شبکه اتوبوسرانی تندرو، تقاضای سفر و نرخ ورود مسافر به ایستگاه مشخص است.

۲- در شبکه اتوبوسرانی تندرو، مسیر حرکت اتوبوس‌ها در هر خط، موقعیت زوج پایانه‌ها، موقعیت ایستگاه‌های مسیر، زمان استراحت در ایستگاه‌ها، زمان سفر بین ایستگاه‌ها در هر خط، زمان کناره‌گیری مجاز ماکزیمم در هر ایستگاه و برای هر اتوبوس مشخص است.

۳- زمان حرکت اولین اتوبوس از ایستگاه به عنوان درجه آزادی مدل در هر خط برابر عددی ثابت در نظر گرفته می‌شود.

۴- درصد مسافرانی که در هر ایستگاه از اتوبوس پیاده می‌شوند، مشخص است.

۵- نوع وسایل نقلیه مورد بهره‌برداری در همه شبکه یکسان است.

۶- زمان چرخه در هر خط برابر عددی ثابت است.

۷- ناوگان تندرو مورد استفاده در کل شبکه دارای اندازه معینی است.

۸- گسیل اتوبوسها در هر خط در طول زمان چرخه صورت می‌گیرد.

۹- گسیل اتوبوس در هر خط به گونه‌ای صورت می‌گیرد که در هر لحظه و نیز در پایان زمان چرخه وسیله‌ای در ابتدای خط برای گسیل آماده باشد.

1 Lampkin and Saalmans

2 Kocur and Hendrikson

3 Ceder and Stern

همین مطلب توابع هدف آن‌ها از اهمیت کمتری در شبکه BRT برخوردار است. زیرا این شبکه دارای نیازمندی‌ها و محدودیت‌های خاص خود است که با شبکه معمولی متفاوت است. در این مقاله سعی می‌شود تا با در نظر گرفتن محدودیت‌های موجود در این شبکه، اختصاص ناوگان و زمان‌بندی حرکت ناوگان اختصاص یافته را انجام دهیم.

فرمول‌بندی مسئله

یکی از مهمترین مراحل در مدل‌سازی، تعیین تابع هدف می‌باشد. در این مقاله اختصاص بهینه ناوگان به خطوط به گونه‌ای که زمان انتظار مسافران در ایستگاه‌ها مینیمم شود مد نظر است. توجه کنید که منظور از زمان انتظار مسافران در ایستگاه عبارت است:

زمان انتظار مسافران پس از اینکه به ایستگاه می‌رسند و منتظر رسیدن اتوبوس می‌شوند.

زمان انتظار مسافران جا مانده از سرویس به علت حجم بالای مسافر درون اتوبوس.

زمان انتظار مسافران درون اتوبوس از زمانی که به ایستگاه می‌رسند تا زمانی که دوباره از ایستگاه به سمت ایستگاه بعدی حرکت می‌کنند.

در این مسئله اختصاص در طول یک دوره زمانی صورت می‌گیرد و چنین فرض می‌شود که در طول این دوره تقاضا ثابت است. فرمول ریاضی این مسئله را می‌توان به شکل زیر ارائه نمود:

$$(1)$$

$$\text{Min } WT$$

$$\sum_{l=1}^L N_l = F \quad (2)$$

$$N_l \geq \left\lceil \frac{TC_l}{H_l^{\max}} \right\rceil \quad (3)$$

$$\forall l = 1, 2, 3, \dots, L$$

$$(4)$$

$$N_l \leq F - \sum_{j=1}^{l-1} \left\lceil \frac{TC_j}{H_j^{\max}} \right\rceil$$

$$\forall l, j = 1, 2, 3, \dots, L$$

$$Wt_i - Wt_j \leq \delta \quad (5)$$

$$\forall i, j = 1, 2, 3, \dots, L$$

زمان‌بندی حرکت انجام داده‌اند. کیانگ [۷] و همکاران روشی را برای ارزیابی برنامه حمل‌ونقل سریع اتوبوس ۵ ارائه دادند. آن‌ها تأکید می‌کنند که برنامه BRT چند موضوعی و چند هدفی است.

بالیونوس [۸] به معرفی ابزار smartBRT به منظور گسترش عملیات، شبیه‌سازی کامپیوتری، ارزیابی و بصری‌سازی BRT پرداخته است. ویجایارا قاون و انتارامایه [۹] با تعریف دو نوع سرویس جدید و نیز تغییر زمان سرویس‌دهی هر خط، اندازه ناوگان مورد نیاز آن را کاهش داده و مسئله مدیریت ناوگان شبکه را در سطحی جزئی‌تر بررسی کرده‌اند. لبلانک [۱۰] روشی برای طراحی شبکه اتوبوسرانی ارائه می‌دهد که با استفاده از آن می‌توان تواتر هر یک از خطوط را به شکلی تعیین کرد که بین بیشینه بهره‌برداری از خطوط و کمینه هزینه عملیات، تعادلی ایجاد شود. در این روش یک مسئله اختصاص ترافیک-انتخاب وسیله حل می‌شود و تأثیر حاصل از تفکیک وسایل در افزایش یا کاهش تواتر هر یک از خطوط بررسی می‌شود.

تام و مهان [۱۱] با هدف کمینه کردن مجموع هزینه‌های استفاده کنندگان و گردانندگان سیستم مسئله انتخاب مسیر خطوط و اختصاص ناوگان به هر خط را به صورت هم‌مدل و آن را با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل کرده‌اند. جاو و همکاران [۱۲] نیز مسئله اختصاص ناوگان در یک شبکه حمل‌ونقل همگانی را به صورت یک مسئله مجزا مدل و آن را از روش برنامه‌ریزی دو سطحی ۱۱ حل کرده‌اند.

چنانچه مشاهده می‌شود همه پژوهش‌های انجام شده روی شبکه‌های معمولی اتوبوسرانی صورت گرفته است و تاکنون هیچ پژوهشی به شکل خاص به مسئله اختصاص ناوگان در شبکه BRT نپرداخته است؛ مضاف بر اینکه در هیچکدام از این پژوهش‌ها زمان‌بندی حرکت ناوگان اختصاص یافته در کنار اختصاص ناوگان در نظر گرفته نشده است. بر اساس

4 Qiang

5 Bus Rapid Transit, BRT

6 Balvanyos

7 Vijayaraghavan T .A .S and Anantharamaiah K .M

8 Leblanc .J

9 Tom V .M and Mohan S

10 Gao .Z et al

11 Bilevel Programming

$$p'_{i,k} = \max \{0, p_{i,k-1} - (L^{\max} - l_{i-1,k-1}(1 - A_i))\} \quad \forall i = 2, \dots, S_l, \quad k = 2, \dots, N_l \quad (14)$$

$$A_i = A_i^{rear} + A_i^{middle} + A_i^{front} \quad \forall i = 1, \dots, S_l \quad (15)$$

$$l_{i,k} = \min \{L^{\max}, l_{i-1,k}(1 - A_i) + p_{i,k} + p'_{i,k}\} \quad \forall i = 2, \dots, S_l, \quad k = 2, \dots, N_l \quad (16)$$

$$TC + d_{1,1} \leq d_{1,N_l} \quad (17)$$

$$d_{i,k} > 0, \quad a_{i,k} > 0 \quad \forall i = 2, \dots, S_l, \quad k = 2, \dots, N_l \quad (18)$$

$$\text{integer } p_{i,k}, p'_{i,k}, d_{i,k}, l_{i,k} \quad \forall i = 2, \dots, S_l, \quad k = 2, \dots, N_l \quad (19)$$

که در آن

SI = تعداد کل ایستگاه های خط l .

NI = تعداد کل اتوبوس های خط l .

λ_i = نرخ ورود ساعتی مسافر به ایستگاه i ام،

$d_{i,k}$ = زمان گسیل اتوبوس k ام از ایستگاه i ام،

L^{\max} = بیشینه ظرفیت اتوبوس ها،

A_i = درصد مسافرانی که در ایستگاه i ام از اتوبوس پیاده می شوند،

A_i^{rear} = درصد مسافرانی که در ایستگاه i ام از درب عقب اتوبوس پیاده می شوند،

A_i^{middle} = درصد مسافرانی که در ایستگاه i ام از درب وسط اتوبوس پیاده می شوند،

A_i^{front} = درصد مسافرانی که در ایستگاه i ام از درب جلو اتوبوس پیاده می شوند،

$a_{i,k}$ = زمان رسیدن اتوبوس k ام به ایستگاه i ام،

$tt_{i-1,i}$ = زمان سفر بین ایستگاه های i و $i-1$ ،

$p_{i,k}$ = تعداد مسافرانی که در ایستگاه i ام از زمان گسیل اتوبوس $k-1$ ام تا رسیدن اتوبوس k ام جمع می شوند.

$p'_{i,k}$ = تعداد مسافرانی که در ایستگاه i ام از اتوبوس k ام به علت ازدحام اتوبوس جا می مانند،

$dwell_{i,k}$ = زمان کناره گیری اتوبوس k ام در ایستگاه i ام،

$$Wt = \sum_{l=1}^L Wt_l \quad (6)$$

$$Wt_l \quad (7) \text{، زمان انتظار مینیمم خط } l \text{ برای تعداد ناوگان}$$

اختصاص یافته NI

که wt_{12} کل زمان انتظار استفاده کنندگان از شبکه BRT است. F کل ناوگان موجود است. همچنین L بیانگر تعداد کل

خطوط سیستم اتوبوسرانی است. TC زمان چرخه اتوبوس -

های تندرو خط I است و عددی ثابت فرض می شود. H_l^{\max}

نیز بیانگر بیشینه سرفاصله زمانی مجاز برای حرکت اتوبوس - های تندرو در خط I است.

δ بیشینه اختلاف مجاز برای مقادیر بهینه زمان انتظار در هر

دو خط دلخواه i و j است (برای برقراری توازن اختصاص

ناوگان بین خطوط) و عددی ثابت فرض می شود. زمان انتظار

کل نیز بر طبق محدودیت (6) از جمع زمان انتظار خطوط

حاصل می شود. محدودیت آخر نیز بیانگر پارامتر اصلی مدل است.

مینیم Wt_l در هر خط، Wt_l ، با استفاده از زیرمدلی که در ادامه به تشریح آن می پردازیم، حاصل می شود.

$$Wt_l = \text{Min} \left[\sum_{i=2}^{S_l} \sum_{k=2}^{N_l} \left[\lambda_i \cdot (d_{i,k} - d_{i,k-1})^2 / 2 + (l_{i-1,k}(1 - A_i))(d_{i,k} - a_{i,k}) \right] + p'_{i,k} \cdot (d_{i,k} - d_{i,k-1}) \right] \quad (8)$$

$$s.t \quad 0 < d_{i,k} - d_{i,k-1} \leq H^{\max} \quad \forall i = 1, \dots, S_l, \quad k = 2, \dots, N_l \quad (9)$$

$$d_{i,k} = a_{i,k} + dwell_{i,k} \quad \forall i = 2, \dots, S_l, \quad k = 2, \dots, N_l \quad (10)$$

$$a_{i,k} = d_{i-1,k} + tt_{i-1,i} \quad \forall i = 2, \dots, S_l, \quad k = 1, \dots, N_l \quad (11)$$

$$dwell_{i,k} = \min \left\{ \begin{aligned} & t_b \cdot (p_{i,k} + p'_{i,k}) + t_a \cdot l_{i-1,k} \cdot A_i, \\ & (L^{\max} - l_{i-1,k}(1 - A_i)) \cdot t_b + l_{i-1,k} \cdot A_i \cdot t_a \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

...

$$\forall i = 2, \dots, S_l, \quad k = 1, \dots, N_l$$

$$p_{i,k} = \lambda_i \cdot (a_{i,k} - d_{i,k-1}) \quad \forall i = 2, \dots, S_l, \quad k = 2, \dots, N_l \quad (13)$$

می‌توان مدیریت صحیحی را در شبکه خطوط در هر بازه زمانی بکار گرفت و در هر زمان بار مسافر ورودی به خطوط را به گونه‌ای کنترل کرد که در کمترین زمان به مقصد خود برسد. علاوه بر آن، پس از گسیل اتوبوس از ایستگاه اول، در صورتی که برای آن اتفاق خاصی مانند نقص فنی و ... رخ ندهد، زمان بازگشت اتوبوس برای شروع برنامه‌ای دوباره مشخص است.

استفاده از بازه‌های زمانی بالا به این علت است که زمان پایان یک سفر انتهای زمان چرخه است. به عبارت دیگر، اتوبوس سفر خود را در ابتدای خط آغاز می‌کند. این سفر زمانی پایان می‌یابد که اتوبوس دوباره به ابتدای خط باز گردد. این امر بخاطر این است که عملیات رفت و برگشت در خط به صورت یک چرخه کامل در نظر گرفته شده است.

در این حالت، مینیمم WT به ازای بهترین اختصاص از اتوبوس‌های تندرو و زمان‌بندی بهینه آن تعداد اتوبوس اختصاص یافته به خطوط حاصل می‌شود. مطالعه انجام شده در این مقاله الگوریتمی ابتکاری برای حل مدل ارائه می‌دهد و سپس با استفاده از برنامه $turbo C++$ و نرم افزار $Lingo$ به حل آن می‌پردازد.

الگوریتم حل مدل اختصاص ناوگان

قبل از بیان الگوریتم حل مسئله اختصاص ناوگان، ابتدا لم‌های زیر را بیان و اثبات می‌کنیم و از نتایج آن در الگوریتم حل مسئله اختصاص ناوگان استفاده خواهیم کرد.

لم ۱. در یک خط BRT ، چنانچه با N_1 اتوبوس به زمان انتظار Wt_{N_1} دست یافتیم، با N_2 اتوبوس ($N_2 > N_1$) به زمان انتظار Wt_{N_2} که کمتر از Wt_{N_1} است، دست خواهیم یافت. به عبارت دیگر:

$$\forall N_1 < N_2 \Rightarrow Wt_{N_2} < Wt_{N_1}$$

برای حل مسئله اختصاص ناوگان به خطوط شبکه BRT الگوریتم حلی ارائه شده است که در زیر بدان اشاره می‌شود. کران پائین تعداد اتوبوس‌های لازم در هر خط را با استفاده از فرمول زیر بیابید.

$$f_b = \text{متوسط زمان سوار شدن یک مسافر به اتوبوس، و}$$

$$l_{i,k} = \text{تعداد مسافران اتوبوس } k \text{ ام زمانی که از ایستگاه } i \text{ ام گسیل می‌شود.}$$

در این مدل تابع هدف به صورت کمینه کردن کل زمان انتظار مسافرانی است که در شبکه BRT سفر می‌کنند که برابر با مجموع زمان انتظار کل خطوط است.

محدودیت اول در مدل اصلی تضمین می‌کند که مجموع اتوبوس‌های اختصاص یافته به خطوط مختلف از کل ناوگان موجود تجاوز نکند. محدودیت دوم مینیمم اتوبوس هر خط را برای راضی شدن شرط بیشینه سرفاصله زمانی تضمین می‌کند. در محدودیت سوم حد بالای اتوبوسی را که می‌توانیم در خط I به کار گیریم به دست می‌آید. محدودیت چهارم برای برقراری شرط توازن در خطوط مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. محدودیت پنجم نیز بیان‌کننده چگونگی حصول زمان انتظار کل است که برابر با مجموع مینیمم زمان انتظارهای حاصل شده در خطوط است.

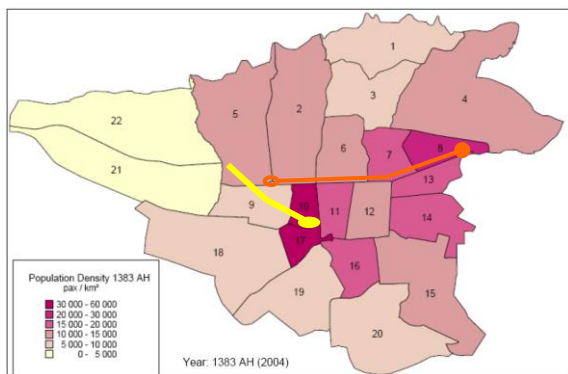
در این مدل متغیر تصمیم زمان گسیل اتوبوس‌ها در بازه‌های زمانی مختلف است که با توجه به ارائه سرویسی که در نهایت منجر به زمان انتظار مینیمم کل در خط شود، به دست می‌آید. با استفاده از این مدل می‌توان تصویر درستی از خط در تمامی ساعات سرویس‌دهی آن داشت. با حل این مدل پارامترهایی مانند: زمان گسیل اتوبوس‌ها از تمامی ایستگاه‌ها و در تمام مدت سرویس‌دهی، میزان بار اتوبوس‌ها در هر لحظه، میزان زمان کناره‌گیری اتوبوس‌ها در ایستگاه‌ها، میزان مسافر هر ایستگاه، میزان مسافر منتظر در هر ایستگاه و در هر زمان و ... مشخص می‌شود و بدین ترتیب تصمیم‌گیری برای اداره خط به آسانی صورت می‌گیرد. قابل ذکر است که در بازه‌هایی که زمان انتظار خط زیاد می‌شود می‌توان تعداد اتوبوس‌ها را در خط با توجه به خروجی این مدل افزایش داد.

مدل ارائه شده می‌تواند در بازه‌های مختلف چرخه اتوبوس‌ها مانند $[0, TC]$ ، $[TC, 2TC]$ و ... که خطوط مختلف دارای بار ورودی متفاوتی هستند، مورد استفاده قرار گیرد و بدین وسیله در هر زمان تعداد اتوبوس کافی مورد استفاده قرار گیرد. با استفاده از مدل ارائه شده در این مقاله به آسانی

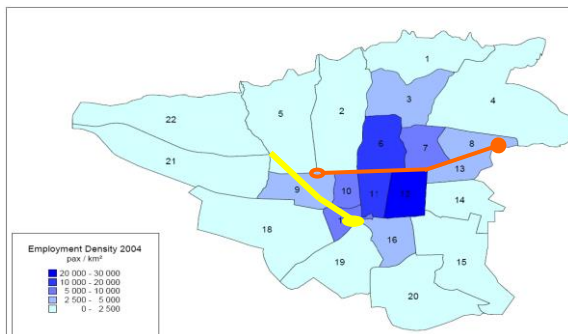
عبارت دیگر، اتوبوس‌ها به گونه‌ای از ایستگاه اول گسیل می‌شوند که در کل، تعداد کمتری از مسافرانی که قصد عبور از خط BRT را دارند، منتظر رسیدن اتوبوس و سوار شدن به آن شود. بنابراین، این زمان بندی با هدوی ثابت صورت نمی‌گیرد و با توجه به نرخ ورود مسافران به ایستگاه‌ها و همچنین درصد پیاده شدن مسافران از اتوبوس‌ها، در هر ایستگاه، دارای هدوی متفاوت است.

معرفی محدوده مورد مطالعه

به منظور اجرای مدل شبکه BRT تهران مورد بررسی قرار گرفت. در حال حاضر ۲ خط از کل شبکه BRT تهران در حال بهره‌برداری است و سایر خطوط مصوب نیز به سرعت در حال پیگیری برای اجرا و بهره‌برداری است. این شبکه در ابتدا کار خود را با محور دپوی شرق-پایانه آزادی آغاز کرد. بر اساس مطالعات شرکت Systra با همکاری شرکت متروی تهران، میزان جمعیت مناطق مختلف و تراکم اشتغال در سال ۱۳۸۳ در شکل‌های زیر آمده است [۱].



جمعیت مناطق مختلف در سال ۱۳۸۳



تراکم اشتغال تهران در سال ۱۳۸۳

کران بالای اتوبوسی را که در هر خط می‌توان به کار برد را با استفاده از فرمول زیر محاسبه کنید:

$$N_i^{\min} = \lceil TC_i / H_i^{\max} \rceil$$

$$N_i^{\max} = F - \sum_{j \neq i} \lceil TC_j / H_j^{\max} \rceil$$

اگر $F < \sum_{l=1}^L N_l^{\min}$ باشد، آنگاه اختصاص امکان ناپذیر است (به دلیل کمبود اتوبوس برای برقراری شرط فاصله زمانی ماکسیمم) بروید به پایان.

مجموعه ψ را به گونه زیر تشکیل دهید:

$$\psi = \left\{ (N_1, N_2, N_3, \dots, N_L) \mid \sum_{i=1}^L N_i = F, N_i^{\min} \leq N_i \leq N_i^{\max} \right\}$$

برای هر یک از اعضای مجموعه فوق میزان Wt مینیمم را در هر خط به دست آورید.

اعضایی از مجموعه ψ که در آن‌ها شرط توازن در خطوط برقرار نیست را از این مجموعه حذف کنید. در این مرحله، استفاده از لم‌ها محاسبات را ساده تر می‌کند.

اگر $\psi = \phi$ ، اختصاص به دلیل عدم برقراری شرط توازن امکان ناپذیر است، بروید به پایان.

مجموع WT خطوط را در هر عضو مجموعه ψ به دست آورید و سپس مجموعه ψ' را به گونه زیر تشکیل دهید:

$$\psi' = \left\{ ((N_1, N_2, N_3, \dots, N_L), (Wt_1, Wt_2, Wt_3, \dots, Wt_L), \sum_{i=1}^L Wt_i) \right\}$$

عضوی از مجموعه ψ' که دارای مینیمم WT است را انتخاب کنید. این عضو کمینه تابع هدف است و مشخصات توزیع ناوگان و زمان انتظار در هر یک از خطوط با توجه به ناوگان اختصاص یافته به آن نیز معین است. پایان.

زمان بندی حرکت اتوبوس‌ها

با به دست آوردن بهترین عضو مجموعه ψ' که دارای کمترین زمان انتظار در مجموعه خطوط است، زمان بندی حرکت اتوبوس‌ها نیز با توجه به ناوگان اختصاص یافته به آن‌ها در طول محاسبه مینیمم زمان انتظار در خط مورد نظر حاصل می‌شود. باید توجه کرد که این زمان بندی با توجه به تابع هدف مینیمم زمان انتظار کل در خط حاصل می‌شود. به

نتایج حاصل از مطالعه موردی

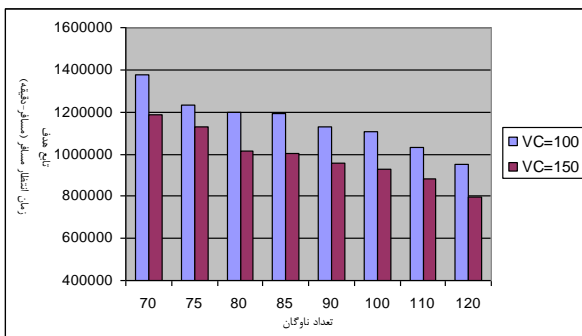
در این مرحله به بررسی نتایج حاصل از اجرای مدل با توجه به تعداد ناوگان مورد استفاده و ظرفیت ماکسیمم اتوبوس‌ها و در نهایت تأثیر این پارامترها بر تابع هدف می‌پردازیم. بدیهی است که تابع هدف مربوطه، با افزایش میزان ناوگان مورد استفاده و نیز افزایش تعداد مسافری که در یک اتوبوس حمل می‌شوند، افزایش می‌یابد. اما باید دید که با توجه به چه برنامه عملی می‌توان از ظرفیت موجود بیشترین استفاده را کرد.

بررسی تغییرات تابع هدف

چنانچه مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد ناوگان مورد استفاده در خط از میزان زمان انتظار سپری شده در طول زمان چرخه کاسته می‌شود. در این ۲ مسیر، حداقل ناوگان مجاز برابر با ۷۰ اتوبوس است. پس، به دلیل عدم برقراری شرط فاصله زمانی ماکسیمم بین اتوبوس‌های گسیل شده از هر ایستگاه، نمی‌توان ناوگانی کمتر از ۷۰ اتوبوس را در خط اختیار کرد. با افزایش تعداد ناوگان از میزان تابع هدف کاسته می‌شود. این کاهش در ابتدا با سرعت بیشتر و سپس با سرعت کمتری دنبال می‌شود. یعنی، نمی‌توان با تزریق بیش از حد ناوگان سعی در کاهش زیاد زمان انتظار داشت. واحد تابع هدف مسافر- دقیقه است.

بررسی تغییرات تابع هدف در مقابل ظرفیت اتوبوس‌ها

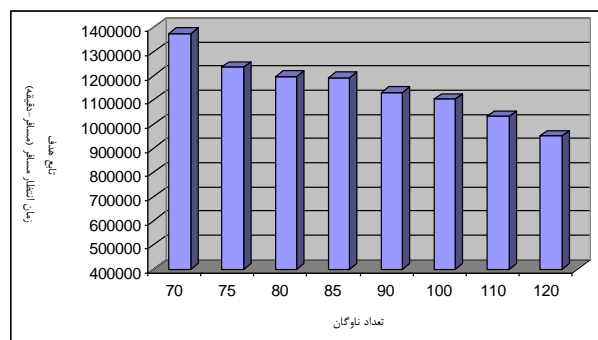
همان‌گونه که در شکل ۷ مشخص است، با افزایش حجم وسیله نقلیه می‌توان از زمان انتظار به میزان بیشتری کاست تا اینکه تعداد بیشتری وسیله نقلیه را در خط مورد استفاده قرار داد. این موضوع به ویژه در خطوط BRT که با حجم بیشتری از مسافر روبروست اهمیت بیشتری دارد. میزان تابع هدف، تابع هزینه زمان انتظار با استفاده از ۱۱۰ وسیله نقلیه، که دارای حجمی برابر با ۱۰۰ مسافر ایستاده و نشسته است، برابر با ۱۰۳۲۶۶۲ مسافر- دقیقه است؛ در حالی که با استفاده از ۸۰ وسیله نقلیه‌ای که دارای ظرفیتی برابر با ۱۵۰ مسافر ایستاده و نشسته است، می‌توان به تابع هدفی برابر با ۱۰۱۴۶۶۰ مسافر- دقیقه دست یافت.



چگونگی کاهش تغییرات تابع هدف با توجه به افزایش ظرفیت اتوبوس‌ها

ارائه برنامه زمانبندی به منظور گسیل ناوگان

همان‌گونه که پیشتر نیز اشاره شد، رسیدن به هدف مورد نظر این مقاله، کاهش زمان انتظار در کل شبکه، مستلزم گسیل به موقع اتوبوس‌ها از ایستگاه اول است؛ به گونه‌ای که هدف مورد نظر به دست آید. در این مطالعه موردی نیز گسیل اتوبوس‌ها، با توجه به تعداد آن‌ها و نیز ماکزیمم هدوی مورد انتظار در هر ایستگاه صورت گرفته است. توجه شود که در این مدل‌سازی، ماکزیمم هدوی در کل ایستگاه‌ها در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر، مسافری که در ایستگاه منتظر رسیدن اتوبوس می‌ماند، بایستی در زمانی کمتر از زمان هدوی ماکسیمم شاهد رسیدن اتوبوس باشد. یعنی در این مدل‌سازی



چگونگی کاهش تابع هدف با افزایش تعداد ناوگان (ظرفیت کل هر اتوبوس ۱۰۰ نفر است)

این نمودار با توجه به ظرفیت ماکسیمم ۱۰۰ مسافر ایستاده و نشسته برای هر اتوبوس حاصل شده است.

پارامترها می‌توان برآورد دقیق‌تری از مسافران عبوری از هر ایستگاه برای طراحی فضای ایستگاه‌ها داشت. این موضوع در ایستگاه‌های سرپیسته از اهمیت بیشتری برخوردار است.

زمان رسیدن اتوبوس‌ها به هر ایستگاه مشخص است و بدین ترتیب می‌تواند اطلاع‌رسانی دقیقی به مسافران صورت گیرد به گونه‌ای که هر مسافر بداند چه زمانی را در ایستگاه برای رسیدن اتوبوس بعدی منتظر بماند.

ظرفیت یا حجم اتوبوس‌ها نقش زیادی در کاهش زمان انتظار مسافران دارد و استفاده از اتوبوس‌های دارای ظرفیت بیشتر، زمان انتظار مسافران را تا حد زیادی تحت تأثیر قرار می‌دهد. استفاده از تعداد بیشتر اتوبوس‌های دارای ظرفیت کمتر، نقش ضعیف‌تری در کاهش زمان انتظار مسافران نسبت به استفاده از تعداد اتوبوس کمتر اما با ظرفیت بیشتر دارد.

در صورتیکه فرض شود همه مسافران منتظر در هر ایستگاه به محض رسیدن اتوبوس سوار آن می‌شوند، یعنی هیچ مسافری منتظر رسیدن اتوبوس بعدی نمی‌شود، نتیجه‌گیری قبلی بر عکس است.

نرخ ورود مسافران به ایستگاه تأثیر زیادی بر چگونگی گسیل اتوبوس‌ها از ایستگاه اول دارد. چنانچه بار مسافر در مسیر رفت بیشتر باشد گسیل اتوبوس‌ها از ایستگاه اول با فاصله بیشتر و چنانچه بار مسافر در مسیر برگشت بیشتر باشد، گسیل اتوبوس‌ها از ایستگاه اول با فاصله کمتر صورت می‌گیرد. در واقع مدل سعی در انتقال همه مسافران از ایستگاه‌ها دارد. حال اگر مسافران بیشتری در مسیر برگشت باشند، اتوبوس‌ها سریع‌تر و در حالت عکس اتوبوس‌ها کندتر از ایستگاه اول گسیل می‌شوند.

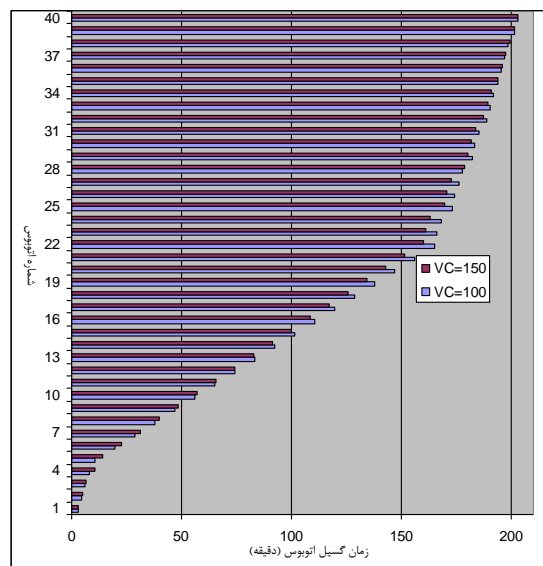
نمی‌توان با تزریق بیش از حد ناوگان سعی در کاهش زیاد زمان انتظار داشت.

با استفاده از این مدل، زمان انتظار مسافران نسبت به حالت گسیل اتوبوس‌ها با هدوی برابر تا حد زیادی کاسته می‌شود.

مراجع

۱- آشنایی با سیستم حمل‌ونقل اتوبوسی تندرو (BRT) در تهران، شهرداری تهران، معاونت حمل‌ونقل و ترافیک، شرکت واحد اتوبوسرانی تهران و حومه، گزارش شماره ۱، گروه

علاوه بر اینکه زمان انتظار را در کل مسیر کاهش داده ایم، قدرت حفظ هدوی ۱۳ را نیز در کل مسیر و اعتماد به سرویس‌دهی به موقع را در ذهن مسافران افزایش داده ایم. شکل زیر، برای اندازه ناوگان ۴۰، ظرفیت‌های ۱۰۰ و ۱۵۰ نفری اتوبوس‌ها و زمان چرخه ۲۰۰ دقیقه در خط یک رسم شده است.



چگونگی گسیل وسایل نقلیه از ایستگاه اول خط ۱ با توجه به ظرفیت‌های متفاوت ۱۰۰ و ۱۵۰ مسافر

بحث، نتیجه‌گیری و پیشنهادات

با استفاده از مدل ارائه شده در این مقاله، اندازه ناوگان بهینه هر خط حاصل می‌شود.

با استفاده از مدل ارائه شده در این پژوهش، برنامه زمانی حرکت ناوگان بهینه اختصاص یافته به هر خط حاصل می‌شود.

مدل ارائه شده، قابلیت انطباق با دو شرط ظرفیت اتوبوس (پر و کمتر از آن) را در خط دارد.

تابع هدف این مدل زمان انتظار کل مسافران را محاسبه می‌کند. این تابع هدف مجموعی از زمان انتظار مسافرانی است که تازه به ایستگاه رسیده‌اند و همچنین مسافرانی که از سرویس قبلی به دلیل ازدحام آن جا مانده‌اند. پس حجم مسافران ورودی به ایستگاه و همچنین حجم مسافران جا مانده از اتوبوس‌ها مشخص است. در نتیجه با توجه به این

- 4- 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.
- 5- Kocur, G. and Hendrikson, C., "Design of Local Bus Service With Demand Equilibrium", Transportation Sciences, Vol. 16, 1982.
- 6- Ceder, A. and Stern, H. 1981. Deficit function bus scheduling with deadheading trip insertions for fleet size reduction. Transportation Science 15:338-363.
- 7- Qiang, L. and Others, "Study of Method for Evaluation Bus Rapid Transit (BRT) Scheme", Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 5, PP. 390-403, 2005.
- 8- Balvanyos, T., Bethel, W., Gardes, Y., Kourjanskaia, N., Liu, H., Misener, J., Sousa, J., VanderWerf, J., Wei, W. "SmartBRT: A Set of Planning, Analysis and Evaluation Tools for Bus Rapid Transit ". California PATH Research Report UCB-ITS-PRR-2003-7.

پژوهشات و بهینه سازی شبکه، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، مهر ۱۳۸۶.

۲- ابوالقاسم، آرزو، "مکان‌یابی پایانه‌های درون شهری برای شبکه اتوبوسرانی" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۷۶.

۳- سیستم اتوبوسرانی پیشنهادی برای شهر شیراز، مطالعات جامع حمل‌ونقل شیراز، گزارش شماره ۰۸-۰۸، پژوهشکده حمل‌ونقل شریف، دانشگاه صنعتی شریف، اسفند ۱۳۸۰.