iiii miii ngppassnngrr waitingmmhhhhhhhhhhhhtt iotttt atioss Taaaa s way aaaaaaa obbbbbbay li 4

Seyed hossein Razavi hajiagha*
Department of Management, Khatam University, Tehran, Iran, h.razavi@khatam.ac.ir
Yousef Mohammadi
Department of Management, Khatam University, Tehran, Iran, yousefpen@yahoo.com
Shide Sadat Hashemi
Department of Management, Saramadan Andisheh Avina, Tehran, Iran,
shide_hashemi@yahoo.com

Purpose: Regarding urban population growth and importance of time and cost in the societies of today, subway systems have faced with demand increase and passengers waiting time have prolonged. In urban transportation systems especially in subways, the passengers waiting time influences the society satisfaction deeply. Since the emersion of rail network, time and scheduling as important challenges have been emerged. Then the periodic train planning as one of the best solutions was introduced to decrease passenger waiting time, reduce travel length, and increase transportation safety. This challenge should be solved by subway managers. Due to the limited number of trains and equipment on subway lines and increase of their cost-effectiveness in reducing passenger waiting times at intersections, an attempt has been made in this paper to reduce waiting time using optimization models that often do not impose costs on the system. In addition, another aim of this paper is to fill the existing research gap in this area.

Design/methodology/approach: This paper aims to calculate the weights of intersections stations in order to minimize the passenger waiting time through goal programming (Khalili Damghani et al. 2015; Mosadeghi et al. 2010). Many studies have been done on train scheduling and transportation mathematical modelling all around the world (Moghaddam and Mahlooji, 2017; Sadeghieh and Dehnavi-Arani, 2019). The aim of this paper is to minimize the deviation from desirable situation through goal programming. The main function of the proposed model is formulated again along with new construction, auxiliary variables and optimum values. It consists of variables with the concept of ddevitt ion of ses irbble sitttt ion.. .n this ppper, tot h of the vevitt ions of ses irbble sitttt ions rr e shown by d_{ip} and d_{in} which are undesired and should be minimized to achieve the optimum value. For this purpose, the fourth line of Tehran subway system and its intersections sections are considered as the real world problem.

Findings: The model is solved by Lingo and optimum values are calculated. The model is developed based on goal programming and it can reduce the passenger waiting time and satisfaction which results in increased acceptance of public transportation in society. These findings are compared with current values of time tables for first and last movements. Findings indicated that the proposed model can reduce the passenger current waiting time by 42%.

* Corresponding author
Copyright © 2020, University of Isfahan. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/BY-NC-ND/4.0/), which permits others to download this work and share it with others as long as they credit it, but they cannot change it in any way or use it commercially.

Research limitations/implications: In this paper, the accurate amount of passenger population was determined in a day based on lines, separately. Also, it was difficult to collect study data from the Tehran subway system organization. The proposed approach resulted in reduced passenger waiting time. Suggestions for further study include examining and analyzing the factors causing train delay and comparing the results of each single line with another; using simulation method to develop an optimization model for time tabling of train movement in order to optimize energy consumption; calculating and optimizing the number of subway station staff; and optimizing models to design the subway station network.

Practical implications: As Tehran public transportation system is extending to cover more urban regions, the intersection stations will increase. Therefore, the role of these stations will be more tangible. Each intersection station scheduling affects the train movements in other stations and this continues throughout the length of the network. It means that each delay and pause will influence the other intersections, increasingly. The subway system managers can employ this model on other lines and reduce the waiting time of passengers in the whole Tehran subway.

Social implications: As mentioned earlier, the waiting time of passengers in different stations, especially in intersections, is an important factor in using subway system as an effective public transportation system. It will increase or decrease the rate of subway usage. More public transportation usage leads to less air pollution, less traffic and faster travels in the city, which are all desirable for society.

Originality/value: In this paper, a goal programming model was proposed to minimize the deviations in the objective function and subsequently, the passenger waiting time in intersection stations. As the intersection stations are increased, the role of the proposed method can be considered as a solution for public transportation in different cities of Iran.

Keywords: Passengers waiting time, Intersection stations, Optimization models; Intersecting passengers

References

Khalili Damghani, K. & Tjj ik Kvvveh, .., ()))))) aaoal rr ogrmmming to reccce logitt ic sost dnd inrr ease service aaal ity trr oggtott the pppplp aaain.. *Journal of Industrial Management Studies*, 13(37), 91-121.

gog aaaaa a , .. & aa hlooji, H. ()))))) AARotttt simultt ion ott imizat ion approach to urban train ccueuuling rr oblem.. *Industrial Engineering & Management*, 33(2), 117-126.

sos ddeghi, .., . vvsnshir, H. & Tvvakkoli gog aaaaa a , R. ()))))) MMdeling a multi-objective train ccueuuling rr oblem wi t t he intersett ion.. *Journal of Traffic Engineering*, 11(43), 50-56.

Sadeghieh, A. & Dehnavi-Arani, S. (2019). Developing the dynamic cell formation and production planning considering the inter/intra-cell material handling equipment. *Production & Operations Management,* 10(2), 55-73.

مدیریت تولید و عملیات، دوره ۱۱، شماره ۱، پیاپی ۲۰، بهار ۱۳۹۹
دریافت: ۱۳۹۶/۰۹/۲۷ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۲۹
صص: ۲۴- ۴۳

بهینه‌سازی زمان انتظار مسافران در ایستگاه‌های تقاطعی متروی تهران

مطالعهٔ موردی: خط ۴ متروی تهران

سید حسین رضوی حاجی آقا[1*]، یوسف محمدی [2]، شیده سادات هاشمی[3]

۱- استادیار گروه مدیریت دانشگاه خاتم، تهران، ایران، h.razavi@khatam.ac.ir
۲- کارشناسی ارشد گروه مدیریت دانشگاه خاتم، تهران، ایران، yousefpen@yahoo.com
۳- کارشناسی ارشد دپارتمان مدیریت، شرکت سرآمدان اندیشه آوینا، تهران، ایران، shide_hashemi@yahoo.com

چکیده: با توجه به رشد جمعیت شهرنشین و اهمیت زمان و هزینه در جوامع امروزی، سیستم‌های مترو با مسئلهٔ افزایش زیاد تقاضا و به دنبال آن، با افزایش زمان انتظار مسافران مواجه شده‌اند که مدیریت آن، دغدغهٔ شرکت‌های مترو محسوب می‌شود. با توجه به محدودیت تعداد قطارها و تجهیزات در خطوط مترو و هزینه‌بر بودن افزایش آنها برای کاهش زمان انتظار مسافران در ایستگاه‌های تقاطعی، در این مقاله سعی شده است کاهش زمان انتظار مسافران از طریق الگوهای بهینه‌سازی‌ای انجام شود که غالباً هزینه‌ای را به سیستم مربوط تحمیل نمی‌کنند و ضمن کاهش زمان انتظار مسافران، ضعف‌های پژوهش‌های پیشین در این زمینه را نیز پوشش دهد. پژوهش حاضر، ضمن بررسی همهٔ ایستگاه‌های تقاطعی و نیز کل ساعت‌های بهره‌برداری از مترو، الگوی بهینه‌سازی‌ای معرفی می‌کند که زمان انتظار مسافران در ایستگاه‌های تقاطعی خط ۴ متروی تهران را به میزان ۴۰ درصد کاهش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: زمان انتظار مسافران،ایستگاه‌های تقاطعی، الگوهای بهینه‌سازی، مسافران تقاطعی

---

*نویسنده مسؤول

۱- مقدمه

از نخستین روزهای شروع به کار شبکه‌های حمل‌ونقل ریلی، مسئلهٔ زمان و زمان‌بندی، یکی از چالش‌های حیاتی این صنعت مطرح شد. سوانح شدید سال‌های ۱۸۴۰ میلادی، که به‌علت ناهماهنگی ساعت در مناطق مختلف جغرافیایی روی می‌دادند، مزید بر علت شدند تا مسئولان صنعت حمل‌ونقل ریلی، توجه بیشتری به مقولهٔ زمان و زمان‌بندی معطوف کنند. بعدها در شبکهٔ حمل‌ونقل ریلی شهری لندن، زمان‌بندی دوره‌ای به‌عنوان بهترین راه زمان‌بندی و هماهنگی قطارها مطرح شد تا از این طریق، زمان انتظار مسافران و نیز طول سفر آنها کاهش و ایمنی حرکت‌ها افزایش یابد. علت استفاده از چنین برنامهٔ زمان‌بندی، افزایش میزان رضایت مسافران و درنتیجه، انتقال‌نیافتن آنها به سایر وسایل حمل‌ونقل بوده است.در سیستم‌های حمل‌ونقل همگانی شهری، مخصوصاً مترو، زمان انتظار مسافران، تأثیر بسیاری در رضایتمندی مسافران دارد. نامنظم‌بودن اعزام قطارها به بروز تأخیر و افزایش زمان انتظار مسافران و ازدحام در ایستگاه‌های مترو مخصوصاً ایستگاه‌های شلوغ و تقاطعی منجر می‌شود و از میزان رضایتمندی مسافران می‌کاهد و باعث استقبال مسافران از سایر لوازم نقلیهٔ سطح زمین می‌شود؛ بنابراین، سازمان‌های مربوط باید اقداماتی برای افزایش رضایتمندی مسافران انجام دهند و با این اقدامات، حیات خود را تضمین کنند. این کار در سازمانی مانند شرکت بهره‌برداری راه‌آهن شهری تهران و حومه با افزایش تعداد قطارها و نیز کم‌کردن فاصلهٔ زمانی حرکت قطارها میسر است. بدین‌منظور باید تجهیزات خط و ابنیه و ... را بهبود بخشید که این موارد علاوه بر زمان‌بری، باعث ایجاد هزینهٔ زیاد و مشکلات گوناگونی برای مترو می‌شوند؛ پس ناگزیر باید به سمتی رفت که از منابع موجود و دردسترس به بهینه‌ترین شکل ممکن استفاده شود. برنامه‌ریزی حرکت‌ها در خطوط حمل‌ونقل، ازجمله مواردی است که متخصصان با توجه به آن، خطوط حال حاضر حمل‌ونقل را بهبود می‌دهند. بدین‌منظور با ایجاد تغییرات در سرفاصلهٔ زمانی حرکت قطارها یا جدول زمانی حرکت آنها با الگوریتم‌ها و برنامه‌ریزی مربوط به اهداف تعیین‌شده از سوی سازمان دست یافته می‌شود و ضمن کاهش میزان تأخیرها در حرکت قطارها، میزان رضایتمندی مسافران بهبود می‌یابد. در این مطالعه سعی شده است با ارائهٔ الگویی ریاضی، زمان انتظار مسافران در ایستگاه‌های تقاطعی بهینه شود. درادامه، مبانی نظری و پیشینهٔ پژوهش مرور شده است. تاکنون در زمینهٔ مسئلهٔ زمان‌بندی حرکت قطارها، الگوهای متفاوتی پیشنهاد شده‌اند که در چهار گروه اصلی الگوهای تجربی، الگوهای ریاضی، الگوهای شبیه‌سازی و الگوهای ابتکاری و فراابتکاری دسته‌بندی می‌شوند. با توجه به شرایط فیزیکی خطوط و ایستگاه‌ها ممکن است الگویی که برای یک شرکت حمل‌ونقل، بهترین جواب را به مسئلهٔ پیش‌آمده می‌دهد، در شرکتی دیگر، کارایی لازم را نداشته باشد؛ به همین علت باید الگوهای کارا را براساس خصوصیات و ویژگی خطوط و ناوگان حمل‌ونقل شرکت شناسایی کرد و به کار گرفت.

پژوهشگر	موضوع پژوهش
جوانوویچ (۱۹۸۹)	معرفی الگوی حل مسئلهٔ اعزام قطارها با حداقل تأخیر به همراه دو الگوریتم دقیق و یک الگوریتم ابتکاری یا غیردقیق.
میلز[1] و همکاران (۱۹۹۱)	معرفی تکنیک برنامه‌ریزی غیرخطی مختلط با فرض تک‌خطه‌بودن و با اهداف به حداقل رساندن مجموع هزینه‌های سوخت و هزینه‌های تأخیر
میس[2] (۱۹۹۱)	معرفی الگویی برای مسیرهای تک‌خطه و دوخطه در خطوط حمل سنگ معدن
کاپارا و همکاران (۲۰۰۶)	الگوریتم ابتکاری لاگرانژ برای مسئلهٔ زمان‌بندی قطارها برای خطوط راه‌آهن
آلبرکت[3](۲۰۰۹)	معرفی رویکرد بهینه‌سازی دومرحله‌ای برای تعیین برنامهٔ زمان‌بندی بهینه در خطوط مترو
کادارسو[4] و مارین (۲۰۱۲)	حل مسئلهٔ ترکیبی برنامه‌ریزی غیردوره‌ای قطارها و تخصیص ناوگان در شبکه‌های راه‌آهن سریع‌السیر درون‌شهری با لحاظ‌کردن تقاضای مسافران و محدودیت ظرفیت برای کمینه‌کردن هزینه‌های عملیاتی سیستم
چن و همکاران (۲۰۱۴)	معرفی الگوی ارزیابی چندشاخصه با تلفیق روش ارزیابی چندسطحی خاکستری و تاپسیس برای ایستگاه راه‌آهن پکن
رحیمی مزرعه شاهی و همکاران (۲۰۱۶)	معرفی آزمون‌های شبیه‌سازی برای استخراج رابطهٔ متغیرهای ورودی (هد وی) و خروجی (متوسط زمان سفر در شبکه و استفاده از ظرفیت کامل)
کانگ[5]و همکاران (۲۰۱۵)	زمان‌بندی غیردوره‌ای برای ایجاد ایمنی و کیفیت بهتر و کاهش زمان انتظار مسافران و نیز کاهش زمان سفر
کانگ و منگ (۲۰۱۷)	روش بهینه‌سازی جهانی برای حل مسئلهٔ زمان خروج آخرین قطار در شبکهٔ متروهای شهرهای پرجمعیت با استفاده از برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته
اشپیگل[6] (۱۹۷۲)	معرفی الگوی برنامه‌ریزی عدد صحیح برای یافتن بهترین موقعیت برای عبور قطارها از کنار هم
کارای[7] و هارکر (۱۹۹۵)	حل مسئلهٔ زمان‌بندی حرکت قطارهای باری در آمریکای شمالی به‌صورت یک الگوی برنامه‌ریزی مختلط با تابع هدف به حداقل رساندن تأخیرها و هزینه‌های سوخت با کاهش انحراف از برنامه‌ریزی زمان‌های ورود و خروج، انحراف از قانون کار برای خدمه و انحراف از زمان‌بندی برای تفکیک و تشکیل واگن‌ها

مقالات و مطالعاتی در حوزهٔ جابه‌جایی و بهینه‌سازی آن در حوزه‌های دیگر انجام گرفته است؛ از آن جمله عتیقه‌چیان (۱۳۹۵) برای زمان‌بندی کارگاه فولادسازی – ریخته‌گری پیوسته در مجتمع فولاد خوزستان از الگوریتم ترکیبی فراابتکاری مورچگان استفاده کرد. در الگوریتم پیشنهادی، «تخصیص منبع و تعیین توالی» با استفاده از الگوریتم جامعهٔ مورچگان و زمان‌بندی با استفاده از یک الگوریتم ابتکاری پیشرو-پس‌رو و بهینه‌سازی با تمرکز بر توالی عملیات و زمان‌بندی انجام شده است. برادران (۱۳۹۷) برای برآورد تعداد بهینهٔ کانبان‌ها در سیستم‌های کانبان حمل از برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه و شبیه‌سازی استفاده کرده است. این مطالعه در پی یافتن نحوهٔ انتقال مناسب اطلاعات و کاهش انواع اتلاف‌هاست؛ از این‌رو، الگویی مبتنی بر برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح چندهدفه با توابع هدف غیرخطی برای تعیین تعداد کانبان و هدف کاهش هزینه‌های موجودی و حمل‌ونقل توسعه داده شده است. صادقیه و دهنوی آرانی (۱۳۹۸) به توسعهٔ مسئلهٔ یکپارچهٔ تشکیل سلولی پویا و برنامه‌ریزی تولید با در نظر گرفتن وسایل جابه‌جاکنندهٔ مواد بین و درون سلول‌های تولیدی توجه کردند. آنها در این مطالعه، برخی از ویژگی‌های وسایل جابه‌جاکننده نظیر ظرفیت تجهیزات و زمان حرکت درون و بین‌سلولی را در نظر گرفتند و با الگوسازی ریاضی، آن را بهینه‌سازی و برنامه‌ریزی کردند. در داخل کشور با توجه به نوپایی صنعت حمل‌ونقل ریلی درون‌شهری، مطالعات بسیار محدودی در این زمینه انجام شده است. بیشتر این مطالعات به‌علت محدودیت‌هایی نظیر ناآشنایی با تکنولوژی استفاده‌شده در قسمت بهره‌برداری از متروی تهران، مربوط به حوزهٔ حمل‌ونقل ریلی برون‌شهری (راه‌آهن) است و تاکنون در حوزهٔ مترو، مطالعات زیادی انجام نشده است.

پور سید آقایی (۱۳۷۷)	زمان‌بندی حرکت قطارها در شبکه‌های یک‌خطهٔ راه‌آهن مسیر تک‌خطه با کمک روش‌های ابتکاری
شفاهی و میرفندرسکی (۱۳۸۰)	الگوی اولیهٔ زمان‌بندی حرکت قطارها با توجه به زمان مسدودی بلاک‌ها
شفاهی و صادقی (۱۳۸۳)	الگوی شبیه‌سازی زمان‌بندی حرکت قطارها با هدف افزایش قابلیت اطمینان
جمیلی (۱۳۸۵)	الگوریتم ابتکاری
سپهری و پور سید آقایی (۱۳۸۷)	برنامه‌ریزی حرکت قطارها در خطوط یک‌خطه با معرفی الگوی ریاضی مخلوط صفر و به‌کارگیری روش‌هایی همچون تولید محدودیت، نامساوی‌های معتبر، کوچک‌ترکردن ابعاد مسئله و استفاده از روشی ابتکاری
مصدقی و همکاران (۱۳۸۹)	معرفی الگویی با تابع هدف مسئلهٔ کمینه‌کردن تأخیر قطارها و همچنین کمینه‌کردن هزینه‌ها با توجه به محدودیت‌های زمان سفر و محدودیت‌های ایمنی حرکت قطارها
یقینی و همکاران (۱۳۹۲)	استفاده از الگوی برنامه‌ریزی ریاضی و الگوریتم فراابتکاری ژنتیک برای تبدیل جواب‌های به‌دست‌آمده به عدد صحیح برای برنامه‌ریزی خطوط مسافری راه‌آهن
حسن نایبی و همکارانش (۱۳۹۳)	زمان‌بندی خطوط مترو به کمک الگویی شبیه‌سازی از سیستم حمل‌ونقل شهری

با گذشت زمان و به‌علت اهمیت موضوع، پژوهش‌های بسیاری در زمینهٔ حمل‌ونقل انجام شده است؛ اما بیشتر این پژوهش‌ها، ضعف‌هایی مانند پوشش‌ندادن کل زمان بهره‌برداری و نیز در برنگرفتن تمامی خطوط مترو و کاربردی‌نبودن و...دارند؛ به همین علت، پژوهش پیش رو می‌کوشد با در نظر گرفتن کل زمان بهره‌برداری و تمامی خطوط و ایستگاه‌های تقاطعی مترو، نقایص پژوهش‌های پیشین را رفع و الگویی کاربردی برای این شرکت معرفی کند تا زمان انتظار مسافران در ایستگاه‌های تقاطعی به حداقل برسد.

۲- مروری بر مبانی نظری

مطالعهٔ حاضر برای کاهش زمان انتظار مسافران در ایستگاه‌های تقاطعی متروی شهر تهران، الگویی را با بررسی خط چهار آن ارائه کرده است. به‌طور کلی، برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، یکی از شاخه‌های علم تحقیق در عملیات است که سابقه‌ای بیش از هشتاد سال دارد. اولین برنامه‌ریزی حمل‌ونقل در دههٔ چهل در آمریکا انجام شد که هدف آن، سنجش ترافیک موجود و برآورد آن در آینده از طریق روش‌های سادهٔ ریاضی بود (اصغرپور و هاشمی، ۱۳۸۴).

الگوی مدنظر در پژوهش حاضر در دستهٔ الگوهای برنامه‌ریزی خط تعریف می‌شود. برنامه‌ریزی مسیرهای مسافری یا برنامه‌ریزی خط یکی از برنامه‌ریزی‌های استراتژیک در برنامه‌ریزی حمل‌ونقل مسافر در خطوط ریلی است. در مبانی نظری مربوط، یک خط، مسیری است بین یک مبدأ و مقصد با ایستگاه‌های توقف مشخص که تعداد تکرار معین حرکت ترن/ قطار است. حرکت قطارهای مختلف در یک خط، مبادی و مقاصد مشخص و زمان‌های اعزام و ورود متفاوت دارد (یقینی و همکاران، ۱۳۹۰). زمان سفر شامل مدت‌زمان انتظار مسافران و زمان جابه‌جایی ایشان، معمولاً مبنایی برای رضایتمندی مسافران مترو در نظر گرفته می‌شود (ژو و همکاران، ۲۰۱۶). در شهرهای پرجمعیت و پرتردد، شبکهٔ ریلی شهری و تعداد خطوط خدمت‌رسانی به مردم جامعه، تشکیل‌دهندهٔ استخوان‌بندی اصلی سیستم حمل‌ونقل عمومی آن شهر محسوب می‌شود. در این کلان‌شهرها، مردم برنامه‌ها و اقدامات روزانهٔ خود را براساس این خطوط و تردد با آنها تنظیم می‌کنند؛ از این‌رو، برنامه‌ریزی و زمان‌بندی خطوط مترو شهری، نقش مهم، عمده و تأثیرگذاری در زندگی فردی و کاری افراد دارد (کانگ و منگ، ۲۰۱۷).

با توجه به اهمیت و سهم حمل‌ونقل ریلی در مدیریت شهری، بهینه‌سازی مسئلهٔ زمان‌بندی در خطوط ریلی، ازجمله مهم‌ترین مواردی است که به استفادهٔ بیشتر از زیرساخت‌های موجود در شبکه کمک می‌کند. زمان‌بندی مشخص می‌کند که هر قطار چه زمانی به هر ایستگاه وارد و چه زمانی از آن خارج می‌شود. در مسائل زمان‌بندی در خطوط ریلی شهری (مترو)، به‌علت فاصلهٔ کم ورود قطارها به ایستگاه‌ها، تعیین سرفاصله‌ها، که همان بازه زمانی بین ورود دو قطار متوالی به یک ایستگاه است، متغیر تصمیم در نظر گرفته می‌شود. در تهیهٔ این زمان‌بندی معمولاً هدف، بیشینه‌کردن استفاده از خطوط ریلی و قطارهای موجود است؛ به‌گونه‌ای که محدودیت‌های ناشی از نوع ریل‌ها، سرعت حرکت قطارها، محدودیت زمان توقف در ایستگاه‌ها، محدودیت‌های مربوط به سرفاصله‌ها، محدودیت تعداد خطوط در هر ایستگاه و محدودیت‌های ایمنی و ملاحظات مربوط به آن تأمین شود. در سال‌های اخیر، مدت‌زمان انتظار مسافران، به‌عنوان معیار عملکرد مهمی برای ارزیابی در بهینه‌کردن عملکرد شبکه‌های ریلی مطرح شده است (مقدم و محلوجی، ۱۳۹۶). عملیات خط مترو با استفاده از اجزای زمان اعزام، سرعت حرکت، مدت توقف در ایستگاه، مدت استراحت در پایانه، فرایند ورود مسافران به ایستگاه‌ها و فرایند سوار و پیاده‌شدن مسافران تشریح می‌شود که قاعدتاً باید مبنای برنامه‌ریزی حرکت قطارها در مسئلهٔ کاهش زمان انتظار مسافران قرار گیرند (همان).

در پژوهش حاضر برای الگوسازی مسئلهٔ مدنظر، از الگویی ریاضی برای کمینه‌سازی میزان انحرافات از وضعیت مطلوب استفاده شده است. این منطق، اساس برنامه‌ریزی آرمانی را شکل می‌دهد. برنامه‌ریزی آرمانی، یکی از روش‌های حل مسائل تصمیم‌گیری چندهدفه و روشی بسیار کارآمد در تصمیم‌گیری چندهدفه است که نگرش متفاوتی دربارهٔ حل انواع مسائل برنامه‌ریزی با اهداف چندگانه و متعارض دارد. برخلاف برنامه‌ریزی خطی، که به‌طور مستقیم به بهینه‌سازی تابع هدف توجه می‌کند، توجه برنامه‌ریزی آرمانی به کاهش انحراف بین اهداف و راه حل بهینه است. تابع هدف مسئلهٔ اصلی به‌صورت محدودیت جدید همراه با متغیر کمکی و مقدار بهینهٔ مدنظر دوباره فرمول‌بندی می‌شود. متغیرهای کمکی را متغیرهای انحراف از آرمان می‌نامند. روش‌های برنامه‌ریزی آرمانی، ساختار مشترکی دارند که هدف آنها به حداقل رساندن انحراف نامساعد هر یک از اهداف از سطح مشخص آرمان‌های مربوط به آنهاست؛ به این صورت که در تابع هدف مسئله، مجموع انحرافات نامطلوب از هر آرمان- که تصمیم‌گیرنده، آن را تعیین می‌کند- به حداقل می‌رسد. متغیرهای انحرافی بر مقادیری دلالت دارند که نشان می‌دهند کدام‌یک از آرمان‌های متعدد نسبت به سطوح مشخص خود، بیشتر یا کمتر برآورده شده‌اند. برونداد این تکنیک مشخص خواهد کرد که کدام‌یک از آرمان‌ها برآورده شده، کدام‌یک به دست نیامده و به چه میزان برآورده نشده است (خلیلی دامغانی و تاجیک خاوه، ۱۳۹۴).

روش برنامه‌ریزی آرمانی، جزء روش‌هایی است که به اطلاعات اولیه به‌صورت کمّی و کیفی از تصمیم‌گیرندگان نیاز دارد. اطلاعات کمّی، همان مقدار هدف برای هر تابع و اطلاعات کیفی، چگونگی دسترسی به هدف است. با استفاده از روش برنامه‌ریزی آرمانی، مسئلهٔ چندهدفه با k هدف، m محدودیت و q متغیر به یک مسئلهٔ تک‌هدفه با $m + k$ محدودیت و $q + 2k$ متغیر تبدیل می‌شود (یقینی، ۱۳۹۰ به نقل از Asgharpour, 2009).

در بخش بعدی، الگوسازی و روش اجرای پژوهش، سپس مطالعهٔ موردی و حل آن و درانتها، مقایسهٔ نتیجهٔ حاصل‌شده با سیستم فعلی بهره‌برداری متروی تهران و نوآوری پژوهش بیان شده است.

۳- روش پژوهش

۳-۱-نمادگذاری و الگوسازی

هدف پژوهش حاضر، معرفی الگویی است که با توجه به وزن‌های داده‌شده به هر یک از ایستگاه‌های تقاطعی، زمان انتظار مسافران تقاطعی را به حداقل برساند. براساس الگوی خطیبی و همکاران (۱۳۹۱) در تابع هدف از متغیری با مفهوم «انحراف از وضعیت مطلوب» استفاده می‌شود (همان). منظور از وضعیت مطلوب، شرایطی است که در آن مسافران تقاطعی برای تعویض خط و سوارشدن به قطار در سکوی بعدی معطل نمی‌شوند و به‌محض رسیدن به سکوی خط دیگر، سوار قطار می‌شوند؛ یعنی در این شرایط، مسافران در خط مبدأ بعد از پیاده‌شدن از قطار و رسیدن به سکوی خط مقصد، زمانی را منتظر نمی‌مانند و به محض رسیدن به سکوی مقصد، سوار اولین قطار می‌شوند و به مسیر خود ادامه می‌دهند. در این پژوهش، هر گونه انحراف از این وضعیت برای مترو و مسافر، نامطلوب تلقی می‌شود.

برای نشان‌دادن انحراف از وضعیت مطلوب از دو متغیر d_{ip} و d_{in} استفاده می‌شود که هر دو انحراف نامطلوب هستند و برای دستیابی به حالت بهینه باید به حداقل میزان ممکن برسند؛ بنابراین شکل اولیهٔ تابع هدف به‌صورت ذیل خواهد بود .

$$\text{Min } z = w_i(d_{in} + d_{ip}) \qquad (۱)$$

در این رابطه، w_i وزن هر کدام از ایستگاه‌های تقاطعی است که براساس نظر خبرگان واحدهای ذی‌ربط مترو به ایستگاه‌های تقاطعی هر کدام از مسیرها تعلق گرفته و در جدول ۱ نشان داده شده است. با اعمال این ضرایب در تابع هدف، شکل اولیهٔ تابع به‌صورت ذیل خواهد بود:

تمامی متغیرها و پارامترهای به‌کاررفته در فرایند الگوسازی در جدول ۱ ارائه شده است.

$A_{s,i,m}$:زمانی که قطار خط i از سمت ایستگاه m به ایستگاه تقاطعی s می‌رسد.

$A_{s,j,l}$: زمانی که قطار خط j از سمت ایستگاه l به ایستگاه تقاطعی s می‌رسد.

$NT_{s,i,j}$: زمان لازم برای حرکت مسافر تقاطعی از سکوی خط i به سمت سکوی خط j در ایستگاه تقاطعی s.

$ST_{i,m,k}$: زمان حرکت اولین قطار در خط i از سمت ایستگاه m با سرفاصلهٔ زمانی (هدوی) k

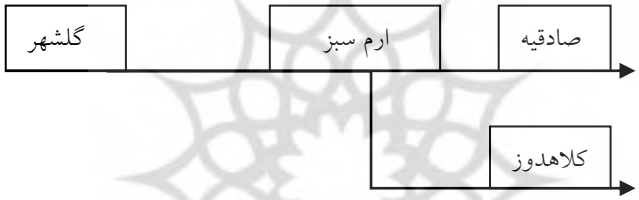
w_i: وزن هر یک از مسیرهای ایستگاه‌های تقاطعی؛

d_{ip} و d_{in}: میزان انحراف از وضعیت مطلوب را نشان می‌دهند که هر دو باید به حداقل برسند؛

جدول ۱- معرفی متغیرها و پارامترهای ضروری الگو

ردیف	متغیر / پارامتر	شرح
۱	$A_{s,i,m}$	زمانی که قطار خط i از سمت ایستگاه m به ایستگاه تقاطعی s می‌رسد.
۲	$NT_{s,i,j}$	زمان لازم برای حرکت مسافر تقاطعی از سکوی خط i به سمت سکوی خط j در ایستگاه تقاطعی s.
۳	$ST_{i,m,k}$	زمان حرکت اولین قطار در خط i از سمت ایستگاهm با سرفاصلهٔ زمانی (هدوی) k
۴	d_{in} و d_{ip}	انحراف از وضعیت مطلوب
۵	$\beta_{i,m,s}$	مشخص‌کنندهٔ زمان لازم برای رسیدن قطار خط i از سمت ایستگاه m به سمت ایستگاه تقاطعی s است
۶	H_i	سرفاصلهٔ زمانی حرکت قطارها
۷	w_i	وزن هر یک از مسیرهای ایستگاه‌های تقاطعی

به‌عنوان مثال، براساس شکل ۱ اگر زمان لازم برای حرکت مسافر از سکوی خط ۵ به سکوی خط ۴ در ایستگاه تقاطعی ارم سبز ($NT_{E,5,4}$) برابر با اختلاف زمانی رسیدن قطارها در ایستگاه تقاطعی ($A_{ER,5,G0} - A_{ER,4,KO}$) باشد، انحراف از وضعیت مطلوب مقدار صفر به خود می‌گیرد. درواقع، در این حالت، مسافر تقاطعی، هیچ زمانی را برای انتظار سپری نمی‌کند و به محض رسیدن به سکوی مدنظر، سوار قطار می‌شود.



شکل ۱- الگوی شماتیک ایستگاه تقاطعی ارم سبز

$$A_{\text{ارم سبز، 5 خط، گلشهر خط}} - A_{\text{ارم سبز، 4 خط، کلاهدوز خط}} + d_{in} - d_{ip} = NT_{\text{ارم سبز، 5 خط، 4 خط}} \quad (۲)$$

$$A_{ER,5,G0} - A_{ER,4,KO} + d_{in} - d_{ip} = NT_{E,5,4}$$

برای مشخص‌کردن مقدار $A_{s,i,m}$ از رابطهٔ ذیل استفاده می‌کنیم:

$$ST_{i,m,k} + \beta_{i,m,s} = A_{s,i,m} \quad (۳)$$

که در این رابطه، مقدار $\beta_{i,m,s}$ مشخص‌کنندهٔ زمان لازم برای رسیدن قطار خط i از سمت ایستگاه m به سمت ایستگاه تقاطعی s است.

برای تشخیص $A_{s,i,m}$ از رابطهٔ ذیل استفاده می‌شود:

$$ST_{i,m,k} + \beta_{i,m,s} = A_{s,i,m} \quad (۴)$$

که $\beta_{i,m,s}$ زمان لازم برای رسیدن قطار خط i از سمت ایستگاه m به سمت ایستگاه تقاطعی s است .

ساختار کلی الگوی پیشنهادی در رابطهٔ (۵) نشان داده شده است.

$$\begin{aligned} &\mathrm{Min\ Z} = w_i\left(d_{in} + d_{ip}\right) \\ &A_{s,i,m} - A_{s,j,l} + d_{in} - d_{ip} = NT_{s,i,j} \\ &0 \le ST_{i,m,k} \le 20 \\ &d_{in} \ge 0 \\ &d_{ip} \ge 0 \end{aligned} \qquad (۵)$$

پژوهش حاضر، پژوهشی کاربردی است که برای کاهش زمان انتظار مسافران در ایستگاه‌های تقاطعی مترو تهران انجام شده است. در این پژوهش سعی شده است الگویی پیشنهاد شود که زمان انتظار مسافران تقاطعی مترو را کاهش دهد و به ترافیک روان مسافران و حرکت بهینهٔ قطارها کمک کند. اساس این پژوهش، الگوسازی ریاضی است. این پژوهش در ۴ گام براساس مراحل ذیل انجام خواهد شد.

۱- مطالعهٔ سیستم فعلی شرکت بهره‌برداری راه‌آهن شهری تهران و حومه؛

۲- تعیین اولویت ایستگاه‌های تقاطعی؛

۳- سرفاصلهٔ زمانی حرکت قطارها و زمان رسیدن آنها به ایستگاه‌های تقاطعی و تعویض خط توسط مسافران.

سرفاصلهٔ زمانی حرکت قطارها (هدوی) و زمان رسیدن آنها به ایستگاه‌های تقاطعی از وب‌سایت شرکت بهره‌برداری راه‌آهن شهری تهران و حومه و خود ایستگاه‌های مترو به دست می‌آید. براساس جدول زمان‌بندی ازپیش‌تعیین‌شده برای سرفاصلهٔ زمانی حرکت قطارها در ساعت‌های مختلف بهره‌برداری و نیز خطوط مختلف متغیر است؛ ولی زمان رسیدن قطارهای هر کدام از خطوط به ایستگاه‌های تقاطعی ثابت است. سرفاصلهٔ زمانی حرکت قطارها در همهٔ خطوط، بین ۰ تا ۲۰ دقیقه متغیر است؛ بنابراین در محدودیت‌ها نیز این بازه ۰ تا ۲۰ لحاظ می‌شود. علت آن نیز ثابت‌بودن طول مسیر و سرعت سیر قطارهاست. برای به دست آوردن زمان لازم برای تعویض خطوط در ایستگاه‌های تقاطعی باید در ساعات مختلف بهره‌برداری در سکوی هر کدام از ایستگاه‌ها حاضر بود و زمان لازم برای رفتن از سکوی خطی به خطی دیگر را با ساعت زمان‌سنج ثبت کرد.

۴- تعیین محدودیت‌های الگو در هر ایستگاه تقاطعی و ایجاد الگو.

برای به دست آوردن محدودیت‌های مدنظر باید زمان اعزام قطارهای هر دو خط درگیر از مبدأ و مقصد هر خط معلوم باشد. با آگاهی از اینکه زمان رسیدن قطارها به ایستگاه‌های تقاطعی چه زمانی خواهد بود، محدودیت مربوط به هر کدام از مسیرهای موجود به دست می‌آید. درنهایت، با در کنار هم قراردادن متغیرها و محدودیت‌ها، الگوی نهایی ایجاد می‌شود.

۳-۲- حل الگو

بعد از تکمیل‌شدن الگوی نهایی به حل آن اقدام می‌شود. با توجه به اینکه الگوی نهایی، الگویی خطی است، برای حل الگوهای خطی، نرم‌افزار لینگو، جزء کاراترین نرم‌افزارهاست. با تغییر متغیر، همهٔ محدودیت‌های مسئله و متغیرهای تصمیم الگو در نرم‌افزار بهینه‌سازی لینگو وارد می‌شوند و ضمن مقایسهٔ جواب‌های به‌دست‌آمده با تحقیقات مشابه، جواب‌های حاصل‌شده از الگو تحلیل و بررسی می‌شوند.

۴- بحث: مطالعهٔ موردی؛ خط ۴

۴-۱- مطالعهٔ سیستم فعلی

شرکت بهره‌برداری راه‌آهن شهری تهران و حومه در سال ۱۹۹۹ با افتتاح خط برون‌شهری تهران کرج افتتاح شد و سپس خطوط درون‌شهری به ظرفیت این شبکه اضافه شدند. در حال حاضر، خطوط فعال متروی تهران عبارتند از خطوط ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ و به‌زودی خط ۶ آن نیز افتتاح خواهد شد. خط ۱ متروی تهران، که شمال تهران را به جنوب آن متصل می‌کند، ۲۹ ایستگاه فعال دارد که در دو سر آن و در شمال ایستگاه تجریش و در جنوب ایستگاه کهریزک قرار دارد. همانگونه که قبلاً نیز اشاره شد، ایستگاه‌هایی که دو خط مترو را به یکدیگر متصل می‌کنند، ایستگاه‌های تقاطعی نامیده می‌شوند که خط ۱ مترو شامل ایستگاه‌های تقاطعی شهید بهشتی با خط ۳، دروازه دولت با خط ۴ و امام خمینی با خط ۲ است. خط ۲ متروی تهران، که شرق را به غرب متصل می‌کند، ۲۲ ایستگاه فعال دارد که ایستگاه‌های صادقیه با خط ۵ و ۲، ایستگاه تقاطع شادمان و دروازه شمیران با خط ۴ و ایستگاه دانشگاه امام علی با خط ۳ و ایستگاه امام خمینی با خط ۱ به‌عنوان ایستگاه‌های تقاطعی یاد می‌شوند. خط ۳ متروی تهران، که جنوب غرب را به شمال غرب تهران متصل می‌کند، ۲۶ ایستگاه فعال دارد که از این تعداد، ایستگاه‌های شهید بهشتی با خط ۱، ایستگاه دانشگاه امام علی با خط ۲ و ایستگاه تئاتر شهر با خط ۴ ایستگاه‌های تقاطعی هستند. خط ۴ متروی تهران نیز از ایستگاه ارم سبز شروع و به ایستگاه شهید کلاهدوز ختم می‌شود و ۱۹ ایستگاه فعال دارد که از این میان، ایستگاه‌های دروازه دولت با خط ۱ و دروازه شمیران و تقاطع شادمان با خط ۲ و ایستگاه تئاتر شهر با خط ۳ و نیز ایستگاه بیمه با قطعهٔ فرودگاه مهرآباد و درنهایت، ارم سبز با خط ۵ تقاطعی هستند. با توجه به اطلاعات مذکور و اینکه خط متروی مدنظر این پژوهش، خط ۴ است، ایستگاه‌های تقاطعی ارم سبز، بیمه، تقاطع شادمان، تئاتر شهر، دروازه شمیران و دروازه دولت بررسی می‌شوند. شکل ۲ نمایی از خطوط متروی فعال شهر تهران را نشان می‌دهد.

۴-۲- اولویت ایستگاه‌های تقاطعی خط ۴

تجربیات و مطالعات شرکت بهره‌برداری راه‌آهن شهری تهران و حومه نشان می‌دهد ایستگاه‌های تقاطعی در همهٔ خطوط، اهمیت فراوانی در ترافیک روان و جابه‌جایی مسافر دارند. خود ایستگاه‌های تقاطعی نیز اهمیت و وزن متفاوتی در هر خط دارند که این تفاوت باید در الگوی پژوهش منظور شود. مواردی نظیر تعداد مسافران ایستگاه مدنظر و نیز منطقهٔ جغرافیایی از شهر که ایستگاه در آن واقع شده است، در اهمیت ایستگاه‌ها نقش بسزایی دارند؛ به‌عنوان‌مثال، ایستگاه تقاطعی بیمه، تعداد مسافران کمتری دارد؛ اما به‌علت اتصال به پایانه‌های مسافری فرودگاه مهرآباد از وزن و اهمیت بیشتری برخوردار است و به‌علت زیادبودن سرفاصلهٔ زمانی حرکت قطارها- که در حال حاضر، ۱۵ دقیقه است- اگر مسافر نتواند به قطار حاضر برسد، باید حداقل ۱۵ دقیقه منتظر قطار بعدی بماند که در این صورت، احتمال جاماندن مسافر از پرواز وجود دارد. در پایان‌نامه‌ای با نام «مدلی برای کاهش زمان انتظار مسافران در ایستگاه‌های تقاطعی متروی تهران» (خطیبی و همکاران، ۱۳۹۱) وزن‌دهی به ایستگاه‌های تقاطعی، فقط با

شاخص جمعیت انجام گرفته است که این دیدگاه، مواردی مانند اهمیت منطقه جغرافیایی را پوشش نمی‌دهد؛ بنابراین در این پژوهش سعی شده است با توجه به شاخص‌های تعداد مسافران ایستگاه‌های تقاطعی، منطقهٔ جغرافیایی و اهمیت رسیدن به قطار خطی دیگر در ایستگاه‌های تقاطعی نسبت به تعیین وزن هر کدام از ایستگاه‌های تقاطعی اقدام شود تا الگو از نتایج و کاربرد بهتری در مقایسه با الگوهای قبلی بهره‌مند شود. به‌علت زیادبودن حجم مسافران در ایستگاه‌های تقاطعی، صرفاً درصد مسافران تقاطعی خط ۴ استخراج شد که به‌ترتیب برای ایستگاه‌های تقاطعی ارم سبز، ۱۷ درصد؛ بیمه، ۴ درصد؛ شادمان، ۱۰ درصد؛ تئاتر شهر، ۲۴ درصد، دروازه دولت، ۳۰ درصد و دروازه شمیران، ۱۵ درصد در نظر گرفته شده‌اند.

شکل۲– نقشهٔ خطوط فعال متروی تهران

۴-۲-۱ اعمال ضریب اولویت‌های ایستگاه‌های تقاطعی در الگو (w_i)

ضرایب هر کدام از مسیرهای ایستگاه‌های تقاطعی در جدول ذیل آمده است که در الگوی نهایی در تابع هدف اعمال خواهند شد.

جدول ۲- وزن مسیرهای مختلف ایستگاه‌های تقاطعی

وزن به درصد	مسیر	متغیر
۸	مسیر گلشهر / صادقیه – ایستگاه تقاطعی ارم سبز	$d_{1n} - d_{1p}$
۱	مسیر صادقیه / گلشهر – ایستگاه تقاطعی ارم سبز	$d_{2n} - d_{2p}$
۸	مسیر کلاهدوز / ارم سبز – ایستگاه تقاطعی ارم سبز	$d_{3n} - d_{3p}$
۰	مسیر ارم سبز / کلاهدوز – ایستگاه تقاطعی ارم سبز	$d_{4n} - d_{4p}$
۱/۲۵	مسیر ارم سبز / کلاهدوز – ایستگاه تقاطعی بیمه	$d_{5n} - d_{5p}$
۱/۲۵	مسیر کلاهدوز / ارم سبز – ایستگاه تقاطعی بیمه	$d_{6n} - d_{6p}$
۰/۵	مسیر ترمینال ۴ و ۶/ بیمه – ایستگاه تقاطعی بیمه به سمت ارم سبز	$d_{7n} - d_{7p}$
۱	مسیر ترمینال ۴ و ۶ / بیمه– ایستگاه تقاطعی بیمه به سمت کلاهدوز	$d_{8n} - d_{8p}$
۲	مسیر ارم سبز / کلاهدوز– ایستگاه تقاطعی شادمان/ صادقیه	$d_{9n} - d_{9p}$
۳	مسیر ارم سبز/کلاهدوز– ایستگاه تقاطعی شادمان/فرهنگسرا	$d_{10n} - d_{10p}$
۲	مسیر صادقیه / فرهنگسرا – ایستگاه تقاطعی شادمان/ ارم سبز	$d_{11n} - d_{11p}$
۳	مسیر صادقیه / فرهنگسرا – ایستگاه تقاطعی شادمان/ کلاهدوز	$d_{12} - d_{12p}$
۶	مسیر ارم سبز / کلاهدوز– ایستگاه تقاطعی تئاتر شهر/ قائم	$d_{13n} - d_{13p}$
۶	مسیر ارم سبز / کلاهدوز– ایستگاه تقاطعی تئاتر شهر / آزادگان	$d_{14n} - d_{14p}$
۶	مسیر قائم/ آزادگان– ایستگاه تقاطعی تئاتر شهر/ ارم سبز	$d_{15n} - d_{15p}$
۶	مسیر قائم/ آزادگان– ایستگاه تقاطعی تئاتر شهر/ کلاهدوز	$d_{16n} - d_{16p}$
۸	مسیر ارم سبز / کلاهدوز– ایستگاه تقاطعی دروازه دولت/ شهرری	$d_{17n} - d_{17p}$
۷	مسیر ارم سبز / کلاهدوز– ایستگاه تقاطعی دروازه دولت/ تجریش	$d_{18n} - d_{18p}$
۸	مسیر تجریش / شهرری– ایستگاه تقاطعی دروازه دولت/ ارم سبز	$d_{19n} - d_{19p}$
۷	مسیر تجریش / شهرری– ایستگاه تقاطعی دروازه دولت/ ارم سبز	$d_{20n} - d_{20p}$
۲	مسیر ارم سبز / کلاهدوز– ایستگاه تقاطعی دروازه شمیران/ صادقیه	$d_{21n} - d_{21p}$
۶	مسیر ارم سبز / کلاهدوز– ایستگاه تقاطعی دروازه شمیران/ فرهنگسرا	$d_{22n} - d_{22p}$
۲	مسیر صادقیه/فرهنگسرا– ایستگاه تقاطعی دروازه شمیران/ ارم سبز	$d_{23n} - d_{23p}$
۵	مسیر صادقیه/فرهنگسرا– ایستگاه تقاطعی دروازه شمیران/ کلاهدوز	$d_{24n} - d_{24p}$

با اختصاص‌دادن درصدهای مذکور به ایستگاه‌های تقاطعی، وزن متغیرهای تابع هدف در الگوی نهایی به دست می‌آیند.

۴-۳- سرفاصلهٔ زمانی گذر قطارها H_i

در مطالعات قبلی، سرفاصلهٔ زمانی گذر قطارها جزء متغیرهای مستقل الگو لحاظ شده بودند که با توجه به تغییر تقاضا، فرض ثابت‌بودن سرفاصلهٔ زمانی گذر قطارها باعث ناکارآمدی الگو می‌شود. در پژوهش پیش رو، سرفاصله زمانی گذر قطارها دقیقاً مطابق جدول زمان‌بندی شرکت بهره‌برداری راه‌آهن شهری تهران و حومه لحاظ شده است.

۴-۳-۱- حرکت از سکوی خط i به سمت سکوی ($jNT_{s,i,j}$)

هدف از پژوهش حاضر، تمرکز بر کاهش زمان مسافران تقاطعی است. مسافران تقاطعی ابتدا سوار قطار خط i می‌شوند و پس از طی مسیری در مترو در یک ایستگاه تقاطعی از قطار پیاده می‌شوند و به سمت سکوی j در خط بعدی حرکت می‌کنند. برای دستیابی به الگوی بهینه لازم است زمان حرکت از یک سکو به سمت سکوی دیگر در خطی دیگر در دست باشد و در الگوی نهایی اعمال شود. در پژوهش حاضر، به‌علت ضعف نتایج پژوهش‌های گذشته، به جای سرشماری مسافران تقاطعی، که به‌علت زیادبودن حجم مسافر و نیز مشخصات و ویژگی‌های فیزیکی ایستگاه‌ها تقریباً ناممکن است، از عامل زمان حرکت اولین و آخرین مسافر تقاطعی هر قطار، با دو سرعت پیاده‌روی پایین و بالا استفاده می‌شود تا جواب به‌دست‌آمده، کاربردی‌تر و جامع‌تر شود. نحوهٔ کار به این صورت است که با حضور پژوهشگر در سکوی هر یک از ایستگاه‌های تقاطعی، ابتدا در دورترین نقطه از قسمت خروجی سکو به سمت سکوی خط دیگر مستقر می‌شود و پس از توقف کامل قطار بر روی سکو و بازشدن درهای قطار به‌عنوان آخرین مسافر قطار و با سرعت اندک در طول سکو حرکت می‌کند و هم‌زمان کرونومتر فعال می‌شود. به محض رسیدن به نزدیک‌ترین قسمت سکوی خط بعدی، زمان ثبت می‌شود. این زمان، زمان لازم برای حرکت آخرین مسافر با سرعت کم و از دورترین نقطهٔ سکوی خط i به نزدیک‌ترین نقطهٔ خط j است. زمان بعدی از ادامهٔ مسیر از دورترین نقطهٔ سکوی خط i به دورترین نقطهٔ خط j و با سرعت کم به دست می‌آید. سومین حالت با سرعت کم نیز مربوط به وضعیتی است که از نزدیک‌ترین نقطهٔ سکوی خط i به نزدیک‌ترین نقطهٔ خط j حرکت می‌شود. همین مراحل برای اولین مسافری که از قطار پیاده می‌شود و با سرعت زیاد، ادامهٔ مسیر می‌دهد نیز تکرار می‌شود تا برای هر مسیر، ۶ زمان به دست آید. میانگین این ۶ زمان به‌عنوان زمان لازم برای حرکت از سکوی خط i به سکوی خط j و در مسیر مدنظر لحاظ می‌شود.

۴-۳-۲- زمان لازم برای حرکت از سکوی خط i به سمت سکوی j در ایستگاه‌های تقاطعی

مسیر گلشهر/ صادقیه – ایستگاه تقاطعی ارم سبز و بالعکس

در دو تاریخ مختلف و در ساعات ۰۷:۳۰ و ۱۸:۳۸ ضمن حضور در ایستگاه ارم سبز نسبت به ثبت زمان‌های ذکرشده اقدام شده است. همین مراحل در ایستگاه ارم به سمت ایستگاه بیمه و سایر ایستگاه‌ها نیز انجام شده است.

زمان حرکت آخرین نفر با سرعت کم از دورترین نقطهٔ سکوی ارم سبز به دورترین نقطهٔ سکوی گلشهر: ۲۵:۷ دقیقه	زمان حرکت آخرین نفر با سرعت کم از دورترین نقطهٔ سکوی ارم سبز به نزدیک‌ترین نقطهٔ سکوی گلشهر: ۵۳:۶ دقیقه
زمان حرکت آخرین نفر با سرعت کم از نزدیک‌ترین نقطهٔ سکوی ارم سبز به نزدیک‌ترین نقطهٔ سکوی گلشهر: ۲۴:۶ دقیقه	زمان حرکت آخرین نفر با سرعت زیاد از دورترین نقطهٔ سکوی ارم سبز به دورترین نقطهٔ سکوی گلشهر: ۶ دقیقه
زمان حرکت آخرین نفر با سرعت زیاد از دورترین نقطهٔ سکوی ارم سبز به نزدیک‌ترین نقطهٔ سکوی گلشهر: ۲۳:۵ دقیقه	زمان حرکت آخرین نفر با سرعت زیاد از نزدیک‌ترین نقطهٔ سکوی ارم سبز به نزدیک‌ترین نقطهٔ سکوی گلشهر: ۰۱:۵ دقیقه

$$\frac{7:25+6:53+6:24+6+5:23+5:01}{6}=6':02''=۰۴/۶$$

زمان مدنظر برای بقیهٔ ایستگاه‌ها و مسیرهای تقاطعی به همین شکل انجام خواهد شد.

در رابطهٔ $\text{Min}\, z = w_i(d_{in}+d_{ip})$، w_i وزن هر کدام از ایستگاه‌های تقاطعی است که براساس نظر خبرگان واحدهای ذی‌ربط مترو به ایستگاه‌های تقاطعی هر کدام از مسیرها تعلق گرفته و در جدول ۲ نشان داده شده است. با اعمال این ضرایب در تابع هدف، شکل اولیهٔ تابع به‌صورت ذیل خواهد بود:

$$\begin{aligned}\text{Min}\, z = {} & 0.08(d_{1n}+d_{1p})+0.01(d_{2n}+d_{2p})+0.08(d_{3n}+d_{3p})+0.0(d_{4n}+d_{4p})+0.125(d_{5n}+d_{5p})\\ & +0.125(d_{6n}+d_{6p})+0.005(d_{7n}+d_{7p})+0.01(d_{8n}+d_{8p})+0.02(d_{9n}+d_{9p})\\ & +0.03(d_{10n}+d_{10p})+0.02(d_{11n}+d_{11p})+0.03(d_{12n}+d_{12p})+0.06(d_{13n}+d_{13p})\\ & +0.06(d_{14n}+d_{14p})+0.06(d_{15n}+d_{15p})+0.06(d_{16n}+d_{16p})+0.08(d_{17n}+d_{17p})\\ & +0.07(d_{18n}+d_{18p})+0.08(d_{19n}+d_{19p})+0.07(d_{20n}+d_{20p})+0.02(d_{21n}+d_{21p})\\ & +0.06(d_{22n}+d_{22p})+0.02(d_{23n}+d_{23p})+0.05(d_{24n}+d_{241p})\end{aligned}$$

۴-۳-۳- جدول‌های سرفاصلهٔ زمانی حرکت قطارها (H_i)

سرفاصلهٔ زمانی حرکت قطارها (هدوی) جزء متغیرهای تصمیم در الگوست و در طول ساعات مختلف بهره‌برداری مترو متغیر است. در الگوی نهایی و در متغیر $ST_{i,m,k}$ با اندیس سوم k نشان داده می‌شود. اندیس k برای هدوی‌های متفاوت اعزام قطارها کاربرد دارد. مقادیر آن نیز از وب‌سایت شرکت بهره‌برداری راه‌آهن شهری تهران و حومه استخراج شده و براساس جدول‌های ذیل است.

جدول ۳- زمان‌بندی سرفاصلهٔ گذر قطارها در خط ۱

از مبدأ ایستگاه شهرری		از مبدأ ایستگاه تجریش	
شنبه تا چهارشنبه		شنبه تا چهارشنبه	
ساعت	فاصلهٔ گذر	ساعت	فاصلهٔ گذر
۵:۳۰ تا ۵:۳۷	هر ۷ دقیقه	۵:۳۰ تا ۶	هر ۱۵ دقیقه
۵:۳۷ تا ۱۹:۰۲	هر ۵ دقیقه	۶ تا ۶:۳۰	هر ۱۰ دقیقه
۱۹:۰۲ تا ۲۰:۴۰	هر ۷ دقیقه	۶:۳۰ تا ۲۱	هر ۵ دقیقه
۲۰:۴۰ تا ۲۱:۳۰	هر ۱۰ دقیقه	۲۱ تا ۲۱:۳۰	هر ۷ دقیقه
۲۱:۳۰ تا ۲۲:۳۰	هر ۲۰ دقیقه	۲۱:۳۰ تا ۲۲:۳۰	هر ۱۰ دقیقه

جدول ۴- زمان‌بندی سرفاصلهٔ گذر قطارها در خط ۲ (شنبه تا چهارشنبه)

از مبدأ ایستگاه صادقیه		از مبدأ ایستگاه فرهنگسرا	
ساعت	فاصلهٔ گذر	ساعت	فاصلهٔ گذر
۵:۳۰ تا ۵:۵۰	هر ۱۰ دقیقه	۵:۳۰ تا ۶	هر ۱۰ دقیقه
۵:۵۰ تا ۶:۰۲	هر ۶ دقیقه	۶ تا ۶:۳۶	هر ۶ دقیقه
۶:۰۲ تا ۹:۵۰	هر ۴ دقیقه	۶:۳۶ تا ۱۰:۳۰	هر ۴ دقیقه
۹:۵۰ تا ۱۶	هر ۵ دقیقه	۱۰:۳۰ تا ۱۶:۲۵	هر ۵ دقیقه
۱۶ تا ۲۰	هر ۴ دقیقه	۱۶:۲۵ تا ۲۰:۳۰	هر ۴ دقیقه
۲۰ تا ۲۰:۳۰	هر ۶ دقیقه	۲۰:۳۰ تا ۲۱	هر ۷ دقیقه
۲۰:۳۰ تا ۲۲	هر ۲۰ دقیقه	۲۱ تا ۲۲	هر ۱۰ دقیقه
۲۲ تا ۲۲:۳۰	هر ۱۵ دقیقه	۲۲ تا ۲۲:۳۰	هر ۱۵ دقیقه

جدول ۵- زمان‌بندی سرفاصلهٔ گذر قطارها در خط ۳ (شنبه تا چهارشنبه)

از مبدأ آزادگان		از مبدأ قائم	
۵:۳۴ تا ۲۲:۳۴	هر ۱۵ دقیقه	۵:۳۴ تا ۲۲:۳۴	هر ۱۵ دقیقه

جدول ۶- زمان‌بندی سرفاصلهٔ گذر قطارها در خط ۴ (شنبه تا چهارشنبه)

از مبدأ ایستگاه ارم سبز		از مبدأ ایستگاه کلاهدوز	
ساعت	فاصله گذر	ساعت	فاصله گذر
۵:۳۰ تا ۶:۴۰	هر ۸ دقیقه	۵:۳۰ تا ۶:۰۲	هر ۸ دقیقه
۶:۴۰ تا ۱۰:۳۰	هر ۵ دقیقه	۶:۰۲ تا ۱۰:۰۲	هر ۵ دقیقه
۱۰:۳۰ تا ۱۵:۳۰	هر ۷ دقیقه	۱۰:۰۲ تا ۱۵:۰۲	هر ۷ دقیقه
۱۵:۳۰ تا ۲۰:۱۵	هر ۵ دقیقه	۱۵:۰۲ تا ۱۹:۴۲	هر ۵ دقیقه
۲۰:۱۵ تا ۲۱:۱۰	هر ۸ دقیقه	۱۹:۴۲تا ۲۱	هر ۸ دقیقه
۲۱:۱۰ تا۲۲:۳۰	هر ۱۰ دقیقه	۲۱ تا ۲۲:۳۰	هر ۱۰ دقیقه

جدول ۷- زمان‌بندی سرفاصلهٔ گذر قطارها در قطعهٔ فرودگاه خط ۴ (شنبه تا چهارشنبه)

از مبدأ بیمه		از مبدأ ترمینال ۴ و ۶ فرودگاه	
۵:۳۷ تا ۲۲:۳۷	هر ۱۵ دقیقه	۵:۴۵ تا ۲۲:۴۵	هر ۱۵ دقیقه

جدول ۸- زمان‌بندی سرفاصلهٔ گذر قطارها در خط ۵ (شنبه تا چهارشنبه)

از مبدأ ایستگاه گلشهر		از مبدأ ایستگاه صادقیه	
ساعت	فاصلهٔ گذر	ساعت	فاصلهٔ گذر
۵:۳۰ تا ۱۰	هر ۱۰ دقیقه	۵:۳۰ تا ۶:۳۰	هر ۲۰ دقیقه
۱۰ تا ۱۶	هر ۱۲ دقیقه	۶:۳۰ تا ۹	هر ۱۰ دقیقه
۱۶ تا ۱۹	هر ۱۰ دقیقه	۹ تا ۱۶	هر ۱۲ دقیقه
۱۹تا ۲۲	هر ۱۲ دقیقه	۱۶ تا ۲۲	هر ۱۰ دقیقه
۲۲ تا ۲۲:۳۰	هر ۱۵ دقیقه	۲۲تا ۲۳:۰۵	هر ۲۰ دقیقه

۴-۳-۴- زمان لازم برای رسیدن قطار خط i از سمت ایستگاه m به ایستگاه تقاطعی s ($A_{s,i,m}$)

برای دستیابی به وضعیت مطلوب و بهینه‌سازی جدول زمانی حرکت قطارها، ابتدا باید شناخت کاملی از سیستم موجود حاصل کرد و سپس با به حداقل رساندن زمان انتظار مسافران در ایستگاه‌های تقاطعی، حالت مطلوب را برای مسافران و سیستم بهره‌برداری مترو به وجود آورد. خط ۴ متروی تهران به‌علت عبور از کمربند مرکزی و پرجمعیت و مناطق دولتی و سیاسی شهر تهران، جزء مهم‌ترین و استراتژیک‌ترین خطوط متروی تهران است؛ به همین علت، به همهٔ خطوط مترو متصل می‌شود و با هر کدام از این خطوط، حداقل یک ایستگاه تقاطعی دارد. برای دستیابی به جواب مطمئن و برای نزدیکی بیشتر الگو به واقعیت، باید زمان اعزام اولین قطارها در همهٔ خطوط بررسی و به محدودیت‌های الگو اضافه شوند. براساس جدول زمان‌بندی حرکت قطارهای مترو، اولین قطار اعزامی از سمت گلشهر، رأس ساعت ۵:۳۰ دقیقه اعزام می‌شود و در ساعت ۶:۲۱ دقیقه به ایستگاه ارم سبز می‌رسد که این زمان با $A_{S,i,m}$ نامیده شده است و با احتساب زمان تعویض خط برای مسافران تقاطعی، اگر قطار اعزامی از سمت ایستگاه ارم سبز به سمت کلاهدوز، رأس ساعت ۶:۲۷ اعزام شود، بیشتر مسافران به این قطار می‌رسند و با حداقل زمان انتظار به مسیر ادامه می‌دهند؛ بنابراین براساس جدول ۹ زمان حرکت اولین قطار در ایستگاه مبدأ هر سه مسیر،

رأس ساعت ۵:۳۰ و زمان دریافت هر کدام در ایستگاه تقاطعی ارم سبز به‌ترتیب، ۵:۳۵، ۶:۱۰ و ۶:۲۱ خواهد بود. برای هر کدام از محدودیت‌های این مسیرها رابطهٔ مدنظر تشکیل و محدودیت‌های نهایی لحاظ می‌شود. برای سایر ایستگاه‌های تقاطعی و مسیرهای موجود نیز به همین ترتیب عمل می‌شود تا بهترین زمان‌بندی ممکن برای اعزام قطارها و کمترین زمان انتظار برای مسافران تقاطعی پس از تشکیل الگوی نهایی به دست آید.

جدول ۹- بیان وضعیت زمان اعزام اولین قطار از ایستگاه مبدأ و زمان رسیدن به ایستگاه تقاطعی

بیان وضعیت	ساعت رسیدن قطار به ایستگاه تقاطعی	ساعت حرکت اولین قطار	خط / ایستگاه مبدأ
$ST_{5,GO,1} + 51 = A_{ER,5,GO}$	۶:۲۱	۵:۳۰	خط۵ / گلشهر
$ST_{5,SA,1} + 5 = A_{ER,5,SA}$	۵:۳۵	۵:۳۰	خط ۵ / تهران
$ST_{4,KO,1} + 40 = A_{ER,4,KO}$	۶:۱۰	۵:۳۰	خط ۴ / کلاهدوز

۴-۴- تشکیل محدودیت‌های مسئله

محدودیت‌های دو مسیر گلشهر / صادقیه – ایستگاه تقاطعی ارم سبز و صادقیه / گلشهر – ایستگاه تقاطعی ارم سبز و برعکس

- **ایستگاه ارم سبز به سمت کلاهدوز از سمت ایستگاه گلشهر و صادقیه**

در مسیر مربوط باید زمان‌های اعزام و دریافت قطارهای خط ۵ از سمت گلشهر و صادقیه و نیز قطارهای اعزامی از سمت ایستگاه کلاهدوز و ارم سبز خط ۴ مشخص باشند. این زمان‌ها براساس جدول زمان‌بندی حرکت قطارها در وب‌سایت و نیز خود ایستگاه‌های مترو در دسترس هستند. قطار اعزامی از ایستگاه گلشهر، رأس ساعت ۶:۲۱ و قطار اعزامی از سمت ایستگاه صادقیه به سمت گلشهر، رأس ساعت ۵:۳۵ و قطار اعزامی از ایستگاه کلاهدوز، رأس ساعت ۶:۱۰ به ایستگاه تقاطعی ارم خواهند رسید. برای رسیدن به محدودیت‌های مسئله باید زمان انحراف از وضعیت مطلوب به حداقل رسانده شود. به بیان ریاضی،

$$ST_{5,GO,1} + 51 = A_1$$
$$ST_{5,SA,1} + 5 = A_2$$
$$ST_{4,KO,1} + 40 = A_3$$

یعنی زمان اعزام قطار از ایستگاه گلشهر $+$۵۱ دقیقه $=$ زمان رسیدن قطار به ارم سبز (A_1)، زمان اعزام قطار از ایستگاه صادقیه $+$۵ دقیقه $=$ زمان رسیدن قطار به ارم سبز (A_2)، زمان اعزام قطار از ایستگاه کلاهدوز $+$۴۰ دقیقه $=$ زمان رسیدن قطار به ارم سبز (A_3) خواهد بود . همانگونه که قبلاً نیز گفته شد، برای تدوین محدودیت‌ها باید زمان انحراف از وضعیت مطلوب به حداقل برسد. شکل کلی محدودیت‌ها برای ایستگاه تقاطعی ارم سبز و مسیر به این صورت است که زمان لازم برای رسیدن به ارم سبز از ایستگاه گلشهر، منهای ($-$) زمان لازم برای رسیدن به سمت ارم از ایستگاه کلاهدوز $= d_{1n} - d_{1p}+$زمان لازم برای حرکت مسافران از سکوی خط ۵ به سکوی خط ۴. برای یافتن محدودیت مسیر ایستگاه گلشهر–صادقیه، ایستگاه تقاطعی ارم سبز و ادامهٔ مسیر به سمت ایستگاه کلاهدوز باید براساس روابط ذیل عمل کرد.

$$A_3 - A_1 + d_{1n} - d_{1p} = ۰۴/۶$$

با جایگذاری A_3 و A_1 خواهیم داشت:

$$ST_{4,KO,1} + 40 - (ST_{5,GO,1} + 51) + d_{1n} - d_{1p} = ۰۴/۶$$

$$ST_{4,KO,1} - ST_{5,GO,1} - 11 + d_{1n} - d_{1p} = ۰۴/۶$$

در این محدودیت، اختلاف‌زمانی رسیدن قطارها به ایستگاه تقاطعی، برابر با ۱۱ و از هدوی خط ۴ بیشتر است؛ بنابراین، این محدودیت، پاسخ مناسبی به شرایط خط نخواهد داد؛ درنتیجه، از عدد حاصل‌شده، میزان هدوی یا ضریبی از آن کسر می‌شود (در این ساعت، هدوی خط ۴ برابر با ۸ دقیقه است) تا درنهایت، بعد از اینکه اولین یا دومین سری از مسافران تقاطعی مجبور می‌شوند منتظر قطار بمانند، مسافران قطارهای بعدی به‌راحتی بتوانند به قطارها دسترسی پیدا کنند؛ بنابراین، محدودیت مذکور به‌صورت ذیل اصلاح می‌شود.

$$ST_{4,KO,1} - ST_{5,GO,1} - 3 + d_{1n} - d_{1p} = ۰۴/۶$$

این محدودیت، مربوط به مسافرانی است که از ایستگاه گلشهر به ایستگاه تقاطعی ارم سبز رسیده‌اند و قصد تعویض خط و ادامهٔ مسیر در خط ۴ را به سمت ایستگاه کلاهدوز دارند. در هر یک از خطوط مترو در ساعت‌های مختلف، سرفاصلهٔ زمانی حرکت قطارها متغیر است؛ بنابراین باید برای همهٔ حالات حرکت قطارها، محدودیت‌های مدنظر را اعمال کرد. سرفاصلهٔ زمانی حرکت قطارها با اندیس سوم متغیر ST نشان داده شده است. پس در این حالت برای ساعات مختلف بهره‌برداری از مترو، روابط ذیل برقرار است:

$$ST_{4,KO,1} - ST_{5,GO,1} - 3 + d_{1n} - d_{1p} = ۰۴/۶$$

$$ST_{4,KO,2} - ST_{5,GO,1} - 3 + d_{1n} - d_{1p} = ۰۴/۶$$

$$ST_{4,KO,3} - ST_{5,GO,2} - 3 + d_{1n} - d_{1p} = ۰۴/۶$$

$$ST_{4,KO,2} - ST_{5,GO,2} - 3 + d_{1n} - d_{1p} = ۰۴/۶$$

$$ST_{4,KO,2} - ST_{5,GO,1} - 3 + d_{1n} - d_{1p} = ۰۴/۶$$

$$ST_{4,KO,2} - ST_{5,GO,2} - 3 + d_{1n} - d_{1p} = ۰۴/۶$$

$$ST_{4,KO,1} - ST_{5,GO,2} - 3 + d_{1n} - d_{1p} = ۰۴/۶$$

$$ST_{4,KO,4} - ST_{5,GO,2} - 3 + d_{1n} - d_{1p} = ۰۴/۶$$

$$ST_{4,KO,4} - ST_{5,GO,3} - 3 + d_{1n} - d_{1p} = ۰۴/۶$$

خود زمان‌بندی حرکت قطارها نیز برای هر مسیر، محدودیت به شمار می‌آید. برای مسیر کلاهدوز به ارم سبز خط ۴ مترو ۴ نوع هدوی موجود است؛ بنابراین، ۴ محدودیت دیگر نیز به‌صورت ذیل اضافه می‌شود:

$$0 \le ST_{4,KO,1} \le ۸$$

$$0 \le ST_{4,KO,2} \le ۵$$

$$0 \le ST_{4,KO,3} \le ۷$$

$$0 \le ST_{4,KO,4} \le ۱۰$$

برای مسیر گلشهر به سمت صادقیه نیز ۳ نوع هدوی وجود دارد:

$0 \le ST_{5,GO,1} \le ۱۰$

$0 \le ST_{5,GO,2} \le ۱۲$

$0 \le ST_{5,GO,3} \le ۱۵$

برای سایر مسیرهای موجود نیز به‌صورت مذکور عمل خواهد شد.

۴-۵- یافته‌ها

۴-۵-۱- ارائهٔ الگوی نهایی به نرم‌افزار لینگو و نتایج تحقیق

پس از گردآوری داده‌ها، الگوی مذکور با استفاده از نرم‌افزار لینگو حل شده است. مقدار بهینه، تابع هدف برابر ۲/۷۰۶۸ و مقادیر بهینهٔ متغیرها به شرح جدول ۱۰ محاسبه می‌شود (متغیرهای اشاره‌نشده در جدول، غیراساسی و مقدار آنها برابر صفر است).

جدول ۱۰- مقادیر متغیرهای تصمیم الگوی نهایی

$ST_{4,KO,1}$ = ۴/۴۹	$ST_{4,KO,2}$ =۴/۴۹	$ST_{4,KO,3}$ =۴/۴۹	$ST_{4,KO,4}$ =۴/۴۹	$ST_{5,SA,1}$ =۲/۴۴	$ST_{5,SA,2}$ =۲/۴۴
$ST_{5,SA,3}$ =۲/۴۴	$ST_{4,ER,1}$ =۳/۹۸	$ST_{4,FO,1}$ =۳.۴	$ST_{5,SA,2}$ =۳/۹۸	$ST_{4,ER,3}$ =۳/۹۸	$ST_{4,ER,4}$ =۳/۹۸
$ST_{4,BI,1}$ =۵/۵۸	$ST_{2,FA,1}$ =۳/۶۸	$ST_{2,FA,2}$ =۳/۶۸	$ST_{2,FA,3}$ =۳/۶۸	$ST_{2,FA,4}$ =۳/۶۸	$ST_{2,FA,5}$=۳/۶۸
$ST_{2,FA,6}$=۳/۶۸	$ST_{2,SA,1}$=۳/۹۱	$ST_{2,SA,1}$=۳/۹۱	$ST_{2,SA,3}$=۳/۹۱	$ST_{2,SA,4}$=۳/۹۱	$ST_{2,SA,5}$=۳/۹۱
$ST_{2,SA,6}$=۳/۹۱	$ST_{1,RE,1}$=۴	$ST_{1,RE,1}$=۴/۴۹	$ST_{1,RE,3}$=۴/۴۹	$ST_{1,RE,4}$=۴/۴۹	$ST_{3,AZ,1}$=۴/۴۹
$D1n$=۴/۵۵	$D3n$=۱۵/۵۳	$D7n$=۱/۰۲	$D9p$=۱/۲۸	$D10p$=۳/۰۴	$D11p$=۹/۲۲
$D13p$=۰/۵۱	$D14n$=۰/۶۹	$D15n$=۰/۱۸	$D17n$=۲/۱۳	$D20n$=۱/۱۵	$D21n$=۹/۲۶
$D22p$=۴/۰۲	$D23n$=۱/۷				

جدول مذکور، مقادیر خروجی الگو را به‌صورت نمادهای تعریف‌شده به نرم‌افزار لینگو نمایش می‌دهد. برای ملموس‌بودن نتایج حاصل‌شده برای هر کدام از ایستگاه‌های آغازین و پایانی، جدولی دیگر طراحی شد. در جدول ۱۱، که بدین‌منظور ارائه شده است، مقادیر مربوط به هر کدام از هدوی‌هایی آورده شده‌اند که باید تغییر کنند تا الگویی بهینه به دست آید. $ST_{4,KO,1} \rightarrow ۴۹/۴$ به این معنی است که قطارها در هدوی‌های مختلف خط۴ از مبدأ ایستگاه کلاهدوز به سمت ایستگاه ارم سبز باید ۴/۴۹ دقیقه زودتر اعزام شوند تا درنهایت، مسافران ایستگاه‌های تقاطعی، زمان انتظار کمتری داشته باشند. قطارهای اعزامی از ایستگاه ارم سبز به سمت ایستگاه کلاهدوز باید ۳/۹۸ دقیقه دیرتر اعزام شوند.

جدول ۱۱- مقادیری که به هر کدام از هدوی‌های خطوط اختصاص خواهد یافت

$ST_{4,KO,4} \rightarrow 4.49$	$ST_{4,KO,3} \rightarrow 4.49$	$ST_{4,KO,2} \rightarrow 4.49$	$ST_{4,KO,1} \rightarrow 4.49$
اعزام قطار با هدوی ۱۰ دقیقه ۴/۴۹ دقیقه زودتر	اعزام قطار با هدوی ۷ دقیقه ۴/۴۹ دقیقه زودتر	اعزام قطار با هدوی ۵ دقیقه ۴/۴۹ دقیقه زودتر	اعزام قطار با هدوی ۸ دقیقه ۴/۴۹ دقیقه زودتر
$ST_{4,ER,4} \rightarrow 3.98$	$ST_{4,ER,3} \rightarrow 3.98$	$ST_{4,ER,2} \rightarrow 3.98$	$ST_{4,ER,1} \rightarrow 3.98$
اعزام قطار با هدوی ۱۵ دقیقه ۳/۹۸ دقیقه زودتر	اعزام قطار با هدوی ۱۰ دقیقه ۳/۹۸ دقیقه زودتر	اعزام قطار با هدوی ۵ دقیقه ۳/۹۸ دقیقه زودتر	اعزام قطار با هدوی ۷ دقیقه ۳/۹۸ دقیقه زودتر
$ST_{5,SA,1} \rightarrow 2.44$	$ST_{5,GO,3} \rightarrow 0$	$ST_{5,GO,2} \rightarrow 0$	$ST_{5,GO,1} \rightarrow 0$
اعزام قطار با هدوی ۲۰ دقیقه ۲.۴۴۹ دقیقه زودتر	اعزام قطارها براساس برنامهٔ موجود	اعزام قطارها براساس برنامهٔ موجود	اعزام قطارها براساس برنامهٔ موجود
$ST_{4,BI,1} \rightarrow 5.58$	$ST_{4,FO,1} \rightarrow 3.4$	$ST_{5,SA,3} \rightarrow 2$	$ST_{5,SA,2} \rightarrow 2$
اعزام قطار از بیمه ۵/۵۸ دقیقه زودتر	اعزام قطار از فرودگاه ۳/۴ دقیقه زودتر	اعزام قطار با هدوی ۱۲ دقیقه ۲ دقیقه زودتر	اعزام قطار با هدوی ۱۰دقیقه ۲ دقیقه زودتر
$ST_{2,FA,4} \rightarrow 3.68$	$ST_{2,FA,3} \rightarrow 3.68$	$ST_{2,FA,2} \rightarrow 3.68$	$ST_{2,FA,1} \rightarrow 3.68$
اعزام قطار با هدوی ۵ دقیقه ۳/۶۸ دقیقه زودتر	اعزام قطار با هدوی ۴ دقیقه ۳/۶۸دقیقه زودتر	اعزام قطار با هدوی۶ دقیقه ۳/۶۸ دقیقه زودتر	اعزام قطار با هدوی ۱۰ دقیقه ۳/۶۸ دقیقه زودتر
$ST_{2,SA,1} \rightarrow 3.91$	$ST_{2,SA,1} \rightarrow 3.91$	$ST_{2,FA,6} \rightarrow 3.68$	$ST_{2,FA,5} \rightarrow 3.68$
اعزام قطار با هدوی ۶ دقیقه ۳/۹۱ دقیقه زودتر	اعزام قطار با هدوی ۱۰ دقیقه۳/۹۱ دقیقه زودتر	اعزام قطار با هدوی ۱۵ دقیقه ۳/۶۸ دقیقه زودتر	اعزام قطار با هدوی ۷ دقیقه ۳/۶۸ دقیقه زودتر
$ST_{2,SA,6} \rightarrow 3.91$	$ST_{2,SA,5} \rightarrow 3.91$	$ST_{2,SA,4} \rightarrow 3.91$	$ST_{2,SA,3} \rightarrow 3.91$
اعزام قطار با هدوی ۱۵ دقیقه۳/۹۱ دقیقه زودتر	اعزام قطار با هدوی ۲۰ دقیقه۳/۹۱ دقیقه زودتر	اعزام قطار با هدوی ۵ دقیقه۳/۹۱ دقیقه زودتر	اعزام قطار با هدوی ۴ دقیقه۳/۹۱ دقیقه زودتر
$ST_{1,TA,2} \rightarrow 0$	$ST_{1,TA,1} \rightarrow 0$	$ST_{3,AZ,1} \rightarrow 0$	$ST_{3,GA,1} \rightarrow 0$
بدون تغییر	بدون تغییر	بدون تغییر	بدون تغییر
$ST_{1,RE,1} \rightarrow 4.49$	$ST_{1,RE,1} \rightarrow 4$	$ST_{1,TA,4} \rightarrow 0$	$ST_{1,TA,3} \rightarrow 0$
اعزام قطار با هدوی ۵ دقیقه ۴ دقیقه زودتر	اعزام قطار با هدوی ۷ دقیقه ۴ دقیقه زودتر	بدون تغییر	بدون تغییر
اعزام قطار با هدوی ۲۰ دقیقه ۴ دقیقه زودتر	$ST_{1,RE,4} \rightarrow 4.49$	اعزام قطار با هدوی ۱۰ دقیقه ۴ دقیقه زودتر	$ST_{1,RE,3} \rightarrow 4.49$

۴-۵-۲-مقایسهٔ یافته‌ها با سیستم فعلی بهره‌برداری از متروی تهران

همانگونه که از خروجی الگو مشخص است، مقدار جواب بهینه برابر با ۲/۷۰۶۸ و مقادیر هر کدام از متغیرهای تصمیم در جدول ۱۱ ارائه شده‌اند. با ارائهٔ وضعیت فعلی بهره‌برداری از متروی تهران به الگو و واردکردن آن در لینگو، مقدار تابع هدف، ۶/۳۸۲۹ خواهد بود. براساس پیش‌بینی‌ها و با توجه به مینیمم‌بودن تابع مدنظر برای الگو نتیجه می‌گیریم الگوی ارائه‌شده در این مطالعه، براساس رابطهٔ ذیل به میزان ۴۲ درصد، زمان انتظار مسافران را در ایستگاه‌های تقاطعی متروی تهران کاهش می‌دهد.

$$\frac{۲/۷۰۶۸}{۶/۳۸۲۹} = ۰/۴۲۴۰$$

در جدول ۱۲ خروجی مقادیر سایر متغیرهای الگو ارائه شده است. بدیهی است که مقادیر زمان اعزام قطارها، که با متغیرهای a تا n1 مشخص می‌شوند، برابر با صفر خواهند بود.

جدول ۱۲- مقادیر متغیرهای تصمیم الگوی مدنظر در مترو

D1n=۹/۴	D۲n=۲/۰۵	D۳n=۱۱/۰۴	D۵n=۰/۵۸	D۶n=۱/۰۹
D۷n=۰/۵۸	D۸n=۱/۰۹	D9p=۱/۵۸	D10p=۳/۸۵	D11n=۹/۱۵
D12p=۰/۵۸	D13p=۴/۴۹	D14p=۳/۸	D15n=۰/۲	D19n=۰/۵۱
D20n=۱/۱۵	D21n=۹/۱۹	D23n=۱/۴	D16p=۰/۴۹	D17p=۱/۸۵
D18p=۴/۴۹	D22p=۴/۶	D24p=۰/۸۱		

۵- نتیجه‌گیری

۵-۱- تفسیر یافته‌ها

در این پژوهش با استفاده از روش برنامه‌ریزی آرمانی، به بهینه‌سازی زمان انتظار مسافران اقدام شده است. اجرای یک الگو بر کل خطوط، نیازمند صرف زمان زیاد، جمع‌آوری اطلاعات بسیار و صرف هزینهٔ زیاد است؛ بنابراین، بخشی از سیستم مترو شهر تهران (خط ۴) با مسافت نسبتاً طولانی بررسی شده است. یافته‌ها نشان می‌دهند با تحلیل دقیق، زمان‌بندی را به‌گونه‌ای می‌توان برنامه‌ریزی کرد که زمان انتظار مسافران تا حدود زیادی کاهش یابد. این کاهش زمان انتظار به افزایش تمایل افراد بیشتری برای استفاده از خطوط مترو و به‌طور کلی، ناوگان حمل‌ونقل شهری منتهی می‌شود و درنتیجه، رضایتمندی بیشتر از سفرهای شهری براساس سیستم حمل‌ونقل عمومی را به دنبال دارد. افزایش استفاده از سیستم حمل‌ونقل عمومی به کاهش آلودگی هوای ناشی از تردد خودروهای تک‌سرنشین، گردش مالی میان نهادهای مختلف جامعه و افزایش درآمد سرویس‌های شهری و نیز اشتغال‌زایی منجر می‌شود.

۵-۲- پیشنهادها

با توجه به خروجی الگو، پیشنهادهایی کاربردی برای ایستگاه‌های آغازین و پایانی هر کدام از خطوط مترو در شرایط مختلف ازلحاظ سرفاصلهٔ زمانی حرکت قطارها وجود دارد که زمان انتظار مسافران تقاطعی را به میزان ۰/۴۲ درصد کاهش می‌دهد و درنتیجه، در سایر ایستگاه‌ها و خطوط مرتبط با ایستگاه‌های تقاطعی، ترافیک خط را روان‌تر می‌کند و باعث افزایش میزان رضایتمندی مسافران می‌شود و کاهش میزان استهلاک ناوگان حمل‌ونقل درون‌شهری را در پی دارد. با توجه به نتایج، برای آن دسته از پژوهشگرانی که به مطالعه در زمینهٔ زمان‌بندی حرکت قطارها یا بهینه‌سازی زمان انتظار مسافران در ایستگاه‌های مترو تمایل دارند، پیشنهادهایی به شرح ذیل ارائه می‌شود:

۱- بررسی عوامل مؤثر بر تأخیر قطارها در خطوط مختلف و مقایسهٔ نتایج هر خط با بقیهٔ خطوط؛

۲- استفاده از روش‌های شبیه‌سازی برای ارائهٔ الگویی بهینه برای جدول زمان‌بندی حرکت قطارها به‌گونه‌ای که ضمن سیر و حرکت سیال قطارها، میزان مصرف انرژی نیز بهینه شود؛

۳- بهینه‌سازی تعداد افرادی که در هر یک از خطوط مترو فعالیت می‌کنند؛

۴- استفاده از الگوهای بهینه‌سازی در طراحی بهینهٔ خطوط مترو.

۵-۳- محدودیت‌ها

محدودیت‌های پژوهش شامل محدودیت در دسترسی به جامعهٔ آماری دقیق مسافران و همکاری شرکت بهره‌برداری راه‌آهن شهری تهران و حومه در ارائهٔ اطلاعات است.

References

Albercht, T. (2009). "Automated timetable design for demand-oriented service on suburban railways". *Public transport*, 1(1), 5-20.

Asgharpour, M.J., and Hashemi, Z. (2005). Mathematical modelling for I.R.I Post transportation network. *Management special issue*, 42, 1-22.

Atighehchian, A. (2016). Steelmaking-Continuous Casting Scheduling Using a Hybrid Meta-heuristic (Case Study: Khoozestan Steel Complex). *Production and operations management*, 7(1), 137-154.

Baradaran, V. (2018). Multi-Objective Optimization and Simulation Model to Design the Withdrawal Kanban Systems. *Production and operations management*, 9(1), 181-203.

Cadarso, L., and Marin, A. (2012). "Integration of timetable and rolling stock in rapid transit networks". *Annals of operations research*, 199(1), 113 -135.

Capara, A., Monaci, M., Toth, P., and Guida, P.L. (2006). "A Lagrangian Heuristic algorithm for a real- world train timetable problem". *Discrete Applied Mathematics*, 154(5), 738-753.

Chen, S., Leng, Y., Mao, B., and Liu, S. (2014). "Integrated weight-based multi-criteria evaluation on transfer in large transport terminals: A case study of the Beijing South Railway Station". *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 66, 13-26.

Hassan Naibi, A., Sajidinejad, A., and Mardani, S. (2014). Optimization of the timing of the movement of trains on metro lines with a simulation-based approach. The 16th International Conference on Rail Transport, Tehran.

Jamilly, A. (2006). Provide heuristic algorithm for motion scheduling. 8th Rail Transport Conference, Iran University of Science and Technology.

Jovanovic, D. (1989). "Improving railroad on-time performance: models, algoritms and applications". Ph.D. Thesis at Decision Science Department, The Wharton School, University of Pennsylvania.

Kang, L., and Meng, Q. (2017). "Two-phase decomposition method for the last train departure time choice in subway networks". *Transportation Research Part B: Methodological*, 104: 568-582.

Kang, L., Wu, J., Sun, H., Zhu, X., and Wang, B. (2015). "A practical model for last train rescheduling with train delay in urban railway transit network". *Omega*, 50, 29-42.

Karray, D.R., & Harker, P.T. (1995). "Real Time Scheduling of Freight Railroads". *Transport*, 3, 213-229.

Khatibi, A., Khatami, S.M., and Javanshir, H. (2012). A model for reducing waiting times for passengers at intersection s of Tehran metro network, The 12th Iranian Conference on Transport and Traffic Engineering.

Khalili Damghani, K., and Tajik Khaveh, M., (2015). Goal programming to reduce logistic cost and increase service quality throughout the supply chain. *journal of industrial management studies*, 37, 91-121.

Mees, A.I. (1991). "Railway Scheduling by Network Optimization". *Mathematical and Computer Modeling*, 15(1), 33-42.

Mills, R.G., Perkins, S.E., and Paudney, P.J. (1991). "Dynamic Rescheduling of Long Haul Trains for Improved Timekeeping and Energy Conservation". *Asia Pacific Journal of Operation Research*, 8, 146-165.

Moghaddam, S., & Mahlooji, H. (2017). A Robust simulation optimization approach to urban train scheduling problem. *Industrial engineering and management*, 1-33 (2/2), 117-126.

Mosadeghi, M., Javanshir, H., and Tavakkoli Moghadam, R. (2011). Modelling the train scheduling with goal programming considering cross sections. *Traffic engineering management*, 22, 50-56.

Pourseyed Aghaei, M. (1998). Planning for trains movement in one-way rail network, Phd thesis.

Rahimi Mazrae Shahi, M., Fallah Mehdipour, E., and Amiri Maghsoud. (2016). "Optimization using simulation and response surface methodology with an application on subway train scheduling". *International transactions in operational research*, 23(4), 797-811.

Sadeghieh, A., and Dehnavi-Arani, S. (2019). Developing the dynamic cell formation and production planning considering the inter/intra-cell material handling equipment. *Production and operations management*, 10(2), 55-73.

Sepehrai, M., and Pourseyed Aghaei, M. (1999). Planning for trains in one way path. *Journal of the college of Engineering*, 33(2), 87-97.

Shafahi,Y., and Fandersky, A. (2001). The initial model for scheduling train movements according to blocked time. 6th Rail Transport Conference, Amirkabir University, Tehran.

Shafahi, Y., and Sadeghi, N. (2004). Application of a simulation model to determine the effect of different operational policies on the reliability of train scheduling. 7th Rail Transport Conference, Amirkabir University, Tehran

Szpigel, B. (1972). *Optimal train scheduling on a single track railway*. In Operational research' 72, M, Ross, (Ed): 343-351, North-Holland, Amsterdam, The Netherlands.

Xu, X., Li, K., and Li, X. (2016). A multi-objective subway timetable optimization approach with minimum passenger time and energy consumption. *Journal of Advanced Transportation*. 50(1), 69-95.

Yaghini, M., Alimohammadian, A., and Sharifi, S. (2011). MODM model to plan railway movements considering variety and limitation in network using goal programming. *Transportation engineering*, 2(3), 273-283.

Yaghini, M., Ali Mohammadian, A., and Karimi, M. (2013). Optimization of the planning of trains lines in the railway. *International Journal of Industrial Engineering and Production Management*, 24(4), 492-501.

[1]- Mills
[2]- Mees
[3]- Albercht
[4]- Cadarso
[5]- Kang
[6]- Szpigel
[7]- Krayy

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی