

طراحی زمان‌بندی‌های بهینه چندهدفه در سیستم اسکتس برای کنترل متغیر با جریان چراغهای راهنمایی

مهدی قطعیⁱ، سید حسن قدسی پورⁱⁱ، سید مهدی تشکری هاشمیⁱⁱⁱ

چکیده

بهینه‌سازی مقادیر پارامترهای کنترلی شبکه حمل و نقل نظیر چراغ راهنما از اهداف اساسی در طراحی یک سیستم مدیریت شبکه است. لیکن این مساله مرتبط با میزان جریانهای تعادلی شبکه مورد نظر است. همچنین برای بهینه‌سازی این پارامترها اهداف گوناگونی نظیر کمینه‌سازی کل زمانهای سفر کاربران شبکه، تعداد ایستهای متوالی هر کاربر پشت نقاط متوالی و تعداد کاربران منتظر در صف پشت هر یک از فازهای چراغ راهنما، مطرح است. هدف در این مقاله پیاده‌سازی توأم مسأله تنظیم چراغ راهنما و جریانهای تعادلی کاربر در قالب یک برنامه‌ریزی دو سطحی است. در سطح بیرونی پارامترهای کنترلی کارا از طریق حل یک برنامه‌ریزی چند هدفه و با احتساب جریانهای تعادلی خیابانهای شبکه، تعیین شده و به سطح داخلی گزارش داده می‌شود. در سطح داخلی با به‌کارگیری مدل‌های شبکه نظیر مدل K-کوتاهترین مسیر، مسیرهای K-مشابه و سایر الگوریتمهای شمارش مسیر، جریانهای تعادلی با احتساب پارامترهای کنترلی به دست می‌آید و نتایج به لایه بیرونی منعکس می‌شود. این فرآیند تا حصول همگرایی ادامه می‌یابد. بدین صورت به طور همزمان پارامترهای کنترلی کارا و جریانهای تعادلی به طور همزمان به دست می‌آید. از مورد اول می‌توان برای تنظیم الگوهای زمان بندی تقاطعهای موجود در نرم افزار اسکتس¹ که هم اکنون در شهر تهران و نود شهر بزرگ دیگر دنیا استفاده می‌شود، بهره برد. از نتایج جریانهای تعادلی نیز می‌توان در گسترش شبکه شهری، برنامه ریزی خدمات عمومی و سایر تحلیلهای شبکه سود جست.

کلمات کلیدی

زمان بندی چراغ راهنما، مسأله تخصیص ترافیک، شمارش مسیرها، مدل‌های بهینه‌سازی چند هدفه

Multi-objective Optimization for Signal Planning in SCATS

Mehdi Ghatee, S. Hassan Ghodspour, S. Mehdi Hashemi

ABSTRACT

It is important to optimize the control parameters such as signal times. However, this problem depends on equilibrium flows and vice versa. A mutually consistent procedure for considering these concepts simultaneously is utilized to obtain efficient signal planning with respect to the equilibrium flows. In internal layer, the equilibrium flow gives applying network algorithms such as K-shortest path or K-similar paths. The first results can be used as scheduling plans of intersections in SCATS while the second is appropriate for urban network planning or public transportation assignments.

ⁱ دانشجوی دکتری، دانشکده ریاضی و علوم کامپیوتر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ghatee@aut.ac.ir، ش.ت. ۰۲۱-۶۴۰۴۲۰۴۰

ⁱⁱ دانشیار دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

ⁱⁱⁱ دانشیار علوم کامپیوتر، دانشکده ریاضی و علوم کامپیوتر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، hashemi@aut.ac.ir

KEYWORDS:

Signal Optimization, Traffic Assignment, Multi-Objective Programming

می‌شود. این مقادیر به سطح بیرونی گزارش می‌شود تا دوباره در بهینه‌سازی روی مقادیر کنترلی مورد استفاده قرار گیرد. این فرایند تا حصول همگرایی پیش می‌رود. برای بهینه‌سازی در سطح بیرونی به جای یک هدف از چندین هدف شامل کمینه سازی کل زمانهای سفر کاربران شبکه، کمینه ساختن تعداد ایستهای متوالی هر کاربر پشت تقاطعات متوالی و کمینه ساختن تعداد کاربران منتظر در صف پشت هر یک از فازهای چراغ راهنما استفاده می‌شود. برای حل این مساله چند هدفه از یکی از تکنیکهای چند هدفه که مجموعه ای از آنها توسط قدسی پور [۳] ارائه گردیده است، استفاده شد. به عنوان نمونه اگر از روش وزن دهی استفاده گردد، به یک مساله تک هدفه می‌رسد که می‌تواند با الگوریتم تندترین شیب که در آزمایشهای قبلی سیپریانی [۱۰] نتایج خوبی داشته، همراه شده و زمان بندی‌های کارای چراغهای راهنمایی را به دست دهد. برای یافتن میزان جریانهای تعادلی نیز از روش K-کوتهاترین مسیر و K-مشابه مسیر استفاده می‌شود.

۲- زمان بندی چراغ راهنما

ایمنی و توانایی یک راه برای عبور دادن تعداد کافی خودرو با حداقل تاخیر و ایجاد ناراحتی برای استفاده‌کنندگان، به نظم و ترتیب جریان آمد و شد بستگی مستقیم دارد. در این میان چراغ راهنما نقش ارزنده ای ایفا می‌کند که پارامترهای آن بایستی در جهت بهبود وضعیت سیستم تنظیم گردد [۲]. پارامترهای اصلی چراغ راهنما عبارتند از:

الف. چرخه: یک دوره علامت‌دهی چراغ راهنمایی.

ب. فاز یا مرحله: بخشی از یک چرخه که به ترکیبی از حرکات به طور همزمان حق تقدم می‌دهد، در حالی که سایر جریانه‌ها متوقف می‌شوند. شکل (۱) نمودار فازبندی را برای یک تقاطع دو خیابانی نشان می‌دهد. در طراحی فازهای چراغ راهنما، ترتیبی برای فازهای متعددی که به دنبال یکدیگر می‌آیند مشخص می‌شود، که ایمنی و کیفیت خدمات بهبود یابد.

ج. سطح سرویس (خدمت‌دهی) یا تابع کارایی: معیاری برای اندازه‌گیری میزان بهره‌وری سیستم حمل و نقل است که می‌تواند بر اساس تحرک پذیری تقاطع که به وسیله میزان تاخیر وسیله نقلیه یا کل زمان تلف شده در سیستم تعیین شود.

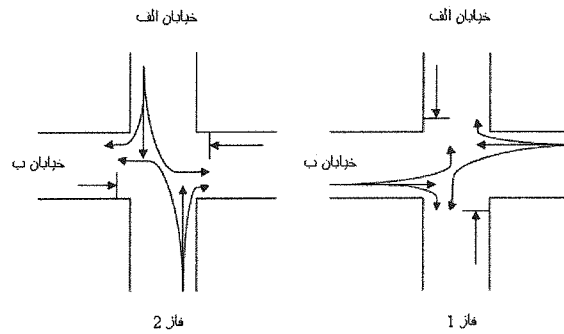
کنترل‌کننده‌های ثابت چراغ راهنما برای حرکت‌های خاص ترافیکی، زمان ثابتی در نظر می‌گیرند. در عوض، کنترل

۱- سابقه مساله بهینه سازی چراغ راهنما

با افزایش روز افزون سیستمهای اطلاعات مسافرتی و خیزش عظیم سیستمهای ماهواره‌ای که به مسافران برای یافتن مسیر بهینه کمک می‌کنند، می‌توان انتظار داشت که مفاهیمی نظیر مسیر بهینه و انتخاب بهینه به عنوان اساس مدل‌های تخصیص، گسترده تر گردد. از سوی دیگر اثر گذاری سیاستهای کنترلی مدیریت شبکه نظیر زمانهای چراغ راهنما روی مسیر بهینه غیر قابل انکار است. برای بالا بردن سطح سرویس و برآورده کردن رضایت کاربران شبکه انجام عملیات بهینه‌سازی روی پارامترهای شبکه ضروری به نظر می‌رسد که در راستای آن، نرم افزارهای گوناگونی نظیر ترانزیت^۱، اسکوپ^۲ و سیگنال^۳ به بازار عرضه شده اند. لیکن به دلیل ارتباط دو طرفه میان سیاستهای کنترل ترافیک و جریانهای بهینه تعادلی، یافتن مقادیر بهینه هر یک بایستی با توجه به دیگری باشد. وجود ارتباط دوری میان این دو مساله نخستین بار در ۱۹۶۸ [۹] مورد تاکید قرار گرفت. اسمیت [۱۸] مثالهایی ارائه نمود که نشان می‌داد سیاستهای متداول سنتی می‌توانند شبکه را به سمت تعادل ناپایدار سوق داده و زمان مسافرت را تا ۳۰٪ طولانی‌تر نمایند. لذا آلسوپ و چارلسورث [۶] الگوریتمی ریاضی برای بهینه‌سازی چراغ راهنما ارائه نمودند که بعدها توسط گرشوین و تان [۱۱] رد شد. مارکوتی [۱۴]، [۱۵]، هیدکر و خو [۱۲] و یانگ و یاگر [۲۰] به ترتیب برای حل این مساله از روشهای ابتکاری، تقریبهای خطی و تحلیل حساسیت، استفاده نمودند. برنامه‌ریزی غیر خطی و فرآیند جستجوی مخلوط برای تنظیم چراغ راهنما نیز در [۱۹] مورد توجه قرار گرفته اند. گزارشهای [۷]، [۸]، [۱۳] نشان می‌دهد که روشهای گوناگون جواب با نقاط شروع متفاوت به دلیل نامحدب بودن مساله می‌توانند منجر به جوابهای گوناگون شود. استفاده از بهینه‌سازی-شبهه‌سازی شامل ترکیبی از روشهای بهینه‌سازی و نرم افزارهای شبیه سازی در [۹] به همین دلیل ارائه شده است.

هدف این مقاله ترکیب بهینه‌سازی پارامترهای کنترلی نظیر زمان سبز چراغ راهنما با مساله تخصیص تعادل کاربر در قالب یک طرح دو سطحی است. در سطح بیرونی بهینه‌سازی روی پارامترهای کنترلی صورت گرفته و نتایج به صورت دستورالعملهایی به سطح درونی منعکس می‌شود و در سطح درونی بر اساس این مقادیر، جریانهای تعادلی کاربر محاسبه

کننده‌های قابل تنظیم اطلاعاتی درباره الگوهای جریان ترافیک از حسگرهایی که در فواصل معینی قرار دارند، دریافت می‌نمایند و از این اطلاعات برای انتخاب یکی از چند برنامه زمان‌بندی (طرحهای کنترل) که در حافظه کنترل کننده قرار دارد، استفاده می‌کنند [۲]. سیستم نرم افزاری-سخت افزاری اسکتس که در شهر تهران و نود شهر عمده جهان در حال استفاده است در این گروه قرار دارد.



شکل (۱): فازهای چراغ راهنما در یک تقاطع

در ادامه، هدف ارائه الگوریتمی است که زمانهای بهینه چراغ‌راهنما برای کنترل کننده‌های نوع دوم ارائه نماید. برای این کار فرم کلی طبق رابطه (۱) در نظر گرفته می‌شود.

$$\psi^* = \arg \min_{\psi} PI(\psi, f^*) \quad (1)$$

$$s.t. \quad 0 \leq \psi_a^{\min} \leq \psi_a \leq \psi_a^{\max}$$

که در آن ψ بردار پارامترهای کنترلی شبکه، $PI(\psi, f)$ تابع کارایی سیستم متناظر با بردار کنترلی ψ و میزان جریان f است. f^* نیز جریان تعادلی شبکه است. در حل این مساله سه بحث مطرح است:

۱: شناخت تابع کارایی شبکه حمل و نقل

۲: تعیین جریانهای تعادلی

۳: چگونگی ارتباط مساله تعادل با مساله تنظیم

با توجه به پدیده‌هایی که از دید مدیریت سیستم مهم تلقی می‌شود می‌توان به تابع کارایی سیستم دست یافت. سه ایده پرکاربرد برای تعریف تابع کارایی عبارتند از:

الف. میزان تاخیر یا انتظار در سیستم که به ازای مقادیر مختلف پارامترهای کنترل و مقادیر مختلف میزان کاربران شبکه تعریف می‌شود. این مقدار به ندرت با آزمایش عملی و جمع‌آوری داده‌های آماری قابل محاسبه است. در عوض با آزمایشهای شبیه‌سازی می‌توان این مقادیر را با صرف مدت زمان معقول به دست آورد.

ب. به دست آوردن ترکیب خطی وزندار از میزان تاخیر در یالهای شبکه و تعداد ایستها پشت چراغهای قرمز که دوباره بر

اساس برنامه‌های شبیه سازی قابل محاسبه است. این معیار که از مقبولترین معیارهای کارایی است در مدل ترافیکی ترانزیت که توسط رابرتسون در ۱۹۶۹ ارائه گردید [۹]، به کار گرفته شده است. فرم ریاضی این تابع به صورت رابطه (۲) می‌باشد.

$$PI_1(\psi, f(\psi)) = \sum_{a \in L} W_1 w_a D_a(\psi, f(\psi)) + W_2 k_a S_a(\psi, f(\psi)) \quad (2)$$

در این تابع W_1 و W_2 نماد درجه اهمیت انتظار در یالها و تعداد ایستها در پایانه یالهاست. همچنین w_a و k_a مقادیر مشابه برای فاز $a \in L$ هستند. بردار ψ نیز نماینده پارامترهای کنترل شبکه $D_a(\psi, f(\psi))$ و $S_a(\psi, f(\psi))$ به ترتیب نمایش بردار میزان جریان در شبکه، میزان انتظار و تعداد ایست در فاز $a \in L$ است.

ج. زمان کل مسافرت که در ۱۹۸۳ توسط مارکوتی [۱۴] پیشنهاد شد و دارای فرم ریاضی طبق رابطه (۳) می‌باشد.

$$PI_2(\psi, f(\psi)) = \sum_{e \in E} C_e(\psi_a, f_e(\psi)) f_e(\psi) \quad (3)$$

در این تابع C_e هزینه پیمایش یال $e \in E$ و a فاز متناظر به یال e است.

خوبی اساسی این تابع آن است که به صورت تحلیلی قابل محاسبه است و می‌تواند در الگوریتمی که از روشهای کلاسیک استفاده می‌کنند، مورد استفاده قرار گیرد.

اکنون اگر هر سه تابع هدف بر شمرده مورد توجه قرار گیرند، رابطه (۴) برقرار است:

$$PI(\psi, f(\psi)) = W_1 \sum_{e \in E} C_e(\psi_a, f_e(\psi)) + \quad (4)$$

$$W_2 \sum_{a \in L} w_a D_a(\psi, f(\psi)) + W_3 \sum_{a \in L} k_a S_a(\psi, f(\psi))$$

لذا با تغییر دادن مقادیر وزنی اختصاص یافته می‌توان به جوابهای بهینه کارای (جوابهایی که توسط جوابهای شدنی دیگر مغلوب نشوند) این مساله دست یافت [۳].

به طور کلی سه دسته الگوریتم برای تنظیم چراغهای راهنما با توجه به ساختار مدل چراغ راهنما در دست است. دسته اول الگوریتمهای ابتکاری یا مکاشفای است. اولین و مهمترین دلیل استفاده از این الگوریتمها نامحدب بودن تابع کارایی شبکه است. بیشتر این الگوریتمها بر روی مدلهای شبیه سازی به کار گرفته می‌شوند. دسته دوم الگوریتمهای تحلیلی است که از جهت یافتن بهینه موضعی تضمینهای مناسبی در اختیار می‌گذارند. این الگوریتمها یا اساساً بدون استفاده از مشتقگیری کار می‌کنند و یا اگر ذاتاً از مشتقگیری استفاده می‌کنند، به فرمهای مشتق گیری عددی تقلیل می‌یابند. دسته سوم الگوریتمهایی هستند که بر روی مدلهای با متغیرهای صحیح کار می‌کنند. این گونه مسائل معمولاً در مدل‌سازیهای

پویا به وجود می‌آیند. در اینجا با استفاده از یکی از روشهای موجود در دسته دوم به نام روش تندترین شیب که از سوی مهندسين حمل و نقل بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است، زمانهای بهینه چراغ راهنما تنظیم می‌گردند. این الگوریتم نخست به وسیله شفی و پاول [۱۷] ارائه شد و در ادامه در [۸]، [۱۳] به کار رفت. اگرچه این الگوریتم تضمینی برای پیدا کردن کمینه سراسری ندارد، لیکن در بدترین حالت کمینه موضعی را می‌یابد. اساس این روش به کارگیری رابطه بازگشتی شماره (۵) است.

$$\psi_b^{k+1} = \psi_b^k + \alpha \nabla_{\psi} z \quad (5)$$

جایی که $z = PI_2$ تابع معیار کارایی شبکه است. تشریحی هاشمی و قطعی [۱۱] نشان دادند که تقریب رابطه (۶) به راحتی می‌تواند برای محاسبه جهت نزولی مساله به کار بسته شود:

$$\frac{\partial z(b)}{\partial \psi_b} \approx \frac{z(\dots, \psi_b + \Delta, \dots) - z(\dots, \psi_b, \dots)}{\Delta} \quad (6)$$

این روش برای مساله چند هدفه مورد بحث در این مقاله نیز برقرار است. بدین جهت، اگر رابطه شماره (۷) جایگزین شوند

$$z = PI(\psi, f(\psi)) = W_1 \sum_{e \in E} C_e(\psi_a, f_e(\psi)) f_e(\psi) \quad (7)$$

$$W_2 \sum_{a \in L} w_a D_a(\psi, f(\psi)) + W_3 \sum_{a \in L} k_a S_a(\psi, f(\psi))$$

در این صورت به روشنی مقدار گرادیان یاد شده قابل محاسبه است. در این صورت کافی است از طریق یک نرم افزار شبیه ساز مانند ترانزیت یا اسکس مقدار دو بخش تعداد ایستهای متوالی و میزان تاخیر در پشت تقاطعات را به دست آورده، پس از ضرب کردن در وزنهای مربوطه، آنها را با مدت زمان پیمایش مسیرها جمع کرده و از این طریق گرادیان را محاسبه نمود.

برای تخمین طول گام α نیز الگوریتمهای گوناگونی پیشنهاد شده که شرح گسترده‌ای از آن در [۴] دیده می‌شود. یک الگوریتم کارا بر اساس پیشنهاد [۱۰] به کارگیری قانون آرمیجو است که در آن برای مقادیر ثابت s ، $\beta \in (0, 1)$ و $\sigma \in (0, 1)$ طول i امین گام الگوریتم با $\alpha_i = \beta^{m_i} s$ تعریف می‌شود که m_i نخستین عدد صحیح نامنفی است که شرط (۸) را بر آورده سازد:

$$z(\psi^k) - z(\psi^k + \alpha_i d^k) \geq \sigma \nabla z(\psi^k)' \cdot d^k \quad (8)$$

نیز جهت نزولی بهبود بخش در مرحله k ام می‌باشد. از آنجا که مساله حداقل سازی است، لذا d^k در صورتی بهبود بخش است که: $d^k \cdot \nabla z(\psi^k) < 0$.

تعبیر قانون آرمیجو این است که همیشه مقدار تابع هدف

در طول تکرارهای متوالی حداکثر به اندازه کنترل شده‌ای از مقدار قبلی می‌تواند تجاوز نماید، به امید آنکه در تکرارهای بعدی بهبود بیشتری حاصل شود.

برای انتخاب مناسب‌ترین مقادیر برای پارامترهای الگوریتم باید توجه داشت که β تاثیر اساسی در تعداد تکرارهای الگوریتم دارد. در حالی که σ به طور وارون وابستگی به دقت جواب نهایی دارد.

در اینجا یک طرح الگوریتمی برای مساله تنظیم چراغ راهنما ارائه می‌شود. [۱]

الگوریتم ۱. (بهینه‌سازی زمانهای چراغ راهنما)

گام ۱. (آماده‌سازی) قرار دهید $k=0$ و s را به عنوان طول گام و \mathcal{E} به عنوان کران توقف ثابت بگیرید. یک بردار چراغ راهنمای شدنی ψ^0 گرفته و با تخصیص تعادل کاربر، جریان f^0 برای یالهای شبکه یافته و مقدار تابع هدف z^0 را تعیین کنید.

گام ۲. (محاسبه جهت نزول) قرار دهید $k = k + 1$. جهت عکس بردار گرادیان تابع هدف z را به صورت عددی و با به کارگیری تخصیص تعادلی کاربر برای هر یال a بر اساس رابطه (۹) به دست آورید:

$$\left(\frac{\Delta z}{\Delta \psi_a}\right)^k = \frac{z_a^k - z_a^{k-1}}{\Delta \psi_a} \quad (9)$$

که در آن z_a^{k-1} مقدار تابع هدف به ازای بردار چراغ راهنمای ψ_a^{k-1} و نیز z_a^k مقدار تابع هدف متناظر با تغییر کوچک $\Delta \psi_a$ در a امین مولفه بردار چراغ راهنما یعنی بردار $(\psi_1^{k-1}, \dots, \psi_a^{k-1} + \Delta \psi_a, \dots, \psi_n^{k-1})$ است.

گام ۳. (محاسبه طول گام) اعداد $\beta \in (0, 1)$ و $\sigma \in (0, 1)$ را ثابت بگیرید. طول گام به وسیله فرمول

$\alpha_i = \beta^{m_i} s$ به دست می‌آید که در آن m_i نخستین عدد صحیح نامنفی است که در عبارت (۱۰) صدق نماید:

$$z(\psi^k) - z(\psi^k + \alpha_i d^k) \geq \sigma \nabla z(\psi^k)' \cdot d^k \quad (10)$$

گام ۴. (محاسبه جواب جدید) جواب جدید از رابطه (۱۱) به دست می‌آید:

$$\psi^k = \psi^{k-1} - (\alpha_i / \max\{(-\frac{\Delta z}{\Delta \psi_a})^k\}) \cdot \nabla z(\psi^k) \quad (11)$$

به شرطی که $\psi_{\min} < \psi^k < \psi_{\max}$.

گام ۵. (به هنگام کردن تابع هدف) با تخصیص تعادل کاربر با بردار جدید ψ^k مقدار جدید تابع هدف یعنی z^k را بیابید.

گام ۶. (آزمون همگرایی) اگر $|\frac{z^k - z^{k-1}}{z^{k-1}}| < \mathcal{E}$ در این صورت توقف کنید و الا به گام ۲ بازگردید.

۳- آگوریتمهای تخصیص ترافیک

یک مساله تخصیص ترافیک به فرم کلی طبق رابطه (۱۲) بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} \min \quad & Z((f_{r,s}^p)_{r,s}, \xi) \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{p \in P_{r,s}} f_{r,s}^p = d_{r,s} \end{aligned} \quad (12)$$

که در آن $f_{r,s}^p \geq 0$ میزان جریان روی مسیر p بین زوج مبدأ-مقصد (r, s) را نمایش می‌دهد و $d_{r,s}$ میزان تقاضای سفر از r به s است. به علاوه $P_{r,s}$ مجموعه مسیرها بین (r, s) را نمایش می‌دهد. مدل‌های گوناگون تعادل متمرکز بر تعریف تابع کارایی سیستم یعنی $Z((f_{r,s}^p)_{r,s}, \xi)$ هستند که وابسته به میزان جریان عبوری $f_{r,s}^p$ و پارامترهای کنترلی شبکه یعنی ξ تشکیل می‌یابند. شرح گسترده‌ای از این مدل‌ها به وسیله قطعی [۴] جمع آوری شده است. برای حل این مدل، می‌توان از آگوریتمهای برنامه ریزی غیر خطی نظیر تندترین شیب یا روشهای ابتکاری مانند آگوریتم ژنتیک [۴]، [۹] و یا ترکیبی از این دو ایده بهره برد. تشکری هاشمی و قطعی [۱۱] یک آگوریتم با دید برنامه ریزی غیر خطی برای پیدا کردن جریانهای لاجیت ارائه نموده‌اند که در این مقاله نیز استفاده می‌شود. لیکن این آگوریتم بر اساس این فرض استوار است که مجموعه‌ای از مسیرهای کوتاه بین نقاط تولیدکننده و مصرف کننده جریان موجود باشد. مساله یافتن اینگونه مسیرها یا به اصطلاح شمارش مسیرها [۴]، [۲۱] به صورت ضمنی در سیستمهای فراهم کننده اطلاعات مسافرتی نیز به چشم می‌خورد. از طرف دیگر برای شبکه‌های با اندازه حقیقی، تعداد مسیرهایی که می‌تواند ساخته شود، به صورت مجازی نامتناهی است. لذا برای محدودتر نمودن این مسیرها بایستی استراتژیهای مناسبی اندیشید. به صورت کلی هدف از مساله شمارش مسیرها، تولید مجموعه‌ای از مسیرها با اندازه مدیریت پذیر است که شامل مسیرهای مرتبط با مساله حمل و نقل معینی باشد. یک راه مستقیم برای تعریف یک مجموعه از مسیرها، انتخاب متوالی اولین، دومین، ...، K -امین کوتاهترین مسیر بین نقاط است که در آن طول ممکن است هزینه‌های تعمیم یافته باشد. یک خصوصیت جالب این روش این است که کاملاً بر تشخیص خصوصیتهای مسیرها استوار است. معذالک مجموعه K -کوتاهترین مسیرها ممکن است شامل مسیرهای دوردار باشد که احتمالاً توسط مسافران انتخاب نمی‌شوند. همچنین مجموعه K -کوتاهترین مسیرها ممکن است شامل

مسیرهایی باشند که خیلی به هم شبیه هستند و بنابراین ممکن نیست بیان‌کننده ناهمگونی موجود در مجموعه مسیرهای انتخاب شونده، باشد. این پدیده حتی می‌تواند برای مقادیر بزرگ K نیز اتفاق بیفتد. برای به دست آوردن مجموعه‌ای که بیشتر بیان کننده گوناگونی در انتخابهای مجاز باشد و از سرریز شدن و جانشینهای غیر حقیقی جلوگیری کند ایده‌هایی ارائه گردیده که عبارتند از:

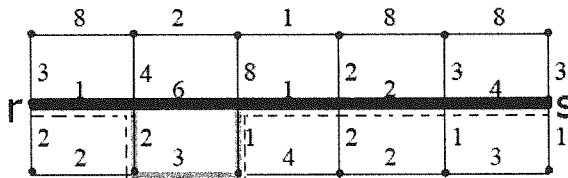
- الف. ایده برچسب‌های مختلف بر اساس سلیقه‌ها
 - ب. ایده K -امین مسیر کوتاه مشروط
 - ج. ایده‌های ابتکاری جریمه یالها
 - د. ایده مسیرهای حداکثر K -مشابه
 - ه. ایده مسیرهای نامتشابه
 - و. ایده یافتن مسیرها به صورت تصادفی
 - ز. ایده یافتن مسیرهای نامغلوب فازی
- در اینجا بر روی دو روش K -کوتاهترین مسیر و K -مشابه مسیر متمرکز شده و سایر موارد در [۴] قابل پیگیری است.

۳-۱- ایده K -کوتاهترین مسیر

مساله K -امین کوتاهترین مسیر یا مساله مرتب کردن مسیرها از اقبال خوبی در میان مسائل شبکه برخوردار بوده است. این مساله زیر بنای بسیاری از مسایل پیچیده نظیر مساله کوتاهترین مسیر چندهدفی است [۵۵]. هدف از طرح این مساله یافتن مجموعه‌ای از مسیرها مانند $P_k = \{p_1, \dots, p_k\}$ از مسیرهای بین دو نقطه ثابت از شبکه است به قسمی که:

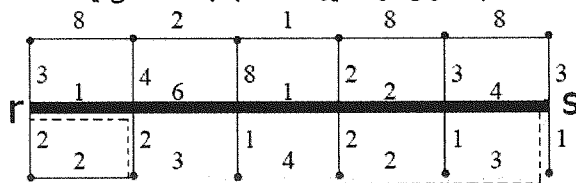
۱. برای $i \in \{1, \dots, k-1\}$ قبل از p_i تعیین شود.
۲. برای هر $i \in \{1, \dots, k-1\}$ ، $c(p_i) \leq c(p_{i+1})$ که در آن $c(q)$ هزینه مسیر q را نمایش می‌دهد.
۳. برای هر $q \in P - \{p_k\}$ ، $c(p_k) \leq c(q)$.

در [۲۱] نشان داده شده است که می‌توان آگوریتم K -کوتاهترین مسیر را برای حالتی که قیود دیگری نیز بر مساله تحمیل شده باشد، تعمیم داد. گروهی از این قیود که برای مساله تخصیص اهمیت دارد به عنوان قیود مسیر بازگشتی تعریف می‌شوند. یک قید مسیر بازگشتی در یک زمان چندین یال را به حساب می‌آورد و به شدنی بودن هر یال مشروط به شدنی بودن یالهای قبلی آن ارزش‌دهی می‌نماید. مثالهای زیادی از قیودی که می‌توانند به صورت بازگشتی مدل شوند، موجود است. برای نمونه قیودی که تعداد خودروهایی که از یک یال می‌گذرند، یا طول گامها را در یک مدل مسافرت چندگانه محدود می‌کنند یا قیودی که دنباله معینی از وسایل حمل و نقل



شکل (۴): نمایش اولین و دومین کوتاه‌ترین مسیرها

نحوه بهتر مدل‌سازی این است که از کاربر بخواهیم حداکثر تعداد یالی که می‌توانند در دو مسیر نامشابه حضور داشته باشند را تعیین کند. این عدد با K نمایش داده می‌شود. در این صورت، به عنوان مثال به ازای $K=1$ دو مسیر نمایش داده شده در شکل ۵ به عنوان دو مسیر ۱-مشابه به دست می‌آیند.



شکل (۵): نمایش دو مسیر ۱-مشابه

برای دیدن یک روش الگوریتمی برای این مساله به کمک روش ضرایب لاگرانژ [۴] را ببینید.

۴- حل مساله ترکیبی تنظیم چراغ راهنما و تخصیص ترافیک به صورت توام

در این قسمت با استفاده از ایده اساسی برنامه‌ریزی دو سطحی، راهبردی برای مساله ترکیب ارائه می‌گردد. به عبارت دیگر در سطح بیرونی به کمک یکی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی نظیر الگوریتم تندترین شیب پارامترهای کنترلی مساله با توجه به جریانهای داده شده، بهینه می‌شوند. سپس در سطح درونی با داشتن مقادیر ثابت پارامترهای کنترلی جریانها روی کوتاهترین مسیرها انتقال می‌یابند و دوباره میزان بهینه جریانها به لایه بالایی گزارش می‌شود و الگوریتم تا حصول همگرایی ادامه می‌یابد. برای پیاده سازی تاخیر پشت چراغهای قرمز نیز از یک تبدیل شبکه‌ای ساده بهره برده می‌شود. برای بیان این نوع از تبدیل به شکل (۶) توجه شود.

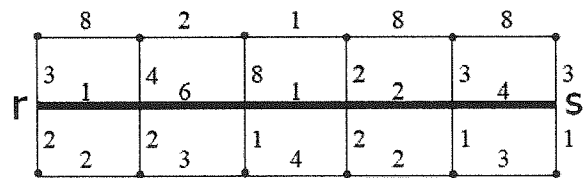
در این شکل یک تقاطع چهار خیابانی که خیابان سمت چپ آن یک طرفه و سایر خیابانهای آن دو طرفه هستند و نیز گراف متناظر با آن دیده می‌شود.

با توجه به زمانهای چراغ راهنما هم می‌توان به صورت بدترین حالت، طول هر یال متناظر را به اندازه طول دوره قرمز بودن چراغ راهنمایی آن در نظر گرفت. یعنی به این صورت فرض کرد که همیشه وقتی راننده به تقاطع می‌رسد که فاز

(اتومبیل، مترو یا اتوبوس) را قبول می‌کنند، یا قیودی که مسیرهای از جهت منطقی نامحتمل مانند مسیرهای با پیچیدگی بالا را حذف می‌نمایند، در زمره قیود بازگشتی به حساب می‌آیند. برای جزییات به [۴] مراجعه شود.

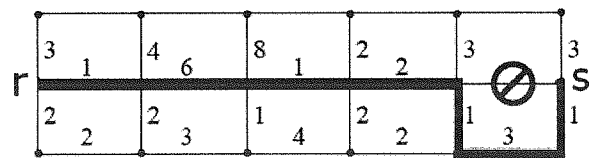
۳-۲- ایده K-مشابه مسیر

این ایده که در ۱۹۹۷ توسط اسکات [۱۶] مطرح شد، به دنبال یافتن مسیرهایی است که حداکثر در K یال مشابه کوتاهترین مسیر باشند. ساده‌ترین راه برای پیاده سازی این روش آن است که از کاربر خواسته شود که معین نماید کدام یک از یالها نباید در مسیر جدید حضور داشته باشد. در این صورت با استفاده از ایده‌های جریمه یالی یا حذف یالی می‌توان مساله را حل نمود. به عنوان مثال شبکه شکل ۲، در نظر گرفته می‌شود:



شکل (۲): نمایش یک شبکه ساده با کوتاهترین مسیر

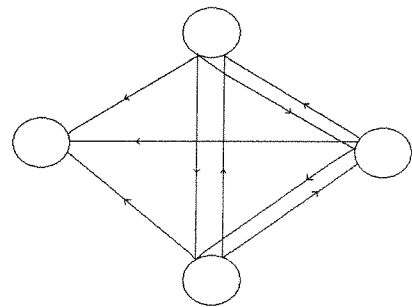
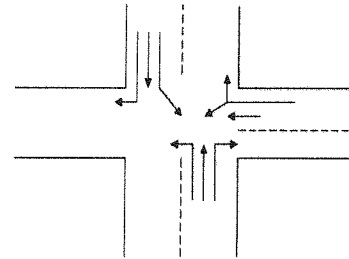
در این شبکه مسیر تیره شده کوتاهترین مسیر میان جفت نقطه ۲ و ۳ است. اکنون اگر کاربر، عبور نکردن از یال خط خورده زیر را لازم بداند، کوتاهترین مسیر، به صورت شکل ۳ تغییر می‌یابد.



شکل (۳): نمایش کوتاهترین مسیر با یک یال ممنوعه

همچنین می‌توان K -کوتاهترین مسیرها را تعیین نموده و در میان آنها به دنبال مسیرهای متفاوت البته با نظر کاربر پرداخت. اما این روش پیاده‌سازی در عمل با دو مشکل مواجه است. نخست آنکه یافتن K -کوتاهترین مسیر سخت‌تر از یافتن اولین کوتاهترین مسیر است و لذا این فرایند زمان‌بر است. دوم آنکه مسیرهایی که توسط این نوع الگوریتمها پیدا می‌شوند، معمولاً بسیار مشابه هم هستند. مثلاً برای شبکه یاد شده دو مسیر تیره شده شکل ۴، اولین و دومین کوتاهترین مسیرند، در حالی که واقعاً به هم شبیه‌اند.

دلخواه او تازه قرمز شده باشد. همچنین می‌توان با به کارگیری یک متغیر تصادفی نمایی به شکل کاراتری این زمان را پیاده‌سازی نمود. در این مقاله برای سادگی از روش اول بهره برده می‌شود. در این صورت الگوریتم ۲ قابل ارائه است:



شکل (۶): شکل بالاتر یک تقاطع چهار خیابانی و شکل پایینتر شبکه متناظر با آن را نمایش می‌دهد.

الگوریتم ۲. (بهینه‌سازی توام زمانهای چراغ‌راهنما و تخصیص ترافیک)

گام ۱. (آماده سازی) میزان خطای مورد قبول ϵ ، طول یک چرخه چراغ راهنما برای هر تقاطع و حداقل و حداکثر زمان سبز برای هر فاز را با کمک خبره تعیین نموده، برای فاز i مقدار زمان سبز ϕ_i را به دلخواه برابر کران بالا یا پایین آن قرار داده، با استفاده از تبدیل شبکه‌ای که بیان آن رفت، هر فاز را به یک یال از شبکه تبدیل نمایید. ظرفیت این یال را ظرفیت عبور از تقاطع و هزینه آن (مدت زمان عبور از آن) را برابر با مجموع زمانهای سبز فازهای دیگر همان تقاطع بگیرید. (این مجموع مدت زمان قرمز برای فاز مورد نظر است.) با پیدا کردن مسیره‌های K-کوتاهترین مسیر و K-مشابه مسیر و اجرای الگوریتم تخصیص ارائه شده در مقاله تشکری هاشمی و قطعی [۱] میزان جریان روی هر یال a را به دست آورید (q_a) و به گام دوم بروید.

گام ۲. بر اساس مقادیر ثابت q_a و با به کارگیری الگوریتم تنظیم چراغ راهنما (الگوریتم ۱) زمانهای بهینه چراغ سبز برای

هر فاز تقاطع با توجه به قید $\phi_{i,\min} \leq \phi_i \leq \phi_{i,\max}$ محاسبه نمایید.

گام ۳. بر اساس مقادیر چراغ سبز و انتقال آنها به عنوان هزینه پیمایش یالهای متناظر در شبکه تبدیل و پیدا کردن مسیره‌های K-کوتاهترین مسیر و K-مشابه مسیر و اجرای الگوریتم تخصیص مقادیر جدید جریان (q'_a) متناظر با یال a را به دست آورید.

گام ۴. اگر $\left| \sum_{a \in L} C_a q_a - \sum_{a \in L} C_a q'_a \right| < \epsilon$ باشد، توقف کنید و گرنه قرار دهید $q_a \leftarrow q'_a$ و به گام ۲ باز گردید.

۵- کاربرد در ایران

حدود ۱۵ سال است که در معاونت حمل و نقل و ترافیک شهرداری تهران گرایش به سمت سیستمهای حمل و نقل هوشمند به چشم می‌خورد. در این راستا برای کنترل تقاطعها از روش کنترل متغیر با میزان جریان استفاده می‌شود. بر این اساس سیستم نرم افزاری-سخت افزاری اسکتس که از تولیدات کشور استرالیاست و در حدود ۹۰ شهر دنیا در حال استفاده می‌باشد، خریداری شده و تا کنون نسخه ششم آن در ۱۴۰ تقاطع شهر تهران نصب گردیده و در آینده نزدیک در ۲۰۰ تقاطع دیگر به بهره برداری خواهد رسید. اساس کار نرم افزاری این سیستم برای تنظیم زمان بندی چراغ راهنما (شامل طول سیکل، مدت زمان موج سبز، زمان بین دو تقاطع که از این پس به مجموعه آنها یک الگو گفته می‌شود) این است که فاصله دو اتومبیل گذرنده از یک فاز تقاطع را اندازه گیری کرده و از روی آن کمیت درجه اشباع موسوم به SD را محاسبه نموده و بر اساس آن قضاوت می‌کند که کدام یک از ۸ یا ۱۶ الگوی از قبل طراحی شده برای آن تقاطع مورد نظر مفید می‌باشد. معمولاً الگوهای طراحی شده برای هر تقاطع شامل سهم درصدی هر فاز از یک سیکل کامل چراغ راهنماست. متأسفانه این الگوهای هشت یا شانزده گانه تا کنون در شهر تهران به صورت آزمون و خطا و حداکثر بر اساس تجربه پلیس که خود در جای خود حائز اهمیت است، طراحی شده‌اند.

بر اساس دست آوردهای این مقاله و به کارگیری برنامه ریزی چند معیاره و یافتن جوابهای بهینه کارا به صورت علمی می‌توان طرحهای مربوط به هر تقاطع را به نحوی تعیین نمود که معیار عملکرد سیستم تا حد زیادی بهبود یابد. باید توجه داشت که تنها نیازمندیهای این طرح استفاده از یک نرم افزار شبیه ساز مانند اسکتس برای بررسی اثر طرحهای مختلف و

- Gershwin, S.B., Tan, H.N., "Hybrid optimisation: optimal static traffic control constrained by drivers route choice behavior", Laboratory for Information and Decision System Report LIDS-p-870, (1979) Massachusetts Institute of Technology.
- Heydecker, B.G., Khoo, T.K., "The equilibrium network design problem", In: Proceeding of AIRO'90 conference on models and methods for decision support, Sorrento, (1990), 587-602.
- Lee, C., Machemehl, R., "Local and iterative search for the combined signal control and assignment problem: Implementation and numerical examples", In: 78th Transportation Research Board Meeting, Washington, January 1999.
- Marcotte, P., "An analysis of heuristics for the network design problem", In: V.F. Hurdle, E. Hauer, G.N. Stewart, editors, The proceeding of the eighth international symposium on transportation and traffic theory, New York: Elsevier, (1981), 26-35.
- Marcotte, P., "Network optimization with continuous control parameters", Transportation science, 17 (1983), 181-197.
- Scott, K., Bernstein, D. "Finding alternatives to the best path", Princeton University, Research paper, New Jersey Tide Center, (1997).
- Sheffi, Y., Powel, W.B., "Optimal signal setting over transportation networks", Journal of transportation engineering, 109(6), 1983, 824-839.
- Smith, M.J., "A local traffic control policy which automatically maximizes the overall travel capacity of an urban road network", Traffic engineering and control, (1980), 298-302
- Smith, M.J., Xiang, Y., Yarrow, R.A., Ghali, M., "Bilevel and other modeling approaches to urban traffic management and control", In: P. Marcotte, S. Nguyen, (Ed.), *Equilibrium and advanced transportation modeling*, Boston: Kluwer Academic Publisher, (1998), 283-325
- Yang, H., Yagar, S., "Traffic assignment and signal control in saturated road network", Transportation research part A, 29(2), (1995), 125-169.
- Zijpp, N.V.D., Catalano, S.F., "Path enumeration by finding the constrained Kshortest paths," Transportation research, part B, 39 (2005) 545- 630.
- [۱۱] یک نرم افزار تخمین زنده جریان^۱ است که در این مقاله کلیات آن مورد بررسی قرار گرفت.
- ### ۶- مراجع
- [۱] تشکری هاشمی، سید مهدی، قطعی، مهدی، بهینه‌سازی همزمان چراغ راهنما و تخصیص ترافیک بر اساس مدل‌های شبکه، هفتمین کنفرانس مهندسی حمل و نقل و ترافیک ایران، اسفند ۱۳۸۵. (<http://www.civilica.com/Paper-TTC07->) (TTC07_017.html)
- [۲] جوتین خیستی، سی، کنت لال، بی، مهندسی ترابری و ترافیک، ویرایش دوم ۱۹۹۸، ترجمه دکتر محمود صفارزاده، جلد دوم، دفتر نشر آثار علمی دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۱
- [۳] قدسی پور، سید حسن، مباحثی در تصمیم‌گیری چند معیاره (برنامه ریزی چند هدفه)، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۲.
- [۴] قطعی، مهدی، آگوریتم‌های شبکه در بهینه‌سازی زمان‌بندی چراغ راهنما و تخصیص ترافیک و توسعه روشهای فازی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۴.
- [۵] Ahuja, R.K., Magnanti, T.L., Orlin, J.B., *Network flows: Theory, algorithms and applications*, Prentice-Hall, Engelwood Cliffs, (1993) NJ
- [۶] Allsop, R.E., Charlesworth J.A., "Traffic in a signal controlled road network: An example of different signal timings including different routing", Traffic engineering and control, (1977), 262-264
- [۷] Cantarella, G.E., Improto, G., Sforza, A., "Road network signal setting: equilibrium conditions", In: M. Papageorgiou, (Ed.), *Concise encyclopedia of traffic and transportation systems*, Pergamon Press, (1991) 366-371.
- [۸] Cascetta, E., Gallo, M., Montella, B., "Optimal signal setting on traffic networks with stochastic equilibrium assignment", In: Tristan III conference, San Juan, Puerto Rico, June 17-23, (1998), vol 2.
- [۹] Ceylan, H., Bell, M.G.H., "Traffic signal optimization based on genetic algorithm approach, including drivers routing". Transportation research part B 38 (2004), 329-342.
- [۱۰] Cipriani, E., Fusco, G., "Combined signal setting design and traffic assignment problem". European Journal of operational Research 155 (2004), 569-583.

۷- زیر نویس ها

- ¹ SCATS
- ² TRANSYT
- ³ SCOOP
- ⁴ SIGNAL
- ⁵ Logit
- ⁶ Offset
- ⁷ Path Flow Estimator