فصلنامه مهندسی ترافیک، سال بیست و سوم، شماره ۹۲، بهار ۱۴۰۲، ص. ۵۱-۳۹

بهینه‌سازی زمانی و هندسی ظرفیت تقاطعات چراغ‌دار به روش برنامه‌ریزی ریاضی صفر و یک

مطالعه موردی: تقاطع جلال آل احمد – آریانفر تهران

پرهام حیاتی (مسئول مکاتبات)، استادیار دانشکده مهندسی عمران، معماری و هنر واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

E-mail: p.hayati@srbiau.ac.ir

بهزاد پزشکی، دانشجوی دکتری گروه حمل‌ونقل و راه‌وترابری، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

چکیده

در پژوهش حاضر، با رویکرد جدیدی به بهینه‌سازی عملکرد تقاطع پرداخته شده است. ترکیب متغیرهای زمانی و متغیرهای هندسی از منظر مهندسی ترافیک باعث بهبود بیشتر عملکرد تقاطع چراغ‌دار با هدف بیشینه‌سازی ظرفیت تقاطع شده است. خطوط تردد و تنظیمات چراغ به‌عنوان متغیرهای تصمیم در نظر گرفته شده‌اند و قید خطوط کوتاه نیز در مدل‌سازی گنجانده شده است. وجود خطوط کوتاه برای تعریض معابر بسیار پرکاربرد هستند و در بسیار از تقاطعات دیده می‌شوند. ظرفیت و عملکرد تقاطع به متغیرهای خطوط کوتاه رابطه بسیار معناداری در جهت مثبت و منفی دارد. در تحقیق حاضر با سه نگرش جدید: ۱- در نظر گرفتن متغیرهای هندسی تقاطع به همراه متغیرهای زمان‌بندی و فازبندی چراغ؛ ۲- در نظر گرفتن خط کوتاه و اثر آن؛ ۳- استفاده از برنامه‌ریزی ریاضی صفرویک برای بهینه‌سازی؛ ظرفیت تقاطع بزرگراه جلال آل احمد و بلوار آریانفر بیشینه شدند و کارایی تقاطع حدود چهارده درصد افزایش یافت. به‌منظور اعتبار سنجی مدل و بررسی رفتار تقاطع مدل در نرم‌افزار سینکرو شبیه‌سازی شد و ظرفیت، زمان سفر و میزان تأخیر تقاطع برآورد شد.

واژه‌های کلیدی: ظرفیت تقاطع چراغدار بهینه‌سازی صفر و یک، تنظیم چراغ‌راهنمایی، خط کوتاه

۱. مقدمه

مدل‌های زیادی برای بیشینه کردن ظرفیت تقاطع چراغ‌دار و یا کمینه کردن تأخیر در تقاطع ارائه شده است. ولی عدم توجه مناسب منابع زمانی و هندسی در مدل‌سازی، باعث می‌شود در بهینه‌ترین حالت از تمام پتانسیل مقطع استفاده نشود. جهت استفاده از این پتانسیل بالقوه بازنویسی مدل بهینه‌سازی با رویکردی جدید که دربرگیرنده‌ی طرح هندسی و زمان‌بندی به‌منظور بیشینه کردن ظرفیت تقاطع می‌تواند مفید باشد. در این مقاله سه دسته متغیر: ۱-مشخصات هندسی تقاطع، ۲-متغیرهای تردد، ۳- متغیرهای چراغ‌راهنمایی برای تعیین متغیرهای تصمیم که همان مجوزهای گردش، فازبندی و زمان‌بندی چراغ است به نحوی در مدل مشارکت داده می‌شوند تا ظرفیت تقاطع حداکثر گردد.

بدین منظور برای ارائه و شیوایی مطلب پس از مقدمه که دربرگیرنده نمای کلی از تحقیق است به مروری بر ادبیات تحقیق با بررسی مقالات ده سال گذشته و خلاصه‌سازی آن پرداخته می‌شود. این مهم از یک‌سو، برای یافتن شیوه‌های مناسب مدل‌سازی و از سوی دیگر برای تأمل بیشتر بر خلأهای پژوهشی است. سپس در قسمت تعریف مسئله متغیرها و جزئیات مسئله با دقت شرح می‌گردد. اساس مدل‌سازی شامل چگونگی شکل‌گیری تابع هدف و قیود مسئله تشریح می‌شود. به‌عنوان مطالعه موردی تقاطع پرتردد شریانی بزرگراه جلال آل احمد و بلوار آریافر به‌صورت کامل مدل و حل می‌شود. برای سنجش کارایی مدل، تقاطع در نرم‌افزار سینکرو شبیه‌سازی می‌شود. با مقایسه نتایجِ مدل‌سازی و شبیه‌سازی به نتیجه‌گیری پرداخته خواهد شد.

۲. ادبیات پژوهش

در سال ۲۰۱٤، سیمو و همکارانش تقاطع چراغ‌داری را به روش بهینه یابی مطلق به‌منظور تخمین فاز سبز مؤثر در یک شبکه با کمینه کردن زمان تأخیر بهینه کردند. در همان سال روشنده و همکاران به کمک فرآیند شبیه‌سازی زمان تأخیر عابران پیاده و خودروها را کمینه کردند و با تلاش خود مدعی شدند که زمان سفر خودرو به‌تنهایی در ناحیه مرکزی شیکاگو ۱۳ درصد و همراه عابران پیاده ۵ درصد بهبود بخشیده‌اند. ژانگ هو و مینگ در سال ۲۰۱٤ با بهینه‌سازی چند تابع هدف به‌منظور کمینه‌سازی تأخیر و کاهش آلایندگی محیط‌زیست به برنامه‌ریزی برای یک چراغ‌راهنمایی پرداختند. ایرج برگ‌گل و همکارانش در سال ۲۰۱۵ به کمک نظریه شوک موج[1] و الگوریتم ژنتیک[2] زمان سفر را کمینه کردند. ارسکین و همکارانش در سال ۲۰۱۷ یک تقاطع را در حالت اشباع موردپژوهش قراردادند و با تولید تابع هدفی بر اساس هزینه سفر بر مبنای زمان سفر به همراه تعداد حرکت و توقف خودرو در صف به بهینه‌سازی تقاطع پرداختند. سال ۲۰۱۸ شن در کنفرانسی طی مقاله‌ای، یک مدل بهینه‌سازی برای زمان‌بندی چراغ‌راهنمایی پیشنهاد کرد که به‌طور جامع کارایی عملیات و انتشار ترافیک را در نظر می‌گرفت. برای برنامه زمان‌بندی چراغ یک مدل از توپولوژی شبکه و شبیه‌سازی آن ساخت. وونگ و همکاران در سال ۲۰۱۹ به کمک برنامه‌ریزی صفر و یک به مدیریت هندسی چند تقاطع پرداختند و نشان دادند که مهندس ترافیک می‌تواند با مدیریت خط‌کشی و معابر در افزایش ظرفیت اثر داشته باشد. ارشد جمال و همکارانش در سال ۲۰۲۰ با درنظرگرفتن تابع هدف غیرخطی میانگین تأخیر را به کمک روش‌های فرا ابتکاری الگوریتم ژنتیک و تکامل دیفرانسیل[3] کمینه کردند. در سال ۲۰۲۰ پورمحراب و همکارانش به طراحی بهینه بر اساس کاهش زمان سفر برای حرکت خودروهای خودران در چراغ‌های راهنمایی پرداختند. ژیاون ونگ با درنظرگرفتن جریمه برای طول خودروهای در صف مانده به بهینه کردن زمان تأخیر در تقاطع در سال ۲۰۲۰ پرداخته است. شپلوو همکارانش در سال ۲۰۲۱ درباره اثر صف خودرو در ظرفیت تقاطع به کمک شبکه عصبی نوشته است. آثار روی در سال ۲۰۲۱ زمان تأخیر بر اساس معادل خودرو شخصی را کمینه کرده است، وی مدعی است که زمان تأخیر را تقریباً ۷ تا

۲۷ درصد بهبود بخشیده است. ژینگ هوی در سال ۲۰۲۲، بر اساس جریان ترافیک به‌عنوان داده‌هایی اساسی، همراه با نظریه توصیفی جریان ترافیک و قوانین تخمین انتشار گازهای خروجی، یک مدل چند هدفه از مشکل زمان‌بندی چراغ‌راهنمایی را طرح و آن را با کمک روش الگوریتم ژنتیک حل می‌کند؛ و در همان سال هونگ‌کی‌آن و همکارانش با رویکرد حمل‌ونقل پایدار به زمان‌بندی هوشمند تقاطع چراغ‌دار همت می‌گمارند. در سال ۲۰۲۳ لی و همکارانش با فن‌آوری تشخیص هوشمند پلاک و تفسیر تصاویر به برنامه‌ریزی تقاطع ممارست کردند.

جدول ۱. خلاصه از پژوهش‌های انجام‌شده در دهه‌ی اخیر

	شماره مرجع													
موضوع	۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱٤
زمان‌بندی چراغ	☑	☑		☑	☑	☑			☑			☑		
هندسه							☑							
محیط‌زیست			☑										☑	
سطح سرویس تقاطع								☑	☑	☑	☑			☑

ترکیب متغیرهای هندسی و زمانی برای افزایش سطح سرویس یک خلأ بزرگ پژوهشی است که بر اساس نتایج این تحقیق اثر معنی‌دار و قابل‌توجهی در بهینه کردن عملکرد تقاطع دارد همچنین با درنظرگرفتن کارهای ارسکین وضعیت اشباع تقاطع نیز در مدل هم‌زمان دیده شده است که مدل را برای ساعات اوج بیشتر به واقعیت نزدیک می‌کند.

قسمت برجسته این تحقیق مربوط به افزودن اثر خطوط کوتاه[٤] در تقاطع است. جینگ ژائو در سال ۲۰۱۳ خطوط کوتاه را این‌گونه تعریف می‌کند: خط کوتاه به خطی با طول محدود گفته می‌شود که نمی‌توان آن را به‌عنوان خط مستقل یا خطی کامل در نظر گرفت. خط کوتاه برای تعریض معابر به‌طور گسترده به کار گرفته می‌شود. هرچند افزایش تعداد خطوط در یک مسیر می‌تواند ظرفیت تقاطع را افزایش دهد، ولی این خطوط کوتاه اضافی ممکن است به‌عنوان خطوط کامل عمل نکنند و با ایجاد اغتشاش، اثر نامطلوب داشته باشند.

۳. روش پژوهش

بر اساس روش‌های ارائه‌شده محدودیت‌های مسئله سه دسته هستند: ۱- محدودیت‌های حرکت؛ ۲- محدودیت‌های جریان ترافیک؛ ۳- محدودیت‌های چراغ‌راهنمایی.

متغیرها نیز به دودسته: ۱- متغیرهای ورودی: مسئله را تعریف می‌کند؛ ۲- متغیرهای کنترلی: که بیشتر بر روی متغیرهای اثرگذار بر کنترل چراغ‌راهنمایی است تقسیم می‌شوند.

۳-۱ متغیرهای ورودی

متغیرهای ورودی شامل سه بخش می‌شوند: ۱-مشخصات هندسی تقاطع؛ ۲-داده‌هایی تردد در مقطع؛ ۳-داده‌هایی مربوط وضعیت اشباع مقطع؛ این سه دسته متغیر در جدول ۲ معرفی می‌شوند:

جدول ۲. متغیرهای ورودی

ردیف	نماد نمایش	شرح متغیر
		مشخصات هندسی تقاطع
۱	N_v	تعداد خیابان‌های منشعب از تقاطع

ردیف	نماد نمایش	شرح متغیر
۲	A_i	تعداد رویکردهای هر خط از هر خیابان $i=1,...,N_v$
۳	E_i	تعداد خروجی هر خیابان $i=1,...,N_v$
		مشخصات تردد در تقاطع
٤	(u,v)	زوج مرتب معرف ورود وسایل نقلیه به تقاطع
٥	ψ	مجموعه تمام خودروهای در حال حرکت تقاطع
٦	ψ_c	زیرمجموعه از ψ که شامل خودروی‌هایی با حرکت ناسازگار که برای افزایش ظرفیت باید جلوگیری یا کنترل شوند.
		مشخصات چراغ‌راهنمایی
۷	$C_{\min}(C_{\max})$	کمینه (بیشینه) یک دوره چراغ
۸	$Q_{i,j}$	تقاضا واقعی عبور از تقاطع
۹	$g_{i,j}$	حداقل زمان سبز چراغ (میانگین خطوط) $i=1,...,N_v$ ؛ $j=1,...,N_v-1$
۱۰	$g_{i,k}$	زمان بهینه سبز چراغ برای خط کوتاه $i\in(1,...,N_v)$ ؛ $k\in(1,...,A_i)$
۱۱	$\omega_{u,v}$	حداقل زمان تمام‌قرمز / تخلیه $(u,v)\in\psi$
		داده‌های زمان اشباع
۱۲	$S_{i,k}$	جریان اشباع هر خط برای حرکت مستقیم $i=1,...,N_v;k=1,...,A_i$
۱۳	$P_{i,k}$	بیشینه پذیرش درجه اشباع $i=1,...,N_v;k=1,...,A_i$
۱٤	$\gamma_{i,j}$	ضریب تعدیل حرکت چرخشی به حرکت مستقیم در محاسبه جریان اشباع خط $i=1,...,N_v;j=1,...,N_v-1$

۳-۲ متغیرهای کنترل

برخلاف متغیرها ورودی که از ماهیت مسئله مشتق شده‌اند و ما دخالتی در آن نداریم، متغیرهای کنترل، متغیرهایی هستند که ما می‌توانیم با تغییر آن‌ها بر وضعیت عملکرد تقاطع اثرگذار باشیم. هدف از حل این مسئله تعیین این متغیرها به نحوی است که ظرفیت مقطع حداکثر گردد.

متغیرهای کنترلی دودسته هستند: ۱- متغیرهای گسسته، ۲- متغیرهای پیوسته؛ به‌تفصیل در جدول ۳ تشریح می‌گردند:

جدول ۳. متغیرهای کنترلی

ردیف	نماد نمایش	شرح متغیر
		متغیرهای (تصمیم) کنترلی گسسته
۱۵	$\alpha_{i,j,k}$	حرکت مجاز در خط k از خیابان i به خیابان j $i=1,...,N_v;j=1,...,N_v-1;k=1,...,A_i$ ۱i= ,...
۱٦	$\Omega_{i,j,l,m}$	توابع جانشین حرکت چرخشی ناسازگار (i,j)$\in\Psi_c$ و (l,m) $\in\Psi_c$
		متغیرهای کنترلی پیوسته
۱۷	$q_{i,j,k}$	تخصیص خطوط به جریان (در هنگام طراحی)

ردیف	نماد نمایش	شرح متغیر
		$i=1,...,N_v;\ j=1,...,N_v-1;\ k=1,...,A_i$
۱۸	μ	ضریب جریان ترافیکی رایج
۱۹	λ	معکوس زمان سیکل به مدت c
۲۰	$B_{i,j}$	زمان شروع سبز برای ترددهای چرخشی (غیرمستقیم) $i=1,...,N_v;\ j=1,...,N_v-1$
۲۱	$D_{i,j}$	مدت‌زمان سبز برای ترددهای چرخشی (غیرمستقیم) $i=1,...,N_v;\ j=1,...,N_v-1$
۲۲	$b_{i,k}$	زمان شروع سبز برای خودروها روی هر خط $i=1,...,N_v;\ k=1,...,A_i$
۲۳	$d_{i,k}$	مدت‌زمان سبز برای خودروها روی هر خط $i=1,...,N_v;\ k=1,...,A_i$
۲۴	Δ	یک عدد ثابت مثبت نسبتاً بزرگ است.

٤. مدل‌سازی

هدف ایجاد یک مدل تعمیم‌یافته پارامتریک است. مدل ارائه‌شده برای هر تقاطعی با هر نرخ جریان و تداخل جریانی با یا بدون خط کوتاه در هرزمانی مانند زمان اوج یا غیر آن قابل بهره‌برداری باشد. چهارراه شکل ۱ را در نظر بگیرید.

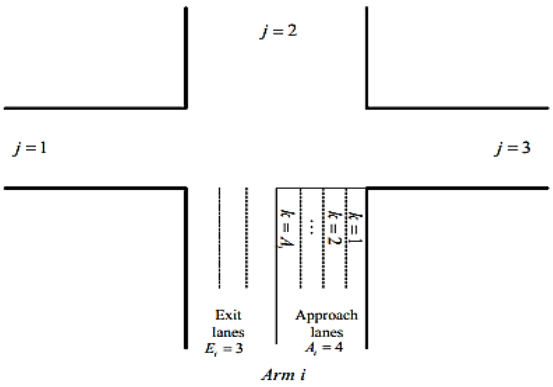
٤-١ تابع هدف

در حالت عمومی میزان عملکرد هرگونه تسهیلات به نسبت $\frac{v}{c}$ بیان می‌شود. اگر این عدد برابر یک باشد به معنی برابری عرضه و تقاضا است اگر بیش از یک باشد ایجاد صف می‌شود و ازنظر بهره‌برداری مطلوبیت ندارد.

همان‌طور که در قسمت تعریف مسئله بیان شد، تقاضا یک امر متناسب به زمان است و می‌تواند اختلاف آن در ساعت اوج با سایر زمان‌های کم تردد تا چندین برابر گردد. استفاده از این نسبت به‌عنوان تابع هدف مناسب نیست؛ زیرا بیشینه کردن آن ازنظر عملی فاقد وجهات است؛ بنابراین از ضریب μ به‌عنوان سهمی از تقاضای پاسخ‌داده‌شده استفاده می‌گردد.

عدد (μQ) مقدار واقعی متقاضی عبوری از تقاطع (تقاضا Q) است. هرچقدر این عدد به متقاضیان عبور داده‌شده نزدیک شود، کارایی تقاطع بهبود می‌یابد. اگر مقادیر عملکرد از مقطع را با ضریب μ پایش کنیم. هرچقدر این ضریب افزایش یابد یعنی عملکرد مقطع بهتر است. برای μ_{max} داریم:

$$\mu_{max}<1 \Rightarrow \text{Overlaoded}=100(1-\mu_{max})$$
$$\mu_{max}>1 \Rightarrow \text{Reserve Capacity}=100(\mu_{max}-1) \quad (١)$$



شکل ۱. نمونه تقاطع برای مدل‌سازی

٤-٢ قیود بهینه‌سازی

در تمام قیود دامنه شمارش متغیرهای شمارنده به شرح زیر است، مگر آن‌که خلاف آن گفته شده باشد:

$$i=1,...,N_v;\ j=1,...,N_v-1;\ k=1,...,A_i \quad (٢)$$

- حداقل یک خودرو از تقاطع عبور کند.

$$\sum_{j=1}^{N_v-1}\alpha_{i,j,k}\geq 1 \quad (٣)$$

- میزان خروجی‌ها بیشتر از ورودی‌ها باشد.

$$\sum_{k=1}^{A_i}\alpha_{i,j,k}\leq E_j \quad (٤)$$

- ترددهای ممنوع

$$\sum_{k=1}^{A_i}\alpha_{i,j,k}\leq \Delta Q_{i,j} \quad (٥)$$

$$\Delta\alpha_{i,j,k} \geq q_{i,j,k} \geq 0 \quad (٦)$$

• حرکات مجاز در خطوط مجاور

$$1-\alpha_{i,m,k} > \alpha_{i,j,k} \quad (٧)$$

$$i=1,...,N_v ; j=1,...,N_v-2; k=1,...,A_i-1 \quad (٨)$$

• برای تأمین تردد برحسب تقاضا از ضریب تنظیم μ استفاده می‌کنیم.

$$\sum_{k=1}^{A_i} \alpha_{i,j,k} = \mu Q_{i,j} \quad (٩)$$

• ضریب جریان برای خطوط مجاور هم

$$\Delta\left(2-\alpha_{i,j,k}-\alpha_{i,j,K+1}\right) \geq \left(\frac{\sum_{j=1}^{N_v-1}(q_{i,j,k}\gamma_{i,j})}{S_{i,k}}\right) - \left(\frac{\sum_{j=1}^{N_v-1}(q_{i,j,k+1}\gamma_{i,j})}{S_{i,k+1}}\right) \geq -\Delta\left(2-\alpha_{i,j,k}-\alpha_{i,j,K+1}\right) \quad (١٠)$$

• محدود کردن حداکثر ضریب اشباع

$$d_{i,K}+\lambda \geq \frac{1}{p_{i,k}s_{i,k}}\sum_{j=1}^{N_v}(q_{i,j,k}\gamma_{i,j}) \quad (١١)$$

• محدودیت مدت‌زمان سیکل

$$\frac{1}{c_{\min}} \geq \lambda \geq \frac{1}{c_{\max}} \quad (١٢)$$

• تنظیم یکسان چراغ خطوط

$$\Delta\left(1-\alpha_{i,j,k}\right) \geq b_{i,k}-B_{i,j} \geq -\Delta\left(1-\alpha_{i,j,k}\right) \quad (١٣)$$

$$\Delta\left(1-\alpha_{i,j,k}\right) \geq d_{i,k}-D_{i,j} \geq -\Delta\left(1-\alpha_{i,j,k}\right) \quad (١٤)$$

• محدودیت زمان شروع سیکل

$$0 < B_{i,j} < 1 \quad (١٥)$$

• محدودیت مدت‌زمان سیکل

$$g_{i,j}\lambda \leq D_{i,j} \leq 1 \quad (١٦)$$

• فازبندی چراغ‌راهنمایی

ترتیب نمایش فازها برای اجتناب از ناسازگاری‌های جریان ترافیک انتخاب می‌شوند. این ناسازگاری‌ها به سه دسته: ۱- ادغام[٥]؛ ۲- جداسازی[٦]؛ ۳- متقاطع[٧]؛ تقسیم می‌شوند. با توجه به میزان خطرآفرینی هرکدام از این ناسازگاری‌ها نحوه برخورد با آن نیز متفاوت است. جداسازی جریان خطر بسیار ناچیزی دارد و در روابط وارد نمی‌شود. از تأثیر ادغام نیز می‌توان چشم‌پوشی کرد و جریان متقاطع بسیار خطرآفرین است و باید به‌صورت حفاظت‌شده در مدل در نظر گرفته شود. مجموعه‌های ناسازگار Ψcمی‌تواند یکی از زیرمجموعه‌های Ψ باشد. تو حرکت ناسازگار (i,j) و (l,m) که از اعضای Ψ_c هستند که در مدل به‌صورت صفرویک بدین شکل مدل می‌شوند:

$$\Omega_{i,j,l,m} = (0 \text{ or } 1)$$

برای مدل‌سازی آن از قید زیر استفاده می‌کنیم:

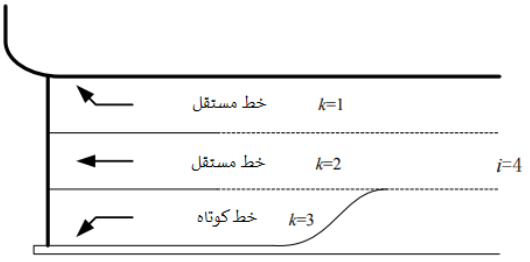
$$\Omega_{i,j,l,m}+\Omega_{l,m,i,j}=1; \forall((i,j),(l,m)) \in \Psi_C \quad (١٧)$$

• محدودیت تأمین تمام‌قرمز برای تخلیه

$$D_{l,m}+\Omega_{i,j,l,m}+\Delta(2-\alpha_{i,j,k}-\alpha_{l,m,n}) \geq D_{i,j}+B_{i,j}+\omega_{u,v}\lambda \quad \forall(u,v) \in \Psi \quad (١٨)$$

• محدودیت مربوط به خطوط کوتاه

در تقاطع چراغ‌دار عموماً یک خط کوتاه برای گردش‌به‌چپ یا راست در نظر گرفته می‌شود. روش مدل‌سازی این خط بر اساس نتایج مرجع [۱۵] جمع‌بندی شده است.



شکل ۲. نمایی از یک خط کوتاه

ظرفیت رویکرد تقرب در خطوط کوتاه گردش‌به‌چپ یا راست به‌طور خاص به طول خط کوتاه، نسبت بین وسایل نقلیه عبوری و گردشی (غیرمستقیم) و زمان سبز برای وسایل نقلیه عبوری مرتبط است. در شکل ۲، $S_{4,1}$و $S_{4,2}$ خطوط مستقل (اختصاصی)[۸] در تحت حالت اشباع و $S_{4,3}$ یک خط کوتاه[۹] تحت حالت اشباع را نشان می‌دهد. اگر طول خط کوتاه کافی باشد هر سه خط به‌طور مؤثر جریان را از خود عبور می‌دهند و جریان اشباع برابر خواهد بود $S_{4,1}+S_{4,2}+S_{4,3}$ و g_1 زمانی است که برای تخلیه آن نیاز است. اگر طول خط کوتاه متناسب نباشد زمان تخلیه برابر خواهد بود g_2 ضریب جریان اشباع بر اساس $S_{4,1}+S_{4,2}$ با توجه به شکل ۳ جریان اشباع خط کوتاه بر اساس رابطه (۱۹) محاسبه می‌شود و به‌اختصار نتایج جدول ٤ استنتاج می‌گردد.

$$S'_{4,3}=\frac{g_1}{g}S_{4,3} \qquad (۱۹)$$

$$S'_{4,3}=\frac{L_s}{l_c g} \qquad (۲۰)$$

L_S: طول خط کوتاه

l_c: متوسط طول خودرو عبوری.

g: مدت‌زمان سبز فاز است.

$$g_1=\frac{L_S\, t}{l_c} \qquad (۲۱)$$

t: میانگین زمان عبور هر خودرو از مقطع است.

جدول ٤. نتایج مدت‌زمان فاز و نرخ جریان بر اساس طول خط کوتاه بر عملکرد تقاطع

ردیف	اگر	آنگاه
۱	$S'_{4,3}<S_{4,3}$	تمام طول خط کوتاه پر نشده است.
۲	$g \geq g_1$	تمام (صف) خودروهای خط کوتاه باهم تخلیه می‌شوند.
۳	$g < g_1$	تمام خودروهای خط کوتاه در یک‌فاز تخلیه نمی‌شوند و صف بیش از یک‌فاز ادامه خواهد داشت.
٤	$g \leq g_1 \wedge S'_{4,3}=S_{4,3}$	در این حالت (بهینه) از تمام طول مقطع استفاده شده است و ایجاد صف هم نمی‌شود.

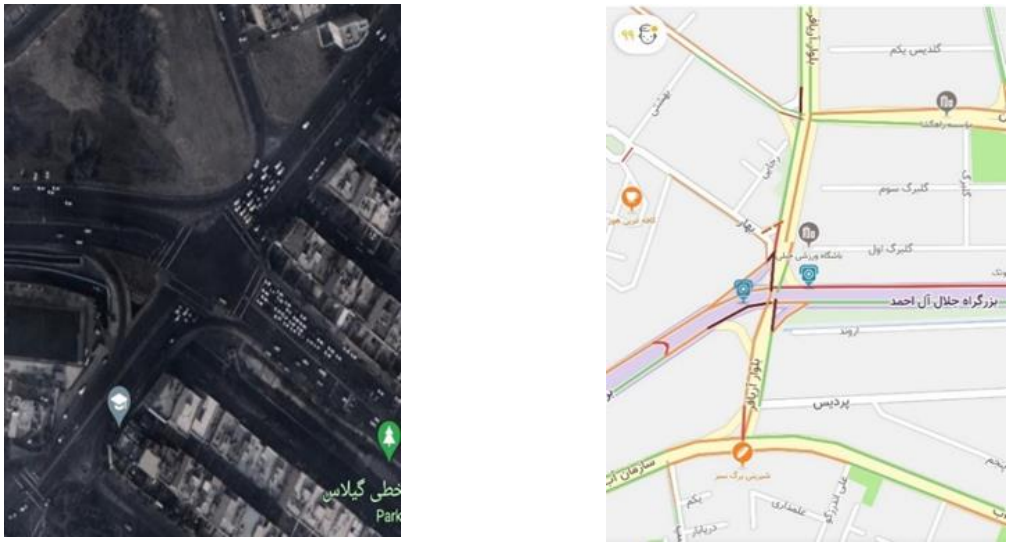
برای مدت‌زمان بهینه مدت‌زمان سبز برای خطوط کوتاه با طول محدود g_1 دو قید زیر اضافه می‌شوند:

$$d_{i,k}=g_{i,k}=\frac{L_s t}{l_c} \qquad (۲۲)$$

k: تعداد خطوط کوتاه است.

۵. تحلیل داده‌ها

تقاطع بزرگراه جلال آل احمد و بلوار آریافر تهران به‌عنوان مطالعه موردی بهینه می‌گردد. عکس ماهواره‌ی تقاطع از تارنمای گوگل ارث[۱۰] و نقشه آن از نرم‌افزار بلد[۱۱] در شکل ۳ رسم شده است.



شکل ۳. الف- نقشه تقاطع، ب- عکس ماهواره‌ای

۵-۱ متغیرهای هندسی تقاطع

رویکردهای تقاطع ارائه شد به‌صورت جدول ۵ خلاصه شده است:

جدول ۵. مشخصات هندسی تقاطع

جهت ورود	۱-جلال شرق	۲-آریافر شمال	۳-جلال غرب	٤-آریافر جنوب
تعداد خطوط	٤ ار،۲م،۱چ	۳ ار،۲م،۱چ	۳ ار،۲م،۲چ	۳ ار،۲م،۱چ
طول خط کوتاه	٦٥	۰	۰	۰

فقط محور غرب به شرق جلال آل احمد دارای خط کوتاه برای گردش‌به‌چپ است. خطوط گردش‌به‌راست موجود و بدون کنترل مجاز دانسته شده‌اند. تدابیر ترافیکی بار تفکیک جریان مانند ارتباط خیابان بهار با بزرگراه جلال آل احمد با توجه به عدم دخالت در ظرفیت تقاطع در مدل وارد نمی‌شود.

جدول ٦. متغیر تردد: حجم تردد بر حست خودرو شخصی در ساعت اوج

خروج / ورود	۱-جلال شرق	۲-آریافر شمال	۳-جلال غرب	٤-آریافر جنوب
۱-جلال شرق	-	۹۵	٦۲۸	۳۹
۲-آریافر شمال	۲۸۳	-	۸۰	۹٤
۳-جلال غرب	٥۱۸	۸٦	-	۳۲۰
٤-آریافر جنوب	۱۰۸	۷۹	۲۳	-

۵-۲ بررسی سناریوهای مختلف

۵-۲-۱ حالت اول: تمام جریان‌های ترافیک متداخل و قطع کننده منع شوند.

در این حالت مدل قیود ما بسط یافته (رابطه ۱) لغایت (رابطه ۱۸) خواهد بود.

۵-۲-۲ حالت دوم: چشم‌پوشی از بعضی ناسازگاری‌های کم‌حجم

در این حالت با توجه به کوچک بودن مقادیر $Q_{2,3}$ و $Q_{4,1}$ برای ناسازگاری حرکت (۲،۳،٤،۳) و (۲،۱،٤،۱) در (رابطه ۱۷) و (رابطه ۱۸) بسط خواهد یافت.

در این حالت مدل قیود ما بسط یافته (رابطه ۱) لغایت (رابطه ۱۸) خواهد بود.

۵-۲-۳ حالت سوم: ایجاد صف در خطوط کوتاه، مسیر ۱ و ۳

ایجاد این صف باعث کاهش ظرفیت تقاطع می‌شود بنابراین باید محدودیت خط کوتاه در تقاطع دیده شود. در حالت اول و دوم قیود (رابطه ۱۹) لغایت (رابطه ۲۲) اضافه می‌شوند.

۵-۳ تعریف سایر متغیرها و ثابت‌های مدل

با توجه به متغیرهای معرفی‌شده نیاز است، یک سری مقادیر تعریف شود این مقادیر بر اساس استراتژی‌ها، واقعیت‌های تقاطع، جنس و نرخ ترافیک عبوری تعیین می‌گردد. آستانه صبر رانندگان حدود دو دقیقه است؛ بنابراین بیشینه زمان هر سیکل نباید بیش از این میزان باشد و با توجه به زمان موردنیاز برای عبور از تقاطع حداقل زمان نیز حدود ۵ ثانیه در نظر گرفته می شود. بدیهی است بهترین زمانی که ظرفیت تقاطع بیشینه گردد محدود به این دو زمان خواهد شد.

جدول ۷. سایر متغیرها

ردیف	شرح متغیر	نماد	مقدار
۱	بیشینه زمان هر سیکل	C_{max}	۱۲۰ ثانیه
۲	کمینه زمان هر سیکل	C_{min}	۵ ثانیه
۳	حداکثر ضریب قابل‌پذیرش اشباع	$P_{i,k}$	٪۹۰
٤	ضریب تبدیل حرکات چرخشی به حرکات مستقیم	$\gamma_{i,j}$	۱/۳ گردش‌به‌راست ۱/۱ گردش‌به‌چپ ۱/۰ مستقیم
۵	حداقل زمان تخلیه تمام‌قرمز برای تمامی (u,v) ها	$\omega_{u,v}$	٦ ثانیه
٦	میانگین طول اشغال خودروها در خط کوتاه		۱۰ متر
۷	میانگین طی کردن تقاطع برای هر خودرو		۲/۸ ثانیه

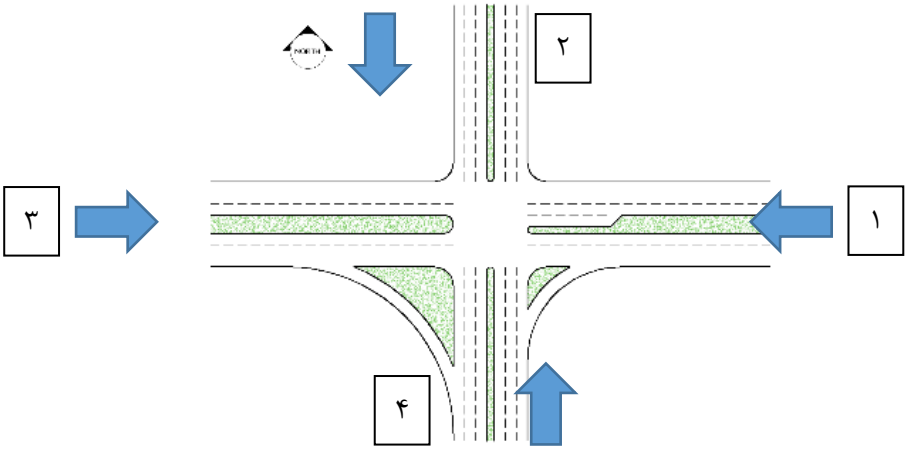
۵-٤ حل مدل

یک برنامه ساده در محیط متلب برای حل این مدل غیرخطی به روزش صفر و یک نوشته شده است. شیوه عمل به‌اختصار به این شرح است: تمام حالات ممکن (دو به توان n) نوشته می‌شود سپس قیود برای تمام حالات چک می‌گردد. اگر حالتی باشد که قیدی را ارضا نکند ضریب مقدار متناظر آن در تابع هدف را منفی می‌کنیم. درنهایت بیشینه مقادیر تابع هدف را جستجو می کنیم. بدیهی است که مقادیر منفی (حالت جریمه داری که ناقض قیود بودند) هرگز به‌عنوان جواب انتخاب نخواهد شد. نتایج بهینه به‌اختصار در جدول ۸ ارائه شده‌اند.

جدول ۸ مقادیر بهینه تابع هدف و تحلیل آن

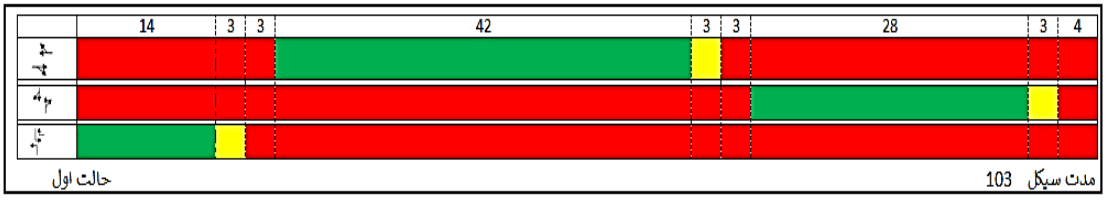
حالت	μ_{max}	ظرفیت بهبودیافته شده	زمان بهینه $\frac{1}{\lambda}$
		درصد	ثانیه
۱	۱/۱٤٥٦	۱٤/٥٦	۱۰۳
۲	۱/۱٤٥٦	۱٤/٥٦	۱۰۳
۳	۱/۰۸۷	۸/۷۰	۱۰۳

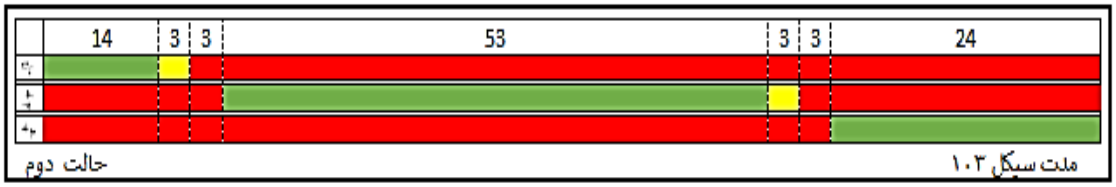
برای تفسیر ترافیکی، پس از مشخص شدن تمام مقادیر (تعیین متغیرها در حالت بهینه) هر حالت به‌عنوان یک سناریو در نرم‌افزار سینکرو شبیه‌سازی شدند و نتایج آن به شکل ۵ نمایش داده شده‌اند. تفسیر ترافیکی مدل‌ها به شرح جدول ۹ است.

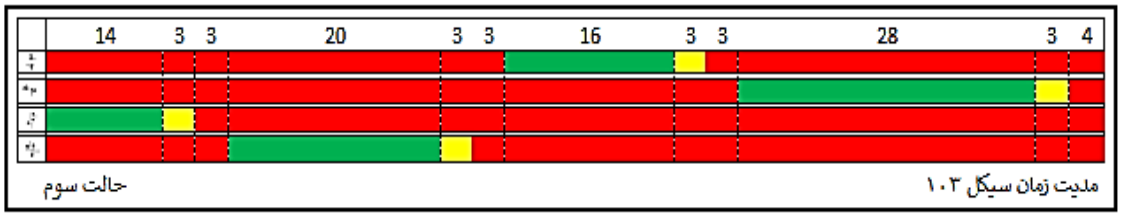


شکل ٤. دیاگرام تقاطع

در شکل ۵ فازبندی گردش‌به‌چپ مسیر غرب به شرق تقاطع در نظر گرفته شده است که نتایج نشان می‌دهد. این موضوع باعث افزایش تأخیر و کاهش کارایی تقاطع می‌شود.







شکل ۵. زمان‌بندی بهینه چراغ‌راهنمای در سه حالت

در شکل ۱ و ۲ ظرفیت مقطع تقریباً ثابت است ولی میزان تأخیر و زمان سفر متفاوت است.

جدول ۹. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در نرم‌افزار سینکرو

حالت	۱	۲	۳
وسیله نقلیه ورودی	۳۲٤۳	۳۲٤۰	۲۸٦۷
وسیله نقلیه خروجی	۳۲٤۰	۳۲۳۹	۲۸۵۸
زمان عبور جریان تجمعی (ساعت)	۵۸/۷	۵۸	۷۰/۳
زمان تأخیر تجمعی (ساعت)	٤۳/۹	٤۲/٦	۸٤/۱
تعداد توقف‌ها (عدد)	۲۸٦۷	۲۸٦۵	۳۱۰۵

میزان وسایل عبوری از تقاطع در مدت‌زمان شبیه‌سازی برابر با ظرفیت مقطع است که مطابق نتایج مدل حالت اول و دوم تقریباً برابر هستند در حالت سوم که اثر خط کوتاه دیده شد است از ظرفیت تقاطع کاسته شده است. با توجه به زمان سفر و زمان کل تأخیر می‌توان نتیجه گرفت حالت دوم از حالت اول بهتر است.

٦. نتیجه‌گیری

در این تحقیق به‌منظور افزایش ظرفیت تقاطع چراغدار زمان هم بهینه‌سازی زمانی – هندسی تقاطع در نظر گرفته شده است. مدل برنامه‌ریزی غیرخطی تقاطع به روش صفرویک حل شد. تقاطع جلال آل احمد – آریافر به‌عنوان نمونه موردمطالعه قرار گرفت. موارد زیر حاصل شد:

۱- برای سنجش اعتبار مدل، از شبیه‌سازی تقاطع در نرم‌افزاری سینکرو استفاده شده است.

۲- نتایج به‌دست‌آمده حاکی بر بهبود چهارده‌درصدی ظرفیت تقاطع دارد.

۳- بحث عدم نیاز به خط کوتاه گردش‌به‌چپ در رویکرد جلال آل احمد شرق به غرب نیز در شبیه‌سازی تأیید شد.

٤- حداکثر زمان یک سیکل کامل ۱۰۳ ثانیه به دست آمد که این زمان به شکل بهینه تخصیص یافت.

۵- در مقادیر برابر در تابع هدف، گزینه‌ای که میزان تأخیر سفر کمتر داشت برگزیده شد.

۷. پی‌نوشت‌ها

1. Waveshoke
2. Genetic algorithm
3. Differential Evolution
4. Short Lane
5. Merging
6. Splitting
7. Crossing
8. Exclusive lanes
9. Short lane
10. Google Earth

۱۱. یک نرم‌افزار مسیریابی است.

۸ مراجع

– He, S., et al., An Improved Optimization Method for Isolated Signalized Intersection Based on the Temporal and Spatial Resources Integration. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2013. 96: p. 1696-1706.

– Roshandeh, A.M., et al., New Methodology for Intersection Signal Timing Optimization to Simultaneously Minimize Vehicle and Pedestrian Delays. Journal of Transportation Engineering, 2014. 140(5).

– Zhou, Z. and M. Cai, Intersection signal control multi-objective optimization based on genetic algorithm. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2014. 1(2): p. 153-158.

– Bargegol, I., et al., Timing optimization of signalized intersections using shockwave theory by genetic algorithm. Computational Research Progress in Applied Science & Engineering, 2015. 1: p. 160-167.

– Eriskin, E., et al., Optimization of Traffic Signal Timing at Oversaturated Intersections Using Elimination Pairing System. Procedia Engineering, 2017. 187: p. 295-300.

– Shen, Y. An optimization model of signal timing plan and traffic emission at intersection based on Synchro. in IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. IOP Publishing.

– Wong, C.K. and Y. Liu, Optimization of signalized network configurations using the Lane-based method. PLoS One, 2019. 14(6): p. e0216958.

– Jamal, A., et al., Intelligent Intersection Control for Delay Optimization: Using Meta-Heuristic Search Algorithms. Sustainability, 2020. 12(5).

– Pourmehrab, M., L. Elefteriadou, and S. Ranka, Real-time Intersection Optimization for Signal Phasing, Timing, and Automated Vehicles' Trajectories. arXiv preprint arXiv:2007.03763, 2020.

– Wang, J., J. Hang, and X. Zhou, Signal Timing Optimization Model for Intersections in Traffic Incidents. Journal of Advanced Transportation, 2020. 2020: p. 1-9.

– Ibryaeva, O., et al., A study of the impact of the transport queue structure on the traffic capacity of a signalized intersection using neural networks. Transportation research procedia, 2021. 52: p. 589-596.

– Roy, B., et al., Optimization of Delay Time at Signalized Intersections using Direction-Wise Dynamic PCE Value. International Journal of Transportation Engineering, 2021. 8(3): p. 279-298.

– Zhang, X., et al., Intersection Signal Timing Optimization: A Multi-Objective Evolutionary Algorithm. Sustainability, 2022. 14(3).

– Li, R., et al., Traffic control optimization strategy based on license plate recognition data. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2023.

– Zhao, J., M. Yun, and X. Yang, Capacity Model for Signalized Intersection under the Impact of Upstream Short Lane. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2013. 96: p. 1745-1754.

– Roess, R.P., E.S. Prassas, and W.R. McShane, Traffic engineering. Fifth edition ed. 2019, Prentice Hall: Pearson.

Maximazation Capacity of Signalized Intersection with Mathematic Programming by Timming and Geometric Variable

Case Study: Jalal-Al-Ahmad, Aryanfar Intersection

Parham Hayati*, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
Behzad Pezeshki, PhD student in Transportation Engineering, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

E-mail: p.hayati@srbiau.ac.ir

Abstract

In the current research, a new approach has been used to optimize the performance of the intersection. The combination of time variables and geometric is enhanced optimization of intersection capacity. Traffic lanes and traffic light settings are considered as decision variables, and the limitation of short lines is also included in the modeling. short are very common and can be seen in many intersections. Intersection capacity and performance have a very significant positive and negative relationship with the variables of short lines. In the present research, with three new approaches: 1- Considering the geometrical variables of the intersection along with the timing and phasing variables of the lights; 2- Considering the short line and its effect; 3- Using mixed integer programming, zero-one as methodology; The capacity of the intersection of Jalal Al-Ahmad highway and Arianfar Boulevard was maximized and the efficiency of the intersection increased by about fourteen percent. In order to validate the model and check the behavior of the intersection, the model was simulated in Synchro software, and the capacity, travel time and delay of the intersection were estimated.

Keywords: Signalized Intersection Capacity, Mixed integer programming, traffic signal timing, Short lane