توسعه مدل و نرم‌افزاری برای ارزیابی کارآیی گزینه‌های ترنزیشن چراغ‌های هماهنگ شده

مقاله علمی – پژوهشی

علی غلامی*، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: ali.gholami32@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۲۰– پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۲۸
صفحه ۲۹۶-۲۸۱

چکیده

در چراغ‌های هماهنگ شده، ممکن است یک چراغ به دلیل زیاد بودن زمان عبورعابر پیاده، وجود چراغ اولویت دهی حمل و نقل همگانی، یا عبور وسایل نقلیه اضطراری، وارد ترنزیشن شود. در چنین شرایطی، چراغ سعی می کند هماهنگی مختل شده را با یکی از گزینه‌های ترنزیشن، به برنامه اصلی خود بازگرداند. چندین گزینه برای ترنزیشن وجود دارد، از جمله Dwell، Max Dwell، Add، Subtract و Short way برای داشتن ابزار کمّی جهت تجزیه و تحلیل گزینه‌های مختلف ترنزیشن، در این مطالعه مدل‌های ریاضی روش‌های ترنزیشن توسعه یافته است. از آن‌جائی‌که استفاده از این مدل‌ها برای متخصصین ترافیک ساده نیست، این مدل‌های ریاضی در نرم‌افزاری به نام TOD (Transition Options Delays) پیاده سازی شدند، که به صورت آزاد در دسترس علاقه مندان به استفاده از آن است. با استفاده از این نرم‌افزار، طراحان چراغ به سادگی پارامترهای متداول زمان‌بندی مانند طول چرخه، حجم وسیله نقلیه و عابر پیاده و زمان مورد نیاز عبور عابر پیاده را وارد می‌کنند سپس این نرم‌افزار براساس تاخیر کلی بهترین گزینه ترنزیشن را پیشنهاد می‌دهد. انتظار می‌رود که مدل‌ها و نرم‌افزار ساخاته شده از آن‌ها پیشنهادات بهتری برای چراغ‌های هماهنگ شده ارایه دهند.

واژه‌های کلیدی: روش‌های ترنزیشن، زمان‌بندی عبورعابر پیاده، وسایل نقلیه اضطراری، هماهنگ‌سازی چراغ

۱- مقدمه

اکثر تصادفات عابر پیاده در تقاطع‌های چراغ دار رخ می‌دهد. استانداردها معمولا بسته به عرض خیابان حداقل زمانی را برای عبور ازمحل عبورعابر ملزم می‌کنند، که می‌تواند بر کارایی سیستم چراغ و افزایش ازدحام تأثیر منفی بگذارد. بنابراین، ممکن است این خود نقض غرض تامین ایمنی عابر پیاده، بخاطر افزایش خستگی راننده و افزایش خطرات برخورد وسایل نقلیه باشد. این تأثیر می‌تواند برای سیستم‌های چراغ های هماهنگ شده که در آن باید از بین دو گزینه مدیریت زمان‌بندی عابر پیاده یکی انتخاب شود چشمگیر باشد. این دو گزینه مدیریت زمان‌بندی عابر عبارتند از ۱) افزایش زمان سبز خیابان فرعی در همه‌ی چرخه‌ها و ۲) اضافه کردن زمان لازم به زمان سبز خیابان فرعی فقط در چرخه‌هایی که درخواست عبور عابر وجود دارد. در هر دو حالت عبور عابر بر سیستم‌های چراغ‌ها هماهنگ شده تأثیر منفی می‌گذارد. در حالت اول معمولاً طول چرخه‌ی طولانی تر لازم است. طول چرخه طولانی‌تر منجر به تاخیر بیشتر در شرایط حجم پایین می‌شود. از طرف دیگر، در حالت دوم عبور عابر پیاده باعث ترنزیشن چراغ می‌شود، چرا که به دلیل استفاده از طول چرخه کوتاه‌تر، اختلال در هماهنگی چراغ‌ها ایجاد می‌شود. چندین الگوریتم ترنزیشن وجود دارد که می‌تواند بر این تصمیم که گزینه‌ی اول مدیریت زمان عابر بهتر است یا گزینه‌ی دوم تأثیر بگذارد. به منظور دستیابی به عملکرد بهینه سیستم می‌توان برای مهندسان طراح چراغ دستورالعملی تدوین کرد که شرایط ترجیح یک گزینه به

گزینه دیگر به روشنی مشخص شود. در حال حاضرچنین دستورالعملی در ادبیات موضوع وجود ندارد. از اهداف اصلی این تحقیق، تولید نرم‌افزاری است تا به طراح چراغ نشان دهد برای احجام مختلف عابر پیاده، زمان عبور عابر پیاده، روش های مختلف ترنزیشن، زمان‌بندی چراغ، وزن خیابان فرعی (در مقایسه با خیابان اصلی) و طول چرخه با انتخاب هر کدام از روش‌های ترنزیشن تاخیر وسایل نقلیه در تقاطعات هماهنگ شده چقدر می‌شود. با استفاده از این نرم‌افزار، طراحان چراغ می‌توانند بهترین گزینه برای هر موقعیت چراغ را انتخاب کنند.

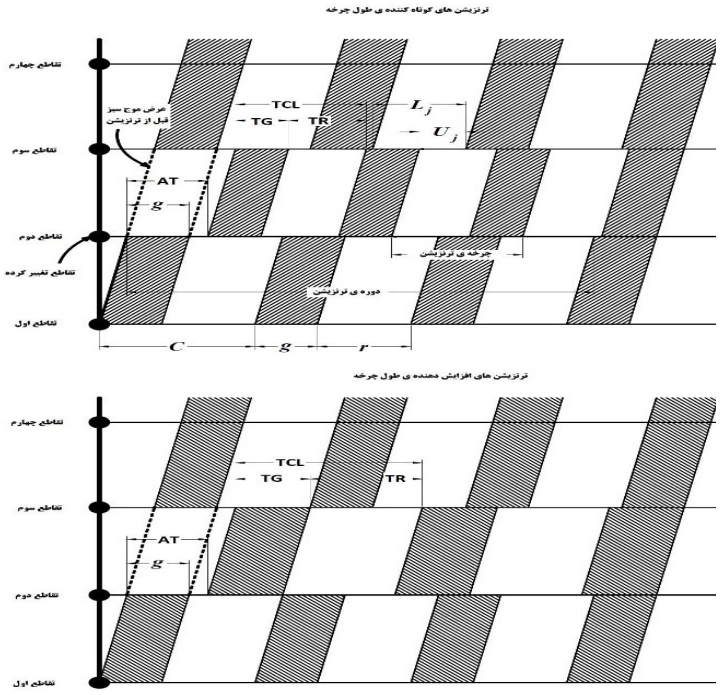
۲- پیشینه تحقیق

برای سیستم‌های چراغ‌های هماهنگ شده، زمان‌بندی عابر پیاده در برنامه‌های زمان‌بندی چراغ می‌تواند ضمن ایجاد تأثیرات ناچیز در ترافیک خودرو، خدمات بهتری را به عابران پیاده ارایه دهد، در حالی که تأثیرات ناچیزی در ترافیک وسایط نقلیه ایجاد می کند، به خصوص هنگامی که طول چرخه چراغ توسط تقاضای ترافیک مشخص می‌شود. با این حال، هنگامی که حجم وسایل نقلیه و عابر پیاده کم است، عابران پیاده ممکن است به یک دوره چرخه طولانی غیر ضروری نیاز داشته باشند، که می تواند باعث تاخیر طولانی و عصبانیت راننده‌ها شود. این که تحت چه شرایطی باید زمان عابرپیاده را در نظر گرفت و این امر چگونه بر کارایی کلی سیستم تأثیر می‌گذارد، یکی از موضوعات بحث برانگیز بین مهندسان ترافیک بوده است. بحث در مورد این موضوع را می‌توان در چندین مطالعه یافت (Parsonson, 1992; Koonce et al., 2008; Tian et al., 2001; Zhu and Yang, 2019; Chowdhury et al., 2019; Campos, 2021). برای سیستم‌های چراغ‌ها هماهنگ، مهندسان ترافیک از دو استراتژی کلی چراغ زمان بندی برای اداره‌ی عبور عابر پیاده استفاده می‌کنند: زمان بندی بر اساس حداقل زمان عابر پیاده و زمان‌بندی بر اساس حداقل وسیله نقلیه. تیان و همکاران (Tian et al., 2000) اثرات مختلف دو گزینه عبور عابرپیاده را از طریق مطالعات موردی تجزیه و تحلیل کرده‌اند. مشخص شد که اگرچه زمان‌بندی بر اساس حداقل وسایل نقلیه به طور کلی می تواند منجر به کوتاه شدن چرخه سیستم شود، زمان بندی بر اساس حداقل عابر پیاده نیزبه طور معمول می‌تواند همان بازده عملیاتی را بدهد. مزیت عمده استراتژی زمان‌بندی بر اساس حداقل زمان مورد نیازعابر پیاده این است که چراغ بدون در نظر گرفتن فاز فعال عابر پیاده، در هماهنگی باقی می‌ماند، بنابراین، از نظر عملکرد سیستم، گزینه ارجح است (Tian et al., 2001). در مطالعه دیگری، تیان و شو (Tian and Xu 2006) مدلی را پیشنهاد کردند که شامل احتمال عبور عابر پیاده در یک چرخه و ظرفیت و تأخیر متناظر آن است. هی و همکاران (He et al., 2014) اثر وسایل نقلیه دارای اولویت و درخواست عبور عابر پیاده بوسیله دکمه‌های عابر را که می تواند هماهنگی چراغ را قطع کند، مطالعه کرده‌اند. زمان بندی بر اساس حداقل عابر پیاده یا داشتن اولویت وسایل نقلیه اضطراری موجب ترنزیشن در تقاطع های چراغ دار هماهنگ می‌شود. به تازگی، لی و همکاران (li et al., 2020) و گاوریک و همکاران (Gavric et al., 2022) نیز روش‌های درنظرگیری زمان‌بندی عابر پیاده در تقاطعات هماهنگ شده را ارزیابی کردند. بعضی ازتحقیقات، بیشتر بر روی پیشنهاد روش ترنزیشن متمرکز شده‌اند. لی و ویلیامز (Lee and Williams 2011) یک مدل ترنزیشن را پیشنهاد داده‌اند که مبتنی بر یک مدل ریاضی غیر خطی است که حداقل سازی تأخیر را از طریق تنظیمات افزایشی و همزمان در جابجایی و طول چرخه در طول ترنزیشن برنامه فراهم می‌کند. شین وخان (Qin and Khan 2012) دو استراتژی کنترل جدید را برای فعال کردن چراغ از حالت عادی به حالت پیش فرض چراغ اضطراری گزارش دادند در نتیجه وسیله نقلیه اضطراری می تواند با سرعت عملیاتی خود با خیال راحت به تقاطع نزدیک شده از آن عبور کند. سپس آنها از یک الگوریتم کنترل بهینه برای برگرداندن چراغ به عملکرد طبیعی استفاده می کنند. تحقیقاتی نیزوجود دارد که بر تحلیل گزینه های مختلف ترنزیشن متمرکز است. کوهن و همکاران (Cohen et al., 2007) با استفاده از CORSIM و مائو (Mao, 2015) عملکرد روش‌های مختلف ترنزیشن در ۱۰ تقاطع شریانی را با استفاده از VISSIM مورد تجزیه تحلیل قراردادند. سایر مطالعات در این زمینه که می‌توان به آنها اشاره کرد عبارتند از شلبی و همکاران (Shelby et al., 2006)، و لی و ویلیامز (Lee and Williams 2012). تقریباً می‌توان گفت در حال حاضر تنها روش رایجی که برای تجزیه و تحلیل گزینه های

ترنزیشن استفاده می‌شود، شبیه سازی است. اگرچه شبیه سازی روشی موثر برای تجزیه و تحلیل چراغ‌های هماهنگ است، ولی برای مدل‌سازی تقاطع‌ها به زمان و هزینه قابل توجهی نیاز دارد. در این مقاله، ابتدا مدل ریاضی گزینه‌های ترنزیشن توسعه یافته است. سپس نرم‌افزاری به نام TOD (Transition Options' Delay) توسط نویسنده‌ی این مقاله توسعه داده شد که مدل های ریاضی در آن کد شده‌اند. این برنامه بصورت رایگان در دسترس قرار داده شده است و می‌تواند با ارایه‌ی نمودارهای تاخیر به مهندسین کمک کند تا بهترین روش ترنزیشن را برای چراغ‌های هماهنگ شده انتخاب کنند. در مقایسه با شبیه سازی، TOD در تجزیه و تحلیل ترنزیشن بسیار آسان‌تر و سریعتر است. در بخش بعدی، مدل ریاضی گزینه‌های ترنزیشن توسعه داده خواهد شد که می‌تواند به عنوان یک روش قوی برای تجزیه و تحلیل گزینه های ترنزیشن در شرایط مختلف حجم و چراغ استفاده شود.

۳- مدل ریاضی گزینه‌های ترنزیشن

گزینه‌ی درنظرگیری زمان‌بندی عابران پیاده در سیستم‌های چراغ‌ها هماهنگ این الزام را دارد که طول چرخه باید به اندازه کافی طولانی باشد تا بتواند زمان حرکت عابر (Walk) و زمان «دیگر وارد نشوید» (Flash -Don't-Walk) (به اصطلاح زمان تخلیه ی عابر پیاده) به اندازه‌ی سبز خیابان فرعی باشد. مزیت این روش این است که چراغ‌ها همیشه بدون توجه به عبور عابر پیاده یا عدم عبور از آن، در هماهنگی باقی می‌ماند. مهمترین نقطه ضعف طول چرخه طولانی‌تر وقتی است که حجم ترافیک وسیله نقلیه کم باشد و بنابراین این زمان‌بندی ممکن است از نظر عملیاتی ناکارآمد باشد و به تأخیرهای طولانی مدت غیرضروری در وسایل نقلیه منجر شود. گزینه دیگر عدم درنظرگیری زمان عابر پیاده است. در این گزینه زمان فاز خیابان فرعی کوتاه‌تر از آن است که برای عبور عابر پیاده لازم است. به هر حال هروقت تقاضای عبور عابر از خیابان اصلی وجود داشته باشد، زمان سبز خیابان فرعی تمدید می‌شود و درنتیجه چراغ‌ها از هماهنگی خارج می‌شوند. این گزینه باعث می‌شود که چراغ به ترنزیشن برود، که هماهنگی را مختل می‌کند و بر کارایی سیستم تأثیر منفی می‌گذارد. برای تعیین اینکه کدام گزینه برای ترنزیشن مناسب‌تراست، این بخش برای هر گزینه ترنزیشن، مدل ریاضی را پیشنهاد می‌کند که حجم وسایل نقلیه، حجم عابر پیاده و شرایط شبکه را بر مبنای تأخیر نشان می‌دهد.



شکل ۱. پارامترهای مدل ترنزیشن

۳-۱- مدل‌های کلی ترنزیشن

مدل‌های تاخیر ارایه شده در این بخش بر مبنای روابط هندسی شکل ۱ توسعه داده شده اند. فرض کنید تقاطع‌های ۱ تا ٤ در شکل ۱ با هم هماهنگ شده‌اند و زمان بندی عابر پیاده در زمان چراغ های ترافیکی قرار ندارد. اگر برای عبور از خیابان در خیابان تقاطع ۲ درخواست عابر پیاده وجود داشته باشد و زمان عابر مورد نیاز بیش از زمان سبز خیابان فرعی باشد (برای سهولت، از این به بعد در مقاله منظور از زمان سبز به معنی زمان سبز بعلاوه زرد و همه–قرمز است)، بنابراین زمان سبز خیابان اصلی (g) با زمان اضافی مورد نیاز برای عبور عابران پیاده از خیابان اصلی در اولین چرخه در حال ترنزیشن به تأخیر می‌افتد. مقدار زمان اضافی به فاصله زمانی سبز خیابان فرعی و زمان مورد نیاز عابر بستگی دارد و با معادله زیر قابل محاسبه است:

$$AT = PT - g_s \quad (۱)$$

AT: زمان اضافی مورد نیاز برای زمان سبز خیابان فرعی برای عبور عابران پیاده از خیابان اصلی (ثانیه)

PT: زمان لازم برای عبور عابر پیاده از خیابان اصلی (زمان حرکت زمان تخلیه) (ثانیه)

g_s زمان سبز خیابان فرعی (ثانیه)

در چرخه‌های ترنزیشن بعدی، مقدار AT به روش ترنزیشن و تعداد چرخه ترنزیشن در طی یک دوره ترنزیشن بستگی دارد. تعداد چرخه‌های ترنزیشن در طول یک دوره ترنزیشن را می‌توان با استفاده از معادلات زیر به دست آورد:

$$TN_s = \left\lceil \frac{AT}{C \times IP} \right\rceil \quad (۲)$$

$$\mathrm{TN_l} = \left\lceil \frac{\mathrm{C - AT}}{\mathrm{C \times IP}} \right\rceil \quad (۳)$$

$\mathrm{TN_s}$: تعداد چرخه های ترنزیشن در طول یک دوره ترنزیشن در روش ترنزیشن‌ها کوتاه کننده‌ی طول چرخه. توجه داشته باشید که نماد تابع سقف (نیم براکت) که در این معادله استفاده شده است به این معنی است که مقدار باید به عدد صحیح بزرگتر گرد شود.

$\mathrm{TN_l}$: تعداد چرخه های ترنزیشن در طول یک دوره ترنزیشن در روش ترنزیشن‌ها افزایش دهنده طول چرخه.

C: طول چرخه (ثانیه)

IP: حداکثر درصد طول چرخه که می‌تواند برای اضافه یا کم کردن از طول چرخه مجاز باشد.

روش های کوتاه سازی و طولانی کردن روش‌هایی هستند که به ترتیب از طول چرخه کم یا اضافه می‌کنند تا چراغ‌ها دوباره به هماهنگی برسند. با استفاده از معادلات ۲ و ۳، مقداری که از هر چرخه کم می‌شود (روش‌های کوتاه کردن) یا به هر چرخه اضافه می‌شود (روش‌های طولانی شدن)، می‌تواند با استفاده از معادلات زیر محاسبه گردد:

$$CC_s = -\frac{AT}{TN_s} \quad (٤)$$

$$CC_l = \frac{C - AT}{TN_l} \quad (۵)$$

CC_s: مقداری که برای کوتاه کردن طول چرخه در روش‌های کوتاه کردن از هر چرخه کاسته می‌شود (ثانیه)

CC_l: مقداری که برای طولانی شدن طول چرخه در روش‌های افزایش طول چرخه، به هر چرخه اضافه می‌شود (ثانیه)

در شکل ۱، فاصله زمانی مرز پایین سبز تأخیر افتاده تا ابتدای سبز بعدی تقاطع ۲ و ۳ را می‌توان با معادلات زیر محاسبه کرد:

$$L_2^i = \begin{cases} AT + (i-1)CC & \text{اگر } AT + (i-1)CC \le TR \\ TR & \text{اگر } AT + (i-1)CC > TR \end{cases}$$

$$i = 1, 2, \dots, TN$$

(۶)

$$L_3^i = \begin{cases} C - AT - (i-1)CC \\ \text{اگر } C - AT - (i-1)CC \le r \\ \text{و} \\ r \\ \text{اگر } C - AT - (i-1)CC > r \end{cases}$$

$$i = 1, 2, \dots, TN$$

(۷)

L^i_2: فاصله زمانی حد پایین سبز تأخیر افتاده تا ابتدای زمان سبز بعدی در تقاطع ۲ در چرخه i هنگام ترنزیشن (ثانیه)

L^i_3: فاصله زمانی حد پایین سبز تاخیر افتاده تا ابتدای زمان سبز بعدی در تقاطع ۳ در چرخه i هنگام ترنزیشن (ثانیه)

TR: زمان قرمز خیابان اصلی در طول دوره ترنزیشن (ثانیه).

CC: CC_s یا CC_lبسته به روش ترنزیشن استفاده شده

TN: TN_s یا TN_l بسته به روش ترنزیشن استفاده شده

همچنین در شکل ۱، فاصله زمانی از بالای سبز ترنزیشن (TG) تا ابتدای سبز زمان تقاطع ۲ و ۳ را می‌توان با معادلات زیـر محاسـبه کرد:

$$U_2^i = \begin{cases} AT + (i-1)CC - g & \text{اگر } AT + (i-1)CC > g \\ 0 & \text{اگر } AT + (i-1)CC \le g \end{cases}$$

$$i = 1, 2, \dots, TN$$

(۸)

$$U_3^i = \begin{cases} C - AT - (i-1)CC - g \\ \text{اگر } C - AT - (i-1)CC - g > TG \\ 0 \\ \text{اگر } C - AT - (i-1)CC - g \le TG \end{cases}$$

$$i = 1, 2, \dots, TN$$

(۹)

U^i_2: فاصله زمانی مرز فوقانی سبز تأخیر افتاده تا ابتدای زمان سبز بعدی در تقاطع ۲ در چرخه i هنگام ترنزیشن (ثانیه)

U^i_3: فاصله زمانی مرز بالای سبز تأخیر افتاده تا ابتدای زمان سبز بعدی در تقاطع ۳ در چرخه i هنگام ترنزیشن (ثانیه)

TG: زمان سبز خیابان اصلی در طول دوره ترنزیشن (ثانیه)

مقدار زمان سبز که با ترنزیشن به تأخیر می افتد عبارت است از:

$$DG_2^i = L_2^i - U_2^i$$

(۱۰)

$$DG_3^i = L_3^i - U_3^i$$

(۱۱)

DG_2^i: مقدار زمان سبز است که با ترنزیشن در تقاطع ۲ در چرخه i در هنگام ترنزیشن به تأخیر می‌افتد (ثانیه)

DG_3^i: مقدار زمان سبز است که با ترنزیشن در تقاطع ۳ در چرخه i در هنگام ترنزیشن به تأخیر می‌افتد (ثانیه)

وقتی چراغ ها هماهنگ می شوند، به جز تقاطع اول، بخشی از وسایل نقلیه به صورت دسته‌ای به تقاطع‌های بعدی می‌رسـند. بخشـی از زمان سبز خیابان اصلی که وسایل نقلیه در ابتدای آن دسته ای می‌رسند را می‌توان با استفاده از روابط زیر محاسبه کرد:

$$BT = \begin{cases} \frac{r \times MV}{SF} & \text{اگر } \frac{r \times MV}{SF} < g \\ g & \text{اگر } \frac{r \times MV}{SF} \geq g \end{cases}$$

(۱۲)

BT: بخشی از زمان سبز خیابان اصلی که وسایل نقلیه در ابتدای آن دسته ای می‌رسند (ثانیه)

r: زمان قرمز خیابان اصلی (ثانیه)

MV: حجم خیابان اصلی (وسیله بر ثانیه)

SF: نرخ جریان اشباع (وسیله بر ثانیه)

g: زمان سبز خیابان اصلی (ثانیه)

در بقیه‌ی زمان سبز وسایل نقلیه به طور تصادفی می‌رسند. مقدار زمان سبز که وسایل نقلیه به طور تصادفی می‌رسند را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$RT = g - BT$$

(۱۳)

RT: فاصله زمانی تا پایان زمان سبز خیابان اصلی که وسایل نقلیه به طور تصادفی به تقاطع می‌رسند (ثانیه)

مقدار BT و RT در دوره ترنزیشن تغییر می‌کند. مقدار آن‌ها را در طول هر چرخه از دوره ترنزیشن می‌توان با معادلات زیر محاسبه کرد:

$$BT_2^i = \begin{cases} BT & \text{اگر } U_2^i = 0 \text{ و } BT < DG_2^i \\ DG_2^i & \text{اگر } U_2^i = 0 \text{ و } BT \geq DG_2^i \\ BT & \text{اگر } U_2^i > 0 \text{ و } L_2^i - U_2^i = g \\ 0 & \text{اگر } U_2^i > 0 \text{ و } L_2^i - U_2^i < g \text{ و } RT \geq DG_2^i \\ DG_2^i - RT & \text{اگر } U_2^i > 0 \text{ و } L_2^i - U_2^i < g \text{ و } RT < DG_2^i \end{cases}$$

(۱۴)

$$RT_2^i = \begin{cases} DG_2^i - BT & \text{اگر } U_2^i = 0 \text{ و } BT < DG_2^i \\ 0 & \text{اگر } U_2^i = 0 \text{ و } BT \geq DG_2^i \\ RT & \text{اگر } U_2^i > 0 \text{ و } L_2^i - U_2^i = g \\ DG_2^i & \text{اگر } U_2^i > 0 \text{ و } L_2^i - U_2^i < g \text{ و } RT \geq DG_2^i \\ RT & \text{اگر } U_2^i > 0 \text{ و } L_2^i - U_2^i < g \text{ و } RT < DG_2^i \end{cases}$$

(۱۵)

$$BT_3^i = \begin{cases} BT & \text{اگر } U_3^i = 0 \text{ و } BT < DG_3^i \\ DG_3^i & \text{اگر } U_3^i = 0 \text{ و } BT \geq DG_3^i \\ BT & \text{اگر } U_3^i > 0 \text{ و } L_3^i - U_3^i = TG \\ 0 & \text{اگر } U_3^i > 0 \text{ و } L_3^i - U_3^i < g_t \text{ و } RT \geq DG_3^i \\ DG_3^i - RT & \text{اگر } U_3^i > 0 \text{ و } L_3^i - U_3^i < TG \text{ و } RT < DG_3^i \end{cases}$$

(۱۶)

$$RT_3^i=\begin{cases} DG_3^i-BT & \text{اگر } U_3^i=0 \text{ و } BT<DG_3^i \\ 0 & \text{اگر } U_3^i=0 \text{ و } BT\geq DG_3^i \\ RT & \text{اگر } U_3^i>0 \text{ و } L_3^i-U_3^i=TG \\ DG_3^i & \text{اگر } U_3^i>0 \text{ و } L_3^i-U_3^i<TG \text{ و } RT\geq DG_3^i \\ RT & \text{اگر } U_3^i>0 \text{ و } L_3^i-U_3^i<TG \text{ و } RT<DG_3^i \end{cases}$$

(۱۷)

BT_2^i: فاصله زمانی در ابتدای زمان سبز خیابان اصلی در تقاطع ۲ که وسایل نقلیه از آن به صورت دسته‌ای از اولین تقاطع در چرخه i هنگام ترنزیشن خارج می‌شوند (ثانیه)

RT_2^i: فاصله زمانی در ابتدای زمان سبز خیابان اصلی در تقاطع ۲ که وسایل نقلیه به طور تصادفی از اولین تقاطع در چرخه i در طول ترنزیشن خارج می‌شوند (ثانیه)

BT_3^i: فاصله زمانی در ابتدای زمان سبز خیابان اصلی در تقاطع ۳ که وسایل نقلیه از آن به صورت دسته‌ای از تقاطع ۲ در چرخه i هنگام ترنزیشن خارج می‌شوند (ثانیه)

RT_2^i: فاصله زمانی در ابتدای زمان سبز خیابان اصلی در تقاطع ۲ که وسایل نقلیه از آن به صورت تصادفی از تقاطع ۲ در چرخه i هنگام ترنزیشن خارج می‌شوند (ثانیه)

بر اساس معادلات قبلی، میانگین تأخیری که وسایل نقلیه به دلیل ترنزیشن در طول یک چرخه تجربه می‌کنند، می‌تواند توسط فرمول زیرمحاسبه شود.

$$NC_2^i=\left[BT_2^i\times SF\left(\frac{L_2^i+\left(U_2^i+RT_2^i\right)}{2}\right)\right]+\left[RT_2^i\times MV\left(\frac{\left(L_2^i-BT_2^i\right)+U_2^i}{2}\right)\right]-\left[SV_2\ \times SW\left(\frac{(AT)^2}{2}\right)\right]$$

(۱۸)

$$NC_3^i=\left[BT_3^i\times SF\left(\frac{L_3^i+\left(U_3^i+RT_3^i\right)}{2}\right)\right]+\left[RT_3^i\times MV\left(\frac{\left(L_3^i-BT_3^i\right)+U_3^i}{2}\right)\right]$$

(۱۹)

NC_2^i: تأخیر چرخه i به دلیل درخواست عابر پیاده در تقاطع ۲ (خودرو- ثانیه)

NC_3^i: تأخیر چرخه i به دلیل درخواست عابر پیاده در تقاطع ۳ (خودرو- ثانیه)

SV: حجم خیابان فرعی (خودرو بر ثانیه)

SW: وزن (اهمیت) خیابان فرعی در مقایسه با خیابان اصلی$(0\leq SW\leq 1)$

اصطلاح سوم معادله ۱۸ به خیابان فرعی اشاره دارد و فقط به چرخه اول دوره‌ی ترنزیشن اضافه می‌شود. عامل SW برای نشان دادن اهمیت خیابان اصلی در مقایسه با خیابان فرعی به مدل اضافه شده است. برای بسیاری از سازمان‌های حمل و نقل و ترافیک پیشروی در امتداد خیابان اصلی اولویت بالاتری دارد. این امر باعث می‌شود گاهی تأخیرهای بیشتری در وسایل نقلیه خیابان‌های فرعی ایجاد شود. اگر SW برابر با ۱ باشد، اهمیت یک وسیله نقلیه در خیابان اصلی برابر است با خیابان فرعی، و اگر SW برابر با صفر باشد، به این معنی است که وسایل نقلیه در خیابان های فرعی کاملاً نادیده گرفته می‌شوند.

اگر قبل از پایان دوره ترنزیشن، حجم عابر پیاده زیاد باشد، دوره ترنزیشن دیگری به دلیل درخواست‌های عابرین دیگر آغاز می شود. برای در نظر گرفتن همپوشانی دوره‌های ترنزیشن، معادله زیر تعداد چرخه‌هایی را که قبل از درخواست عابر پیاده در ترنزیشن هستند را محاسبه می‌کند:

$$TC=\begin{cases}\left\lceil\frac{1}{P(X\geq 1)}\right\rceil & \text{اگر } \frac{1}{P(X\geq 1)}\leq TN \\ TN & \text{اگر } \frac{1}{P(X\geq 1)}>TN\end{cases}$$

(۲۰)

TC: تعداد چرخه‌هایی که قبل از درخواست دیگر عابرین پیاده در حال ترنزیشن هستند.

$P(X \geq 1)$: احتمال داشتن حداقل یک درخواست عابر پیاده در طی یک چرخه

به عنوان مثال اگر $P\ (X \geq 1) = 0.2$ و $\mathrm{TN} = 6$ سپس $\mathrm{TC} = 5$. این بدان معنی است که شش چرخه برای بازگشت چراغ به هماهنگی لازم است، اما پس از پنج چرخه، درخواست عابر پیاده دیگری وجود خواهد داشت و بنابراین قبل از اتمام دوره‌ی ترنزیشن، چراغ وارد یک دوره‌ی ترنزیشن جدید می‌شود.

احتمال داشتن حداقل یک درخواست عابر پیاده در یک چرخه را می‌توان با معادله زیر محاسبه کرد:

$$P(X \geq 1) = 1 - P(X = 0) = 1 - e^{-(PV/3600)C}$$

(۲۱)

PV: حجم عابر پیاده برای عبور از خیابان اصلی (عابر بر ساعت)

با کنار هم قرار دادن معادلات قبلی، معادلات زیر می‌توانند تأخیر را برای یک دوره ترنزیشن که یک درخواست عابر پیاده در تقاطع ۲ داشته و تقاطع بعدی آن (تقاطع ۳) محاسبه کنند:

$$NC_2^t = \left[\sum_{i=1}^{TC}\left[\left[BT_2^i \times SF\left(\frac{L_2^i + \left(U_2^i + RT_2^i\right)}{2}\right)\right] + \left[RT_2^i \times MV\left(\frac{\left(L_2^i - BT_2^i\right) + U_2^i}{2}\right)\right]\right]\right] - \left[SV_2 \times SW\left(\frac{(AT)^2}{2}\right)\right]$$

(۲۲)

$$NC_3^t = \sum_{i=1}^{TC}\left[\left[BT_3^i \times SF\left(\frac{L_3^i + \left(U_3^i + RT_3^i\right)}{2}\right)\right] + \left[RT_3^i \times MV\left(\frac{\left(L_3^i - BT_3^i\right) + U_3^i}{2}\right)\right]\right]$$

(۲۳)

NC_2^t: تأخیر یک دوره ترنزیشن در تقاطع ۲ اگر درخواست عابر پیاده در تقاطع ۲ رخ دهد (خودرو–ثانیه)

NC_3^t: تأخیر یک دوره ترنزیشن در تقاطع ۳ اگر درخواست عابر پیاده در تقاطع ۲ رخ دهد (خودرو–ثانیه)

به علت نبود عابر در همه‌ی چرخه‌ها، تأخیر NC نیز در همه چرخه‌ها رخ نمی‌دهد. بنابراین، برای محاسبه تاخیر ناشی از ترنزیشن به مدت یک ساعت، باید مشخص شود که چند دوره ترنزیشن در طول یک ساعت اتفاق می‌افتد. اگر افزایش و کاهش طول چرخه در طول ترنزیشن نادیده گرفته شود، تعداد دوره‌های ترنزیشن را می‌توان با استفاده ازفرمول زیر محاسبه کرد:

$$HTN = \begin{cases} \dfrac{3600}{C \times TC} & \text{اگر } \dfrac{1}{P(X \geq 1)} \leq TN \\ \dfrac{3600}{C} \times P(X \geq 1) & \text{اگر } \dfrac{1}{P(X \geq 1)} > TN \end{cases}$$

(۲۴)

HTN: تعداد دوره‌های ترنزیشن در ساعت

طول اولین چرخه در حال ترنزیشن برابر با $C + AT$ است و طول چرخه بعدی در حال ترنزیشن برای روش‌های کوتاه شدن و طولانی شدن طول چرخه توسط معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$TCL = C + CC$$

(۲۵)

TCL: طول چرخه‌های بعد از چرخه اول در دوره ترنزیشن (ثانیه)

بنابراین، میانگین طول چرخه در طول یک ساعت را می‌توان با استفاده ازاین فرمول محاسبه کرد.

$$ACL = \begin{cases} \dfrac{(C+AT)+[(TC-1)TCL]}{TC} & \text{اگر } \dfrac{1}{P(X\geq 1)} \leq TN \\ \dfrac{(C+AT)+[(TN-1)TCL]}{TN} P(X\geq 1)TN + C\left[1-[P(X\geq 1)TN]\right] & \text{اگر } \dfrac{1}{P(X\geq 1)} > TN \end{cases}$$

(۲۶)

ACL: طول متوسط چرخه‌ها در طول یک ساعت (ثانیه)

با استفاده از مقدار طول متوسط چرخه، معادله ۲۴ را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$HTN = \begin{cases} \dfrac{3600}{ACL \times TC} & \text{اگر } \dfrac{1}{P(X\geq 1)} \leq TN \\ \dfrac{3600}{ACL} \times P(X\geq 1) & \text{اگر } \dfrac{1}{P(X\geq 1)} > TN \end{cases}$$

(۲۷)

با ضرب معادلات ۲۲ و ۲۳ در معادله ۲۷، تاخیر ساعتی ناشی از ترنزیشن در گزینه‌ی عدم درنظرگیری زمان‌بندی عابر پیاده در تقاطع ۲ و ۳ اگر درخواست عابر پیاده در تقاطع ۲ رخ دهد، می‌تواند به شرح زیر محاسبه شود:

$$ADN_2 = NC_2^t \times HTN$$

(۲۸)

$$ADN_3 = NC_3^t \times HTN$$

(۲۹)

ADN_2: تاخیر ساعتی ناشی از ترنزیشن در گزینه‌ی عدم درنظرگیری زمان‌بندی عابر پیاده در تقاطع ۲ اگر درخواست عابر پیاده در تقاطع ۲ رخ دهد (خودرو–ساعت)

ADN_3: تاخیر ساعتی ناشی از ترنزیشن در گزینه‌ی عدم درنظرگیری زمان‌بندی عابر پیاده در تقاطع ۳ اگر درخواست عابر پیاده در تقاطع ۲ رخ دهد (خودرو–ساعت)

معادلات ۲۸ و ۲۹ تاخیر ناشی عدم درنظرگیری زمان‌بندی عابر پیاده در یک تقاطع در وسط یک سری تقاطع‌های هماهنگ را محاسبه می‌کند. این روابط تأخیرهای دیگر را که بر وسایل نقلیه وارد می‌شود در نظر نمی گیرد. اگر درخواست عابر پیاده در تقاطع اول رخ دهد، دیگر نمی‌توان وسایل نقلیه ای را که به این تقاطع می‌رسند، به صورت دسته‌ای در نظر گرفت زیرا تقاطع قبلی با آن هماهنگ نیست. در نتیجه، طول چرخه این تقاطع در تقاطع قبلی آن معمولاً متفاوت است. بنابراین، حتی اگر وسایل نقلیه به دلیل وجود تقاطع بالادست به صورت دسته‌ای برسند، می توان این ورود دسته‌ای را تصادفی دانست. تأخیر ناشی از درخواست و عبور عابر پیاده در این تقاطع را می‌توان به صورت زیر مدل‌سازی کرد:

$$NC_1^t = \left[\sum_{i=1}^{TC}\left[DG_1^i \times MV\left(\frac{L_1^i - U_1^i}{2}\right)\right]\right] - \left[SV_1 \times SW\left(\frac{(AT)^2}{2}\right)\right]$$

(۳۰)

NC_1^t: تأخیر یک دوره ترنزیشن در تقاطع ۱ اگر درخواست عابر پیاده در تقاطع ۱ رخ دهد (خودرو–ساعت)

تمام پارامترهای این معادله را می‌توان مشابه معادلات مربوط به تقاطع ۲محاسبه کرد. همچنین، تاخیر تقاطع بعدی آن را می‌توان مشابه تأخیر تقاطع ۳ هنگام درخواست عابر پیاده در تقاطع ۲ محاسبه کرد. بنابراین، تأخیر ساعتی ترنزیشن در تقاطع ۱ و ۲ اگر درخواست عابر پیاده در تقاطع ۱ رخ دهد، می‌تواند به شرح زیر محاسبه گردد:

$$ADN_1 = NC_1^t \times HTN$$

(۳۱)

$$ADN_2 = NC_2^t \times HTN$$

(۳۲)

ADN_1: تأخیر ساعتی ترنزیشن در تقاطع ۱ اگر درخواست عابر پیاده در تقاطع ۱ رخ دهد (خودرو–ساعت)

ADN_2: تأخیر ساعتی ترنزیشن در تقاطع ۲ اگر درخواست عابر پیاده در تقاطع ۱ رخ دهد (خودرو–ساعت)

با جمع کردن کل تأخیر ساعتی تقاطع‌ها، می توان تاخیر کلی ترنزیشن در تقاطع با درخواست عابر پیاده و تقاطع بعدی آن را به شرح زیر محاسبه کرد:

$$ADN_x = \sum_{i=x}^{x+1} ADN_i$$

(۳۳)

ADN_x: تأخیر کلی ساعتی ناشی از ترنزیشن در تقاطع x (تقاطع با درخواست عابر پیاده) و تقاطع بعدی آن (خودرو–ساعت)

: شماره تقاطع با درخواست عابر پیاده

بخش‌های زیر برخی ملاحظات خاص ناشی از ترنزیشن برای هر گزینه ترنزیشن را برای محاسبه تأخیر ارایه می‌دهند.

۳-۲- گزینه ترنزیشن Dwell

Dwell یک روش ترنزیشن طولانی شونده است. در Dwell، زمان سبز در چرخه ی اول ترنزیشن تا رسیدن به نقطه مرجع تمدید می‌شود. در این روش، مقدار فازهای ناهماهنگ تغییر نمی‌کند و چراغ در یک چرخه دوباره به حالت هماهنگی برمی‌گردد بنابراین: TN=1. از آن‌جائی‌که ترنزیشن فقط در یک چرخه رخ می‌دهد حد بالایی زمان سبز در تقاطع‌های ۲ و ۳ صفر است ($U^1{}_2 = 0$ و $U^1{}_3 = 0$). در این گزینه‌ی ترنزیشن، مقدار فازهای ناهماهنگ تغییر نمی‌کند، بنابراین:

$$TR = r$$

(۳٤)

مقدار TG را می‌توان به شرح زیر محاسبه کرد:

$$TG = C + g - AT$$

(۳۵)

در این گزینه ترنزیشن، برای یک چرخه، زمان سبز خیابان فرعی به تأخیر می‌افتد. معادله زیر را باید به معادلات ۲۲ یا ۳۰ اضافه کرد تا تأخیر اعمال شده بر وسایل نقلیه خیابان های فرعی به دلیل ترنزیشن در گزینه‌ی درنظرگیری زمان عابر قابل محاسبه باشد:

$$SDD = SV_i \times SW \frac{(L_2^1)^2}{2}$$

(۳٦)

SDD: تاخیر تحمیل شده به وسایل نقلیه خیابان فرعی در زمان ترنزیشن Dwell (خودرو–ساعت)

۳-۳- گزینه ترنزیشن Max Dwell

Max Dwell یک روش ترنزیشن طولانی شونده است. در Max Dwell، مقدار محدودی از زمان سبز اضافی به هر چرخه به فازهای هماهنگ‌شده اضافه می‌شود. در این روش، مقدار فاز ناهماهنگ تغییر نمی‌کند. بنابراین رابطه‌ی ۳٤ اینجا هم برقرار است مقدار g_t را می‌توان به شرح زیر محاسبه کرد:

$$TG = g + CC_l$$

(۳۷)

در این گزینه ترنزیشن، زمان سبز خیابان فرعی در طول چرخه‌های ترنزیشن CC_l ثانیه به تأخیر می‌افتد. معادله زیر را باید به معادلات به معادلات ۲۲ و ۳۰ برای محاسبه‌ی تأخیر اعمال شده بر روی وسایل نقلیه خیابان‌های فرعی به دلیل گزینه ترنزیشن Max Dwell اضافه کرد.

$$SDM = SV_i \times SW \times TC\frac{(CC_l)^2}{2}$$

(۳۸)

SDM: تأخیر تحمیل شده به وسایل نقلیه خیابان فرعی در زمان گزینه ترنزیشن Max Dwell

۳-٤- گزینه ترنزیشن Add

Add یک روش ترنزیشن طولانی شونده است. مشابهMax Dwell است با این تفاوت که تمام فازها در دوره ترنزیشن زمان اضافی دریافت می‌کنند. زمان‌های قرمز و سبز خیابان اصلی در زمان ترنزیشن به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$TR = r + \left(CC_l \times \frac{r}{C}\right)$$

(۳۹)

$$TG = g + \left(CC_l \times \frac{g}{C}\right)$$

(٤۰)

۳-۵- گزینه ترنزیشن Subtract

Subtract یک روش ترنزیشن کوتاه کننده است. بسته به حداقل زمان سبز فازها و زمان مورد نیاز عابر پیاده، زمان یک یا چند فاز متوالی را کاهش می‌دهد. زمان‌های قرمز و سبز خیابان اصلی در زمان ترنزیشن به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$TR = \begin{cases} r - \left(CC_s \times \frac{r}{C}\right) & \text{اگر } r - \left(CC_s \times \frac{r}{C}\right) \geq g_{s,min} \\ r & \text{اگر } r - \left(CC_s \times \frac{r}{C}\right) < g_{s,min} \end{cases}$$

(٤۱)

$$TG = \begin{cases} g - \left(CC_s \times \frac{g}{C}\right) & \text{اگر } r - \left(CC_s \times \frac{r}{C}\right) \geq g_{s,min} \\ g - CC_s & \text{اگر } r - \left(CC_s \times \frac{r}{C}\right) < g_{s,min} \end{cases}$$

(٤۲)

$g_{s,min}$: حداقل زمان سبز خیابان فرعی (ثانیه)

۳-٦- گزینه ترنزیشن Shortway

Shortway کوتاهترین ترنزیشن را محاسبه می کند تا زمان‌بندی را با استفاده از روش‌های ترنزیشن طولانی شونده یا کوتاه شونده به هماهنگی برگرداند. جزئیات خاص نحوه تعیین کوتاه‌ترین روش ترنزیشن توسط این گزینه می‌تواند در مارک‌های مختلف کنترل کننده‌های تقاطع به طور قابل توجهی متفاوت باشد (Koonce et al., 2008). در این مقاله، حالت‌های ترنزیشن Add و Subtract مقایسه شدند. هریک که کمترین TN دارا باشند برای هماهنگی به کار گرفته خواهد شد.

٤- نرم‌افزار TOD

جدول ۱ ورودی‌های مورد نیاز برای معادله ۳۳ را نشان می‌دهد. برای سهولت استفاده از این معادله و محاسبه تمام پارامترهای مرتبط، در این مطالعه نرم‌افزاری مبتنی بر مدل ریاضی بخش ۳ با نام 'TOD (Transition Options Delays) ساخته شده است که با دنبال کردن پیوند در شکل ۲ می‌توان به آن دسترسی پیدا کرد. این نرم‌افزار با استفاده از MATLAB کدنویسی شده است و برای اجرا باید MATLAB روی سیستم نصب باشد. شکل ۲ یک تصویر از TOD و یک نمونه از خروجی‌ها را نشان می‌دهد.

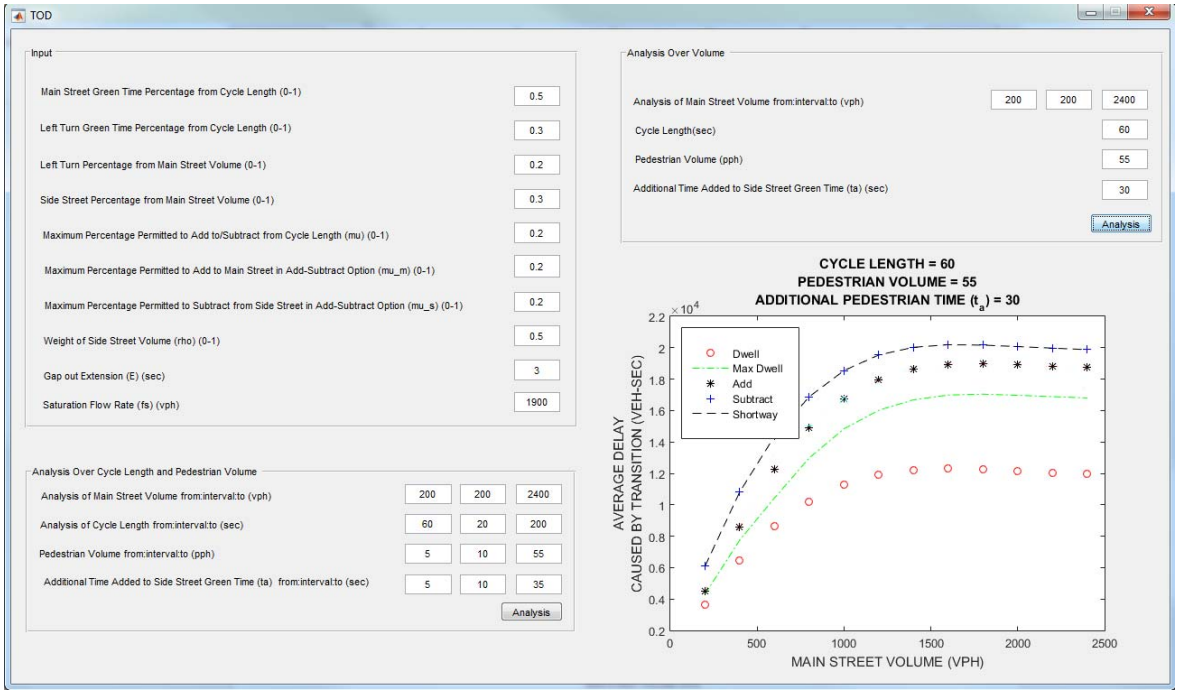
شکل نشان می‌دهد که بهترین روش ترنزیشن برای این وضعیت (طول چرخه ٦۰ ثانیه، حجم عابر پیاده ۵۵ و AT = 30 ثانیه) گزینه Dwell است. بهترین گزینه ترنزیشن بعدی Max Dwell است. اگرچه بعضی مطالعات نشان می‌دهد که در میان گزینه‌های موجود ترنزیشن، Shortway یکی از بهترین گزینه‌های ترنزیشن است (Shelby et al., 2006)، این مثال نشان می‌دهد که

Shortway همیشه بهترین روش برای کاهش تأخیر نیست. پیش از این، لی و ویلیامز (Lee and Williams, 2012) نیز ثابت کردند که الگوریتم Shortway بهترین عملکرد را برای بیشتر سناریوهای شبیه سازی ایجاد می‌کند، اما الگوریتم های Max Dwell و Dwell از نظر میانگین تأخیر کل تقاطع برای برخی شرایط عملکرد خوبی دارند.

TOD همچنین می تواند روش‌ها را برمبنای هر پارامتر، به ویژه حجم پیاده و حجم وسایل نقلیه، تجزیه و تحلیل کند. به عبارت دیگر، می‌تواند بهترین مرزهای حجم را برای هر روش تعیین کند. از صفحه سمت چپ پایین TOD می‌توان برای نشان دادن همه ترکیبات مربوط به AT، حجم عابر پیاده و وسیله نقلیه و طول چرخه استفاده کرد.

جدول ۱. ورودی های مدل

گروه متغیر	متغیر	علامت متغیر
حجم	نرخ جریان اشباع	SF
	حجم خیابان اصلی	MV
	حجم خیابان فرعی i	SV_i
	حجم عابر پیاده برای عبور از خیابان اصلی	PV
	وزن (اهمیت) خیابان فرعی در مقایسه با خیابان اصلی (بین صفر تا ۱)	SW
زمان‌بندی چراغ	طول چرخه	C
	زمان سبز خیابان اصلی	g
	زمان سبز خیابان فرعی	g_s
	شماره تقاطع با درخواست عابر پیاده	p
	زمان مورد نیاز عابر برای عبور از خیابان اصلی	TP
	حداکثر درصد طول چرخه که مجاز به اضافه شدن یا کم شدن از طول چرخه است	IP



شکل ۲. عکس صفحه نمایش TOD (ساخته شده در این مطالعه، قابل دستیابی در لینک https://urlis.net/ak5q2)

۵- مطالعه‌ی موردی

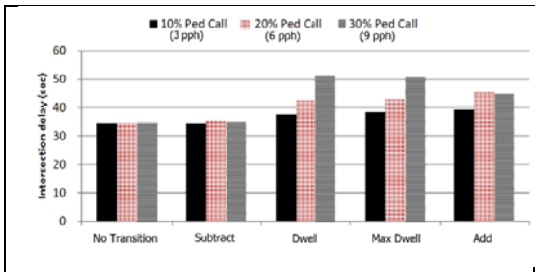
مدل‌های ریاضی ارایه شده در این مقاله تنها تاخیر مربوط به ترنزیشن را محاسبه می‌کنند. این امر بدان معناست که مقادیر تأخیر تولید شده توسط TOD برابر با نتایج نرم‌افزارهای شبیه سازی نیستند. با این حال، نتایج را می‌توان با رتبه‌بندی آن‌ها مقایسه کرد، به این معنی که مقایسه بهترین روش ترنزیشن در نرم‌افزار شبیه‌سازی در مقابل بهترین ترنزیشن در TOD مقایسه شده است. نتایج تقاطع های هماهنگ مورد استفاده در مائو (Mao, 2015) برای مطالعه موردی انتخاب و با روش ارایه شده در این مقاله مقایسه شد. مائو تقاطع هماهنگ شده‌ی McCarran/Clear Acre Ln در رینو، نوادا را تجزیه و تحلیل کردند. چراغ این تقاطع ٦ فاز بوده و طول چرخه آن ۱۲۰ ثانیه است. ورودی های فاز و توالی فاز در جدول ۲ ذکر شده است. فازهای ٤ و ۸ فازهای هماهنگ هستند. درخواست عابر پیاده در فاز ۲ اتفاق می‌افتد و PT، ٤۹ ثانیه است، به این معنی که باعث می‌شود ۲۰ ثانیه AT داشته باشیم (زمان سبز فاز دو ۲۹ ثانیه است). سناریوهای حجم عابر پیاده بگونه‌ای انتخاب شده است که در ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد چرخه‌ها عابر وجود دارد. این بدان معنا است که حجم عابر به ترتیب ۳، ٦ و ۹ نفر در ساعت انتخاب شده است. چهار عامل حجم عابر پیاده، حجم خودرو، زمان اضافی مورد نیاز برای افزودن به زمان سبز خیابان های فرعی (AT) و روش ترنزیشن مورد آزمایش قرار گرفتند. آنها تقاطع را در VISSIM شبیه سازی کرده و تأخیر روش های مختلف ترنزیشن را مقایسه کرده‌اند (شکل ۳ الف). نتایج آنها نشان می‌دهد که در این تقاطع، برای حجم ۳ و ٦ عابر پیاده، بهترین روش‌های ترنزیشن از بهترین به بدترین حالت، Subtract، Dwell، Max Dwell و Add است. برای حجم عابر پیاده ۹ نفر در ساعت، بهترین روش‌های ترنزیشن به ترتیب Subtract، Add و Dwell/Max Dwell هستند (Dwell و Max Dwell تأخیرهای یکسانی دارند). روش پیشنهادی تحقیق حاضر، برای همان فاکتورهای حجم و چراغ مطالعه‌ی مائو در شکل ۳ (ب) نشان داده شده است. نتایج به این سطح از حجم عابر پیاده، خیلی حساس نیستند. برای تمام سطح مورد مطالعه از حجم عابر پیاده، بهترین روش‌های حالت ترنزیشن به ترتیب عبارتند از Subtract / Dwell، Max Dwell و Add. همانطور که مشاهده می شود، نتایج مربوط به حجم عابر پیاده ۳ و ٦ مشابه همان نتایج شبیه‌سازی در مطالعه‌ی مائو است. برای حجم ۹ عابر پیاده، بهترین ترنزیشن همان است در حالی که رتبه‌های بعدی ترنزیشن متفاوت است. این تفاوت می تواند به این دلیل باشد که نتایج شبیه‌سازی مقداری نوسان دارد. همچنین می‌توان گفت که اختلاف بین Add و Dwell/Max Dwell قابل توجه نیست.

٦- نتیجه‌گیری

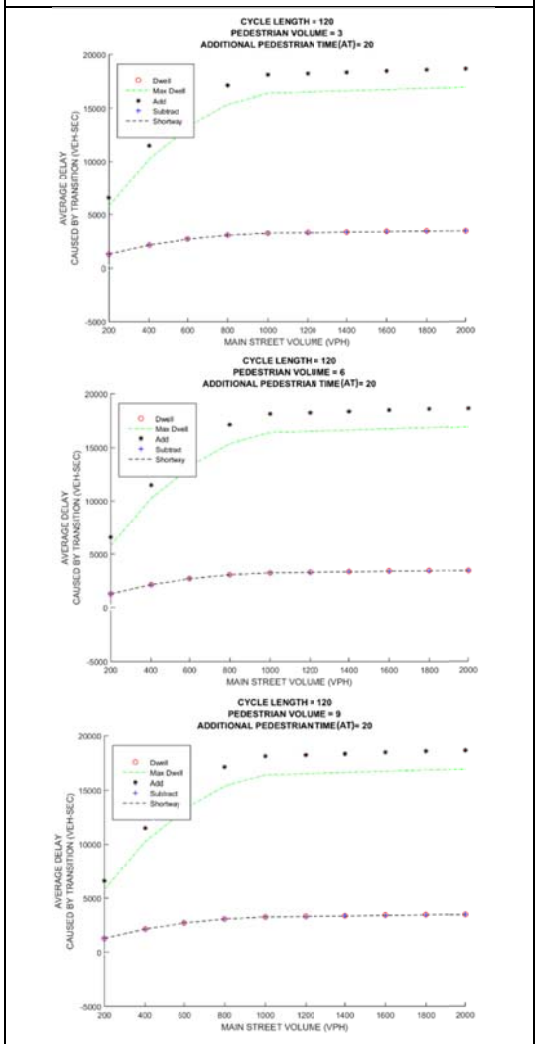
در چراغ‌های هماهنگ شده وقتی طول چرخه برای تأمین Walk و Flash-Don’t-Walk (به اصطلاح فاصله تخلیه ی عابر پیاده) برای خیابان فرعی کافی نیست، و درخواست عابر پیاده وجود دارد، چراغ باید به حالت ترنزیشن درآید. اگرچه ترنزیشن هیچ مشکل ایمنی برای عابر پیاده ندارد (زیرا عابر پیاده WALK و Flash-Don’t-Walk را هنگام عبور از محل دریافت می‌کند)، ولی ترنزیشن هماهنگی چراغ‌ها را مختل می‌کند و بر کارایی سیستم تأثیر منفی می‌گذارد.

جدول ۲. ویژگی‌های تقاطع هماهنگ شده‌ی McCarran/Clear Acre Ln در رینو، نوادا (Mao, 2015)

پارامترهای زمان‌بندی	فاز ۱	فاز ۲	فاز۳	فاز٤	فاز٥	فاز٦
جهت	جنوب-شمال مستقیم	شمال-جنوب مستقیم	شرق-غرب چپگرد	غرب-شرق مستقیم	غرب-شرق چپگرد	شرق-غرب مستقیم
حداقل سبز (ثانیه)	٤	٤	٤	٤	٤	٤
زرد (ثانیه)	٤	٤	۳	٤,۳	۳	٤,۳
تمام قرمز(ثانیه)	۲	۲	۰,٥	۱	۰,٥	۱
حرکت عابر (ثانیه)	-	۷	-	-	-	-
فلش نروی عابر (ثانیه)	-	۳٦	-	-	-	-
فاز سبز (ثانیه)	۳۰	۲۹	۱٥	٤٦	۱٤	٤۷



(الف)



(ب)

شکل ۳. تأخیر؛ (الف) تاخیر روش‌های مختلف ترنزیشن، (Mao, 2015)؛ (ب) تاخیرهای ترنزیشن با استفاده از مدل‌های ریاضی پیشنهادی این مطالعه برای احجام مختلف عابر پیاده

به منظور تعیین بهترین ترنزیشن، در این مطالعه یک مدل ریاضی برای هر گزینه ترنزیشن ارایه شده است که پارامترهای حجم وسیله نقلیه، حجم عابر پیاده و شرایط شبکه را بر مبنای تأخیر ناشی از افزودن زمان عابر پیاده به فاصله زمانی سبز خیابان مدل می‌کند. برای سهولت استفاده از مدل‌های ریاضی، در این مطالعه نرم‌افزاری به نام TOD ساخته شده است که با اسکن کد QR یا لینک در شکل ۲ می توان به آن دسترسی پیدا کرد. هدف این نرم‌افزار ارایه راهی آسان برای کارشناسان ترافیک است تا بتوانند تعیین کنند که کدام گزینه ترنزیشن بر سایر موارد ارجح است. با استفاده از این نرم‌افزار، افراد متصدی، طول چرخه ورودی، حجم، زمان مورد نیاز عابر پیاده و سایر

پارامترهای چراغ را وارد نرم‌افزار می‌کنند. سپس نرم‌افزار تاخیر نسبی گزینه های ترنزیشن را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که اگرچه انجام یک تحلیل شبیه سازی با کنترلرهای متصل به شبیه ساز (بعضی از شبیه‌سازها مانند ویسیم این قابلیت را دارند تا به آنها کنترلرهای واقعی متصل کرد)، تحلیلی قابل اعتمادتری ارایه دهند اما چنین تحلیل‌هایی بسیار زمان‌بر هستند. بنابراین TOD این امکان را بوجود می‌آورد تا فرآیند تجزیه و تحلیل گزینه‌های ترنزیشن آسان‌تر و سریع‌تر انجام شود. همچنین، از آنجا که همه کنترلرها نمی توانند در یک محیط شبیه سازی کار کنند، می‌توان از TOD به ویژه برای ارزیابی عملکرد طیف وسیعی از حجم عابر پیاده، طول چرخه، مدت زمان فازها (ازکوتاه به طولانی) و طیف وسیعی از مقدارهای کاهش/افزایش طول چرخه در حین ترنزیشن استفاده کرد. این طیف وسیع پارامترها باعث می‌شود که عملاً شبیه‌سازی برای بسیاری از شرایط بسیار دشوار یا غیرممکن شود.

٦-مراجع

-Campos, E. M. M., (2021), "Minimizing Signal Transition Impact at Intersections Caused by Pedestrian Crossings", (Doctoral dissertation, University of Nevada, Reno).

-Chowdhury, S. E. S., Stevanovic, A., & Mitrovic, N., (2019), "Estimating pedestrian impact on coordination of urban corridors", Transportation research record, 2673(7), pp.265-280.

-Cohen, D., Head, L., & Shelby, S. G., (2007), "Performance analysis of coordinated traffic signals during transition", Transportation research record, 2035(1), pp.19-31.

-Gavric, S., Sarazhinsky, D., Stevanovic, A., & Dobrota, N., (2022), "Development and Evaluation of Non-Traditional Pedestrian Timing Treatments for Coordinated Signalized Intersections", Transportation Research Record, 03611981221099913.

-He, Q., Head, K. L., & Ding, J., (2014), "Multi-modal traffic signal control with priority, signal actuation and coordination", Transportation research part C: emerging technologies, 46, pp.65-82.

-Koonce, P., & Rodegerdts, L., (2008), "Traffic signal timing manual", (No. FHWA-HOP-08-024), United States, Federal Highway Administration.

-Lee, J., & Williams, B. M., (2012), "Development and evaluation of a constrained optimization model for traffic signal plan transition", Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 20(1), pp.185-198.

-Lee, J. & Williams, B. M., (2011), "Fundamental insight into signal plan transition methods", Journal of transportation engineering, 137(10), pp.676-686.

-Li, D., Song, Y., & Chen, Q., (2020), "Bilevel programming for traffic signal coordinated control considering pedestrian crossing", Journal of advancedtransportation.

-Mao, D., (2015), "Pedestrian crossing caused signal transition study", University of Nevada, Reno. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Civil and Environmental Engineering, University of Nevada, Reno.

-Parsonson, P. S., (1992), "Signal timing improvement practices (No. 172)".

-Qin, X., & Khan, A. M., (2012), "Control strategies of traffic signal timing transition for emergency vehicle preemption", Transportation research part C: emerging technologies, 25, pp.1-17.

-Shelby, S. G., Bullock, D. M., & Gettman, D., (2006), "Transition methods in traffic signal control", Transportation research record, 1978(1), pp.130-140.

-Tian, Z., & Xu, F., (2006), "Modeling the effects of pedestrians on intersection capacity and delay with actuated signal control", In Proc., 5th International Symposium on Highway Capacity.

-Tian, Z., (2004), "Pedestrian timing treatment for coordinated signal systems, Proceedings of International Conference on Traffic and Transportation Studies".

-Tian, Z., Urbanik, T., Engelbrecht, R., and Balke, K., (2001), "Pedestrian timing alternatives and impacts on coordinated signal systems under split-phasing operations", Transportation Research Record 1748, pp. 46-54.

-Tian, Z.Z., Urbanik, T., Kacir, K.K., Vandehey, M.A., and Long H., (2000), "Pedestrian timing treatment for coordinated signal systems", Proc., 2nd International Conference on Transportation and Traffic Studies, Beijing, China, ASCE, pp. 533–540.

-Zhu, H., & Yang, X., (2019), "Analysis of Pedestrian-Crossing Speed Characteristics at Traffic Intersections", In 19th COTA International Conference of Transportation Professionals.

Transition Options Delays
Software for Efficiency Estimation of Transition Options

Ali Gholami, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Golestan University, Gorgan, Iran.

E-amil: ali.gholami32@gmail.com

Received: March 2023- Accepted: August 2023

ABSTRACT

At coordinated signals, a signal may go to transition due to oversized pedestrian timing, transit signal priority (TSP), or emergency vehicles. In these situations, a signal tries to bring back disrupted coordination to its original plan by a transition option. There are several options for transitions, including Dwell, Max Dwell, Add, Subtract, and Short way. To have a quantitative tool to analyze different transition options, mathematical models of transition methods were developed. Then the mathematical models of transition options were implemented into software called TOD (Transition Options' Delays), which is an open-source program available for anyone who is interested in using it. With this software, practitioners simply input the common timing parameters such as cycle length, vehicle and pedestrian volume, and required pedestrian timing. The software will then give a recommendation based on the overall delay. The mathematical models and the related TOD software are expected to provide improved recommendations when dealing with pedestrian crossings at coordinated signal systems.

Keywords: Pedestrian Timing Accommodation, Emergency Vehicle, Signal Coordination, Transition Methods