

(یادداشت فنی)

## تحلیل حساسیت مدل محاسبه تأخیر حرکت گردش به چپ

### محافظت نشده در HCM

داریوش دریایی، عضو هیئت علمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران  
علی پیردوانی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران  
E-mail: d.daryaee@yahoo.com

#### چکیده

یکی از مهم‌ترین حرکت‌هایی که در تقاطع‌ها صورت می‌گیرد، حرکت گردش به چپ است. هنگامی که حرکت گردش به چپ در یک فاز به صورت حفاظت نشده انجام می‌شود، احتمال برخورد و تصادف این حرکتها با حرکت مستقیم رویکرد مخالف نیز افزایش می‌یابد. در این تحقیق برای رفتار حفاظت نشده، مطابق استاندارد HCM، تأخیر در حرکت گردش به چپ به صورت نمودارهایی با متغیرهای حجم گردش به چپ، حجم حرکات مستقیم رویکرد مخالف، تعداد خطوط حرکات مستقیم رویکرد مخالف، و نسبت زمان سبز مؤثر توسط تحلیل با نرم افزار Hicap رسم شده است. نمودارهای روند تغییر تأخیر به ازای تغییر حجم در هر یک از حالات گوناگون رسم شده است. از روی نمودارهای روند تغییر تأخیر، منحنی‌های هم‌تأخیر برای سه سطح سرویس  $D$  و  $E$  و  $F$  بر اساس حجم گردش به چپ و حجم حرکات مستقیم برخوردی برای شرایط مختلف رسم شدند. با مقایسه تأخیر در حجم‌های مختلف در شرایط رفتار حفاظت نشده و حفاظت شده، یک مرز پیشنهادی بین استفاده از این دو شرایط ارزیابی شد.

واژه‌های کلیدی: رفتار حفاظت نشده، تأخیر و حرکت گردش به چپ، تقاطع‌ها

#### ۱. مقدمه

افزایش احتمال برخورد وسایل نقلیه و ایجاد تصادف می‌شود. آمار تصادفات نشان می‌دهند که با تبدیل حرکت گردش به چپ حفاظت نشده به حرکت گردش به چپ حفاظت شده، ۸۵ درصد این تصادفات کاهش می‌یابند. از سویی وجود حرکات گردش به چپ حفاظت نشده در بسیاری از مواقع باعث افزایش تأخیر در سطح تقاطعات نیز می‌شود. بر اساس استاندارد، حرکات گردش به چپ برای پیدا کردن فاصله

در تقاطع‌های چراغدار، حرکت گردش به چپ مشکل‌ترین و پیچیده‌ترین حرکتی است که صورت می‌گیرد. طبق آمار تصادفات در بسیاری از کشورها، ۴۵ درصد تصادفات موجود در تقاطع‌ها، مربوط به مانور گردش به چپ است. بیشترین تصادفات هنگامی رخ می‌دهند که حرکت گردش به چپ به صورت حفاظت نشده صورت می‌گیرد. در حرکت گردش به چپ حفاظت نشده عبور حرکت گردش به چپ از بین حرکت مستقیم رویکرد مقابل، باعث

زمان سفر، آزادی مانور، گسیختگی ترافیکی، ایمنی، راحتی رانندگی و هزینه‌های اجرایی استفاده می‌شد [۱].

در سال ۱۹۶۶، وبستر و همکارانش برای تعداد وسایل نقلیه چپگرد که به صورت حفاظت نشده از بین حرکات مستقیم رویکرد مخالف در طول هر چرخه تخلیه می‌شوند، رابطه‌ای پیشنهاد کردند. این رابطه تابعی از حداکثر جریان نظری وسایل نقلیه چپگرد عبوری از بین حرکات مستقیم رویکرد مخالف، زمان سبز چراغ، طول چرخه و جریان اشباع و شدت جریان ترافیک حرکت مستقیم رویکرد مخالف بود [۲].

در سال ۱۹۷۰، Tidwell و Humpherys، تأخیر متوسط هر وسیله نقلیه را به عنوان یک معیار برای اندازه‌گیری سطح سرویس معرفی کردند. در بین سالهای ۱۹۷۰ تا ۱۹۸۰ روشهای بسیاری برای پیدا کردن تأخیر متوسط ناشی از توقف ارایه شد و از آن برای تعیین سطح سرویس استفاده می‌کردند. از سال ۱۹۹۰ به بعد، روابطی بین تأخیر کنترل‌کننده تقاطع و تأخیر ناشی از توقف به دست آمد [۱].

در سال ۱۹۸۳، تحقیقات بسیاری در زمینه معیار انتخاب رفتار حفاظت شده و حفاظت نشده برای حرکت گردش به چپ صورت گرفت. از جمله پیشنهادهایی که برای استفاده نکردن از رفتار حفاظت نشده ارایه شد، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۳]:

- هنگامی که متوسط تأخیر حرکت گردش به چپ ۳۵ ثانیه شود.
- هنگامی که به ۵ درصد حرکات گردش به چپ بیشتر از ۲ چرخه تأخیر وارد شود.
- هنگامی که چهار وسیله نقلیه چپگرد در یک ساعت بیشتر از ۲ چرخه در صف باقی بمانند.
- هنگامی که نود و سومین درصد تأخیر حرکات گردش به چپ ۷۳ ثانیه شود.

در سال ۲۰۰۱، مقایسه بین تأخیرات و روشهای محاسبه آنها در بین کشورها رواج یافت. این مقایسه تفاوت‌های آشکار در رفتار رانندگان، نوع وسایل نقلیه و عملکرد چراغهای راهنمایی در کشورهای مختلف را نشان می‌داد. با انجام این مقایسه نتیجه‌گیری شد که از بین روشهای مختلف، روش HCM 2000 قابلیت تعیین تأخیر در شرایط کمتر و یا بیشتر از وضعیت اشباع، با در نظر گرفتن دوره تحلیل، و اثرات ناشی از صف باقیمانده از هر دوره زمانی را داراست [۴].

در سال ۲۰۰۳، تحقیقاتی برای پیدا کردن معیار منطقی که تلفیقی از تأخیر و ایمنی در اندازه‌گیری سطح سرویس بود، توسط Zhang

زمانی عبور از وسایل نقلیه حرکت مستقیم رویکرد مخالف دچار تأخیر می‌شوند. این تأخیر رابطه مستقیم با حجم حرکات برخوردی وسایل نقلیه رویکرد مخالف دارد. در این تحقیق رابطه بین تأخیر وسایل نقلیه چپگرد و حجم حرکات مستقیم برخوردی وسایل نقلیه رویکرد مخالف برای تعداد خطوط برخورد حرکات مستقیم رویکرد مخالف و نسبتهای زمان سبز مؤثر (g/c) متفاوت، بررسی شده است. پیدا کردن مرز بین استفاده از شرایط حفاظت نشده و حفاظت شده با توجه به تحلیل حساسیتی که در این تحقیق صورت گرفته، ارایه شده است.

## ۲. تعریف مسأله

طبق استاندارد HCM در تقاطع‌های چراغدار، هنگامی که یک فاز حفاظت نشده وجود دارد، تأخیر حرکت گردش به چپ با افزایش حجم حرکات مستقیم رویکرد مخالف، روند صعودی پیدا می‌کند. در این حالت نتایج به دست آمده از نرم‌افزارهایی که بر اساس روابط HCM بنا شده‌اند، با شرایط میدانی تطابق چندانی ندارند. در بسیاری از کشورها از جمله ایران، حرکات گردش به چپ، منتظر پیدا کردن فاصله زمانی مناسب برای عبور نمی‌شوند و با فواصل زمانی کمتری نسبت به فاصله زمانی عبور استاندارد از حرکات مستقیم رویکرد مخالف عبور می‌کنند. عبور حرکات گردش به چپ باعث اعمال تأخیر به حرکات مستقیم رویکرد مخالف می‌شود، در حالی که نتایج نرم‌افزارهایی مانند Hicap یا Synchro و ... چنین تأثیری را بر روی تأخیر حرکات مستقیم رویکرد مخالف نشان نمی‌دهند. این امر در شرایطی که حجم‌های گردش به چپ و حرکت مستقیم رویکرد مخالف در رفتار حفاظت شده از حد معینی بیشتر شوند، اتفاق می‌افتد. برای تعیین حدود حجم‌های گردش به چپ و حرکت مستقیم رویکرد مخالف، تحلیل حساسیت تأخیر حرکت گردش به چپ در مقابل افزایش حجم مستقیم برخوردی و افزایش حجم گردش به چپ باید انجام شود.

## ۳. مروری بر تحقیقات گذشته

یکی از مهم‌ترین مفاهیم برای عملکرد خوب یک تقاطع، سطح سرویس است. مفهوم سطح سرویس به سال ۱۹۵۰ باز می‌گردد، که از آن به عنوان معیاری برای اندازه‌گیری عواملی چون سرعت،

#### ۴-۳ تأخیر ناشی از صف باقیمانده ( $d_r$ )

این تأخیر هنگامی که صف از پررود زمانی قبلی باقیمانده باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرد و با استفاده از دوره تحلیل، نسبت  $V/C$  و محاسبه مقدار صف باقیمانده به دست می‌آید.

با توجه به رابطه (۲) مربوط به تعیین تأخیر در هر گروه خطی، با افزایش حجم در شرایط فوق اشباع تأخیر افزایشی ( $d_r$ ) به سرعت افزایش پیدا می‌کند. این تأخیر شدیداً به نسبت  $V/C$ ، یعنی هم حجم و هم ظرفیت بستگی دارد. در این تحقیق اثر حجم و برخی از پارامترهای تأثیرگذار بر ظرفیت، بر مقدار تأخیر حرکت گردش به چپ بررسی شده است.

ظرفیت یک گروه خط به عوامل متعددی بستگی دارد. یکی از عوامل مهم تأثیرگذار در ظرفیت گروه خط گردش به چپ، ضریب مربوط به گردش به چپ ( $f_{it}$ ) است که در شرایط حفاظت نشده تأثیر بسزایی در محاسبه ظرفیت گروه خط دارد. این ضریب به عواملی چون تعداد خطوط حرکت مستقیم رویکرد مخالف ( $N$ )، نسبت زمان سبز اختصاصی به فاز حفاظت نشده، حجم حرکات مستقیم رویکرد مخالف و حجم حرکت گردش به چپ مورد نظر بستگی دارد. روابط مربوط به محاسبه  $f_{it}$  با توجه به سه زمان  $g_u$ ،  $g_q$  و  $g_f$  صورت می‌گیرد [۵]:

$g_f$ : مدت زمانی است که بعد از سبز شدن چراغ اولین گردش به چپ به صف وسایل نقلیه مستقیم رویکرد مخالف می‌رسد.  
 $g_q$ : مدت زمانی است که حرکات مستقیم به صورت گروهی و با شرایط اشباع، باعث مسدود شدن حرکات گردش به چپ رویکرد مقابل می‌شوند.

$g_u$ : مدت زمانی است که بعد از این که صف وسایل نقلیه حرکت مستقیم رویکرد مخالف از بین رفت، حرکت گردش به چپ بتواند از جریان غیراشباع حرکت مستقیم، فاصله زمانی عبور بگیرند. مقادیر  $g_f$ ،  $g_q$  و  $g_u$  از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$g_f = G \left[ e^{-0.882(LTC)^{0.717}} \right] - t_L \quad (3)$$

$$g_q = \frac{V_{olc} q_{ro}}{0.5 - \left[ V_{olc} \left( 1 - \frac{q_{ro}}{g_o} \right) \right]} - t_L \quad (4)$$

$$\begin{cases} g_u = g - g_q & g_q \geq g_f \\ g_u = g - g_f & g_q < g_f \end{cases} \quad (5)$$

و همکاریانش صورت گرفت. در این تحقیق مدلی از ترکیب تأخیر و ایمنی به عنوان یک شاخص جامع برای تعیین سطح سرویس ارائه شد و مقایسه‌های بین سطح سرویس تقاطعات در شرایط حفاظت شده و حفاظت نشده صورت گرفت [۱].

#### ۴. روش تعیین تأخیر و معیارهای وابسته به آن

یکی از عواملی که در تعیین سطح سرویس حرکات و گروه خطهای متفاوت، تأثیر بسزایی دارد، تأخیر است. علاوه بر تأخیر، عواملی چون زمان سفر، سرعت سفر، گسیختگی ترافیکی، آزادی مانور، ایمنی، رضایت و راحتی رانندگان، هزینه‌های عملکردی و غیره در سطح سرویس تأثیر دارند. برای محاسبه تأخیر به روش HCM 2000 از جمع سه تأخیر مجزا استفاده می‌شود [۵].

##### ۴-۱ تأخیر یکنواخت

این تأخیر در شرایط جریان مداوم و پایدار و بدون صف اولیه، بر اساس فرمول وبستر، برای شرایط ایده آل و شرایط درجه اشباع کوچک‌تر از یک ( $V/C < 1$ ) معتبر است و از رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$d_1 = \frac{0.5c(1-g/c)^2}{1 - [\min(1, x)(g/c)]} \quad (1)$$

$d_1$ : تأخیر یکنواخت

$g/c$ : نسبت زمان سبز به طول سیکل

$X$ :  $V/C$  یا درجه اشباع

##### ۴-۲ تأخیر افزایشی

این تأخیر برای شرایط غیر یکنواخت جریان ترافیک و جریان فوق اشباع بکار برده می‌شود. این تأخیر حساسیت زیادی به  $V/C$  (درجه اشباع) دارد و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$d_2 = 900 T \left[ (x-1) + \sqrt{(x-1)^2 + \frac{8KIX}{CT}} \right] \quad (2)$$

که در آن:

$d_2$ : تأخیر افزایشی

$T$ : دوره تحلیل بر حسب ساعت

$K$ : فاکتور تأخیر افزایش مربوط به نوع کنترل کننده

$I$ : فاکتور مربوط به هماهنگی تقاطع بالادست

$C$ : ظرفیت گروه خط

$X$ : نسبت  $V/C$

الف) حجم گردش به چپ: حجم گردش به چپ با بازه‌های ۵۰ وسیله نقلیه در ساعت از ۵۰ تا ۴۰۰ وسیله نقلیه در ساعت تغییر می‌کند. این محدوده تغییرات با توجه به حجمهای اکثر تقاطع‌های موجود در راههای شریانی درجه ۲ تعیین شده است.

ب) حجم حرکات مستقیم رویکرد مخالف: حجم حرکات مستقیم که با گردش به چپ برخورد دارند، از ۲۰۰ تا ۲۰۰۰ وسیله نقلیه در ساعت با بازه‌های ۲۰۰ وسیله نقلیه در ساعت تغییر می‌کند. این محدوده تغییرات نیز برای نشان دادن تأثیر حجم برخوردی بر تأخیر وسایل نقلیه چپگرد انتخاب شده است.

ج) تعداد خطوط حرکات مستقیم رویکرد مخالف: یکی از عواملی که بر تأخیر حرکت گردش به چپ تأثیر دارد، تعداد خطوط حرکات مستقیم در رویکرد مخالف است. با افزایش تعداد خطوط حرکات مستقیم رویکرد مخالف، مقدار  $g_q$  کاهش پیدا کرده و مطابق رابطه (۵) در نتیجه مقدار  $g_u$  بیشتر می‌شود، نتیجتاً حرکات گردش به چپ زمان بیشتری برای پیدا کردن فاصله زمانی عبور مناسب از وسایل نقلیه حرکت مستقیم رویکرد مخالف دارند. با توجه به رابطه (۶)، افزایش مقدار  $g_u$  تأثیر مستقیم بر ضریب مربوط به گردش به چپ و ظرفیت آن دارد. در این تحقیق از تعداد خطوط ۲ و ۳، برای حرکات مستقیم رویکرد مخالف ( $N = 2$  و  $N = 3$ ) در تحلیل نرم افزاری استفاده شده است.

د) نسبت زمان سبز مؤثر فاز حفاظت نشده ( $g/c$ ): نسبت زمان سبز مؤثر برای حرکت گردش به چپ به طول چرخه، در نتایج تحلیل نرم افزاری بسیار اثرگذار است. به دلیل پهناور بودن محدوده تغییرات نسبت زمان سبز مؤثر ( $g/c$ )، در این تحقیق از دو مقدار  $g/c = 0/45$  و  $g/c = 0/5$  استفاده شده است. این مقادیر بیشتر برای تقاطع‌های دو فازه با حجم‌های متقارن کاربرد دارد.

## ۶. رسم منحنی‌های تأخیر حرکت گردش به چپ

همان گونه که بیان شد، برای تحلیل ترافیکی هر یک از عوامل مؤثر در ظرفیت حرکت گردش به چپ از نرم افزار Hicap که بر اساس HCM 2000 ایجاد شده است، استفاده شد. با تحلیل نرم افزاری توسط Hicap، منحنی تأخیر حرکت گردش برای هر حجم گردش به چپ به ازای تغییرات حجم حرکات مستقیم

(۶)

$$f_{LT} = \left[ \left[ \frac{g_f}{g} \right] + \left[ \frac{g_u}{g} \right] \left[ \frac{1}{1 + P_L(E_L - 1)} \right] + 0.91(N - 1) \right] / N$$

که در آن:

LTC: گردش به چپ در هر سیکل

$t_L$ : زمان تلف شده

G: زمان سبز حقیقی برای گردش به چپ

g: زمان سبز مؤثر برای گردش به چپ

$g_0$ : زمان سبز مؤثر برای حرکت مستقیم برخوردی

$V_{0lc}$ : حجم جریان برخوردی در هر خط در هر سیکل

$q_{ro}$ : نسبت صف برخوردی

$E_L$ : ضریب معادل گردش به چپ

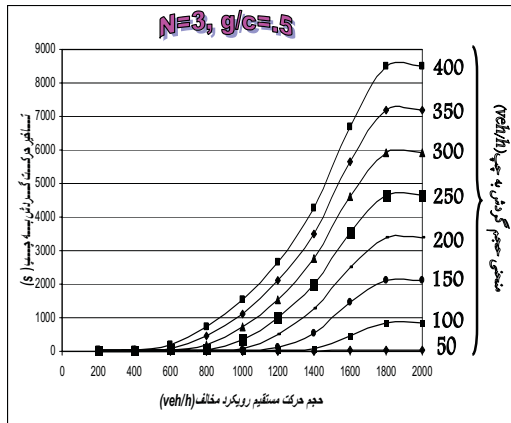
$P_L$ : نسبت حرکت گردش به چپ

N: تعداد خطوط گردش به چپ

در روابط HCM برای محاسبه ضریب گردش به چپ، با افزایش حجم حرکات مستقیم رویکرد مخالف، زمان  $g_q$  بیشتر شده و در نتیجه زمان مورد نیاز برای عبور وسایل نقلیه چپگرد ( $g_u$ ) کاهش پیدا می‌کند، و در نتیجه ضریب گردش به چپ نیز کاهش می‌یابد. چون ضریب گردش به چپ به صورت مستقیم در ظرفیت گروه خطی تأثیر می‌گذارد، ظرفیت حرکت گردش به چپ دچار کاهش شدیدی شده و درجه اشباع ( $V/C$ ) به حالت فوق اشباع یعنی بزرگ‌تر از ۱ می‌رسد، بنابراین تأخیر افزایشی ( $d_+$ ) به مراتب بیشتر از تأخیر یکنواخت ( $d_1$ ) می‌شود. در این تحقیق با استفاده از تحلیل حساسیت نسبت به عواملی چون حجم گردش به چپ، حجم حرکات مستقیم رویکرد مخالف و نسبت زمان سبز مؤثر ( $g/c$ )، تأخیر یک خط حرکت گردش به چپ که به صورت حفاظت نشده انجام می‌شود، محاسبه شده است.

## ۵. روش تحقیق

در این تحقیق، از یک تقاطع با حجم‌های متقارن، و با شرایط ایده‌آل (عرض خطوط، ۳/۶۵ متر، بدون شیب، بدون پارک حاشیه‌ای و ایستگاه اتوبوس و ...) استفاده شده است. این تقاطع به صورت دو فاز شمالی - جنوبی و شرقی - غربی به صورت حفاظت نشده و به شکل هوشمند کنترل می‌شود. محاسبه تأخیر یک خط گردش به چپ اختصاصی با حجم‌های مختلف توسط نرم افزار Hicap انجام شده است. عواملی که در هر تحلیل نرم افزاری تغییر می‌کرد، شامل موارد زیر بود:



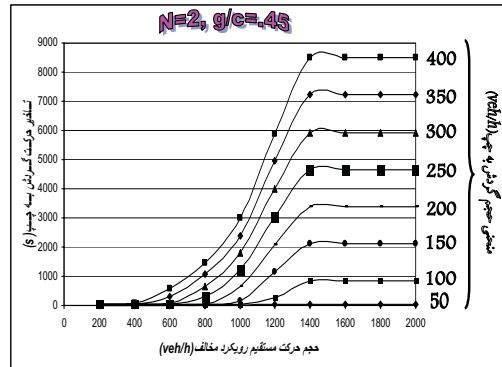
شکل ۴. منحنی‌های تأخیر گردش به چپ به ازای حجم‌های مختلف برای شرایط  $N=3, g/c=.5$

با توجه به شکلهای ۱ تا ۴، مشاهده می‌شود که منحنی‌های تأخیر نیز در هر شکل برای حجم‌های گردش به چپ ۵۰ تا ۴۰۰ وسیله نقلیه در ساعت رسم شده است.

با توجه به روند منحنی‌ها، دیده می‌شود که با افزایش حجم حرکت مستقیم رویکرد مخالف، تأخیر حرکت گردش به چپ روند صعودی دارد. ترتیب قرار گرفتن منحنی‌های با حجم گردش به چپ متفاوت به ترتیب از پایین به بالا از ۵۰ تا ۴۰۰ وسیله نقلیه در ساعت است. بالاترین منحنی در هر شکل مربوط به گردش به چپ ۴۰۰ وسیله نقلیه در ساعت است و پایین‌ترین منحنی مربوط به گردش به چپ ۵۰ وسیله نقلیه در ساعت است. منحنی‌های دیگر در بین این محدوده قرار دارند و مربوط به سایر حجم‌های گردش به چپ از ۵۰ تا ۴۰۰ وسیله نقلیه در ساعت هستند. هر یک از منحنی‌ها تغییرات تأخیر را به خوبی نشان می‌دهند. مقادیر تأخیر بعد از افزایش حجم حرکت مستقیم رویکرد مخالف یکباره افزایش پیدا کرده و حتی به ۸۵۰۰ ثانیه نیز نزدیک شده‌اند که این مقادیر با واقعیت میدانی مطابقت ندارد. نکاتی که در مورد مقادیر تأخیر بیشتر از ۱۰۰۰ ثانیه می‌توان اشاره کرد، به شرح زیرند:

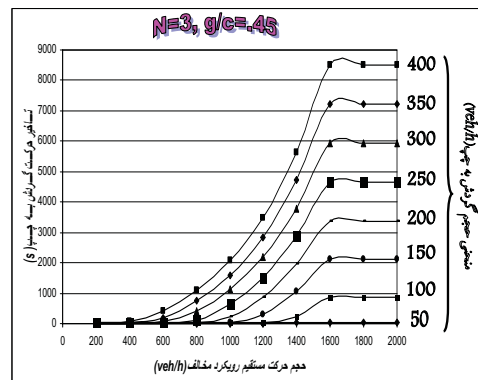
- ۱- با افزایش حجم حرکات مستقیم رویکرد مخالف، از یک حد معینی،  $g_q$  به شدت افزایش پیدا کرده و زمان لازم برای عبور گردش به چپها ( $g_u$ ) کاهش می‌یابد؛
- ۲- با کاهش ناگهانی  $g_u$  ضریب مربوط به گردش به چپ کاهش پیدا می‌کند.
- ۳- کاهش ضریب گردش به چپ تأثیر مستقیم و منفی بر ظرفیت حرکت گردش به چپ دارد.

رویکرد مخالف، تعداد خطوط حرکت مستقیم رویکرد مخالف و نسبت زمان سبز مؤثر  $g/c$  رسم شد. شکل‌های ۱ تا ۴ نمودارهای تأخیر حرکت گردش به چپ را برای تعداد خطوط و  $g/c$ ‌های مختلف نشان می‌دهند. در هر شکل محور افق، حجم حرکت مستقیم رویکرد مخالف را از ۲۰۰ تا ۲۰۰۰ وسیله نقلیه در ساعت نشان می‌دهد، و محور عمودی آن نیز شامل تأخیرهای به دست آمده از نرم افزار Hicap برای حرکت گردش به چپ است.



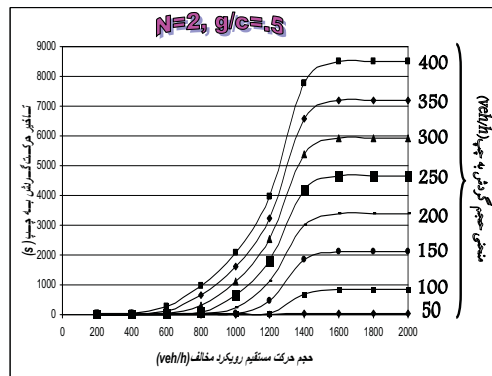
شکل ۱. منحنی‌های تأخیر گردش به چپ به ازای حجم‌های

مختلف برای شرایط  $N=2, g/c=.45$



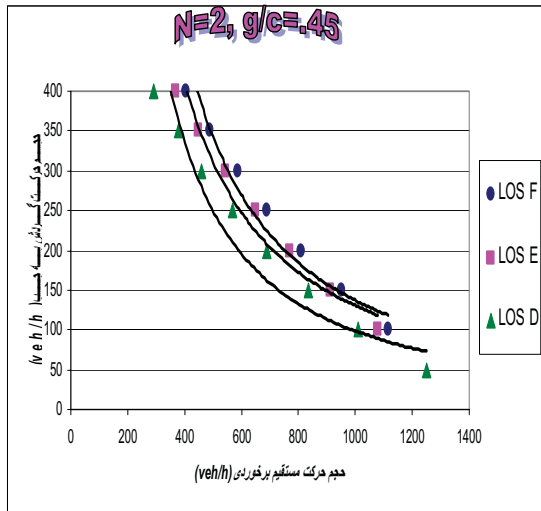
شکل ۲. منحنی‌های تأخیر گردش به چپ به ازای حجم‌های

مختلف برای شرایط  $N=3, g/c=.45$

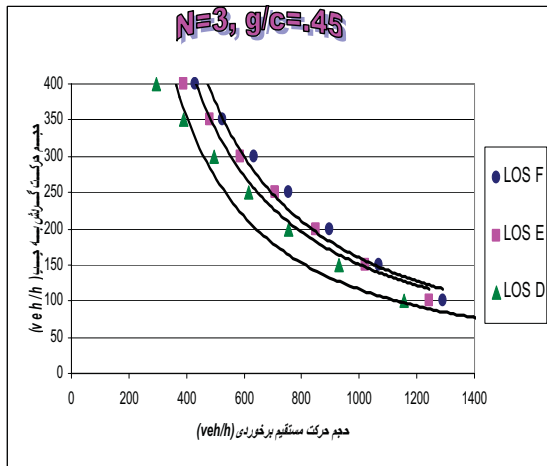


شکل ۳. منحنی‌های تأخیر گردش به چپ به ازای حجم‌های

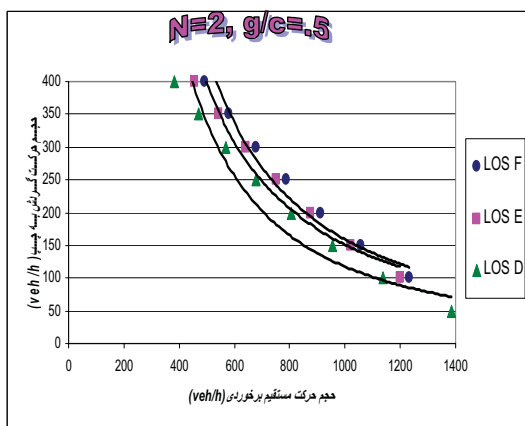
مختلف برای شرایط  $N=2, g/c=.5$



شکل ۵. منحنی‌های توانی هم تأخیر برای سطوح سرویس مختلف برای  $N=2, g/c=0.45$



شکل ۶. منحنی‌های توانی هم تأخیر برای سطوح سرویس مختلف برای  $N=3, g/c=0.45$



شکل ۷. منحنی‌های توانی هم تأخیر برای سطوح سرویس مختلف برای  $N=2, g/c=0.5$

۴- با افزایش حجم و کاهش ظرفیت، نسبت  $V/C$  بیشتر شده و تأخیر افزایشی ( $d_2$ ) روند صعودی پیدا می‌کند.

یکی از نکات قابل توجه در شکل‌های ۱ تا ۴ این است که در همه منحنی‌ها در یک حجم حرکت مستقیم رویکرد مخالف، تأخیرها ثابت می‌شود. برای مثال در شرایط  $N=2$  و  $g/c=0.45$ ، همه منحنی‌ها در حجم با حرکت مستقیم رویکرد مخالف بیشتر از ۱۴۰۰ وسیله نقلیه در ساعت، موازی با محور افق شده‌اند. این پدیده به این علت است که در حجم برخوردی بیشتر از ۱۴۰۰ وسیله نقلیه در ساعت، ضریب گردش به چپ به حداقل مقدار تعریف شده رسیده و با افزایش حجم تغییری در ظرفیت حرکتی گردش به چپ دیده نمی‌شود.

با مقایسه شکل‌های ۱ و ۲ دیده می‌شود که شیب تغییرات تأخیر منحنی‌های گردش به چپ در شرایط با دو خط حرکت مستقیم رویکرد مخالف بیشتر از شرایط با سه خط حرکت مستقیم رویکرد مخالف است. علت این امر آن است که افزایش تعداد خطوط عبوری حرکات مستقیم رویکرد مخالف، باعث کاهش  $g/c$  و افزایش  $g_u$  می‌شود. در نتیجه ضریب گردش به چپ بیشتر شده و ظرفیت خط گردش به چپ افزایش، و تأخیرها کاهش می‌یابد. همچنین با مقایسه شکل‌های ۱ و ۳ ملاحظه می‌شود که افزایش زمان سبز یا نسبت  $g/c$  نیز باعث کاهش شیب منحنی‌های تأخیر حرکت گردش به چپ شده است.

## ۷. رسم منحنی‌های هم تأخیر برای سطوح سرویس گوناگون

با استفاده از شکل‌های ۱ تا ۴ برای سطوح سرویس  $F, E$  و  $D$ ، حجم گردش به چپ و حجم حرکت مستقیم رویکرد مخالف، که باعث ایجاد تأخیر ۸۰ ثانیه، ۵۵ ثانیه و ۳۵ ثانیه شده‌اند، در تعداد خطوط مختلف حرکت مستقیم رویکرد مخالف و  $g/c$  های متفاوت به دست می‌آید.

با داشتن حجم‌های گردش به چپ و حجم‌های حرکت مستقیم رویکرد مخالف، منحنی‌های هم تأخیر برای شرایط مختلف  $N$  و  $g/c$  در شکل‌های ۵ تا ۸ رسم شده‌اند. در شکل‌های ۵ تا ۸، محور افقی حجم حرکت مستقیم رویکرد مخالف و محور قائم حجم حرکت گردش به چپ است. منحنی‌های هم تأخیر نیز برای سطوح سرویس  $F$  و  $E$  و  $D$  در هر یک از شکل‌ها رسم شده است.

جدول ۱. ضریب  $n$  و  $k$  برای معادله بدست آمده منحنی‌ها

$g/c = 0/5$		$g/c = 0/45$		سطح سرویس	مقدار
$N=3$	$N=2$	$N=3$	$N=2$		
۱/۳۶	۱/۴۷	۱/۲۳	۱/۳۲	F	n
۱/۳	۱/۳۲	۱/۳۹	۱/۲۵	E	
۱/۴۲	۱/۵۲	۱/۲۲	۱/۳۴	D	
$2 \times 10^6$	$4 \times 10^6$	$0.79 \times 10^6$	$1 \times 10^6$	F	K
$1 \times 10^6$	$2 \times 10^6$	$0.48 \times 10^6$	$0.74 \times 10^6$	E	
$1.0^{22}$	$4 \times 10^6$	$0.53 \times 10^6$	$1 \times 10^6$	D	

چپگرد حفاظت شده به جای حرکت چپگرد حفاظت نشده ملاک منطقی است. در تأخیرات کمتر از ۳۵ ثانیه، ممکن است که استفاده از فازبندی حفاظت نشده بهتر از شرایط حفاظت شده باشد. چرا که در فازبندی حفاظت شده معمولاً تعداد فازها بیشتر شده و باعث افزایش تأخیر و زمان تلف شده در کل تقاطع خواهد شد. در تأخیرات بیشتر از محدوده سطح سرویس  $D$ ، نیز به علت تغییرات ناگهانی که در تأخیر گردش به چپ وجود دارد، نتایج تحلیل نرم‌افزاری روش حفاظت نشده فاقد اعتبار خواهد شد.

با توجه به مطالب مذکور منحنی سطح سرویس  $D$ ، به عنوان مرز بین انتخاب شرایط حفاظت نشده و حفاظت شده برای حرکت گردش به چپ معرفی می‌شود. معادله این خط به صورت رابطه (۷) است، که

$$X^n y = k$$

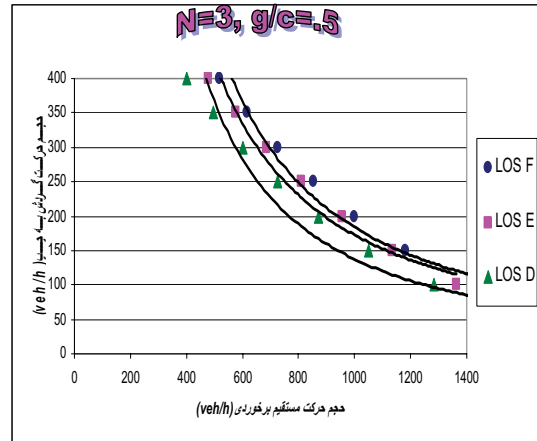
$X$ : حجم حرکات مستقیم رویکرد مخالف،

$y$ : حجم حرکت گردش به چپ و

$n$  و  $k$ : ضرایب ثابت برای سطح سرویس  $D$  که در جدول (۱) آمده است.

در شکل‌های ۵ تا ۸، برای حجم گردش به چپ و حجم حرکات مستقیم برخوردی، که مختصات نقطه مورد نظر آنها پایین‌تر از منحنی مربوط به سطح سرویس  $D$  قرار می‌گیرد، استفاده از رفتار حفاظت نشده مناسب است و تحلیل  $Hicap$  نیز تطابق مناسب با مشاهدات میدانی خواهد داشت، زیرا در این حجمها مدت زمان لازم برای پیدا کردن فاصله زمانی عبور ( $g_u$ ) مناسب است.

برای حجم گردش به چپ و حجم حرکات مستقیم برخوردی، که مختصات نقطه مورد نظر آنها بالاتر از منحنی مربوط به سطح سرویس  $D$  قرار می‌گیرد، استفاده از رفتار حفاظت نشده پیشنهاد



شکل ۸. منحنی‌های توانی هم تأخیر برای سطوح سرویس

مختلف برای  $N=3, g/c=0.5$

برای هر سطح سرویس یک منحنی هم تأخیر در شرایط  $N$  و  $g/c$  با توجه به جدول (۱) مشاهده می‌شود که در شرایط مختلف برآزش شده است. معادله این منحنی که دارای  $R^2$  قابل قبولی است، نشان می‌دهد که داده‌های به دست آمده نسبت به یکدیگر دارای یک روند منطقی می‌باشند. معادله‌های به دست آمده برای سطوح سرویس  $F, E, D$  برای تعداد خطوط مختلف حرکت مستقیم رویکرد مخالف و نسبت  $g/c$ ‌های متفاوت به صورت زیر می‌باشد:

$$x^n y = k \quad (7)$$

$X$ : حجم حرکت مستقیم رویکرد مخالف

$y$ : حجم حرکت گردش به چپ

$n$  و  $k$ : ضرایب ثابت که تابع تعداد خطوط حرکت مستقیم رویکرد مخالف و  $g/c$  می‌باشند.

ضرایب  $n$  و  $k$  برای حالات مختلف بررسی شده، در جدول (۱) آورده شده است.

$g/c = 0/45$  مقدار  $n$  تقریباً بین ۱/۲ تا ۱/۳ است و مقدار  $k$  نیز بین  $10^6 \times 0/5$  تا  $10^6 \times 1$  است. همچنین در شرایط  $g/c = 0/5$  مقدار  $n$  بین ۱/۳ تا ۱/۵ و مقدار  $k$  نیز  $10^6 \times 1$  تا  $4 \times 10^6$  است.

با توجه به ضرایب جدول (۱) و منحنی‌های شکل‌های ۵ تا ۸ دیده می‌شود که، روابط به دست آمده نسبت به  $g/c$  حساس‌تر از مقادیر  $N$  می‌باشند و با تغییر  $g/c$  مقادیر  $k$  و  $n$  دچار تغییر بیشتری می‌شوند. سرویس  $D$  با آنها دارای اختلاف قابل توجهی است. از آنجا که مرز تأخیر سطح سرویس  $D$  از ۳۵ ثانیه شروع می‌شود و پیشنهادات تحقیقات گذشته [۳]، انتخاب منحنی سطح سرویس  $D$  به عنوان یک مرز برای پیشنهاد استفاده از حرکت

همان گونه که از شکل ۹ پیداست، دو خط که برای رفتار حفاظت شده و حفاظت نشده رسم شده‌اند، یکدیگر را در یک نقطه قطع می‌کنند، که این نقطه تقریباً مرز شروع تأخیر سطح سرویس D (یعنی ۳۵ ثانیه) است. در تأخیرات کمتر از سطح سرویس D، خط مربوط به رفتار حفاظت شده بالاتر از خط مربوط به رفتار حفاظت نشده قرار گرفته است، یعنی تأخیر حرکت گردش به چپ در شرایط حفاظت شده بیشتر از حفاظت نشده است. در تأخیرات بیشتر از سطح سرویس D، برعکس حالت قبل بوده و تأخیر حرکت گردش به چپ در شرایط حفاظت نشده بیشتر از حفاظت شده است.

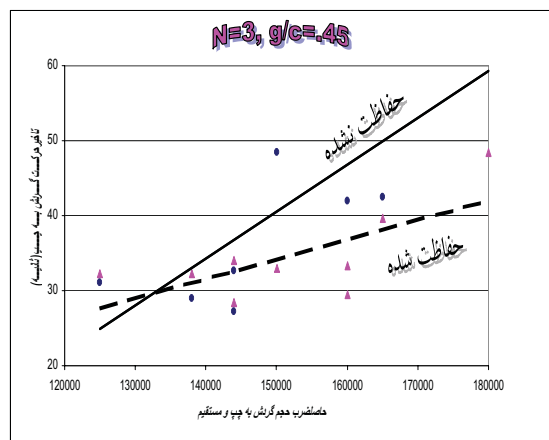
### ۸. نتیجه گیری

در این تحقیق، با توجه به روابط ظرفیت حرکت گردش به چپ در شرایط رفتار حفاظت نشده، مطابق آیین نامه HCM، تحلیل حساسیت تأخیر برای این حرکت بررسی شد. این کار با تغییرات حجم گردش به چپ، حجم حرکت مستقیم رویکرد مخالف، تعداد خطوط حرکت مستقیم رویکرد مخالف و نسبت زمان سبز مؤثر (g/c) انجام شد. نتایجی که از این تحقیق به دست آمد، به صورت زیر خلاصه شده‌اند:

- منحنی‌های تأخیر حرکت گردش به چپ بر اساس حجم گردش به چپ، حجم حرکت مستقیم رویکرد مخالف، تعداد خطوط حرکت مستقیم رویکرد مخالف و نسبت زمان سبز مؤثر رسم شد.
- تأخیر حرکت گردش به چپ در این منحنی‌ها در یک حجم معین حرکت مستقیم رویکرد مخالف، ثابت شده و با افزایش این حجم دیگر تغییری نمی‌کند. این امر به علت نزدیک شدن ضریب گردش به چپ به حداقل مقدار خود (مطابق HCM) است.
- با توجه به منحنی‌های تأخیر گردش به چپ، منحنی‌های هم تأخیر برای سه سطح سرویس E، F و D برای تعداد خطوط مختلف حرکت مستقیم رویکرد مخالف و نسبت زمان سبز مؤثر متفاوت رسم شد.
- با برآزش نمودارهای هم تأخیر، برای سطوح سرویس مختلف، معادله منحنی‌های هم تأخیر به صورت تابع توانی مطابق رابطه (۷) به دست آمد، که دارای  $R^2$  قابل قبولی بودند. ضرایب ثابت این رابطه به تعداد خطوط حرکت مستقیم رویکرد مخالف و نسبت زمان سبز مؤثر بستگی دارند.

نمی‌شود. زیرا در این قسمت حجم‌های گردش به چپ و حجم‌های برخوردی حرکت مستقیم رویکرد مخالف بیشتر شده و با افزایش این حجم‌ها، مقدار زمان مناسب برای پیدا کردن فاصله زمانی عبور ( $g_{ii}$ ) کاهش پیدا می‌کند. در شرایط میدانی، همین امر باعث می‌شود که وسایل نقلیه چپگرد، فاصله زمانی عبور استاندارد را رعایت نکرده و باعث مسدود شدن حرکت مستقیم رویکرد مخالف شوند. در این صورت نتایج تأخیر حرکت گردش به چپ به دست آمده از تحلیل نرم‌افزاری Hicap تطابق مناسبی با شرایط میدانی ندارد. برای مثال، برای شرایطی که تعداد خطوط حرکت مستقیم برخوردی (N) برابر ۳ است و نسبت زمان سبز مؤثر نیز ۰/۴۵ است، در یک تقاطع با حجم‌های متقارن تأخیر حرکت گردش به چپ در رفتار حفاظت نشده و حفاظت شده با همدیگر مقایسه شده است. برای این کار به ازای حجم‌های مختلف گردش به چپ و حرکات مستقیم رویکرد مخالف، تأخیر در شرایط حفاظت نشده و حفاظت شده توسط نرم‌افزار Hicap به دست آمده است. در رفتار حفاظت شده، تمامی شرایط تحلیل نرم‌افزاری مطابق با رفتار حفاظت نشده بوده، بجز این‌که زمان‌بندی بهینه برای هر فاز تعیین شده است. در جدول (۲)، مقایسه بین تأخیر حرکت گردش به چپ در رفتار حفاظت نشده و حفاظت شده در حجم‌های مختلف صورت گرفته است.

نتایج به دست آمده در جدول (۲) را می‌توان به صورت شکل ۹ ارایه کرد. در این شکل در محور افقی، حاصلضرب حجم گردش به چپ و حجم حرکت مستقیم برخوردی و در محور قائم نیز تأخیر حرکت گردش به چپ برای شرایط حفاظت شده و حفاظت نشده نشان داده شده است.



شکل ۹. مقایسه تأخیر گردش به چپ در شرایط حفاظت شده و

حفاظت نشده برای  $N=3, g/c=0.45$



جدول ۲. مقایسه تأخیر گردش به چپ در شرایط حفاظت شده و حفاظت نشده برای شرایط  $N=3, g/c=.45$

تأخیر حرکت گردش به چپ در شرایط حفاظت شده	تأخیر حرکت گردش به چپ در شرایط حفاظت نشده	حجم حرکت مستقیم برخوردی (Veh/h)	حجم گردش به چپ (Veh/h)
۳۳	۳۱	۱۰۰۰	۱۲۵
۳۳	۴۹	۱۰۰۰	۱۵۰
۳۴	۶۲	۱۰۰۰	۱۶۰
۳۴	۲۷	۸۰۰	۱۶۰
۲۹	۳۳	۸۰۰	۱۸۰
۳۰	۴۲	۸۰۰	۲۰۰
۳۳	۲۹	۶۰۰	۲۳۰
۴۰	۴۳	۶۰۰	۲۷۵
۴۹	۶۰	۶۰۰	۳۰۰

- با توجه به روند تغییرات تأخیر و تحقیقات گذشتگان، سطح سرویس D به عنوان مرز پیشنهادی برای حرکت گردش به چپ با رفتار حفاظت نشده و حفاظت شده ارایه شد.
- در شرایط  $N=3$ ، و  $g/c=0.45$ ، برای حجم‌های مختلف حرکت‌های گردش به چپ و حرکت مستقیم رویکرد مخالف، تأخیر حرکت گردش به چپ در دو رفتار حفاظت شده و حفاظت نشده با یکدیگر مقایسه شدند.
- در کل با در دست داشتن حجم گردش به چپ و حجم حرکات مستقیم برخوردی و برداشتهای وضعیت موجود یک تقاطع، با استفاده از منحنی‌های هم تأخیر، می‌توان علاوه بر پیشنهاد رفتار حفاظت شده و حفاظت نشده، تأخیر حرکت گردش به چپ را نیز برآورد کرد.

#### ۹. ارایه پیشنهادات

- ادامه تحقیق برای تعداد خطوط متفاوت حرکت مستقیم رویکرد مخالف و نسبت‌های متفاوت زمان سبز مؤثر
- مقایسه نتایج نرم افزار Hicap و Synchro در مورد نتایج این تحقیق
- مقایسه رفتار حفاظت شده و حفاظت نشده برای شرایط مختلف فازبندی و زمان‌بندی تقاطع

#### ۱۰. مراجع

1. Zhang, L. and Prevedouros, P.D. (2003) "Signalized intersection loss that accounts for safety risk". The 82<sup>nd</sup>. Annual Meeting of the Transportation Research Board, January 2003.
2. Mc Shane W.R. and Roess, R.P. (1990) "Traffic Engineering", London: Prentice – Hall.
3. Lin, H.J. and Machemel, R.B. (1983) "Development study of implementation guidelines for left turn treatment", Transportation Research Record, No, 905.
4. Luttinen, R. Tapio (2003) "Delay at signalized intersections, a comparison of Capcal 2 , Dankap, and HCM 2000", The 82<sup>nd</sup>. Annual Meeting of the Transportation Research Board.
5. Transportation Research Board (2001) "Highway capacity manual 2000", TRB, National Research Council, Washington, D.C.

**(Technical Note)**  
**Sensitivity Analysis of Permitted Left - Turn Movement Delay  
Model in HCM<sup>1</sup>**

*D. Daryaei, Member of the Academic Board, Department of Engineering, Malayer  
University, Malayer, Iran.*

*A. Pirdavani, M.Sc. Student, Department of Engineering, Azad University of Science and  
Research, Tehran, Iran.*

*E-Mail: d\_daryaei@yahoo.com*

**ABSTRACT**

According to the HCM standards of signalized intersections, when there is a permitted phase, delay of left-turns will grow with increasing of through-turn volume of the opposing approach. In many countries, among them Iran, left-turn movement will not look for an acceptance gap and cuts into the through movement of opposing approach in a later time according to standards. Left-turn movements cause increasing the delay of through-turn movements of opposing approach. This fact will occur in a permitted condition, when volumes of left and through-turn movements prosper a certain limit. To determine these boundaries of left-turn movements and through-turn movements of the opposing approach, we should do the sensitivity analysis of “left-turn movement delay” against increasing of volumes of left-turn movements and through-turn movements of the opposing approach.

According to accident statistics of many countries, %45 of accidents, at intersections, pertains to left-turn maneuvers. Most accidents occur when left-turn movements are done in a permitted condition. Statistics indicate that %85 of these accidents will reduce, if permitted left-turn movements changed into protected left-turn movements.

In addition, existence of permitted left-turn movements will increase the intersection delay. This paper presents relation between left-turn movements and volume of through-turn movements of opposing approach considering various numbers of opposing approach lanes and effective green time ratio (g/C).

In this research, delay of left-turn movements is drawn in different charts with variables like left-turn movement volumes, effective green time ratio and opposing approach through-turn movement volumes and number of lanes, as a result of analysis with HICAP Software, for permitted condition. Also same-delay curves are drawn for three LOS<sup>2</sup>es (D, E, F), according to volumes in different conditions. In comparison to delays, based on different volumes in permitted and protected conditions, we will present a proposed boundary that shows us when to use, which of these conditions.

**Keywords:** Delay, left-turn movement, permitted condition

---

<sup>1</sup> Highway Capacity Manual

<sup>2</sup> Level of Service