

تأثير أنواع المركبات المختلفة على سعة التقاطعات المزودة بإشارات ضوئية

سعد بن عبدالرحمن القاضي

أستاذ مشارك، قسم الهندسة المدنية، كلية الهندسة، جامعة الملك سعود،

ص.ب. ٨٠٠ الرياض ١١٤٢١، المملكة العربية السعودية

الملخص

يميل السائقون في مدينة الرياض إلى تجاهل الخطوط الأرضية المدهونة على رصفية الطريق واستغلال كل متر من عرض مدخل التقاطع المزود بإشارة ضوئية. فالمركبات تتزاحم في مدخل التقاطع لتكوين عدد من صفوف الانتظار يتجاوز عادة عدد الحارات المرورية المخططة على رصفية الطريق. وقد قامت هذه الورقة بتحليل أثر هذا السلوك على سعة التقاطعات المزودة بإشارات ضوئية وتقدير قيم مكافئ سيارات الركاب الصغيرة لستة أنواع مختلفة من المركبات في ظل هذه الظروف. وتم توظيف طريقة تحليل الانحدار الخطي المتعدد، ولكن مع تطويرها بحيث يتم اعتبار إجمالي بيانات جميع الحارات المرورية التي تستخدمها المركبات المتجهة للأمام، وليس لحارة واحدة كما هو المتبع عادة. وجمعت البيانات اللازمة لتقدير نموذج الانحدار من ١١ تقاطعا في مدينة الرياض باستخدام التصوير بالفيديو من خلال كاميرات غرفة التحكم والسيطرة بإدارة مرور الرياض. وتوصلت الدراسة إلى عدة نتائج مفيدة لتحليل سعة التقاطعات المزودة بإشارات ضوئية، حيث وجد أن معدل التدفق المشيع عند التقاطعات هو ١٩٤٥ سيارة ركاب صغيرة لكل ساعة خضراء للإشارة لكل حارة مخططة على مدخل التقاطع. وكشفت النتائج أن الحافلة الصغيرة (مثل حافلة تويوتا كوستر ذات ٢٥ مقعد) مكافئة لسيارة الركاب الصغيرة، من حيث تقاطرها الزمني وبالتالي تأثيرها على سعة التقاطع، وأرجعت ذلك إلى الرعونة والتهور الملحوظين لمعظم سائقي تلك الحافلات. كما توصلت الدراسة إلى أن الشاحنة الثقيلة والحافلة الكبيرة تعادل ١,٧٣ سيارة ركاب صغيرة، في حين تبلغ قيمة مكافئ سيارات الركاب الصغيرة ١,٠٧ للشاحنة الخفيفة.

١. مقدمة

يمكن اعتبار علم هندسة المرور، من جوانب عدة، على أنه من العلوم السلوكية، فهو مبني على سلوك مستخدم الطريق في تفاعله مع الخواص الطبيعية للمركبة والطريق. لذا، فإن الفهم العميق لهذا التفاعل يعد شرطا ضروريا للخروج بحلول عملية. ومعظم المعرفة الحالية في هذا العلم مبنية بشكل أساسي على ظروف الدول المتقدمة، مثل الولايات المتحدة الأمريكية وأوروبا، ولكن الظروف المرورية في الدول النامية، وخصوصا سلوك السائقين، عادة ما تكون مختلفة اختلافا جذريا عنها في الدول المتقدمة [١].

من جانب آخر، يعد التقاطع السطحي من أهم عناصر تصميم الطرق وتشغيلها. ويختلف تحليل سعة التقاطعات اختلافا جذريا عن تحليل سعة الطرق. ففي الطرق، يفترض عدم تعرض حركة المرور لأية مقاطعة بحيث لا تضطر المركبات للتوقف لأسباب خارجة عن حركة المرور. ولكن في حالة التقاطعات، يجب على المركبات التوقف، على سبيل المثال، عند الإشارات المرورية. بالإضافة لذلك، فإن سعة الطريق لا تتأثر إلا بالخصائص الهندسية للطريق نفسه وعوامل

الحركة المرورية عليه فقط، في حين أن سعة التقاطع تتأثر بالخصائص الهندسية لجميع الطرق التي تتقابل عنده وعواملها المرورية. وهذا بالطبع يجعل تحليل سعة التقاطعات أشد تعقيدا منه للطرق.

ويتم عادة أخذ تأثير العوامل المرورية على سعة التقاطعات المزودة بإشارات ضوئية بالاعتبار من خلال استخدام عوامل وزنية، تسمى مكافئ سيارات الركاب الصغيرة. وهي تعطي لأصناف المركبات المختلفة، على حسب طولها وقدرات تسارعها وتباطؤها ومقدار حملتها والوقت الذي تستغرقه مقارنة بسيارات الركاب الصغيرة، مما يؤثر بدوره على معدل التدفق المشبع لمدخل التقاطع المزود بإشارة ضوئية.

ونظرا لاختلاف الظروف المرورية في الدول النامية، وخصوصا سلوك السائقين، عنها في الدول المتقدمة، كما تقدم، فإنه لا يمكن نقل قيم مكافئ سيارات الركاب الصغيرة المقترحة في دليل سعة الطرق (الأمريكي) واستخدامها في دولة نامية بدون دراسة متأنية للظروف المحلية فيها؛ وفي كثير من الحالات يتبين أنه لا بد من إعادة حساب مكافئ سيارات الركاب الصغيرة من خلال دراسات محلية [١].

ويستخدم مفهوم مكافئ سيارات الركاب الصغيرة للأخذ بالاعتبار الآثار السلبية للمركبات الثقيلة على حركة المرور، فالمركبات الثقيلة، بسبب زيادة أبعادها وانخفاض معدلات تسارعها وتباطؤها، ربما تؤثر سلبا على أداء حركة المرور عند التقاطعات. ويعرف مكافئ سيارات الركاب الصغيرة لمركبة من نوع معين بأنه عدد سيارات الركاب الصغيرة التي لها نفس التأثير على حركة المرور الذي تسببه مركبة واحدة من هذا النوع. أو بمعنى آخر هو عدد سيارات الركاب الصغيرة التي تريحها مركبة واحدة تحت ظروف الطريق وحركة المرور السائدة. فالمركبات الثقيلة الواقفة عند التقاطع تتسبب في حدوث فجوات زمنية (تقاطر زمني) أطول منها للسيارات الصغيرة عند عبورها للتقاطعات، وبالتالي تتسبب في تأخير المركبات خلفها. ولا يقتصر سبب حدوث التأخير على الزيادة في زمن تقاطر المركبة الثقيلة نفسها، ولكنه يشمل أيضا الزيادة في التقاطر الزمني للمركبات التي خلفها [٢].

وفي مدينة الرياض، وربما في غيرها من مدن المملكة العربية السعودية [٣]، يختلف سلوك السائقين أثناء وقوفهم في طوابير انتظار عند الإشارات الضوئية في التقاطعات، عنه في كثير من الدول الأخرى. فالمركبات تتزاحم في مدخل التقاطع لتكوين عدد من صفوف الانتظار يتجاوز عدد الحارات المرورية المخططة والمدهونة على رصيف الطريق. كما أن بعض السائقين لا يلتزم بالحارة المرورية المخصصة للمناورة التي ينوي القيام بها. فمثلا، قد يسلك السائق الحارة المرورية التي في أقصى اليمين، والتي قد تكون مخصصة فقط للانعطاف لليمين، وهو يريد الاستمرار للأمام أو حتى الانعطاف لليسار أو الدوران للخلف عند بدء زمن الأخضر للإشارة [٧-٤]. وقد كان هذا السلوك الفريد للسائقين في مدينة الرياض حافزا للقيام بهذه الدراسة.

وتهدف هذه الورقة العلمية لتقدير مكافئ سيارات الركاب الصغيرة لمختلف أنواع المركبات، وذلك للحركة المستمرة إلى الأمام (بدون انعطافات) عند التقاطعات المزودة بإشارات ضوئية في مدينة الرياض ومعرفة تأثير ذلك على سعة التقاطعات.

ويعرض الجزء التالي من الورقة مراجعة مستفيضة للأساليب المستخدمة في حساب مكافئ سيارات الركاب الصغيرة عند التقاطعات. ويناقش الجزء الثالث الأسلوب الرياضي الذي تبنته هذه الدراسة. أما الجزء الرابع فيشرح عملية جمع البيانات اللازمة لمعايرة النموذج الرياضي، والذي تتم مناقشة نتائجه في الجزء الخامس من الورقة. ويعرض الجزء الأخير النتائج والتوصيات التي توصلت لها هذه الدراسة.

٢. مراجعة الدراسات السابقة

أجريت عدة أبحاث من أجل فهم تأثيرات الأنواع المختلفة للمركبات على سعة التقاطعات المزودة بإشارات ضوئية. وفي سبيل تقدير مكافئ سيارات الركاب الصغيرة فقد سلكت تلك الدراسات عدة طرق وأساليب سيتم عرضها حسب تصنيفها الموضح أدناه.

٢-١ طريقة ويبستر (Webster)

في عام ١٩٥٨م، قام ويبستر بإجراء تجربة محكمة، على طريق مخصص للتجارب، لحساب مكافئ سيارات الركاب الصغيرة. وقد صنف المركبات إلى صنفين هما المركبات الخفيفة والمركبات المتوسطة والثقيلة. وقدر قيمة المكافئ للمركبات الثقيلة بجمع بيانات من ١٢ دورة متتابة للإشارة الضوئية ثم رسم شكل بياني للعلاقة بين متوسط عدد المركبات الثقيلة لكل دورة، على الإحداثي الصادي، مع متوسط عدد المركبات الخفيفة لكل دورة، على الإحداثي السيني. وقد وجد أن النقاط المرسومة كانت تشكل خطا مستقيما، يمثل مقلوب ميله مكافئ سيارات الركاب الصغيرة للمركبات الثقيلة [٨]. وفي دراسة أخرى، أوصى ويبستر باستخدام قيمة للمكافئ قدرها ١,٧٥ للشاحنات الثقيلة وقيمة ٢,٢٥ للحافلات، وذلك عند حساب معدل التدفق المشبع للحركة المستمرة للأمام عند التقاطعات [٩].

٢-٢ طريقة الانحدار الخطي

عرض برانستون وفانزويلن (Branston and Van Zuylen) [١٠] وبرانستون وقيبرز (Branston and Gipps) [١١] طريقة للانحدار الخطي المتعدد لتقدير المعلمات المرورية عند التقاطعات المزودة بإشارات ضوئية، بما في ذلك مكافئ سيارات الركاب الصغيرة. حيث تم تقسيم زمن الأخضر المخصص لمدخل التقاطع إلى ثلاث فترات متتابة للحصر سُميت الفترات "الأولى" و "الوسطى" و "الأخيرة". وتغطي الفترة الأولى تزايد معدل التدفق من الصفر عند بدء زمن الأخضر وحتى الوصول للتدفق المشبع، في حين تغطي الفترة الوسطى طول فترة التدفق المشبع الثابت، أما الفترة الأخيرة فتشمل انخفاض معدل التدفق عن المعدل المشبع خلال زمن الأصفر. وتم تسجيل أزمان مغادرة المركبات لخط الوقوف عند التقاطع وحصر أنواعها لفترة زمنية قدرها (T)، والتي تبدأ وتنتهي عند أزمنة اختيارية. بعد ذلك تم تطبيق معادلة الانحدار التالية لتقدير معدل التدفق المشبع لسيارات الركاب الصغيرة (β_0) ومكافئ سيارات الركاب الصغيرة لكل صنف i من المركبات الأخرى (β_i):

$$n_{pc} = \beta_0 T - \sum_{i \neq pc} \beta_i n_i + \varepsilon \quad (1)$$

حيث أن:

n_{pc} = عدد سيارات الركاب الصغيرة التي تم حصرها في دورة الإشارة

n_i = عدد المركبات الأخرى من الصنف i

ε = مقدار الخطأ العشوائي

وقد سجلت أزمان مغادرة المركبات بطريقتين مختلفتين هما "المتزامنة" و "اللامتزامنة"، حيث يتم في الأولى الالتزام بإنهاء المشاهدات عند لحظة المغادرة لأية مركبة، ولكن في الطريقة الثانية يتم إنهاء المشاهدات في أي زمن اختياري. وتوصلت الدراسة المذكورة لتقدير قيمة المكافئ للمركبات الثقيلة بـ ١,٧٤ للطريقة المتزامنة و ١,٥٩ للطريقة

اللامتزامنة، وذلك عند تطبيق طريقة الانحدار على الحركة المستمرة للأمام عند التقاطعات، وبعد استبعاد الزمن الضائع عند بدء الحركة.

كما قام برانستون أيضاً، في دراسة أخرى، بتطبيق أسلوب تحليل الانحدار الخطي على بيانات الحركة المرورية المستمرة للأمام في تقاطع مستو بدون ميل، وتوصل لتقدير المكافئ بالقيمين ١,٣٥ و ١.٦٨ للشاحنات المتوسطة والثقيلة، على التوالي [١٢].

وقد أجريت مؤخراً دراسة لتقدير تأثير الشاحنات الخفيفة (Light Duty Trucks) على سعة التقاطعات المزودة بإشارات ضوئية [١٣]. وتم في هذه الدراسة تقسيم الشاحنات الخفيفة إلى أربع مجموعات هي :

١. المركبات الرياضية-الخدمية (Sport-Utility Vehicle) الطويلة، وهي ما يزيد طولها عن خمسة أمتار
٢. المركبات الرياضية-الخدمية القصيرة، وهي ما لا يزيد طولها عن ٥ أمتار
٣. مركبات الـ "فان" الصغيرة (Minivan)
٤. الشاحنات الصغيرة أو "الوانيت" (Pickup)

وقد استخدمت الدراسة المذكورة معادلة الانحدار التالية لتقدير مكافئ السيارات الصغيرة للشاحنات الخفيفة:

$$T = \alpha + \sum_{j=1}^{j=m} \beta_j D_j + \sum_{k=1}^{k=p} \gamma_k X_k + \sum_{i=1}^{i=n} \delta_i Y_i + \varepsilon \quad (٢)$$

حيث :

- T = مجموع الزمن اللازم لطابور المركبات لعبور خط الوقوف عند الإشارة
- α = الزمن الضائع المرتبط بالمركبات الأولى في الطابور زائداً الزمن اللازم للمركبة الأولى لإخلاء مدخل التقاطع
- B_j = متوسط الزمن الإضافي اللازم لشاحنة خفيفة من النوع j لعبور خط الوقوف مقارنة بسيارة الركاب الصغيرة
- γ_k = متوسط الفجوة الزمنية للتدفق المشبع المرتبطة بزوج مركبة - سيارة ركاب صغيرة من النوع k
- δ_i = متوسط الفجوة الزمنية للتدفق المشبع المرتبطة بشاحنة خفيفة من النوع j
- m = عدد المتغيرات الثنائية (واحد أو صفر) المشمولة في الأصناف المختلفة للمركبة الأولى في الطابور (مع استبعاد المتغير الثنائي لسيارة الركاب الصغيرة)

P = عدد التباديل المميزة لترتيب أزواج المركبة-سيارة ركاب صغيرة

n = عدد اصناف الشاحنات الخفيفة المشمولة بالتحليل

D_j = متغير ثنائي (واحد أو صفر) للدلالة على ما إذا كانت المركبة الأولى في الطابور من النوع j

X_k = عدد المركبات في الطابور من النوع k أمام سيارة ركاب صغيرة

Y_j = عدد الشاحنات الخفيفة من النوع j في الطابور

ε = الخطأ الذي يمثل الزمن المتراكم من الخصائص غير المشاهدة لجميع المركبات في الطابور، وخصائص سائقيها.

وبعد معايرة المعادلة رقم (٢) أعلاه، بناء على قياسات ميدانية، قامت الدراسة بتقدير مكافئ السيارات

الصغيرة لمختلف أنواع المركبات باستخدام المعادلة التالية:

$$PCE_i = \frac{\delta_i + \Delta\gamma_i}{\gamma_p} \quad (٣)$$

حيث أن:

$$PCE_i = \text{مكافئ السيارات الصغيرة للشاحنة الخفيفة من النوع } i$$

$$\delta_i = \text{متوسط الفجوة الزمنية المرتبطة بشاحنة خفيفة من النوع } i$$

$$\gamma_p = \text{متوسط الفجوة الزمنية المرتبطة بسيارة ركاب صغيرة تتبع سيارة ركاب صغيرة أخرى}$$

$$\Delta\gamma_i = \text{متوسط التأخير الإضافي الذي تتسبب به شاحنة خفيفة من النوع } i \text{ وهي تتبع سيارة ركاب صغيرة .}$$

وقد توصلت الدراسة إلى أن مكافئ سيارات الركاب الصغيرة للمركبات الرياضية-الخدمية القصيرة والطويلة هو ١,٠٧ و ١,٤١، على التوالي، وللغان الصغيرة ١,٣٤، و ١,١٤ للوانيت، وذلك للحركة المستمرة للأمام عند التقاطعات [١٣].

٢-٣ طريقة نسبة التقاطر الزمني

في عام ١٩٤٧، طور قرينشيلدز وزملاؤه (Greenshields) طريقة نسبة التقاطر الزمني (الفجوة الزمنية). وهذه الطريقة مبنية على أن مكافئ سيارات الركاب الصغيرة للمركبة من النوع i (PCE_i) يساوي نسبة متوسط التقاطر الزمني للمركبة من النوع i (\bar{h}_i) إلى متوسط التقاطر الزمني لسيارات الركاب الصغيرة (\bar{h}_{pc}):

$$PCE_i = \frac{\bar{h}_i}{\bar{h}_{pc}} \quad (٤)$$

وتعد طريقة نسبة التقاطر الزمني أكثر الطرق شيوعاً لتحديد مكافئ سيارات الركاب الصغيرة عند التقاطعات المزودة بإشارات ضوئية [١٤]. فعلى سبيل المثال، تم استخدام هذه الطريقة لتقدير مكافئ سيارات الركاب الصغيرة لمختلف أنواع المركبات الموصى باستخدامها لتصميم التقاطعات في المملكة المتحدة، والتي تأخذ القيم التالية: ٥.١ للمركبة التجارية المتوسطة (لها محورين وأربع إطارات أو أقل)، و ٢,٣ للمركبة التجارية الثقيلة (لها أكثر من محورين) و ٢,٠ للحافلة [١٥].

وبالرغم من أن هذه الطريقة بسيطة ومباشرة، إلا أنها لا تأخذ بالاعتبار الآثار السلبية للمركبات الثقيلة على التأخير. فقد ذكرت إحدى الدراسات أن نسبة حضور المركبات الثقيلة في الموقع الأمامي لطابور المركبات المنتظرة عند الإشارة تكون أكثر تكراراً من نسبة تلك المركبات في حركة المرور. وعند استخدام تلك الدراسة لطريقة نسبة التقاطر الزمني، وجدت أن المكافئ للشاحنات الثقيلة (التي عرفتها بأنها المركبة التي لها أكثر من ثلاثة محاور) في حالة كونها في الموقع الأمامي للطابور هو ٤,٠٥، وكانت قيمته ٢,٦٣ في حالة كون الشاحنة الثقيلة ليست في مقدمة الطابور [١٦].

وقد اقترح مولينا (Molina) تعديلاً على طريقة نسبة التقاطر الزمني للأخذ بالاعتبار الزيادة في التقاطر الزمني للمركبات المنتظرة في طابور خلف مركبة ثقيلة، حيث اقترح أن يتم حساب مكافئ سيارات الركاب الصغيرة للمركبة من النوع i (PCE_i) كالتالي [٢]:

$$PCE_i = \frac{(\bar{h}_i + \Delta H)}{\bar{h}_{pc}} \quad (٥)$$

أو

$$PCE_i = 1 + \frac{TT_i - TT_{pc}}{h_{pc}} \quad (٦)$$

حيث أن:

$$\bar{h}_i = \text{متوسط التقاطر الزمني للمركبات من النوع } i$$

$$\bar{h}_{pc} = \text{متوسط التقاطر الزمني المشبع لسيارات الركاب الصغيرة}$$

$$\Delta H = \text{الزمن الإضافي الإجمالي للتقاطر الزمني لطابور المركبات الذي تسببه الشاحنة الثقيلة}$$

$$TT_i = \text{الزمن الكلي لمغادرة طابور المركبات الذي تتقدمه شاحنة من النوع } i$$

$$TT_{pc} = \text{الزمن الكلي لمغادرة طابور المركبات الذي تتقدمه سيارة ركاب صغيرة}$$

وقد وجدت تلك الدراسة أن موقع الشاحنة داخل طابور المركبات المنتظرة، بالنسبة للشاحنات المفردة ذوات المحورين والثلاثة محاور، ليس له تأثير يذكر على قيمة مكافئ سيارات الركاب الصغيرة، ولكن تأثير الموقع كان ملموساً على قيمة المكافئ للشاحنة ذات الخمسة محاور. مع العلم أن تلك الدراسة كانت مقصورة على الحركة المستمرة للأمام مع وجود شاحنة واحدة فقط في الطابور، حيث لم يتم الأخذ بالاعتبار عوامل أخرى مثل حجم المرور ونسبة الشاحنات. وقد أوصت الدراسة باستخدام قيمتي ٣,٧ و ١,٧ للمكافئ للشاحنات الثقيلة والخفيفة، على التوالي [٢].

وفي عام ١٩٩٥م، قام تساو وشو (Tsao and chu) بتحليل بيانات جمعت في تقاطعات في تايوان، ووجدوا أن متوسط التقاطر لسيارات الركاب الصغيرة وللمركبات الثقيلة لا يعتمد على نوع المركبة التي تكون أمامها مباشرة. كما أشارت نتائج دراستهما إلى أنه يجب استخدام عوامل تصحيح مختلفة للمركبات الثقيلة، عند التقاطعات، في حالة حركة المرور المتجهة للأمام عن تلك المنعطفة لليسار [١٧].

٤-٢ طريقة دليل سعة الطرق

يستخدم دليل سعة الطرق عامل تصحيح للمركبات الثقيلة (f_{hv}) يأخذ الصيغة التالية [٢٠-١٨]:

$$f_{hv} = \frac{1}{[1 + P_H (PCE - 1)]} \quad (٧)$$

حيث أن:

$$P_H = \text{نسبة المركبات الثقيلة}$$

$$PCE = \text{مكافئ سيارات الركاب الصغيرة للمركبة الثقيلة}$$

وفي تحليل سعة التقاطعات، يوصي الدليل في طبعته الثانية (١٩٨٥م) [١٨] باستخدام قيمة ١,٥ للمكافئ، في حين يوصي في طبعته الثلاث اللاحقة (١٩٩٤م و ١٩٩٧م و ٢٠٠٠م) [٢١-١٩] باستخدام قيمة ٢,٠، ولكن بدون إعطاء أية أسباب لهذه الزيادة. وبشكل عام، فإن نتائج الأبحاث السابقة المعروضة أعلاه قريبة من قيمة ٢,٠ للمكافئ، التي توصي بها الطبعتين الثالثة والرابعة للدليل سعة الطرق (الأمريكي) بالنسبة للمركبات الثقيلة- وإن كانت تميل إلى أن تكون أقل منها. كما أنه من المهم الإشارة إلى أنه في حالة الميول الحادة للطرق، في حالة تحليل سعة الطرق، فإن الدليل يوصي باستخدام قيم متغيرة للمكافئ حسب نوع المركبة الثقيلة ونسبتها في حركة المرور. بينما يستخدم الدليل، في حالة التقاطعات، قيمة ثابتة للمكافئ بغض النظر عن نوع المركبة الثقيلة وحجم الحركة المرورية.

أما الدليل الكندي لسعة التقاطعات المزودة بإشارات ضوئية فيعرف وحدة سيارة الركاب بأنها مركبة نقل الركاب التي تتسع لتسع أشخاص بحد أقصى ولا يزيد عدد إطاراتها عن أربعة، وهي عادة ماتشمل سيارات الركاب

الصغيرة، والفان (van) والوانيت (pickup). ويعتمد الدليل الكندي القيم التالية لمكافئ سيارات الركاب الصغيرة: ١,٠ لوحدة سيارة الركاب (التي تشمل الفان والوانيت)، و ١,٥ للشاحنة المفردة، و ٢,٥ للشاحنة ذات المقطورات والحمولة غير الثقيلة، و ٣,٥ للشاحنة ذات المقطورات والحمولة الثقيلة، و ١,٧٥ للحافلات [٢٢].

٢-٥ طرق أخرى

تعد المحاكاة الحاسوبية من أهم الأساليب الأخرى المستخدمة في الدراسات السابقة لتقدير مكافئ سيارات الركاب الصغيرة. فقد استخدمت إحدى الدراسات نموذج المحاكاة المرورية الكلي المعروف باسم "ترانزيت-٧" (TRANSYT-7) لمحاكاة شبكة من الشوارع الحضرية واستنتاج مكافئ سيارات الركاب الصغيرة للمركبات الثقيلة كدالة في حجم المركبة وتوقيت الإشارة وحجم المرور. وقد تم تقدير المكافئ بحساب نسبة أزمدة الانتقال الإجمالية للمركبات الثقيلة من النوع i (TT^i) إلى تلك الخاصة بسيارات الركاب الصغيرة (TT^{pc})، خلال تنقلها عبر شبكة الشوارع [٢٣]:

$$PCE_i = \frac{TT^i}{TT^{pc}} \quad (٨)$$

وتوصلت تلك الدراسة لتقدير مكافئ سيارات الركاب الصغيرة لسبعة أنواع من المركبات، حيث تراوحت القيم بين ١,٠٩ للشاحنة المفردة وحتى ١,٥٣ للشاحنة ذات مقطورة.

كما وظفت دراسة أخرى نموذج المحاكاة المروري الجزئي المعروف باسم "نيتسم" (NETSIM)، أو محاكي الشبكة، وذلك لاستنتاج قيم مكافئ سيارات الركاب الصغيرة على شوارع شريانية حضرية بما عدة تقاطعات متتالية مزودة بإشارات ضوئية. وقد حسبت تلك القيم على أساس الزمن الإضافي لإجمالي زمن الانتقال على مقاطع الشوارع الشريانية بين الإشارات، الناتج من إدخال المركبات الثقيلة ضمن الحركة المرورية. وقد توصلت الدراسة لتقدير قيم للمكافئ تراوحت بين ١,١ للشاحنة المفردة و ١,٤٥ للشاحنة ذات المقطورة [٢٤].

كما اقترحت دراسة أخرى أن مكافئ سيارات الركاب الصغيرة، كما هو مستخدم لتقدير معدل التدفق المشبع، يجب أن لا يحسب على أساس أنه عدد سيارات الركاب الصغيرة المكافئة التي تزيحها مركبة ثقيلة واحدة من الطريق بسبب حجمها، ولكن على أساس العدد الذي يعطي أقل زمن تأخير للتقاطع. وقد قامت تلك الدراسة باستخدام المحاكاة لتقدير المكافئ حسب التعريف المعدل، حيث توصلت إلى أن قيمة المكافئ الذي يعطي أقل تأخير للتقاطع في حالة المركبة الثقيلة كان ٢,٣، وذلك بفرض أن متوسط التقاطر الزمني لكل من سيارة الركاب الصغيرة والمركبة الثقيلة هو ٢,٠ و ٤,٥٦ ثانية، على التوالي [٢٥].

ومؤخرا تم توظيف نموذج المحاكاة المروري الجزئي المعروف باسم "تراف-نيتسم" (TRAF-NETSIM)، لحساب مكافئ سيارات الركاب الصغيرة بناء على مفهوم التأخير، حيث تتغير قيمة المكافئ حسب حجم المرور ونوع المركبة الثقيلة ونسبتها في حركة المرور. وقد توصلت الدراسة إلى أن قيمة المكافئ تتراوح بين ١,٠٠ و ٣٧,٠١ للشاحنة المفردة، وبين ١,٠٠ و ٢,١٨ للشاحنة المركبة، حسب تغير حجم المرور ونسبة الشاحنات [٢٦].

من جهة أخرى، هناك بعض الدراسات السابقة التي استخدمت أساليب أخرى لتقدير قيمة مكافئ سيارات الركاب الصغيرة. فقد توصل ميلر (Miller) من خلال قياس الزمن الإضافي الذي تحتاجه الشاحنة الكبيرة والمتوسطة لعبور التقاطع مقارنة بسيارة الركاب الصغيرة إلى تقدير المكافئ لها بقيمة ١,٨٥ [٢٧]. كما أفادت دراسة أخرى لتأثير السيارات الصغيرة على سعة التقاطعات المزودة بإشارات ضوئية، أن لقياس المركبة ونوع المركبة التي أمامها تأثيرا كبيرا على

التقاطر [٢٨]. وتوصلت إحدى الدراسات إلى تحديد مقدار التأخير، الذي تتعرض له المركبات التي تصل إلى التقاطع، من خلال حساب الفرق بين الزمن الذي تستغرقه المركبة الواحدة للانتقال عبر التقاطع ابتداء من نقطة ما قبل خط الوقوف عند مدخل التقاطع وأخرى بعده، والزمن اللازم لقطع المسافة نفسها في حالة استمرار المركبات بالسير بسرعاتها العادية. وتشير النتائج التي توصلت إليها تلك الدراسة إلى أن قيمتي المكافئ للشاحنة المفردة والشاحنة ذات المقطورات هما ١,٦ و ٢,٨ ، على التوالي [٢٩].

وبعد هذه المراجعة المستفيضة لأساليب تقدير مكافئ سيارات الركاب الصغيرة، ينبغي الإشارة إلى أن الأساليب الميدانية المعروضة في الطرق الثلاث الأولى مبنية على أن القياسات تتم في حارة مرورية واحدة، حيث تكون المركبات منتظمة في الحارات المرورية المخططة على مدخل التقاطع. ومن الواضح أن هذا على خلاف ما هو مشاهد في معظم التقاطعات في مدينة الرياض. ويعرض الجزء التالي من الورقة النموذج الرياضي الذي تم توظيفه للتعامل مع الظروف الخاصة التي أوجدها سلوك السائقين في مدينة الرياض.

٣. النموذج الرياضي

يصنف دليل سعة الطرق سيارات الركاب بأنها تشمل سيارات الركاب الصغيرة وجميع الشاحنات الخفيفة (Light Duty Trucks)، وهي صنف من المركبات يشمل "الوانيت" (pick-up)، والـ"فان" الصغيرة (Minivan) والمركبات الرياضية-الخدمية (Sport-Utility Vehicles)، أي "الجيب" والمركبات العائلية مثل "الجمس" أو "الصالون"، والتي لا يتجاوز وزنها الإجمالي حوالي أربعة أطنان (٨٥٠٠ رطل). ويزيد متوسط طول الشاحنات الخفيفة، بأنواعها المختلفة، عن متوسط طول سيارات الركاب الصغيرة بحوالي عشرة بالمائة [١٣]. كما أن متوسط ارتفاع هيكلها أكبر منه لسيارات الركاب الصغيرة، مما قد يعيق الرؤية لسيارات الركاب الصغيرة التي تقف خلفها عند التقاطع. وبالرغم من أن تأثير الشاحنات الخفيفة السلبي على سعة التقاطع يزداد بسبب هذين العاملين، أي زيادة الطول والارتفاع، إلا أن كلا من دليل سعة الطرق (الأمريكي) [٢١] والدليل الكندي لسعة التقاطعات المزودة بإشارات ضوئية [٢٢] لا يزالان يصنفانها على أنها سيارات صغيرة.

وتشير إحدى الدراسات إلى أن نسبة الشاحنات الخفيفة بلغت ٤٤% من إجمالي السيارات الجديدة المسجلة في الولايات المتحدة الأمريكية لعام ١٩٩٧م، في حين بلغت النسبة المقابلة للشاحنات المتوسطة والثقيلة ٢,٧% فقط [٣٠]. أما في المملكة العربية السعودية، فإن الإحصائيات الرسمية المنشورة لتسجيل المركبات الجديدة لا تصنف المركبات حسب أنواعها، ولكن حسب نوعية رخصة المركبة، والتي تشمل عدة تقسيمات من أهمها: خصوصي، وأجرة، ونقل، وحافلة. وتشمل المركبات "الخصوصي"، حسب تصنيف الإدارة العامة للمرور، جميع سيارات الركاب الصغيرة، ماعدا سيارات الأجرة، بالإضافة لمعظم أصناف الشاحنات الخفيفة، مثل الـ"فان" الصغيرة والمركبات الرياضية-الخدمية (أي الصالون والجيب). وقد تبين من العينة التي تم جمعها في هذه الدراسة لتقاطعات مختارة في مدينة الرياض، كما سيتم عرضه في الجزء التالي من الورقة، والتي بلغ حجمها ٧٣٠١ مركبة، أنها مكونة من ١٣,٨% شاحنات خفيفة، و ٣,٥% شاحنات ثقيلة، و ٢,٣% حافلات صغيرة (٢٥ مقعد)، و ١,٦% حافلات كبيرة (أكثر من ٤٠ مقعد) والباقي سيارات ركاب صغيرة (٧٩%).

وبالرغم من أن تأثير الشاحنة الخفيفة على سعة التقاطع أقل من تأثير الشاحنة الثقيلة، إلا أن وجود الشاحنات الخفيفة في حركة المرور أكثر شيوعاً، وبالتالي فإن تأثيرها الإجمالي على سعة التقاطع سيكون ملموساً مما

يتطلب أخذه بالاعتبار في هذه الدراسة. لذا سيتم في هذه الدراسة تقسيم أنواع المركبات إلى ستة أصناف هي: سيارات الركاب الصغيرة، والشاحنات الخفيفة القصيرة (التي لا يزيد طولها عن خمسة أمتار)، والشاحنات الخفيفة الطويلة (التي يتجاوز طولها خمسة أمتار)، والحافلات الصغيرة (مثل حافلات تويوتا-كويستا)، والحافلات الكبيرة والشاحنات الثقيلة. ويبين الجدول رقم (١) أبعاد بعض أنواع الشاحنات الخفيفة المتوفرة في سوق السيارات في المملكة العربية السعودية.

ونظرا للطبيعة الخاصة لسلوك السائقين في مدينة الرياض، من حيث عدم التزامهم بالوقوف في طوابير ضمن الحارات المرورية المخططة والمدهونة على رصيفية الطريق، فإن المركبات غالبا ماتكون متداخلة مع بعضها البعض ولا تقف في صفوف انتظار منتظمة، وبالتالي فهي كذلك لا تسير، في الغالب، في صفوف منتظمة عند تحركها مع بدء زمن الأخضر للإشارة. وهذا السلوك يحد من إمكانية الاستخدام المباشر لأي من الأساليب الميدانية المطروقة في الدراسات السابقة (الطرق الثلاث الأولى في الجزء السابق). إذ أن تلك الأساليب مبنية على أن تكون القياسات مأخوذة لطابور من المركبات المنتظمة في حارة واحدة، مثل التقاطر الزمني بين كل مركبة والمركبة التي تسير أمامها مباشرة في حارة مرورية واحدة. وللتغلب على هذه المشكلة لا بد من اعتبار جميع المركبات المستمرة للأمام في مدخل التقاطع بأكمله، أي عدم الاقتصار على حارة مرورية واحدة.

بناء على ذلك، سيتم استخدام طريقة تحليل الانحدار الخطي المتعدد، ولكن مع تحويلها بحيث يتم اعتبار جميع الحارات المرورية التي تستخدمها المركبات المتجهة للأمام فقط، واستبعاد الحارات المرورية التي بها حركات الانعطاف، سواء كانت تلك الحارات مخصصة بالكامل لحركات الانعطاف أو تستخدم لخليط من مركبات منعطفة وأخرى مستمرة للأمام.

ويأخذ نموذج الانحدار الخطي المتعدد المقترح استخدامه في هذه الدراسة الصيغة التالية:

$$T = \beta_0 + \beta_{PC}n_{PC} + \beta_{SLDT}n_{SLDT} + \beta_{LLDT}n_{LLDT} + \beta_Tn_T + \beta_{MB}n_{MB} + \beta_Bn_B \quad (9)$$

حيث أن:

T = إجمالي الزمن اللازم لطوابير المركبات المنتظرة عند الإشارة لعبور خط الوقوف منذ بدء الزمن الأخضر للإشارة أثناء الحركة المرورية المشبعة، أو طول زمن الأخضر، أيهما أقل، بالثواني

n_{PC} = إجمالي عدد سيارات الركاب الصغيرة التي تغادر خط الوقوف خلال T ، لجميع الحارات المستمرة للأمام

n_{SLDT} = إجمالي عدد الشاحنات الخفيفة القصيرة التي تغادر خط الوقوف خلال T ، لجميع الحارات المستمرة للأمام

n_{LLDT} = إجمالي عدد الشاحنات الخفيفة الطويلة التي تغادر خط الوقوف خلال T ، لجميع الحارات المستمرة للأمام

n_T = إجمالي عدد الشاحنات الثقيلة التي تغادر خط الوقوف خلال T ، لجميع الحارات المستمرة للأمام

n_{MB} = إجمالي عدد الحافلات الصغيرة التي تغادر خط الوقوف خلال T ، لجميع الحارات المستمرة للأمام

n_B = إجمالي عدد الحافلات الكبيرة التي تغادر خط الوقوف خلال T ، لجميع الحارات المستمرة للأمام

β_0 = الزمن الضائع لبدء الحركة منذ إضاءة الإشارة الخضراء وحتى الوصول لمعدل التدفق المشبع، بالثانية

β_i = متوسط التقاطر الزمني للتدفق المشبع المرتبط بمركبة من النوع i ، وهي معاملات المعايرة، ووحداتها هي

ثانية/مركبة/جميع الحارات المستمرة للأمام في مدخل التقاطع.

جدول رقم (١) : أبعاد عينة من الشاحنات الخفيفة المباعة في المملكة العربية السعودية

تصنيف المركبة	الصانع	النوع	الطراز	الأبعاد		
				العرض الكلي (مم)	الارتفاع الكلي (مم)	الطول الكلي (مم)
شاحنة خفيفة طويلة	جي. إم. سي.	صالون	سوبربان	٢٠٠٤	١٩٢٣	٥٥٧٠
	فورد	صالون	اكسكركشن	٢٠٣٢	١٩٤٣	٥٧٥٨
	لينكولن	صالون	نافيجيتور	١٩٤٥,٦	١٨٨٧,٢	٥٢٠٢
	فورد	صالون	اكسبيديشن	٢٠٢٩	١٩١٠	٥١٩٦,٨
	هيونداي	فان	H - 1	١٨٢٠	١٨٨٠	٥٠٣٥
	هيونداي	فان	H 100	١٦٩٠	٢٠١٠	٥٤٧٠
	نيسان	جيب	باترول	١٩٣٠	١٨٥٥	٥٠١٠
	دودج	فان	ويندوستار	١٩٤٥	١٦٦٦	٥١٠٢
	جي. إم. سي.	صالون	يوكون	٢٠٠٢	١٩٢٦	٥٠٥٠
	فورد	وانيت	رينجر	١٧٦٣	١٧٤٥	٦٢١٥
شاحنة خفيفة قصيرة	فورد	وانيت	السلسلة F	١٩٨٩	١٨٩٠	٥٢٦٥
	تويوتا	جيب	لانديكرورز	١٩٤٠	١٨٦٠	٤٨٩٠
	تويوتا	جيب	برادو	١٧٣٠	١٨٦٥	٤٧٧٠
	فورد	صالون	أكسبلورر	١٧٨٣,٣	١٧١٧,٤	٤٧٨٧,٩
	جيب	جيب	شيروكي	١٨٣٦	١٧٦٢	٤٦١٠
	نيسان	صالون	باتفايندار	١٨٢٠	١٧٢٥	٤٦٤٠
	نيسان	فان	أورفان	١٦٩٠	١٩٩٠	٤٧٩٠
	جي. إم. سي.	فان	سفاري	١٩٦٩	١٨٨٧	٤٨٢١
	جي. إم. سي.	صالون	جيمي	١٧٢٢	١٦٣٨	٤٤٩١
	هيونداي	جيب	جالوير	١٦٨٥	١٨٩٠	٤٦٤٠

المصدر: وكالات بيع السيارات المختلفة في مدينة الرياض

ويمكن من خلال معايرة نموذج الانحدار الخطي أعلاه تقدير متوسط التقاطر الزمني المشبع لكل نوع من أنواع المركبات الستة المشمولة في النموذج. ويقسم متوسط التقاطر الزمني لنوع المركبات المعين (β_i) على متوسط التقاطر الزمني لسيارات الركاب الصغيرة (β_0) يمكن الحصول على مكافئ سيارات الركاب الصغيرة لهذا النوع من المركبات. ويعرض الجزء التالي أسلوب جمع البيانات اللازمة لمعايرة نموذج الانحدار الخطي المتعدد.

٤. جمع البيانات

نظرا لتركيز الدراسة على حركة المركبات المستمرة للأمام، والتي تشغل عادة أكثر من حارة مرورية واحدة، فإن ذلك يشكل صعوبة في جمع البيانات المطلوبة من خلال المسح الميداني اليدوي المباشر، وذلك بسبب سلوك السائقين من حيث عدم تقديمهم بالحارات المرورية المخططة على الطريق مما لا يتيح تسجيل البيانات بدقة. لذا فقد تم استخدام التصوير بالفيديو لتسجيل حركة المركبات عند التقاطعات المختارة في أوقات الذروة، ومن ثم تفرغ البيانات منها مكتيبا. وقد تمت الاستفادة من بعض كاميرات المراقبة المرورية التابعة لغرفة التحكم والسيطرة في إدارة مرور الرياض، والتي تغطي ثمانين تقاطعا هاما في المدينة. وتلك الكاميرات مثبتة في مواقع مرتفعة بجوار التقاطعات مما يتيح مجالا واسعا للرؤية مع إمكانية تصغير الصورة وتكبيرها حسب الرغبة، وهي تعطي أيضا صورة واضحة للحارات المرورية المخططة على مداخل التقاطع. ولكن، مما يعيب هذه الكاميرات أنها غير ملونة، مما قد يعيق، أحيانا وفي بعض التقاطعات، رؤية تحول الإشارة من الضوء الأحمر إلى الضوء الأخضر بشكل واضح، خصوصا في النهار.

ولكن نموذج الانحدار في المعادلة رقم (٩) يفترض حساب الزمن الإجمالي لجمع البيانات لكل دورة (T) بدقة منذ لحظة بدء زمن الأخضر، لذا فقد روعي إجراء تعديل طفيف على نموذج الانحدار بحيث يتم إلغاء المعامل (β_0)، أو الزمن الضائع لبدء الحركة منذ إضاءة الإشارة الخضراء وحتى الوصول لمعدل التدفق المشبع، وذلك بإجبار خط الانحدار على المرور بنقطة الأصل، ليصبح نموذج الانحدار كالتالي:

$$T = \beta_{PC}n_{PC} + \beta_{SLDT}n_{SLDT} + \beta_{LLDT}n_{LLDT} + \beta_T n_T + \beta_{MB}n_{MB} + \beta_B n_B \quad (10)$$

وهذا يتطلب تعديلا مقابلا لأسلوب جمع البيانات بحيث يتم البدء بقياس الزمن (T)، وأيضا حصر أعداد المركبات حسب أنواعها، بعد مرور فترة زمنية لا تقل عن الزمن الضائع لبدء الحركة. وقد توصلت دراسة سابقة أجريت في مدينة الرياض لحساب معدل التدفق المشبع عند التقاطعات، إلى أن أقصى قيمة لمتوسط الزمن الضائع لبدء الحركة منذ إضاءة الإشارة الخضراء وحتى الوصول لمعدل التدفق المشبع كانت ٢,٢٥ ثانية [٦]. لذا، تم في هذه الدراسة اعتماد البدء بقياس الزمن (T) بعد مرور فترة زمنية قدرها ثلاث ثوان من بدء تحرك المركبة الأولى في طابور المركبات المنتظرة عند مدخل التقاطع.

وقد تم جمع البيانات اللازمة للدراسة من سبعة تقاطعات مختارة، وفي أوقات مختارة، روعي في اختيارها عدة معايير هندسية ومرورية تشمل مايلي:

١. عدم وجود عوائق طبيعية (كالجسور) تحد من وضوح تصوير مدخل التقاطع بكاميرات إدارة المرور
٢. تنوع المركبات التي تستخدم التقاطع
٣. تلافي الأوقات التي يتم فيها منع دخول المركبات الثقيلة لبعض الطرق الرئيسية من قبل إدارة المرور (٧:٠٠-٩:٠٠ صباحا و ١٢:٣٠-١٥:٣٠ ظهرا)
٤. وجود حركة مرورية مشبعة مستمرة للأمام عند التقاطع، أي في أوقات ذروة
٥. عدم وجود إعاقات خارجية للحركة عند التقاطع، مثل مواقف السيارات الجانبية
٦. أن يكون التقاطع في منطقة مستوية (بدون أية ميول)
٧. أن يكون عرض الحارة المرورية في مدخل التقاطع مثاليا (٣,٦٥ مترا)

وبعد تحديد التقاطعات المختارة، تم تصوير مدخلين من مداخل كل تقاطع لفترات زمنية متفاوتة، ومن ثم تفرغ بيانات أشرطة الفيديو بطريقة يدوية، مع تكرار عملية التفرغ مرتين على الأقل، للتأكد من صحة تفرغ البيانات.

وتشمل عملية تفرغ البيانات، لكل دورة من دورات الإشارة ولكل مدخل من المداخل المشمولة في الدراسة في التقاطعات المختارة، تسجيل إجمالي الزمن المنقضي بعد مرور ثلاث ثواني من مغادرة المركبة الأولى في الطابور لخط الوقوف، وحتى مغادرة آخر مركبة في طوابير المركبات المنتظرة عند الإشارة الحمراء في الدورة السابقة، أو حتى انتهاء زمن الأخضر للإشارة، أيهما أقل، والذي يرمز له بالرمز (T). وكذلك تسجيل عدد المركبات المغادرة لخط الوقوف خلال هذا الزمن حسب نوعها. ويلخص الجدول رقم (٢) البيانات التي تم جمعها لكل مدخل من المداخل الستة عشر المشمولة في الدراسة.

جدول رقم (٢): التقاطعات المشمولة بالدراسة وملخص البيانات التي تم جمعها

م	اسم التقاطع	الفرع	عدد دورات الإشارة	عدد الحارات المستمرة للأمام	إجمالي عدد المركبات
		الشرقي	٩	٥	٤٥٣
		الغربي	١١	٥	٣٦١
		الشرقي	٨	٣	٣٥٤
		الغربي	١٣	٣	٦١٣
		الشمالي	١٤	٢	١٣٨٣
		الشرقي	٩	٤	٤٦٣
		الشمالي	١٧	٢	٧٢٠
		الشرقي	٤	٤	٢٥٥
		الشمالي	١٣	٤	١٠٤٥
		الجنوبي	٦	٤	١٥٠
		الشرقي	١٢	٢	٥١٦
		الغربي	١٦	٢	٥٩٩
		الجنوبي	٤	٢	١٦٦
		الغربي	٦	٢	٢٢٣
	المجموع		١٤٢	٤٤	٧٣٠١

٥. معايرة النموذج

باستخدام طريقة مربعات الانحرافات الصغرى وتوظيف برنامج ميني-تاب [Minitab] الإحصائي الحاسوبي [٣١]، تم تحليل البيانات التي جمعت وتقدير معاملات نموذج الانحدار (الكامل) كالتالي:

$$T = 0.6128n_{PC} + 0.6541n_{SLDT} + 0.6753n_{LLDT} + 1.0592n_T + 0.6145n_{MB} + 1.0621n_B \quad (11)$$

(17.8) (2.42) (2.35) (3.11) (2.80) (2.82)

$$n = 142, R_{adj}^2 = 0.9731, F = 857.35$$

حيث يظهر من قيمة معامل التحديد (R_{adj}^2) جودة تقدير النموذج، والأرقام التي بين قوسين هي قيم اختبار (t) الإحصائي، والتي تدل قيمة كل منها على أن قيمة معامل الانحدار المقابلة كانت ذات دلالة إحصائية عند مستوى معنوية (α) قدره ٠,٠٥. والجدير بالذكر أن قيم معاملات الانحدار في النموذج ماهي إلا متوسطات التقاطر الزمني لأنواع المركبات المقابلة مقسومة على متوسط عدد الحارات المرورية المستمرة للأمام.

وباستخدام معاملات الانحدار التي تم تقديرها في النموذج أعلاه، يمكن حساب مكافئ سيارات الركاب الصغيرة لكل نوع من أنواع المركبات المختلفة وذلك بقسمة قيمة معامل الانحدار لنوع المركبات المعين على قيمة معامل الانحدار لسيارات الركاب الصغيرة. كما يمكن أيضا حساب متوسط التقاطر الزمني لأنواع المركبات المختلفة وذلك من خلال ضرب قيمة معامل الانحدار في متوسط عدد صفوف المركبات المستمرة للأمام، البالغ ٠٢.٣ حارة مرورية فعلية في هذه الدراسة. ويلخص الجدول رقم (٣) نتائج هذه الحسابات.

جدول رقم (٣) : ملخص نتائج تقدير نموذج الانحدار الكامل (معادلة رقم ١١)

نوع المركبة	رمزها	معامل الانحدار	متوسط التقاطر (ثانية/مركبة)	معدل التدفق المشبع (مركبة/ساعة خضراء)	مكافئ سيارات الركاب الصغيرة
سيارة ركاب صغيرة	PC	٠,٦١٢٨	١,٨٥١	١٩٤٥	١,٠٠
شاحنة خفيفة قصيرة	SLDT	٠,٦٥٤١	١,٩٧٥	١٨٢٣	١,٠٧
شاحنة خفيفة طويلة	LLDT	٠,٦٧٥٣	٢,٠٣٩	١٧٦٦	١,١٠٢
شاحنة ثقيلة	T	١,٠٥٩٢	٣,١٩٩	١١٢٥	١,٧٢٨
حافلة صغيرة	MB	٠,٦١٤٥	١,٨٥٦	١٩٤٠	١,٠٠٣
حافلة كبيرة	B	١,٠٦٢١	٣,٢٠٨	١١٢٢	١,٧٣٣

ويظهر من الجدول أن قيم معاملات الانحدار، وبالتالي مكافئ سيارات الركاب الصغيرة، متقاربة لكل من أزواج المركبات التالية:

١. سيارات الركاب الصغيرة والحافلات الصغيرة

٢. الشاحنات الخفيفة القصيرة والطويلة

٣. الشاحنات الثقيلة والحافلات الكبيرة

لذا فقد تم إجراء عدد من اختبارات الفروض الإحصائية للتحقق من إمكانية تساوي قيم معاملي الانحدار لكل من نوعي المركبات في الحالات الثلاث. ففي الحالة الأولى، على سبيل المثال، تكون فرضية العدم هي (انظر معادلة رقم ١٠):

$$H_0 : \beta_{PC} = \beta_{MB} \quad (أ ١٢)$$

$$H_1 : \beta_{PC} \neq \beta_{MB} \quad (ب ١٢)$$

ويتطلب إجراء الاختبار الإحصائي لهذه الفرضية تقدير نموذج الانحدار الكامل (الأصلي)، كما تم في المعادلة رقم (١١)، ثم اختزال النموذج بدمج مشاهدات عدد سيارات الركاب الصغيرة مع عدد الحافلات الصغيرة في متغير واحد وإعادة تقدير نموذج الانحدار المختزل، حيث وجد أنه يأخذ الصيغة التالية:

$$T = 0.613(n_{PC} + n_{MB}) + 0.6538n_{SLDT} + 0.6746n_{LLDT} + 1.0589n_T + 1.062n_B \quad (١٣)$$

(22.39) (2.47) (2.53) (3.14) (2.84)

$$n = 142, R_{adj}^2 = 0.9733, F = 1036.38$$

ولإجراء الاختبار الإحصائي للفرضية أعلاه يتم استخدام اختبار (F) الإحصائي وذلك من خلال حساب قيمة F* على النحو التالي [٣٢]:

$$F^* = \frac{SSE(R) - SSE(F)}{df_R - df_F} / \frac{SSE(F)}{df_F} \quad (١٤)$$

حيث أن :

$$SSE(R) = \text{مجموع مربعات الأخطاء للنموذج الكامل (معادلة رقم ١١)}$$

$$SSE(F) = \text{مجموع مربعات الأخطاء للنموذج المختزل (معادلة رقم ١٣)}$$

$$df_F = \text{درجات الحرية للنموذج الكامل}$$

$$df_R = \text{درجات الحرية للنموذج المختزل}$$

وبعد حساب قيمة F* يتم مقارنتها مع القيمة النظرية لاختبار F عند حد ثقة $(1-\alpha)$ ، حيث α هو مستوى المعنوية، وعند درجتي حرية $(df_R - df_F)$ و (df_F) . أي بالنسبة للحالة التي نحن بصدد دراستها تكون قيمة F النظرية [٣٢]:

$$F_{(1-\alpha), 1, n-6} = F_{0.95, 1, 136} = 3.84$$

وعندما تكون قيمة F* المحسوبة أكبر من القيمة النظرية (أي ٣,٨٤) فيجب رفض فرضية العدم (H_0)، التي تقول بأن معاملي الانحدار متساويين. وعند إجراء اختبار الفروض للحالات الثلاث (أي $\beta_{PC} = \beta_{MB}$ ، و $\beta_{SLDT} = \beta_{LLDT}$ ، و $\beta_T = \beta_B$) ظهر أن قيمة F* المحسوبة أصغر من قيمتها النظرية لكل من تلك الحالات، وبالتالي تم قبول فروض العدم لها كلها.

وبذلك يصبح نموذج الانحدار النهائي بالصيغة التالية:

$$T = 0.6129(n_{PC} + n_{MB}) + 0.664(n_{SLDT} + n_{LLDT}) + 1.0603(n_T + n_B) \quad (١٥)$$

(22.62) (4.28) (3.92)

$$n = 142, R_{adj}^2 = 0.9737, F = 1752.49$$

ويلخص الجدول رقم (٤) نتائج تقدير نموذج الانحدار المختزل والنهائي. ويظهر من النتائج أنه لا يوجد تأثير سلبي لوجود الحافلات الصغيرة في حركة المرور على سعة التقاطع. والجدير بالذكر أن معظم الحافلات الصغيرة التي تسير على شوارع مدينة الرياض هي من حافلات النقل شبه العام (Paratransit)، أو ما يعرف محليا باسم الحافلات الأهلية، والتي يمتلكها أفراد ويقومون بتشغيلها بأنفسهم [٣٣]. وهي تقوم بدور كبير في توفير خدمة النقل العام في

المدينة، إذ تساهم بنقل مانسبته ٨٠% من حجم الإركاب اليومي للنقل العام، مقابل ٢٠% لحافلات الشركة السعودية للنقل الجماعي. ويعود سبب الإقبال عليها إلى سرعة خدمتها وتقاطرها الجيد، الذي يصل إلى حوالي خمس دقائق، مقارنة بـ ١٨ دقيقة لحافلات النقل العام. إلا أنه يؤخذ على سائقها التهور وعدم الاهتمام بجوانب السلامة ورعونة القيادة الملحوظة التي يبدو أنها في سعيهم لتقليل أزمان رحلاتهم، وبالتالي زيادة أعداد الرحلات ذات الدخل وتحقيق عائد مالي إضافي [٣٤]. وبالتالي، فليس من المستغرب أن تكون قيمة مكافئ سيارات الركاب الصغيرة للحافلات الصغيرة (الأهلية) مساوية للواحد الصحيح.

جدول رقم (٤) : ملخص نتائج تقدير نموذج الانحدار المختزل (معادلة رقم ١٥)

نوع المركبة	رمزها	معامل الانحدار	متوسط التقاطر (ثانية/مركبة/حارة)	معدل التدفق المشبع (مركبة/ساعة)	مكافئ سيارات الركاب الصغيرة
سيارة ركاب صغيرة	PC				
حافلة صغيرة	MB				
شاحنة خفيفة قصيرة	SLDT				
شاحنة خفيفة طويلة	LLDT				
شاحنة ثقيلة	T				
حافلة كبيرة	B				

من جانب آخر، يقدر دليل سعة الطرق (الأمريكي)، في الظروف الهندسية والتشغيلية المثالية للتقاطعات المزودة بإشارات ضوئية، معدل التدفق المشبع للحارة الواحدة بـ ١٩٠٠ سيارة ركاب صغيرة لكل ساعة خضراء كاملة للإشارة لكل حارة مرورية [٢١]. في حين يشير الدليل الكندي لسعة التقاطعات أن قيمة معدل التدفق المشبع المشاهدة في مدينة تورونتو تتراوح بين ١٨٧٠ و ١٩٥٠ سيارة ركاب صغيرة لكل ساعة خضراء كاملة للإشارة لكل حارة مرورية [٢٢]. وعلى ذلك يبدو أن معدل التدفق المشبع الذي تم التوصل إليه في هذه الدراسة، وهو ١٩٤٥ سيارة ركاب صغيرة لكل ساعة خضراء كاملة للإشارة لكل حارة مرورية مخططة واحدة، يتفق مع تلك القيم التي يقترحها الدليلان الأمريكي والكندي.

كما بينت نتائج هذه الدراسة أن الشاحنة الثقيلة و الحافلة الكبيرة تكافئ ١,٧٣ سيارة ركاب صغيرة. وبمقارنة هذه القيمة مع نظيراتها في بعض الدول الأخرى، يظهر أنها أقل من القيمة ٢,٠٠، التي اعتمدها الطبقات الثلاث الأخيرة للدليل سعة الطرق، للأعوام ١٩٩٤م، ١٩٩٧م، و ٢٠٠٠م [٢١-١٩]، وأكبر من القيمة ٥٠.١ التي اعتمدها الطبعة الثالثة للدليل نفسه، لعام ١٩٨٥م [١٨].

أما الدليل الكندي لسعة التقاطعات فيعطي ثلاث قيم مختلفة للمكافئ للشاحنات حسب نوعها (١,٥ للشاحنة المفردة، و ٢,٥ للشاحنة ذات المقطورات والحمولة غير الثقيلة، و ٣,٥ للشاحنة ذات المقطورات والحمولة الثقيلة) وقيمة ١,٧٥ للحافلات [٢٢]. ومن الواضح أن قيمة المكافئ للحافلات تتفق مع نتائج هذه الدراسة، أما

بالنسبة لمكافئ الشاحنات فلا يمكن إجراء المقارنة لعدم توفر تصنيف للشاحنات الثقيلة في هذه الدراسة. إلا أنه من واقع الملاحظة الشخصية أثناء جمع البيانات فإن نسبة الشاحنات ذات المقطورات (النوعين الثاني والثالث) كانت نسبياً متدنية.

وبالنسبة لقيم مكافئ سيارات الركاب الصغيرة لمختلف أنواع المركبات الموصى باستخدامها لتصميم التقاطعات في المملكة المتحدة، فقد سبقت الإشارة إلى أنها تأخذ القيم التالية: ١,٥ للمركبة التجارية المتوسطة (لها محورين وأربع إطارات أو أقل)، و ٢,٣ للمركبة التجارية الثقيلة (لها أكثر من محورين) و ٢,٠ للحافلة [١٥]. وبمقارنة ذلك بنتائج هذه الدراسة يظهر أن مكافئ الحافلة في بريطانيا أكبر منه للقيمة المقدرة هنا. أما بالنسبة للمركبات التجارية فيظهر أن قيم المكافئ المطبقة في بريطانيا قريبة جداً لقيمتي نوعي الشاحنات الأولين في الدليل الكندي لسعة التقاطعات، المعروضة أعلاه، وبالتالي ينطبق عليهما ما سبق قوله من تعذر مقارنتها مع نتائج هذه الدراسة.

ومن النتائج التي توصلت إليها هذه الدراسة أن الشاحنة الخفيفة الواحدة، سواء القصيرة أو الطويلة، تكافئ ١,٠٧ سيارة ركاب صغيرة. وهذه القيمة قريبة من الواحد الصحيح الذي يعتمد عليه دليل سعة الطرق [٢١] والدليل الكندي لسعة التقاطعات [٢٢]، حيث أنهما يصنفان الشاحنات الخفيفة على أنها سيارات ركاب صغيرة. من جهة أخرى تعد الدراسة رقم [١٣]، والتي أجريت في ولاية تكساس الأمريكية، هي الدراسة الوحيدة، من بين الدراسات السابقة، التي حاولت تقدير تأثير الشاحنات الخفيفة على سعة التقاطعات المزودة بإشارات ضوئية. وقد سبقت الإشارة إلى أنها توصلت إلى أن مكافئ سيارات الركاب الصغيرة للمركبات الرياضية-الخدمية القصيرة والطويلة هو ١,٠٧ و ١,٤١، على التوالي، وللجان الصغيرة ١,٣٤، و ١,١٤ للوانيت. وبالرغم من التساوي الظاهري لقيمة المكافئ للمركبات الرياضية-الخدمية القصيرة مع قيمة المكافئ المقدرة في هذه الورقة للشاحنة الخفيفة القصيرة، إلا أن الواقع هو اختلاف جميع تلك القيم للمكافئ عن القيمة المقدرة في هذه الورقة، حيث أن تصنيف الشاحنة الخفيفة القصيرة في هذه الدراسة يشمل، بالإضافة للمركبات الرياضية-الخدمية القصيرة، مركبات الفان والوانيت القصيرة.

وبناء على النتائج التي تم التوصل إليها، يمكن حساب عامل تصحيح سعة التقاطع لنوع المركبات (f_{vt}) باستخدام المعادلة:

$$f_{vt} = \frac{1}{[1 + P_{HV} (E_{HV} - 1) + P_{LDT} (E_{LDT} - 1)]} \quad (16)$$

حيث أن:

$$P_{HV} = \text{نسبة الشاحنات الثقيلة والحافلات الكبيرة}$$

$$P_{LDT} = \text{نسبة الشاحنات الخفيفة (القصيرة والطويلة)}$$

$$E_{HV} = \text{مكافئ سيارة الركاب الصغيرة للشاحنات الثقيلة والحافلات الكبيرة} = ١,٧٣$$

$$E_{LDT} = \text{مكافئ سيارة الركاب الصغيرة للشاحنات الخفيفة} = ١,٠٧$$

وعلى سبيل المثال، باستخدام نسب توزيع أنواع المركبات للعينة التي تم جمعها في هذه الدراسة (١٣,٨% شاحنات خفيفة، و ٣,٥% شاحنات ثقيلة، و ٢,٣% حافلات صغيرة، و ١,٦% حافلات كبيرة والباقي سيارات ركاب صغيرة)، وتطبيق المعادلة رقم (١٦)، تكون قيمة عامل تصحيح نوع المركبة هي ٠,٩٥٥. ويتبين من ذلك أن متوسط انخفاض معدل التدفق التشيع للحركة المستمرة للأمام في التقاطعات المزودة بإشارات ضوئية، بسبب وجود

مركبات أخرى غير سيارات الركاب الصغيرة، هو حوالي ٤,٥٥%، أي أن معدل التدفق المشبع الفعلي يقدر بحوالي ١٨١٥ مركبة/ساعة خضراء كاملة للإشارة/حارة مرورية مخططة.

٦. الاستنتاجات والتوصيات

بناء على النتائج التي تم التوصل إليها في هذه الورقة، يمكن الخروج بالاستنتاجات التالية:

- تبين من مراجعة الدراسات السابقة أن الأساليب الميدانية المستخدمة لتقدير مكافئ سيارات الركاب الصغيرة، لأنواع المختلفة من المركبات، مبنية على أن جمع البيانات يتم لكل حارة مرورية واحدة على حدة، حيث تكون المركبات منتظمة في الحارات المرورية المخططة على رصافية مدخل التقاطع. وهذا على خلاف ما هو مشاهد في معظم التقاطعات في مدينة الرياض، بسبب عدم التزام السائقين بالحارات المرورية المخططة. لذا، وجد أنه لا يمكن استخدام تلك الأساليب مباشرة، خصوصا طريقة نسبة التقاطر الزمني الشائعة الاستخدام. ولتغلب على هذه المشكلة لابد من اعتبار جميع المركبات المستمرة للأمام في مدخل التقاطع بأكمله، أي عدم الاقتصار على حارة مرورية واحدة.
- قامت الدراسة بتطبيق أسلوب تحليل الانحدار الخطي المتعدد، المستخدم في بعض الدراسات السابقة، بعد تحويله ليغطي المدخل بأكمله كي يتوافق مع سلوك السائقين. وذلك بأن يتم اعتبار جميع الحارات المرورية التي تستخدمها المركبات المتجهة للأمام فقط، واستبعاد الحارات المرورية التي بها حركات انعطاف، سواء كانت مخصصة أو مشتركة.
- نظرا لأن تركيز مثل هذا النوع من الدراسات على حركة المركبات المستمرة للأمام، والتي تشغل عادة أكثر من حارة مرورية واحدة، فإن ذلك يشكل صعوبة في جمع البيانات المطلوبة من خلال المسح الميداني اليدوي المباشر، وذلك بسبب سلوك السائقين من حيث عدم تقديمهم بالحارات المرورية المخططة على الطريق مما لا يتيح تسجيل البيانات بدقة. لذا فلا بد من استخدام التصوير بالفيديو لتسجيل حركة المركبات عند التقاطعات ومن ثم تفريغ البيانات منها مكنيا.
- بعد جمع بيانات ١٤٢ دورة إشارة مرورية، في ١١ تقاطعا بمدينة الرياض، تم تقدير نموذج انحدار يشمل ستة أصناف من المركبات المتواجدة في حركة المرور، وهي سيارات الركاب الصغيرة، والشاحنات الخفيفة القصيرة (التي لا يزيد طولها عن خمسة أمتار)، والشاحنات الخفيفة الطويلة (التي يتجاوز طولها خمسة أمتار)، والحافلات الصغيرة (مثل حافلات تويوتا-كوستر، ٢٥ مقعد)، والحافلات الكبيرة والشاحنات الثقيلة. وبعد إجراء بعض الاختبارات الإحصائية تم دمج الأصناف الستة للمركبات في ثلاثة فقط: سيارة ركاب صغيرة، شاحنات خفيفة ومركبات ثقيلة، وتقدير نموذج انحدار خطي لها.
- تبين أن معدل التدفق المشبع الذي تم التوصل إليه في هذه الدراسة، وهو ١٩٤٥ سيارة ركاب صغيرة لكل ساعة خضراء كاملة للإشارة لكل حارة مرورية مخططة واحدة في مدخل التقاطع، يتفق مع تلك القيم التي يقترحها دليل سعة الطرق (الأمريكي) والدليل الكندي لسعة التقاطعات.
- ظهر من النتائج أنه لا يوجد تأثير سلبى لوجود الحافلات الصغيرة في حركة المرور على سعة التقاطع، إذ تبين أن الحافلة الصغيرة تكافئ سيارة ركاب صغيرة واحدة. ويبدو أن ذلك يعود إلى أن معظم الحافلات الصغيرة المشمولة في الدراسة هي من الحافلات الأهلية، التي يؤخذ على سائقيها السرعة والتهور ورعونة القيادة.

- بينت النتائج أن الشاحنة الثقيلة و الحافلة الكبيرة (المركبات الثقيلة) تكافئ ٧٣.١ سيارة ركاب صغيرة. ويظهر أن هذه القيمة محصورة بين القيمة ٢,٠٠، التي اعتمدها الطبعة الرابعة لدليل سعة الطرق (٢٠٠٠م)، والقيمة ١,٥٠ التي اعتمدها الطبعة الثالثة للدليل نفسه (١٩٨٥م). كما أن الدليل الكندي لسعة التقاطعات يوصي بقيمة ١,٧٥ للحافلات الكبيرة.
- بينت الدراسة أن الشاحنة الخفيفة الواحدة، سواء القصيرة أو الطويلة، تكافئ ١,٠٧ سيارة ركاب صغيرة، مما يتطلب أخذها بالاعتبار عند تحليل سعة التقاطعات. وهذا يخالف الأسلوب المعتمد في دليل سعة الطرق والدليل الكندي لسعة التقاطعات للتعامل مع الشاحنات الخفيفة، حيث أنهما يصنفانها على أنها سيارات ركاب صغيرة.

وبناء على تلك الاستنتاجات يمكن الخروج بالتوصيات التالية:

- ضرورة الأخذ بالاعتبار أن الشاحنة الخفيفة تختلف عن سيارة الركاب الصغيرة من حيث تأثيرها على سعة التقاطعات المزودة بإشارات ضوئية.
- اعتماد قيم مكافئ سيارات الركاب الصغيرة التالية: ١,٠٠ لسيارة الركاب الصغيرة، ١,٠٠ للحافلة الصغيرة (الأهلية، ٢٥ مقعد)، ١,٠٧ للشاحنة الخفيفة و ١,٧٣ للمركبة الثقيلة (شاحنة ثقيلة أو حافلة كبيرة)، وذلك عند تقدير عامل تصحيح نوع المركبة في تحليل سعة التقاطعات، على الأقل في مدينة الرياض.
- ضرورة توعية وتنقيف السائقين بالالتزام بالحوارات المرورية المخططة على مداخل التقاطعات والتشدد في فرض الأنظمة المرورية.

وختاماً فإن هذه الورقة توصي بإجراء عدد من الدراسات التكميلية المرتبطة بموضوع هذه الدراسة، مثل:

- دراسة لتقدير عوامل تصحيح سعة التقاطعات بسبب العوامل المرورية الأخرى مثل حركات الانعطاف، خصوصاً حركات الدوران (U-turn) عند التقاطعات.
- دراسة تأثير تظليل زجاج المركبات، من حيث حجبتها للرؤية غيرها، على سعة التقاطعات
- دراسة تأثير مواقع تثبيت أعمدة الإشارات، في الجانب القريب أو البعيد من مدخل التقاطع، على سعة التقاطعات.
- إجراء دراسة لتقدير تأثير نوع المركبة على سعة الطرق (بدون تقاطعات).

شكر وتقدير: يتقدم المؤلف بالشكر لإدارة مرور الرياض على تعاونها والسماح باستخدام كاميرات غرفة التحكم والسيطرة، الموجودة في قسم مرور الناصرية، لجمع بيانات هذه الدراسة، كما يتقدم بالشكر للمهندس/نايف عزيز العتيبي على مساعدته في جمع وتفريغ البيانات.

٧. المراجع

1. Thagesen, Bent (Editor). Highway and Traffic Engineering in Developing Countries. Chapman & Hall, London, UK, First Edition, 1996.
2. Molina, C. J. Development of passenger car equivalencies for large trucks at signalized intersections. ITE Journal, November 1987.

٣. القاضي، سعد عبدالرحمن وعلي سعيد الغامدي وحسين صالح الخربوش. تحديد ومقارنة مستوى جودة الخدمة المرورية في المدن السعودية الكبرى باستخدام نموذج المائعين. مجلة جامعة الملك سعود [العلوم الهندسية]، المجلد ١٣، العدد ٢، ٢٠٠١م.
٤. الخربوش، حسين صالح. تحديد مستوى الخدمة المرورية في المدن السعودية الكبرى باستخدام نموذج المائعين. رسالة ماجستير، قسم الهندسة المدنية، كلية الهندسة، جامعة الملك سعود، الرياض، المملكة العربية السعودية، أكتوبر ١٩٩٩م.
٥. القاضي، سعد عبدالرحمن وحسين صالح الخربوش. تحديد مستوى جودة الخدمة المرورية في مدينة جدة باستخدام نموذج المائعين. سجل ندوة تخطيط وتنظيم النقل والمرور لمدن وقرى منطقة مكة المكرمة، جدة، المملكة العربية السعودية، ص ص ٢٣٣-٢٥٥، ١٩٩٩م.
6. Osseil, Abdulrahman Rashed. Effect of drivers' behavior on intersection saturation flow rate in Riyadh. Graduation Report CE 14/15-II-05-01, Civil Engineering Department, College of Engineering, King Saud University, Riyadh, Saudi Arabia, 1994.
 7. Al-Shiha, Mohammed A. Evaluation and optimization of traffic signal control at diamond interchanges in Arriyadh. M.Sc. thesis, Civil Engineering Department, College of Engineering, King Saud University, Riyadh, Saudi Arabia, 1997.
 8. Webster, F. V. A controlled experiment on the capacity of junctions with traffic signals. Road Research Lab. Res. Note No. RN/3313/FVW. BR587, 1958.
 9. Webster, F. V. and B. M. Cobbe. Traffic Signals. Road Research Technical Paper No. 56, HMSO, London, 1966.
 10. Branston, D. and H. Van Zuylen. The estimation of saturation flow, effective green time and passenger car equivalents at traffic signals by multiple linear regression. Transportation Research 12, 47-53, 1978.
 11. Branston, D. and P. Gipps, "Some experience with a multiple linear regression method of estimating parameter of the traffic signal departure process. Transportation Research 15, 445-458, 1981.
 12. Branston, D. Some factors affecting the capacity of signalized intersections. Traffic Engineering and Control, 20 (8/9), 390-396, 1979.
 13. Kockelman, Kara M. and Raheel A. Shabih. Effect of light-duty trucks on the capacity of signalized intersection. J. Transportation Engineering, ASCE, V. 126, No. 6, pp. 506-512, NOV/DEC 2000.
 14. Greenshields, B. D., D. Shapiro and E. L. Erickson. Traffic performance at urban intersection. Bureau of Highway Traffic, Technical Report No. 1, Yale University, New Haven, Conn., USA, 1947.
 15. Salter, R. J. and N. B. Hovnsell. Highway Traffic Analysis and Design. Third Edition. Macmillan Press Ltd., 1996.

16. Evans, L., and R. Rothery. Influence of vehicles size and performance on intersection saturation flow. Proceedings of the Eighth International Symposium on Transportation and Traffic Theory, 1981.
 17. Tsao, S. and S. Chu. Adjustment factors for heavy vehicles at signalized intersections. J. Transportation Engineering, ASCE, 121 (2), 150-157, 1995.
 18. Transportation Research Board. Highway Capacity Manual. National Research Council, Special Report 209, 2nd edition, Washington, D.C., 1985.
 19. Transportation Research Board. Highway Capacity Manual. National Research Council, Special Report 209, 3rd edition, Washington, D.C., 1994.
 20. Transportation Research Board. Highway Capacity Manual. National Research Council, Special Report 209, 3rd edition, Washington, D.C., 1997.
 21. Transportation Research Board. Highway Capacity Manual. National Research Council, Special Report 209, 4th edition, Washington, D.C., 2000.
 22. Teply, S. et al. Canadian Capacity Guide for Signalized Intersections. ITE - District 7: Canada, second edition, June 1995.
 23. Keller, E. L. and J. G. Saklas. Passenger car equivalents from network simulation. J. Transportation Engineering, ASCE, 110 (4), 397-411 July 1984.
 24. Sumner R., D. Hill and S. Shapiro. Segment passenger car equivalent values for cost allocation on urban arterial roads. Transportation Research A 18, 399-406, 1984.
 25. Kimber, R. M. et al. Passenger car units in saturation flows: concept, definition, derivation. Transportation Research B 19, 39-61, 1985.
 26. Benehohal, R. F. and W Zhao. Delay-based passenger car equivalents for trucks at signalized intersections. Transportation Research A 34, 437-457, 2000.
 27. Miller, A. J. The capacity of signalized intersections in Australia. Bull. No. 3, Australian Road Research Board, 1968.
 28. Steuart, G. N., and B. Y. Shin. The effect of small cars on the capacity of signalized intersections. Transportation Science 12 (3), 250-263, 1978.
 29. Sosin, J. A. Delays at intersections controlled by fixed-cycle traffic signals. Traffic Engineering and Control, 21 (8/9), 407-413, 1980.
 30. Intertec publishing Corp. Ward's automotive yearbook, 1998.
 31. Minitab Statistical Software. Release 2.12, 1997.
 32. Neter, J. et al. Applied Linear Statistical Models. Irwin Inc., Third Edition, 1990.
٣٣. الحسون، عبدالعزيز إبراهيم. الحافلات الأهلية ودورها في نقل الركاب بالمدن الرئيسية. سجل أوراق ندوة النقل العام بالحافلات وخدمة المجتمع، وزارة المواصلات، الرياض، ص ص ٤٧٧-٤٩١، ١٩٩٨
34. AlGadhi, Saad A. H. Evaluation of performance of Riyadh urban public transportation services. Transportation Research Record 1433, pp. 10-15, 1993.

Effect of Vehicle Type on the Capacity of Signalized Intersections

Saad A. H. AlGadhi

Associate Professor, Civil Engineering Department, College of Engineering,
King Saud University, P. O. Box 800, Riyadh 11421, Saudi Arabia

Abstract

Drivers in Riyadh tend to disregard lane markings and use every available meter of signalized intersections approach width. Thus, actual vehicles queues usually exceed marked lanes. This paper analyzes the effect of this behavior on signalized intersection capacity by estimating the passenger car equivalent (PCE) for six different types of vehicles under these prevailing conditions. Multiple linear regression analysis was employed by considering all the through lanes in the approach as the unit of analysis; unlike the traditional treatment of a lane by lane basis, when lane discipline is enforced. Data were collected from 11 intersections in Riyadh by videotaping through the remote monitoring cameras of the Riyadh traffic control center. The study resulted in some useful findings for signalized intersections capacity analysis. The saturation flow rate is estimated to be 1945 passenger cars per hour of green per marked lane. The results revealed that the minibus (e.g., 25-seat Toyota Coaster) and the passenger car time headways are equal, and thus have the same effect on intersection capacity. It is believed that this is due to the observed reckless driving of minibus drivers. The study also found that the heavy truck and the standard bus have the same PCE of 1.73, while the PCE of light duty trucks is 1.07.