

النمذجة والمحاكاة الكلية لحركة المركبات في الحج خلال الإفاضة من عرفات

سعد عبدالرحمن القاضي

قسم الهندسة المدنية، جامعة الملك سعود،

ص.ب. ٨٠٠ الرياض ١١٤٢١، المملكة العربية السعودية

المستخلص. إن حركة المركبات الكثيفة أثناء إفاضة الحج من عرفات إلى مزدلفة، مع غروب شمس اليوم التاسع من شهر ذي الحجة من كل عام، لا مثيل لها عالمياً. والهدف من هذه الدراسة هو نمذجة الحركة المرورية على الشبكة الداخلية لطرق وشوارع عرفات والطرق التي تربطها بمزدلفة، وذلك أثناء الإفاضة، من خلال استخدام نموذج محاكاة كلي ومعايرته بناء على قياسات ميدانية. وقد تم في هذه الدراسة استخدام النماذج الساكنة لتخصيص الحركة المرورية على شبكة الطرق (نماذج الاتزان لمستخدمي الشبكة) وذلك من خلال توظيف برنامج ترانزكاد [١٩]، بعد معايرته على الظروف الفعلية لاستخدامات الأراضي وتوزيع الحجاج عليها، وشبكة الطرق وحركة المركبات فوقها أثناء حج عام ١٤١٥هـ. كما تم توظيف النموذج الكلي المعايير لاختبار تأثير تطبيق استراتيجية تخصيص الطريق رقم (٩) (٤ حارات) الموصل بين عرفات ومزدلفة لحركة الحافلات الترددية على حركة المركبات الأخرى في بقية الطرق. كما احتوت الورقة على مقارنة لنتائج هذا التطبيق للنموذج الكلي مع نتائج تطبيق النموذج الجزئي للحالة ذاتها، وتوصلت إلى تفضيل أسلوب النمذجة والمحاكاة الجزئية لهذه الحالة الدراسية.

مقدمة

يعد الحج إلى بيت الله الحرام أكبر تجمع بشري سنوي يتم في حيز محدد مكاناً وزماناً. ففي عام ١٤١٥هـ، على سبيل المثال، بلغ إجمالي عدد الحجاج حوالي ٢,٥ مليون حاج، وقد ١,٠٤١ مليون منهم من خارج المملكة العربية السعودية^[١]. كما أن إفاضة الحجاج من عرفات إلى مزدلفة، مع غروب شمس اليوم التاسع من شهر ذي الحجة من كل عام، لا مثيل لها عالمياً، من حيث كثافة الحركة المرورية. إذ ينتقل الحجاج بين المشعرين، مستخدمين أكثر من ٦٦ ألف رحلة-مركبة، على تسع طرق مباشرة يبلغ مجموع حرارتها المرورية ٢٥ حارة، منها ٢٢ حارة متجهة إلى مزدلفة والحرارات الثلاث الباقية مخصصة لعودة بعض المركبات مرة أخرى لعرفات، هذا بالإضافة إلى طريقتين إقليميين سريعين يمران بمحاذاة المشاعر من جهتي الشمال (طريق الطائف-السييل-مكة المكرمة) والجنوب (طريق الطائف-الكر-مكة المكرمة) بست حرارات في الاتجاهين لكل منهما. وبالرغم من ضخامة المعروض من حرارات الطرق بين المشعرين، لخدمة حركة المركبات أثناء الإفاضة، إلا أن الحجاج يعانون معاناة شديدة بسبب الازدحام الشديد وما ينتج عنه من تأخير، سواء داخل شبكة شوارع عرفات أو على الطرق المؤدية إلى مزدلفة. وتشير إحدى الدراسات الميدانية إلى أن زمن الرحلة لقطع المسافة بين المشعرين وطولها ٨ كيلومترات - كان في المتوسط ١٩٥ دقيقة^[٢].

وتهدف هذه الدراسة لنمذجة الحركة المرورية على الشبكة الداخلية لطرق وشوارع عرفات والطرق التي تربط عرفات بمزدلفة، وذلك أثناء الإفاضة من عرفات إلى مزدلفة في الحج، باستخدام نموذج محاكاة كلي (Macroscopic) ومعايرته بناء على قياسات ميدانية، من أجل توفير أداة فعالة لاختبار مختلف بدائل تصميم وإدارة نظام الحركة المرورية في الإفاضة. ويعطي الجزء التالي من الورقة خلفية موجزة عن النمذجة الكلية لحركة المرور بما في ذلك برنامج النمذجة الكلية المستخدم في هذه الدراسة (ترانزكاد TransCAD) أما الجزء الثالث فيعرض أسلوب ونتائج معايرة معلمات البرنامج على الظروف الخاصة بالإفاضة، في حين يبين الجزء الرابع تطبيق النموذج المعيار لاختبار تأثير

تطبيق استراتيجية تخصيص بعض الطرق الواصلة بين عرفات ومزدلفة لحركة الحافلات الترددية على حركة المركبات الأخرى في بقية الطرق. كما يشتمل هذا الجزء أيضا على مقارنة بين النتائج التي تم التوصل إليها من خلال النموذج الكلي مع تلك التي أعطاها نموذج المحاكاة الجزئي (إيمسن ٢ AIMSUN2) والمعروضة في دراسة سابقة^[٣]. ويختتم الجزء الخامس الورقة بالاستنتاجات والتوصيات.

٢ - وصف النموذج المروري الكلي

تعد النمذجة الرياضية لسلوك الحركة المرورية مطلباً سابقاً للعديد من الأنشطة الهامة بما في ذلك تخطيط النقل، ومراقبة حركة المرور، واستشعار وتحسس وقوع الحوادث، والتصميم المنظم لاستراتيجيات التحكم المروري، والمحاكاة، والتنبؤ، وأخيراً وليس آخراً، استخدامها حديثاً في تقويم استهلاك الطاقة من قبل أنظمة النقل والتأثيرات البيئية لها وتقويم أنظمة توجيه وإرشاد المركبات في أنظمة النقل الذكي^[٤]. ومن المنهجيات الرئيسة المقترحة لنمذجة الحركة المرورية منهجيتان اثنتان هما الأكثر شيوعاً، الأولى هي النمذجة الجزئية (Microscopic) أما الأخرى فهي النمذجة الكلية (Macroscopic). ويتم في النمذجة الجزئية تمثيل المركبات المكونة للحركة المرورية، كلاً على حدة، مع أخذ التفاعل بين المركبات بالاعتبار من خلال توظيف نماذج رياضية لتتابع المركبات في حارة مرورية واحدة ولقيام المركبة بتغيير مسارها من حارة مرورية لأخرى. وقد تم توظيف الأسلوب الجزئي لنمذجة المركبات أثناء إفاضة الحج في دراسة سابقة^[٣]. أما في النمذجة الكلية فيتم اعتبار مجموع الحركة المرورية كوحدة واحدة متجمعة، مثل المائع، الذي لا يتم اعتبار الجزيئات المكونة له، أي المركبات، كلاً على انفراد.

ويوجد صنفان رئيسان للنماذج الكلية هي النماذج الهيدروديناميكية للحركة المرورية الكلية والنماذج الساكنة لتخصيص الحركة المرورية على شبكة الطرق. والنماذج الكلية التي تعطي رؤية ديناميكية لسلوك الحركة المرورية مبنية على التناظر مع حركة الموائع التي يمكن وصف حالتها من خلال متغيرات تجميعية كلية مثل كثافة المرور

(مركبة/كلم) وحجم المرور (مركبة/ ساعة) والسرعة المتوسطة (كلم/ ساعة). وقد بدأت هذه النماذج عندما نشر لايتهيل ووتام (Lighthill and Whitham) ورقتهما المشهورة التي تصف التحول الديناميكي للمتغيرات الكلية على الطرق بمعادلة تفاضلية جزئية، تعكس قانون حفظ المركبات، بالإضافة إلى علاقة ساكنة بين حجم وكثافة المرور، والتي تعرف بشكل واسع بالعلاقة الأساسية في هندسة المرور^[٥]. وقد جرى لهذا الأسلوب تطوير من قبل عدد من الباحثين من خلال إحلال العلاقة الأساسية الساكنة بمعادلة تفاضلية جزئية أخرى واقتراح حل عددي لهذه المعادلات التفاضلية الجزئية^[٦-١١]. وهناك عدد من البرامج الحاسوبية التي تستخدم هذا الأسلوب^[١١-١٣].

أما نماذج تخصيص الحركة المرورية فتعطي صورة ساكنة لمتوسط توزيع أحجام الحركة المرورية على وصلات شبكة الطرق، التي تغطي المساحة الجغرافية لمنطقة الدراسة، وذلك باستخدام نماذج رياضية غير خطية للحركة على شبكة الطرق، التي يتم تمثيلها كمخطط شبكي مكون من مجموعة من الوصلات والعقد. ويتطلب ذلك معرفة أنماط الطلب المروري على منطقة الدراسة من حيث مصفوفة مصادر ومقاصد الرحلات ونمذجة تأثير الازدحام على توزيع الحركة المرورية من خلال دوال رياضية معينة (دالة أداء الوصلة).

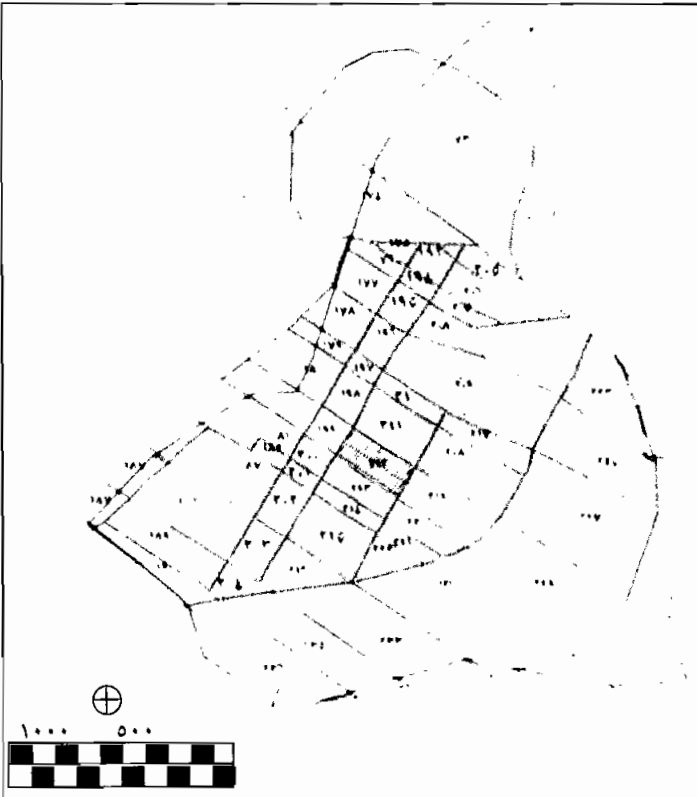
وتعد نماذج الاتزان لمستخدمي شبكة الطرق (User Equilibrium)^[١٤] أكثر نماذج تخصيص الحركة المرورية استخداماً، وهي نماذج رياضية تهدف للتنبؤ بأحجام حركة المرور على وصلات الشبكة وأزمان الانتقال التي تنتج من طريقة اختيار المستخدمين لمساراتهم عبر الشبكة من نقاط انطلاقهم (المصادر) إلى أهدافهم (المقاصد)^[١٥]. وبالتالي فإن النماذج الساكنة لتخصيص حركة المرور المبنية على نظرية اتزان المستخدم، سواء ثابتة أو متغيرة الطلب، أو الاحتمالية، قد وجدت لها تطبيقات في أنظمة الحزم الحاسوبية مثل برنامج محاكاة وتخصيص المرور على شبكات الطرق الحضرية المعروف اختصاراً باسم ساتورن (SATURN)^[١٦]، وبرنامج نموذج الاتزان، أو إي إم ٢ (EMME/2)^[١٧]، وبرنامج تخطيط النقل، أو ترانبلان (TRANPLAN)^[١٨]، وبرنامج

تخطيط النقل باستخدام نظم المعلومات الجغرافية، أو ترانزكاد (TransCAD)^[١٩]، وغيرها من البرامج التي يمكن معرفة المزيد عنها في المرجع^[٢٠].

وقد تم في هذه الدراسة استخدام النماذج الساكنة لتخصيص الحركة المرورية على شبكة الطرق وذلك من خلال توظيف برنامج ترانزكاد^[١٩]، بعد معايرته، والذي يعد من أحدث أنظمة إدارة وتحليل بيانات النقل، وهو برنامج يجمع بين نظم المعلومات الجغرافية والنماذج الرياضية للنمذجة الكلية لشبكات النقل. ويصف الجزء التالي من الورقة معايرة برنامج ترانزكاد على شبكة شوارع عرفات والطرق التي تصلها بمزدلفة.

٣ - معايرة النموذج

تم تقسيم مشعر عرفات (١٥٤، ١ هكتار) إلى ٥٦ منطقة تحليل مرورية، وهي



مساحات مخصصة للإيواء والخدمات، وبالتالي فهي أماكن لتوليد رحلات المركبات المتجهة إلى مزدلفة من عرفات. واعتمد في التقسيم على شكل شبكة الطرق بحيث تكون كل منطقة مرورية رباعية الشكل تقريباً، وتحيط بها الطرق التي تفصلها عن المناطق المرورية الأخرى. وقد

شكل (١) مراكز تولد الرحلات والوصلات الافتراضية لشبكة طرق عرفات

افتراض أن لكل منطقة مرورية مركز تولد للرحلات متصل بشبكة الطرق عن طريق وصلات وهمية (شكل رقم ١). وبالرجوع إلى وزارة الحج، أمكن الحصول على التوزيع الجغرافي للحجاج في مشعر عرفات [٢١]، وبالتالي تقدير عدد رحلات المركبات المتولدة من كل منطقة مرورية، وذلك بعد استبعاد الحجاج المشاة، وأيضاً تحويل رحلات الأفراد إلى رحلات مركبات باستخدام معدلات الإشغال المناسبة حسب نوع المركبة.

وتألف شبكة طرق المركبات بعرفات من طرق طولية باتجاه الشرق والغرب، وطرق عرضية باتجاه الشمال والجنوب، وهذه الطرق تقسم مشعر عرفات إلى مساحات رباعية الشكل. ويحيط بمشعر عرفات طريق عرفات الدائري، وطريق عرفات الدائري الأوسط لربط الطرق الطولية ببعضها وتسهيل الانتقال من منطقة إلى أخرى دون الدخول إلى وسط المشعر. وقد جرى رفع وترميز شبكة الطرق والشوارع الداخلية لعرفات، والطرق التي تصل عرفات بمزدلفة، على شكل وصلات (٤٧١ وصله) وعقد (٢٠٧ عقدة)، وتحديد بياناتها الأساسية للاستفادة منها في تطوير ومعايرة النموذج. وشملت بيانات كل وصلة كلاً من رقم الوصلة، اتجاه الحركة عليها، أرقام العقد في نهايتها، وطولها، وسرعة المركبات عليها، وعرض الرصيف والأكتاف لها، وعدد المسارات، والسرعة المتوسطة، والسعة لكل طريق من طرق الشبكة. وقد افترضت السرعة القصوى (الحرّة) والسعة لكل طريق على أساس تصنيفه كالتالي [٢٢].

١ - طريق سريع: سرعته ٨٠ كم/ ساعة وسعته ١,٠٠٠ مركبة/ ساعة

٢ - طريق رئيس: سرعته ٦٠ كم/ ساعة وسعته ٨٠٠ مركبة/ ساعة

٣ - طريق ثانوي: سرعته ٤٠ كم/ ساعة وسعته ٥٠٠ مركبة/ ساعة

هذا وقد بلغ عدد المركبات المستخدمة في الإفاضة من عرفات لحج عام ١٤١٥هـ-٤٧٠، ٦٦ رحلة-مركبة، منها ٥١٣، ٤٦ رحلة-مركبة على الطرق التسعة المتجهة إلى مزدلفة، وذلك بعد استبعاد رحلات المركبات الأخرى سواء تلك المتجهة إلى عرفات على طرق أخرى غير الطرق التسعة المشمولة في الدراسة أو المركبات المتجهة من

مزدلفة إلى عرفات، وذلك خلال الفترة من الساعة السابعة مساء يوم التاسع من ذي الحجة حتى الساعة الثامنة من صباح اليوم العاشر (عيد الأضحى). وبلغ عدد رحلات الحافلات الكبيرة ١٣٣، ٢٣ رحلة-حافلة (٣٥٪ من إجمالي رحلات المركبات)، بمتوسط إشغال ٥٠ راكباً^[٢]، والباقي مركبات أخرى (٤١٪ صالونات، ١٦٪ حافلات صغيرة، ٤٪ شاحنات ثقيلة، ٢٪ شاحنات خفيفة، ٢٪ سيارات صغيرة). وقد تناولت الدراسة فترة الإفاضة من عرفات عند غروب الشمس مباشرة، حيث يغادر عرفات ٦، ٨٠٪ من الحجاج^[٢]. وعلى ذلك يبلغ عدد رحلات المركبات المشاركة في الإفاضة ٣٦، ٣٦٤ رحلة-مركبة وقت ساعة الذروة.

ومن جهة أخرى، فمن المعلوم أن النماذج التتابعية لتخطيط النقل الحضري (داخل المدن) تشتمل على أربعة نماذج جزئية هي توليد الرحلات، توزيع الرحلات، تحديد واسطة النقل، وأخيراً تخصيص الحركة المرورية على شبكة الطرق. ونظراً للطبيعة الخاصة للإفاضة، فإن جميع الرحلات المنطلقة من عرفات تقصد هدفاً واحداً (مزدلفة)، وبالتالي فلا حاجة لنماذج التنبؤ بتوزيع الرحلات هنا. كما تفترض هذه الدراسة أن نسب توزيع رحلات الحجاج على وسائل النقل يمكن اعتبارها ثابتة وذلك نظراً للتحكم الكبير في ذلك مركزياً، خصوصاً بالنسبة لحجاج الخارج. لذا فقد تم اعتبار أن جميع رحلات حجاج مؤسستات الطواف (حجاج الخارج) تتم بالحافلات، أما بقية الحجاج فيتوزعون على كافة أنواع المركبات بالنسب المثوية المشاهدة والمذكورة أعلاه. كما تم اعتبار أن رحلات المركبات المتولدة من مركز كل منطقة مرورية في عرفات كلها تنجّه إلى عقدة هدف واحدة وهي مزدلفة.

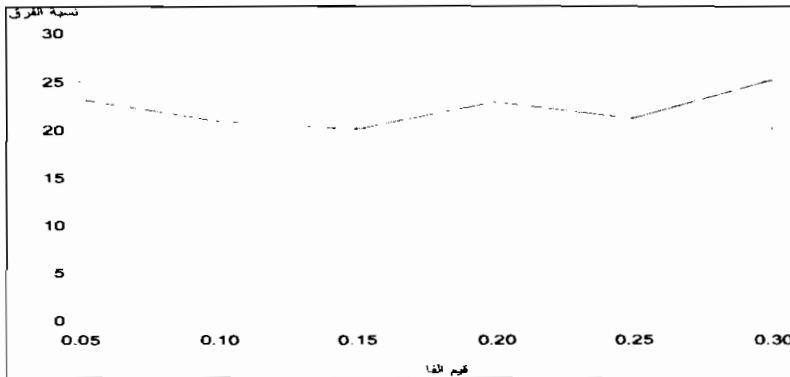
وبعد ذلك تم تشغيل برنامج ترانزكاد لإجراء التخصيص المبدئي لحركة المركبات على شبكة الطرق باستخدام نموذج الاتزان لمستخدمي شبكة الطرق^[١٤]، مع استخدام المعلومات الافتراضية للبرنامج نفسها. ومن ذلك تم الحصول على تقدير لحجم الحركة المرورية وزمن الانتقال على كل وصلة على الشبكة. ومن أجل معايرة معلمات النموذج على ظروف الإفاضة جرى مقارنتها بالحصص المرورية الذي تم على الطرق التسع التي

تصل عرفات بمزدلفة^[٢٣]. ومن نتائج مقارنة التدفق المروري المحسوب من النموذج مع نتائج الحصر المروري على تلك الطرق وجد أن هناك اختلافا كبيرا (المتوسط الموزون لنسبة الانحراف ٩, ١٩٪)، لذا وجب عمل معايرة للنموذج ليتناسب مع نتائج الحصر الفعلي.

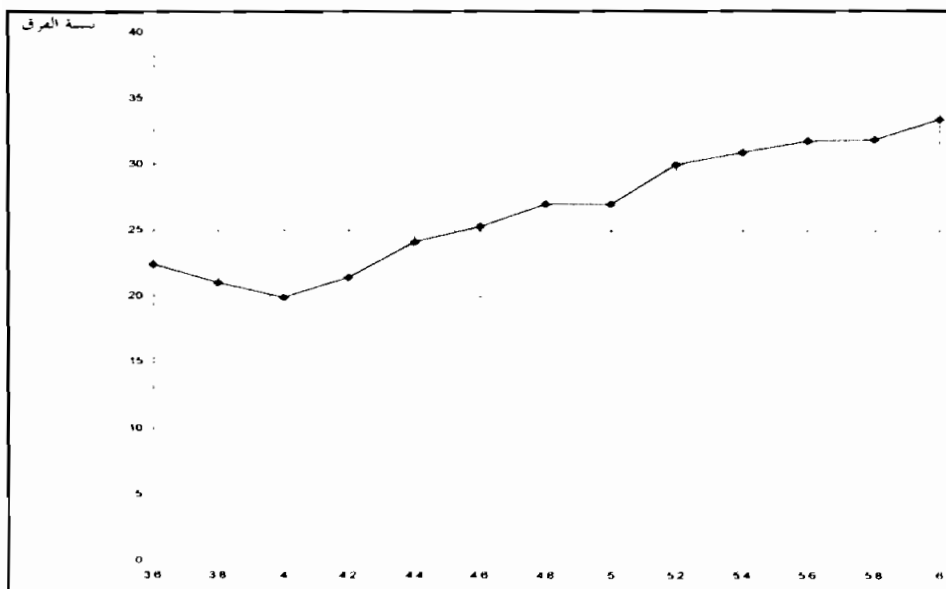
وتنحصر عملية معايرة نموذج تخصيص حركة المرور على شبكة الطرق في معلمات دالة أداء الوصلة (link performance function) وقيم أزمنة التعويق عند العقد (أو عقوبات الالتفاف)، (Turn Penalties) والقيم المفترضة لسعة الطريق حسب تصنيفه. وتعد دالة أداء الوصلة المستخدمة من قبل مكتب الطرق العامة الأمريكي (المعروفة اختصارا باسم طريقة BPR) من أكثر دوال أداء الطرق شيوعا، وتأخذ الصيغة الرياضية التالية^[١٩]:

$$t = t_f [1 + \alpha (v/c)^\beta]$$

حيث إن t هي الزمن اللازم للانتقال عبر وصلة معينة تحت الظروف السائدة، و t_f هي الزمن اللازم لعبور وصلة معينة في حالة التدفق الحر، و v هي مقدار التدفق، و c هي السعة، و B, a هي معلمات للمعايرة. وقد تم استخدام قيم عديدة للمعلمتين B, a واستنتاج أنسب القيم التي تعطي أقل فرق بين قيم التدفق المحسوب من النموذج وتلك المشاهدة، مع العلم بأن القيم الافتراضية لـ B, a في البرنامج هي ١٥, ٠, ٠ و ٤, ٠ على التوالي. ويبين الشكلان (٢) و (٣) نتائج معايرة تلك المعلمتين حيث يظهر أن أفضل هذه القيم هي القيم الافتراضية نفسها، ولكنها لاتزال تعطي متوسط نسبة انحراف مرتفعة (٩, ١٩٪) بين الأحجام المرورية المحسوبة وتلك المشاهدة على الطرق الموصلة من عرفات إلى مزدلفة.



شكل رقم (٢):
تأثير قيمة المعامل
ألفا (α) على نسبة
الفرق بين نتائج
التدفق المحصور
والمحسوب على
طرق عرفات.



شكل (٣) تأثير قيمة المعامل بيتا (β) على نسبة الفرق بين نتائج قيم التدفق المحصور والمحسوب على طرق عرفات .

أما بالنسبة لأزمة التعويق عند التقاطعات (العقد) فإن القيم الافتراضية للبرنامج تعتبرها غير موجودة (صفر) ما لم يتم استخدام البرنامج بتحديدتها. ولكن واقع الحال في الطرق والشوارع داخل عرفات يتطلب أخذها بالاعتبار نظراً لأن معظم التأخير يتم عند تقاطعات الطرق. ففي تمثيل الحركة لشبكة طرق عرفات لابد من تقدير مقدار التأخير في حالات الالتفاف عند بعض التقاطعات (العقد) أو عند الانتقال من وصلة إلى أخرى، كما قد يكون من الضروري منع بعض حالات الالتفاف غير المسموح بها.

وعند عدم توفر بيانات ميدانية لأزمان التأخير لحركات الالتفاف المختلفة عند تقاطعات الطرق، كما هو الحال في عرفات أثناء الإفاضة، فعادة ما يتم تقديرها باستخدام بعض الأساليب التحليلية المتعارف عليها في هندسة المرور لتحليل التقاطعات، سواءً المحكومة بإشارات مرور أو غير المحكومة (مثل أساليب دليل سعة الطرق الأمريكي)^[٢٤]. ولكن هذه الأساليب المطورة للظروف الطبيعية داخل المدن لا تتناسب مع الظروف الخاصة بالإفاضة نظراً لعدم وجود إشارات مرور في التقاطعات، كما أن التقاطعات تدار بطريقة يدوية من قبل شرطة المرور، وأيضاً لضخامة الطلب المروري

على تلك التقاطعات والذي يتجاوز طاقتها الاستيعابية.

لذا فقد تم اللجوء إلى أسلوب آخر لتقدير أزمدة التعويق وذلك من خلال المحاكاة الجزئية لشبكة طرق عرفات وتقاطعاتها، حيث تم الرجوع إلى نتائج نموذج المحاكاة الجزئية المعايير سابقا للإفاضة^[٣]، ومنه تم تقدير أزمدة التعويق لكل حركات الالتفاف في كل عقدة من عقد شبكة عرفات. وقد تم التوصل إلى متوسط نسبة انحراف قدرها ٢١، ٨٪ بين الأحجام المرورية المحسوبة وتلك المشاهدة على الطرق التسعة التي تربط المشعرين. ونظرا لأن نسب الانحراف التي لا تتجاوز ١٠٪ تعد عموما مقبولة لمعايرة النموذج، فقد تم الإبقاء على قيم ساعات الطرق حسب تصنيفاتها كما هي واعتبر أنه بذلك قد تمت معايرة النموذج الكلي للإفاضة.

٤ - تطبيق النموذج الكلي للإفاضة

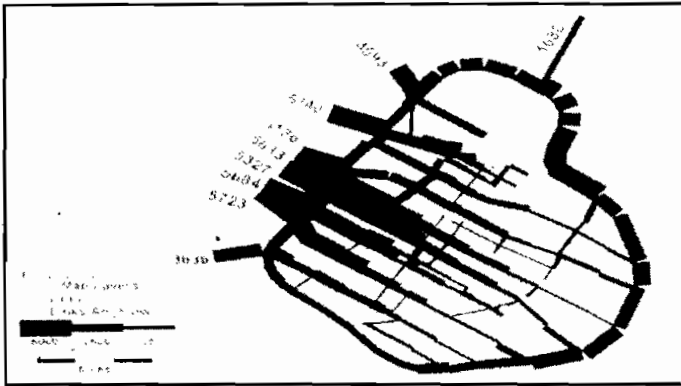
خلال موسمي حج العامين ١٤١٦هـ و ١٤١٧هـ، تم بنجاح تجربة أسلوب نقل الحجاج بالحافلات الترددية أثناء الإفاضة على حجاج مؤسسة تركيا وأوروبا وأمريكا، حيث تم نقل مامجموعه ١١٧ ألف حاج في العام الأول و ١٢٩ ألف حاج في العام الآخر بالنقل الترددي عن طريق تخصيص الطريق رقم (٩) الجنوبي (حاره/ اتجاه) بالكامل للنقل الترددي. وقد حقق ذلك زمنا قياسيا للرحلة بين عرفات ومزدلفة بلغ متوسطه ٣، ١٤ دقيقة و ٠، ٢٤ دقيقة، على التوالي، مقارنة بـ ١٩٥ دقيقة بإسلوب النقل العادي (نظام الردين)، كما انخفض حجم الأسطول من ٢٧٠، ١ حافلة بنظام الردين إلى ٥٢٠ حافلة و ٤٥٠ حافلة، على الترتيب^[٣].

وقد شجع ذلك النجاح على تبني المخطط الشامل للمشاعر المقدسة لمبدأ النقل الترددي بين المشاعر على كافة الطرق^[٢٥]. وقد وضع هذا المخطط الشامل ليغطي احتياجات النقل والإيواء والخدمات المطلوبة حتى عام ١٤٤٥هـ، ولعدد الحجاج إجمالي قدره ٨، ٤ مليون حاج. وقد طور نظام النقل فيه على أساس وجود ست حلقات من الطرق السريعة التي تربط المشاعر المقدسة (عرفات، مزدلفة ومنى)، كل منها

مكون من ٨ حارات مرورية (٤ في كل اتجاه). ويتفرع من كل طريق سريع ٤ طرق محلية لتحميل وتنزيل الحجاج في كل مشعر. وتنص المرحلة الأولى من مراحل تنفيذ المخطط على تنفيذ طريقين سريعين من الطرق الستة يقعان في الجهة الشمالية للمشاعر، أحدهما مستحدث على حدود الحمى الشرعية للمشاعر، والآخر عبارة عن رفع مستوى الطريق رقم (٩) القائم (الشمالي والجنوبي، ٤ حارات) إلى طريق سريع بـ ٨ حارات مرورية. ويتوقع عند اكتمال المرحلة الأولى (١٤٢٠هـ) أن يوفر هذان الطريقان السريعان خدمة النقل الترددي لحوالي خمس إجمالي الحجاج أثناء الإفاضة، في حين ينتقل بقية الحجاج بنظام النقل الراهن على بقية الطرق القائمة التي تربط المشعرين (١٨ حارة مرورية متجهة إلى مزدلفة).

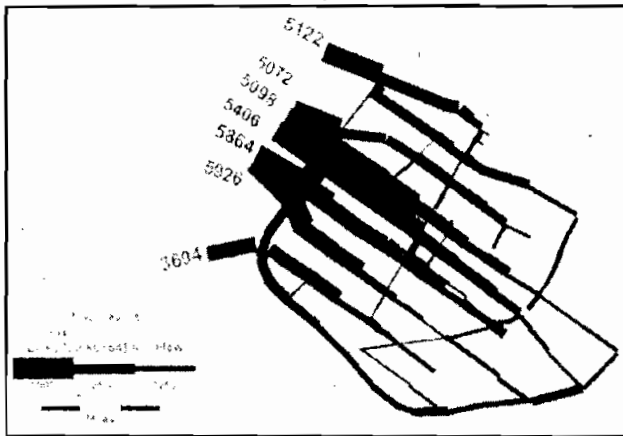
وقد تم تطبيق نموذج المحاكاة الكلي المعايير للإفاضة لتقييم تأثير تنفيذ المرحلة الأولى المتمثلة بتخصيص الطريق رقم (٩) بجزئيه الشمالي والجنوبي (٤ حارات) للحركة الترددية على حركة الإفاضة لبقية الحجاج غير المشمولين في المرحلة الأولى. وجرى ذلك بمحاكاة حركة الإفاضة فيما لو استمر الوضع الراهن لشبكة الطرق ومقارنة نتائج الأداء لها مع نتائج المحاكاة للجزء المتبقي من عرفات بعد تنفيذ المرحلة الأولى من المخطط الشامل.

وقد جرى أولاً تحديث تمثيل شبكة الطرق الداخلية لعرفات بإدخال كافة التعديلات الهندسية التي طرأت عليها حتى موسم حج ١٤١٧هـ، ثم تم تقدير إجمالي عدد الحجاج لعام ١٤٢٠هـ الذي يتوقع أن يصل إلى حوالي ٨,٢ مليون حاج^[٢٥]. وبناء على الأعداد الفعلية للمركبات في عام ١٤١٥هـ، قُدر عدد المركبات التي ستشارك في حركة الإفاضة في ساعة الذروة لحج عام ١٤٢٠هـ بحوالي ١٦٠,٤٢ رحلة-مركبة تسير على ٢٢ حارة مرورية للطرق التسعة (٩١٦,١ مركبة/حارة)، منها ٦٩٤,١٨ رحلة-حافلة، التي وزعت على مناطق التحليل المرورية تبعاً للتوزيع الحالي للحجاج. ومن ثم تم تطبيق نموذج المحاكاة الكلي على اعتبار بقاء وضع الشبكة على ما هو عليه (أي بدون تنفيذ المرحلة الأولى من المخطط الشامل). ويبين الشكل رقم (٤) التدفق المروري على كل وصلة من وصلات الشبكة لحالة امتداد الوضع الراهن (١٤١٥هـ) إلى العام ١٤٢٠هـ.



شكل (٤) نتائج
تطبيق النموذج الكلي
على امتداد الوضع
الراهن (١٤٢٠هـ)

كما جرى أيضا تمثيل شبكة طرق عرفات بعد إجراء التعديلات اللازمة عليها لتناسب مع وضع المرحلة الأولى من المخطط الشامل للمشاعر المقدسة حيث تم استبعاد أجزاء الشبكة التي تقع ضمن الأراضي الداخلة في المرحلة الأولى (شمال عرفات) بما في ذلك الطريق رقم (٩) بأكمله. كما تم تقدير رحلات المركبات غير المشمولة في المرحلة الأولى والمشاركة في حركة الإفاهضة باستبعاد رحلات المركبات التي كانت تتولد من مناطق إيواء الحجاج المشمولين الآن في الحركة الترددية للحافلات (المرحلة الأولى)، والواقعة في منطقة شمال عرفات، والبالغ عددها ٩٧٣, ٥ رحلة-حافلة ليتبقى ١٨٧, ٣٦ رحلة-مركبة تسيير على ١٨ حارة مرورية للطرق التسعة (٢, ٠١٠, ١٢, ٧٢١, ١٢) رحلة-حافلة، ومن ثم جرى توزيعها على مناطق التحليل المرورية في الجزء المتبقي من عرفات. ويبين الشكل رقم (٥) نتائج تطبيق نموذج المحاكاة الكلي على المرحلة الأولى لعام ١٤٢٠هـ.



شكل (٥) نتائج تطبيق النموذج
الكلي على امتداد المرحلة
الأولى للمخطط الشامل
(١٤٢٠هـ)

وبمقارنة نتائج تطبيق النموذج الكلي على الحالتين كما يظهر من الشكلين الأخيرين (جدول رقم ١) يظهر أن التدفق المروري قد ازداد على الطرق من رقم (٢) وحتى رقم (٦) في المرحلة الأولى عنه في امتداد الوضع الراهن، ولكن نسبة الزيادة ضئيلة ولا تتعدى ٥,٣٪ (٢٠٣ مركبة/ ساعة). في حين انعكس الوضع بالنسبة للطريقين رقم (٧) ورقم (٨)، حيث انخفض التدفق المروري عليهما ولكن، أيضاً، كان مقدار الانخفاض طفيفاً ولم يتجاوز ٢٢٠ مركبة/ ساعة (١,٤٪). لذا يمكن استنتاج أنه ليس هناك تأثير يذكر لتخصيص الطريق رقم (٩) لاستخدامه في النقل الترددي في المرحلة الأولى من مراحل تنفيذ المخطط الشامل للمشاعر المقدسة على أداء بقية شبكة طرق عرفات ساعة الإفاضة إلى مزدلفة.

جدول (١)

مقارنة نتائج المحاكاة الكلية للوضع الراهن والمرحلة الأولى للمخطط الشامل (١٤٢٠هـ)

رقم الطريق	امتداد الوضع الراهن		المرحلة الأولى		فرق التدفق
	التدفق (مركبة/ ساعة)	التدفق (مركبة/ ساعة)	التدفق (مركبة/ ساعة)	مقداره	
٢	٣٦٣٦	٣٦٩٤	٥٨	١,٦	
٣	٥٧٢٣	٥٩٢٦	٢٠٣	٣,٥	
٤	٥٦٨٤	٥٨٦٩	١٨٥	٣,٣	
٥	٥٣٢٧	٥٤٠٦	٧٩	١,٤	
٦	٥٠٣٣	٥٠٩٨	٦٥	١,٣	
٧	٥١٣٦	٥٠٧٢	-٦٤	-١,٣	
٨	٥٣٤٠	٥١٢٢	-٢١٨	-٤,١	
٩	٦٢٨١	-	-	-	
المجموع	٤٢١٦٠	٣٦١٨٧	-٥٩٧٣	-١٤,٢	

من جهة أخرى، فقد سبق تطوير نموذج محاكاة جزئي للإفاضة وتطبيقه على المرحلة الأولى من المخطط الشامل للمشاعر المقدسة ذاتها. وبين الجدول رقم (٢) مقارنة بين النتائج التي تم التوصل إليها من خلال نموذج المحاكاة الكلي هنا مع تلك التي أعطاها نموذج المحاكاة الجزئي (إيمسن ٢ AIMSUN2) والمعروضة في دراسة سابقة^[٣]. ويظهر من

المقارنة بالنسبة لحالة امتداد الوضع الراهن أن تنبؤات النموذجين الكلي والجزئي كانت متشابهة جدا (نسبة فرق لا تتجاوز 5%) للطرق أرقام (٣) و (٤) و (٥) في حين تفاوتت بشكل كبير للطرق الست الأخرى، حيث تراوحت نسبة الفرق في التقديرات بين 18% و 52% . أما في حالة محاكاة المرحلة الأولى فقد كان الفرق واسعا بين تقديرات كل من نموذجي المحاكاة الكلي والجزئي، حيث تراوح الفرق للطرق الثمانية بين 12% و 48% .

وعند محاولة تفسير تلك الاختلافات بين تنبؤات أسلوبَي النمذجة والمحاكاة ترد عدة ملاحظات، أولها أن البيانات والقياسات الميدانية المتوافرة لمعايرة كل من النموذجين كانت محدودة جدا واقتصرت على الحصر المروري للأحجام المرورية على الطرق التسعة التي تصل عرفات بمزدلفة، بينما لم تتوافر أية بيانات ميدانية عن الأحجام المرورية على طرق وشوارع شبكة عرفات الداخلية، كما لم تتوافر أية بيانات عن أزمان الانتقال على وصلات الشبكة ذاتها أثناء الإفازة.

جدول (٢)

مقارنة نتائج نموذج المحاكاة الكلي مع نتائج نموذج المحاكاة الجزئي

رقم الطريق	امتداد الوضع الراهن		المرحلة الأولى	
	النموذج الكلي	النموذج الجزئي	النموذج الكلي	النموذج الجزئي
	القيمة %	القيمة %	القيمة %	القيمة %
٢	٣٦٣٦	٥٠٣٧	٣٦٩٤	٤٧٨٢
٣	٥٧٢٣	٥٦٢٠	٥٩٢٦	٦٦٤٧
٤	٥٦٨٤	٥٤٠٣	٥٨٦٩	٥٠٩٠
٥	٥٣٢٧	٥٤٧٥	٥٤٠٦	٤٢٦٢
٦	٥٠٣٣	٧٦٧٩	٥٠٩٨	٦٧٥١
٧	٥١٣٦	٦٠٦٦	٥٠٧٢	٥٧١٩
٨	٥٣٤٠	٤٠٩٠	٥١٢٢	٢٩٢٦
٩	٦٢٨١	٣٢٤٠	-	-
المجموع	٤٢١٦٠	٤٢١٦٠	٣٦١٨٧	٣٦١٨٧

وفي ظل هذا النقص الواضح في البيانات، الذي قد يكون مسؤولاً عن جزء كبير من عدم توافق تقديرات النموذجين، فإن عدد معلمات المعايرة في النموذج الجزئي يفوق عددها في النموذج الكلي، كما أن أزمته التعويق المستخدمة في النموذج الكلي لم تكن مبنية على قياسات ميدانية، بل اشتقت من نتائج المحاكاة الجزئية، مما قد يقلل من موثوقية عملية المعايرة. كما أن درجة الدقة التي تم التوصل إليها في عملية المعايرة للنموذج الجزئي كانت نسبياً أفضل منها للنموذج الكلي، حيث كان متوسط الانحراف للنموذج المعيار عن القياسات الميدانية لكل منهما ١٩, ٥٪ و ٢١, ٨٪، على التوالي. أخيراً، فإن النمذجة الجزئية تمتاز بأنها تعيد تمثيل ديناميكية حركة كل مركبة على حدة مع أخذ الجوانب السلوكية لسائقي المركبات بالاعتبار، لذا فهي تُعد عموماً الأقرب للواقع.

٥ - الخاتمة

عادة ما يكون هدف بناء نماذج المحاكاة هو المساعدة على الوصول إلى فهم أفضل لكيفية سلوك النظام الخاضع للدراسة أو تقييم التأثيرات المحتملة لإدخال تعديلات على عناصره، أو على قيم معالمة التي تحكم أداءه، أو على القرارات المتخذة حول سياسات التشغيل والتحكم به. ويوفر أسلوب المحاكاة أداة فعالة لدراسة مختلف الأنظمة المعقدة بما في ذلك أنظمة النقل والمرور. وقد حاولت هذه الدراسة توظيف ذلك في دراسة حركة المركبات في الإفاضة من عرفات، التي تعد من أضخم الحركات في العالم.

وقد هدفت هذه الورقة إلى تطبيق أسلوب النمذجة والمحاكاة الكلية على حركة المركبات في الحج خلال الإفاضة من عرفات وذلك بمعايرة النموذج الكلي أولاً، باستخدام قياسات ميدانية للأحجام المرورية على الطرق التي تصل عرفات بمزدلفة، ومن ثم تطبيق النموذج لاختبار تأثير تطبيق استراتيجية تخصيص الطريق رقم (٩) (٤ حارات) الموصل بين عرفات ومزدلفة لحركة الحافلات الترددية، وذلك ضمن المرحلة الأولى لتنفيذ المخطط الشامل للمشاعر المقدسة المطور حديثاً، على حركة المركبات الأخرى في بقية الطرق.

وقد أفادت تنبؤات النموذج الكلي المعايير بعدم وجود أثر سلبي يُذكر لتطبيق تلك الاستراتيجية. وهو ماتم التوصل إليه بشكل عام، أيضاً، في دراسة سابقة للحالة نفسها، ولكن عن طريق استخدام النمذجة والمحاكاة الجزئية^[٣]. إلا أن التوقعات التفصيلية لأحجام الحركة المرورية على الطرق الموصلة بين عرفات ومزدلفة كانت متباينة للنموذجين الجزئي والكلي. ويبدو أن ذلك يعود للنقص في البيانات الميدانية المتوفرة لمعايرة النموذجين، كما رجحت هذه الورقة أن تقديرات النموذج الجزئي قد تكون هي الأكثر موثوقية والأقرب للواقع.

وأخيراً، توصي الورقة بضرورة التوسع في استخدام نماذج المحاكاة والنمذجة لأنظمة الحركة في الحج (للمركبات والمشاة على حد سواء)، ومايلزم لذلك من دراسات وقياسات ميدانية لمعايرة النماذج بشكل دقيق. كما يبدو أن النمذجة الجزئية هي الأنسب لدراسة الحركة على المستوى المحلي، أي داخل المشعر الواحد أو بين مشعرين، في حين تكون النماذج الكلية أكثر ملاءمة لدراسة الحركة على مستويات أعم، مثل دراسة عملية الحج برمتها منذ وصول الحجاج لمنافذ دخول المملكة العربية السعودية، مروراً بالحركة بين المشاعر ومكة المكرمة، وانتهاءً بمغادرتهم إلى بلدانهم بعد قضاء مناسكهم.

شكر وتقدير

يتقدم المؤلف ببالغ الشكر والتقدير لشركة البيثة: مخططون ومعماريون ومهندسون، بالرياض، على دعمها المالي والفني لهذه الدراسة.

المراجع

- [١] لجنة الحج المركزية، اللجنة العليا لمراقبة نقل الحجاج، تطوير استخدامات الحاسب لمساندة عمليات نقل الحجاج، التقرير النهائي، مكة المكرمة، صفر ١٤١٦ هـ.
- [٢] مركز أبحاث الحج، دراسة إمكانية استخدام الحافلات الترددية كنظام نقل بين المشاعر المقدسة. جامعة أم القرى، مكة المكرمة، جمادى الأولى، ١٤١٦ هـ.

[3] AlGadhi, S. A.. Microscopic Modeling and Simulation of Hajj Vehicular Traffic During Ifadha. *Proc. Of the Fifth Saudi Engineering Conference, Umm Al-Qura University, Makkah, Saudi Arabia, Vol. 3,*

- pp.443-452, (1999).
- [4] **Barcelo, J., J. Ferrer, D. Garcia, M. Florian and E. L. Saux.** Parellezation of Microscopic Traffic Simulation for ATT Systems Analysis. A Chapter in Marcotte, **P. and S. Nguyen** (Eds.), *Equilibrium and Advanced Transportation Modelling*, Centre for Research on Transportation, Universite de Montreal, Canada (1998).
- [5] **Lighthill, M. J. and G. B. Whitham,** "On Kinematic Waves II: A Theory of Traffic Flow on Long Crowded Roads," *Proc. Royal Society of London, Series A*, 229, pp. 317-345 (1955).
- [6] **Payne, H. J.,** "Models of Freeway Traffic and Control," *Simulation Council Proc.* **1**, pp. 51-61 (1971).
- [7] **Papageorgiou, M., J. M. Blosseville and H. Haj-Salem,** "Macroscopic Modelling of Traffic Flow on the Boulevard Peripherique in Paris," *Transportation Research* **23B**, pp. 29-47 (1989).
- [8] **Papageorgiou, M., J. M. Blosseville and H. Haj-Salem,** "Modelling and Real-Time Control of Traffic Flow on the Southern Part of Boulevard Peripherique in Paris, Part I: Modeling," *Transportation Research* **24A**, pp. 345-359 (1990).
- [9] **Michalopoulos, P. G., Ping Ui, D. E. Beskos and A. S. Lyrintizis,** "Continuum Modelling of Traffic Dynamics," in *Proc. 2nd Int. Conf. on Applications of Advanced Technologies in Transportation Engineering*, Minneapolis, pp. 36-40 (1991).
- [10] **Hirsch, C.** *Numerical Computation of Internal and External Flows*. Vol **2**, John Wiley and Sons (1988).
- [11] **Payne, H. J.,** "FREEFLO: A Macroscopic Simulation Model of Freeway Traffic," *Transportation Research Record* **772**, pp. 68-75 (1979).
- [12] **Messmer, A. and M. Papageorgiou,** "METANET: A Macroscopic Simulation Program for Motorway Networks," *Traffic Engineering and Control*, **31**, pp. 466-470 (1990).
- [13] **Chronopoulos, A. T., P. Michalopoulos and J. Donohoe,** "Efficient Traffic Flow Simulation Computations," *Mathematical and Computer Modelling*, Vol. **16**, No. **5**, pp. 107-120 (1992).
- [14] **Wardrop, J. G.** Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research. *Proc. Instit. Civil Engineers*, Part **II**, pp. 325-378 (1952).
- [15] **Florian, M.** *Nonlinear Cost Network Models in Transportation Analysis, Mathematical Programming Study*, **26**, pp. 167-196 (1986).
- [16] **Van Vilet, D.** SATURN: A Modern Assignment Model, *Traffic Engineering and Control*, **23** (12), pp. 578-81 (1982).
- [17] **INRO consultants,** *EMME/2: Release 6.0. User's Manual* (1992).
- [18] **Urban Analysis Group,** *TRANPLAN (TRANsportation PLANning) Software. User's Guide, version 9*, Danville, California, USA (1997).
- [19] **Caliper Corporation.** *Travel Demand Modeling with TransCAD, version 3.5*, March (1999).
- [20] **Chang C. L. and D. T. Meyers.** Transportation Models. A Chapter in *Transportation Planning Handbook*. Second Edition, **Edwards, John D. (Editor)**, Institute of Transportation Engineers, Washington, D.C (1999).

[٢١] وزارة الحج. بيانات توزيع أراضي المشاعر المقدسة في عرفات ومزدلفة، شاملة مؤسسات حجاج الداخل، لموسم حج عام ١٤١٥هـ (١٤١٥هـ).

[٢٢] الهيئة العليا لتطوير مدينة الرياض. تطوير نماذج تخطيط النقل لمدينة الرياض، ندوة التخطيط والتصميم، معهد الإدارة العامة، الرياض، ١٤٠٨هـ.

[٢٣] وزارة الداخلية - الإدارة العامة للمرور، إحصاء السيارات على طرق الحج لعام ١٤١٥هـ (١٤١٥هـ).

[24] Transportation Research Board. *Highway Capacity Manual. Special Report 209*, Washington, D. C (1994).

[٢٥] لجنة الحج المركزية، تطوير المخطط الشامل للمشاعر المقدسة، التقرير النهائي، البيثة: مخطون ومعماريون ومهندسون، رمضان (١٤١٨هـ).

Macroscopic Modeling and Simulation of Hajj Vehicular Traffic during *Ifadha* from Arafat

SAAD A. H. ALGADHI

*Civil Engineering Dept., King Saud University,
P.O.Box 800, Riyadh 11421, Saudi Arabia*

ABSTRACT. The heavy vehicular movement from Arafat to Muzdalifa during *Ifadha* probably has no match elsewhere. The objective of this study is to model the traffic movement on the Arafat street network and its connecting roads to *Muzdalifa* during *Ifadha* by utilizing a macroscopic simulation model, and to calibrate it using local field data. In this paper, the static user equilibrium traffic assignment approach was utilized through the TransCAD software package, after its calibration to actual conditions, including land-use and pilgrim distribution, road network, and vehicular counts during 1415H Hajj season. The calibrated macroscopic model was then utilized to simulate and assess the impact of dedicating some of these highways to the bus operational strategy successfully experimented during the past few *Hajj* seasons. Furthermore, the paper compares the results of the macroscopic model in this case study with the results of applying a microscopic model to the same case study. The paper concludes that the latter was a better approach for this case study.