KAPSARC
مركز الملك عبدالله للدراسات والبحوث البترولية
King Abdullah Petroleum Studies and Research Center

ورقة نقاش

دراسة الازدحام المروري في المدن وتأثيره في استهلاك الوقود عن طريق الاستعانة ببيانات إنترنت الأشياء: دراسة حالة لمدينة الرياض

لمى ياسين، نوره الحسين،
إبراهيم شطناوي، عبد الرحمن محسن

أبريل 2025 | KS--2024-DP72

عن كابسارك

مركز الملك عبدالله للدراسات والبحوث البترولية (كابسارك) هو مركز عالمي غير ربحي يجري بحوثًا مستقلة في اقتصاديات وسياسات وتقنيات الطاقة بشتى أنواعها بالإضافة إلى الدراسات البيئية المرتبطة بها. وتتمثل مهمة كابسارك في تعزيز فهم تحديات الطاقة والفرص التي تواجه العالم اليوم وفي المستقبل من خلال بحوث غير منحازة ومستقلة وعالية الجودة لما فيه صالح المجتمع، ويقع كابسارك في الرياض بالمملكة العربية السعودية.

إشعار قانوني

© حقوق النشر 2025 محفوظة لمركز الملك عبدالله للدراسات والبحوث البترولية (كابسارك). لا يجوز استخدام هذا المستند أو أي معلومات أو بيانات أو محتوى يتضمنه دون نسبته بشكل ملائم لكابسارك. كما لا يجوز إعادة إنتاج هذا المستند أو جزء منه دون إذن خطي من كابسارك. ولا ينشأ عن المعلومات الواردة في هذا المستند أي ضمان أو تعهد أو أي مسؤولية قانونية –سواء مباشرة أو غير مباشرة- تجاه دقتها أو اكتمالها أو فائدتها. كما لا يجوز أن يعتبر هذا المستند –أو أي جزء منه- أو أن يفسر كنصيحة أو دعوة لاتخاذ أي قرار. الآراء والأفكار الواردة هنا تخص الباحثين معدي الدراسة، ولا تعكس بالضرورة موقف المركز ووجهة نظره.

الملخص

تستكشف الدراسة الحالية ظاهرة الازدحام المروري المتزايد في مدينة الرياض وأثرها في معدلات استهلاك سيارات الركاب من الوقود في ظل تحديات التوسع العمراني المتسارع وتزايد استخدام المركبات. وترتكز الدراسة على تحليل البيانات الآنية للسيارات المتنقلة (FCD) التي تجمعها المركبات المزودة بنظام تحديد المواقع العالمي (GPS) وأنظمة الاتصالات من أجل تسليط الضوء على الإمكانات الواعدة لتقنيات إنترنت الأشياء (IoT) والمدن الذكية في مجال تطوير أنظمة النقل الذكية وتحسين إدارة التنقل الحضري. وبإجراء تحليل مكاني لديناميات التدفق المروري في مدينة الرياض إلى جانب التركيز على مجموعة محددة من طرقها العامة الرئيسة، يتضح أن القيادة على الطرق عالية السعة تؤدي إلى زيادة معدلات استهلاك الوقود في أغلب الأحيان. ونشير إلى أننا أجرينا تحليلًا على المستوى الميزوسكوبي للازدحام المروري في الطرق عالية السعة في مدينة الرياض، وقد تبين لنا أن الازدحام يتسبب في زيادة معدلات استهلاك الوقود بنسبة تصل إلى 29٪، ويُعزَى ذلك في المقام الأول إلى سلوك القيادة الذي يتسم بتكرار التوقف والتحرك، مما يؤثر سلبًا في الكفاءة الكلية لاستهلاك الوقود. وتهدف الدراسة الحالية إلى تعميق فهمنا لأنماط الحركة المرورية في المدن بهدف إمداد صانعي السياسات برؤى كاشفة مدعومة بالبيانات يتسنى لهم من خلالها صوغ إستراتيجيات أكثر استدامة في مجال تخطيط الطرق بهدف تلبية متطلبات التنقل الحضري في المدن واجتياز التحديات المرتبطة به.

الكلمات المفتاحية: استهلاك الوقود، الازدحام المروري، حركة المرور، أنظمة المعلومات الجغرافية، إنترنت الأشياء، بيانات السيارات المتنقلة.

1. المقدمة

تتفاقم ظاهرة الازدحام المروري في المدن حول العالم نتيجة زيادة وتيرة التوسع العمراني والارتفاع الملحوظ في ملكية المركبات، الأمر الذي يؤثر سلبًا في جودة الهواء ويُحدِث زيادة كبيرة في انبعاثات غازات الدفيئة (Sims et al. 2014). وفي المملكة العربية السعودية، يواجه قطاع النقل تحديات هائلة بسبب الاعتماد المتزايد على السيارات في التنقلات اليومية إلى جانب ما تشهده المملكة من تصاعد وتيرة التطوير العمراني. وتتجلى هذه التحديات في العاصمة الرياض التي تُعد أكبر المدن السعودية، إذ شهدت زيادة سنوية كبيرة في الأزمنة المستغرقة في التنقل بسبب تفاقم الازدحام المروري (TomTom 2024a). وفي ضوء هذه المعطيات، تبرز الحاجة الملحة إلى وضع إستراتيجيات فعّالة في مجالي التخطيط العمراني المستدام وإدارة حركة المرور، بما يفي بمتطلبات التنقل المتزايدة لدى الكتلة السكانية المتنامية في المدن.

يقصد ببيانات السيارات المتنقلة تلك البيانات المستخلصة من المركبات المتحركة المزودة بنظام تحديد المواقع العالمي وغيره من تقنيات تتبع المواقع، وهذه البيانات تتضمن معلومات عن موقع المركبة وسرعتها واتجاه سيرها، بما يتيح تحليل أنماط حركة المرور ورصد حالة الطرق وإدارة أنظمة النقل (Liu and Ban 2013).

وتلعب هذه البيانات دورًا جوهريًا في تطوير تقنيات إنترنت الأشياء والمدن الذكية وأنظمة التنقل الذكية وإجراء البحوث، استنادًا إلى ما توفره من معلومات آنية عن ديناميات حركة المرور وتدفق المركبات. في هذا السياق، يشير مفهوم التنقل الذكي إلى استخدام التقنيات المتطورة والحلول القائمة على البيانات في تحسين كفاءة أنظمة النقل وإتاحتها وتعزيز استدامتها (Faria et al. 2017). ويمكن تعريف المدن الذكية بأنها بيئات حضرية تعتمد على التقنيات الرقمية وتحليلات البيانات وتقنيات إنترنت الأشياء بهدف تحسين الخدمات العامة والبنية التحتية وآليات الحوكمة وجعلها أكثر تكاملًا، سعيًا لبناء مجتمعات تتسم بالكفاءة والاستدامة وجودة الحياة (Silva, Khan, and Han 2018). وتعتمد هذه المدن على حلول التنقل الذكي للحد من الازدحام المروري وتحسين وسائل النقل ودعم نظام بيئي حضري أكثر اخضرارًا. وفي ما يتعلق بتطبيقات إنترنت الأشياء، تسهم بيانات السيارات المتنقلة في تعزيز كفاءة متابعة أنظمة المركبات المتصلة وإدارتها، مما يمنح إمكانية الصيانة التنبؤية للمركبات وتحسين إدارة أساطيل النقل (Ayfantopoulou et al. 2022).

وتؤدي بيانات السيارات المتنقلة دورًا بالغ الأهمية في مجال التنقل الذكي. فهي توفر معلومات تفصيلية عن أنماط حركة المرور وسرعات المركبات وأوقات التنقل، مما يسهم في تحسين خدمات النقل العام ووضع إستراتيجيات أكثر كفاءة لإدارة حركة المرور (Ismaeel et al. 2023). ونشير إلى أن أهمية هذه البيانات لا تقتصر على الجانب التطبيقي فحسب، بل تُشكّل أيضًا مصدرًا ثريًا للباحثين في مجال تحليل السلوكيات المرورية، واختبار نظريات التخطيط الحضري، واستحداث نماذج النقل المبتكرة. ومن خلال الاستمرار في جمع هذه البيانات وتحليلها، يتسنى للمدن والباحثين تطوير بيئات حضرية أكثر استجابة واستدامة وكفاءة (Liu and Ban 2013).

وقد أصبح التكامل بين مصادر البيانات المتقدمة مثل بيانات السيارات المتنقلة لا غنى عنه في نمذجة الطلب على خدمات النقل، لما توفره من معلومات آنية عالية الدقة بشأن تدفق حركة المرور وسرعات المركبات وأنماط التنقل. وتسهم هذه البيانات التفصيلية في إتاحة توقعات أكثر دقة للطلب على خدمات النقل، وتحديد أنماط الازدحام المروري، ودعم تحسين إستراتيجيات إدارة المرور (Croce et al. 2021; Kan et al. 2018; Jiang et al. 2021; Xu, Yue, and Li 2013). كما يتيح استخدام تقنيات التحليل المكاني رصد الزيادات الموضعية في معدلات الازدحام المروري والانبعاثات ضمن شبكات الطرق الحضرية، مما يساعد في فهم السلوكيات المرورية فهمًا شاملًا، ويدعم جهود تطوير حلول مستهدفة لتحسين انسيابية الحركة المرورية والحد من آثارها البيئية.

وتهدف الدراسة الحالية إلى تسليط الضوء على تحديات الازدحام المروري والتنقل في مدينة الرياض، مستهلة ذلك باستعراض

شامل للدراسات والبحوث ذات الصلة. ثم تنتقل إلى استجلاء تقنيات النمذجة المكانية وبيانات السيارات المتنقلة التي تستخدم في تحليل أنماط القيادة الحضرية وكيفية تأثير الظروف المختلفة في كفاءة استهلاك الوقود بالمركبات، مع إيلاء تركيز خاص للعلاقة بين تفاوتات السرعة ومعدلات استهلاك الوقود. وتركز الدراسة على مجموعة محددة من الطرق العامة عالية السعة في مدينة الرياض؛ إذ تحلل السلوكيات المرورية على هذه الطرق الرئيسة وذلك على المستوى الميزوسكوبي، كما أنها تتضمن تحليلًا زمانيًا ومكانيًا يهدف إلى رصد مختلف أنماط القيادة على مستوى المدينة وتحليلها. ويتناول النقاش النتائج المستخلصة من هذه التحليلات لفهم تأثيرات الازدحام المروري والظروف الحضرية في أنماط القيادة واستهلاك الوقود. وتختتم الدراسة بعرض أهم النتائج المستخلصة من التحليل المكاني، مع إبراز العوامل الرئيسة المؤثرة في الازدحام المروري وكفاءة استهلاك الوقود في مدينة الرياض. وتؤكد الدراسة كذلك الدور المحوري الذي تضطلع به تقنيات إنترنت الأشياء والحلول الذكية في تحسين إدارة أنظمة التنقل الحضري، وتقترح حزمة من التدخلات على مستوى السياسات والبنية التحتية في سبيل اجتياز التحديات القائمة.

2. الدراسات السابقة

تحتل المدن موقعًا محوريًا في النقاشات المتعلقة بتغير المناخ، فهي من أكبر العوامل المساهمة في تفاقم هذه الظاهرة، وهي في الوقت نفسه تمثل خط المواجهة الأول في التصدي لها، لأن التركز الكثيف للسكان والأنشطة الصناعية والخدمية في المناطق الحضرية يُسفر عن ارتفاع معدلات استهلاك الطاقة، ومن ثم حدوث زيادة كبيرة في انبعاثات ثاني أكسيد الكربون. لكن التوسع الحضري ينطوي على فرصة ربما لا تتكرر للحد من تداعيات تغير المناخ عن طريق التخطيط الحضري المستدام وتطوير نظام النقل العام وتعزيز كفاءة استخدام الطاقة والتحول نحو استخدام المركبات العالية الكفاءة والصديقة البيئة. وبتسليط الضوء على دور المركبات والازدحام المروري يتضح لنا أنهما لا يمثلان فحسب مصدرين لانبعاثات ثاني أكسيد الكربون في المناطق الحضرية، لكنهما أيضًا مجالان أساسيان يمكن أن تؤدي التدخلات فيهما إلى تحقيق منافع بيئية ملموسة (Kamal-Chaoui and Robert 2009)، فعن طريق اجتياز التحديات الناجمة عن المركبات والازدحام المروري، تستطيع المدن أن تقطع أشواطًا واسعة نحو خفض بصمتها الكربونية وتعزيز استدامتها.

1.2. الازدحام المروري في المدن المعتمدة على السيارات

تُعد مدينة الرياض مثالًا للمدن التي تعتمد اعتمادًا كثيفًا على السيارات الشخصية في التنقل؛ إذ تشير الدراسات إلى أن جميع سكان مدينة الرياض تقريبًا يعتمدون على السيارات في جميع تنقلاتهم، مما أفرز تحديات عدة، منها التمدد العمراني العشوائي والتركيز على تلبية متطلبات السيارات على حساب وسائل النقل الأخرى (Al-Mosaind 1998; Al Zohbi 2021).

تناولت دراسات أكاديمية كثيرة مشكلة الازدحام المروري المتفاقمة في مدينة الرياض، واقترحت الحلول الممكنة لمعالجتها. فقد نبَّهت دراسة (Al-Mosaind 1998) قبل أكثر من عقدين إلى هذه المشكلة، مؤكدة ضرورة اعتماد سياسات متكاملة لاستغلال الأراضي للتعامل مع هذه المشكلة والحد من تداعياتها. واستكشفت دراسة (Youssef, Alshuwaikhat, and Reza 2021) إمكانية تخفيف حدة الازدحام المروري من خلال تشجيع التحول إلى الاعتماد على أنماط نقل بديلة مثل استحداث نظام نقل عام للحد من الاعتماد على المركبات الخاصة وتحسين انسيابية الحركة المرورية في المناطق الحضرية. واقترحت دراسات أخرى حلولًا تعتمد أكثر على الجانب التقني مثل التقنيات الجديدة لإنترنت الأشياء. فاقترحت مثلًا دراسة (Al-Majhad et al. 2018) إطارًا مبتكرًا لإدارة الازدحام المروري يستند إلى تقنيات إنترنت الأشياء بهدف إمداد السكان بمعلومات آنية عن حالة المرور وتحسين إدارة الحركة المرورية في المدن. ويؤكد مجمل هذه الدراسات أهمية اعتماد نهج شامل في معالجة هذه المشكلة، فهذا ضروري للحد من آثارها البيئية والاقتصادية السلبية على المراكز الحضرية (Al-Zohbi, 2021).

وحظيت العلاقة بين الازدحام المروري وانبعاثات ثاني أكسيد الكربون باهتمام واسع من جانب الأبحاث والدراسات العلمية. فتناولت مثلًا دراسة (Barth and Boriboonsomsin 2008) العلاقة بين مستويات الازدحام المروري ومتوسطات سرعات المركبات وانبعاثات ثاني أكسيد الكربون، مشيرة إلى أن تدهور الأحوال المرورية يسهم إسهامًا مباشرًا في زيادة هذه الانبعاثات. وكشفت الدراسة بالتفصيل كيف أن تزايد الازدحام وما يصاحبه من انخفاض في متوسطات سرعات المركبات يؤدي إلى اتباعها نمط القيادة القائم على تكرار التوقف والتحرك، مما ينتج عنه ارتفاع ملحوظ في انبعاثات ثاني أكسيد الكربون. وأبرزت دراسة (Zhang and Batterman 2013) الصلة بين طول فترات

الازدحام المروري وتزايد الانبعاثات، ما يُفرز تحديات جسيمة تتعلق بجودة الهواء والصحة العامة. ومن جانبها أكدت دراسة (Sitati et al. 2022) التأثير البالغ للازدحام المروري في نسب انبعاثات ثاني أكسيد الكربون على مستوى الشوارع، وما يترتب على ذلك من تداعيات بيئية ضارة. وتؤكد هذه الدراسات في مجملها الحاجة الملحة إلى إستراتيجيات فعالة للحد من الازدحام المروري، بهدف تخفيف العبء الواقع على البيئة بسبب الازدحام المروري في المناطق الحضرية.

2.2. دور التنقل الذكي

تتجلى علاقة الارتباط المتبادلة بين المدن الذكية وأنظمة التنقل الذكي في اعتماد كل منهما على التقنيات المتقدمة والحلول القائمة على البيانات في تحسين البنية التحتية الحضرية وأنظمة النقل. وتؤدي هذه الحلول دورًا مهمًا في تعزيز الاستدامة عن طريق الحد من الازدحام المروري وخفض الانبعاثات وتحسين إدارة الموارد والارتقاء بجودة الحياة. وقد أبرز تقرير يتناول أهداف التنمية المستدامة للأمم المتحدة في مجالي النقل والتنمية (United Nations 2021) الدورَ المحوري للمدن الذكية وأنظمة النقل الذكية في دفع عجلة التنمية الحضرية المستدامة. وبالنظر إلى أن المدن يعيش فيها أكثر من نصف سكان العالم، وهي نسبة مرشحة للزيادة بحسب التوقعات، فإنها تضطلع بدور جوهري في تعزيز مبادرات النقل المستدام. ويُعد اعتماد تقنيات المدن الذكية، ومنها أنظمة النقل الذكية، أمرًا ضروريًا للارتقاء بجودة الحياة في المدن، وتعزيز كفاءتها التشغيلية، والحفاظ على قدرتها التنافسية.

تعمل هذه التقنيات على تيسير إدارة النقل الحضري باستخدام تطبيقات متطورة تشمل خدمات طلب المركبات عبر الإنترنت وأنظمة الملاحة المرورية الآنية وأنظمة مواقف السيارات الذكية. كما أن التكامل بين تقنيات إنترنت الأشياء والبيانات الضخمة التي منها بيانات السيارات المتنقلة، يُعد ضروريًا لتطوير الخدمات لا سيما في مجال التخطيط المروري المستدام الذي يؤدي دورًا محوريًا في تعزيز الاستدامة البيئية للنقل الحضري.

ومن الضروري دمج مصادر بيانات التنقل المختلفة مثل بيانات النقل العام وأجهزة استشعار الطرق والدراسات المسحية ووسائل التواصل الاجتماعي، أن تُدمَج جميعًا في قواعد بيانات متكاملة بهدف رسم خريطة شاملة للتنقل الحضري تعتمد عليها المدن الذكية (Faria et al. 2017). وتكمن أهمية أنظمة النقل الذكي في قدرتها على الحد من الازدحام المروري وتقليص أوقات التنقل وتقليل الحوادث المرورية عن طريق تمكين الركاب من تخطيط رحلات تنقلهم وفق احتياجاتهم (Bıyık et al. 2021).

وفي إطار جهود المملكة العربية السعودية الرامية إلى الاستفادة من التقنيات المتقدمة بغرض مواجهة التحديات الحضرية، أسست الهيئة السعودية للبيانات والذكاء الاصطناعي (سدايا) عام 2024 مركز التميز لحلول الازدحام باستخدام البيانات والذكاء الاصطناعي. يتمحور اهتمام المركز حول تطوير حلول ذكية قائمة على البيانات والذكاء الاصطناعي بهدف تحسين إدارة الحركة المرورية والحد من الازدحام، سعيًا إلى تحقيق نقلة نوعية في جودة حياة سكان المدن (SPA 2024). ويهتم المركز بتعزيز الحلول الذكية في القطاعات الحكومية المختلفة لدعم وضع السياسات بالاستناد إلى البيانات، فمثل هذه السياسات ضرورية لتعزيز الاستدامة والكفاءة في المدن. ويُعد إنشاء هذا المركز تجسيدًا لالتزام المملكة باعتماد الحلول الذكية القائمة على الذكاء الاصطناعي في اجتياز التحديات الحضرية.

3. المنهجية

ترتكز الدراسة الحالية على منهجية يُستعان فيها ببيانات السيارات المتنقلة من أجل تقدير استهلاك الوقود وكفاءة المركبات في ظل ظروف قيادة محددة. ويُستخدم التوزيع المكاني للبيانات المجمعة في تحليل قطاعات مختلفة من الطرق، مع التركيز على مجموعة منتقاة من الطرق العامة في مدينة الرياض. وقد اختيرت هذه الطرق بناءً على سعتها العالية وبحيث يكون الحد الأقصى للسرعة فيها 120 كيلومترًا في الساعة، من أجل ضمان إمكانية المقارنة بينها. وشملت الدراسة أيضًا طريق الملك فهد، رغم بلوغ الحد الأقصى للسرعة فيه 100 كيلومتر في الساعة، لأن البحوث تعتبره من طرق مدينة الرياض الأكثر تأثرًا بمشكلات الازدحام المروري (Al-Mosaind 1998).

1.3. بيانات السيارات المتنقلة

تُجمع بيانات السيارات المتنقلة من المركبات المزودة بنظام تحديد المواقع العالمي، وتوفر هذه البيانات معلومات تفصيلية عن حركة المركبات مثل إحداثيات خطوط الطول ودوائر العرض والسرعة والتوقيت الزمني، وهي معلومات يمكن استخدامها في تحليل أنماط حركة المرور وتقدير استهلاك الوقود والانبعاثات.

1.1.3. التحديات المرتبطة بالبيانات التجارية للسيارات المتنقلة

يُعد تفاوت معدل تغطية البيانات أحد التحديات الرئيسة المرتبطة ببيانات السيارات المتنقلة، إذ يؤثر تأثيرًا كبيرًا في دقة البيانات وموثوقيتها. ويشير معدل التغطية إلى نسبة المركبات المزودة بقدرات نقل البيانات ضمن حركة المرور الكلية. وينتج عن انخفاض معدل التغطية بيانات محدودة ربما لا تعكس بدقة ظروف حركة المرور، مما يُسفر عن تحيزات وأخطاء محتملة في التحليلات (Fourati, Dabbas, and Friedrich 2021). وفي دراسة (Altintasi, Tuydes-Yaman, and Tuncay 2022)، أكد الباحثون ضرورة دمج بيانات السيارات المتنقلة مع البيانات الواقعية. وأشاروا إلى أن البيانات المستمدة من الجهات التجارية لا تتبع معايير موحدة في أغلب الأحيان بسبب اختلاف التقنيات والمنهجيات، الأمر الذي يزيد من صعوبة دمج البيانات من مصادر متعددة والمقارنة بينها. بالإضافة إلى ذلك، يمكن أن تتضمن قواعد البيانات التجارية قيودًا خاصة بالملكية، مما يؤثر سلبًا على شفافية البيانات وقابلية التحقق منها (Leduc 2008; Gitahi et al. 2020). لكن الشواغل المتعلقة بمعدلات تغطية البيانات لا تسلب قواعد البيانات الموثوقية. فقد توصلت بعض الدراسات بالفعل أنه حتى معدلات التغطية المنخفضة التي تتراوح بين 10٪ و14٪ كافية لقياس مَعلمات بعينها بدقة، مثل مدة الرحلة، إلا أن قياس مؤشرات أخرى مثل الكثافة المرورية أو الحجم فعادةً ما يعتمد على العدد الإجمالي للسيارات التي سُجلت على الطريق (Altintasi et al. 2022; Wang et al. 2015). وينصب تركيز الدراسة الحالية على ارتفاع معدلات استهلاك الوقود نتيجة زيادة الازدحام المروري وانخفاض السرعات، بناءً على افتراض مفاده أن المركبات المتنقلة على القطاعات المحددة من الطرق سيارات ركاب تقليدية.

2.1.3. سمات البيانات المجمعة والنطاق الجغرافي

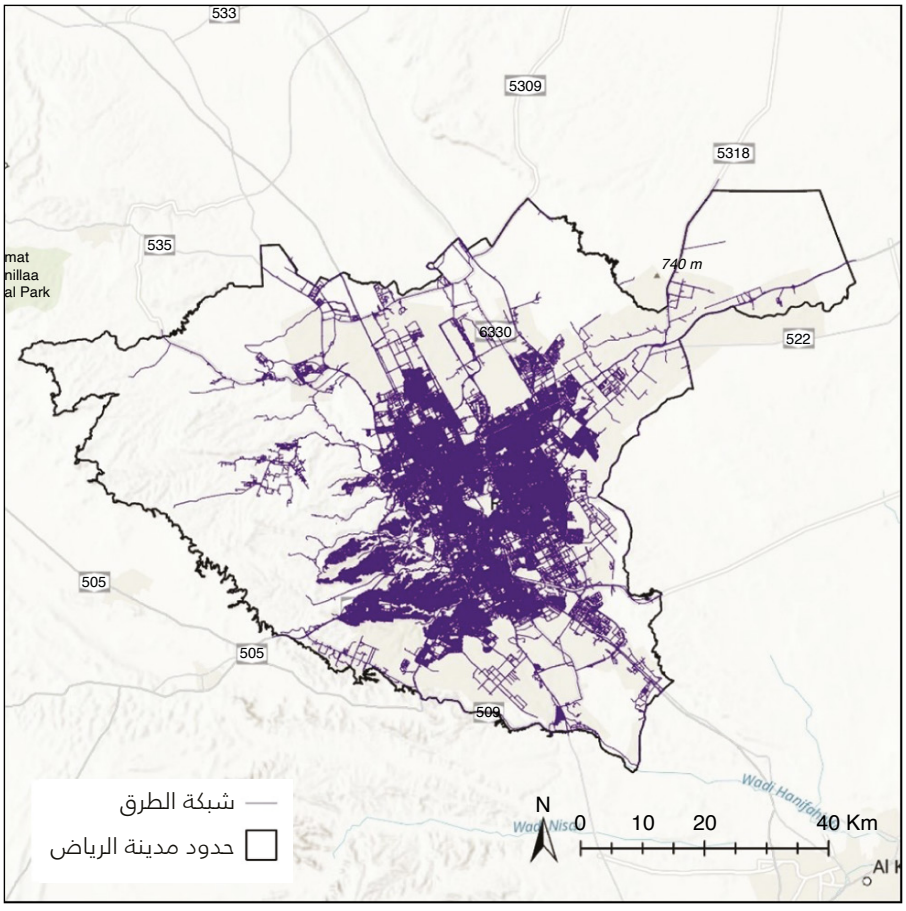
استخلصنا البيانات المرورية المستخدمة في هذه الدراسة من إحصائيات (TomTom 2024a). ويركز التحليل الوارد في الدراسة الحالية على بيانات حركة مرور سيارات الركاب المجمعة خلال أيام العمل الأسبوعية (من الأحد إلى الخميس). ولأغراض دراسة الحالة هنا، اقتصر النطاق الجغرافي على مدينة الرياض فقط، وفقًا للحدود الرسمية المبينة في الشكل 1. كما عالجنا البيانات المرورية للحصول على مؤشرات متوسطة لكل ساعة في كل قطاعات الطرق، مما أمدنا بتوصيف تفصيلي لحركة المرور الحضرية في مدينة الرياض لكل ساعة.

استنادًا إلى التصنيف الوظيفي للطرق (FRC) الذي وضعته شركة توم توم (TomTom)، يمكن تقسيم الطرق إلى فئات بناءً على ما تقدمه من خدمات لتيسير حركة المركبات بين مختلف

المناطق مثل المدن والبلدات والمراكز الترفيهية. ويتضمن التصنيف الفئات الآتية: الفئة 0 FRC التي تشمل الطرق السريعة والطرق العامة، والفئة 1 FRC التي تشمل الطرق العامة الأقل أهمية نسبيًا والفئة 2 FRC التي تشمل الطرق العامة الأخرى، والفئة 3 FRC التي تشمل الطرق الفرعية والفئة 4 FRC التي تشمل الطرق الداخلية الرابطة والفئة 5 FRC، التي تشمل الطرق الداخلية عالية الأهمية والفئتين 6 FRC و7 FR اللتين تشملان الطرق الداخلية متفاوتة الأهمية، وأخيرًا الفئة 8 FRC التي تشمل جميع الطرق الأخرى التي تكون تُخصَّص عادةً للمشاة والدراجات (TomTom 2024c). وفي تحليلنا هنا، استبعدنا الفئة 8 FRC لأنها تركز على المسارات غير المخصَّصة للمركبات.

- ويقتصر التحليل على مجموعة فرعية من بيانات السيارات المتنقلة تركز على سيارات الركاب، في ضوء الافتراضات والضوابط الآتية:
- البيانات منظمة مكانيًا على شكل شبكة ومسجلة على مستوى قطاعات الطرق، ويمثّل كل سجل قطاعًا محددًا، وينطوي على تفاصيل مثل تفاوت متوسطات السرعات، وتصنيفات الطرق، ومتوسط مدة الرحلة، وأسماء الطرق، وأطوال القطاعات (الشكل 1).
- لا تخص البيانات المجمعة سوى سيارات الركاب خلال 20 يومًا من أيام العمل (من الأحد إلى الخميس) في شهر أكتوبر 2022.
- نفترض أن قاعدة البيانات الفرعية للسيارات الخاصة المستخلصة من بيانات السيارات المتنقلة تمثّل فقط استهلاك البنزين خلال تلك الفترة الزمنية المحددة.
- تتنوع فئات الطرق تبعًا لتصنيفها الوظيفي في قاعدة البيانات الفرعية، وتشمل الفئات من 0 FRC إلى 7 FRC.

الشكل 1. النطاق الجغرافي والزمني للبيانات المستخدمة في دراسة مدينة الرياض.



المصدر: بيانات الشبكة من تقرير (TomTom 2024a)، وتقتصر على الحدود الموضحة.

يبلغ إجمالي طول الطرق في قواعد البيانات 39,437 كيلومترًا، كما هو مبين في الشكل 1.

3.1.3. قياس الازدحام المروري

ثمة طرق عدة لقياس الازدحام المروري، فهناك مقاييس كثيرة وُضعت لتقييم جوانب الأداء المختلفة مثل السرعة ومدة الرحلة ومدى التأخير ومستوى الخدمة ومؤشرات الازدحام. وصحيح أن الازدحام المروري كثيرًا ما يُقاس باستخدام مؤشرات مثل نسب التأخير والمؤشرات المتعلقة بمدة الرحلة، لكن منهجيتنا تركز على المؤشرات ذات الصلة بالسرعة (Afrin and Yodo 2020). فنستخدم في الدراسة مؤشر انخفاض السرعة (SRI) لقياس الازدحام المروري لأنه يتسق مع هدفنا لفهم كيفية تأثير تفاوت السرعة في معدلات استهلاك الوقود. وهذا ضروري لتقدير تأثير تفاوت السرعات في الكفاءة الكلية لاستهلاك الوقود.

نحصل على مؤشر انخفاض السرعة عن طريق حساب الفرق بين متوسط سرعة المركبة والحد الأقصى للسرعة، ونعبّر عن هذا الفرق بنسبة من الحد الأقصى. تُتيح هذه الطريقة مقياسًا بسيطًا وبديهيًا للازدحام المروري، وتعكس مدى تباطؤ الحركة المرورية بالمقارنة مع الحالة المثالية لتدفقها دون عوائق. ويُحسب مؤشر انخفاض السرعة كالآتي:

$$SRI = \max\left(0, \frac{\text{Speed Limit} - \text{Average Speed}}{\text{Speed Limit}}\right) \quad (1)$$

يتفق هذا النهج مع النهج الذي طرحته دراسة (Afrin and Yodo 2020) ودراسة (Rao and Rao 2012)؛ إذ ترصد المعادلة درجة انخفاض السرعة في ظروف الازدحام المروري. لكننا فكرنا في إجراء تعديل واحد، وهو عدم ضرب النتائج في 10، كي يتراوح المقياس من 0 إلى 1 بدلًا من 0 إلى 10. هذا إلى جانب أننا أردنا ضمان ألا تكون قيمة المؤشر سالبة، حتى نستبعد الحالات التي تتجاوز فيها المركبات السرعة المقررة على الطريق كي ينصب تركيزنا على ظروف انسياب الحركة المرورية دون عوائق.

3.2. تقدير استهلاك الوقود

1.2.3. مراعاة ظروف القيادة في المناطق الحضرية

أظهرت البحوث أن سلوكيات القيادة مثل زيادة السرعة وتشغيل المحرك في وضع الوقوف، ونمط القيادة القائم على تكرار التوقف والتحرك، كلها تؤثر تأثيرًا شديدًا في انبعاثات المركبة. فمثلًا، تؤدي القيادة الجريئة والمتهورة عادة إلى زيادة معدلات استهلاك الوقود وارتفاع نسب الانبعاثات مقارنة بالقيادة المعتدلة والسلسة (Wang et al. 2019). كما يؤدي تكرار توقف السيارة في أثناء تشغيل المحرك والتغيير المستمر في السرعة إلى زيادة نسب الانبعاثات، وهي سلوكيات شائعة في البيئات الحضرية المزدحمة. وهكذا فإن فهم سلوكيات القيادة وتغييرها يمكن أن يلعب دورًا حاسمًا في خفض الانبعاثات الكربونية للمركبات (Wang et al. 2019). وبالمثل يمكن تقليص الانبعاثات عن طريق الحد من الازدحام المروري الذي يؤدي إلى تكرار التوقف والتحرك.

وترتكز الدراسة الحالية على منهجية مشابهة لتلك التي تبنتها الدراسات السابقة التي تناولت العلاقة بين متوسط السرعة واستهلاك الوقود والانبعاثات. ونستخدم في التحليل الحالي بيانات متوسط السرعة المُستمَدة من بيانات السيارات المتنقلة الخاصة بتقرير (TomTom 2024a). وقد وضعت الدراسات السابقة مَعلمات خاصة تركز في المقام الأول على سرعة المركبة وسماتها.

ووفقًا لدراسات عدة مثل (Barth and Boriboonsomsin 2008) و(Sobrina, Monzón, and Hernandez 2014) و(Song, Yu, and Wu 2016)، تتَّبع العلاقة بين معدل استهلاك الوقود وسرعة المركبة منحنى على شكل حرف U. هذا معناه أن معدل استهلاك الوقود يرتفع في حالة السرعات المنخفضة، وينخفض عندما تقترب السرعة من النطاق المثالي، ثم يزيد مرة أخرى في حالة السرعات العالية. ويتأثر هذا المنحنى بعوامل مثل كفاءة المحرك وقوة السحب الهوائي وقوة مقاومة الدحرجة، وكل هذه العوامل تتفاوت تبعًا لنوع المركبة، وفقًا لما أوضحته تلك الدراسات. وفي حالة السرعات المنخفضة، تكون المحركات أقل كفاءة، فيُستهلك مزيد من الوقود للتغلب على القصور الذاتي والاحتكاك. ومع زيادة السرعة، تصل المحركات إلى نطاقها التشغيلي الأمثل، مما يقلل من معدل استهلاك الوقود لكل وحدة مسافة. لكن في حالة السرعات شديدة الارتفاع، يزيد تأثير السحب الهوائي، مما يستلزم مزيدًا من الطاقة ومن ثمَّ زيادة استهلاك الوقود من جديد. ويختلف الشكل الدقيق لهذا المنحنى تبعًا لنوع المركبة وسعة المحرك، كما أوضحت الدراسات السابقة. فمثلًا نجد أن المنحنى الذي وضعته دراسة (Barth and Boriboonsomsin 2008) اعتمد على معرفة بيانات سرعة المركبة لحظة بلحظة، ودمجها مع البيانات الآنية لحركة المرور، ثم تقسيمها بناءً على مدى اتساق مستويات الخدمة على الطرق، وتطبيق نموذج الانبعاثات الشامل لأنماط القيادة بهدف تقدير انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، وأخيرًا اختارت الدراسة معادلة كثيرة الحدود من الدرجة الرابعة لتمثيل البيانات بأكبر درجة من الدقة.

في المقابل، جمعت دراسة (Sobrino, Monzón, and Hernandez 2014) عوامل استهلاك الوقود من قاعدة بيانات COPERT IV، ووضعت منحنيات استهلاك الوقود استنادًا إلى سرعة كل نوع من أنواع المركبات، مع تعديل المنحنيات باستخدام أساليب الانحدار غير الخطية، وتكييفها بما يتناسب مع دراسات

حالة محددة، من خلال مراعاة بنية أساطيل المركبات، وعوامل تصحيح المسافات المقطوعة سنويًا.

أما دراسة (Song, Yu, and Wu 2016) فجمعت البيانات الواقعية لنشاط المركبات، ووضعت نماذج لتوزيع الطاقة حسب السرعة ونوع المركبة، ثم حسبت عوامل تصحيح السرعة عن طريق دمج أنماط التوزيع هذه مع معدلات الانبعاثات.

وبالنسبة إلى دراسة (Ricardo-AEA 2014)، فتوصلت إلى مَعلماتها باستخدام معادلة كثيرة الحدود لتمثيل العلاقة بين

الجدول 1. نظرة على الدراسات التي وضعت منحنيات لتقدير معدل استهلاك الوقود ومستويات الانبعاثات.

نوع المنحنى	مصدر البيانات	السرعة المثلى (عندما يكون الاستهلاك في أدنى مستوياته)	تأثير السرعة المنخفضة (عندما يزيد الاستهلاك)	المرجع
استهلاك الوقود (أنواع وقود مختلفة، منها البنزين والديزل)	بنية أسطول المركبات في المملكة المتحدة على مدار سنوات متنوعة	نحو 75-85 كم/ساعة	45 كم/ساعة أو أقل	Ricardo-AEA 2014
استهلاك البنزين	بيانات سيارات الركاب في إسبانيا التي تقل سعة محركاتها عن 1.4 لتر.	نحو 65-80 كم/ساعة	40 كم/ساعة أو أقل	Sobrino, Monzón, and Hernández 2014
انبعاثات ثاني أكسيد الكربون	بيانات نشاط المركبات المجمعة من مركبات الاستقصاء على الطرق السريعة في جنوب ولاية كاليفورنيا خلال الفترة 2005-2007.	نحو 72-80 كم/ساعة (وهو ما يعادل في الدراسة نحو 45 ميل/ساعة)	نحو 48 كم/ساعة (وهو ما يعادل في الدراسة نحو 30 ميل/ساعة أو أقل)	Barth and Boriboonsomsin 2008
الهيدروكربونات وأكاسيد النيتروجين (NOx) وأول أكسيد الكربون (CO)	بيانات مركبات الأجرة من عام 2005 إلى عام 2012 على طرق محددة في بكين.	بالنسبة إلى الهيدروكربونات: نحو 75-80 كم/ساعة	20 كم/ساعة	Song, Yu, and Wu 2016

عوامل السرعة والانبعاثات بالنسبة إلى مختلف فئات المركبات. وبعد ذلك عدّلت الدراسة هذه العوامل وفقًا لجودة الوقود ومدى تدهور أنظمة التحكم في الانبعاثات بالمركبات، ووضعت أوزانًا ترجيحية للمَعلمات استنادًا إلى بنية أساطيل المركبات في كل فئة. وفي النهاية، عدّلت الدراسة المنحنيات كي تتسق مع البيانات الواقعية. ويعرض الجدول 1 أدناه المنحنيات التي توصلت إليها الدراسات المذكورة.

نستخدم هنا مَعلمات تقرير (Ricardo-AEA 2014) الخاص بقاعدة البيانات الوطنية للانبعاثات الجوية في المملكة المتحدة (NAEI)، الذي يعكس بنية أساطيل المركبات في المملكة المتحدة، ما يتيح لنا وضع منحنى استهلاك مماثل للمملكة العربية السعودية. يتضمن التقرير الخاص بالمملكة المتحدة مَعلمات خاصة بالسيارات التي تعمل بالبنزين، وهو ما ينسجم مع محور تركيز الدراسة الحالية وهو استهلاك البنزين في سيارات الركاب.

تستند المَعلمات التي وضعناها إلى دالة للسرعة تمثّل ديناميات ظروف القيادة في المناطق الحضرية، حسبما هو مبين في الجدول 2. وعادة ما تتحدد هذه المَعلمات من خلال مراعاة عوامل

الجدول 2. مَعلمات استهلاك الوقود.

فئة المركبة	المَعلمات					
	a	b	c	d	الحد الأدنى للسرعة (كم/ساعة)	الحد الأقصى للسرعة (كم/ساعة)
سيارة تعمل بالبنزين	0.45195	0.09605	0.00109-	0.000007	10	130

المصادر: NAEI (2019); UK Department of Transport (2018).

مثل سعة المحرك ووزن المركبة وغيرها من المتغيرات ذات الصلة التي تؤثر في استهلاك الوقود.

يمكن تمثيل الدالة بالمعادلة الآتية:

$$FC = w\frac{a}{v} + b + cv + dv \quad (2)$$

حيث:

- يشير الرمز FC إلى استهلاك الوقود (باللتر لكل كيلومتر [لتر/كم])[1]
- الرمز V يشير إلى متوسط سرعة التنقل (كيلومتر في الساعة [كم/ساعة])
- المَعلمات a وb وc وd لكل فئة من المركبات تتضمن سيناريوهات مختلفة للسرعة، من القيادة البطيئة في المناطق الحضرية إلى القيادة الأسرع على الطرق السريعة.

وتعكس هذه المَعلمات التفاوت في استهلاك الوقود بالنسبة إلى السرعات المختلفة للمركبات في المملكة المتحدة، استنادًا إلى بيانات بنية أسطول المركبات لعام 2015. وقد وُضع نطاق السرعة ليتراوح بين 10 كم/ساعة و130 كم/ساعة ليطابق سيناريوهات القيادة الواقعية التي نشهدها داخل حدود المدن، والتي تتنوع بين تباطؤ حركة المرور، وتكرار التوقف والتحرك، وانفتاح الطرق بين الحين والآخر لتسمح بزيادة السرعة. ويمثّل الحد الأدنى من النطاق (10 كم/ساعة) حركة المرور على الطرق المزدحمة بالمدن أو المناطق السكنية، فيما يشير الحد الأقصى (130 كم/ساعة) إلى حركة المرور على الطرق الحضرية السريعة أو العامة التي يمكن للمركبات أن تتحرك عليها بسرعات أعلى. يضمن هذا النطاق إمكان تمثيل منحنيات الانبعاثات الناتجة لغالبية ظروف القيادة في المناطق الحضرية، مما يوفر لنا نظرة شاملة بشأن انبعاثات المركبات في ظل السرعات المختلفة.

وعلى الرغم من أن النهج المتبع في تقرير (Ricardo-AEA 2014) يقدم لنا رؤى كاشفة، من الأهمية بمكان ملاحظة أن طريقة النمذجة الميزوسكوبية المستخدمة هنا لا تأخذ في الحسبان التفاعلات الفردية بين المركبات التي نراها في النماذج الميكروسكوبية (Ferrara, Sacone, and Siri 2018). وصحيح أنه من الممكن تحديد أنماط الازدحام على الطرق عالية السعة، لكن الطبيعة الميزوسكوبية للمنهجية التي تضمنتها دراستنا لا تراعي السلوكيات الفردية للمركبات في الأحياء الصغيرة؛ إذ يمكن أن تنعطف المركبات أو تتوقف عند إشارات المرور. ومع ذلك، فإن هذه المنهجية ملائمة لدراسة التأثيرات واسعة النطاق على مستوى المدن والمناطق الأكبر. ولجعل النموذج أكثر شمولية، يمكن تصميم نموذج لمحاكاة الحركة المرورية يجمع بين الطريقة الميزوسكوبية والميكروسكوبية من أجل تحسين تحليلات استهلاك الوقود عن طريق سد الفجوة بين سلوكيات شبكة المرور واسعة النطاق وديناميات القيادة في مختلف المناطق. فمن الممكن أن يصبح النموذج الهجين قادرًا على التعامل مع هذه القيود عن طريق دمج محاكاة شبكة المرور الأوسع نطاقًا مع التفاعلات التفصيلية بين المركبات، على النحو الذي يتيح رؤى أكثر دقة عن كيفية تأثر استهلاك الوقود بالازدحام المروري على الطرق العامة وسلوكيات القيادة في المناطق الأصغر، مثل تكرار التوقف أو الانعطاف (Burghout, Koutsopoulos, and Andreasson 2005). ومثل هذا النهج المتكامل سيتيح لنا فهمًا أكثر شمولًا لظروف الحركة المرورية، وهو من المسائل المهمة التي يجب أن تنظر فيها البحوث المستقبلية ذات الصلة بسياق الدراسة الحالية.

2.2.3. تقدير استهلاك الوقود استنادًا إلى بنية أسطول المركبات في المملكة العربية السعودية

لكي يتسنى لنا استخدام هذه المَعلمات لتقدير استهلاك الوقود في مدينة الرياض، نفترض أن بنية أسطول المركبات في المملكة المتحدة مماثل لبنيته في مدينة الرياض. ويصنف تقرير (NAEI 2019) الفئات المكونة لأسطول المركبات في المملكة المتحدة تبعًا لسعة المحرك، وقد طبّقنا هذا النهج باستخدام توزيع أنواع السيارات في المملكة العربية السعودية لعام 2023، بناء على تقرير المركز الصناعي عن قطاع السيارات

(IC 2024)، ثم أوضحنا سعة المحركات في أنواع السيارات هذه في ضوء بيانات سوق السيارات التجارية المستمدة من موقع «موتري» (Motory 2022).

تضمَّنت بيانات سوق السيارات ما يزيد على 2000 نوع من السيارات مع تحديد مواصفاتها، بيعت في المملكة العربية السعودية خلال الفترة بين عامي 2020 و2023. وساعدتنا البيانات المستقاة من المركز الصناعي على تنقيح حساباتنا، وهي بيانات تشمل التوزيع النسبي للعلامات التجارية للسيارات المبيعة. ثم حدَّدنا أوزانًا لتوزيع علامات السيارات W_brandi ولأنواع هياكل السيارات w_bodyTypei بناءً على بيانات المركز الصناعي (IC 2024)، وربطنا هذه الأوزان بسعة المحركات بناء على مدى شيوع العلامات التجارية وأنواع المركبات في السوق. وأتاح لنا هذا النهج تمثيلًا أكثر دقة لأسطول المركبات المحلي في حساباتنا.

قدَّرنا النسبة المئوية لكل فئة من المحركات في السعودية من خلال المعادلة الآتية:

$$KSA\ percentage\ for\ each\ engine\ category_j = \left(\frac{\sum_{i \in j} \left(w_brand_i \times w_bodyType_i \right)}{\sum_k \sum_{i \in k} \left(w_brand_i \times w_bodyType_i \right)} \right) \quad (3)$$

إذ:

- الرمز j يمثل فئة المحرك.
- الرمز $i \in j$ يمثل السيارات المصنفة ضمن فئة المحرك j.
- الرمز k يمثل كل فئات المحركات.

يعرض الجدول 3 استهلاك الوقود بالغالون لكل كيلومتر (غ/كم) لثلاث فئات من سعات المحركات، بالإضافة إلى النسب المئوية لبنية أسطول المركبات في المملكة العربية السعودية والمملكة المتحدة. كما يعرض المتوسط الترجيحي لاستهلاك الوقود، والنسبة بين هذا المتوسط في السعودية والمملكة المتحدة.

ونلاحظ في الجدول أن قيم استهلاك الوقود المقدَّرة بالغالون لكل كيلومتر (غ/كم) تُمثل متوسط كمية الوقود المستهلكة لكل كيلومتر تقطعه المركبات ذات سعات المحركات المختلفة.

الجدول 2. مَعلمات استهلاك الوقود.

سعة المحرك (باللتر)	استهلاك الوقود للسيارة النموذجية (غ/كم)	بنية الأسطول في المملكة العربية السعودية (٪)	بنية الأسطول في المملكة المتحدة (٪)
صغيرة (سعة المحرك < 1.4 لتر)	56	%2.2	%49.2
متوسطة (سعة المحرك من 1.4 إلى 2.0 لتر)	66	%32.1	%40.2
كبيرة (سعة المحرك > 2.0 لتر)	86	%65.9	%10.7
المتوسط الترجيحي لاستهلاك الوقود (غ/كم)	78.9		63.3
النسبة بين القيمة المتوسطة الترجيحية لاستهلاك الوقود في المملكة العربية السعودية ونظيرتها في المملكة المتحدة	1.25		

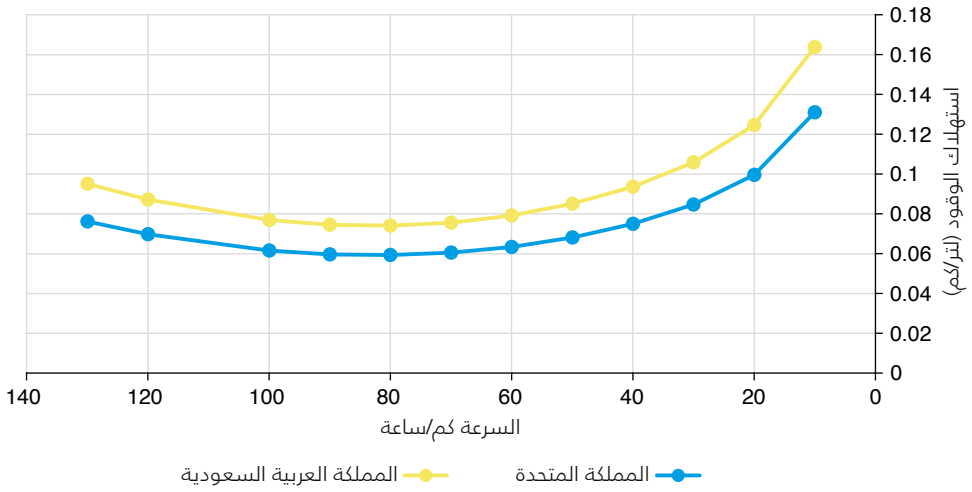
المصدر: مؤلفو الدراسة.

استقينا هذه القيم من الدليل الإرشادي لبيانات انبعاثات ملوثات الهواء الذي وضعه برنامج المتابعة والتقييم الأوروبي بالتعاون مع الوكالة الأوروبية للبيئة في عام 2019 ونشرته دراسة (Ntziachristos and Samaras 2019).

واستندنا إلى البيانات المتعلقة ببنية أسطول المركبات في المملكة المتحدة لعام 2015 لأنها كانت السنة المرجعية لرسم منحنى استهلاك الوقود في المعادلة (2). واستمددنا بيانات تكوين أسطول المركبات في المملكة العربية السعودية من تقرير المركز الصناعي وبيانات «موتري» (Motory 2022).

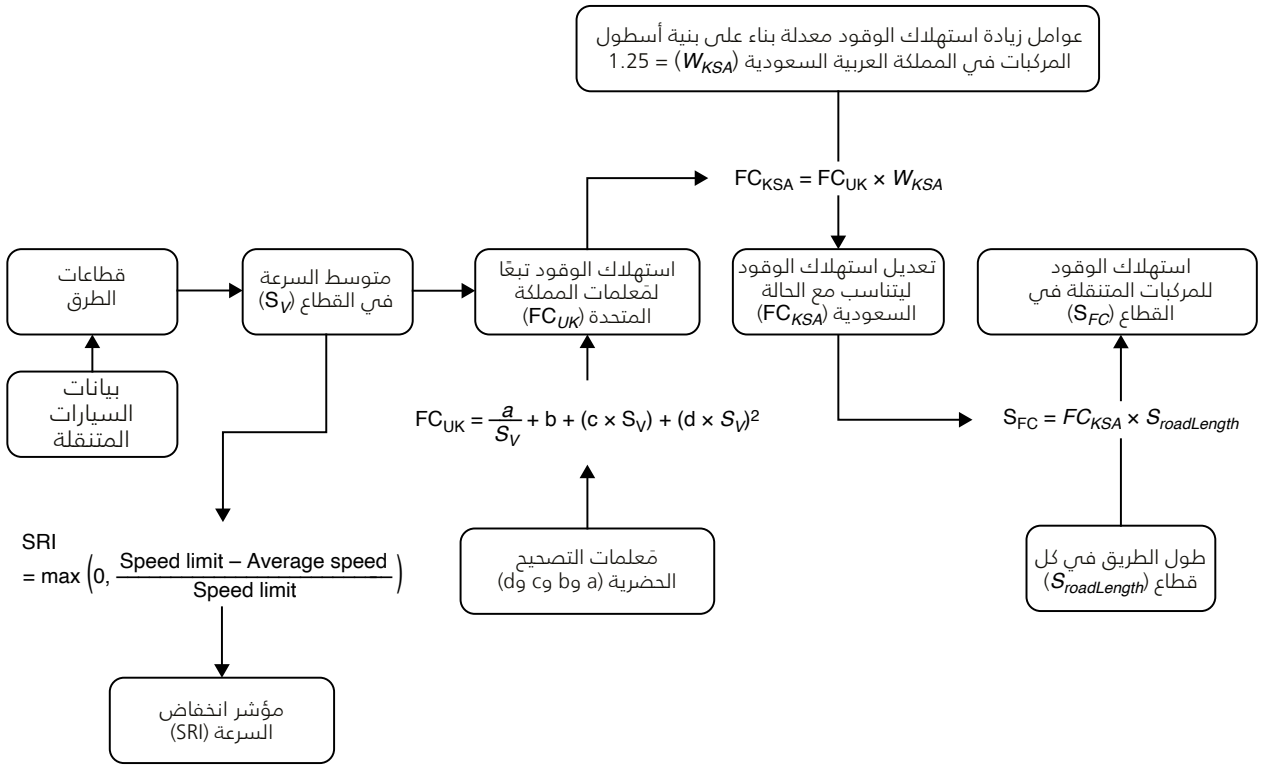
تُظهر حسابات المتوسط الترجيحي لاستهلاك الوقود W_{ksa} أن أسطول المملكة العربية السعودية يستهلك وقودًا أكثر بنسبة 25٪ من أسطول المملكة المتحدة. ويرجع هذا الاختلاف إلى البنية المتمايز لأسطول المركبات في كل من الدولتين. وعليه، عند تعديل قيم استهلاك الوقود في المملكة المتحدة كي تتناسب مع الظروف السعودية، تؤخذ هذه النسبة الزائدة في الحسبان، ومن ثم تعدل القيم كي تراعي ظروف القيادة في

الشكل 2. معدلات استهلاك الوقود حسب السرعة في المملكة المتحدة مقابل المملكة العربية السعودية في ما يتعلق بالسيارات التي تعمل بالبنزين.



المصدر: تقديرات مؤلفي الدراسة لمعدلات استهلاك الوقود في المملكة المتحدة (U.K. Department of Transport 2018) والمملكة العربية السعودية.

الشكل 3. مخطط توضيحي للمنهجية المستخدمة في تقدير استهلاك الوقود لكل قطاع من الطرق التي تعمل بالبنزين.



المصدر: مؤلفو الدراسة.

المناطق الحضرية وأنواع المركبات السائدة في المملكة العربية السعودية، كما هو مبين في الشكل 2.

أما الشكل 3 فيعرض مخططًا توضيحيًا للمنهجية المستخدمة في تقدير استهلاك الوقود لكل قطاع من الطرق S_{fc}.

وللتحقق من المنطق المستخدم في تحديد قيم استهلاك الوقود، نعقد مقارنة بين كفاءة استهلاك الوقود المشتقة من قيم الاستهلاك المقدَّرة. وتُحسب كفاءة استهلاك الوقود باستخدام المعادلة الآتية:

الجدول 4. العلاقة بين السرعة والقيمة المقدَّرة لاستهلاك الوقود وكفاءة استهلاك الوقود في ما يتعلق بالمركبات التي تعمل بالبنزين في المملكة العربية السعودية.

السرعة (كم/ساعة)	القيمة المقدَّرة لاستهلاك الوقود في ما يتعلق بالمركبات التي تعمل بالبنزين (لتر/كم)	كفاءة استهلاك الوقود (كم/لتر)
10	0.1677376	5.961692548
20	0.1275488	7.840136481
30	0.1084352	9.222097621
40	0.0959344	10.42378959
50	0.08715392	11.47395321
60	0.0811296	12.32595748
70	0.077448229	12.91185116
80	0.0759032	13.17467511
90	0.076379733	13.09247828
100	0.07880896	12.68891253
120	0.0893648	11.19008827
130	0.097441969	10.26251838

المصدر: مؤلفو الدراسة.

$$Fuel\ efficiency\ (Km/L) = \frac{1}{FC_KSA} \quad (4)$$

يعرض الجدول 4 نتائج حساب الكفاءة.

وفقًا لتقديرات المركز السعودي لكفاءة الطاقة، بلغت كفاءة استهلاك الوقود في المركبات الخفيفة في المملكة العربية السعودية نحو 15.5 كم/لتر في عام 2022 (SEEC 2024). لكن تقديراتنا تشير إلى أن كفاءة استهلاك الوقود في هذه المركبات تبلغ نحو 13 كم/لتر في حالة القيادة بالسرعة المثلى (الجدول 4). وأحد الأسباب المحتملة لهذا التباين هو إدراج المركبات الهجينة ضمن تقديرات متوسط اقتصاد الوقود للمركبات الخفيفة (SEEC 2024). وعادة ما تتسم المركبات الهجينة بأن كفاءة استهلاك الوقود فيها أفضل بكثير إذا ما قُورنت بالمركبات التقليدية التي تعمل بالبنزين، ومن ثمَّ ترفع هذه المركبات المتوسط العام لاقتصاد الوقود في المركبات الخفيفة. ومن ثمَّ فإن إدراج المركبات الهجينة يجعل قيم متوسط اقتصاد الوقود تبدو أفضل مما يمكن أن يُلاحَظ في ظل ظروف قيادة معينة، لا سيّما في السيناريوهات التي لا تُستغل فيها المزايا الكاملة لتوفير الوقود التي تتيحها التقنيات الهجينة. وفي ضوء هذه الاعتبارات، يُعد الفارق بين القيم المقدَّرة والمسجلة مقبولًا، نظرًا لأن ظروف القيادة الواقعية مثل التفاوتات في السرعة وحركة المرور وسلوكيات القيادة، لا تعكس دائمًا الظروف المثلى أو التجريبية التي تُحسب على أساسها معايير اقتصاد الوقود للمركبات الخفيفة (Carley et al. 2019).

4. النتائج والمناقشة

بوجه عام نقول إنه عند تحليل النسبة بين الطرق المزدحمة والطرق غير المزدحمة في مدينة ما باستخدام البيانات المكانية والبيانات واسعة النطاق، تكشف لنا تلك النسبة عن المناطق الأكثر ازدحامًا في المدينة. لكن عند دراسة بيانات حركة المرور على نطاق مدينة بأكملها، يصبح من الصعب تحديد أنماط الازدحام. وفي المقابل، يمنحنا التركيز على طرق معينة إمكانية تحديد هذه الأنماط بمزيد من الوضوح، ما يوفر لنا رؤى كاشفة أدق عن التدخلات المستهدفة الممكنة.

1.4. تحديد أنماط الازدحام المروري

عند تحليل زيادة الازدحام المروري من الناحية المكانية، لا بد أن نفهم أن النتائج يمكن أن تختلف اختلافًا كبيرًا باختلاف المنطقة محل الدراسة. ويرجع هذا إلى أن الازدحام غالبًا ما يتركز في مناطق معينة، مع وجود عدد اختلافات كبيرة في ظروف الحركة المرورية، حتى داخل المناطق الجغرافية الصغيرة نسبيًا.

ونركز في هذه المناقشة على طرق عامة معينة في مدينة الرياض، وهي طرق غالبًا ما تواجه مستويات ازدحام متزايدة. ويتضمن الجدول أدناه تلك الطرق.

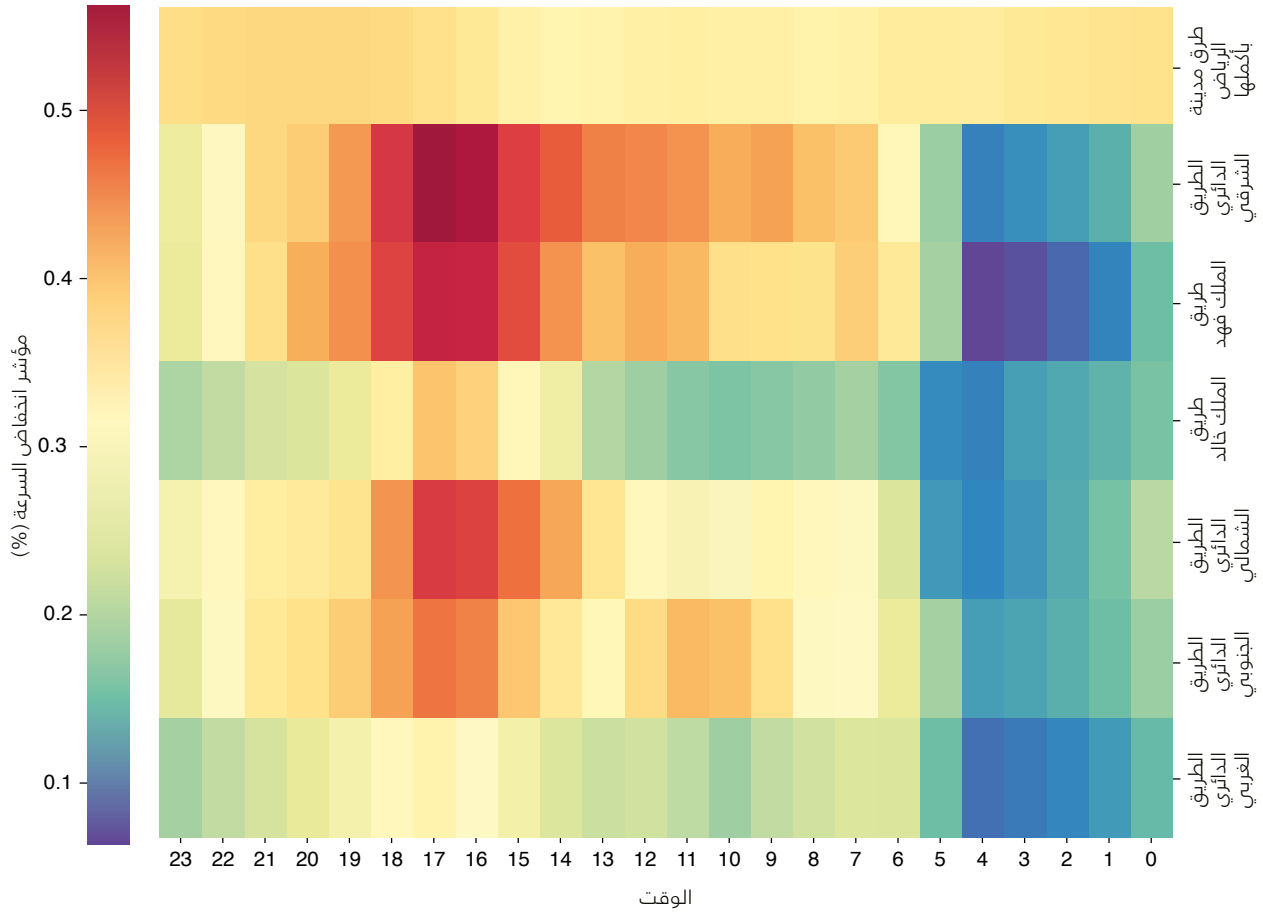
ويشتمل الشكل 1 على تمثيل للمدينة بأكملها في حين يوضح الشكل 7 الأطوال المحددة لهذه الطرق بالتفصيل.

الجدول 5. نظرة عامة على شبكات الطرق الرئيسة المختارة في مدينة الرياض.

الرمز التعريفي	الطريق	طول الطريق (كم)	حد السرعة (كم/ساعة)
CITY-WIDE	الرياض (جميع الطرق)	39,437	غير متوفر
KFR	طريق الملك فهد	49	100
ERR	الطريق الدائري الشرقي	41	120
WRR	الطريق الدائري الغربي	40	120
SRR	الطريق الدائري الجنوبي	38	120
KKR	طريق الملك خالد	31	120
NRR	الطريق الدائري الشمالي	30	120

المصدر: مؤلفو الدراسة.

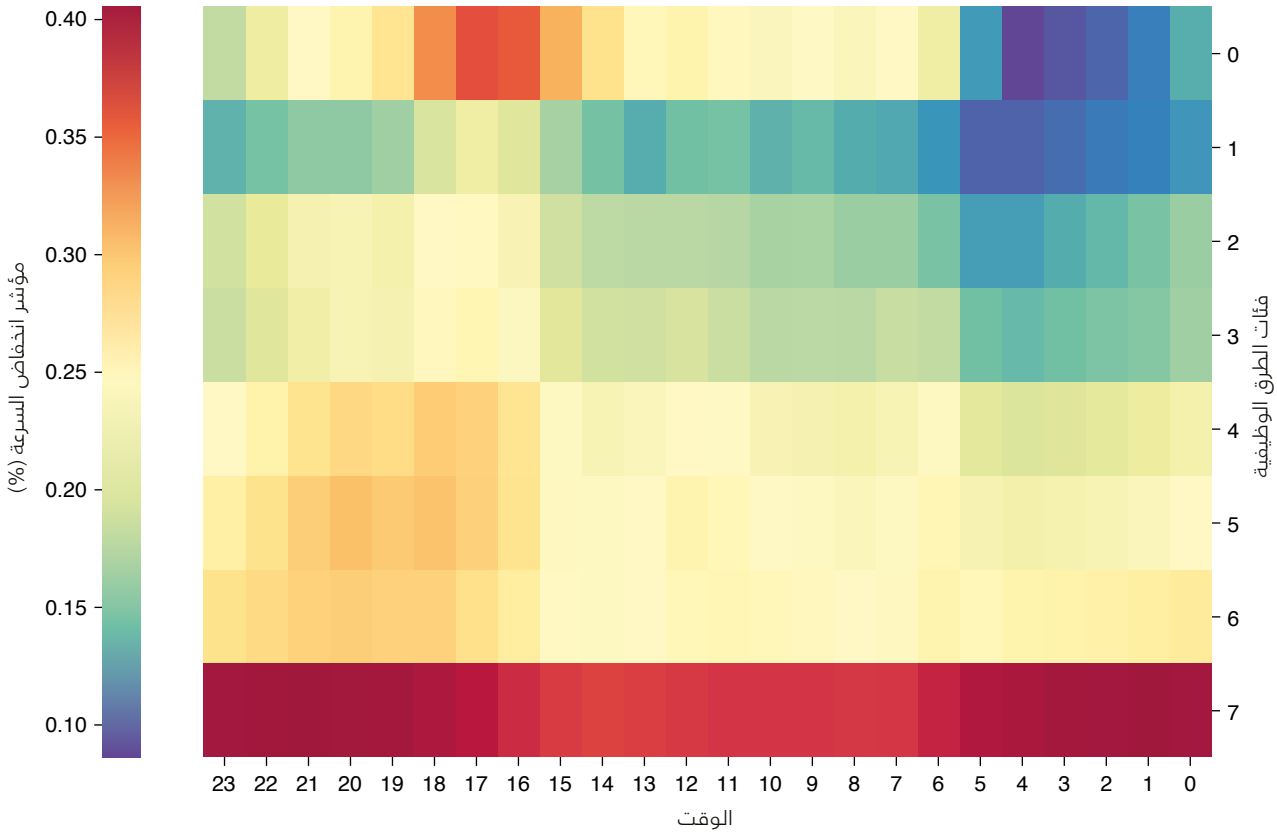
الشكل 4. خريطة حرارية لمؤشر انخفاض السرعة لمختلف الطرق العامة التي شملتها الدراسة، بما في ذلك المؤشر على مستوى المدينة بأكملها وفي أوقات مختلفة من اليوم.



المصدر: نتائج تحليل مؤلفي الدراسة.

يرصد الشكل 4 اتجاهًا ملحوظًا في مؤشر انخفاض السرعة على مختلف الطرق العامة، مع ارتفاع مستويات الازدحام المروري ارتفاعًا مطردًا خلال ساعات الذروة (بين الساعة 15:00 والساعة 19:00). ومن الملاحظ أن الطريق الدائري الشرقي يشهد مزيدًا من الاضطراب في حركة المرور على مدار اليوم، إذ تبقى مستويات الازدحام مرتفعة نسبيًا —أكثر من 30٪— منذ وصولها إلى ذروتها في الصباح، ويتفاقم الازدحام حتى يصل إلى حالة من الاختناق الشديد في حوالي الساعة 17:00، عندما يتجاوز مؤشر انخفاض السرعة 50٪. وعلى النقيض من الطرق الأخرى، فإن دراسة طرق مدينة الرياض بأكملها لا توفر لنا قيمًا واضحة لمؤشر انخفاض السرعة، إذ تقترب القيم في المتوسط من 30٪ في جميع أنحاء المدينة. ويرجع هذا في المقام الأول إلى أن تأثيرات الازدحام المروري على مثل هذا النطاق الواسع تصبح أكثر انتشارًا، وأصعب في رصدها، وعند تحليل شبكة واسعة مثل طرق مدينة الرياض التي يبلغ طولها الإجمالي 39437 كيلومترًا، يتلاشى التفاوت في الازدحام المروري بين منطقة وأخرى، مما يؤدي إلى تغييرات أقل وضوحًا في مؤشر انخفاض السرعة. وتمنحنا دراسة طرق المدينة بأكملها متوسطًا مجمّعًا لأنواع طرق متعددة من بينها الطرق العامة والطرق الداخلية. وبالنظر إلى أن بيانات طرق المدينة بأكملها تتضمن عادةً مجموعة متنوعة من ظروف الطرق (مثل الشوارع الأضيق والمناطق السكنية والطرق الداخلية الأخرى)، فمن المتوقع لمتوسط قيم مؤشر الازدحام أن يكون أعلى من ذلك، كما يتضح في الشكل 4، لأن الطرق الداخلية عادة ما تشتمل على مزيد من التقاطعات، وتكون الحركة المرورية فيها أبطأ ويكثر توقف السيارات بها. وتُسهم هذه العوامل في ارتفاع مستويات الازدحام المروري مقارنة بالطرق العامة. ويتضح هذا في الشكل 5؛ إذ تنخفض السرعات بشدة في طرق الفئة FRC 7، التي توصف بأنها «تغطي الطرق الداخلية متفاوتة الأهمية» (TomTom 2024c) بسبب ضيق هذه الطرق.

الشكل 5. خريطة حرارية لمؤشر انخفاض السرعة لمختلف فئات الطرق الوظيفية في أوقات مختلفة من اليوم.



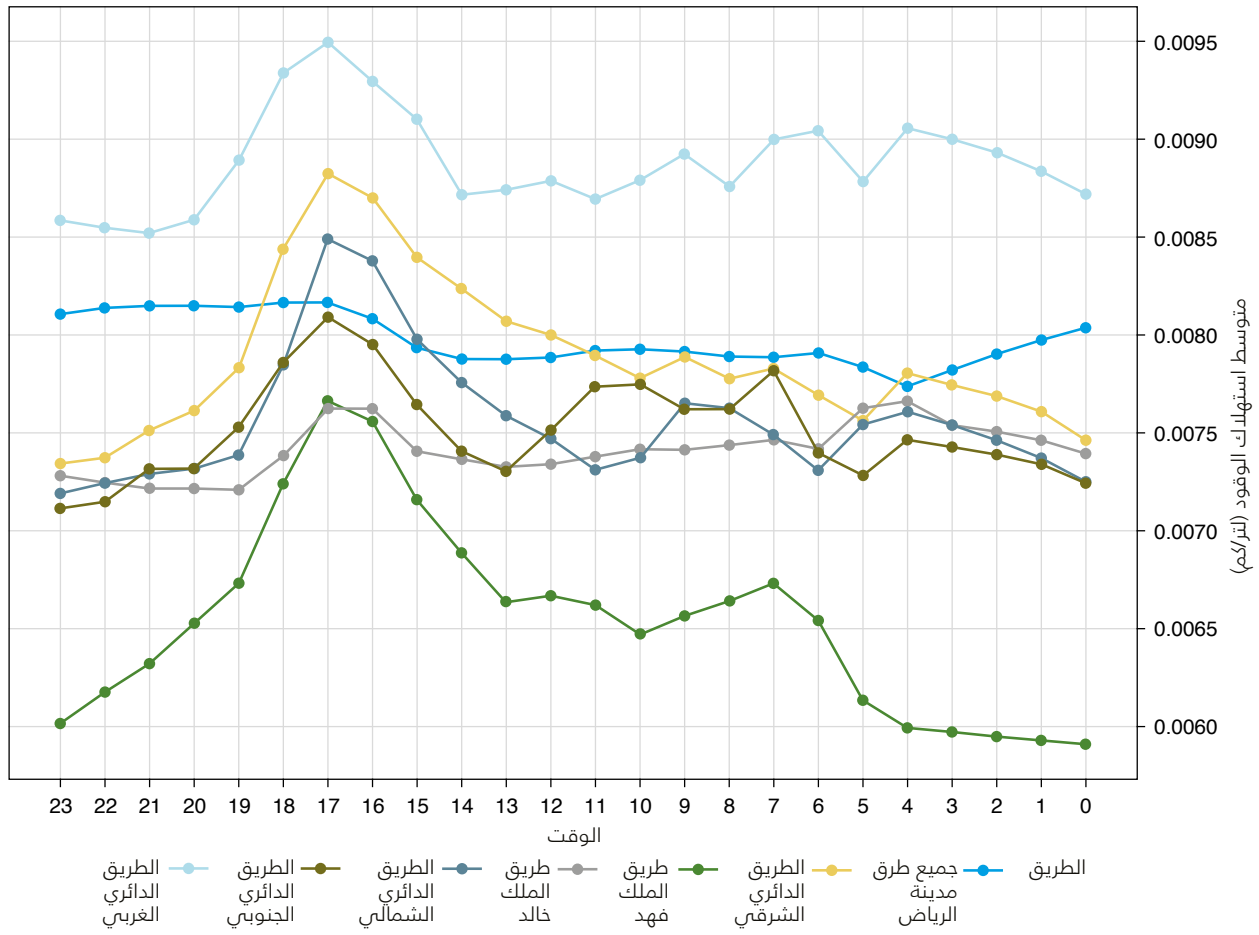
المصدر: نتائج تحليل مؤلفي الدراسة.

وفي ما يتعلق بالطرق الأخرى التي تتراوح أطوالها بين 30 كيلومتر و40 كيلومتر، وتكون فيها آثار الازدحام المروري أوضح وأكثر قابلية للقياس، فتتيح إمكانية إجراء تحليلات أكثر تركيزًا. وكلما اتسعت شبكة الطرق، زادت صعوبة تحديد أنماط الازدحام، إذ تصبح البيانات حينها معبرة عن حالة عامة، وليس عن اضطرابات الحركة المرورية التي تشهدها شبكات الطرق الأصغر في منطقة بعينها.

2.4. دراسة اتجاهات استهلاك الوقود

يبين الشكل 6 الزيادة في متوسط استهلاك الوقود في ما يخص السيارات التي تسير على هذه الطرق باللتر لكل كيلومتر. وكما هي الحال في الشكل 4، تبدو البيانات التي تمثل طرق المدينة بأكملها أكثر انتشارًا، كما يصعب تحديد أي نمط لها. لكن ثمة اتجاه ملحوظ لزيادة استهلاك الوقود خلال ساعات الذروة، وهو أمر متوقع لأن ارتفاع مؤشر انخفاض السرعة معناه تباطؤ السرعات، ومن ثمَّ استهلاك كميات أكبر من الوقود نتيجة تكرار مرات زيادة السرعات وتقليلها. ونلاحظ زيادة استهلاك الوقود على الطريق الدائري الغربي، ما يدل على انخفاض مستويات الازدحام المروري، وهو ما يسمح بزيادة سرعات القيادة (كما هو مبين في الشكلين 4 و6)، ومن ثمَّ يؤدي إلى زيادة استهلاك الوقود. ورغم أن مؤشر انخفاض السرعة على طريق الملك خالد مماثل للمؤشر على الطريق الدائري الغربي، يشهد الطريق الدائري الغربي مزيدًا من التفاوت في سرعات القيادة على مدار اليوم. ويتضح لنا من الجدول 6 أن نطاق السرعات أكبر على الطريق الدائري الغربي ونستنتج أن المركبات تستغرق نسبة أكبر من الوقت وهي تتحرك بسرعات عالية أو منخفضة، مما يسهم في الزيادة الملحوظة لاستهلاك الوقود على هذا الطريق مقارنةً بطريق الملك خالد، حسبما نرى في الشكل 6.

الشكل 6. متوسط استهلاك الوقود (لتر/كم) على مختلف الطرق العامة في مدينة الرياض على مدار اليوم.



المصدر: نتائج تحليل مؤلفي الدراسة.

الجدول 6. توزيع نطاقات السرعة واتجاهات استهلاك الوقود المقابلة لها على مختلف الطرق العامة في مدينة الرياض.

نطاق السرعة (كم/ساعة)	الطريق الدائري الغربي (٪)	طريق الملك خالد (٪)	الطريق الدائري الشمالي (٪)	طريق الملك فهد (٪)	الطريق الدائري الشرقي (٪)	الطريق الدائري الجنوبي (٪)	اتجاه الاستهلاك
20–0	1	0	0	0	0	0	مرتفع
40–21	2	1	4	17	9	7	مرتفع
60–41	3	3	11	16	14	8	مرتفع
80–61	6	7	20	33	23	20	متوسط
100–81	44	48	40	34	34	40	متوسط
120–101	43	40	24	0	20	23	مرتفع

المصدر: نتائج تحليل مؤلفي الدراسة.

وفي حين أن بيانات الطرق العامة الأقل ازدحامًا ربما تعكس زيادةً في استهلاك الوقود عليها، فإن هذا ليس معناه بالضرورة عدم كفاءة استهلاك الوقود، لأن المركبات على تلك الطرق غالبًا ما تستمر في التحرك بسرعات أعلى وتكمل رحلاتها في مدة زمنية أقصر، مما يؤدي إلى تجربة تنقّل أكثر كفاءة عمومًا بالمقارنة مع الطرق المزدحمة، فالازدحام المروري له تداعيات اقتصادية كبيرة، تؤثر في الركاب الأفراد وفي الاقتصاد عمومًا. فوفقًا لدراسة (Arnott and Small 1994)، يؤدي الازدحام المروري إلى زيادة أوقات التنقل وزيادة استهلاك الوقود وارتفاع تكاليف تشغيل المركبات، وجميعها عوامل تقلل من الكفاءة الاقتصادية. كما يوضح مؤلفو الدراسة المذكورة أن الازدحام لا يكبد السائقين تكاليف مباشرة فحسب، وإنما ينطوي على تداعيات اقتصادية أوسع نطاقًا مثل انخفاض الإنتاجية وزيادة نسب التلوث (Arnott and Small 1994).

وفي هذا السياق، نعقد مقارنة بين وقتين مختلفين من حيث معدل استهلاك الوقود: ذروة الانخفاض (الساعة 01:00) وذروة الارتفاع (الساعة 17:00)، ونحسب متوسط الزيادة في استهلاك الوقود بين هاتين الساعتين من خلال المعادلة الآتية:

Average increase from low peak to high peak

$$= \left(\frac{\overline{S}^{R}_{_FC_17} - \overline{S}^{R}_{FC_1}}{\overline{S}^{R}_{FC_1}} \right) \times 100 \quad (5)$$

حيث:

- يشير الرمز R إلى الطريق
- يشير الرمز $\overline{S}^{R}_{_FC_17}$ إلى متوسط استهلاك الوقود عند الساعة 17:00
- يشير الرمز $\overline{S}^{R}_{FC_1}$ إلى متوسط استهلاك الوقود عند الساعة 01:00

وعند مقارنة الزيادة في استهلاك الوقود خلال ساعات الذروة مع الاستهلاك في غير ساعات الذروة، يتضح من النتائج أن القيادة على بعض الطرق العامة الرئيسة في مدينة الرياض ربما تزيد من استهلاك الوقود خلال ساعات الذروة على استهلاكه في غير ساعات الذروة بنسبة تصل إلى 29.26٪ (الجدول 7).

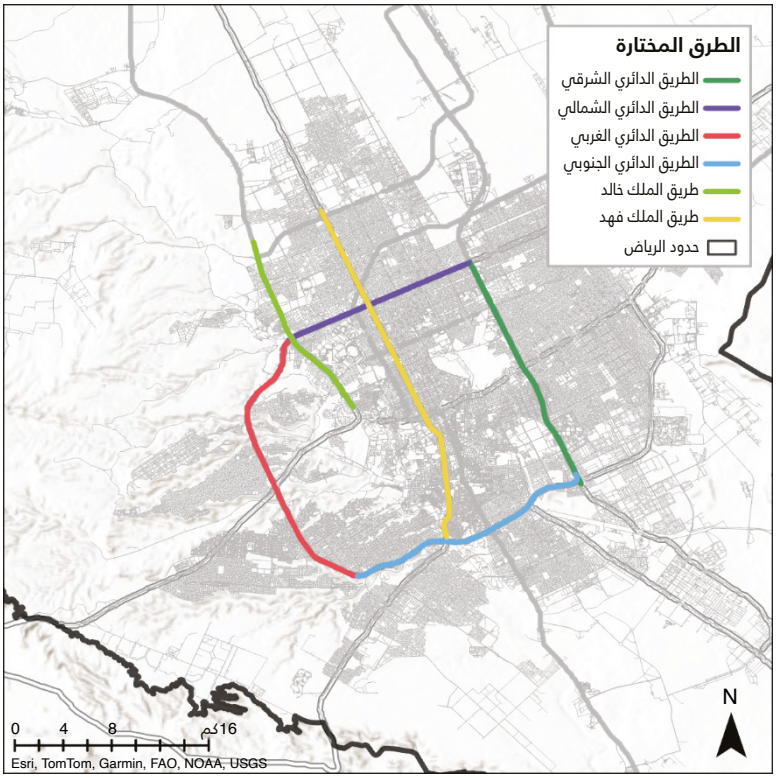
وتجدر الإشارة إلى أن النتائج تختلف اختلافًا كبيرًا باختلاف المنطقة التي نختار دراستها.

الجدول 7. متوسط الزيادة في استهلاك الوقود بين الساعة 01:00 والساعة 17:00 على الطرق الرئيسة في مدينة الرياض.

	متوسط استهلاك الوقود في القطاع عند الساعة 01:00 (لتر)	متوسط استهلاك الوقود في القطاع عند الساعة 17:00 (لتر)	التغيير (لتر)	متوسط الزيادة في استهلاك الوقود (٪)
طرق مدينة الرياض بأكملها	0.007974	0.008169	0.000195	2.44235
طريق الملك فهد	0.00593	0.007666	0.001735	29.264823
الطريق الدائري الغربي	0.008838	0.009496	0.000658	7.442644
الطريق الدائري الشرقي	0.007611	0.008824	0.001213	15.943012
الطريق الدائري الشمالي	0.007373	0.008492	0.001119	15.173594
طريق الملك خالد	0.007463	0.007624	0.000161	2.161888
الطريق الدائري الجنوبي	0.00734	0.008089	0.000749	10.202571

المصدر: نتائج تحليل مؤلفي الدراسة.

الشكل 7. الطرق العامة الرئيسة المختارة في مدينة الرياض لتحليل الحركة المرورية واستهلاك الوقود.



المصدر: تقرير (TomTom 2024a)، وتحليل مؤلفي الدراسة.

تسلط هذه الخريطة الضوء على الطرق العامة الرئيسة في مدينة الرياض التي خضعت للتحليل في سياق الدراسة الحالية. وهذه الطرق تشمل الطريق الدائري الشرقي (باللون الأخضر) والطريق الدائري الشمالي (باللون الأرجواني) والطريق الدائري الغربي (باللون الأحمر) والطريق الدائري الجنوبي (باللون الأزرق) وطريق الملك خالد (باللون الأخضر الفاتح)، وطريق الملك فهد (باللون الأصفر)، مع تمييز حدود المدينة باللون الأسود.

فمثلًا، ربما يؤدي التركيز على المنطقة المحددة التي تحمل اسم طريق الملك فهد في الشكل 7 إلى نتائج مختلفة عن النتائج التي يمكن أن نتوصل إليها في حال قررنا تمديد طول الطريق نفسه أو اختيار قطاع أقصر منه. ويسمح هذا التركيز في الدراسة على قطاع معين بالحصول على نتائج أدق من الناحية المكانية، كما أنه يُظهر التفاوت الكبير في النتائج تبعًا لنطاق التركيز. ويؤكد التفاوت المرصود في دراسات سابقة هذه الجزئية، لا سيّما عندما نأخذ في الحسبان أن الدراسات غالبًا ما تشمل دولًا ومدنًا وطرقًا وأنواع سيارات مختلفة (Wang et al. 2019; Zhang and Batterman 2013; Afrin and Yodo 2020; Boggio-Marzet et al. 2021).

وبالإضافة إلى ذلك، يُعد النطاق الزمني لمجموعة البيانات أحد العوامل التي من شأنها إحداث تغيير في النتائج الإجمالية المجمعة، إذ تتضمن هذه الدراسة بيانات مستقاة من 22 يومًا فقط من أيام الأسبوع باستثناء العطلات من شهر أكتوبر 2023. ويمكن أن تؤثر التغيرات الموسمية تأثيرًا كبيرًا في ظروف القيادة على الطرق المختلفة بمدينة الرياض.

3.4. ملاحظات الدراسة والنقاط الرئيسة

- العلاقة بين السرعة واستهلاك الوقود ليست خطية، وسلوك القيادة في أثناء الازدحام المروري يؤثر في استخدام الوقود. فالزيادة الكبيرة في السرعة والضغط المفاجئ على المكابح وتغيير الحارة المرورية بكثرة جميعها سلوكيات تُسفر عن تفاقم هذه التقلبات، ما يؤدي إلى زيادة استهلاك الوقود خلال فترات الازدحام.
- يمكن أن تؤدي القيادة على الطرق عالية السعة بمدينة

الرياض إلى زيادة كبيرة في استهلاك الوقود، مع زيادة الاستهلاك في سيارات الركاب بنسبة تصل إلى 29٪ بسبب الازدحام المروري. فتكرار التوقف والتحرك على هذه الطرق يجبر المركبات مرارًا على التسارع أو التباطؤ، مما يقلص الكفاءة الإجمالية لاستهلاك الوقود ويرفع معدل الاستهلاك.

- لا غنى عن التحليل المكاني لفهم الأنماط والعلاقات المعقدة، لا سيّما في الدراسات التي تتناول المناطق الحضرية. فعن طريق إفراد حيز للاعتبارات المكانية، يمكن للتحليلات أن تُثمر عن رؤى كاشفة ربما تغفل عنها التحليلات غير المكانية، لتوفر لنا بذلك حلولًا أكثر دقة وفعّالية. وتوضح الدراسة الحالية كيف يمكن أن تختلف النتائج باختلاف المناطق التي نتناولها، من خلال تسليط الضوء على أنواع مختلفة من المواقع المحلية، مثل الطرق، لاستجلاء الكيفية التي يمكن أن يستفيد من خلالها صانعو السياسات والمطورون الحضريون من التحليل المكاني في ما يخص التدخلات المستهدفة.
- دمج تقنيات إنترنت الأشياء في هذه الدراسات يؤدي دورًا مهمًا في تحسين إمكانات الرصد الآني للحركة المرورية والتنبؤ بها. فالمستشعرات القائمة على تقنيات إنترنت الأشياء، جنبًا إلى جنب مع أنظمة بيانات السيارات المتنقلة، تجمع بيانات الحركة المرورية آنيًّا، مما يتيح التنبؤ بمستويات الازدحام المروري بمزيد من الدقة، ومن ثمَّ فإن هذا النهج القائم على البيانات يمنحنا إمكانية إدارة الحركة المرورية بطريقة دينامية ومرنة كما يُحسّن تدفق الحركة المرورية ويقلل الازدحام.

4.4. آفاق البحوث المستقبلية

في سياق الدراسة الحالية، أجرينا تحليلًا على المستوى الميزوسكوبي، تعتمد النتائج فيه في المقام الأول على التفاوتات في السرعة على الطرق، وتستخدم مَعلمات محدَّدة مسبقًا تتعلق باستهلاك الوقود بهدف تعديل النتائج على النحو الذي يأخذ في الحسبان معدلات استهلاك الوقود زيادةً أو نقصانًا. وفي حين يتيح لنا هذا النهج تقييمًا عامًا، فمن الممكن حساب استهلاك الوقود بمزيد من الدقة باستخدام منهجيات تفصيلية تستعين بأساليب النمذجة الميكروسكوبية. فمثل هذه الأساليب تراعي العوامل التفصيلية مثل المنعطفات وإشارات المرور واندماج الحارات، مما يتيح لنا تمثيلًا أكثر تفصيلًا ودقة لديناميات استهلاك الوقود. وعلاوة على ذلك، فإن الاستعانة ببيانات أكثر تمثيلًا للواقع في التحليلات المستقبلية، مثل التفاوتات الموسمية والاختلافات في أنواع الوقود، يمكن أن تساعدنا في تحقيق فهم شامل للطلب على التنقل في المناطق الحضرية وما يرتبط بذلك من انبعاثات.

5. الخاتمة

تسلط الدراسة الحالية الضوء على العلاقة الحيوية بين الازدحام المروري وسلوكيات القيادة واستهلاك الوقود في البيئات الحضرية، مع إيلاء تركيز خاص للطرق عالية السعة في مدينة الرياض. ونشير إلى أن العلاقة غير الخطية بين السرعة واستهلاك الوقود تعكس التأثير الكبير للازدحام المروري وتكرار التسارع والتباطؤ خلال القيادة في كفاءة استهلاك الوقود.

وتكشف النتائج أن الحركة المرورية التي تتسم بتكرار التوقف والتحرك، لا سيّما على الطرق العامة المزدحمة، يمكن أن تُسفر عن زيادات كبيرة في استهلاك الوقود، وتكشف أن استهلاكه في سيارات الركاب يمكن أن يزيد بنسبة تصل إلى 29٪. وتؤكد هذه المعلومات الحاجة إلى تدخلات مستهدفة لإدارة الازدحام المروري وتحسين كفاءة استهلاك الوقود، خصوصًا في المدن التي تشهد توسعًا حضريًا متسارعًا مثل مدينة الرياض. وقد اتضح لنا أن دمج أساليب التحليل المكاني المتقدمة وتقنيات إنترنت الأشياء في التحليلات، بما في ذلك أنظمة بيانات السيارات المتنقلة، يؤدي دورًا بالغ الأهمية في فهم التحديات المرورية بالمناطق الحضرية والتصدي لها. فمن خلال توفير بيانات آنية عالية الدقة عن أنماط الحركة المرورية، تتيح لنا هذه التقنيات تنبؤات أكثر دقة، وتُفسح المجال لإدارة الحركة المرورية بقدر أكبر من المرونة، ما من شأنه أن يُسهم في زيادة كفاءة أنظمة التنقل واستدامتها في المناطق الحضرية. ولا تُظهر هذه الدراسة فحسب أهمية التحليل المكاني في تحديد الازدحامات المرورية المتركزة في مناطق معينة وآثارها، وإنما تدعو أيضًا إلى مواصلة تطوير التقنيات الذكية والاستفادة منها في تحسين عمليات التخطيط الحضري وإدارة الحركة المرورية. وفي المستقبل، يمكن لصانعي السياسات والمطورين الحضريين أن يستعينوا بهذه الرؤى الكاشفة في توجيه الإستراتيجيات التي تحدّ من الازدحام المروري وتحسّن كفاءة استهلاك الوقود عن طريق التركيز على الاستثمار في الأنظمة الذكية لإدارة الحركة المرورية، وتعزيز برامج القيادة الصديقة للبيئة، وتوسعة البنية التحتية لأنظمة النقل العام، وتشجيع الاستدامة في تصميمات المدن، واستغلال سياسات التنقل القائمة على البيانات، فكل هذا يُسهم في تحسين الظروف المعيشية في المدن سريعة التوسع العمراني مثل مدينة الرياض.

الحاشية

[1] يمكن أيضًا الإشارة إلى استهلاك الوقود هنا بمصطلح «كثافة استهلاك الوقود» أو «معدل استهلاك الوقود»، لأننا نشير في هذا السياق إلى كمية الوقود المستخدمة لكل وحدة مسافة (لتر/كم)، التي يمكن أن تتأثر بعوامل متنوعة مثل السرعة وظروف القيادة وكفاءة المركبة. هذه المصطلحات جميعها تصف العلاقة بين استهلاك الوقود والمسافة المقطوعة، وغالبًا ما تُستخدم على سبيل الترادف في الدراسات التي ينصب تركيزها على كفاءة المركبات والانبعاثات. (Sobrino, Monzón, and Hernandez 2014; U.K. Department of Transport 2019; Huo et al. 2012; Thomas et al. 2017; Fifer, Catron, and Bunn 2009).

المراجع

Afrin, Tanzina, and Nita Yodo. 2020. “A Survey of Road Traffic Congestion Measures Towards a Sustainable and Resilient Transportation System.” *Sustainability* 12, no. 11 (June): 4660. https://doi.org/10.3390/su12114660.

Al Zohbi, Gaydaa. 2021. “Sustainable Transport Strategies: A Case Study of Riyadh, Saudi Arabia.” *E3S Web of Conferences* 259: 02007. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125902007.

Al-Mosaind, Musaad A. 1998. “Freeway Traffic Congestion in Riyadh, Saudi Arabia: Attitudes and Policy Implications.” *Journal of Transport Geography* 6, no. 4 (December): 263–272. https://doi.org/10.1016/S0966-6923(98)00024-6.

Altıntası, Oruç, Hediye Tuydes-Yaman, and Kagan Tuncay. 2022. “A Method to Estimate Traffic Penetration Rates of Commercial Floating Car Data Using Speed Information.” *Transport* 37 (3): 161–176. https://doi.org/10.3846/transport.2022.17069.

Arnott, Richard J., and Kenneth Small. 1994. “The Economics of Traffic Congestion.” *American Scientist* 82 (5): 446–455. http://www.jstor.org/stable/29775281.

Ayfantopoulou, Georgia, Marios Nikolaos Militsis, Josep Maria Salanova Grau, and Socrates Basbas. 2022. “Improving Map Matching of Floating Car Data with Artificial Intelligence Techniques” *Information* 13 (11): 508. https://doi.org/10.3390/info13110508.

Barth, Matthew and Kanok Boriboonsomsin, 2008. “Real-World Carbon Dioxide Impacts of Traffic Congestion.” *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2058 (1): 163–171. https://doi.org/10.3141/2058-20.

Bıyık, Can, Ahmad Abareshi, Alexander Paz, Rosa Arce Ruiz, Rosaria Battarra, Christopher D.F. Rogers, and Carmen Lizarraga. 2021. “Smart Mobility Adoption: A Review of the Literature.” *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity* 7 (2): 146. https://doi.org/10.3390/joitmc7020146.

Boggio-Marzet, Alessandra, Andres Monzon, Ana M. Rodriguez-Alloza, and Yang Wang. 2021. “Combined Influence of Traffic Conditions, Driving Behavior, and Type of Road on Fuel Consumption: Real Driving Data from Madrid Area.” *International Journal of Sustainable Transportation* 16 (4): 301–313. https://doi.org/10.1080/15568318.2020.1871128.

Burghout, Wilco, Haris N. Koutsopoulos, and Ingmar Andréasson. 2005. “Hybrid Mesoscopic–Microscopic Traffic Simulation.” *Transportation Research Record* 1934 (1): 218–225. https://doi.org/10.1177/0361198105193400123.

Carley, Sanya, Nikolaos Zirogiannis, Denvil Duncan, Saba Siddiki, and John D. Graham. 2019. “The Macroeconomic Effects of 2017 through 2025 Federal Fuel Economy and Greenhouse Gas Emissions Standards.” *Journal of Policy Analysis and Management* 38, no. 3 (Summer): 732–763. https://doi.org/10.1002/pam.22132.

Croce, Antonello Ignazio, Giuseppe Musolino, Corrado Rindone, and Antonino Vitetta. 2021. “Estimation of Travel Demand Models with Limited Information: Floating Car Data for Parameters’ Calibration.” *Sustainability* 13 (16): 8838. https://doi.org/10.3390/su13168838.

Faria, Ricardo, Lina Brito, Karolina Baras, and José Luís Silva. 2017. “Smart Mobility: A Survey.” In *Proceedings of the 2017 International Conference on Internet of Things for the Global Community (IoTGC)*, Funchal, Portugal, 1–8. https://doi.org/10.1109/IoTGC.2017.8008972.

Ferrara, Antonella, Simona Sacone, and Silvia Siri. 2018. “Microscopic and Mesoscopic Traffic Models.” In *Freeway Traffic Modelling and Control*, 105–136. Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-75961-6_5.

Fifer, Daniel Paul Catron, and Nicholas Patrick Bunn. 2009. “Assessing Consumer Valuation of Fuel Economy in Auto Markets.” Honors Thesis, Duke University. https://hdl.handle.net/10161/1380.

Fourati, Walid, Hekmat Dabbas, and Bernhard Friedrich. 2021. “Estimation of Penetration Rates of Floating Car Data at Signalized Intersections.” In *Transportation Research Procedia* 52: 228–235. 23rd EURO Working Group on Transportation Meeting, EWGT 2020, 16–18 September 2020, Paphos, Cyprus. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.01.026.

Gitahi, Joseph Mureithi, M. Hahn, M. Storz, C. Bernhard, M. Feldges, and R. Nordentoft. 2020. “Multi-Sensor Traffic Data Fusion for Congestion Detection and Tracking.” *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XLIII-B1: 173–180. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xliii-b1-2020-173-2020.

Huo, Hong, Kebin He, Michael Wang, and Zhiliang Yao. 2012. “Vehicle Technologies, Fuel-Economy Policies, and Fuel-Consumption Rates of Chinese Vehicles.” *Energy Policy* 43 (April): 30–36. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.09.064.

Industrial Center (IC). 2024. “Saudi Arabia Market Share 2022/2023 Report.” *Saudi Arabia’s Industrial Cluster.* https://www.ic.gov.sa/industries-automotive.

Ismaeel, Ayad Ghany, Krishnadas Janardhanan, Manishankar Sankar, Yuvaraj Natarajan, Sarmad Nozad Mahmood, Sameer Alani, and Akram H. Shather. 2023. “Traffic Pattern Classification in Smart Cities Using Deep Recurrent Neural Network.” *Sustainability* 15 (19): 14522. https://doi.org/10.3390/su151914522.

Jiang, Yun, Guohua Song, Zeyu Zhang, Zhiqiang Zhai, and Lei Yu. 2021. “Estimation of Hourly Traffic Flows from Floating Car Data for Vehicle Emission Estimation.” *Journal of Advanced Transportation*: 1–11. https://doi.org/10.1155/2021/6628335.

Kamal-Chaoui, Lamia and Alexis Robert, eds. 2009. “Competitive Cities and Climate Change.” OECD Regional Development Working Papers No. 2009/2. OECD Publishing. https://EconPapers.repec.org/RePEc:oec:govaab:2009/2-en.

Kan, Zihan, Luliang Tang, Mei-Po Kwan, and Xia Zhang. 2018. “Estimating Vehicle Fuel Consumption and Emissions Using GPS Big Data.” *International Journal of Environmental Research and Public Health* 15 (4): 566. https://doi.org/10.3390/ijerph15040566.

Leduc, Guillaume. 2008. “Road Traffic Data: Collection Methods and Applications.” *Joint Research Centre (JRC) Technical Notes, Working Papers on Energy, Transport and Climate Change* N. 1 (January 2008). https://www.researchgate.net/publication/254424803_Road_Traffic_Data_Collection_Methods_and_Applications.

Liu, Xintao, and Y. Ban. 2013. “Uncovering Spatio-Temporal Cluster Patterns Using Massive Floating Car Data.” *ISPRS International Journal of Geo-Information* 2 (2): 371. https://doi.org/10.3390/ijgi2020371.

Motory. 2022. “New and Used Cars for Sale in Saudi Arabia.” https://ksa.motory.com/en.

National Atmospheric Emissions Inventory (NAEI). 2019. “RTP Fleet Projection NAEI 2017 Base2019r v1_1.” Excel file, authored by Yvonne Pang and Tim Murrells, May. https://naei.beis.gov.uk/resources/rtp_fleet_projection_NAEI_2017_Base2019r_v1_1.xlsx.

Ntziachristos, L, and Zissis Samaras. 2019. *EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2019 – Part B: Sectoral Guidance Chapters, 1.A.3.b.i – Road Transport: Combustion*. Publications Office of the European Union. https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-b-i/view.

Rao, Amudapuram Mohan, and Kalaga Ramachandra Rao. 2012. “Measuring Urban Traffic Congestion – A Review.” *International Journal for Traffic and Transport Engineering* 2 (4): 286–305. https://doi.org/10.7708/ijtte.2012.2(4).01.

Ricardo-AEA. 2014. “Production of Updated Emission Curves for Use in the National Transport Model.” Report to the Department for Transport Ricardo-AEA/R/ED56186 Issue Version 2. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/662795/updated-emission-curves-ntm.pdf.

Saudi Energy Efficiency Center (SEEC). 2024. “Open Data.” https://www.seec.gov.sa/ar/open-data.

Saudi Press Agency (SPA). 2024. “SDAIA Launches Center of Excellence in Congestion Solutions Using Data, AI.” February. https://spa.gov.sa/en/N2047028.

Silva, Bhagya Nathali, Murad Khan, and Kijun Han. 2018. "Towards Sustainable Smart Cities: A Review of Trends, Architectures, Components, and Open Challenges in Smart Cities." *Sustainable Cities and Society* 38 (April): 697–713. https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.01.053.

Sims, Ralph E. H. et al. 2014. "Transport." In *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*, Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by Ottmar Edenhofer et al., 315–398. Cambridge: Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415416.005.

Sitati, Cynthia N., Christopher Oludhe, Leah Oyake, and Aderiana Mutheu Mbandi. 2022. "A Street-Level Assessment of Greenhouse Gas Emissions Associated with Traffic Congestion in the City of Nairobi, Kenya." *Clean Air Journal* 32 (1). https://doi.org/10.17159/caj/2022/32/1.12546.

Sobrino, Natalia, Andrés Monzón, and Sara Hernández. 2014. "Reduced Carbon and Energy Footprint in Highway Operations: The Highway Energy Assessment (HERA) Methodology." *Networks and Spatial Economics* 16 (1): 395–414. https://doi.org/10.1007/s11067-014-9225-y.

Song, Guohua, Lei Yu, and Yizheng Wu. 2016. "Development of Speed Correction Factors Based on Speed-Specific Distributions of Vehicle Specific Power for Urban Restricted-Access Roadways." *Journal of Transportation Engineering* 142 (3): 04016001. https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000819.

Thomas, John F., Shean Huff, Brian H. West, and Paul Chambon. 2017. "Fuel Consumption Sensitivity of Conventional and Hybrid Electric Light-Duty Gasoline Vehicles to Driving Style." *SAE International Journal of Fuels and Lubricants* 10 (3). https://doi.org/10.4271/2017-01-9379.

TomTom. "Move Portal." https://move.tomtom.com.

TomTom. "Saudi Arabia Traffic Index." 2024b. https://www.tomtom.com/traffic-index/saudi-arabia-country-traffic.

TomTom. "Traffic Stats API FAQ." 2024c. https://developer.tomtom.com/traffic-stats/documentation/product-information/faq.

UK Department for Transport. 2018. "TAG Data Book." November 29. https://www.gov.uk/government/publications/tag-data-book.

United Nations. 2021. "Sustainable Transport, Sustainable Development: Interagency Report for the Second Global Sustainable Transport Conference." https://www.un.org/en/desa/sustainable-transport-sustainable-development-interagency-report-second-global-sustainable.

Wang, Xiaomeng, Ling Peng, Tianhe Chi, Mengzhu Li, Xiaojing Yao, and Jing Shao. 2015. "A Hidden Markov Model for Urban-Scale Traffic Estimation Using Floating Car Data." *PLoS ONE* 10 (12): e0145348. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0145348.

Wang, Jingyi, Guohua Song, Lei Yu, Hongyu Lu, Jianping Sun, Ying Cheng, and Weinan He. 2019. "Macroscopic Relationship between Traffic Condition and Fuel Consumption for an Urban Road Network: Case Study of Beijing." *Transportation Research Record* 2673 (11): 604–615. https://doi.org/10.1177/0361198119853575.

Xu, Lin, Yang Yue, and Qingquan Li. 2013. "Identifying Urban Traffic Congestion Pattern from Historical Floating Car Data." *Procedia – Social and Behavioral Sciences* 96 (November): 2084–2095. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.08.235.

Youssef, Zaher, Habib M. Alshuwaikhat, and Imran Reza. 2021. "Modeling the Modal Shift Towards a More Sustainable Transport by Stated Preference in Riyadh, Saudi Arabia." *Sustainability* 13 (1): 337. https://doi.org/10.3390/su13010337.

Zhang, Kai, and Stuart Batterman. 2013 "Air Pollution and Health Risks Due to Vehicle Traffic." *Science of The Total Environment* 450–451 (April): 307–316. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.01.074.

ملاحظات

نبذة عن المؤلفين

لمى ياسين

زميل باحث تعمل ضمن برنامج النقل والبنية التحتية في كابسارك، وتتركز اهتماماتها البحثية في تحديات الاستدامة وتغير المناخ وأمن الطاقة والبنية التحتية الرقمية في المناطق الحضرية. وهي باحثة ومتخصصة في البيانات تتمتع بخبرة في تطوير البرمجيات كما أنها متخصصة في نمذجة البيانات الضخمة لأغراض البحث في مجال النقل الحضري والمستدام. كانت في السابق عضو في فريق علوم السياسة واتخاذ القرار في كابسارك، حيث تولت مسؤولية تطوير برمجيات نماذج السياسات والسلوكيات. وهي حاصلة على درجة الماجستير في هندسة البرمجيات من جامعة أكسفورد ودرجة البكالوريوس في علوم الحاسب من جامعة عفت بالمملكة العربية السعودية.

نوره الحسين

مدير في برنامج التقنيات المخصصة. تركز أعمالها على التحليل والنمذجة الجغرافية المكانية. وكانت سابقًا عضو في برنامج علوم السياسة واتخاذ القرار في كابسارك، إذ كانت جزءًا من فريق تطوير مجموعة أدوات كابسارك للتحليل السلوكي. وهي حاصلة على درجة البكالوريوس في علوم الحاسب من جامعة الأمير سلطان.

إبراهيم شطناوي

زميل أول في قسم النقل في كابسارك، ويتمتع بخبرة تزيد على 19 عامًا في مجال هندسة النقل. تتركز اهتماماته البحثية في سياسات النقل وتقنياته لأغراض إزالة الكربون من وسائل النقل البري، إضافة إلى نمذجة الطلب على النقل لتقدير احتياجات الطاقة والانبعاثات.

قبل انضمامه إلى كابسارك، اكتسب خبرة واسعة في القطاعين العام والخاص، فعمل مع دائرة النقل في أبو ظبي وهيئة الطرق والمواصلات في دبي بالإضافة إلى عدد من الشركات الاستشارية المرموقة مثل جاكوبس ومايكل بيكر إنترناشيونال وشركة بارسونز. وقد عمل خلال مسيرته المهنية في عدة دول، منها الولايات المتحدة والإمارات العربية المتحدة والأردن والمملكة العربية السعودية. وتتعدد جوانب خبرته؛ إذ تشمل إستراتيجيات تعريفة النقل العام وسياسات النقل ونمذجة الطلب على السفر ودراسات الأثر الاقتصادي للنقل وأنظمة النقل الذكية وتشغيل الحركة المرورية ومشروعات المحاكاة الدقيقة. وقد شغل منصب مدير مشروع لعدة دراسات نقل واسعة النطاق وكتب العديد من التقارير الفنية.

يحمل درجة البكالوريوس في الهندسة المدنية مع تخصص في النقل من جامعة العلوم والتكنولوجيا الأردنية، ودرجة الدكتوراه في الهندسة المدنية مع تخصص في هندسة المرور من جامعة أكرون في أوهايو، الولايات المتحدة الأمريكية.

عبد الرحمن محسن

خبير في الجغرافيا المكانية، وحاصل على ماجستير في نظم المعلومات الجغرافية، ولديه أكثر من 20 عامًا من الخبرة في نظم المعلومات الجغرافية وإدارة البيانات المكانية، وهو متخصص في نمذجة الاقتصاد المكاني للتحليل والتنبؤ بالعلاقات بين الأنشطة الاقتصادية والطلب على الطاقة واستغلال الأراضي والنقل الحضري. وقد حقق نجاحًا في قيادة وتسليم مشروعات نظم المعلومات الجغرافية لمؤسسات دولية في أمريكا الشمالية والشرق الأوسط. قبل أن يشغل منصبه في كابسارك، عمل لدى مؤسسات مرموقة مثل اكسنشر وإسري قائدًا تقنيًا ومستشارًا أول؛ إذ تولى مسؤولية توجيه العملاء في قطاع الطاقة إلى كيفية استخراج القيمة من أصول البيانات الجغرافية المكانية واستثمارات نظم المعلومات الجغرافية. وهو حاصل أيضًا على درجة الماجستير في الهندسة الجيوماتيكية من جامعة كالغاري في كندا.

نبذة عن المشروع

من الأهمية بمكان أن تجتاز المملكة العربية السعودية تحديات التنقل واسعة النطاق، لا سيّما تلك المرتبطة بالتأثيرات البيئية الناجمة عن المركبات التقليدية التي تعمل بمحركات الاحتراق الداخلي. فشيوع استخدام هذه المركبات في المملكة يؤكد أهمية دراسة حلول النقل المتعددة الوسائط والأكثر استدامة. ويركز هذا المشروع على وضع إستراتيجيات من شأنها تعزيز الجهود الهادفة إلى تطوير نظام نقل حضري متكامل ومستدام، كما يُعنى بتقييم وتحسين البنية التحتية المادية والرقمية لنظام النقل الحضري. ويهدف المشروع في المقام الأول إلى تحسين كفاءة شبكة النقل في المملكة العربية السعودية واستدامتها عن طريق دمج خيارات النقل المتعددة الوسائط والاستفادة من التطورات التقنية الرقمية.

www.kapsarc.org