

بحث بعنوان

إعادة بناء سيناريوهات الحوادث وتحليل الأنماط باستخدام الذكاء الاصطناعي GPTrace

اعداد

شادن ابراهيم عبد الحليم الزيدانة

الملخص

"تبحث هذه الدراسة في شدة الإصابات بين مستخدمي الطرق من الفئات الأكثر عرضة للخطر، وتحديدًا المشاة وراكبي الدراجات، بالاستناد إلى بيانات الحوادث على مدى خمس سنوات في ولاية ميشيغان الأمريكية (2016-2020). ولتعزيز إعادة بناء سيناريوهات الحوادث الخاصة بهذه الفئات، طُبِّق إطار عمل يعتمد على تقنية (GPTrace) لتحديد الأنماط الكامنة في بيانات الحوادث باستخدام نهج التعلم غير الخاضع للإشراف. ويؤكد التوافق بين الطريقتين أن ثلاثة عناقيد (Clusters) توفر التمثيل الأنسب لبيانات حوادث المشاة. وبوجه عام، تُظهر النتائج أن كل عنقود يمثل نمطًا مميزًا من الحوادث بخصائص فريدة. وتكشف عمليات إعادة بناء سيناريوهات الحوادث القائمة على (GPTrace) لكل من المشاة وراكبي الدراجات عن أنماط حوادث متداخلة وأخرى متميزة، مما يبرز تعقيد ديناميكيات السلامة لمستخدمي الطرق من الفئات الأكثر عرضة للخطر (VRUs). وتبين هذه النتائج أنه على الرغم من تعرض المجموعتين لمخاطر التقاطعات، فإنه ينبغي تصميم تدخلات السلامة بما يلائم على نحو خاص طبيعة نقاط الضعف الخاصة بكل مجموعة".

Abstract

This study examines the severity of injuries among vulnerable road users (VRUs)—specifically pedestrians and cyclists—based on five years of crash data (2016–2020) from the U.S. state of Michigan. To enhance the reconstruction of crash scenarios for these groups, a framework utilizing the "GPTrace" technique was applied to identify underlying patterns in the crash data through an unsupervised learning approach. The alignment between the methods confirms that three clusters provide the most appropriate representation of the pedestrian crash data. Overall, the results indicate that each cluster represents a distinct crash pattern with unique characteristics. The GPTrace-based reconstructions for both pedestrians and cyclists reveal a mix of overlapping and distinct crash patterns, highlighting the complex safety dynamics associated with VRUs. These findings suggest that, while both groups face risks at intersections, safety interventions should be specifically tailored to the unique vulnerabilities of each group.

المقدمة

مع تزايد الازدحام المروري في المدن الحديثة، أصبح الاهتمام بخيارات النقل غير الآلي، مثل المشي وركوب الدراجات، أمراً أساسياً لتحقيق تنقل آمن ومستدام. ويُعد المشاة وراكبو الدراجات من بين الفئات الأكثر عرضة للخطر، لافتقارهم إلى الحماية الجسدية المتاحة لمستخدمي المركبات الآلية. لذا، يجب أن يراعي تخطيط الطرق وتصميمها احتياجاتهم، وتوفير بنية تحتية مناسبة تضمن سلامتهم وراحتهم أثناء التنقل. ومع النمو المتواصل لسكان المدن وزيادة حجم حركة المرور، أصبح ضمان سلامة هذه الفئات موضع اهتمام بالغ في مجال هندسة النقل وتخطيط الطرق.

أظهرت الدراسات أن الحوادث التي تشمل المشاة وراكبي الدراجات تُعد من أشد الحوادث على الطرق الحضرية، وكثيراً ما تؤدي إلى إصابات خطيرة أو وفيات مقارنة بالحوادث التي تشمل فئات أخرى. وتتأثر هذه المخاطر المتزايدة بعوامل معقدة ومتداخلة، تشمل: سرعة المركبات، وكثافة حركة المرور، وتصميم الطرق وحالتها، وتخطيط التقاطعات، والإضاءة، والظروف الجوية، وسلوك السائقين والمشاة، وتوافر البنية التحتية المخصصة كالأرصفة ومسارات الدراجات.

على الرغم من التقدم الكبير في هذا المجال، تركز العديد من دراسات السلامة المرورية التقليدية في المقام الأول على الجوانب الفيزيائية والإحصائية لحوادث المرور. فهي غالباً ما تقتصر على القدرة على تحليل العلاقات المعقدة بين هذه العوامل وشدة الحوادث، ولا تولي اهتماماً كافياً للتوزيع المكاني والزمني لشبكة الطرق، أو البعد السلوكي للسائقين والمشاة. وتؤكد هذه الفجوة ضرورة تطوير أطر شاملة لمحاكاة الحوادث تجمع بين ديناميكيات المرور، والسلوك البشري، والتقنيات الذكية.

في السنوات الأخيرة، برز الذكاء الاصطناعي والتحليل الخوارزمي كأدوات قوية لبناء نماذج رياضية تساعد على تحليل مجموعات البيانات الكبيرة، وتحديد العوامل الأشد تأثيراً في سلامة مستخدمي الطرق غير المحميين. لذا، يهدف هذا المشروع إلى معالجة هذه الفجوة باستخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي لتحليل العوامل المؤثرة في شدة الحوادث، ومقارنتها بين المشاة وراكبي الدراجات. كما يهدف إلى إعادة بناء سيناريوهات الحوادث من خلال تحليل الظروف المساهمة فيها، وإعادة إنشاء مواقف الحوادث لفهم أنماطها وأسبابها على نحو أفضل. وستدعم النتائج تقديم توصيات قائمة على البيانات لتحسين تصميم الطرق، وتعزيز السلامة المرورية، والحد من الإصابات الشديدة بين مستخدمي الطرق الأكثر عرضة للخطر.

مشكلة البحث

تعتمد التحقيقات التقليدية في الحوادث (سواء المرورية أو الصناعية) بشكل كبير على الجهود البشرية والبيانات المحدودة، مما يجعل عملية إعادة بناء سيناريو الحادث عرضة للخطأ البشري، والتأخر الزمني، والقصور في استيعاب التعقيدات الديناميكية للحدث. مع تزايد كثافة البيئات الحديثة وتداخل العوامل البشرية والميكانيكية والبيئية، أصبحت الطرق اليدوية غير قادرة على معالجة الكم الهائل من البيانات المتناثرة (مثل كاميرات المراقبة، وبيانات أجهزة الاستشعار، وسجلات المركبات والأنظمة الذكية) لاستخراج صورة دقيقة وشاملة لكيفية وقوع الحادث وتسلسل أحداثه لحظة بلحظة.

بالإضافة إلى ذلك، تعاني الجهات المعنية بالسلامة من صعوبة في تحليل الأنماط الخفية والمتكررة التي تؤدي إلى الحوادث، حيث يقتصر التحليل غالباً على الأسباب المباشرة والظاهرة دون الغوص في الجذور العميقة والارتباطات المعقدة بين المتغيرات المختلفة. هذا القصور في استغلال تقنيات الذكاء الاصطناعي وتحليل

البيانات الضخمة يحول دون الانتقال من مرحلة "الرد على الحوادث" إلى مرحلة "الاستباق والتنبؤ"، مما يؤدي إلى استمرار وقوع حوادث مماثلة، ويُعشل الجهود المبذولة في تطوير استراتيجيات وقائية فعالة ومستدامة.

أهداف البحث

1. تطوير نموذج ذكاء اصطناعي متكامل يعتمد على دمج البيانات متعددة المصادر (مثل الرؤية الحاسوبية وبيانات المستشعرات) لإعادة بناء سيناريوهات الحوادث بدقة عالية ومحاكاتها رقمياً.
2. تحليل الأنماط الخفية والمتكررة في الحوادث باستخدام خوارزميات التعلم الآلي للكشف عن العوامل المشتركة والجذور العميقة لأسباب الوقوع.
3. تقييم دقة وكفاءة النماذج المقترحة في إعادة بناء الحوادث مقارنة بالطرق التقليدية، وقياس مدى تقليلها للهامش الزمني والبشري في عمليات التحقيق.
4. بناء نظام تنبؤي يستفيد من الأنماط المستخرجة لتحديد "نقاط الخطر" والسيناريوهات المحتملة لوقوع حوادث مستقبلية في بيئات متشابهة.
5. تقديم توصيات عملية وتطبيقية للمخططين الحضريين، ومهندسي السلامة، وصناع القرار لتوظيف مخرجات الذكاء الاصطناعي في تصميم بيئات أكثر أماناً وتقليل معدلات الحوادث.

أهمية البحث

تكمن الأهمية العلمية لهذا البحث في إثراء المكتبة الأكاديمية من خلال تقديم إطار منهجي وتقني يدمج بين علوم الحاسب (الذكاء الاصطناعي والرؤية الحاسوبية) وهندسة السلامة والتحقيق الجنائي والمروري. يساهم

البحث في سد الفجوة القائمة في كيفية توظيف خوارزميات التعلم العميق ومعالجة البيانات الضخمة لتحويل البيانات الخام المشتتة إلى نماذج محاكاة ديناميكية، مما يفتح آفاقاً جديدة للباحثين في مجال التحليل الرقمي للحوادث، وتطوير خوارزميات أكثر تخصصاً وقدرة على فهم السياقات المعقدة للحوادث.

أما على الصعيد التطبيقي والمجتمعي، فإن لهذا البحث أهمية بالغة في إنقاذ الأرواح وتقليل الخسائر المادية والاقتصادية الناجمة عن الحوادث. من خلال توفير أدوات دقيقة وسريعة لإعادة بناء الحوادث وفهم أنماطها، يمكن للجهات الأمنية وشركات التأمين ومراكز إدارة الطوارئ تسريع عمليات التحقيق، وإنصاف المتضررين، وتوجيه الموارد الوقائية نحو المناطق والعوامل الأكثر خطورة. علاوة على ذلك، تُمكن مخرجات هذا البحث الحكومات والشركات من الانتقال نحو منظومات سلامة استباقية ذكية، مما ينعكس إيجاباً على جودة الحياة، ورفع كفاءة البنية التحتية، وتقليل الأعباء على الأنظمة الصحية والقضائية.

مراجعة الأدبيات

تُعد حوادث المرور أحد أبرز التحديات التي تواجه أنظمة النقل في أنحاء العالم، إذ تتأثر معدلاتها وشدتها بمجموعة كبيرة من العوامل الهندسية والبشرية والبيئية. وقد تناولت دراسات سابقة كثيرة موضوع تباين الحوادث من وجهات نظر مختلفة، سعياً إلى فهم الأسباب الكامنة وراء الاختلافات في معدلات الحوادث بين المناطق والفترات الزمنية وأنواع الطرق والمركبات.

وتُظهر الأدبيات باستمرار أن الظروف البيئية تؤثر في السلامة المرورية بأبعاد متعددة؛ إذ تتحدد مستويات مخاطر الحوادث، بصورة مشتركة، من تباين الطقس، وجودة البنية التحتية، وقدرة السائقين على التكيف مع

هذه المتغيرات. وعلى الرغم من تعذر التحكم في العوامل البيئية، يمكن الحد من آثارها من خلال تحسين تصميم البنية التحتية، وتنقيف السائقين، وتطبيق أنظمة لإدارة المرور لتتكيف مع الظروف المناخية الإقليمية. ومع التطور السريع للذكاء الاصطناعي، ازداد توظيف تقنيات التعلم الآلي في أبحاث شدة الحوادث. ومقارنةً بالأساليب الإحصائية التقليدية، تستطيع نماذج التعلم الآلي التعامل بفاعلية مع مجموعات البيانات الكبيرة والمعقدة، بما فيها البيانات المشوشة والقيم الشاذة والقيم المفقودة. وإضافة إلى ذلك، لا تتطلب هذه النماذج تحديد علاقات رياضية مسبقة بين المتغيرات، ما يتيح لها النقاط التفاعلات غير الخطية بين العوامل المرتبطة بالحوادث (Abdel-Aty & Haleem, 2011) وبالمثل، سلّط Karlaftis و (2011) Vlahogianni الضوء على قدرة نماذج التعلم الآلي على النقاط الأنماط المعقدة في بيانات النقل.

تأثير البيئة والسلوك

تشكل البيئة المحيطة بالمركبة مجموعة معقدة من العوامل التي تؤثر تأثيراً مباشراً وكبيراً في إدراك السائق وتركيزه واتخاذ القرارات، وبالتالي في سلامته وسلامة مستخدمي الطرق الآخرين.

وتؤثر الظروف الجوية والطبيعية تأثيراً كبيراً في الحالة المادية للطريق، ومن ثم في السلامة المرورية. وتتباين هذه الآثار بحسب المنطقة، وتتأثر بعوامل مثل هطول الأمطار، ودرجة الحرارة، وتساقط الثلوج.

وتُعد حالة الطرق والبنية التحتية مؤشراً أساسياً على كفاءة نظام النقل وسلامة مستخدمي الطريق. وتعتمد جودة الطرق على مجموعة من العوامل المترابطة، تشمل التصميم الهندسي، ونوع المواد المستخدمة، وحجم حركة المرور، وتأثير الظروف المناخية والطبيعية. ومع مرور الوقت، يتراجع أداء الطرق تدريجياً بسبب الأحمال المتكررة والعوامل البيئية المختلفة، مما يؤدي إلى انخفاض مستوى الخدمة وزيادة احتمال وقوع الحوادث.

وتتميز الطرق الريفية بانخفاض أحجام حركة المرور عليها مقارنةً بالمناطق الحضرية، لكنها تتسم بسرعات تشغيلية أعلى وبنية تحتية أقل تطوراً. وتشير الدراسات إلى أن الحوادث في هذه المناطق تكون غالباً من نوع التصادم وجهاً لوجه أو الخروج عن الطريق، وتتجم عن مناورات التجاوز الخاطئة أو فقدان السيطرة على المركبة.

العوامل البيئية

تؤدي هندسة الطرق وظروف البنية التحتية أيضاً دوراً حاسماً في وقوع الحوادث. فقد حدد (Atubi 2009) أن مقاطع الطرق السريعة التي تتميز بالمنحنيات الحادة والحفر والأسطح غير المستوية تُعد مواقع شائعة لوقوع الحوادث، ولا سيما عندما يقود السائقون بسرعة مفرطة أو في ظروف ضعف الرؤية.

فعلى سبيل المثال، تشهد ميشيغان فصول شتاء طويلة تتساقط فيها الثلوج بغزارة وتتجمد فيها الطرق، مما يؤدي إلى ارتفاع وتيرة الحوادث المرتبطة بالطقس، ولا سيما خلال الأيام الأولى لتساقط الثلوج في الموسم. وتؤدي هذه الظروف إلى إضعاف تماسك الإطارات، وتقليل مدى الرؤية، وغالباً ما تتسبب في تصادمات تشمل عدة مركبات أو في إغلاق الطرق. وفي المناطق التي تشهد أنماطاً موسمية متميزة، حُدِّد تساقط الثلوج أيضاً بوصفه عامل خطر رئيسياً؛ إذ تتجاوز آثاره مخاطر التصادم المباشرة، حيث تؤدي الأسطح الزلقة وانخفاض مدى الرؤية إلى إطالة أمد الازدحام وتعقيد جهود الاستجابة وإعادة فتح الطرق.

شدة الإصابات بين مستخدمي الطرق الأكثر عرضة للخطر

يواجه مستخدمو الطرق الأكثر عرضة للخطر، بمن فيهم المشاة وراكبو الدراجات، مخاطر غير متناسبة في الحوادث المرورية مقارنةً بشاغلي المركبات الآلية. وقد أظهرت الدراسات الحديثة باستمرار ارتفاع معدلات شدة

الإصابة بين هذه الفئة، ولا سيما عند اصطدامهم بمركبات أكبر حجمًا أو في سيناريوهات حوادث محددة، مثل مناورات الرجوع إلى الخلف. ويستعرض هذا القسم أبرز النتائج المستخلصة من الأبحاث السابقة لمقارنة أنماط شدة الإصابة بين المشاة وراكبي الدراجات، وتحديد عوامل الخطر الحاسمة وما يترتب عليها من آثار في تدخلات السلامة على الطرق.

وُثِّق تحليل شدة الإصابة بين مستخدمي الطرق الأكثر عرضة للخطر على نطاق واسع في الدراسات الوبائية حول العالم. فعلى سبيل المثال، حللت دراسة شاملة أُجريت في كوينزلاند بأستراليا خلال الفترة (2013-2019) ما مجموعه 21,158 حادثًا شمل مستخدمي الطرق الأكثر عرضة للخطر، باستخدام نماذج التعلم الآلي، ووجدت أن 35.63% من راكبي الدراجات النارية تعرضوا لإصابات شديدة، مقابل 40.98% من المشاة و53.97% من راكبي الدراجات (Haque et al., 2021) وبالمثل، سلطت أبحاث أُجريت في باكستان الضوء على ارتفاع مخاطر الوفاة التي تواجه هذه الفئة بسبب سرعة المركبة ونوع الطريق (Khan et al., 2025). وتؤكد هذه الأنماط مدى تعرض مستخدمي الطرق غير المحميين للخطر جراء انتقال الطاقة الحركية عند الاصطدام.

وتقدم الدراسات القائمة على بيانات المستشفيات رؤى سريرية إضافية بشأن نتائج الإصابات. فقد أبلغت دراسة أسترالية شملت 37,428 من مستخدمي الطرق الأكثر عرضة للخطر الذين أدخلوا إلى المستشفى عن معدل وفيات خلال 30 يومًا بلغ 2.9% للمشاة، مقابل 0.4% لراكبي الدراجات، كما زادت إصابات الجذع أرجحية التعرض لإصابة شديدة لدى راكبي الدراجات بمقدار 4.11 مرات (Beck et al., 2022) وكشفت التحليلات المقارنة التي أجراها Tefft وآخرون أن المشاة يتعرضون لإصابات أشد في الرأس والجذع عند اصطدامهم

بمركبات متحركة في الاتجاه المعاكس (9.1% إصابات شديدة)، في حين بلغت النسبة 0% لدى راكبي الدراجات في حوادث الرجوع إلى الخلف (Tefft et al., 2016).

مقارنة شدة الإصابات بين المشاة وراكبي الدراجات

تكشف المقارنات المباشرة عن اختلافات دقيقة تتأثر بديناميكيات الحوادث. ففي مناورات الرجوع إلى الخلف، يُظهر المشاة معدلات إصابات شديدة أعلى (9.1%) من راكبي الدراجات (0%)، ويُعزى ذلك إلى الاصطدامات المباشرة من الخلف من دون تأثير للدراجة في امتصاص الصدمة (Tefft et al., 2016) غير أن راكبي الدراجات يواجهون مخاطر أكبر جراء السقوط وتتابع الاصطدامات المتعددة، وتُعد إصابات الرأس من الأسباب الرئيسية للوفاة بينهم، ويزداد خطرها سوءًا عند عدم استخدام الخوذة؛ كما أظهرت دراسة أجريت في قطر أن جميع حالات إصابات الرأس الشديدة (100%) وقعت بين راكبين لم يكونوا يرتدون الخوذات (Al-Thani et al., 2019).

وتزيد المركبات الكبيرة من شدة الإصابات لدى كلتا المجموعتين، غير أن أثرها على المشاة أشد بصورة غير متناسبة. فقد أظهرت أبحاث معهد تأمين السلامة على الطرق السريعة التي أجراها Nie وآخرون (2023) أن سيارات الدفع الرباعي تزيد خطر وفاة المشاة بنسبة 44% لدى البالغين و82% لدى الأطفال، بسبب ارتفاع مواضع الاصطدام في مقدمة المركبة، التي تستهدف الجذع والرأس. ويتعرض راكبو الدراجات لزيادات مماثلة في المخاطر بسبب ارتفاع مناطق التلامس، ما أسهم في ارتفاع الحوادث المميتة بنسبة 45% خلال العقد الماضي (Nie et al., 2023).

وتفسر عدة عوامل ميكانيكية-حيوية وبيئية هذا التفاوت في شدة الإصابات. فتعرض راكبي الدراجات للسقوط من ارتفاع يتراوح بين 1 و1.5 متر يزيد سرعة الاصطدام، ما يرفع معدلات كسور الرأس والأطراف العلوية، على عكس المشاة الذين يكونون واقفين أثناء الاصطدام (Stone et al., 2025) ويؤدي غياب الهياكل الواقية إلى امتصاص أجسام راكبي الدراجات للطاقة الناتجة عن الاصطدام، ويتفاقم ذلك بفعل عيوب الطريق التي تتسبب في فقدان السيطرة (Haque et al., 2021) أما المشاة، فيتعرضون أولاً لإصابات في الأطراف السفلية، ثم لإصابات في الرأس عند ارتطامهم بالأرض، كما أن الفئة العمرية 65 عامًا فأكثر تضاعف أرباحية الوفاة (Beck et al., 2022).

ويؤثر نوع المركبة أيضًا في النتائج؛ إذ تزيد الشاحنات الكبيرة وسيارات الدفع الرباعي تكاليف العلاج وشدة الإصابة في مختلف الفئات العمرية، ولا سيما كبار السن (Kim et al., 2022).

وتدعو هذه النتائج إلى تدخلات موجهة؛ فالخوذات الإلزامية لراكبي الدراجات تقلل إصابات الرأس بدرجة كبيرة (Al-Thani et al., 2019)، في حين تخفض البنية التحتية التي تعطي الأولوية للمشاة، وحدود السرعة التي تقل عن 50 كم/ساعة، خطر الوفاة بمقدار 4.5 أضعاف (WHO, 2023).

المنهجية

طرق جمع البيانات

استُخرجت سجلات حوادث على مستوى الأفراد لخمس سنوات (2016-2020) من قاعدة بيانات حقائق الحوادث المرورية التابعة لشرطة ولاية ميشيغان (الولايات المتحدة الأمريكية). وتتألف مجموعة البيانات من

ملاحظات على مستوى الأفراد، ما يتيح نمذجة شدة الإصابة عند مستوى التعرض الفردي بدلاً من مستوى الحادث الإجمالي.

ويركز التحليل حصرياً على المشاة وراكبي الدراجات بوصفهم من مستخدمي الطرق الأكثر عرضة للخطر. وتُستبعد منهجياً السجلات التي تتضمن رموزاً غير مكتملة لشدة الإصابة، أو تصنيفات مفقودة لمستخدمي الطرق، أو بيانات ملتبسة على مستوى الأفراد، ضماناً لجودة البيانات واتساقها وموثوقية التحليل.

إنشاء السمات واختيار المتغيرات

اختيرت المتغيرات التنبؤية من أربعة مجالات رئيسية لاستيعاب العوامل المؤثرة في مخاطر الإصابة على نحو شامل:

- العوامل المتعلقة بمستخدم الطريق: العمر، والجنس، واستخدام الخوذة، وتعاطي الكحول.
- العوامل المتعلقة بالمركبة: نوع المركبة، والسرعة التقديرية.
- العوامل المتعلقة بالطريق: حد السرعة، والتصنيف الوظيفي، وأجهزة التحكم المروري، ووجود ممر للمشاة.
- العوامل البيئية: ظروف الإضاءة، والطقس، ووقت اليوم.

واستُبعدت المتغيرات التي تعكس مباشرةً نتائج الإصابات أو الاستجابات اللاحقة للحوادث، لتجنب تسرب المعلومات (Data Leakage) واستُرشد في اختيار السمات بالمعرفة المتخصصة ومدى توافر البيانات.

إعادة البناء وتحليل الأنماط باستخدام GPTrace

بهدف تحسين إعادة بناء سيناريوهات الحوادث التي تشمل مستخدمي الطريق الأكثر عرضة للخطر، تم تنفيذ إطار عمل يعتمد على تقنية "GPTrace" للكشف عن الأنماط الكامنة في بيانات الحوادث باستخدام نهج التعلم غير الخاضع للإشراف. وقد حُوِّلت السمات المرتبطة بالحوادث بما في ذلك خصائص مستخدمي الطريق، والظروف البيئية، وعوامل الطريق إلى تمثيلات نصية، ثم جرى ترميزها في هيئة متجهات كثيفة (dense vector embeddings) باستخدام نماذج "Sentence Transformers"؛ مما مكّن النموذج من رصد أوجه التشابه الدلالي بين حالات الحوادث المختلفة.

ثم أُجري التجميع العنقودي للبيانات المضمّنة باستخدام خوارزمية HDBSCAN، التي تحدد عدد العناقيد تلقائيًا استنادًا إلى كثافة البيانات. ولضمان اختيار العدد الأمثل للعناقيد، استُخدم معامل السيلويت، مدعومًا بطريقة المرفق، لتقييم جودة التجميع العنقودي والتأكد من أن العناقيد منفصلة جيدًا ومتسقة داخليًا.

علاوة على ذلك، طُبِّقت خوارزمية UMAP لخفض أبعاد البيانات وعرض بنية التجميع العنقودي في فضاء ثنائي الأبعاد، مما أتاح التحقق بصريًا من انفصال العناقيد. وأخيرًا، استُخدمت c-TF-IDF والأساليب القائمة على السمات لتفسير كل عنقود وتحديد أكثر خصائصه تمثيلًا.

النتائج والمناقشة

الإحصاءات الوصفية

حُلِّلت شدة حوادث مستخدمي الطرق الأكثر عرضة للخطر، وتحديدًا المشاة وراكبي الدراجات، على المستوى الفردي استنادًا إلى بيانات الحوادث الممتدة لخمس سنوات، التي وقعت في ميشيغان بالولايات المتحدة الأمريكية

بين عامي 2016 و2020. وبعد استبعاد الحوادث غير ذات الصلة وسجلات البيانات غير المكتملة لضمان موثوقية التحليل، أُدرج ما مجموعه 14,989 حادثاً لتحليل شدة الإصابة لدى مستخدمي الطرق الأكثر عرضة للخطر.

ويخلص الجدول (1) المتغيرات المختارة لظروف حوادث مستخدمي الطرق الأكثر عرضة للخطر في تحليل شدة الإصابات، وتشمل عوامل مكانية وزمنية وبيئية وعوامل مرتبطة بالمستخدم منسوبة إلى كل حالة. ويوضح الجدول توزيع المتغيرات في مجموعة البيانات، وقدرتها على النقاط أنماط الحوادث التي تؤثر في احتمالية حدوث نوع الإصابة لكل من المشاة وراكبي الدراجات ضمن إطار نمذجة مشترك.

المتغير	العدد	المتوسط	الانحراف المعياري	الحد الأدنى	الحد الأقصى	المتغير
يوم الأسبوع	عطلة نهاية الأسبوع	3233	0.217	0.412	0	1
حد السرعة		14898	33.643	11.7	5	75
أرتباط الحوادث بالتحول	نعم	1207	0.081	0.273	0	1
تورط المخدرات	نعم	328	0.022	0.146	0	1
تورط شاحنة	نعم	268	0.018	0.133	0	1
تورط مركبة طوارئ	نعم	104	0.007	0.084	0	1
تورط سائق مشيت إلى انتباه	نعم	596	0.040	0.196	0	1
عدد المركبات الآلية المتورطة	مفردة	14342	0.9630	0.190	0	1
	متعددة	557	0.037	0.190	0	1
عدد المركبات غير الآلية المتورطة	مفردة	14474	0.971	0.166	0	1
	متعددة	425	0.029	0.166	0	1
حضري إريفي	إريفي	1177	0.079	0.270	0	1
	شبه حضري	3352	0.225	0.418	0	1
	حضري	10369	0.696	0.460	0	1
وجود تقاطع ضمن الحوادث	نعم	8015	0.538	0.499	0	1

المتغير	العدد	المتوسط	الانحراف المعياري	الحد الأدنى	الحد الأقصى	المتغير
تصرف خطر	المتسبب	6868	0.461	0.498	0	1
نوع الحادث	مفردة	10622	0.713	0.452	0	1
	نقص ادم وجهه أو لوجه	3903	0.262	0.444	0	1
	زاوية	60	0.004	0.060	0	1
	خلفي	104	0.007	0.085	0	1
	احتكاك الكاحل	89	0.006	0.075	0	1
	رجوع إلى الخلف	15	0.001	0.038	0	1
العمر	18 أقل من	3427	0.230	0.421	0	1
	18-24	2413	0.162	0.369	0	1
	25-44	3963	0.266	0.442	0	1
	45-64	3823	0.257	0.437	0	1
	فأكثر 65	1251	0.084	0.278	0	1
الجنس	ذكر	10235	0.687	0.463	0	1
نوع المركبة	سيارة ركوب	10816	0.726	0.446	0	1
حالة الإضاءة	ضوء النهار	9416	0.632	0.482	0	1
	ظل ام	4752	0.319	0.466	0	1
	أخرى	730	0.049	0.216	0	1

حالة الطقس	صافي	10369	0.696	0.460	0	1
التحكم المروحي	إشارة صوتية	4648	0.312	0.463	0	1
	علامة توقف	2667	0.179	0.383	0	1
	علامة إعطاء الأولوية	134	0.009	0.095	0	1
	لا يوجد	7449	0.500	0.500	0	1
حالة الطريق	جاف	2875	0.193	0.395	0	1
عدد المسارات	1	1117	0.075	0.264	0	1
	2	6868	0.461	0.499	0	1
	أو أكثر 3	6898	0.463	0.499	0	1
الإجراء السابق	السير مباشرة إلى الأمام	3814	0.256	0.436	0	1
	العبور عند التقاطع	4246	0.285	0.451	0	1
	العبور في منطقة عبور غير مسموح به	2160	0.145	0.352	0	1
	أخرى	4678	0.314	0.464	0	1

التقاطعات. أما القيادة تحت تأثير مواد، فقد تسبب الكحول والمخدرات في 8.1% و 2.2% من الحوادث، على التوالي. علاوة على ذلك، مثلت القيادة المشتتة 4% من جميع الحوادث. وفيما يتعلق بالعوامل البيئية، وقعت غالبية الحوادث في وضوح النهار (63.2%) وفي طقس صافٍ (96.6%)، ما يقدم فهمًا أوليًا مفاده أن مشكلات الرؤية أقل شيوعًا مقارنة بالعوامل الأخرى. وتشير البيانات أيضًا إلى أن سيارات الركاب تستحوذ على الحصة الأكبر من حوادث مستخدمي الطريق الأكثر عرضة للخطر، إذ شكّلت 72.6% من إجمالي الحالات، بينما بلغ متوسط السرعة المحددة على الطريق لجميع الحالات المختارة نحو 33 ميلًا في الساعة. وتُظهر الخصائص الديموغرافية انحيازًا واضحًا نحو الذكور من مستخدمي الطريق الأكثر عرضة للخطر، إذ شكّلوا 68.7% من العينة. أما التوزيع العمري، فيُظهر توازنًا ملحوظًا ضمن فئة متوسطي العمر من مستخدمي الطريق الأكثر عرضة للخطر، بنسبة تقارب 26%، رغم أن نسبة كبيرة (23%) كانت دون 18 عامًا. ومع ذلك، كان لسلوك ما قبل الحادث حضور بارز أيضًا ضمن ملابسات الحوادث. وكان عبور الطريق عند منطقة التقاطع أكثر التصرفات السابقة للحادث تكرارًا (28.5%)، تلاه السير إلى الأمام مباشرة (26%). علاوة على ذلك، تجدر الإشارة إلى أن نحو 46.1% من الحوادث أُسندت مسؤوليتها إلى المستخدم، ما يشير إلى تعقيد تحديد المسؤولية عن الحوادث.

عمومًا، تشير هذه الإحصاءات إلى أن حوادث المشاة وراكبي الدراجات تتركز في المناطق الحضرية وعند التقاطعات، وغالبًا ما تقع في ظل ظروف إضاءة وطقس مواتية. وتبرز العوامل السلوكية، مثل تورط الكحول وحوادث الصدم والفرار، بوصفها عناصر مهمة قد ترتبط بارتفاع احتمال الإصابات الشديدة.

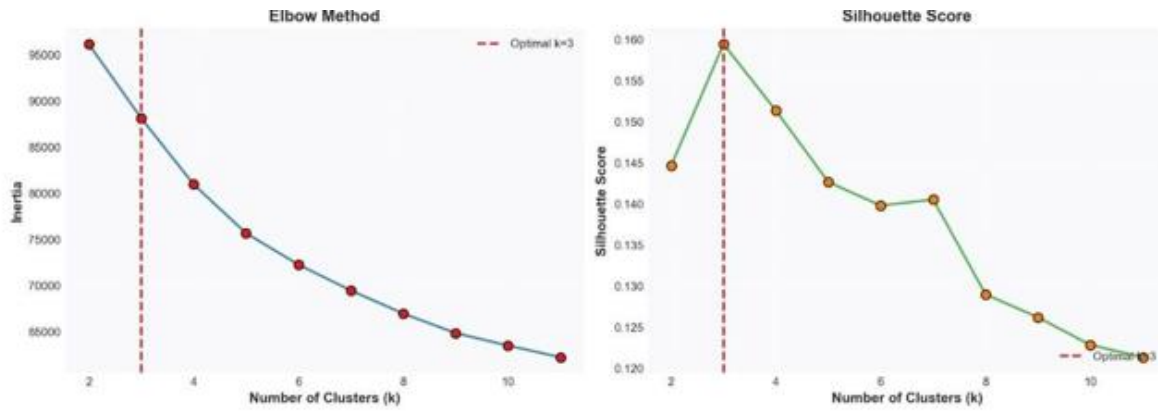
تحليل حوادث المشاة باستخدام GPTrace-

- تحديد العدد الأمثل للعناقيد

لتحديد العدد الأمثل للعناقيد في تحليل GPTrace، طُبِّقَت كل من طريقة الكوع ودرجة السيلويت، كما هو موضح في الشكل 4-1.

تشير طريقة الكوع إلى نقطة انعطاف واضحة عند $k=3$ ، حيث يبدأ الانخفاض في التشتت الداخلي للعناقيد بالتباطؤ، ما يوحي بتناقص العائد من زيادة عدد العناقيد. وبالمثل، تبلغ درجة السيلويت أقصى قيمة لها عند $k=3$ ، ما يشير إلى أفضل توازن بين تماسك العنقود وانفصاله.

يؤكد التوافق بين الطريقتين أن ثلاثة عناقيد توفر التمثيل الأنسب لبيانات حوادث المشاة. وبناءً على ذلك، حُدد عدد سيناريوهات الحوادث بثلاثة لمواصلة التحليل.



تحديد العدد الأمثل للعناقيد باستخدام طريقة الكوع ودرجة السيلويت [4-1] الشكل

- توزيع سيناريوهات الحوادث

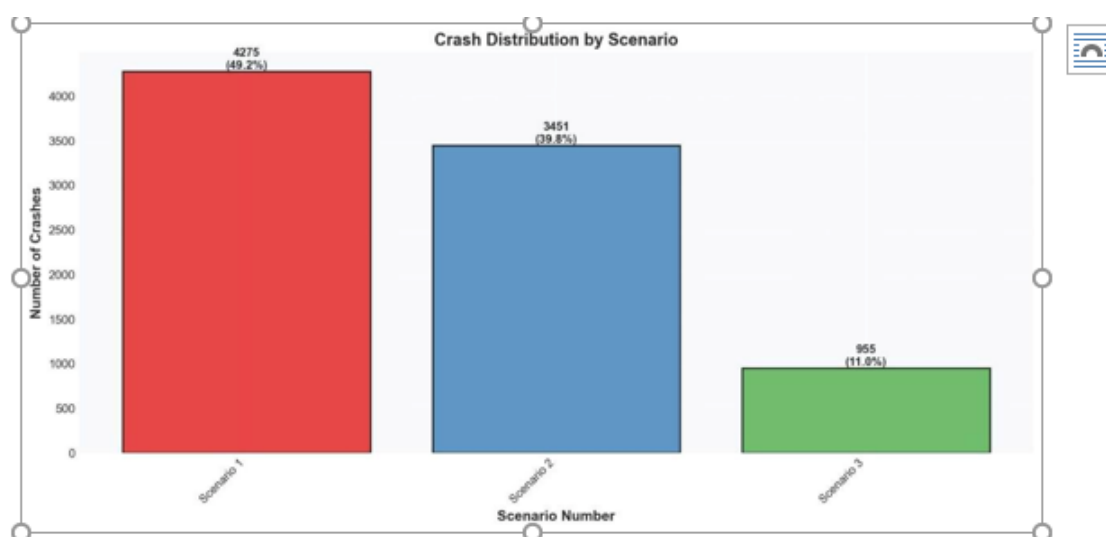
يوضح الشكل 4-2 توزيع سيناريوهات حوادث المشاة.

تُظهر النتائج أن السيناريو 1 هو الأكثر تكرارًا، إذ يشمل 4,275 حادثًا (49.2%). يليه السيناريو 2 بـ 3,451

حادثًا (39.8%)، بينما يمثل السيناريو 3 النمط الأقل تكرارًا، بواقع 955 حادثًا (11.0%).

يشير هذا التوزيع إلى أن غالبية حوادث المشاة تتركز في سيناريوهين مهيمنين، ما يوحي بأن عددًا محدودًا من

الأنماط المتكررة يفسر معظم وقوع الحوادث.



GPTrace توزيع سيناريوهات حوادث المشاة المحددة باستخدام 4-2 الشكل

- خصائص العناقيد وتفسيرها

لمقارنة خصائص العناقيد المحددة، استُخدم مخطط راداري، كما هو موضح في الشكل 4-3. ويُظهر السيناريو 1 قيمًا متوسطة عبر معظم السمات، ما يشير إلى بيئة حوادث متوازنة نسبيًا تتأثر بالعوامل الشائعة المرتبطة بالطريق والمستخدم.

يرتبط السيناريو 2 ارتباطًا وثيقًا بالمتغيرات المتعلقة بالتقاطعات، مما يشير إلى أن الحوادث في هذا العنقود يُرجح وقوعها عند التقاطعات أو بالقرب منها، حيث تكون تفاعلات المرور أكثر تعقيدًا.

يُظهر السيناريو 3 قيمًا أعلى عبر سمات متعددة مرتبطة بالمخاطر، بما في ذلك التورط في الكحول، والتشتت، والتصرفات الخطرة. ويشير ذلك إلى سيناريو عالي الخطورة تتفاعل فيه عوامل مساهمة متعددة في الوقت نفسه، مما يؤدي إلى ظروف حوادث أكثر تعقيدًا.

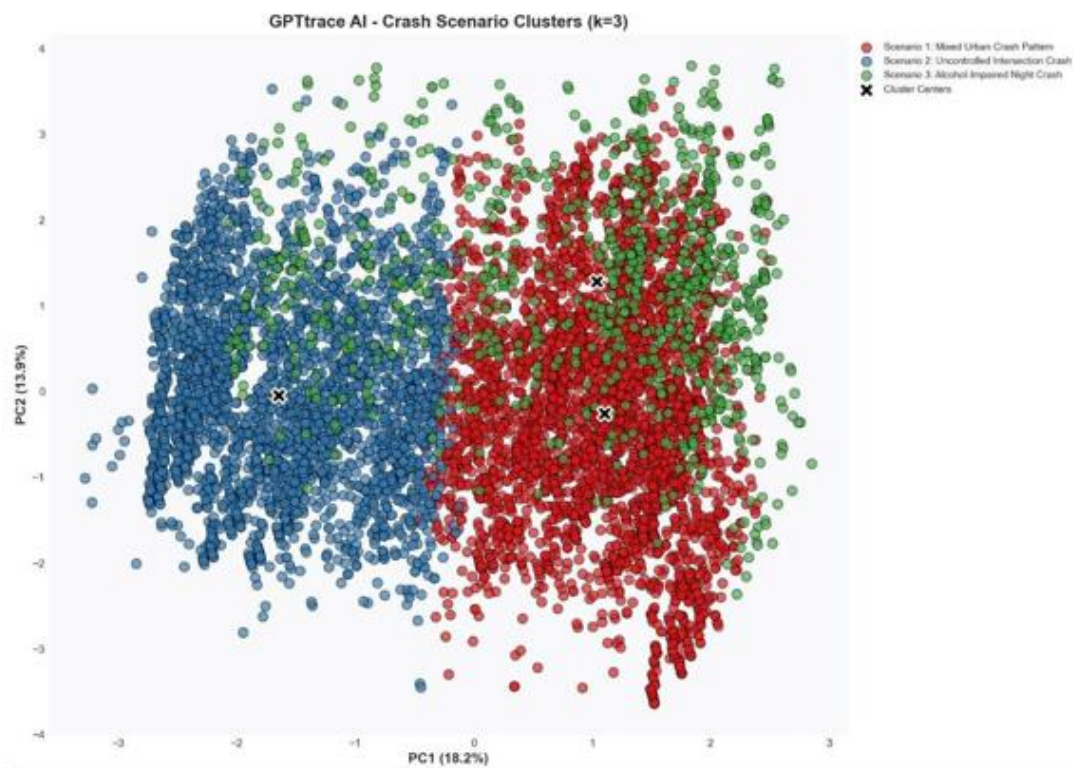
عمومًا، تُظهر النتائج أن كل عنقود يمثل نمطًا متميزًا للحوادث بخصائص فريدة.



- تصور العناقيد والتحقق منها

لمزيد من التحقق من صحة نتائج التجميع العنقودي، استُخدم UMAP لإسقاط البيانات عالية الأبعاد إلى فضاء ثنائي الأبعاد، كما هو معروض في الشكل 4-4.

يُظهر التصوير انفصالاً واضحاً بين العناقيد الثلاثة، ما يؤكد تمايز السيناريوهات المحددة. ويبدو السيناريو 1 والسيناريو 2 أكثر تماسكاً، في حين أن السيناريو 3 أكثر تشتتاً، ما يشير إلى تباين أكبر داخل ذلك العنقود. يشير التداخل المحدود بين العناقيد إلى أن إطار GPTrace التقط بفاعلية الاختلافات ذات الدلالة بين أنماط حوادث المشاة.



الشكل 4.4: تمثيل UMAP لنتائج GPTTrace لتحديد أنماط حوادث المرور باستخدام UMAP

نمط حوادث حضري مختلط: 1/السيناريو

المتغير	القيمة النموذجية	النسبة المئوية
عدد الحوادث	4275	49.2
السرعة	ساعة/ميل 25	31
الكحول	ن/أ	100
التقاطيع	ن/أ	87
الإضاءة	ضوء النهار	55
الطقس	صاف	66
الجنس	ذكر	64
المنارات	2	51
Rd Rtd	رئيسي	58
التحكم المروري	إشارة ضوئية	93
الفئة العمرية	25-45	27
الإجراء المتبع	غير آمن	66
تصرف خطر	نعم	51

خصائص نمط الحوادث الحضري المختلط 4.3 الجدول

ح/ادث عند تقاطع غير منظم: 2/السيناريو

المتغير	القيمة النموذجية	النسبة المئوية
عدد الحوادث	3451	39.8
السرعة	ساعة/ميل 25	35
الكحول	لأ	100
التقاط	نعم	89
الإضاءة	ضوء النهار	61
الطقس	صافي	65
الجنس	ذكر	54
المسارات	3	64
Rd Rtd	رئيسي	71
التحكم المروري	لأ يوجد	64
الفئة العمرية	45-65	27
الإجراء السابق	عدم إعطاء الأولوية	77
تصرف خطر	لأ	66

خصائص ح/ادث عند تقاطع غير منظم 4-4 الجدول

ح/ادث ليلى متأثر ب/الكحول: 3/السيناريو

المتغير	القيمة النموذجية	النسبة المئوية
عدد الحوادث	955	11
السرعة	ساعة/ميل 25	23
الكحول	نعم	100
التقاط	لأ	70
الإضاءة	مضياء/مظلم	79
الطقس	صافي	63
الجنس	ذكر	75
المسارات	3	53
Rd Rtd	رئيسي	66
التحكم المروري	إشارة ضوئية	75
الفئة العمرية	25-45	41
الإجراء السابق	غير آمن	53
تصرف خطر	نعم	69

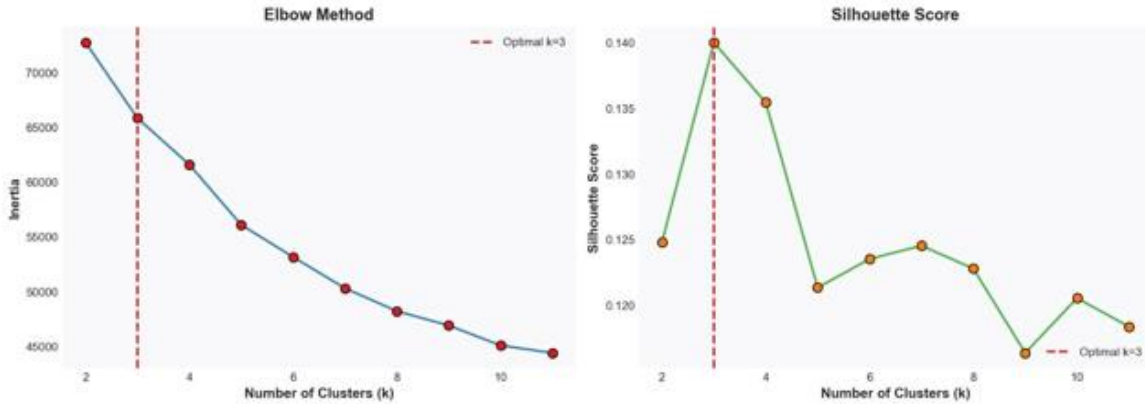
خصائص الحوادث الليلية المتأثر ب/الكحول 4-5 الجدول

تحليل حوادث راكبي الدراجات باستخدام GPTrace

تحديد العدد الأمثل للعناقيد

لتحديد العدد الأمثل للعناقيد في تحليل GPTrace ، طُبِّقَت كل من طريقة الكوع ودرجة السيلويت، كما هو موضح في الشكل 4-5.

تشير طريقة الكوع إلى نقطة انعطاف واضحة عند $k=3$ ، حيث يبدأ الانخفاض في التشتت الداخلي للعناقيد بالتباطؤ، ما يوحي بتناقص العائد من زيادة عدد العناقيد. وبالمثل، تبلغ درجة السيلويت أقصى قيمة لها عند $k=3$ ، ما يشير إلى أفضل توازن بين تماسك العنقود وانفصاله. ويؤكد التوافق بين الطريقتين أن ثلاثة عناقيد توفر التمثيل الأنسب لبيانات حوادث المشاة. وبناءً على ذلك، حُدد عدد سيناريوهات الحوادث بثلاثة لمواصلة التحليل.



تحديد العدد الأمثل للعناقيد باستخدام طريقة الكوع ودرجة السيلويت 4-5 الشكل

- توزيع سيناريوهات الحوادث

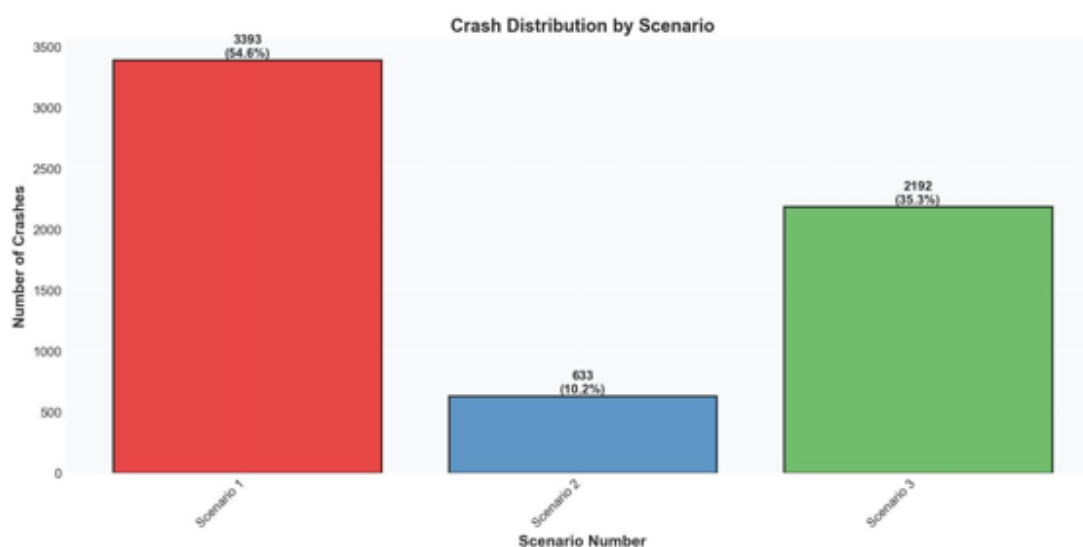
يوضح الشكل 4-6 توزيع سيناريوهات حوادث راكبي الدراجات.

تُظهر النتائج أن السيناريو 1 هو الأكثر تكرارًا، إذ يشمل 3,393 حادثًا (54.6%). يليه السيناريو 3 بـ 2,192

حادثًا (35.3%)، بينما يمثل السيناريو 2 النمط الأقل تكرارًا، بواقع 633 حادثًا (10.2%).

يشير هذا التوزيع إلى أن غالبية حوادث المشاة تتركز في سيناريوهين مهيمنين، ما يوحي بأن عددًا محدودًا من

الأنماط المتكررة يفسر معظم وقوع الحوادث.



GPTrace. توزيع سيناريوهات حوادث راكبي الدراجات المحددة باستخدام 4-6/الشكل

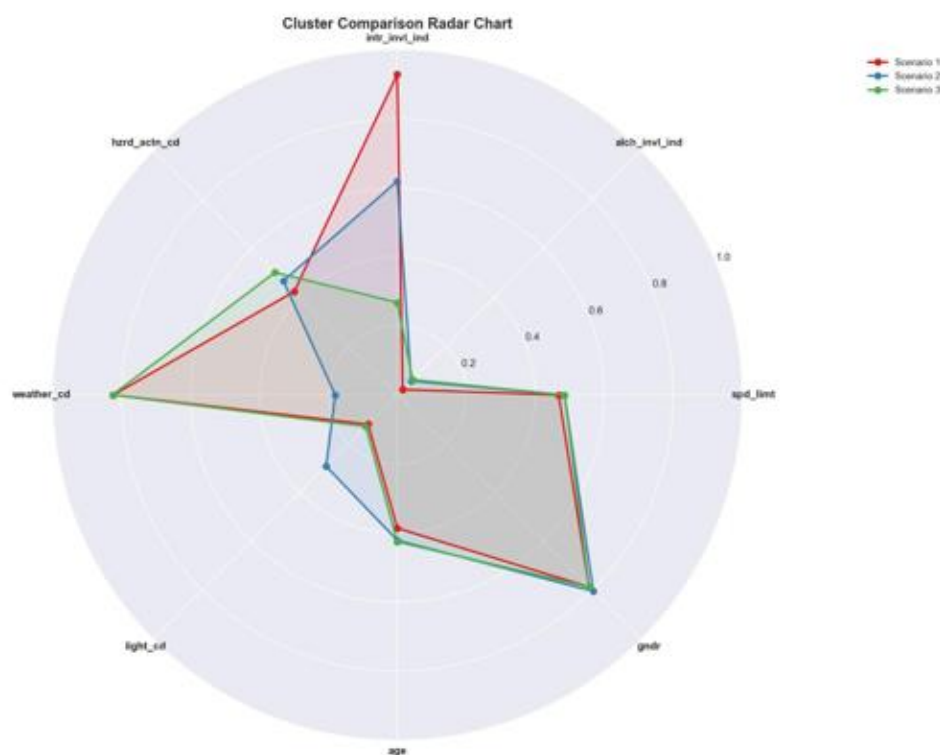
- خصائص العناقيد وتفسيرها

لمقارنة خصائص العناقيد المحددة، استُخدم مخطط راداري، كما هو موضح في الشكل 4-7.

يوضح المخطط الراداري التباين في العوامل الرئيسية المرتبطة بالحوادث عبر السيناريوهات الثلاثة.

يتميز السيناريو 1 بارتفاع مستوى التورط في التقاطعات، مما يشير إلى أن الحوادث ترتبط ارتباطاً وثيقاً بالتعارضات عند التقاطعات. ويُظهر السيناريو 2 عموماً قيماً أقل عبر معظم المتغيرات، مما يشير إلى حالة أكثر استقراراً وأقل عرضة للمخاطر.

في المقابل، يُظهر السيناريو 3 قيماً أعلى في الظروف الجوية والتصرفات الخطرة، ما يشير إلى تأثير أكبر للعوامل البيئية والسلوكية في وقوع الحوادث.



مقارنة مساهمات السمات غير عن أقيد حوادث راكبي الدراجات 4-7 الشكل

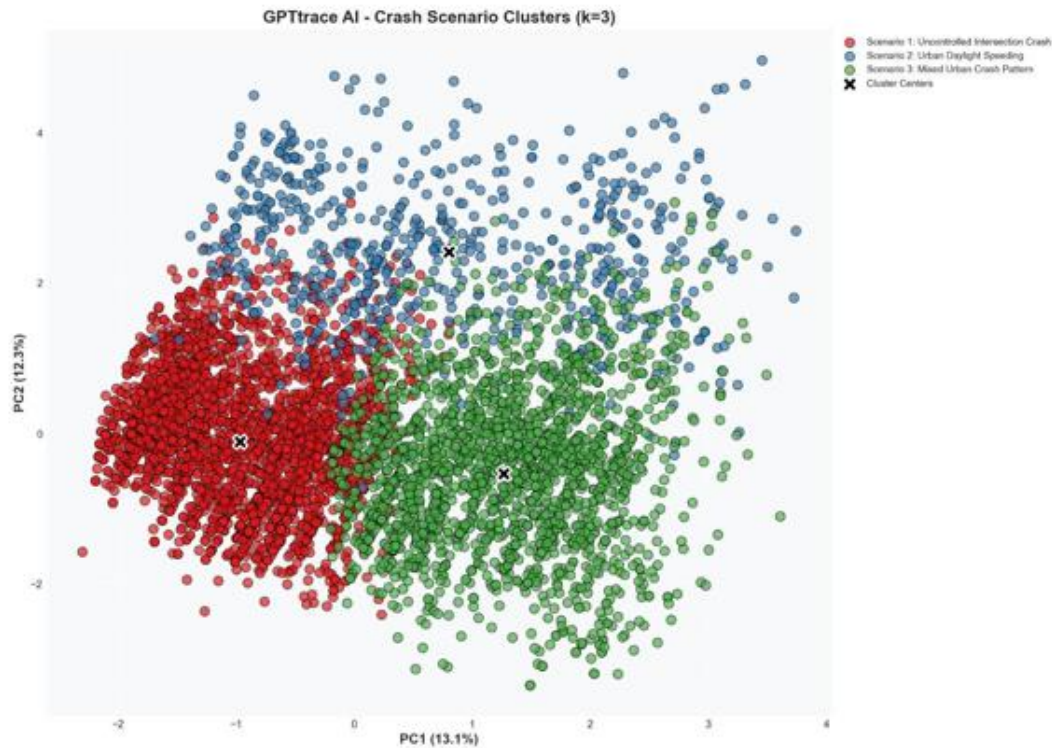
- تصور العناقيد والتحقق منها

لمزيد من التحقق من نتائج التجميع العنقودي، استُخدم UMAP لإسقاط البيانات عالية الأبعاد في فضاء ثنائي الأبعاد، كما هو معروض في الشكل 4-8.

يُظهر التصور بوضوح وجود فصل بين العناقيد الثلاثة، مؤكداً أن السيناريوهات المحددة متميزة ولها خصائص فريدة.

يبدو السيناريو الأول (بالأحمر) الأكثر تماسكاً وكثافةً في الجانب الأيسر، ما يشير إلى نمط متجانس لحوادث التقاطعات غير المنظمة. يليه السيناريو الثاني (بالأزرق)، الذي يشغل موقعاً علوياً مستقراً. أما السيناريو الثالث (بالأخضر)، فيبدو أكثر تشتتاً وانتشاراً، ما يدل على تباين أكبر وتداخل بين العوامل ضمن نمط الحوادث الحضرية المختلطة.

يعكس الحد الأدنى من التداخل بين هذه العناقيد نجاح إطار GPTrace في رصد الفروق المهمة وذات الدلالة بين أنماط حوادث المشاة، مع تباعد مراكز العناقيد بما يكفي لضمان تصنيف كل سيناريو وتحليله بدقة.



GPTTrace لعن أقيد حوادث راكبي الدراجات المحددة باستخدام UMAP تصور 4-8 الشكل

حادث عند تقاطع غير منظم: 1/السيناريو

المتغير	القيمة التوزيعية	النسبة المئوية
عدد الحوادث	3393	54.6%
السرعة	ساعة/كم 25	42%
الكحول	لا	97.7%
التقاط	نعم	92.8%
خطر	لا يوجد	57.6%
الطقس	صاف	82.4%
الإضاءة	ضوء النهار	80.7%
الممرور	إشارة ضوئية	55.6%
Rd rtld	على الطريق	70.2%
حالة الطريق	جاف	100%
عدد المسارات	3	54.8%
العمر	18 أقل من	29.3%
الإجراء السابق	السير مباشرة إلى الأمام	58.2%
الجنس	ذكر	78.6%

خصائص حادث عند تقاطع غير منظم 4-6 الجدول

سرعة زائدة حضرية في وضع النهار: 2/السيناريو

المتغير	القيمة النموذجية	النسبة المئوية
عدد الحوادث	633	10.2
السرعة	ساعة/كم 25	36%
الكحول	لأ	94.3%
التقاط	نعم	62%
الإضاءة	ضوء النهار	49.4%
الطقس	صافي	82%
الجنس	ذكر	80.4%
عدد المسارات	3	48%
حالة الطريق	مبتل	100%
Rd rtld	على الطريق	65%
المرور	علامة إعطاء الأولوية	40.4%
الفئة العمرية	45-64	26.8%
الإجراء السابق	السير مباشرة إلى الأمام	58%
تصرف خطر	لأ يوجد	53.2%

خصائص السرعة الزائدة الحضرية في وضع النهار 4-7 الجدول

نمط حوادث حضري مختلط: 3/السيناريو

المتغير	القيمة النموذجية	النسبة المئوية
عدد الحوادث	2192	35.3%
السرعة	ساعة/كم 25	37%
الكحول	لأ	93.7%
التقاط	لأ	73%
الإضاءة	ضوء النهار	78.6%
الطقس	صافي	82%
الجنس	ذكر	78%
الفئة العمرية	18 أقل من	26%
الإجراء السابق	السير مباشرة إلى الأمام	61%
المرور	علامة إعطاء الأولوية	85.5%
Rd rtld	على الطريق	57%
خطر	نعم	50.1%

خصائص نمط الحوادث الحضري المختلط 4-8 الجدول

النتائج المقارنة الرئيسية

تختلف الآليات المؤدية إلى شدة الحوادث اختلافاً جوهرياً بين المجموعتين. وتتأثر شدة الإصابة لدى المشاة بدرجة أكبر بالعوامل السلوكية، مثل ظروف الإضاءة وتأثير الكحول، كما يبدو أن العمر عامل تنبؤي أكثر بروزاً في نتائج حوادث المشاة. وعلى النقيض من ذلك، يتأثر راكبو الدراجات بدرجة أكبر بديناميات البنية التحتية، بما في ذلك خصائص الطريق، وتكوينات المسارات، والطرق الريفية.

تُظهر هذه النتائج أنه رغم تعرض المجموعتين لمخاطر التقاطعات الخطرة، ينبغي تصميم تدخلات السلامة بما يتناسب تحديداً مع خصائص مواطن الضعف لدى كل مجموعة. وينبغي لاستراتيجيات السلامة التي تركز على المشاة إعطاء الأولوية للحد من المخاطر السلوكية وتحسين التقاطعات المزودة بإشارات، في حين يجب أن تركز المبادرات الموجهة إلى راكبي الدراجات على تحسين البنية التحتية وإدارة ديناميات تدفق حركة المرور في المناطق الحضرية متعددة الاستخدامات.

التوصيات والاستنتاج

- توصيات سلامة المشاة

- تحسين الإضاءة عند التقاطعات: تحسين الإنارة عند التقاطعات المزودة بإشارات والتقاطعات غير المنظمة، للحد من المخاطر المرتبطة بضعف الرؤية، الذي برز عاملاً حاسماً في شدة حوادث المشاة.
- حملات التوعية بالكحول: تنفيذ برامج توعية عامة تتناول تحديداً مخاطر التصرفات تحت تأثير الكحول، نظراً إلى الارتباط القوي الذي جرى رصده بين هذه السلوكيات وحوادث المشاة الشديدة.

- إنفاذ قواعد التحكم المروري: تعزيز إنفاذ قواعد إشارات المرور وأنظمة عبور المشاة للحد من التصرفات الخطرة وتحسين امتثال السائقين والمشاة بوجه عام.

- توصيات سلامة راكبي الدراجات

- بنية تحتية مخصصة للدراجات: إنشاء مسارات منفصلة ومتواصلة للدراجات في المناطق الحضرية للحد من التعرض لظروف حركة المرور المختلطة، ومعالجة التباين الكبير والأنماط المتناثرة التي لوحظت في سيناريوهات راكبي الدراجات ضمن «البيئة الحضرية المختلطة».
- تحسين تصميم التقاطعات: إعادة تصميم التقاطعات غير المنظمة للحد من التعقيد والمناورات الخطرة، بما يضمن مروراً أكثر أماناً وقابلية للتنبؤ لراكبي الدراجات.
- تحسين جودة الطرق: صيانة أسطح الطرق وتطويرها للحد من المخاطر المرتبطة بتفاوت الظروف، ولا سيما في البيئات الحضرية المختلطة حيث يكون توزيع حوادث راكبي الدراجات الأكثر تشتتاً.

- الاستنتاج

تُظهر هذه النتائج أنه رغم تعرض المجموعتين لمخاطر التقاطعات الخطرة، ينبغي تصميم تدخلات السلامة بما يتناسب تحديداً مع خصائص مواطن الضعف لدى كل مجموعة. وينبغي لاستراتيجيات السلامة التي تركز على المشاة إعطاء الأولوية للحد من المخاطر السلوكية وتحسين التقاطعات المزودة بإشارات، في حين يجب أن تركز المبادرات الموجهة إلى راكبي الدراجات على تحسين البنية التحتية وإدارة ديناميات تدفق حركة المرور في المناطق الحضرية متعددة الاستخدامات.

المصادر والمراجع

- A. O. Atubi, "Contemporary analysis of variability in road traffic accidents in Lagos State, Nigeria," *African Geographical Review*, vol. 28, no. 1, pp. 11–41, 2009.
- H. Al-Thani, K. Farhat, and N. Al-Hammadi, "Head injuries in bicycle accidents: A Qatar study," *Qatar Medical Journal*, vol. 2019, no. 2, pp. 45–52, 2019.
- B. Beck, K. Smith, and P. Cameron, "Risk factors associated with severity of hospitalised injury outcome for vulnerable road users," *Journal of Road Safety*, vol. 4, no. 1, pp. 112–128, 2022.
- M. M. Haque, M. S. Haque, and M. Sarker, "Crash severity analysis of vulnerable road users using machine learning methods," *PLoS ONE*, vol. 16, no. 8, Art. no. e0255828, 2021.
- M. A. Khan, S. A. Butt, and R. Ali, "Investigating factors influencing injury severity in crashes involving vulnerable road users in Pakistan," *Scientific Reports*, vol. 15, Art. no. 16477, 2025.
- S. Kim, G. F. Ulfarsson, and V. N. Shankar, "Effects of large vehicles on pedestrian and pedalcyclist injury severity," *Journal of Safety Research*, vol. 83, pp. 256–267, 2022.
- B. Nie and A. Steinfeld, "Higher point of impact makes SUV crashes more dangerous for cyclists," *IIHS Research Brief*, Insurance Institute for Highway Safety, 2023.
- M. Stone and A. Lawson, "Comparing pedestrian and cyclist injuries from falls and collisions," *Sustainable Cities and Society*, vol. 142, Art. no. 105678, 2025.
- B. C. Tefft, E. Arnold, and M. Ramirez, "Injury severity of pedestrians, bicyclists and motorcyclists resulting from traffic crashes," *Traffic Injury Prevention*, vol. 17, no. 8, pp. 861–868, 2016.
- World Health Organization (WHO), "Road traffic injuries fact sheet," 2023.
- M. Abdel-Aty and K. Haleem, "Analyzing angle crashes at unsignalized intersections using machine learning techniques," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 43, no. 1, pp. 461–470, 2011.

<https://jaspss.com>

M. G. Karlaftis and E. I. Vlahogianni, “Statistical methods versus neural networks in transportation research: Differences, similarities and some insights,” Transportation Research Part C, vol. 19, no. 3, pp. 387–399, 2011.