

دراسة مقارنة لأداء بروتوكولات التوجيه المحسنة المعتمدة على AODV و بروتوكولي GPSR و Q-Learning في شبكات المركبات اللاسلكية النقالة VANETS

د.م. أحمد العلي*

الملخص

تشهد شبكات المركبات اللاسلكية النقالة (Vehicular Ad Hoc Networks – VANETs) تطوراً متزايداً باعتبارها أحد المكونات الرئيسة لأنظمة النقل الذكية، حيث توفر بيئة اتصال ديناميكية بين المركبات والبنية التحتية بهدف تحسين السلامة المرورية ورفع كفاءة إدارة حركة المرور. إلا أن الطبيعة الديناميكية لهذه الشبكات، والمتمثلة في السرعات العالية للمركبات والتغير المستمر في طوبولوجيا الشبكة، تفرض تحديات كبيرة على بروتوكولات التوجيه من حيث موثوقية الاتصال واستقرار المسارات وكفاءة نقل البيانات.

يهدف هذا البحث إلى تقييم وتحليل أداء مجموعة من بروتوكولات التوجيه التفاعلية والجغرافية والذكية في شبكات المركبات اللاسلكية، وتشمل البروتوكولات AODV و AODMV و AODV-UU و EAODV و IAODV و GPSR بالإضافة إلى بروتوكول التوجيه الذكي المعتمد على خوارزمية Q-Learning. تم إجراء الدراسة باستخدام مجموعة من سيناريوهات المحاكاة المتعددة التي تعكس ظروف التشغيل الواقعية لشبكات VANETs، بما في ذلك تأثير كثافة المركبات، وسرعات الحركة المختلفة، والبيئات الحضرية والطرق السريعة، وتأثير كثافة وحدات البنية التحتية الجانبية (RSUs)، ونسبة المركبات المشاركة في الشبكة.

اعتمد البحث على تحليل عدد من مؤشرات الأداء المهمة، منها نسبة تسليم الرزم (Packet Delivery Ratio)، ومتوسط التأخير من طرف إلى طرف (End-to-End Delay)، والإنتاجية (Throughput)، ونسبة فقدان الرزم (Packet Loss Ratio)، والحمل الناتج عن التوجيه

(Routing Overhead). أظهرت النتائج أن البروتوكولات المحسنة المعتمدة على AODV تحقق أداءً أفضل من البروتوكول التقليدي AODV ، في حين أظهر البروتوكول IAODV كفاءة عالية في البيئات الحضرية ذات الكثافة المرورية المرتفعة. كما حقق البروتوكول GPSR أداءً متميزاً في بيئات الطرق السريعة بفضل اعتماده على المعلومات الجغرافية للمركبات. أما بروتوكول Q-Learning فقد أظهر قدرة أكبر على التكيف مع التغيرات الديناميكية للشبكة وتحقيق معدلات أعلى لتسليم الرزم مع تقليل التأخير وفقدان البيانات مقارنة بمعظم البروتوكولات الأخرى.

كما بينت النتائج أن دمج وحدات البنية التحتية (RSUs) يسهم بشكل ملحوظ في تحسين موثوقية الاتصال وزيادة كفاءة التوجيه لجميع البروتوكولات المدروسة، مع تحقيق أفضل النتائج عند استخدام البروتوكول الذكي المعتمد على التعلم المعزز. تشير الدراسة إلى أن اختيار بروتوكول التوجيه الأمثل في شبكات VANETS يعتمد على طبيعة البيئة المرورية ومتطلبات التطبيق، وأن دمج تقنيات الذكاء الاصطناعي في عملية التوجيه يمثل اتجاهاً واعداً لتحسين أداء شبكات المركبات اللاسلكية ودعم الجيل القادم من أنظمة النقل الذكية.

الكلمات المفتاحية

شبكات المركبات اللاسلكية (VANETS) ، بروتوكولات التوجيه، AODV ، AOMDV ، AODV-UU ، EAODV ، IAODV ، GPSR ، Q-Learning ، التعلم المعزز ، أنظمة النقل الذكية ، RSU.

* عضو هيئة تدريسية- قسم الشبكات الحاسوبية و النظم- كلية الهندسة المعلوماتية-جامعة حمص.

Comparative Performance Evaluation of Enhanced AODV-Based Routing Protocols, GPSR, and Q-Learning in Vehicle Ad Hoc Networks(VANETS)

Abstract

Dr.eng. Ahmad Alali*

Vehicular Ad Hoc Networks (VANETs) have emerged as one of the key components of Intelligent Transportation Systems (ITS), providing a dynamic communication environment between vehicles and roadside infrastructure to enhance road safety and improve traffic management efficiency. However, the highly dynamic nature of VANETs, characterized by high vehicle mobility and frequent topology changes, poses significant challenges to routing protocols in terms of communication reliability, route stability, and efficient data transmission.

This research aims to evaluate and analyze the performance of a set of reactive, geographic, and intelligent routing protocols in VANETs, including AODV, AOMDV, AODV-UU, EAODV, IAODV, GPSR, and an intelligent routing protocol based on the Q-Learning reinforcement learning algorithm. The study was conducted using multiple simulation scenarios that reflect realistic VANET operating conditions, including variations in vehicle density, vehicle speed, urban and highway environments, roadside unit (RSU) deployment density, and the percentage of participating vehicles.

The evaluation was based on several key performance metrics, including Packet Delivery Ratio (PDR), End-to-End Delay (E2ED), Throughput, Packet Loss Ratio (PLR), and Routing Overhead (RO). The simulation results indicate that the enhanced AODV-based routing protocols outperform the conventional AODV protocol in most evaluated scenarios. Among them, IAODV demonstrated superior performance in dense urban environments,

while GPSR achieved outstanding performance in highway scenarios due to its utilization of geographic position information. Furthermore, the Q-Learning-based routing protocol exhibited greater adaptability to dynamic network conditions, achieving higher packet delivery ratios while reducing end-to-end delay and packet loss compared with most of the other evaluated protocols.

The results also demonstrate that integrating Roadside Units (RSUs) significantly improves communication reliability and routing efficiency across all studied protocols, with the intelligent reinforcement learning-based routing approach achieving the best overall performance. The study concludes that selecting the most appropriate routing protocol in VANETs depends on the traffic environment and application requirements. Moreover, incorporating artificial intelligence techniques into the routing process represents a promising direction for enhancing VANET performance and supporting the next generation of Intelligent Transportation Systems.

Keywords: Vehicular Ad Hoc Networks (VANETs), Routing Protocols, AODV, AOMDV, AODV-UU, EAODV, IAODV, GPSR, Q-Learning, Reinforcement Learning, Intelligent Transportation Systems (ITS), Roadside Units (RSUs).

—

* Lecturer, Department of Systems and Computer Networks, Faculty Of Informatics Engineering, Homs University.

1. مقدمة:

شهد العالم خلال العقود الأخيرة تطوراً متسارعاً في تقنيات الاتصالات اللاسلكية وأنظمة النقل الذكية، مما أدى إلى ظهور مفاهيم وتقنيات حديثة تهدف إلى تحسين كفاءة شبكات النقل وتعزيز السلامة المرورية. وتعد شبكات المركبات اللاسلكية (Vehicular Ad Hoc Networks – VANETs) من أبرز هذه التقنيات، حيث توفر بيئة اتصال ذاتية التنظيم تسمح للمركبات بتبادل المعلومات فيما بينها (Vehicle-to-Vehicle, V2V) أو مع البنية التحتية على جانبي الطرق (Vehicle-to-Infrastructure, V2I) لدعم العديد من التطبيقات الحيوية، مثل التحذير المبكر من الحوادث، وإدارة الازدحام المروري، وتوجيه المركبات، وتوفير خدمات الإنترنت والترفيه للمستخدمين. [1]

تتميز شبكات VANETs بمجموعة من الخصائص التي تجعلها مختلفة عن الشبكات اللاسلكية المتنقلة التقليدية (MANETs)، ومن أهمها الحركة السريعة للمركبات، والتغير المستمر في طوبولوجيا الشبكة، والتبدل المتكرر في الروابط بين العقد، إضافة إلى التباين الكبير في كثافة المركبات بين المناطق الحضرية والطرق السريعة. وتؤثر هذه الخصائص بصورة مباشرة على كفاءة بروتوكولات التوجيه المستخدمة في الشبكة، مما يجعل عملية اختيار البروتوكول المناسب تحدياً أساسياً لضمان استمرارية الاتصال وتحقيق الأداء المطلوب.

تعد بروتوكولات التوجيه من أهم مكونات شبكات المركبات اللاسلكية، حيث تتحكم في آلية اكتشاف المسارات وإدارة حركة البيانات بين المركبات. قد طورت العديد من بروتوكولات التوجيه لتلبية متطلبات هذه الشبكات، ويمكن تصنيفها إلى بروتوكولات تفاعلية (Reactive Routing Protocols) وبروتوكولات جغرافية (Geographic Routing Protocols) وبروتوكولات ذكية تعتمد على تقنيات الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي. من أشهر البروتوكولات التفاعلية بروتوكول AODV والبروتوكولات المحسنة المعتمدة عليه مثل AOMDV و AODV-UU و EAODV و IAODV، والتي تهدف إلى تحسين استقرار المسارات وتقليل التأخير وزيادة موثوقية الاتصال. أما بروتوكول GPSR فيمثل أحد أشهر البروتوكولات الجغرافية التي تعتمد على معلومات الموقع الجغرافي للمركبات لاتخاذ قرارات التوجيه. [2]

ومع التطور المتسارع في تقنيات الذكاء الاصطناعي، ظهرت اتجاهات بحثية حديثة تعتمد على خوارزميات التعلم المعزز (Reinforcement Learning) لتحسين عملية التوجيه في شبكات VANETs. ويعد بروتوكول التوجيه المعتمد على Q-Learning أحد أبرز هذه الاتجاهات، حيث يتيح للعقد التعلم من البيئة المحيطة واتخاذ قرارات توجيه أكثر كفاءة اعتماداً على الخبرات السابقة وحالة الشبكة الحالية، مما يساعد على تحسين نسبة تسليم الرزم وتقليل التأخير وفقدان البيانات في البيئات الديناميكية. [3]

على الرغم من كثرة الدراسات التي تناولت بروتوكولات التوجيه في شبكات VANETs، إلا أن معظمها ركز على مقارنة عدد محدود من البروتوكولات أو دراسة ظروف تشغيل محددة، في حين ما تزال الحاجة قائمة لإجراء دراسة شاملة تجمع بين البروتوكولات التفاعلية المحسنة والجغرافية والذكاء ضمن بيئات تشغيل متعددة تعكس الواقع العملي لشبكات المركبات اللاسلكية. كما أن دراسة تأثير العوامل المختلفة مثل كثافة المركبات، وسرعات الحركة، وطبيعة البيئة المرورية، وكثافة وحدات البنية التحتية الجانبية (RSUs)، تمثل جانباً مهماً لفهم سلوك هذه البروتوكولات وتحديد نقاط القوة والضعف لكل منها.

تكمن أهمية هذا البحث في تقديم إطار مقارن شامل يجمع بين البروتوكولات التقليدية والحديثة المعتمدة على الذكاء الاصطناعي، بما يسهم في دعم تطوير أنظمة النقل الذكية وتحسين كفاءة الاتصالات في شبكات المركبات المستقبلية، فضلاً عن توفير نتائج علمية يمكن الاستفادة منها في تصميم حلول توجيه أكثر ذكاءً وموثوقية تتوافق مع متطلبات الجيل القادم من شبكات النقل الذكية.

2. هدف البحث:

يهدف هذا البحث إلى تقييم وتحليل أداء مجموعة من بروتوكولات التوجيه المحسنة المعتمدة على بروتوكول AODV، والمتمثلة في AOMDV و AODV-UU و EAODV و IAODV، ومقارنتها مع بروتوكول التوجيه الجغرافي GPSR والبروتوكول الذكي المعتمد على التعلم المعزز Q-Learning في بيئات شبكات المركبات اللاسلكية (VANETs). كما يهدف إلى دراسة تأثير مجموعة من العوامل

المؤثرة في أداء الشبكة، مثل كثافة المركبات، وسرعات الحركة، واختلاف البيئات المرورية بين المناطق الحضرية والطرق السريعة، إضافة إلى تأثير استخدام وحدات البنية التحتية الجانبية (RSUs)، ويسعى البحث إلى تحديد البروتوكول الأكثر كفاءة وموثوقية لكل بيئة تشغيلية من خلال تحليل مؤشرات الأداء الرئيسية، بما في ذلك نسبة تسليم الرزم، ومتوسط التأخير، والإنتاجية، ونسبة فقدان الرزم، والحمل الناتج عن التوجيه، بما يسهم في تحسين كفاءة أنظمة النقل الذكية وتطوير شبكات المركبات المستقبلية.

3. أهمية البحث:

تتبع أهمية هذا البحث من الأهمية المتزايدة لشبكات المركبات اللاسلكية باعتبارها أحد الركائز الأساسية لأنظمة النقل الذكية، والتي تهدف إلى تعزيز السلامة المرورية وتحسين انسيابية حركة المرور وتوفير خدمات اتصال موثوقة بين المركبات والبنية التحتية. كما تبرز أهمية البحث في تقديم دراسة مقارنة شاملة بين بروتوكولات التوجيه التفاعلية المحسنة المعتمدة على AODV وبروتوكول GPSR الجغرافي وبروتوكول Q-Learning ضمن سيناريوهات تشغيل متعددة تحاكي الظروف الواقعية لشبكات VANETs، ويسهم البحث في توضيح نقاط القوة والضعف لكل بروتوكول في البيئات الحضرية والطرق السريعة، فضلاً عن دراسة أثر دمج وحدات البنية التحتية (RSUs) على أداء الشبكة. ومن المتوقع أن توفر نتائج البحث مرجعاً علمياً يمكن الاستفادة منه في اختيار بروتوكولات التوجيه المناسبة لتطبيقات النقل الذكي المستقبلية، كما تمثل إضافة علمية في مجال تحسين كفاءة الاتصالات اللاسلكية في شبكات المركبات ذات الحركة العالية. [3]

4. الدراسات السابقة:

حظيت شبكات المركبات اللاسلكية (VANETs) باهتمام واسع من قبل الباحثين خلال السنوات الأخيرة، نظراً للدور المهم الذي تؤديه في أنظمة النقل الذكية وتحسين السلامة المرورية. قد ركزت العديد من الدراسات على تقييم أداء بروتوكولات التوجيه المختلفة بهدف إيجاد حلول قادرة على مواجهة التغير السريع في طوبولوجيا الشبكة الناتج عن الحركة المستمرة للمركبات.

قامت الدراسة [4] بدراسة أثر خوارزميات جدولة الطوابير (Active Queue Management – AQM) على أداء بروتوكولات التوجيه في شبكات المركبات اللاسلكية (VANETs). تم من خلال

استخدام محاكي الشبكة NS3 تقييم أربعة بروتوكولات توجيه وهي AODV, DSR, DSDV, QPSR، وذلك باستخدام ثلاث خوارزميات لإدارة الطوابير وهي DropTail, RED, REM وأظهرت الدراسة أن أفضل أداء في معظم السيناريوهات كان باستخدام بروتوكول QPSR مع خوارزمية الجدولة REM.

ركزت الدراسة [5] على تقييم أداء كل من بروتوكول التوجيه AODV و DSR في شبكات المركبات اللاسلكية باستخدام نموذجي تنقل وهي نموذج تنقل السائق الذكي مع إدارة التقاطعات IDM-IM ونموذج تنقل السائق الذكي مع تغيير المسار IDM-LC وأظهرت الدراسة تفوق البروتوكول AODV.

هدفت الدراسة [6] إلى تطوير بروتوكول توجيه هجين جديد أطلق عليه ReLeVR (Reinforcement Learning-based Vehicular Routing) لتحسين أداء شبكات المركبات اللاسلكية (VANETS) في البيئات الحضرية ذات الطوبولوجيا المتغيرة باستمرار. اعتمد البروتوكول على دمج خوارزمية-Q Learning مع بنية هجينة تجمع بين المركبات ووحدات البنية التحتية الجانبية (RSUs)، بهدف تحسين قرارات التوجيه وتقليل عدد وحدات RSU اللازمة لتغطية الشبكة. أجريت التجارب باستخدام بيانات مرور حقيقية، وقورن أداء البروتوكول المقترح مع البروتوكولين QPSR و QGrid G، كما تمت مقارنة عدد وحدات RSUs المطلوبة مع بروتوكول QTAR. اعتمد التقييم على مؤشرات أداء رئيسية مثل نسبة تسليم الرزم (PDR) ومتوسط التأخير (End-to-End Delay) وأظهرت النتائج أن بروتوكول ReLeVR حقق معدلاً أعلى لتسليم الرزم وزمن تأخير أقل مقارنةً بكل من QPSR و QGrid G، كما احتاج إلى عدد أقل من وحدات RSUs مقارنةً ب QTAR، مما أدى إلى تحسين كفاءة الشبكة وتقليل تكلفة نشر البنية التحتية.

على الرغم من تعدد الدراسات التي تناولت بروتوكولات التوجيه في شبكات VANETS، إلا أن معظمها ركز على مقارنة عدد محدود من البروتوكولات أو دراسة بيئة تشغيل واحدة فقط. كما أنه لا يوجد دراسات جمعت بين البروتوكولات المحسنة المعتمدة على AODV والبروتوكول المعتمد على الموقع QPSR وبروتوكول Q-learning ضمن سيناريوهات متعددة تشمل البيئات الحضرية والطرق السريعة وتأثير البنية التحتية الذكية (RSUs). ومن هنا تأتي أهمية هذا البحث في تقديم دراسة مقارنة شاملة لتقييم أداء البروتوكولات AODV و AOMDV و AODV-UU و EAODV و IAODV و QPSR و Q-Learning ضمن مجموعة متنوعة من السيناريوهات التي تعكس ظروف التشغيل الواقعية لشبكات

المركبات اللاسلكية، بما يسهم في تحديد البروتوكول الأنسب لكل بيئة تشغيلية ودعم تطوير أنظمة النقل الذكية المستقبلية.

5. الدراسة النظرية لبروتوكولات التوجيه المستخدمة:

5.1 بروتوكول AODV (Ad Hoc On-Demand Distance Vector) [7]

يعد بروتوكول AODV أحد أشهر بروتوكولات التوجيه التفاعلية، حيث يعتمد على إنشاء المسار عند الحاجة فقط بين العقد المصدر والوجهة، بدلاً من الاحتفاظ بجداول توجيه كاملة لجميع العقد في الشبكة. عند الحاجة إلى إرسال البيانات، يبدأ المصدر بعملية اكتشاف المسار من خلال بث رسالة Route Request (RREQ)، وعند العثور على المسار المناسب يتم إرسال رسالة Route Reply (RREP) لتأسيس الاتصال، بينما تستخدم رسالة Route Error (RERR) للإبلاغ عن انقطاع المسارات. من ميزاته تقليل رسائل التحكم، استهلاك منخفض للذاكرة فهو مناسب للشبكات متوسطة الحجم، أما عيوبه زيادة التأخير أثناء اكتشاف المسار، انخفاض الأداء عند السرعات العالية، كثرة انقطاع المسارات في البيئات الديناميكية .

5.2 بروتوكول AOMDV (Ad Hoc On-Demand Multipath Distance Vector) [8]

يعد AOMDV تطويراً لبروتوكول AODV ، إذ يعتمد على إنشاء عدة مسارات مستقلة بين المصدر والوجهة بدلاً من مسار واحد فقط. وعند تعطل المسار الأساسي، ينتقل البروتوكول مباشرة إلى أحد المسارات الاحتياطية دون الحاجة إلى إعادة اكتشاف المسار، مما يحسن موثوقية الاتصال ويقلل زمن الاستجابة. من ميزاته تعدد المسارات، تقليل فقدان الرزم، أما عيوبه زيادة حجم جداول التوجيه.

5.3 بروتوكول AODV-UU [9]

يعد AODV-UU أحد أشهر التطبيقات العملية لبروتوكول AODV ، وقد طورته جامعة Uppsala لاستخدامه في الأنظمة الحقيقية والمحاكاة. يقدم تحسينات في معالجة رسائل التحكم، وإدارة جداول

التوجيه، واستقرار الاتصال مقارنة بالتنفيذ الأساسي. من ميزاته تنفيذ عملي مستقر، سرعة أفضل في إدارة المسارات، أما من عيوبه يعتمد على نفس آلية AODV وما يزال يتأثر بالحركة العالية.

5.4 بروتوكول EAODV (Enhanced AODV) [10]

يمثل EAODV مجموعة من التحسينات المقترحة على AODV ، حيث تركز هذه التحسينات على تقليل زمن اكتشاف المسار، وتحسين اختيار العقد الوسيطة، وتقليل الحمل الناتج عن رسائل التحكم، مما ينعكس على رفع نسبة تسليم الرزم وخفض التأخير. من ميزاته تحسين نسبة تسليم الرزم، وتقليل التأخير، وتقليل حمل التوجيه.

5.5 بروتوكول IAODV (Improved AODV) [11]

يهدف IAODV إلى معالجة أوجه القصور في AODV من خلال تحسين اكتشاف المسارات وصيانتها، واستخدام معايير إضافية مثل جودة الرابط أو استقرار العقد لاختيار المسار الأفضل، مما يقلل من احتمال انقطاع الاتصال ويزيد من كفاءة الشبكة. من ميزاته زيادة استقرار المسارات، تقليل فقدان الرزم، تحسين الإنتاجية، أما عيوبه زيادة التعقيد الحسابي.

5.6 بروتوكول GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing) [12]

يعد GPSR من أشهر بروتوكولات التوجيه الجغرافية، حيث يعتمد على معلومات الموقع الجغرافي للعقد بدلاً من إنشاء جداول توجيه تقليدية. يستخدم أسلوب Greedy Forwarding لإرسال الرزم إلى الجار الأقرب إلى الوجهة، وعند مواجهة مشكلة Local Maximum ينتقل إلى أسلوب Perimeter Routing لإيجاد مسار بديل. من ميزاته حمل توجيه منخفض، مناسب للطرق السريعة، لا يحتاج إلى اكتشاف المسار، أما عيوبه يعتمد على توفر معلومات من GPS، يتأثر في البيئات الحضرية المعقدة.

5.7 بروتوكول Q-Learning Routing [13]

يعتمد بروتوكول Q-Learning على خوارزمية التعلم المعزز (Reinforcement Learning) ، حيث تتعلم كل عقدة اختيار أفضل جار لإرسال الرزم اعتماداً على الخبرة السابقة وحالة الشبكة الحالية. يتم تحديث قيم Q بصورة مستمرة وفقاً للمكافآت (Rewards) المرتبطة بنجاح الإرسال، والتأخير، واستقرار الروابط، مما يساعد على تحسين قرارات التوجيه مع مرور الوقت. من ميزاته التكيف مع تغيرات الشبكة، تحسين نسبة تسليم الرزم، تقليل التأخير، اختيار أكثر المسارات استقراراً، أما عيوبه يحتاج إلى مرحلة تعلم، تعقيد حسابي أعلى، يتطلب ذاكرة إضافية لتخزين جدول Q.

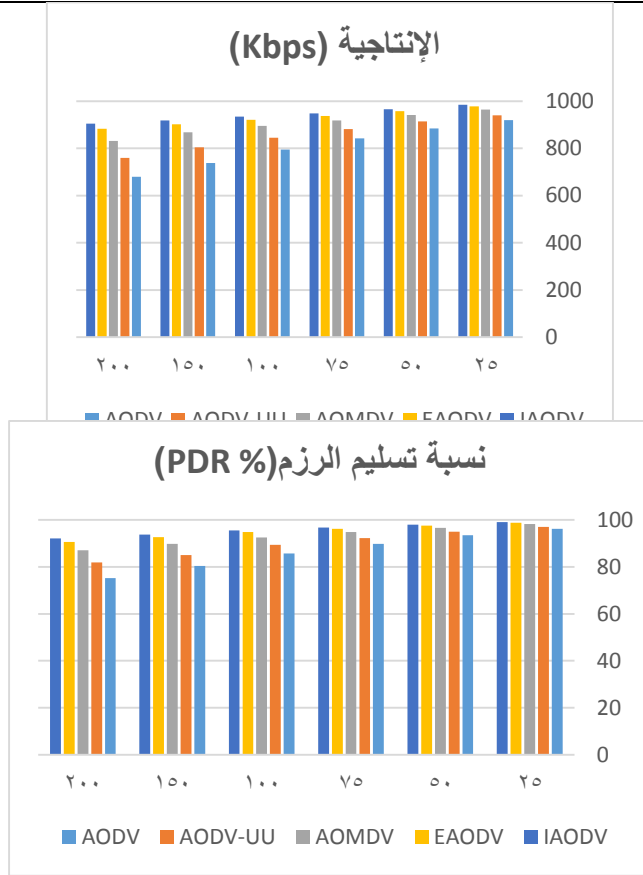
6. التطبيق العملي:

يهدف هذا الفصل إلى تقديم منهجية البحث العملية المعتمدة في تقييم أداء بروتوكولات التوجيه المدروسة، والتي تشمل البروتوكولات التفاعلية AODV و AOMDV و AODV-UU و EAODV و IAODV، إضافة إلى بروتوكول التوجيه الجغرافي GPSR وبروتوكول التوجيه الذكي المعتمد على خوارزمية Q-Learning. وقد تم تصميم مجموعة من سيناريوهات المحاكاة التي تمثل بيئات تشغيل مختلفة لشبكات VANET ، وذلك لدراسة تأثير مجموعة من العوامل المؤثرة في أداء الشبكة، مثل كثافة المركبات، وسرعات الحركة، وطبيعة البيئة المرورية (الحضرية والطرق السريعة)، وكثافة وحدات البنية التحتية الجانبية (RSUs) ، ونسبة المركبات المشاركة في الشبكة. [14] اعتمدت الدراسة على استخدام برنامج SUMO (Simulation of Urban Mobility) لتوليد نماذج حركة المركبات بصورة واقعية، في حين تم استخدام برنامج NS-3 (Network Simulator-3) لتنفيذ بروتوكولات التوجيه ومحاكاة عمليات الاتصال بين المركبات وتحليل أداء الشبكة. [15] كما تم استخدام نموذج الاتصال اللاسلكي وفق معيار IEEE 802.11p، وهو المعيار المعتمد لاتصالات المركبات في شبكات VANET. لتقييم أداء البروتوكولات بصورة موضوعية، تم اعتماد مجموعة من مؤشرات الأداء الرئيسة، وهي: نسبة تسليم الرزم (Packet Delivery Ratio - PDR) ، ومتوسط التأخير من طرف إلى طرف (End-to-End Delay)، والإنتاجية (Throughput) ، ونسبة فقدان الرزم (Packet Loss Ratio - PLR) ، والحمل الناتج عن التوجيه (Routing Overhead) . [14] وقد تم إجراء المحاكاة وفق مجموعة من السيناريوهات المتدرجة، مع تثبيت جميع المعلمات غير المدروسة في كل تجربة لضمان أن تكون الفروقات في النتائج ناتجة عن المتغير قيد الدراسة فقط. [15]

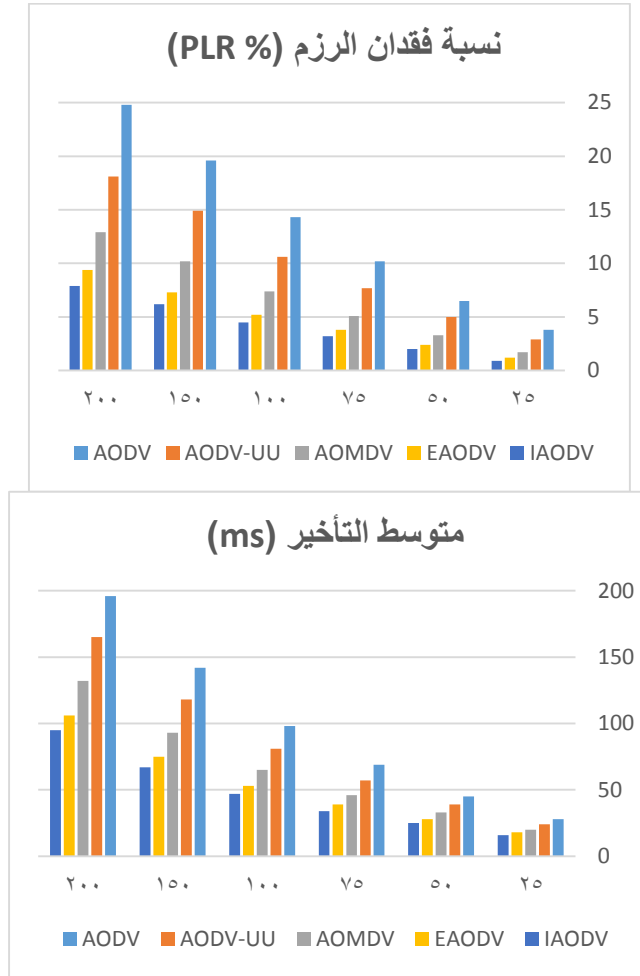
6.1 السيناريو الأول زيادة كثافة المركبات

الجدول (1) بارامترات المحاكاة للسيناريو الأول الذي يتم فيه زيادة عدد المركبات.

المعامل (Parameter)	القيمة (Value)
هدف السيناريو	دراسة تأثير كثافة المركبات على أداء بروتوكولات التوجيه
بيئة المحاكاة	حضرية (Urban)
مساحة الشبكة	2000 × 2000 متر
عدد المركبات	25، 50، 75، 100، 150، 200
سرعة المركبات	60 كم/ساعة (ثابتة)
زمن المحاكاة	300 ثانية
بروتوكولات التوجيه	AODV، AOMDV، AODV-UU، EAODV، IAODV
طبقة MAC	IEEE 802.11p
الطبقة الفيزيائية	IEEE 802.11p PHY
نموذج الانتشار	Two-Ray Ground
مدى الإرسال	250 متر
حجم الرزمة (Packet Size)	512 Byte
نوع الحركة	Constant Bit Rate (CBR)
معدل الإرسال	10 Packets/s
بروتوكول النقل	UDP

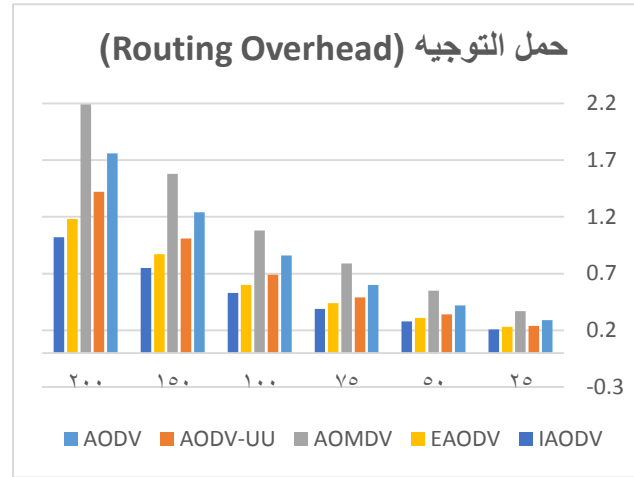


الشكل (1) الإنتاجية ونسبة تسليم الرزم عند زيادة كثافة المركبات في السيناريو الأول يظهر الشكل (1) أن زيادة كثافة المركبات تؤدي إلى انخفاض كل من نسبة تسليم الرزم (PDR) والإنتاجية (Throughput) لدى جميع بروتوكولات التوجيه، وذلك نتيجة زيادة ازدحام القناة اللاسلكية وارتفاع احتمالية تصادم الحزم وانقطاع الروابط. مع ذلك، حقق بروتوكول IAODV أفضل أداء في جميع مستويات الكثافة، حيث سجل أعلى نسبة لتسليم الرزم وأعلى إنتاجية، يليه EAODV ثم AOMDV، بينما جاء AODV-UU في المرتبة الرابعة، وسجل AODV أضعف أداء. ويعزى تفوق IAODV إلى قدرته على اختيار مسارات أكثر استقراراً وتقليل انقطاع الروابط، مما أدى إلى تحسين موثوقية الاتصال وزيادة كفاءة نقل البيانات في شبكات VANET ذات الكثافة المرورية المرتفعة.



الشكل (2) نسبة فقدان الرزم ومتوسط التأخير عند زيادة كثافة المركبات في السيناريو الأول.

يظهر الشكل (2) أن زيادة كثافة المركبات أدت إلى ارتفاع متوسط التأخير (End-to-End Delay) وزيادة نسبة فقدان الرزم (PLR) لدى جميع بروتوكولات التوجيه، نتيجة ازدياد ازدحام القناة اللاسلكية، وارتفاع معدل تصادم الحزم، والانقطاعات المتكررة في الروابط مع تزايد عدد المركبات. قد حقق بروتوكول IAODV أفضل أداء، حيث سجل أقل متوسط تأخير وأدنى نسبة فقدان للرزم في جميع مستويات الكثافة، يليه EAODV ثم AOMDV، بينما جاء AODV-UU في المرتبة الرابعة، وسجل AODV أعلى قيم للتأخير وفقدان الرزم، مما يعكس انخفاض كفاءته في البيئات ذات الكثافة المرورية المرتفعة. وتؤكد هذه النتائج أن التحسينات المضافة إلى IAODV ساهمت في تحسين استقرار المسارات وتقليل انقطاعها، الأمر الذي انعكس إيجابياً على تقليل التأخير وفقدان الرزم، وجعله البروتوكول الأكثر كفاءة وموثوقية للعمل في شبكات VANET عالية الكثافة.



يوضح الشكل أن حمل التوجيه (Routing Overhead)

يزداد مع زيادة عدد المركبات نتيجة

ارتفاع عدد رسائل التحكم اللازمة لاكتشاف وصيانة

المسارات. وقد سجل AOMDV أعلى حمل توجيه بسبب اعتماده على تعدد المسارات، بينما حقق

IAODV أقل حمل توجيه، يليه EAODV، مما يعكس كفاءتهما في إدارة المسارات وتقليل رسائل

التحكم. أما AODV و AODV-UU فقد حققا أداءً متوسطاً بين البروتوكولات المدروسة.

أظهرت نتائج السيناريو الأول أن زيادة كثافة المركبات تؤثر سلباً في أداء جميع بروتوكولات التوجيه،

حيث انخفضت نسبة تسليم الرزم (PDR) والإنتاجية (Throughput)، في حين ارتفع متوسط التأخير

(End-to-End Delay) ونسبة فقدان الرزم

(PLR) وحمل التوجيه (Routing Overhead)

مع زيادة عدد المركبات، وذلك

نتيجة ازدياد ازدحام الشبكة وكثرة انقطاع الروابط. وقد حقق بروتوكول IAODV أفضل أداء بين جميع

البروتوكولات، حيث سجل أعلى نسبة لتسليم الرزم وأعلى إنتاجية، إلى جانب أقل متوسط تأخير وأدنى

نسبة فقدان للرزم وأقل حمل توجيه، مما يعكس كفاءته العالية في اختيار مسارات مستقرة وتقليل رسائل

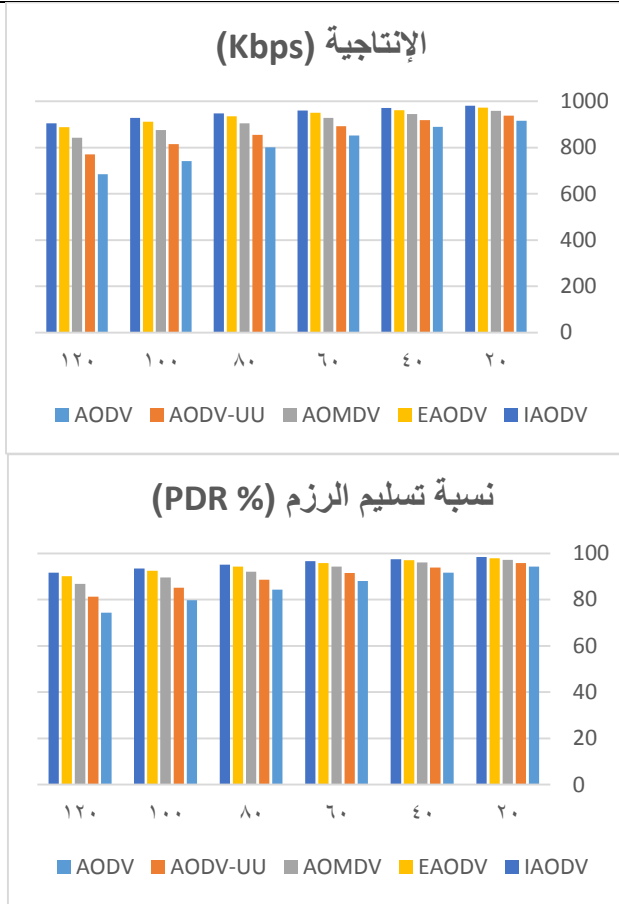
الشكل (3) حمل التوجيه عند زيادة كثافة المركبات في السيناريو الأول.

التحكم. جاء EAODV في المرتبة الثانية، يليه AOMDV، بينما حقق AODV-UU أداءً متوسطاً، في حين سجل AODV أقل كفاءة في معظم مؤشرات الأداء. وتؤكد هذه النتائج أن البروتوكولات المحسنة، ولا سيما IAODV، تتفوق على البروتوكول التقليدي AODV في البيئات ذات الكثافة المرورية المرتفعة، مما يجعلها أكثر ملاءمة للاستخدام في شبكات المركبات اللاسلكية (VANETS).

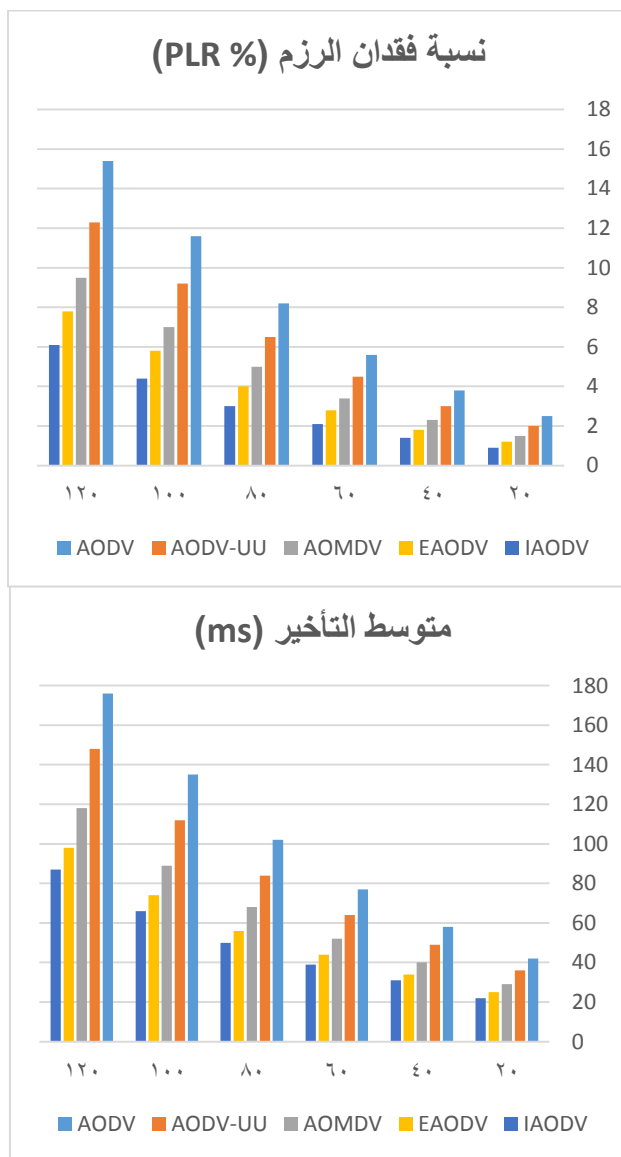
6.2 السيناريو الثاني تأثير سرعة المركبات على أداء بروتوكولات التوجيه في VANET

الجدول (2) بارامترات المحاكاة للسيناريو الثاني الذي يتم فيه زيادة سرعة المركبات.

المعامل (Parameter)	القيمة (Value)
هدف السيناريو	دراسة تأثير سرعة المركبات على أداء بروتوكولات التوجيه
بيئة المحاكاة	حضرية (Urban)
مساحة الشبكة	2000 × 2000 متر
عدد المركبات	100 مركبة
سرعات المركبات	20، 40، 60، 80، 100، 120 كم/ساعة
زمن المحاكاة	300 ثانية
بروتوكولات التوجيه	IAODV، EAODV، AODV-UU، AOMDV، AODV
الطبقة الفيزيائية (PHY)	IEEE 802.11p
نموذج الانتشار	Two-Ray Ground Propagation Model
مدى الإرسال	250 متر
حجم الرزمة (Packet Size)	512 Byte
نوع حركة المرور	Constant Bit Rate (CBR)
معدل إرسال الرزم	10 Packets/s
بروتوكول النقل	UDP



الشكل (4) الإنتاجية ونسبة تسليم الرزم مع زيادة سرعة المركبات في السيناريو الثاني. يظهر الشكل (4) أن زيادة سرعة المركبات تؤدي إلى انخفاض نسبة تسليم الرزم (PDR) والإنتاجية (Throughput) لدى جميع بروتوكولات التوجيه، نتيجة التغير السريع في طوبولوجيا الشبكة وزيادة انقطاع الروابط. قد حقق IAODV أفضل أداء في جميع مستويات السرعة، يليه EAODV ثم AOMDV، بينما جاء AODV-UU في المرتبة الرابعة، وسجل AODV أقل أداء، خاصة عند السرعات العالية. وتشير النتائج إلى أن IAODV هو الأكثر كفاءة في الحفاظ على استقرار الاتصال وتحسين نقل البيانات في شبكات VANET ذات الحركة العالية.



الشكل (5) نسبة فقدان الرزم ومتوسط التأخير مع زيادة سرعة المركبات في السيناريو الثاني. أظهرت النتائج في الشكل (5) أن زيادة سرعة المركبات تؤدي إلى ارتفاع متوسط التأخير (End-to-End Delay) ونسبة فقدان الرزم (PLR) لدى جميع بروتوكولات التوجيه، نتيجة التغير السريع في طوبولوجيا الشبكة وتكرار انقطاع الروابط. قد حقق IAODV أفضل أداء، حيث سجل أقل متوسط

تأخير وأدنى نسبة فقدان للرزم في جميع مستويات السرعة، يليه EAODV ثم AOMDV، بينما جاء AODV-UU في المرتبة الرابعة، وسجل AODV أعلى قيم للتأخير وفقدان الرزم، خاصة عند السرعات العالية. وتشير هذه النتائج إلى أن IAODV يتمتع بقدرة أكبر على الحفاظ على استقرار المسارات وتحسين موثوقية الاتصال في شبكات VANET ذات الحركة السريعة.

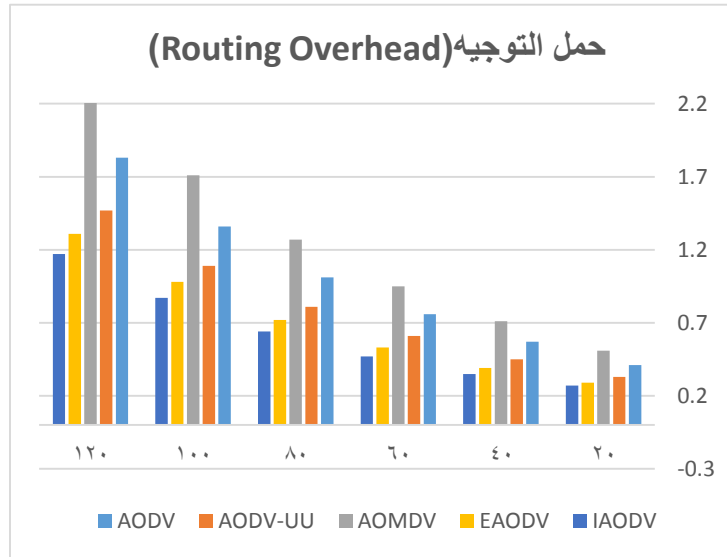
يظهر الشكل (6) حمل التوجيه للبروتوكولات المدروسة ونرى أنه بشكل مشابه للنتائج السابقة أن البروتوكول IAODV أعطى أفضل أداء والبروتوكول AOMDV أسوأ أداء.

أظهرت نتائج السيناريو الثاني أن زيادة سرعة المركبات تؤدي إلى تدهور أداء جميع بروتوكولات التوجيه، حيث انخفضت نسبة تسليم الرزم (PDR) والإنتاجية (Throughput)، بينما ارتفع متوسط التأخير (Delay) ونسبة فقدان الرزم (PLR) وحمل التوجيه (Routing Overhead).

مع زيادة السرعة. قد حقق

IAODV أفضل أداء في جميع مؤشرات التقييم، يليه EAODV ثم AOMDV، بينما

جاء AODV-UU في المرتبة الرابعة، وسجل AODV أضعف أداء. وتؤكد النتائج أن IAODV هو البروتوكول الأكثر كفاءة للتعامل مع البيئات عالية الحركة في شبكات VANET.



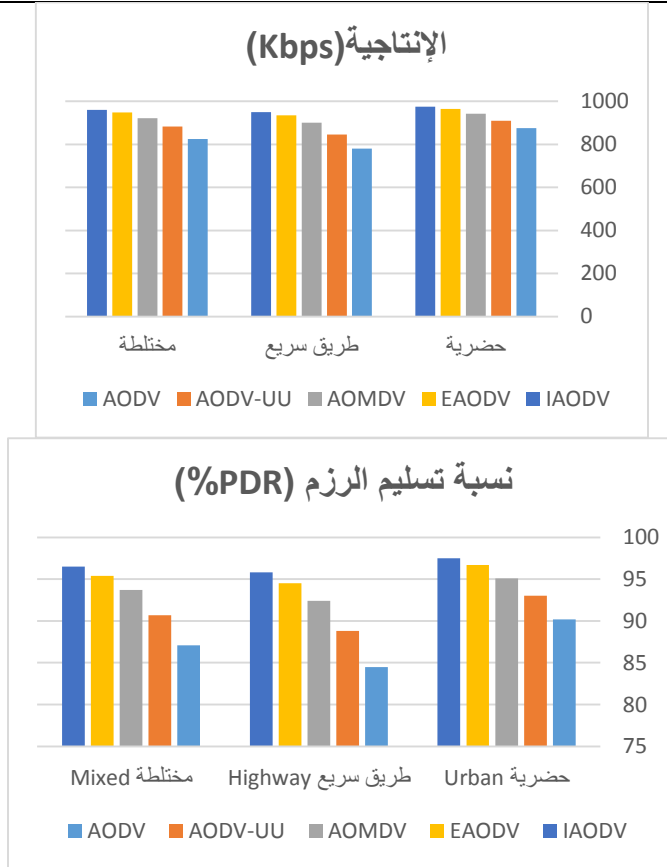
الشكل (6) حمل التوجيه مع زيادة سرعة المركبات في السيناريو الثاني.

6.3 السيناريو الثالث نوع البيئة المرورية

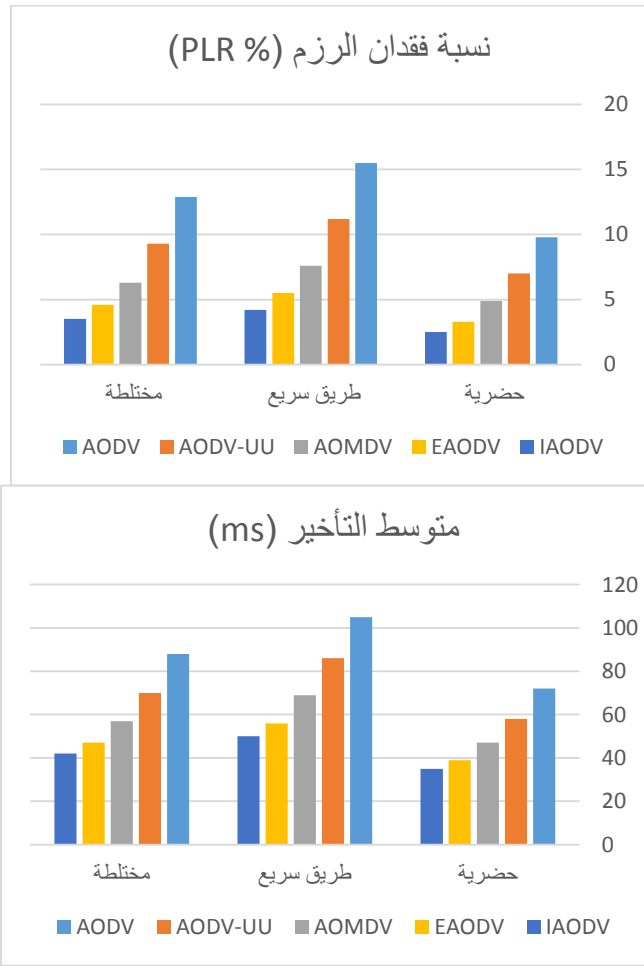
الجدول (3) بارامترات المحاكاة للسيناريو الثالث لدراسة تأثير نوع البيئة المرورية.

دراسة مقارنة لأداء بروتوكولات التوجيه المحسنة المعتمدة على AODV وبروتوكولي Q- و GPSR
Learning في شبكات المركبات اللاسلكية النقلة VANETS

المعامل (Parameter)	القيمة (Value)
هدف السيناريو	دراسة تأثير نوع البيئة المرورية على أداء بروتوكولات التوجيه
بيئة المحاكاة	حضرية (Urban) وطريق سريع (Highway)
مساحة الشبكة	2000 × 2000 متر
عدد المركبات	100 مركبة
سرعة المركبات	60 كم/ساعة (ثابتة)
زمن المحاكاة	300 ثانية
بروتوكولات التوجيه	IAODV ، EAODV ، AODV-UU ، AOMDV ، AODV
طبقة MAC	IEEE 802.11p
الطبقة الفيزيائية (PHY)	IEEE 802.11p
نموذج الانتشار	Two-Ray Ground Propagation Model
مدى الإرسال	250 متر
حجم الرزمة (Packet Size)	512 Byte
نوع حركة المرور	Constant Bit Rate (CBR)
معدل إرسال الرزم	10 Packets/s
بروتوكول النقل	UDP



الشكل (7) الإنتاجية ونسبة تسليم الرزم عند دراسة تأثير نوع البيئة المرورية في السيناريو الثالث. أظهرت النتائج أن بروتوكول IAODV حقق أفضل أداء في جميع البيئات المرورية، حيث سجل أعلى نسبة لتسليم الرزم (PDR) وأعلى إنتاجية (Throughput)، يليه EAODV ثم AOMDV، بينما جاء AODV-UU في المرتبة الرابعة، وسجل AODV أقل أداء. كما تبين أن أداء جميع البروتوكولات كان الأفضل في البيئة الحضرية (Urban)، وانخفض في بيئة الطريق السريع (Highway) نتيجة زيادة ديناميكية الحركة وسرعة تغير الروابط، في حين جاءت نتائج البيئة المختلطة (Mixed) بين البيئتين. وتشير هذه النتائج إلى أن IAODV يتميز بقدرته على الحفاظ على استقرار المسارات وتحسين موثوقية الاتصال، مما انعكس على ارتفاع نسبة تسليم الرزم وزيادة الإنتاجية في مختلف البيئات المرورية.



الشكل (8) نسبة فقدان الرزم ومتوسط التأخير عند دراسة تأثير نوع البيئة المرورية في السيناريو الثالث.

أظهرت النتائج أن بروتوكول IAODV حقق أفضل أداء في جميع البيئات المرورية، حيث سجل أقل متوسط تأخير وأدنى نسبة فقدان للرزم، يليه EAODV ثم AOMDV، بينما جاء AODV-UU في المرتبة الرابعة، وسجل AODV أعلى قيم للتأخير وفقدان الرزم. كما تبين أن أداء جميع البروتوكولات كان أفضل في البيئة الحضرية (Urban)، في حين ارتفع التأخير وفقدان الرزم في بيئة الطريق السريع (Highway) نتيجة زيادة ديناميكية الحركة وسرعة تغير الروابط، بينما جاءت نتائج البيئة المختلطة

(Mixed) بين البيئتين. وتؤكد هذه النتائج كفاءة AODV في تحسين استقرار المسارات وتقليل فقدان البيانات في مختلف البيئات المرورية.

تشير نتائج السيناريو الثالث أن نوع البيئة المرورية يؤثر بشكل واضح في أداء بروتوكولات التوجيه، حيث حققت جميع البروتوكولات أفضل أداء في البيئة الحضرية (Urban)، بينما انخفض الأداء في بيئة الطريق السريع (Highway) نتيجة السرعات العالية والتغير السريع في طوبولوجيا الشبكة، في حين جاءت نتائج البيئة المختلطة (Mixed) بين البيئتين. وقد حقق بروتوكول IAODV أفضل أداء في جميع مؤشرات التقييم، حيث سجل أعلى نسبة لتسليم الرزم (PDR) وأعلى إنتاجية (Throughput)، إلى جانب أقل متوسط تأخير (End-to-End Delay) وأدنى نسبة فقدان للرزم (PLR) وأقل حمل توجيه (Routing Overhead)، يليه EAODV ثم AOMDV، بينما جاء AODV-UU في المرتبة الرابعة، وسجل AODV أضعف أداء. تؤكد هذه النتائج أن IAODV هو البروتوكول الأكثر كفاءة وقدرة على التكيف مع اختلاف البيئات المرورية في شبكات VANET، مما يجعله الخيار الأنسب للتطبيقات التي تتطلب اتصالاً مستقرًا وموثوقًا في الظروف التشغيلية المختلفة.

6.4 السيناريو الرابع مقارنة أداء بروتوكولي IAODV و GPSR في بيئات مرورية مختلفة

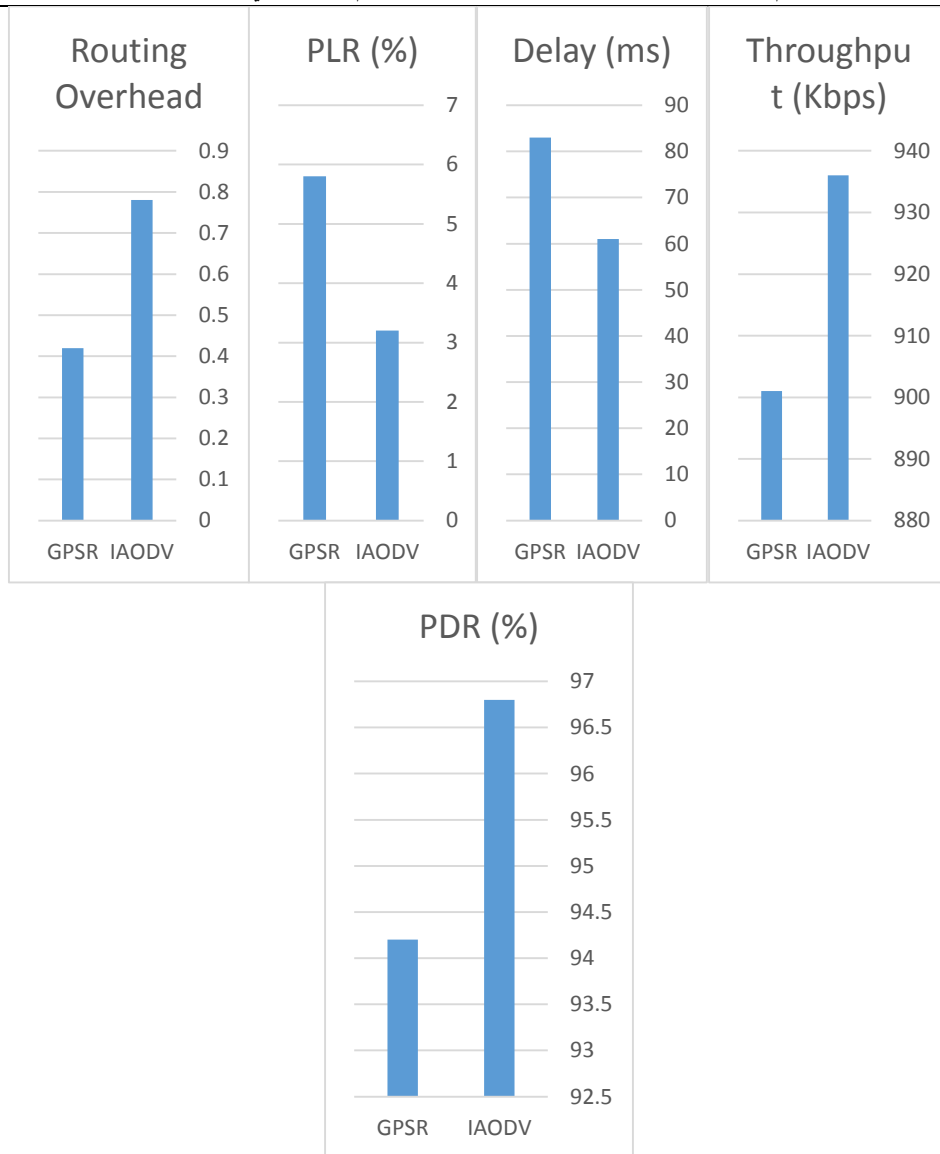
جدول (4): بارامترات المحاكاة للسيناريو الرابع لمقارنة IAODV و GPSR في البيئات المرورية المختلفة.

المعامل (Parameter)	القيمة (Value)
هدف السيناريو	مقارنة أداء بروتوكولي IAODV و GPSR في بيئات مرورية مختلفة
بروتوكولات التوجيه	GPSR، IAODV
بيئة المحاكاة	حضرية (Urban) وطريق سريع (Highway)
مساحة الشبكة	3000 × 3000 متر
عدد المركبات	100 مركبة

دراسة مقارنة لأداء بروتوكولات التوجيه المحسنة المعتمدة على AODV وبروتوكولي Q- و GPSR
Learning في شبكات المركبات اللاسلكية النقالـة VANETS

سرعة المركبات	30-60 كم/ساعة (Urban) ، 80-120 كم/ساعة (Highway)
زمن المحاكاة	600 ثانية
طبقة MAC	IEEE 802.11p
الطبقة الفيزيائية (PHY)	IEEE 802.11p
نموذج الانتشار	Two-Ray Ground Propagation Model
مدى الإرسال	250 متر
حجم الرزمة (Packet Size)	512 Byte
نوع حركة المرور	Constant Bit Rate (CBR)
معدل إرسال الرزم	10 Packets/s
بروتوكول النقل	UDP

البيئة الحضرية Urban:

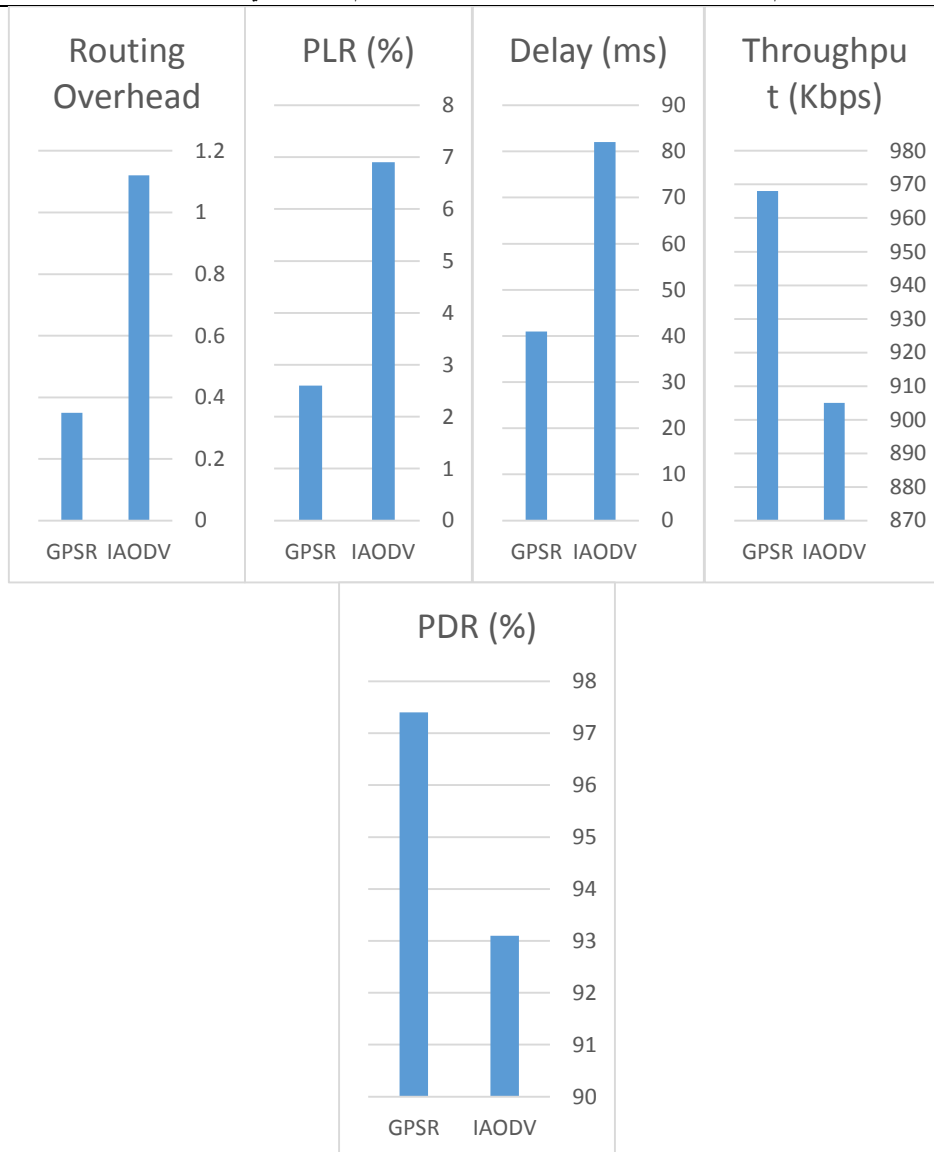


الشكل (9) المحاكاة للسيناريو الرابع لمقارنة IAODV و GPSR في البيئة الحضرية.

أظهرت النتائج أن بروتوكول IAODV تفوق على GPSR في معظم مؤشرات الأداء، حيث حقق أعلى نسبة لتسليم الرزم (96.8%) وأعلى إنتاجية (936 Kbps)، بالإضافة إلى أقل متوسط تأخير

(61 ms) وأدنى نسبة فقدان للـرزم (3.2%) ، مما يدل على كفاءته العالية في توفير اتصال مستقر وموثوق في البيئة الحضرية. في المقابل، سجل GPSR أقل حمل توجيه (0.42) مقارنةً بـ IAODV (0.78)، ويعزى ذلك إلى اعتماده على التوجيه الجغرافي باستخدام معلومات الموقع دون الحاجة إلى عمليات اكتشاف وصيانة المسارات، مما يقلل عدد رسائل التحكم. تشير النتائج إلى أن IAODV يعد الخيار الأنسب عند التركيز على جودة وموثوقية نقل البيانات، بينما يتميز GPSR بانخفاض حمل التوجيه، مما يجعله مناسباً للتطبيقات التي تتطلب تقليل رسائل التحكم في الشبكة.

البيئة السريعة Highway VANET :



الشكل (10) نتائج المحاكاة للسيناريو الرابع لمقارنة IAODV و GPSR في البيئة السريعة.

أظهرت النتائج أن بروتوكول GPSR تفوق على IAODV في جميع مؤشرات الأداء تقريباً في بيئة الطريق السريع، حيث حقق أعلى نسبة لتسليم الرزم (97.4%) وأعلى إنتاجية (968 Kbps)، إلى

جانب أقل متوسط تأخير (41 ms) وأدنى نسبة فقدان للزم (2.6%) وأقل حمل توجيه (0.35). يعزى هذا التفوق إلى اعتماد GPSR على التوجيه الجغرافي باستخدام معلومات الموقع، مما يجعله أكثر ملاءمة للطرق السريعة التي تتميز بحركة منتظمة وسرعات عالية. في المقابل، سجل IAODV أداءً أقل في هذه البيئة، حيث انخفضت نسبة تسليم الرزم وارتفع كل من التأخير، وفقدان الرزم، وحمل التوجيه نتيجة التغير السريع في الروابط والحاجة المتكررة إلى إعادة اكتشاف المسارات. تؤكد هذه النتائج أن GPSR هو الخيار الأنسب لبيئات الطرق السريعة (Highway VANET)، بينما يحقق IAODV أداءً أفضل في البيئات الحضرية ذات الحركة المعقدة، مما يبرز أن كفاءة بروتوكول التوجيه تعتمد بشكل كبير على طبيعة البيئة المرورية.

6.5 السيناريو الخامس تأثير نسبة المركبات المشاركة في الشبكة

فكرة هذا السيناريو أنه في الواقع العملي ليست جميع المركبات مجهزة بوحدات اتصال VANET لذلك تتم دراسة تأثير نسبة المركبات المشاركة في الاتصال على أداء IAODV و GPSR. تم تحديد نسبة المركبات المشاركة بـ 20%، 40%، 60%، 80%، 100% لتقييم مدى تأثير انتشار المركبات المجهزة بوحدات الاتصال على أداء بروتوكولي IAODV و GPSR، وتحديد البروتوكول الأكثر كفاءة في المراحل الانتقالية قبل الوصول إلى الانتشار الكامل لمركبات VANET، وهو سيناريو يعكس بصورة أفضل ظروف النشر الواقعية للشبكات الذكية.

الجدول (5): بارامترات المحاكاة للسيناريو الخامس (تأثير نسبة المركبات المشاركة في الشبكة).

المعامل (Parameter)	القيمة (Value)
هدف السيناريو	دراسة تأثير نسبة المركبات المشاركة في الاتصال على أداء بروتوكولي IAODV و GPSR
بروتوكولات التوجيه	IAODV، GPSR
بيئة المحاكاة	حضرية (Urban) وطريق سريع (Highway)
مساحة الشبكة	3000 × 3000 متر
عدد المركبات الكلي	200 مركبة

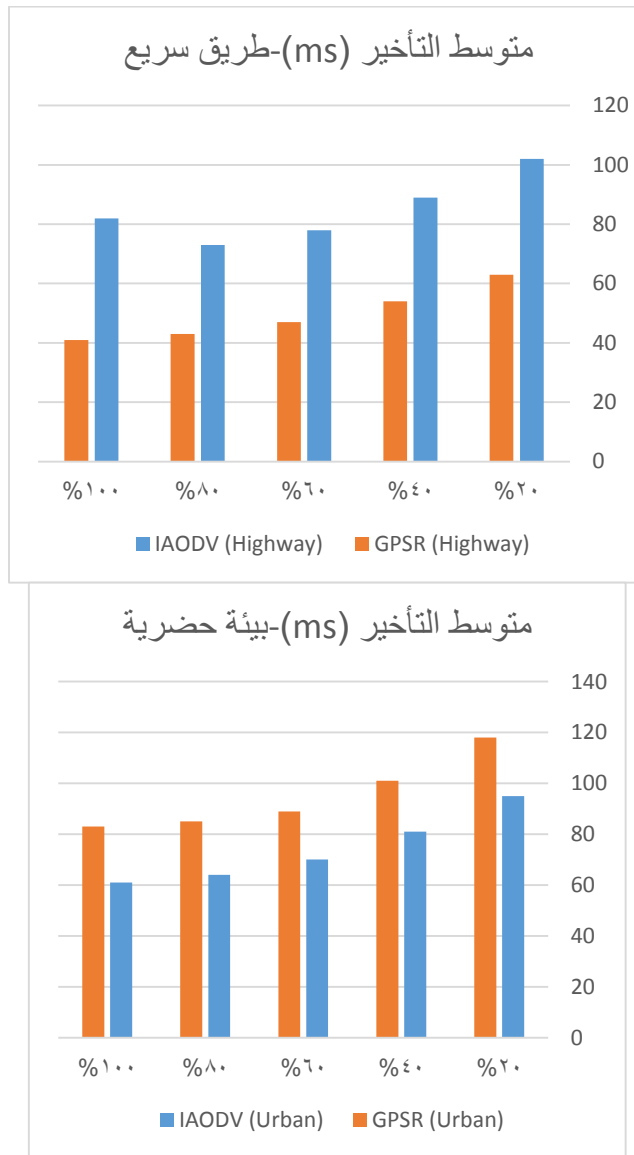
نسبة المركبات المشاركة	20%، 40%، 60%، 80%، 100%
عدد المركبات المشاركة	40، 80، 120، 160، 200 مركبة
سرعة المركبات	60 كم/ساعة (Urban)، 100 كم/ساعة (Highway)
زمن المحاكاة	600 ثانية
طبقة MAC	IEEE 802.11p
الطبقة الفيزيائية (PHY)	IEEE 802.11p
نموذج الانتشار	Two-Ray Ground Propagation Model
مدى الإرسال	250 متر
حجم الرزمة (Packet Size)	512 Byte
نوع حركة المرور	Constant Bit Rate (CBR)
معدل إرسال الرزم	10 Packets/s
بروتوكول النقل	UDP



الشكل (11) نسبة تسليم الرزم مع تغير نسب المركبات المشاركة في السيناريو الخامس.

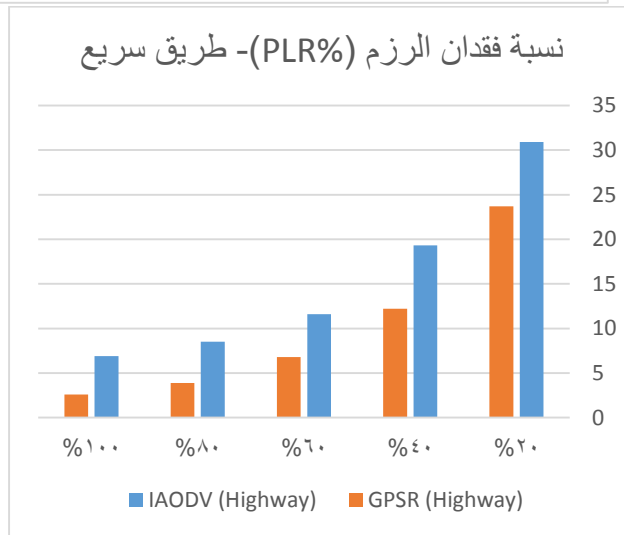
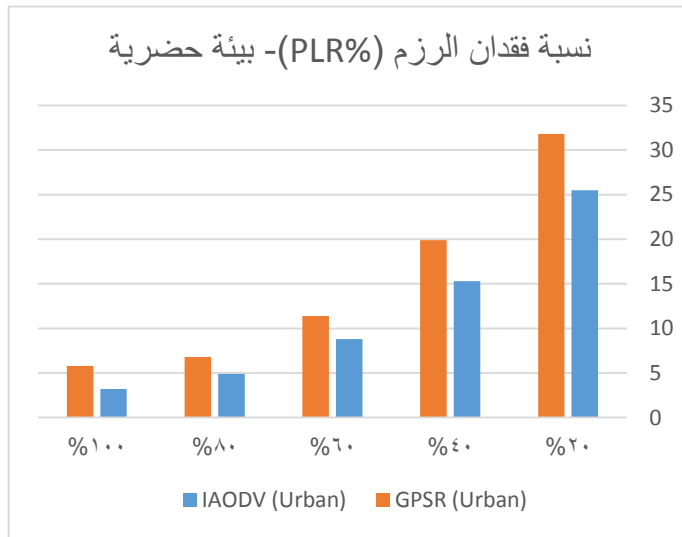
أظهرت النتائج أن نسبة تسليم الرزم (PDR) تزداد تدريجياً مع زيادة نسبة المركبات المشاركة في شبكة VANET لدى كلا البروتوكولين، مما يشير إلى أن ارتفاع نسبة المركبات المجهزة بوحدة الاتصال يحسن استقرار الاتصال ويزيد من فرص توفر المسارات بين المركبات. في البيئة الحضرية (Urban)، حقق IAODV أداءً أفضل من GPSR عند جميع نسب المشاركة، حيث سجل أعلى نسبة لتسليم

الرزم، ويعزى ذلك إلى كفاءته في اختيار مسارات مستقرة في البيئات ذات التقاطعات والحركة المعقدة. أما في بيئة الطريق السريع (Highway)، فقد تفوق GPSR على AODV في جميع نسب المشاركة، مستفيداً من اعتماده على التوجيه الجغرافي الذي يتلاءم مع الحركة المنتظمة والسرعات العالية. تؤكد هذه النتائج أن IAODV يعد الخيار الأنسب للبيئات الحضرية، بينما GPSR هو الأكثر كفاءة في بيئات الطرق السريعة، كما أن زيادة نسبة المركبات المشاركة تؤدي إلى تحسين أداء بروتوكولات التوجيه بغض النظر عن نوع البيئة المرورية.



الشكل (12) متوسط التأخير مع تغير نسب المركبات المشاركة في السيناريو الخامس.

تظهر النتائج أنه في البيئة الحضرية حقق IAODV أقل متوسط تأخير مقارنةً بـ GPSR، بينما في بيئة الطريق السريع سجل GPSR أقل تأخير في جميع نسب المشاركة، ويقل التأخير تدريجياً مع زيادة نسبة المركبات المشاركة.



الشكل (13) نسبة فقدان الرزم مع تغير نسب المركبات المشاركة في السيناريو الخامس.

تظهر النتائج أنه تتخفص نسبة فقدان الرزم مع زيادة نسبة المركبات المشاركة لدى كلا البروتوكولين. وفي البيئة الحضرية حقق IAODV أقل نسبة فقدان للرزم، بينما تفوق GPSR في بيئة الطريق السريع، مما يتوافق مع تفوقه في نسبة تسليم الرزم (PDR) في هذه البيئة.

أظهرت نتائج السيناريو الخامس أن زيادة نسبة المركبات المشاركة في شبكة VANET تؤدي إلى تحسين أداء بروتوكولات التوجيه، حيث ارتفعت نسبة تسليم الرزم (PDR) والإنتاجية (Throughput)، في حين انخفض متوسط التأخير (End-to-End Delay) ونسبة فقدان الرزم (PLR) مع زيادة نسبة المركبات المجهزة بوحدات الاتصال. في البيئة الحضرية (Urban)، تفوق IAODV على GPSR في معظم مؤشرات الأداء، حيث حقق أعلى نسبة لتسليم الرزم وأعلى إنتاجية، إلى جانب أقل تأخير وأدنى نسبة فقدان للرزم، بفضل قدرته على اختيار مسارات مستقرة في البيئات ذات التقاطعات والحركة المعقدة. أما في بيئة الطريق السريع (Highway)، فقد تفوق GPSR على IAODV في جميع مؤشرات الأداء تقريباً، محققاً أعلى نسبة لتسليم الرزم وأعلى إنتاجية، وأقل تأخير وأدنى نسبة فقدان للرزم، نتيجة اعتماده على التوجيه الجغرافي الذي يتلاءم مع الحركة المنتظمة والسرعات العالية. تؤكد هذه النتائج أن كفاءة بروتوكول التوجيه تعتمد على طبيعة البيئة المرورية ونسبة انتشار المركبات المجهزة بالاتصال. إذ يعد IAODV الخيار الأنسب للبيئات الحضرية، بينما يمثل GPSR الخيار الأفضل لبيئات الطرق السريعة، كما أن زيادة نسبة المركبات المشاركة تسهم في تحسين أداء الشبكة بشكل ملحوظ بغض النظر عن البروتوكول المستخدم.

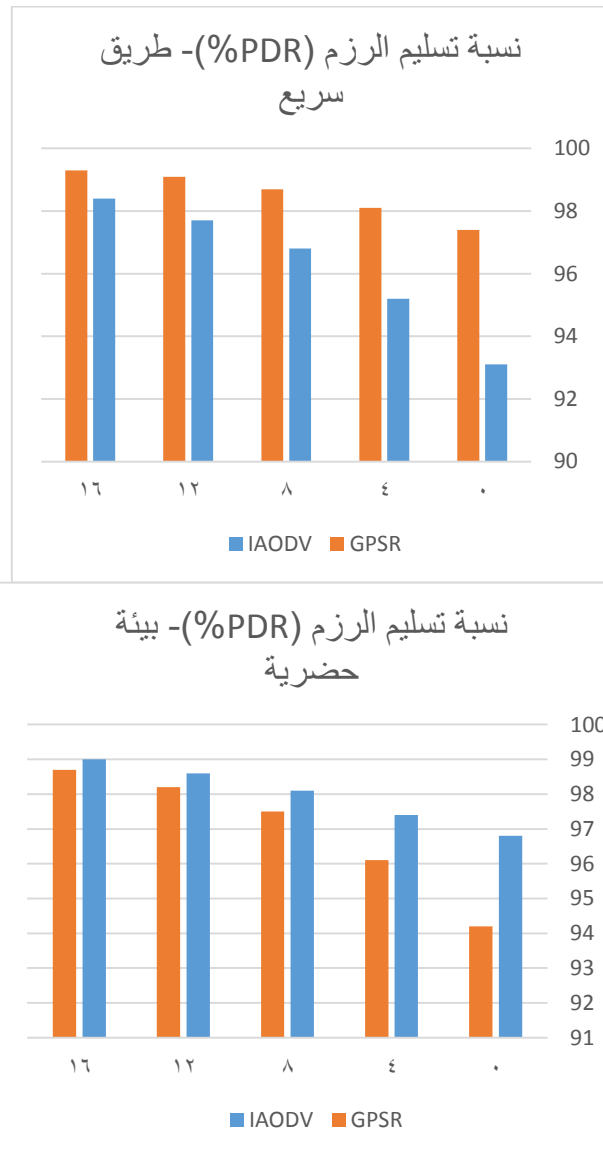
6.6 السيناريو السادس تأثير كثافة وحدات RSU

جدول (6): بارامترات المحاكاة للسيناريو السادس تأثير كثافة وحدات RSU

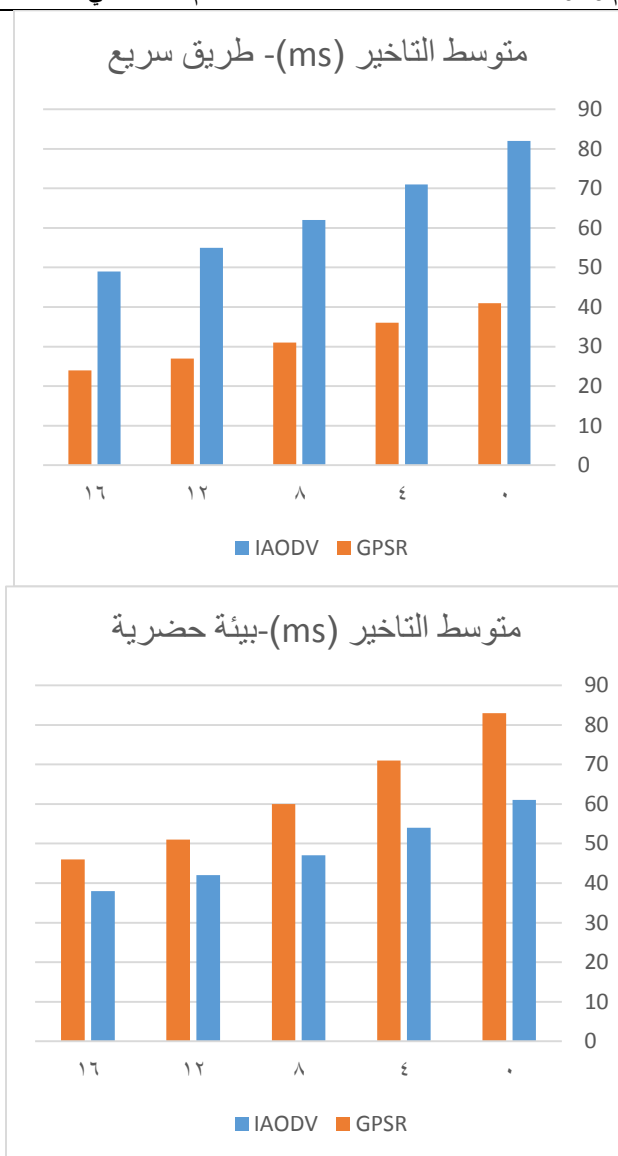
المعامل (Parameter)	القيمة (Value)
هدف السيناريو	دراسة تأثير كثافة وحدات البنية التحتية (RSUs) على أداء بروتوكولي IAODV و GPSR
بروتوكولات التوجيه	IAODV، GPSR
بيئة المحاكاة	حضرية (Urban) وطريق سريع (Highway)

مساحة الشبكة	3000 × 3000 متر
عدد المركبات	150 مركبة
سرعة المركبات	80 كم/ساعة
عدد وحدات RSU	0، 4، 8، 12، 16
زمن المحاكاة	600 ثانية
طبقة MAC	IEEE 802.11p
الطبقة الفيزيائية (PHY)	IEEE 802.11p
نموذج الانتشار	Two-Ray Ground Propagation Model
مدى الإرسال	250 متر
حجم الرزمة (Packet Size)	512 Byte
نوع حركة المرور	Constant Bit Rate (CBR)
معدل إرسال الرزم	10 Packets/s
بروتوكول النقل	UDP

يظهر الشكل (14) أن زيادة عدد وحدات البنية التحتية (RSU) تؤدي إلى تحسين نسبة تسليم الرزم (PDR) لدى كل من IAODV و GPSR في البيئتين الحضرية والطريق السريع، وذلك نتيجة تحسن الاتصال وتقليل انقطاع الروابط وتوفير مسارات بديلة لنقل البيانات. في البيئة الحضرية (Urban)، حافظ IAODV على تفوقه في جميع مستويات كثافة وحدات RSU، حيث سجل أعلى نسبة لتسليم الرزم مقارنةً بـ GPSR. أما في بيئة الطريق السريع (Highway)، فقد حقق GPSR أفضل أداء في جميع الحالات، مستفيداً من اعتماده على التوجيه الجغرافي الذي يتناسب مع الحركة المنتظمة والسرعات العالية. وتؤكد هذه النتائج أن زيادة كثافة وحدات RSU تسهم بشكل ملحوظ في تحسين موثوقية الاتصال ورفع كفاءة بروتوكولات التوجيه، مع بقاء IAODV الخيار الأفضل في البيئات الحضرية، و GPSR لأكثر كفاءة في بيئات الطرق السريعة.



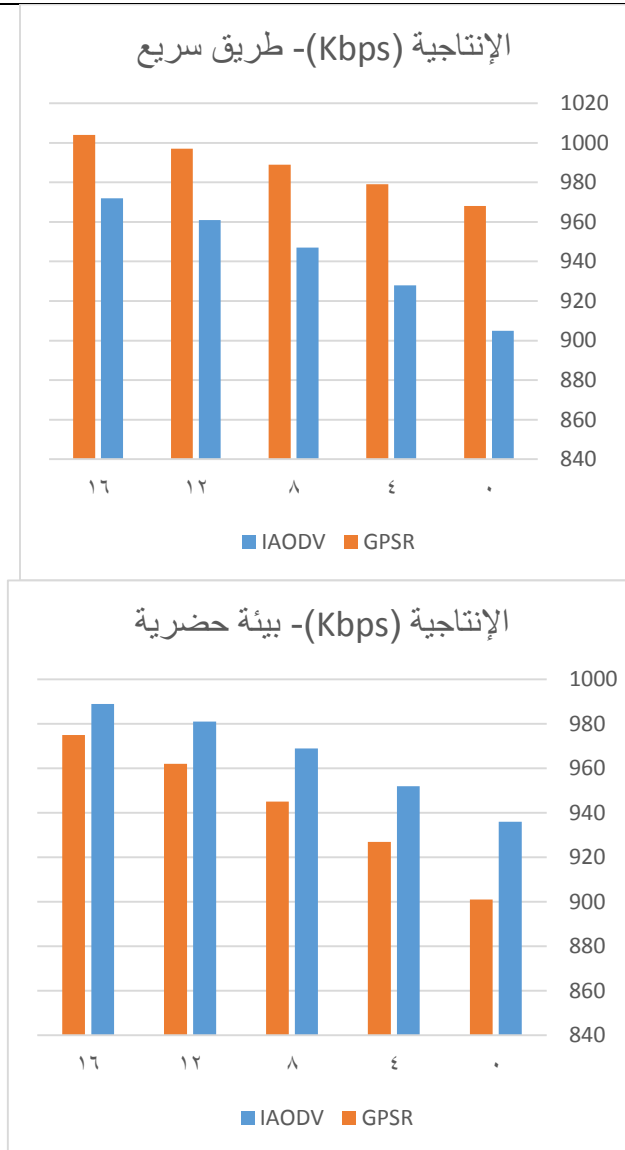
الشكل (14) نسبة تسليم الرزم مع تغير كثافة وحدات RSU في السيناريو السادس.



الشكل (15) متوسط التأخير مع تغير كثافة وحدات RSU في السيناريو السادس.

أظهرت النتائج أن زيادة عدد وحدات البنية التحتية (RSU) تؤدي إلى انخفاض متوسط التأخير لدى كل من IAODV و GPSR في البيئتين الحضرية والطريق السريع، وذلك بفضل تحسين الاتصال

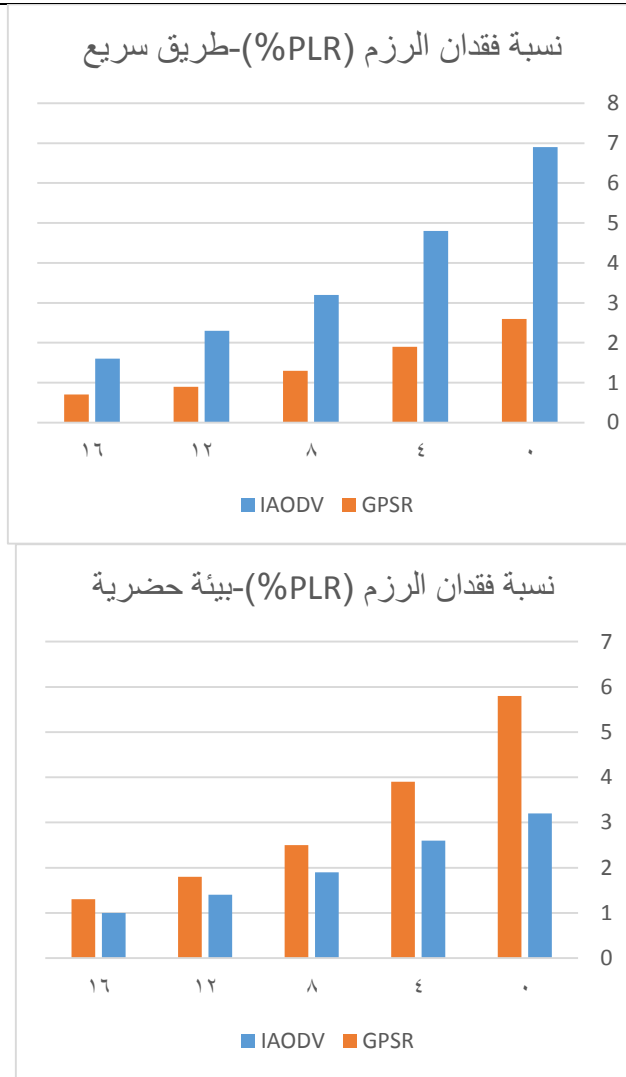
وتقليل زمن اكتشاف المسارات وإعادة توجيه البيانات. في البيئة الحضرية (Urban) ، حقق IAODV أقل متوسط تأخير مقارنةً بـ GPSR في جميع مستويات كثافة وحدات RSU ، بينما في بيئة الطريق السريع (Highway) تفوق GPSR وسجل أقل قيم للتأخير ، مستفيداً من طبيعة التوجيه الجغرافي والحركة المنتظمة للمركبات. تؤكد النتائج أن زيادة كثافة وحدات RSU تسهم في تقليل زمن نقل البيانات وتحسين استجابة الشبكة، مع استمرار تفوق IAODV في البيئات الحضرية و GPSR في بيئات الطرق السريعة.



الشكل (16) الإنجابية مع تغير كثافة وحدات RSU في السيناريو السادس.

أظهرت النتائج أن زيادة عدد وحدات البنية التحتية (RSU) تؤدي إلى تحسين الإنجابية (Throughput) لدى كل من IAODV و GPSR في البيئتين الحضرية والطريق السريع، نتيجة

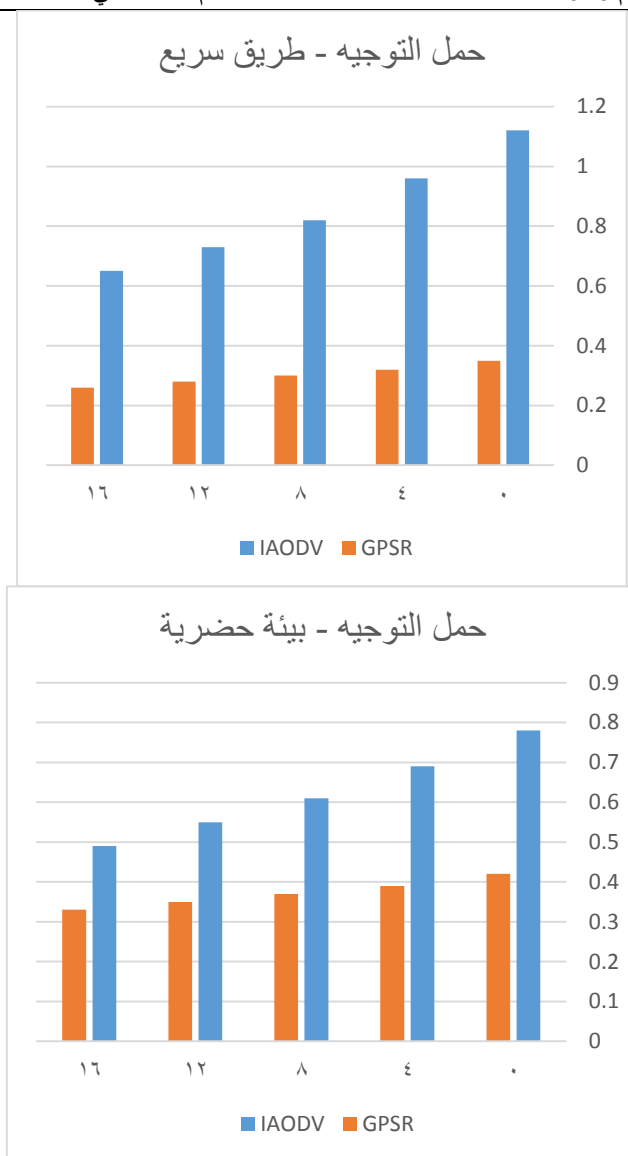
تحسين استقرار الاتصال وتقليل انقطاع المسارات، مما يزيد من عدد الحزم التي تصل بنجاح خلال زمن المحاكاة. في البيئة الحضرية (Urban)، حقق AODV أعلى إنتاجية في جميع مستويات كثافة وحدات RSU مقارنةً بـ GPSR، بينما في بيئة الطريق السريع (Highway) تفوق GPSR وسجل أعلى قيم للإنتاجية، مستفيداً من كفاءة التوجيه الجغرافي في البيئات ذات الحركة المنتظمة والسرعات العالية. تؤكد النتائج أن زيادة كثافة وحدات RSU تسهم في رفع كفاءة نقل البيانات وتحسين أداء الشبكة، مع استمرار تفوق AODV في البيئات الحضرية و GPSR في بيئات الطرق السريعة.



الشكل (17) نسبة فقدان الرزم مع تغير كثافة وحدات RSU في السيناريو السادس.

أظهرت النتائج أن زيادة عدد وحدات البنية التحتية (RSU) تؤدي إلى انخفاض نسبة فقدان الرزم (PLR) لدى كل من IAODV و GPSR في البيئتين الحضرية والطريق السريع، نتيجة تحسين الاتصال بين المركبات وتقليل انقطاع الروابط. في البيئة الحضرية (Urban)، حقق IAODV أقل نسبة فقدان للرزم مقارنةً بـ GPSR في جميع مستويات كثافة وحدات RSU، بينما في بيئة الطريق

السريع (Highway) تفوق GPSR وسجل أدنى نسبة فقدان للـرزم، مستفيداً من كفاءة التوجيه الجغرافي في البيئات ذات الحركة المنتظمة. تؤكد النتائج أن زيادة كثافة وحدات RSU تحسن موثوقية نقل البيانات وتقلل فقدان الـرزم، مع استمرار تفوق IAODV في البيئات الحضرية و GPSR في بيئات الطرق السريعة.



الشكل (18) حمل التوجيه مع تغير كثافة وحدات RSU في السيناريو السادس.

أظهرت النتائج أن زيادة عدد وحدات البنية التحتية (RSU) تؤدي إلى انخفاض حمل التوجيه (Routing Overhead) لدى كل من IAODV وGPSR في البيئتين الحضرية والطريق السريع،

نتيجة تحسن استقرار الاتصال وتقليل الحاجة إلى عمليات إعادة اكتشاف المسارات ورسائل التحكم. في البيئة الحضرية (Urban)، انخفض حمل التوجيه لدى البروتوكولين مع زيادة عدد وحدات RSU، إلا أن GPSR حافظ على أقل حمل توجيه مقارنةً بـ IAODV. كما تفوق GPSR أيضاً في بيئة الطريق السريع (Highway)، حيث سجل أقل قيم لحمل التوجيه في جميع مستويات كثافة وحدات RSU، مستفيداً من آلية التوجيه الجغرافي التي تعتمد على معلومات الموقع بدلاً من إنشاء وصيانة المسارات. تؤكد النتائج أن زيادة كثافة وحدات RSU تسهم في تقليل رسائل التحكم وتحسين كفاءة إدارة الشبكة، مع احتفاظ GPSR بأفضل أداء من حيث تقليل حمل التوجيه في كلتا البيئتين.

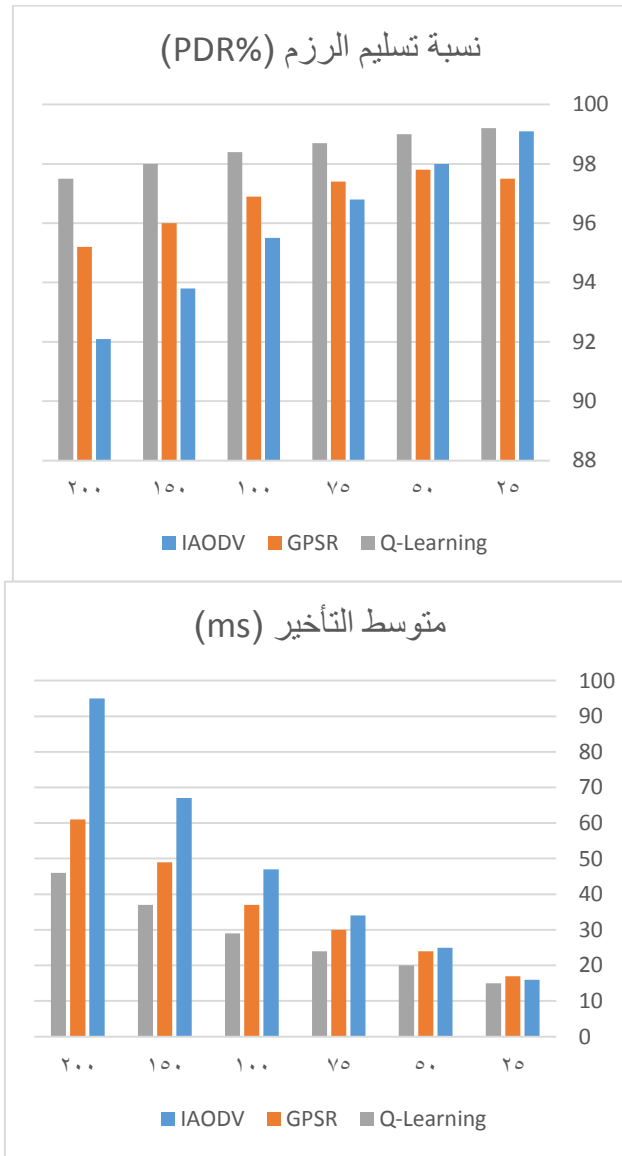
أظهرت نتائج السيناريو السادس أن زيادة عدد وحدات البنية التحتية (RSU) تؤدي إلى تحسين أداء بروتوكولي IAODV و GPSR بشكل ملحوظ، حيث ارتفعت نسبة تسليم الرزم (PDR) والإنتاجية (Throughput)، في حين انخفض متوسط التأخير (End-to-End Delay) ونسبة فقدان الرزم (PLR) وحمل التوجيه (Routing Overhead) مع زيادة عدد وحدات RSU، وذلك نتيجة تحسين الاتصال بين المركبات وتوفير مسارات أكثر استقراراً. في البيئة الحضرية (Urban)، تفوق IAODV في معظم مؤشرات الأداء، حيث حقق أعلى نسبة لتسليم الرزم وأعلى إنتاجية، إلى جانب أقل متوسط تأخير وأدنى نسبة فقدان للرزم، بينما سجل GPSR أقل حمل توجيه. أما في بيئة الطريق السريع (Highway)، فقد تفوق GPSR في جميع مؤشرات الأداء تقريباً، محققاً أعلى نسبة لتسليم الرزم وأعلى إنتاجية، وأقل متوسط تأخير وأدنى نسبة فقدان للرزم وأقل حمل توجيه، مستفيداً من اعتماده على التوجيه الجغرافي الذي يتلاءم مع الحركة المنتظمة والسرعات العالية. تؤكد هذه النتائج أن زيادة كثافة وحدات RSU تعزز موثوقية الاتصال وترفع كفاءة شبكات VANET، كما أن IAODV يعد الأنسب للبيئات الحضرية، في حين يمثل GPSR الخيار الأفضل لبيئات الطرق السريعة، خاصة عند توفر بنية تحتية داعمة.

6.7 السيناريو السابع مقارنة أداء البروتوكول المحسن IAODV وبروتوكول GPSR مع البروتوكول المعتمد على الذكاء الاصطناعي Q-Learning

الجدول (7): بارامترات المحاكاة للسيناريو السابع (تأثير كثافة المركبات)

المعامل (Parameter)	القيمة (Value)
هدف السيناريو	دراسة تأثير كثافة المركبات وسرعتها ونوع البيئة على أداء بروتوكولات التوجيه
بروتوكولات التوجيه	Q-Learning Routing ، GPSR ، IAODV
بيئة المحاكاة	حضرية (Urban)
مساحة الشبكة	2000 × 2000 متر
عدد المركبات	25، 50، 75، 100، 150، 200 مركبة
سرعة المركبات	60 كم/ساعة (ثابتة)
زمن المحاكاة	300 ثانية
طبقة MAC	IEEE 802.11p
الطبقة الفيزيائية (PHY)	IEEE 802.11p
نموذج الانتشار	Two-Ray Ground Propagation Model
مدى الإرسال	250 متر
حجم الرزمة (Packet Size)	512 Byte
نوع حركة المرور	Constant Bit Rate (CBR)
معدل إرسال الرزم	10 Packets/s
بروتوكول النقل	UDP

مع تغير كثافة المركبات 25،50،75،100،150،200 مركبة:

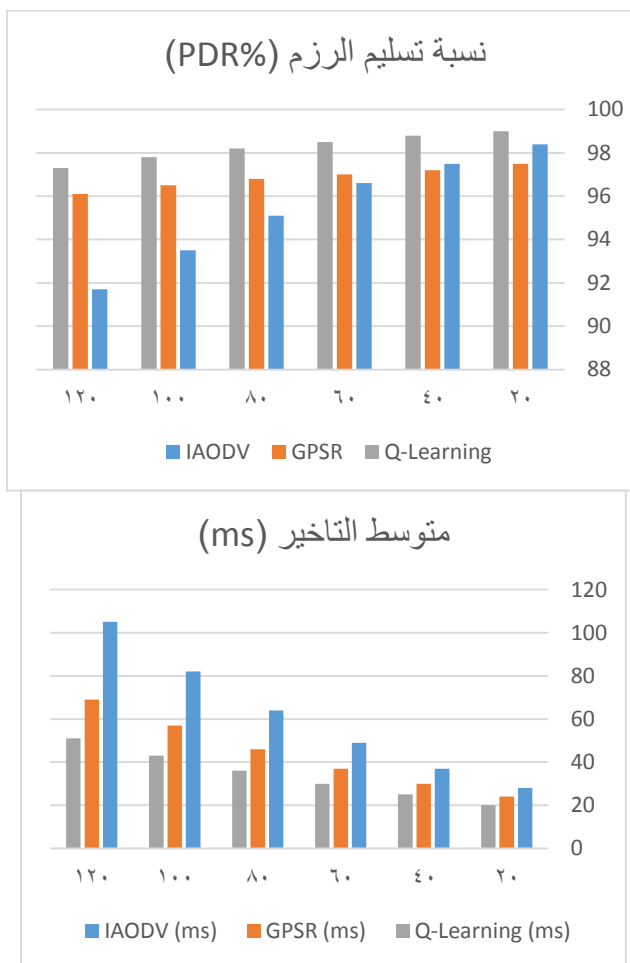


الشكل (19) نسبة تسليم الرزم ومتوسط التأخير للسيناريو السابع مع تغير كثافة المركبات.

أظهرت النتائج أن زيادة كثافة المركبات تؤثر سلباً على أداء بروتوكولات التوجيه، حيث انخفضت نسبة تسليم الرزم (PDR) وارتفع متوسط التأخير (End-to-End Delay) مع زيادة عدد المركبات، نتيجة

ازدياد ازدحام الشبكة وتكرار انقطاع الروابط. قد حقق بروتوكول Q-Learning Routing أفضل أداء، حيث سجل أعلى نسبة لتسليم الرزم وأقل متوسط تأخير في جميع مستويات الكثافة، مما يعكس كفاءته في اختيار المسارات المثلى والتكيف مع التغيرات الديناميكية في الشبكة. وجاء IAODV في المرتبة الثانية من حيث نسبة تسليم الرزم، بينما تفوق GPSR عليه عند الكثافات المرتفعة من حيث الحفاظ على نسبة تسليم الرزم وتقليل التأخير. وتشير النتائج إلى أن البروتوكولات المعتمدة على الذكاء الاصطناعي، وعلى رأسها بروتوكول Q-Learning ، توفر أداءً أفضل من البروتوكولات التقليدية والمحسنة في شبكات VANET ، خاصة في البيئات ذات الكثافة المرورية العالية.

مع تغير سرعة المركبات 20،40،60،80،100،120 كم/سا



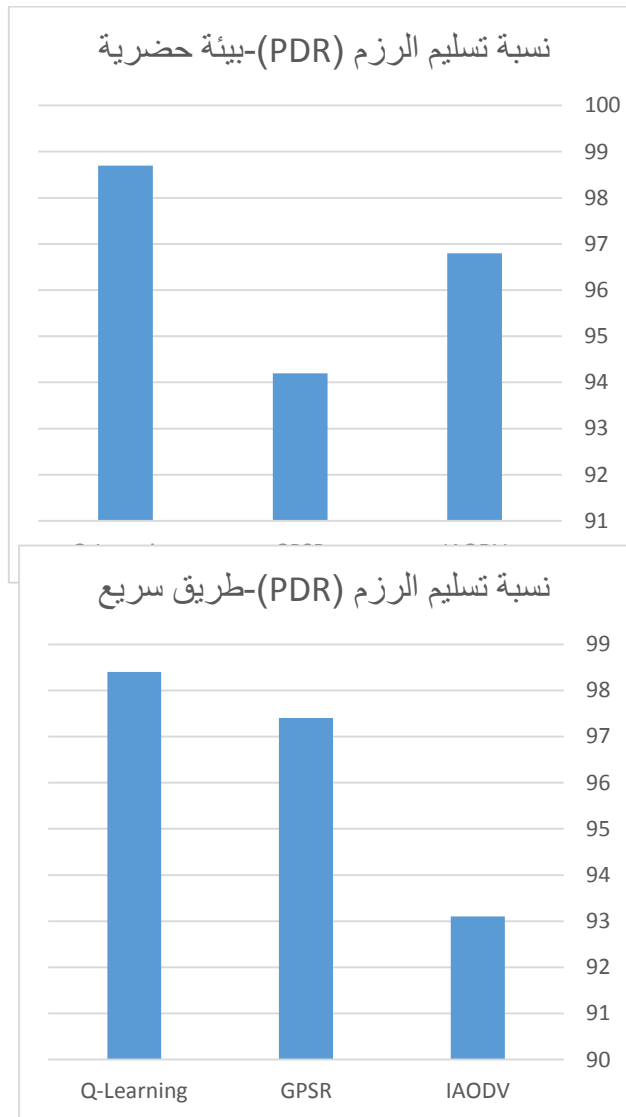
الشكل (20) نسبة تسليم الرزم ومتوسط التأخير للسيناريو السابع مع تغير سرعة المركبات.

أظهرت النتائج أن زيادة سرعة المركبات تؤدي إلى انخفاض نسبة تسليم الرزم (PDR) وارتفاع متوسط التأخير (End-to-End Delay) لدى جميع بروتوكولات التوجيه، نتيجة التغير السريع في طوبولوجيا الشبكة وتكرار انقطاع الروابط. قد حقق بروتوكول Q-Learning أفضل أداء، حيث سجل أعلى نسبة لتسليم الرزم وأقل متوسط تأخير في جميع مستويات السرعة، يليه GPSR، بينما جاء IAODV في المرتبة الثالثة، إذ انخفضت نسبة تسليم الرزم وازداد التأخير بشكل ملحوظ عند السرعات المرتفعة. تؤكد هذه النتائج أن البروتوكول المعتمد على التعلم المعزز (Q-Learning Routing) يتمتع بقدرة أكبر

على التكيف مع البيئات عالية الحركة، مما يجعله الأكثر كفاءة للحفاظ على موثوقية الاتصال وتقليل زمن نقل البيانات في شبكات المركبات اللاسلكية.

مع تغير نوع البيئة (البيئة الحضرية - الطريق السريع):

يظهر الشكل (21) أنه يحقق البروتوكول Q-Learning Routing أفضل أداء حيث سجل أعلى نسبة لتسليم الرزم ، مما يعكس كفاءته في اختيار المسارات المثلى والتكيف مع ظروف الشبكة المتغيرة. وجاء GPSR في المرتبة الثانية، بينما سجل IAODV أقل أداء عند أحجام الرزم الكبيرة. تؤكد هذه النتائج أن البروتوكولات المعتمدة على الذكاء الاصطناعي، وبخاصة بروتوكول Q-Learning ، توفر أداءً أكثر استقراراً وكفاءة عند نقل أحجام مختلفة من البيانات في شبكات VANET ، مما يجعلها مناسبة للتطبيقات التي تتطلب موثوقية عالية وسرعة في نقل البيانات.



الشكل (21) نسبة تسليم الرزم للسيناريو السابع ضمن بيئة حضرية وطريق سريع.

بالتالي وبناءً على السيناريوهات السابقة يمكن تلخيص آلية عمل البروتوكولات المدروسة وأهم المزايا والعيوب والبيئة الأنسب بالجدول التالي:

الجدول (8) ملخص آلية عمل البروتوكولات المدروسة وأهم المزايا والعيوب والبيئة الأنسب.

البيئة الأنسب	أهم العيوب	أهم المزايا	آلية العمل	نوع البروتوكول	البروتوكول
الشبكات صغيرة ومتوسطة الكثافة	انقطاع المسارات عند السرعات العالية، زيادة التأخير عند إعادة اكتشاف المسار	بسيط، حمل توجيه منخفض، لا يحتاج جداول كاملة	إنشاء المسار عند الطلب باستخدام رسائل RREQ, RREP	تفاعلي (Reactive)	AODV
الشبكات ذات الحركة العالية	زيادة الحمل الناتج عن إدارة عدة مسارات	موثوقية أعلى، تقليل فقدان الرزم، سرعة التعافي من الأعطال	إنشاء عدة مسارات مستقلة بين المصدر والوجهة	تفاعلي متعدد المسارات	AOMDV
التطبيقات العملية والمحاكاة	يعتمد على آلية AODV الأساسية ويتأثر	أكثر استقراراً، أداء عملي جيد،	تنفيذ عملي محسّن لـ AODV مع تحسين إدارة المسارات	تفاعلي	AODV-UU

دراسة مقارنة لأداء بروتوكولات التوجيه المحسنة المعتمدة على AODV وبروتوكولي GPSR و-Q
Learning في شبكات المركبات اللاسلكية النقلة VANETS

			سرعة استجابة أفضل	بالحركة العالية	
EAODV	تفاعلي محسن	تحسين اكتشاف وصيانة المسارات وتقليل رسائل التحكم	تحسين نسبة تسليم الرمز وتقليل التأخير وحمل التوجيه	تعقيد حسابي أكبر من AODV	البيئات متوسطة وعالية الكثافة
IAODV	تفاعلي محسن	اختيار المسارات اعتماداً على جودة الرابط أو استقرار العقد	استقرار أعلى، فقدان رمز أقل، إنتاجية أعلى	تعقيد حسابي أكبر من AODV	البيئات الحضرية (Urban)
GPSR	جغرافي (Geographic)	اختيار أقرب جار إلى الوجهة باستخدام معلومات GPS مع آلية Greedy Perimeter و	حمل توجيه منخفض، تأخير قليل، لا يحتاج اكتشاف مسار	يعتمد على دقة GPS ، يتأثر بمشكلة Local Maximum	الطرق السريعة (Highway)

Q- Learning Routing (HQLR)	ذكي-(AI- Based)	استخدام التعلم المعزز لاختيار أفضل جار اعتماداً على الخبرة السابقة وحالة الشبكة	يتكيف مع تغير الشبكة، أعلى نسبة تسليم رزم، أقل تأخير، قرارات ذكية	يحتاج مرحلة تعلم، تعقيد حسابي وذاكرة أكبر	البيئات الديناميكية والحضرية والطرق السريعة
-------------------------------------	--------------------	--	--	--	---

7. خاتمة البحث

استعرض هذا البحث تقييم أداء بروتوكولات التوجيه في شبكات المركبات اللاسلكية (VANET) من خلال مقارنة البروتوكولات المحسنة عن البروتوكول AODV و GPSR و Q-Learning Routing باستخدام سبعة سيناريوهات محاكاة شملت تأثير كثافة المركبات، وسرعة المركبات، ونوع البيئة المرورية، والمقارنة بين البيئات الحضرية والطرق السريعة، ونسبة المركبات المشاركة في الشبكة، وكثافة وحدات البنية التحتية (RSU)، وتأثير حجم الرزم. تم تقييم أداء البروتوكولات اعتماداً على مؤشرات الأداء الرئيسية، وهي نسبة تسليم الرزم (PDR)، ومتوسط التأخير (End-to-End Delay)، والإنتاجية (Throughput)، ونسبة فقدان الرزم (PLR)، وحمل التوجيه (Routing Overhead).

أظهرت نتائج السيناريوهات أن كثافة المركبات وسرعتها تؤثران سلباً في أداء الشبكة، بينما يسهم ارتفاع نسبة المركبات المشاركة وزيادة عدد وحدات RSU في تحسين جودة الاتصال ورفع كفاءة بروتوكولات التوجيه. كما بينت النتائج أن البيئة التشغيلية تعد عاملاً حاسماً في اختيار بروتوكول التوجيه المناسب. إذ حقق IAODV أداءً متميزاً في البيئات الحضرية، في حين أظهر GPSR كفاءة أعلى في بيئات الطرق السريعة، أما بروتوكول Q-Learning فقد حقق أفضل النتائج في معظم السيناريوهات، مسجلاً

أعلى نسبة لتسليم الرزم والإنتاجية، وأقل متوسط تأخير ونسبة فقدان للرزم، بفضل قدرته على التعلم والتكيف مع التغيرات المستمرة في الشبكة.

تؤكد النتائج أن الاعتماد على تقنيات الذكاء الاصطناعي في بروتوكولات التوجيه يمثل اتجاهاً واعداً لتطوير شبكات المركبات اللاسلكية، لما يوفره من تحسين في موثوقية الاتصال وكفاءة نقل البيانات في مختلف الظروف التشغيلية. كما توفر هذه الدراسة أساساً علمياً لتطوير بروتوكولات توجيه ذكية تدعم تطبيقات أنظمة النقل الذكية والمركبات المتصلة، وتسهم في تحسين السلامة المرورية وكفاءة إدارة حركة المرور في المستقبل.

8. التوصيات المستقبلية

يوصي البحث بتطوير بروتوكولات توجيه هجينة وذكية تعتمد على تقنيات الذكاء الاصطناعي والتعلم المعزز لتحسين الأداء في شبكات المركبات اللاسلكية، كما يقترح دمج تقنيات التعلم العميق والحوسبة الطرفية (Edge Computing) مع البنية التحتية لـ RSU لتعزيز كفاءة الاتصال وتقليل التأخير، إضافة إلى ذلك، من المهم اختبار البروتوكولات في بيئات واقعية أكثر تعقيداً، ودراسة تأثير الأمن السيبراني والمركبات ذاتية القيادة، مع التوجه نحو تصميم بروتوكولات أكثر تكيفاً مع التغيرات السريعة في بيئة النقل الذكي.

9. المراجع

- [1] A. e. a. Ali, "A comprehensive survey on routing protocols in vehicular ad hoc networks ", *IEEE Access* .2022 ,.
- [2] H .& .L. K. P. Hartenstein, "A tutorial survey on vehicular ad hoc networks ", *IEEE Communications Magazine* ،،p. 164–171. .2010 ،

- [3] H. & L. K. P. Hartenstein , " VANET: Vehicular Applications and Inter- Networking Technologies " , *John Wiley & Sons* .2008 ، .
- [4] د. احمد العلي، "دراسة أثر خوارزميات الجدولة على أداء بروتوكولات التوجيه في شبكات المركبات اللاسلكية VANET"، *مجلة جامعة حمص*، p. 30، 3 2026.
- [5] م. احمد العلي، "جودة الخدمة لبروتوكولات التوجيه في شبكات المركبات اللاسلكية"، *مجلة جامعة حمص*، p. 30، 2015.
- [6] N. H. D. S. & F. P. Boroujeni ، "Reinforcement Learning-based Hybrid Routing Algorithms for Vehicular Ad Hoc Networks " ، *Procedia Computer Science* ، p. 623–630 .2025 ،
- [7] C. ،-R. E. D. s. Perkins ، "Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing .2003 " ، .
- [8] M. K. & D. S. R. Marina ، " Ad hoc On-demand Multipath Distance Vector Routing. Wireless Communications and Mobile Computing " ، pp. 969–988 .2006 ،
- [9] E. Nordström ، "AODV-UU Implementation. Uppsala University, Sweden .2004 " ،
- [10] R. & S. P. Kumar ، "Enhanced AODV Routing Protocol for Vehicular Ad Hoc Networks " ، *International Journal of Computer Applications* ، .2017

- [11] R .& .V. A. Singh ، "Improved AODV Routing Protocol for VANET "،
International Journal of Advanced Computer Science and Applications .2019 ،
- [12] B .& .K. H. T. Karp ، " GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for
Wireless Networks "، *Proceedings of the 6th Annual International
Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2000)* ،
.2000
- [13] X. e. a. Yang ، " V2V Routing in VANET Based on Heuristic Q-
Learning "، *International Journal of Computers Communications* .2020 ،
- [14] C. M. A .& .S. R. Campolo ، " Vehicular Ad Hoc Networks: Standards,
Solutions, and Research "، *Springer* .2015 ،
- [15] H .& .K. J. Kaur ، "Studying Routing Issues in Vehicular Ad Hoc
Networks using NS-3 and SUMO "، *Journal of Communications* ،
.2022