تقييم نظام تواصل قائم على سلاسل الكتل في شبكات المركبات اللاسلكية باستخدام العقود الذكية

المهندسة ريم جرجس[1] الدكتور المهندس علي الحاتم[2]

(1) طالبة دراسات عليا في كلية الهندسة المعلوماتية جامعة حمص

(2) مدرس في كلية الهندسة المعلوماتية جامعة حمص

الملخص

في ظل التوسع المتسارع في أنظمة النقل الذكية، تبرز الحاجة إلى بنى اتصالية آمنة وموثوقة بين المركبات ضمن بيئة شبكات المركبات اللاسلكية (VANET). في هذا البحث، نقترح إطاراً متكاملاً يجمع بين تقنيات سلاسل الكتل والعقود الذكية، مع توظيف وحدات الطريق الذكية (RSUs) كوحدات معالجة لامركزية تتولى تسجيل المركبات، إدارة التفاعل، وتوثيق تبادل الرسائل على سلسلة كتل مخصصة. يعتمد الإطار المقترح على توزيع عبء المعالجة الحسابية على وحدات RSUبدلاً من المركبات، مما يحسّن الأداء ويعزّز الثقة في بيئة ديناميكية متغيرة. تم تنفيذ النظام ضمن بيئة محاكاة واقعية باستخدام أداة SUMO لتمثيل حركة المركبات، وربطها بواجهة TRACIمع شبكة سلاسل الكتل تجريبية مدمجة. أظهرت نتائج التجارب تفوق النظام المقترح من حيث نسبة تسليم الرسائل(PDR) ، التي تراوحت بين 85 و82% مقارنة بنسبة 80% في أقرب دراسة مرجعية. يمثّل هذا الإطار خطوة عملية نحو تحقيق بيئة تواصل ذكية، آمنة، وقابلة للتوسع

في شبكاتVANET، ويؤسس لبنية تحتية رقمية داعمة لتطبيقات مستقبلية في المدن الذكية مثل كشف الحوادث، إدارة الأولويات المرورية، وأنظمة الدفع المؤتمتة.

الكلمات المفتاحية: شبكات المركبات اللاسلكية (VANET)، سلاسل الكتل، العقود الذكية، وحدات الطريق الذكية (RSU)، SUMO، TRACI.

Evaluating a System Based on Blockchain in VANET Networks Using Smart Contracts

Abstract

With the rapid expansion of intelligent transportation systems, the need for secure and reliable vehicle-to-vehicle communication architectures within the Vehicular Wireless Networks (VANET) environment is becoming increasingly urgent. In this research, we propose an integrated framework that combines blockchain and smart contracts, employing Road Smart Units (RSUs) as decentralized processing units that handle vehicle registration, interaction management, and message authentication on a dedicated blockchain. The proposed framework distributes the computational burden to RSUs rather than vehicles, improving performance and enhancing trust in a dynamic environment.

The system was implemented in a realistic simulation environment using the SUMO tool to model vehicle traffic and connecting it to the TRACI interface with an integrated blockchain pilot network. Experimental results

demonstrated superiority of the proposed system in terms of message delivery rate (PDR), which ranged between 82% and 90%, compared to 80% in the closest benchmark study, along with improvements in other indicators such as latency and average block mining time. This framework represents a practical step toward achieving a smart, secure, and scalable communication environment in VANETs, and establishes a digital infrastructure that supports future smart city applications such as accident detection, traffic priority management, and automated payment systems.

Keywords: Vehicular Wireless Networks (VANET), Blockchain, Smart Contracts, Road Smart Units (RSU), SUMO, TRACI.

1. مقدمة:

مع تزايد الاعتماد على شبكات المركبات اللاسلكية (VANETs) كأحد أهم مكونات أنظمة النقل الذكية، باتت الحاجة إلى حلول اتصال أكثر أماناً وموثوقية أمراً بالغ الأهمية. في هذه البيئة الديناميكية عالية التقلّب، تتمثل التحديات الأساسية في ضمان تكامل البيانات، خصوصيتها، ومنع التلاعب بها أثناء انتقالها بين المركبات أو بين المركبات والبنية التحتية .تتضح الحاجة إلى آليات لامركزية قادرة على إدارة التفاعل بين مكونات هذه الشبكة بكفاءة وشفافية [1].

تقدم تقنية سلاسل الكتل حلاً واعداً لهذه التحديات، من خلال نموذج توزيع آمن وغير مركزي يمكن من خلاله التحقق من صحة المعاملات وتخزينها بشكل دائم وغير قابل للتغيير. لكن، إدماج

سلاسل الكتل ضمن بيئة VANET يتطلب تجاوز قيود الأداء، مثل التأخير الزمني وزمن التحقق والمعالجة، لا سيما عندما تكون الاتصالات قائمة على متطلبات زمنية صارمة واستجابة فورية. في هذا البحث، نقترح إطاراً متكاملاً يربط بين تقنيات سلاسل الكتل وشبكات VANET باستخدام وحدات الطريق الذكية (RSUs) كمكوّن مركزي. تتولى وحداتRSU:

- تسجيل المركبات عبر عقود ذكية.
- تسهيل تبادل الرسائل بين المركبات.
- توثيق المعاملات ضمن سلسلة كتل مُخصّصة.

يُدار كل تفاعل بين المركبات عبر عقود ذكية مدمجة داخلRSU ، ما يضمن أن شروط الإرسال، المسافة، وتوافر الموارد (مثل الغاز) يتم التحقق منها تلقائياً. وتقومRSU ، بصفتها عقدة في شبكة سلاسل الكتل، بمعالجة المعاملات وتسجيلها بعد التحقق منها. يُنفّذ النظام ضمن بيئة محاكاة باستخدام أداة SUMO لتمثيل حركة المركبات والتفاعل في سيناريو واقعي.

2. مشكلة البحث:

رغم التقدم في شبكات المركبات اللاسلكية(VANETs) ، ما زالت هذه الشبكات تعاني من مشاكل تتعلق بأمان تبادل الرسائل، ضعف التوثيق، وفقدان الثقة بين المركبات المتنقلة ضمن بيئة ديناميكية سريعة التغير. وبالرغم من أن تقنيات سلاسل الكتل والعقود الذكية تتيح إمكانيات واعدة لحل هذه المشكلات من خلال التوثيق اللامركزي وتسجيل المعاملات بطريقة شفافة وآمنة، إلا أن

تطبيقها المباشر ضمن المركبات يواجه تحديات تقنية مثل محدودية الموارد، التأخير الزمني، وصعوبة التوسع. من هنا تنبع مشكلة هذا البحث، التي تتمثل في إيجاد طريقة فعّالة لدمج سلاسل الكتل والعقود الذكية في بيئة VANET عبر وحدات الطريق الذكية(RSUs) ، لتقوم هذه الوحدات بإدارة المعاملات وتبادل الرسائل بين المركبات بشكل آمن وموثوق ودون تحميل المركبات عبء المعالجة الحسابية.

3. هدف البحث:

يهدف البحث الى تحقيق نظام سلاسل الكتل متكامل مع RSU وVANETs عن طريق إدارة العقود الذكية بالكامل داخل RSU دون الحاجة لطرف مركزي من اجل تحقيق بيئة تواصل آمنة وموثوقة بين المركبات باستخدام رسائل موثقة ومسجلة على سلاسل الكتل. يمثل هذا الإطار خطوة عملية نحو تعزيز أمان وموثوقية أنظمة النقل الذكية، ويمهّد لتكامل سلس بين البنية التحتية المادية (RSU)والافتراضية سلاسل الكتل (Blockchain) ضمن بيئةVANET.

4. أهمية البحث:

يوفر هذا الإطار نموذجاً قابلاً للتطبيق في سياق المدن الذكية، حيث يمكن نشر RSUs على امتداد الطرق لتمكين المركبات من التفاعل مع بعضها بطريقة آمنة، لامركزية، وقابلة للتوثيق الكامل. كما يفتح البحث الباب أمام تطوير تطبيقات مستقبلية تعتمد على التحقق التلقائي من الحوادث، إدارة الأولويات عند التقاطعات، أو حتى أنظمة الدفع الآلي للمرور والتأمين، وكل ذلك

من خلال بنية قائمة على سلاسل الكتل والعقود الذكية، مما يضمن الشفافية والتكامل الكامل بين جميع الأطراف.

5. شبكة المركبات اللاسلكية:

تُعرف شبكة المركبات اللاسلكية (VANET) بأنها نوع خاص من الشبكات اللاسلكية المتنقلة، وهي تُصمّم خصيصاً لتأمين الاتصال بين المركبات المتحركة وبين المركبات والبنية التحتية على الطرق. تعتمد VANET على تقنية الاتصال من نوع "Vehicle-to-Vehicle (V2V)" و"Vehicle-to-Infrastructure (V2I)"، مما يسمح بتبادل المعلومات والبيانات في الزمن الحقيقي بين المركبات بعضها البعض أو مع وحدات الطرق الذكية مثل إشارات المرور، الكاميرات، ومحطات التحكم. يهدف هذا النوع من الشبكات إلى تحسين السلامة على الطرق، تعزيز فعالية النقل، وتقليل الحوادث والازدحام[2].

1.5 أهمية شبكة VANET في أنظمة النقل الحديثة:

شبكة **VANET** تعد ركناً أساسياً في أنظمة النقل الذكية، إذ تتيح تواصل المركبات مع محيطها بسرعة، مما يساعد السائقين على اتخاذ قرارات دقيقة في الوقت المناسب. فعند وقوع حادث أو تباطؤ مفاجئ، ترسل المركبة إشعاراً للمركبات القريبة لتجنب المخاطر، كما تسهم الشبكة في تقليل استهلاك الوقود والانبعاثات عبر تحسين انسيابية المرور [8].

2.5 المكونات الأساسية لشبكةVANET:

تتألف شبكة **VANET** من ثلاثة عناصر أساسية [2]:

- **الوحدات داخل المركبات (OBUs):** أجهزة مثبتة بالمركبات للتواصل عبر موجات الراديو.
- **وحدات جانب الطريق (RSUs):** أجهزة على البنية التحتية تدعم الاتصال بين المركبات والطرق مثل إشارات المرور ومحطات الوقود.
- **البروتوكولات مثل DSRC و IEEE 802.11p:** لضمان سرعة وموثوقية الاتصال في بيئة مرورية متغيرة.

3.5 أنواع الاتصالات في VANET:

تُقسم الاتصالات في VANET إلى ثلاثة أنواع رئيسية [4]:

1. **مركبة–مركبة (V2V):** تبادل مباشر للرسائل بين السيارات للتنبيه عن الحوادث أو الظروف الطارئة دون الحاجة لبنية تحتية.
2. **مركبة–بنية تحتية (V2I):** تواصل المركبات مع وحدات الطريق الثابتة لجمع البيانات أو إرسالها، مثل خدمات الرسوم أو التوجيه الذكي.
3. **مركبة–كل شيء (V2X):** يشمل الاتصال مع المشاة (V2P)، السحابة (V2C)، ومراكز المرور، مع دعم تقنيات الجيل الخامس لسرعة وموثوقية أعلى.

تم في هذا البحث دراسة اتصال المركبة الى مركبة، واتصال مركبة بالبنية التحتية.

4.5 التطبيقات الذكية لشبكات VANET:

أبرز تطبيقات شبكات المركبات اللاسلكية وفق [5]:

1. السلامة :
    a. كشف النقاط العمياء وتحذير السائق عند تغير المسار.
2. الإدارة المرورية :
    a. جمع وتحليل البيانات من المركبات لتحديد أكثر الطرق ازدحام.
3. الخدمات التجارية :
    a. توصيل الإعلانات المحلية للمحال القريبة إلى شاشة السيارة.

4. الترفيه :
    a. مشاركة الإنترنت بين المركبات.

5.5 التحديات التقنية الكبرى:

رغم فوائد شبكة VANET، إلا أنها تواجه تحديات عدة؛ أبرزها تغيّر بنية الشبكة المستمر بسبب حركة المركبات، ما يصعّب الحفاظ على اتصال مستقر. كما تبرز مخاوف الأمان والخصوصية نتيجة تبادل بيانات حساسة، إضافة إلى صعوبة إدارة الموارد وتخصيص النطاق الترددي خاصة في المناطق المزدحمة. كذلك يشكل عدم التوافق بين أنظمة المركبات والبنية التحتية عائقاً أمام فعالية الشبكة[9]، أيضاً VANET لا توفر اكتشاف مضمون في الوقت الحقيقي لظروف الطريق، هذا يعني انه فقط عند وجود مركبة، او RSU تكتشف او يتم اخبارها بظروف الطريق يتم نشر المعلومات داخل VANET [6].

6. سلاسل الكتل:

سلاسل الكتل هي سجل رقمي موزع يعمل كقاعدة بيانات لا مركزية لتخزين المعاملات، ويتميز بكونه آمناً، شفافاً، وغير قابل للتعديل بعد التحقق [7]. تمتاز هذه التقنية بقدرتها على إزالة الحاجة إلى طرف ثالث موثوق، من خلال تمكين المشاركين في الشبكة من التحقق من صحة المعاملات بشكل جماعي، مما يجعلها مثالية للبيئات التي تتطلب الثقة والشفافية. كل مجموعة من المعاملات تُجمع ضمن ما يُعرف بـ "كتلة(Block) "، ثم تُربط هذه الكتل معاً في سلسلة متتالية تُسمى "سلسلة الكتل" [8].

1.6 بنية سلاسل الكتل:

يتكون كل بلوك في السلسلة من عدة عناصر أساسية [9]:

- رقم البلوك (Index): يمثل ترتيب الكتلة ضمن السلسلة.
- طابع زمني (Timestamp): يُسجل وقت إنشاء الكتلة.
- مجموعة المعاملات :هي المعلومات أو البيانات المضافة إلى الكتلة.
- تجزئة الكتلة السابقة (Previous Hash): لربط الكتلة بسابقتها.
- التجزئة الخاصة (Hash): وهو توقيع تشفيري يُحسب اعتماداً على محتويات الكتلة.

يضمن هذا البناء أن أي تغيير في محتوى كتلة واحدة سيؤدي إلى كسر السلسلة بالكامل، مما يُضفي طبقة قوية من الحماية تمنع التلاعب أو التزوير.

2.6 آلية عمل سلاسل الكتل:

عند إنشاء معاملة جديدة، يتم إرسالها إلى الشبكة حيث تنتظر التحقق. بعد جمع عدد من المعاملات، يتم إدراجها في كتلة جديدة. هذه الكتلة تُمرر عبر آلية تحقق تُعرف بالتعدين (Mining)، والتي تعتمد على حل مسائل رياضية معقدة باستخدام خوارزميات مثل SHA−256 بعد التحقق من الكتلة، تُضاف بشكل دائم إلى سلسلة الكتل ولا يمكن تعديلها أو حذفها. كل عقدة (Node)في الشبكة تحتفظ بنسخة محدثة من السلسلة، مما يعزز التكرار والتوافق ويمنع الفشل أو التزوير [9].

3.6 العقود الذكية ودورها:

العقود الذكية (Smart Contracts) هي برامج صغيرة تُخزن وتُنفذ على سلاسل الكتل وتُستخدم لتنفيذ اتفاقيات محددة عند تحقق شروط معينة دون الحاجة لتدخل بشري. على سبيل المثال، يمكن إعداد عقد ذكي يقوم بتسجيل مركبة تلقائياً عند دخولها نطاق معين، أو يرسل رسالة تنبيه لمركبة مجاورة في حال وجود حادث.

تُستخدم العقود الذكية في سيناريو شبكات المركبات لتحديد من يحق له إرسال أو استقبال الرسائل، أو للتحقق من هوية المركبة أو الحد من التزوير [10].

4.6 فوائد سلاسل الكتل في شبكات المركبات VANET:

في شبكات المركبات الذكية(VANET) ، تُستخدم تقنية سلاسل الكتل لضمان أمان وتوثيق تبادل البيانات بين المركبات (V2V) وبين المركبات ووحدات الطرق الذكية (V2I) RSU من بين الفوائد الأساسية [11]:

- تحقيق النزاهة والشفافية: لا يمكن تعديل الرسائل المرسلة بعد تسجيلها.
- إدارة هويات: حيث يتم تحديد المركبات المسجلة وتوثيقها عبر النظام.
- منع الهجمات: مثل هجمات التزوير أو الانتحال.
- توزيع المسؤولية: لا يوجد خادم مركزي، مما يقلل من نقاط الفشل.

التحديات المقترنة:

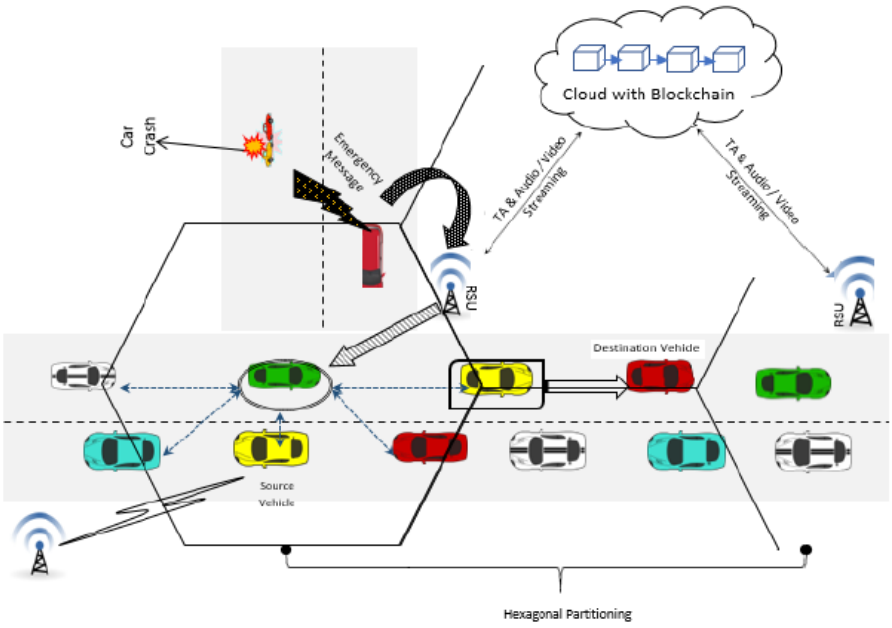
رغم مزاياها، إلا أن دمج سلاسل الكتل في VANET يواجه عدة تحديات [12]:

- زمن الاستجابة: بسبب طبيعة التحقق اللامركزي.
- استهلاك الموارد: خاصة في عمليات التعدين.
- الاتصال المتقطع: بسبب تحرك المركبات السريع وتغير البُنية الشبكية.
- حجم البيانات المتزايد: نتيجة تراكم الكتل والمعاملات بمرور الوقت.

7. الدراسة المرجعية:

تناقش الورقة [13] تحسين أمان شبكات المركبات المتنقلة باستخدام تقنية سلاسل الكتل. تُعد سرعة وأمان نقل البيانات (مثل الرسائل الصوتية أو التحذيرية) بين المركبات أمراً حيوياً، لكن وجود مركبات غير موثوقة قد يؤدي إلى رسائل مزيفة تُهدد السلامة العامة. لحل هذه المشكلة، تقترح الورقة دمج تقنية سلاسل الكتل مع الحوسبة السحابية، بحيث يتم تخزين البيانات الحساسة (مثل سجلات المعاملات وقيم الهاش) على سلاسل الكتل لضمان الأمان، بينما يتم تخزين الملفات الكبيرة (مثل الوسائط المتعددة) في السحابة لتوفير المساحة وتحسين الأداء كما هو موضح في [

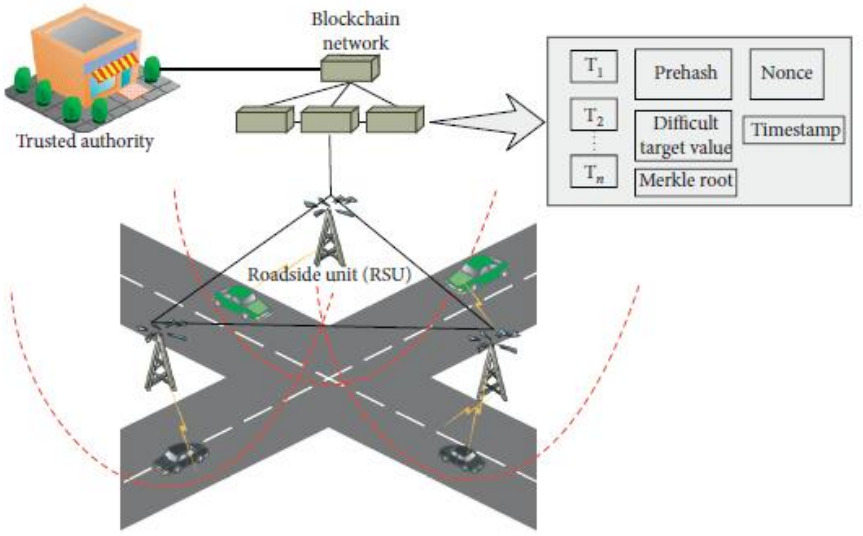
الشكل 1] يعتمد النظام المقترح على عقود ذكية باستخدام منصة Ethereum لتأمين التواصل بين المركبات. ويسعى النظام إلى تقليل الرسائل الاحتيالية وتحسين كفاءة التواصل داخل الشبكة، وصلت نسبة packet delivery ratio الى 80 %.



[الشكل 1] النظام المقترح في البحث [1].

تُعد القيادة الذكية ممكنة بفضل التطور السريع في شبكات المركبات المتنقلة(VANETs) ، والتي تُستخدم لتوفير معلومات السلامة المرورية والتواصل الفوري بين المركبات. إلا أن الطبيعة اللاسلكية المفتوحة لهذه الشبكات تجعلها عرضة لهجمات أمنية من قبل جهات خبيثة، مما يستدعي وجود آليات تحقق آمنة ومجهولة الهوية. تقترح الورقة [14] نظام تحقق مجهول قائم على تقنية سلاسل الكتل، يهدف إلى تحسين كفاءة التحقق من المركبات، خاصة عند انتقالها بين وحدات

الطرق (RSUs) دون الحاجة لإعادة التحقق التقليدية، من خلال تبادل رموز تحقق آمنة بين الـ RSUs. في هذا النظام، تُعد وحدات RSU بمثابة عُقد تعدين تتحقق من هوية المركبات عبر خوارزميات إجماع، مع استخدام شجرة Merkle لتسجيل عمليات التحقق في الوقت الفعلي. كما يتيح النظام إمكانية تتبع المركبات المخالفة عند الحاجة عبر مراجعة السجلات السابقة، محققاً بذلك التوازن بين الخصوصية والمساءلة. وأظهرت نتائج التحليل الأمني أن النظام المقترح أكثر أماناً وكفاءة من الأنظمة التقليدية، مع تقليل ملحوظ في التكلفة الحسابية، يوضح [الشكل 2] بنية النظام المقترح في البحث [14].



[الشكل 1]النظام المقترح في BBAAS [2].

شبكات المركبات المتنقلة تُمثل مستقبلاً واعداً في تحسين إدارة المرور وسلامة السائقين، لكنها تعاني من تحديات تتعلق بالأمان والخصوصية بسبب اعتمادها على قنوات الاتصال اللاسلكية،

مثل مشكلات المصادقة، وسرية البيانات، وسلامتها، والتحكم في الوصول، وتوفر الخدمة. لمعالجة هذه التحديات، تقترح الدراسة [15] تقنية تحقق مجهولة وآمنة مادياً تعتمد على تقنية سلاسل الكتل وهندسة الحوسبة الضبابية .يتمتع النظام المقترح بميزات مثل تقليل زمن الاستجابة، ودعم الحركة، ومراقبة الموقع، مما يجعله فعالاً في مواجهة التهديدات الأمنية. تعتمد آلية التحقق على عُقد ضبابية تعمل كعُقد تعدين للتحقق من شرعية المركبة عبر خوارزميات إجماع، كما تُستخدم شجرة Merkle لتتبع بيانات التحقق في الوقت الحقيقي. لا حاجة للمركبة لتخزين المفاتيح السرية، مما يعزز الأمان المادي ويقلل من تعقيد النظام. بالمقارنة مع الأنظمة الأخرى، يحقق النظام المقترح كفاءة أعلى من حيث الأمان وتقليل التكاليف الحسابية والتخزينية والاتصالية، يستهلك النظام المقترح تكلفة حسابية قدرها 24:23 مللي ثانية لإجراء عملية المصادقة. بينما تستهلك مخططات تنافسية أخرى ذات صلة، تكلفة حسابية قدرها 106:48.

تم في [16] اقتراح نظاماً قائماً على تقنية سلاسل الكتل للحفاظ على الخصوصية، يُعزز أمن شبكات VANET مع معالجة مشاكل عدم إمكانية الملاحظة، وعدم إمكانية الربط، وكفاءة المصادقة. يعتمد النهج على خادم إخفاء الهوية قائم على ذاكرة التخزين المؤقت، يقع بين وحدة المركبة (OBU) ووحدة جانب الطريق (RSU)، مما يُعزز الخصوصية من خلال إخفاء أنماط الاتصال، ويُحسّن الكفاءة من خلال تقليل تكاليف المصادقة. تُظهر تقييمات الأداء أن نظامنا يُخفّض التكاليف الحسابية بشكل ملحوظ، حيث يُحقق انخفاضاً بنسبة 95.17% إلى 97.00% في اتصال V2V، و97.81% إلى 98.90% في وقت اتصال V2RSU مقارنةً بالأنظمة

المرجعية. بالإضافة إلى ذلك، يُخفّض نهجنا تكلفة الاتصال بنسبة 67.94% إلى 81.67% في اتصال V2V، و72.40% إلى 88.00% في اتصال V2RSU، مع تقليل احتمالية تسرب الموقع إلى 0.05%، وهي نسبة أقل بكثير من الأنظمة المركزية. علاوة على ذلك، يضمن نظامنا حماية قوية للخصوصية، حيث يصل إلى مستوى إنتروبيا أقصى قدره 5، وهو أعلى بنسبة 95.8% من الأنظمة الحالية. تؤكد هذه النتائج أن إطار عملنا يُقلّل من النفقات الحسابية، ويُحسّن كفاءة الاتصال، ويُعزّز حماية الخصوصية، مما يجعله حلاً متيناً وقابلاً للتطوير لأنظمة VANET.

تم في[17] اقتراح بنية مصادقة مؤسسية عبر المركبات من خلال تصميم آلية لتوليد الشهادات من مرحلتين، حيث تتعاون هيئة إصدار الشهادات، وشركات المركبات لإنشاء بيانات اعتماد الهوية للمركبات. لمعالجة مخاوف المركبات الافتراضية، نُرسي ثقة موزعة ونُمكّن تبادل المعلومات بين المركبات الافتراضية من خلال طرح سلسلة كتل ائتلافية تتألف من شركات السيارات، وهيئة التصديق، وهيئة شهادات الاسم المستعار. ونظراً لحاجة المركبات للوصول إلى معلومات حركة المرور، نستخدم سلسلة كتل عامة لتخزين المعلومات العامة، ونستخدم خوارزمية التسامح العملي مع الأخطاء البيزنطية للوصول إلى توافق في الآراء. بدلاً من استخدام عمليات الاقتران الخطي الثنائي المعقدة حسابياً وعمليات التجزئة من نقطة إلى نقطة، يستخدم المخطط المقترح نظام تشفير المنحنى الإهليلجي (ECC)، نظراً لمحدودية موارد الأجهزة للمركبة ووحدة التحكم في الوصول بالإضافة إلى ذلك، يدمج مخططنا الحوسبة الطرفية لحل مهام الحوسبة المعقدة التي لا يمكن

إجراؤها محلياً، مما يُقلل من زمن وصول النظام. يُظهر تحليل الأمان وتحليل الأداء أن مخططنا يتميز بأداء أفضل من المخططات الحالية من حيث الأمان، والتكاليف الحسابية، وتكاليف الاتصالات.

يوضح [الجدول 1] المقارنة بين الدراسات السابقة والدراسة الحالية، المقترح في الدراسة الحالية الغى الحاجة الى استخدام العقود الذكية في الحوسبة السحابية وتم نقل منطق العمل الى وحدات RSU مع التأكيد على استخدام عقدين ذكيين الأول للتحقق من المركبات وتسجيلها والثاني لتبادل الرسائل.

[جدول 1] المقارنة بين الدراسات السابقة والدراسة الحالية

الدراسة	استخدام الحوسبة السحابية	استخدام عقد ذكي للتحقق من المركبات	استخدام عقد ذكي لتبادل الرسائل	استخدام العقد الذكي من قبل RSU
[1]	نعم	نعم	لا	لا
[2]	لا	نعم	لا	لا
[3]	لا	نعم	لا	لا
[4]	لا	نعم	لا	لا
[5]	لا	نعم	لا	لا
الدراسة الحالية	لا	نعم	نعم	نعم

8. النظام المقترح:

تم اتباع منهجية عملية تعتمد على بناء نموذج محاكاة متكامل يجمع بين بيئة شبكات المركبات (VANET)وتقنية سلاسل الكتل كما هو موضح في [الشكل 3]، حيث تم استخدام أداة المحاكاة SUMOلمحاكاة حركة المركبات، وربطها عبر واجهة TRACI مع نظام قائم على سلاسل الكتل والعقود الذكية لتنفيذ عمليات تسجيل المركبات وتبادل الرسائل. في هذا النموذج، تم توظيف وحدات الطريق الذكية (RSUs) كعقد وسيطة تقوم بجميع العمليات الحسابية المرتبطة سلاسل الكتل نيابةً عن المركبات، ما يقلل من العبء على الموارد ويضمن استقرار النظام. تم تسجيل كل عملية تواصل أو رسالة بين المركبات كسجل في سلسلة الكتل، مما يضمن التوثيق، الشفافية، وعدم الإنكار. كما شملت المنهجية جمع بيانات الأداء وتحليلها إحصائياً لتقييم كفاءة النظام من حيث زمن المحاكاة، نسبة إيصال الرسائل(PDR).

1. إعداد بيئة المحاكاة وحركة المركبات:

تم استخدام محاكي SUMO لمحاكاة حركة المركبات داخل شبكة طرق في المدينة، ضمن سيناريو طريق مكوّن من مسار مستقيم ثنائي الاتجاه . تم الاعتماد على نموذج الحركة الافتراضي في SUMO وهو نموذج Krauss لتوليد سلوك المركبات، والذي يعتمد على نموذج المتابعة Car– Following Modelويأخذ بعين الاعتبار سرعة المركبة الأمامية والمسافة الفاصلة لتجنّب الاصطدامات. كما تم استخدام نموذج تغيير المسار الافتراضي LC2013 الذي يتيح للمركبات تجاوز المركبات الأبطأ وفق قواعد واقعية لتبديل المسارات. يتم في كل خطوة زمنية تتبع مواقع المركبات بدقة عبر واجهة TRACI التي تسمح بالوصول إلى بيانات المركبات الحية مثل الموقع،

السرعة، واتجاه الحركة. تم تعيين عدة وحدات طريق ذكية (RSUs) على نقاط ثابتة في الطرق، وتم تحديد موقع كل RSU باستخدام إحداثياتها ضمن شبكة المحاكاة،

في هذه الدراسة تم استخدام **بيئة محاكاة SUMO** لتوليد حركة.

2. تسجيل المركبات في الشبكة عبرRSU:

عند بداية المحاكاة، كل مركبة جديدة تدخل الشبكة لم تُسجل بعد في نظام سلاسل الكتل. عند اكتشاف مركبة غير مسجلة، تقوم أقرب وحدة RSU بالبدء بعملية تسجيل هذه المركبة عبر العقود الذكية.

- **خطوات التسجيل:**
  - الـ RSU يتحقق أولاً إذا كانت المركبة مسجلة مسبقاً.
  - في حال عدم التسجيل، يتم إنشاء معاملة (Transaction) خاصة بتسجيل المركبة في سلاسل الكتل مع فرض رسم تسجيل رمزي(registration fee).
  - يتم تضمين هذه المعاملة ضمن كتلة جديدة تُعدن (mine) وتُضاف إلى سلسلة الكتل.
  - بعد إتمام التسجيل، تُضاف المركبة لقائمة المركبات المسجلة، ويُسمح لها بالمشاركة في التواصل.

3. آلية تبادل الرسائل بين المركبات:

خلال كل خطوة زمنية في المحاكاة:

- لكل مركبة، يُحدد موقعها ويتم إيجاد المركبات الأخرى القريبة ضمن مدى مسافة محدد (مثلاً 50 متر).
- إذا وُجدت مركبة أخرى ضمن هذا النطاق ولم يتم إرسال رسالة إليها مؤخراً (حسب فترة زمنية معينة لمنع التكرار السريع)، يقوم أقرب RSU إلى المرسل بإدارة عملية إرسال الرسالة.
- **خطوات إرسال الرسالة:**
  - يتم التحقق من أن كل من المرسل والمستقبل مسجلان ضمن الشبكة.
  - ينشئ RSU معاملة رسالة جديدة تحتوي على بيانات المرسل، المستقبل، نص الرسالة، مواقع الطرفين، والطابع الزمني.
  - تُضاف المعاملة إلى قائمة المعاملات المعلقة في سلاسل الكتل.
  - يبدأ RSU عملية تعدين الكتلة التي تحتوي هذه المعاملة، ليتم التحقق منها وإضافتها إلى سلسلة الكتل.
  - قد تفشل الرسالة بنسبة 10% لمحاكاة فقدان الحزمة أو مشاكل الشبكة.
  - بعد نجاح التعدين، يتم تسجيل نجاح الإرسال وتأخير الوقت المستغرق بين الإرسال والاستلام.

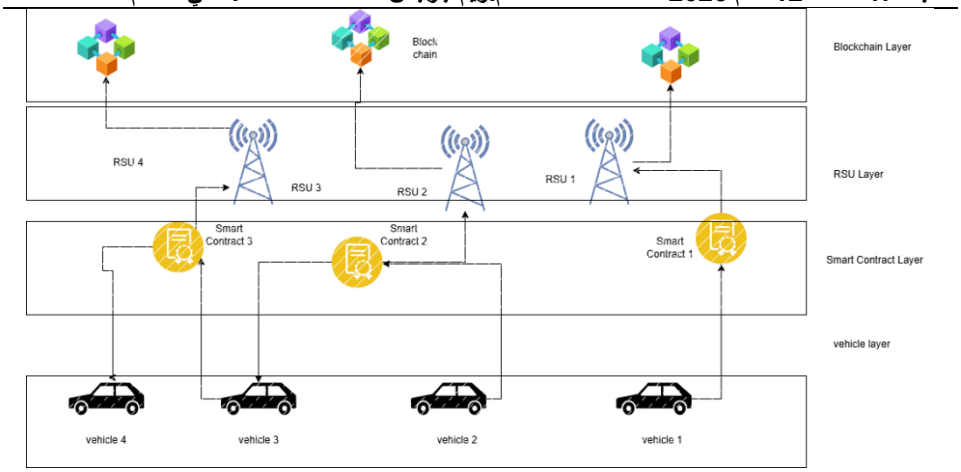
4. إدارة البيانات والتوثيق:

- كل رسالة ناجحة تُسجل في ملف لوج يحتوي معلومات تفصيلية (RSU المرسل، المرسل، المستقبل، محتوى الرسالة، والطابع الزمني).
- كما يتم تسجيل كامل سلسلة الكتل في ملف JSON يحتوي على كل الكتل والمعاملات لتوفير سجل شامل يمكن تحليله لاحقاً.

5. قياس مؤشرات الأداء:

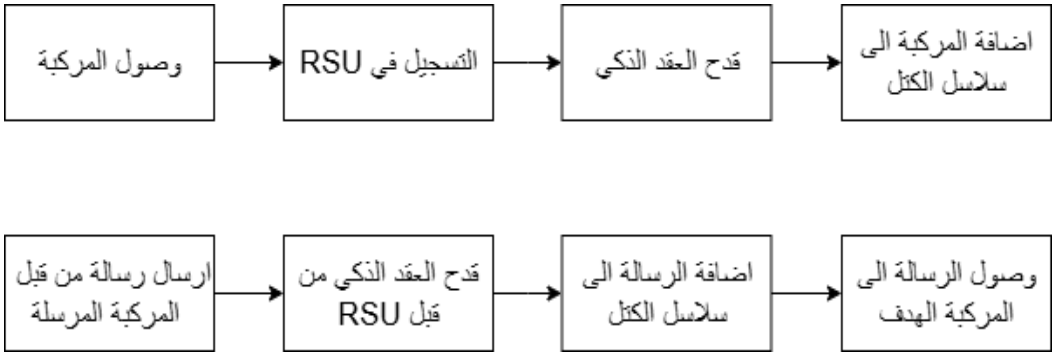
بعد انتهاء فترة المحاكاة، يتم تحليل البيانات التي تم جمعها لحساب المؤشرات الرئيسية:

- نسبة إيصال الرسائل (PDR): نسبة الرسائل التي تم إيصالها بنجاح مقارنة بعدد الرسائل المرسلة.
- عدد الرسائل المرسلة.
- الوقت الكلي لتنفيذ المحاكاة: الزمن المستغرق لتشغيل كل الخطوات السابقة.



[الشكل 3] النظام المقترح

في حين يوضح [الشكل 4] المخطط التدفق لتسجيل المركبة وتبادل الرسائل بين المركبات في النظام.



[الشكل 4] الشكل المخطط التدفق لتسجيل المركبة وتبادل الرسائل بين المركبات في النظام.

9. أدوات الدراسة والاعداد التجريبي:

تم استخدام محاكي SUMO لمحاكاة حركة المركبات داخل شبكة طرق المدينة. يتم في كل خطوة زمنية تتبع مواقع المركبات بدقة عبر واجهة TRACI التي تسمح بالوصول إلى بيانات المركبات الحية مثل الموقع، السرعة، واتجاه الحركة. تم تعيين عدة وحدات طريق ذكية (RSUs) على نقاط ثابتة في الطرق، وتم تحديد موقع كل RSU باستخدام إحداثياتها ضمن شبكة المحاكاة.

10 التجارب والمناقشة:

من أجل تقييم فعالية النظام المقترح تحت ظروف تشغيلية مختلفة، تم إجراء مجموعة من التجارب التي تهدف إلى قياس أداء النظام مع تغيّر الأحمال داخل الشبكة .وقد تم ذلك من خلال زيادة عدد المركبات المشاركة في النظام تدريجياً، حيث شملت التجارب خمس حالات تم فيها اختبار النظام باستخدام 20 مركبة، 40 مركبة، 60 مركبة، 80 مركبة، وأخيراً 100 مركبة.

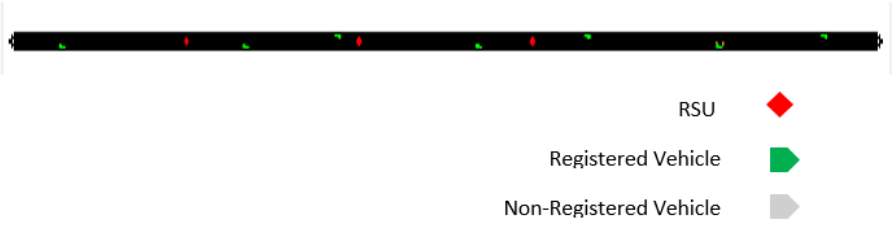
لضمان اتساق نتائج المقارنة، تم الاعتماد على نفس الخريطة الحضرية في جميع التجارب، مع ثبات الإعدادات البيئية والمعايير الأساسية الأخرى. وقد تم رصد مؤشرات الأداء الرئيسية مثل زمن الاستجابة، معدل اكتشاف الشذوذ، كفاءة استخدام الموارد، ودقة التصنيف عند كل مستوى من الأحمال.

تهدف هذه التجارب إلى اختبار قدرة النظام على التحمل والتوسع(Scalability) ، وبيان مدى تأثير زيادة الكثافة المرورية (عدد المركبات) على فعالية النظام، خصوصاً في بيئة المدينة ذات حركة ديناميكية عالية.

يوضح [الشكل 5] خريطة بشارع واحد ذهاب واياب ويوجد فيه ثلاث وحدات على جانب الطريق متموضعة على الخريطة باللون الأحمر.

[شكل 2]خريطة حضرية بشارع واحد.

يوضح [الشكل 6] تحركات المركبات والتي تتموضع على الخريطة باللون الأخضر.



[الشكل 3] تحركات المركبات.

ليتم الانتقال بعدها الى التجارب العملية على النظام المقترح وقد تم الاعتماد على 5 سيناريوهات مختلفة وهي تجربة استخدام 20 مركبة و40 و60 ثم 80 مركبة واخيراً 100 مركبة وقد تم اختيار هذه الاعداد وفقاً للدراسة [1]

- **التجربة الأولى استخدام 20 مركبة:**

في هذه التجربة، تم اختبار أداء النظام ضمن بيئة تضم عشرين مركبة تتبادل الرسائل فيما بينها، بهدف تقييم مدى تحمل النظام وزيادة تعقيده الشبكي مع تزايد عدد العقد. بلغ زمن المحاكاة 146

ثانية، وبلغ متوسط نسبة توصيل الحزم (Packet Delivery Ratio) حوالي 84.76%، ما يعكس استمرار الأداء الجيد للنظام رغم زيادة عدد المركبات، مع ملاحظة انخفاض تدريجي في كفاءة التوصيل نتيجة الضغط المتزايد على الشبكة، وقد بلغ عدد الرسائل المرسلة 328 رسالة.

- **التجربة الثانية:**

في هذه التجربة، تم اختبار أداء النظام ضمن بيئة تضم 40 مركبة تتبادل الرسائل فيما بينها، بهدف تقييم مدى تحمل النظام وزيادة تعقيده الشبكي مع تزايد عدد العقد. بلغ زمن المحاكاة 107.01 ثانية، وبلغ متوسط نسبة توصيل الحزم (Packet Delivery Ratio) حوالي 88.32%، ما يعكس استمرار الأداء الجيد للنظام رغم زيادة عدد المركبات، مع ملاحظة انخفاض تدريجي في كفاءة التوصيل نتيجة الضغط المتزايد على الشبكة، وبلغ عدد الرسائل المرسلة 548.

- **التجربة الثالثة:**

في هذه التجربة، تم اختبار أداء النظام ضمن بيئة تضم 60 مركبة تتبادل الرسائل فيما بينها، بهدف تقييم مدى تحمل النظام وزيادة تعقيده الشبكي مع تزايد عدد العقد. بلغ زمن المحاكاة 109.21 ثانية، وبلغ متوسط نسبة توصيل الحزم (Packet Delivery Ratio) حوالي 88.16%، ما يعكس استمرار الأداء الجيد للنظام رغم زيادة عدد المركبات، مع ملاحظة انخفاض تدريجي في كفاءة التوصيل نتيجة الضغط المتزايد على الشبكة، بلغ عدد الرسائل المرسلة 549.

- **التجربة الرابعة:**

في هذه التجربة، تم اختبار أداء النظام ضمن بيئة تضم 80 مركبة تتبادل الرسائل فيما بينها، بهدف تقييم مدى تحمل النظام وزيادة تعقيده الشبكي مع تزايد عدد العقد. بلغ زمن المحاكاة 164.0ثانية، وبلغ متوسط نسبة توصيل الحزم (Packet Delivery Ratio) حوالي 88.84%، ما يعكس استمرار الأداء الجيد للنظام رغم زيادة عدد المركبات، مع ملاحظة انخفاض تدريجي في كفاءة التوصيل نتيجة الضغط المتزايد على الشبكة، وقد بلغ إجمالي عدد الرسائل المتبادلة 547 رسالة.

- **التجربة الخامسة:**

في هذه التجربة، تم اختبار أداء النظام ضمن بيئة تضم 80 مركبة تتبادل الرسائل فيما بينها، بهدف تقييم مدى تحمل النظام وزيادة تعقيده الشبكي مع تزايد عدد العقد. بلغ زمن المحاكاة 96.13 ثانية، وبلغ متوسط نسبة توصيل الحزم (Packet Delivery Ratio) حوالي 88.0%، ما يعكس استمرار الأداء الجيد للنظام رغم زيادة عدد المركبات، مع ملاحظة انخفاض تدريجي في كفاءة التوصيل نتيجة الضغط المتزايد على الشبكة، وقد بلغ إجمالي عدد الرسائل المرسلة 550 رسالة.

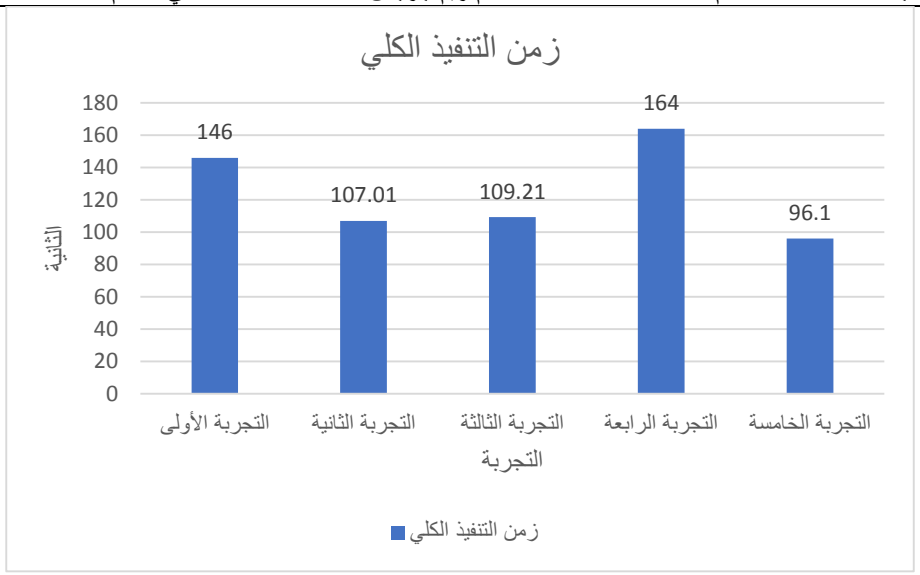
- **ملخص نتائج السيناريوهات:**

يوضح [الشكل 7] زمن التنفيذ لمختلف السيناريوهات. يُظهر الجدول السابق أن زمن التنفيذ الكلي للنظام يختلف باختلاف عدد المركبات المشاركة في التجربة. فكلما ازداد عدد المركبات، ازداد الضغط على وحدات المعالجة نتيجة زيادة عمليات الاتصال والتحقق وتبادل الرسائل عبر العقود الذكية، مما يؤدي إلى ارتفاع طفيف في زمن التنفيذ.

إلا أن هذا الارتفاع لا يُعدّ خطياً، حيث تُظهر النتائج أن النظام يحتفظ بأداء مستقر نسبياً رغم ازدياد عدد المركبات، وهو ما يعكس كفاءة تصميم البنية الموزعة التي تُمكّن كل وحدة RSU من معالجة جزء من العمليات بشكل مستقل دون الاعتماد الكامل على عقدة مركزية واحدة.

على سبيل المثال، في التجربة الرابعة التي تضمنت عدداً أكبر من المركبات، بلغ زمن التنفيذ 164 ثانية وهو الأعلى بين التجارب، نتيجة ازدحام الشبكة وزيادة الرسائل المتبادلة، بينما سجلت التجربة الخامسة انخفاضاً ملحوظاً (96.1 ثانية) بسبب توازن أفضل في توزيع المركبات ضمن منطقة المحاكاة.

بذلك تُظهر النتائج أن النظام المقترح يتمتع بقدرة عالية على التوسع (Scalability) مع الحفاظ على استقرار الأداء في مختلف ظروف التشغيل.



[الشكل 4] مقارنة زمن التنفيذ لكافة التجارب في النظام المقترح.

تفسير التغير في زمن التنفيذ بين التجارب:

إن التباين في زمن التنفيذ الكلي بين التجارب لا يرتبط بعدد المركبات فقط، وإنما بعدة عوامل مترابطة تؤثر على أداء النظام أثناء المحاكاة، وهي:

- كثافة الاتصال بين المركبات.

في بعض السيناريوهات، رغم أن عدد المركبات أكبر، إلا أن المسافات الفاصلة بينها ضمن الشبكة تكون متوزعة بشكل أفضل، ما يقلل عدد الرسائل التي تُرسل فعلياً في كل خطوة زمنية، وبالتالي يقل زمن التنفيذ. وهذا ما يفسر انخفاض الزمن في التجربة الخامسة (96.1 ثانية) رغم وجود عدد كبير من المركبات.

- موقع وحدات الـRSU وتوزيعها المكاني.

في التجربة الرابعة، لوحظ ارتفاع زمن التنفيذ (164 ثانية) لأن بعض المركبات كانت متقاربة من نفس وحدات الـRSU، مما أدى إلى ازدحام في عمليات التحقق من العقود الذكية ومعالجة الرسائل قبل إضافتها إلى سلسلة الكتل، وهو ما زاد الحمل الحسابي على النظام وأطال زمن التنفيذ.

- نشاط العقود الذكية.

كل عملية إرسال أو استقبال تمر بعقد ذكي للتحقق والتسجيل في البلوك تشين، وبالتالي ازدياد عدد المعاملات في فترة زمنية قصيرة يرفع من زمن التعدين ويؤدي إلى بطء نسبي في المحاكاة.

- تأثير احتمال فقدان الرسائل.

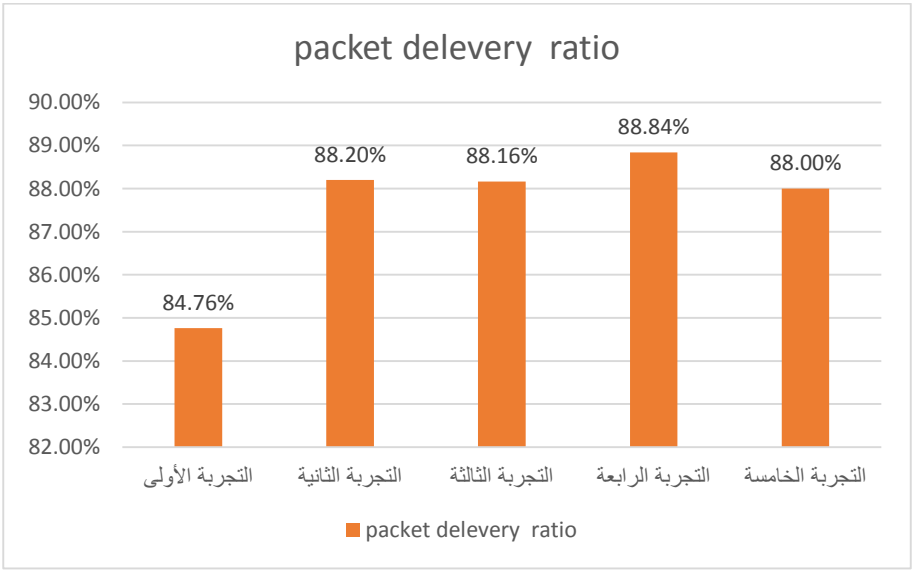
النظام يحاكي نسبة فقد عشوائية (حوالي 10%)، وهذا قد يؤدي أحياناً إلى تقليل عدد الرسائل المتبادلة وبالتالي تقليل زمن التنفيذ في بعض التجارب بشكل غير خطي.

- العشوائية في الحركة ومسارات المركبات

بما أن النموذج المستخدم يعتمد على توزيع مركبات عشوائي في بيئة طرق بسيطة، فإن التفاعل بين العقد والـRSU قد يختلف من تجربة لأخرى، ما يسبب تفاوتاً في الحمل الزمني حتى ضمن عدد متقارب من المركبات.

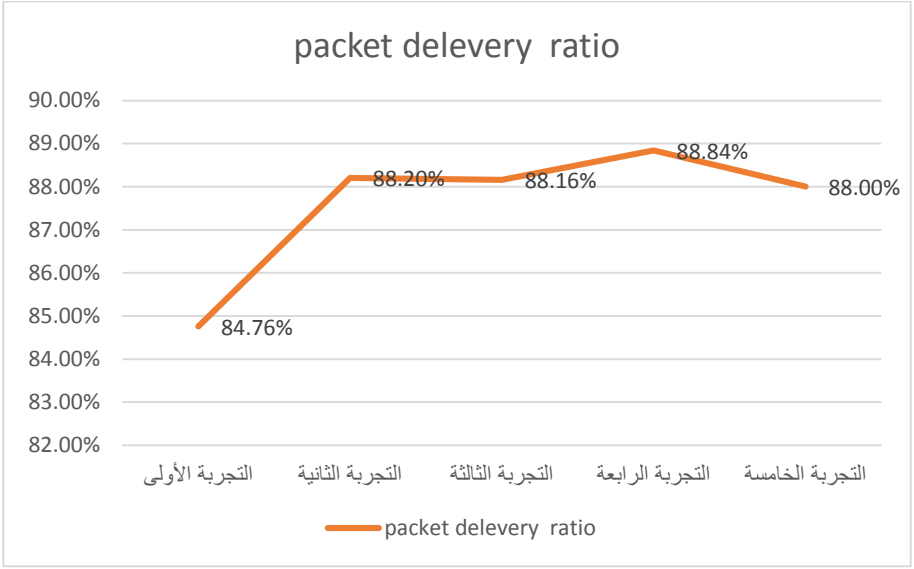
بناءً على ما سبق، فإن أكبر زمن تنفيذ في التجربة الرابعة كان نتيجة تراكم الحمل على RSU محددة وارتفاع معدل التبادلات المتزامنة، في حين انخفض الزمن في التجربة الخامسة بسبب توزيع أفضل للمركبات وتوازن الحمل بين وحدات الـRSU، ما أدى إلى تحسين كفاءة التنفيذ.

يوضح [الشكل 8] مقارنة نسبة توصيل الحزم (Packet Delivery Ratio – PDR) في جميع التجارب التي أُجريت على النظام المقترح باستخدام أعداد مختلفة من المركبات. وتبيّن النتائج أن أفضل نسبة توصيل بلغت 88.84 %عند استخدام 80 مركبة، بالتالي النتائج تؤكد قدرة النظام المقترح على الحفاظ على مستوى أداء مستقر وموثوق حتى في بيئات ذات حمل مرتفع وكثافة اتصالات عالية.



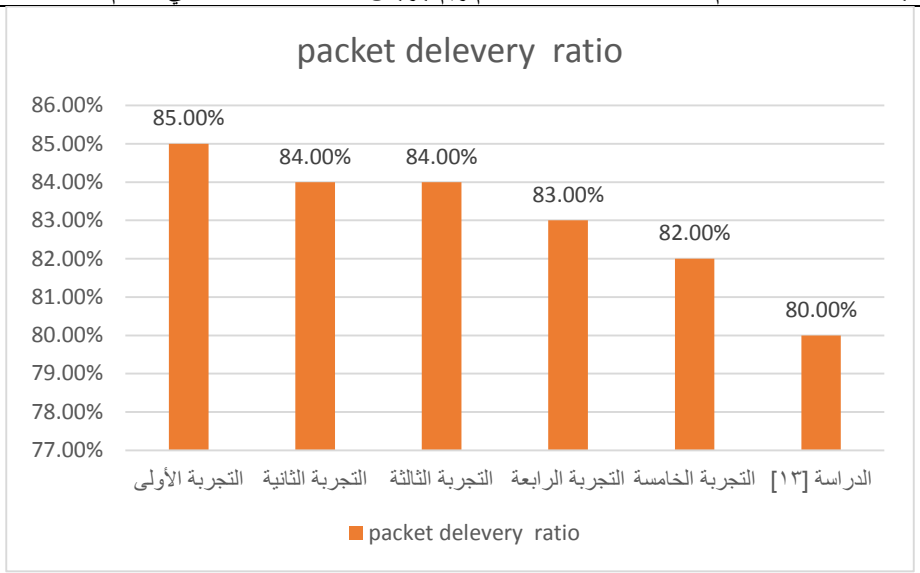
[الشكل 5] مقارنة packet delivery ratio لكافة التجارب في النظام المقترح

يوضح [الشكل 9] تطور نسبة تسليم الحزم في كافة التجارب، في كافة التجارب ومع زيادة عدد المركبات لم تقل نسبة تسليم الحزم المتبادلة بين المركبات عن 84 % .



[الشكل 6] تطور نسبة تسليم الحزم في كافة التجارب.

بالمقارنة مع أقرب دراسة مشابهة من حيث بنية النظام المقترح، وهي الدراسة [1]، تبين أن نسبة تسليم الرسائل في النظام الحالي كانت متفوقة في جميع التجارب والسيناريوهات كما هو موضح [بالشكل 10]. حيث تراوحت نسبة تسليم الرسائل في النظام المقترح بين 84 %و88%، بينما لم تتجاوز هذه النسبة في الدراسة [13] نسبة 80%. تعكس هذه النتائج التفوق الواضح للنظام المقترح، مما يؤكد نجاحه في تحسين كفاءة توصيل الرسائل وتعزيز أداء الشبكة مقارنة بالدراسات السابقة.



[الشكل 7] مقارنة مع دراسات سابقة.

يجدر الذكر بأن باقي اعدادات المحاكاة للشبكة موضحة [بالجدول 2] .

[جدول 1] اعدادات المحاكاة للشبكة

البند	القيمة / التوضيح
عدد المركبات(Vehicles)	20-80 مركبة (حسب السيناريو)
عدد وحدات RSU (Road Side Units)	3 وحدات موزعة على الشبكة
نمط الطوبولوجيا	ونظام موزع (Distributed Blockchain)
نظام الاتصال	**V2I** (Vehicle-to-Infrastructure) و **V2V** (Vehicle-to-Vehicle)
بروتوكول الشبكة المستخدم	تم الاعتماد على نموذج الاتصال التعاوني عبر **IEEE 802.11p / DSRC** المدمج ضمن SUMO لمحاكاة شبكاتVANET
بروتوكول نقل الرسائل	تبادل الرسائل يتم عبر العقود الذكية (Smart Contracts) التي تعمل كطبقة تحقق وتسجيل (Validation Layer)
آلية تسجيل المركبات	تتم عملية التسجيل والتحقق من الهوية عبر عقد ذكي خاص بـRSU، باستخدام معاملات مسجلة في سلسلة الكتل
آلية إرسال الرسائل	يتم إرسال الرسائل بين المركبات عبر أقرب RSU باستخدام العقد الذكي الخاص بها، مع تسجيل كل معاملة في سلاسل الكتل
إعدادات المسافة للاتصال	الحد الأقصى لمسافة الاتصال بين المركبات 50 مترًا
زمن المحاكاة (Simulation Time)	500خطوة زمنية(simulation steps)
أداة سلاسل الكتل	نموذج محاكاة لسلاسل الكتل يعتمد على إثبات العمل (Simplified Proof of Work)
المقاييس المقارنة	نسبة تسليم الرسائل – (PDR / Reliability) التأخير من طرف إلى طرف – (End-to-End Delay) زمن التعدين(Mining Time)

11. الخلاصة والعمل المستقبلي:

يقدّم هذا البحث إطاراً مبتكراً يجمع بين تقنيات سلاسل الكتل وشبكاتVANET ، من خلال توظيف وحدات الطريق الذكية (RSUs) كعُقد وسيطة لإدارة العمليات الحسابية والتوثيقية المتعلقة بالتواصل بين المركبات. يعتمد النظام المقترح على عقود ذكية لإتمام عمليات تسجيل المركبات وتبادل الرسائل بطريقة موثوقة، لا مركزية، وقابلة للتوثيق الكامل، دون تحميل المركبات عبئاً حسابياً إضافياً.

أظهرت نتائج المحاكاة باستخدام أداة SUMO فعالية الإطار المقترح، حيث حقق نسبة تسليم رسائل (PDR) مرتفعة تراوحت بين 84% و88%، متفوقاً على أقرب دراسة مرجعية. كما أظهر النظام كفاءة جيدة في مؤشرات الأداء الأخرى مثل زمن التأخير وزمن تعدين الكتل، مما يعزز من جدواه في بيئات VANET الواقعية.

رغم النتائج الإيجابية، لا تزال هناك فرص واسعة لتطوير النظام في أبحاث مستقبلية، منها:

- دعم التنقل العالي: تحسين أداء النظام في بيئات ذات كثافة مرورية وسرعات عالية، مثل الطرق السريعة.
- تكامل الذكاء الاصطناعي: إدماج تقنيات تعلم الآلة لتحسين اتخاذ القرار في RSUs بشأن أولوية الرسائل أو توقيت الإرسال.
- زيادة الأمان: دراسة سيناريوهات الهجمات المحتملة (مثل هجوم Sybil أو الانتحال)وتطوير آليات كشف واستجابة داخل العقود الذكية.

- اختبار عملي: الانتقال من بيئة المحاكاة إلى تنفيذ تجريبي ميداني باستخدام وحدات RSUحقيقية وأجهزة محمولة داخل المركبات.
- تحسين استهلاك الطاقة: دراسة أثر النظام على استهلاك الطاقة فيRSUs ، خاصةً في حال اعتمادها على مصادر طاقة محدودة أو خضراء.

جدول الاختصارات

الاختصار	الكلمة الكاملة (بالإنجليزية)	المعنى بالعربية
OBU	On-Board Unit	وحدة داخل المركبة
PDR	Packet Delivery Ratio	نسبة توصيل الحزم
RSU	Road Side Unit	وحدة جانب الطريق
V2I	Vehicle-to-Infrastructure	اتصال المركبة بالبنية التحتية
V2V	Vehicle-to-Vehicle	اتصال مركبة بمركبة
VANET	Vehicular Ad Hoc Network	شبكة مخصصة للمركبات

المراجع

[1] Kim, Seungmo. "Impacts of mobility on performance of blockchain in VANET." IEEE Access 7 (2019): 68646-68655.
[2] Anwer, M. Shahid, and Chris Guy. "A survey of VANET technologies." Journal of Emerging Trends in Computing and Information Sciences 5.9 (2014): 661-671.
[3] Bariah, Lina, et al. "Recent advances in VANET security: A survey." 2015 IEEE 82nd vehicular technology conference (VTC2015-fall). IEEE, 2015.
[4] Cunha, Felipe, et al. "Data communication in VANETs: Protocols, applications and challenges." Ad hoc networks 44 (2016): 90-103.
[5] Lee, Michael, and Travis Atkison. "VANET applications: Past, present, and future." Vehicular Communications 28 (2021): 100310.
[6]اقتراح بنية هجينة لشبكة الاستشعار اللاسلكية وشبكة المركبات المخصصة لتحسين السلامة على الطرق لارا علي، د.محسن عبود، مجلة جامعة حمص،المجلد 43 العدد 16 عام 2021
[7]دراسة سلسلة الكتل وإمكانية استخدامها في التحقق من ملكية المفتاح العام في ارسال رسائل معماة، محمد خليل، محمد الشايطة، محمد عصورة، مجلة جامعة حمص، المجلد 43 العدد 10 عام 2021
[8] Di Pierro, Massimo. "What is the blockchain?." Computing in Science & Engineering 19.5 (2017): 92-95.
[9] Zheng, Zibin, et al. "An overview of blockchain technology: Architecture, consensus, and future trends." 2017 IEEE international congress on big data (BigData congress). Ieee, 2017.
[10] Wang, Shuai, et al. "An overview of smart contract: architecture, applications, and future trends." 2018 IEEE intelligent vehicles symposium (IV). IEEE, 2018.
[11] Majumder, Subhrajit, Akshay Mathur, and Ahmad Y. Javaid. "A study on recent applications of blockchain technology in vehicular adhoc network (VANET)." National Cyber Summit. Cham: Springer International Publishing, 2019. 293-308.
[12] Alladi, Tejasvi, et al. "A comprehensive survey on the applications of blockchain for securing vehicular networks." IEEE Communications Surveys & Tutorials 24.2 (2022): 1212-1239.
[13] More, Shivaprasad, et al. "Secured communication in vehicular adhoc networks (VANETs) using blockchain." IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 1022. No. 1. IOP Publishing, 2021.

[14] Maria, Azees, et al. "BBAAS: blockchain- based anonymous authentication scheme for providing secure communication in VANETs." Security and Communication Networks 2021.1 (2021): 6679882.
[15] Subramani, Jegadeesan, et al. "Blockchain-based physically secure and privacy-aware anonymous authentication scheme for fog-based vanets." IEEe Access 11 (2022): 17138-17150.
[16] Ilyas, Iqra, et al. "Blockchain enabled privacy provisioning scheme for location based services in VANETs." PLoS One 20.6 (2025): e0323438.
[17] Lai, Jiaming, et al. "Blockchain-based VANET edge computing-assisted cross-vehicle enterprise authentication scheme." Computer Communications 231 (2025): 108040.