

مجلة جامعة حمص

سلسلة علوم الهندسة الميكانيكية والكهربائية
والمعلوماتية



مجلة علمية محكمة دورية

المجلد 48 . العدد 8

1448 هـ - 2026 م

الأستاذ الدكتور طارق حسام الدين رئيس جامعة حمص

المدير المسؤول عن المجلة

أ. د. وليد حمادة	رئيس تحرير مجلة جامعة حمص للعلوم الإنسانية
د. نعيمة عجيب	رئيس تحرير مجلة جامعة حمص للعلوم الطبية والهندسية والأساسية والتطبيقية

عضو هيئة التحرير	د. محمد فراس رمضان
عضو هيئة التحرير	د. مضر سعود
عضو هيئة التحرير	د. ممدوح عبارة
عضو هيئة التحرير	د. موفق تلاوي
عضو هيئة التحرير	د. طلال رزوق
عضو هيئة التحرير	د. أحمد الجاعور
عضو هيئة التحرير	د. الياس خلف
عضو هيئة التحرير	د. روعة الفقس
عضو هيئة التحرير	د. محمد الجاسم
عضو هيئة التحرير	د. خليل الحسن
عضو هيئة التحرير	د. هيثم حسن
عضو هيئة التحرير	د. أحمد حاج موسى

تهدف المجلة إلى نشر البحوث العلمية الأصيلة، ويمكن للراغبين في طلبها
الاتصال بالعنوان التالي:

رئيس تحرير مجلة جامعة حمص

سورية . حمص . جامعة حمص . الإدارة المركزية . ص . ب (77)

. هاتف / فاكس : 2138071 31 963 ++

. موقع الإنترنت : www.homs-univ.edu.sy

. البريد الإلكتروني : journal.homs-univ.edu.sy

ISSN: 1022-467X

شروط النشر في مجلة جامعة حمص

الأوراق المطلوبة:

- 2 نسخة ورقية من البحث بدون اسم الباحث / الكلية / الجامعة) + word / CD من البحث منسق حسب شروط المجلة.
 - طابع بحث علمي + طابع نقابة معلمين.
 - إذا كان الباحث طالب دراسات عليا:
يجب إرفاق قرار تسجيل الدكتوراه / ماجستير + كتاب من الدكتور المشرف بموافقة على النشر في المجلة.
 - إذا كان الباحث عضو هيئة تدريسية:
يجب إرفاق قرار المجلس المختص بإنجاز البحث أو قرار قسم بالموافقة على اعتماده حسب الحال.
 - إذا كان الباحث عضو هيئة تدريسية من خارج جامعة البعث :
يجب إحضار كتاب من عمادة كليته تثبت أنه عضو بالهيئة التدريسية و على رأس عمله حتى تاريخه.
 - إذا كان الباحث عضواً في الهيئة الفنية :
يجب إرفاق كتاب يحدد فيه مكان و زمان إجراء البحث ، وما يثبت صفته وأنه على رأس عمله.
 - يتم ترتيب البحث على النحو الآتي بالنسبة لكليات (العلوم الطبية والهندسية والأساسية والتطبيقية):
عنوان البحث .. ملخص عربي و إنكليزي (كلمات مفتاحية في نهاية الملخصين).
- 1- مقدمة
 - 2- هدف البحث
 - 3- مواد وطرق البحث
 - 4- النتائج ومناقشتها .
 - 5- الاستنتاجات والتوصيات .
 - 6- المراجع.

- يتم ترتيب البحث على النحو الآتي بالنسبة لكليات (الآداب - الاقتصاد - التربية - الحقوق - السياحة - التربية الموسيقية وجميع العلوم الإنسانية):
- عنوان البحث .. ملخص عربي و إنكليزي (كلمات مفتاحية في نهاية الملخصين).
- 1. مقدمة.
- 2. مشكلة البحث وأهميته والجديد فيه.
- 3. أهداف البحث و أسئلته.
- 4. فرضيات البحث و حدوده.
- 5. مصطلحات البحث و تعريفاته الإجرائية.
- 6. الإطار النظري و الدراسات السابقة.
- 7. منهج البحث و إجراءاته.
- 8. عرض البحث و المناقشة والتحليل
- 9. نتائج البحث.
- 10. مقترحات البحث إن وجدت.
- 11. قائمة المصادر والمراجع.
- 7- يجب اعتماد الإعدادات الآتية أثناء طباعة البحث على الكمبيوتر:
 - أ- قياس الورق 25×17.5 B5.
 - ب- هوامش الصفحة: أعلى 2.54- أسفل 2.54 - يمين 2.5- يسار 2.5 سم
 - ت- رأس الصفحة 1.6 / تذييل الصفحة 1.8
 - ث- نوع الخط وقياسه: العنوان . Monotype Koufi قياس 20
 - كتابة النص Simplified Arabic قياس 13 عادي - العناوين الفرعية Simplified Arabic قياس 13 عريض.
 - ج. يجب مراعاة أن يكون قياس الصور والجداول المدرجة في البحث لا يتعدى 12سم.
- 8- في حال عدم إجراء البحث وفقاً لما ورد أعلاه من إشارات فإن البحث سيهمل ولا يرد البحث إلى صاحبه.
- 9- تقديم أي بحث للنشر في المجلة يدل ضمناً على عدم نشره في أي مكان آخر، وفي حال قبول البحث للنشر في مجلة جامعة البعث يجب عدم نشره في أي مجلة أخرى.

10- الناشر غير مسؤول عن محتوى ما ينشر من مادة الموضوعات التي تنشر في المجلة
11- تكتب المراجع ضمن النص على الشكل التالي: [1] ثم رقم الصفحة ويفضل استخدام التهميش الإلكتروني المعمول به في نظام ورد WORD حيث يشير الرقم إلى رقم المرجع الوارد في قائمة المراجع.

تكتب جميع المراجع باللغة الانكليزية (الأحرف الرومانية) وفق التالي:

آ . إذا كان المرجع أجنبياً:

الكنية بالأحرف الكبيرة - الحرف الأول من الاسم تتبعه فاصلة - سنة النشر - وتتبعها معترضة (-) عنوان الكتاب ويوضع تحته خط وتتبعه نقطة - دار النشر وتتبعها فاصلة - الطبعة (ثانية . ثالثة) . بلد النشر وتتبعها فاصلة . عدد صفحات الكتاب وتتبعها نقطة . وفيما يلي مثال على ذلك:

MAVRODEANUS, R1986- Flame Spectroscopy. Willy, New York, 373p.

ب . إذا كان المرجع بحثاً منشوراً في مجلة باللغة الأجنبية:

— بعد الكنية والاسم وسنة النشر يضاف عنوان البحث وتتبعه فاصلة، اسم المجلد ويوضع تحته خط وتتبعه فاصلة — المجلد والعدد (كتابة مختزلة) وبعدها فاصلة — أرقام الصفحات الخاصة بالبحث ضمن المجلة . مثال على ذلك:

BUSSE,E 1980 Organic Brain Diseases Clinical Psychiatry News , Vol. 4. 20 – 60

ج . إذا كان المرجع أو البحث منشوراً باللغة العربية فيجب تحويله إلى اللغة الإنكليزية و التقيد بالبنود (أ و ب) ويكتب في نهاية المراجع العربية: (المراجع In Arabic)

رسوم النشر في مجلة جامعة حمص

1. دفع رسم نشر (600) ل.س ستمئة ليرة سورية عن كل بحث لكل باحث يريد نشره في مجلة جامعة البعث.
2. دفع رسم نشر (2000) ل.س الفا ليرة سورية عن كل بحث للباحثين من الجامعة الخاصة والافتراضية .
3. دفع رسم نشر (200) مئتا دولار أمريكي فقط للباحثين من خارج القطر العربي السوري .
4. دفع مبلغ (150) ل.س مئة وخمسون ليرة سورية رسم موافقة على النشر من كافة الباحثين.

المحتوى

الصفحة	اسم الباحث	اسم البحث
36-11	م. إلياذة الابراهيم د.م. جمانا دياب	تحسين خوارزمية النهج التكراري للتحكم الأمثل في النظم الخطية غير المحددة جزئياً باستخدام القدح القائم على الحدث
60-37	د. علي الحاتم	إدارة الثقة في شبكات المركبات باستخدام سلاسل الكتل المستضافة في السحابة: دراسة أثر الذاكرة المؤقتة في المركبات
116-61	د.م. أحمد العلي	دراسة مقارنة لأداء بروتوكولات التوجيه المحسنة المعتمدة على AODV وبروتوكولي GPSR و Q-Learning في شبكات المركبات اللاسلكية النقلة VANETS
140-117	راما جعبري د. أحمد سلامة د. رامي منصور	تأثير بارامترات المزج الميكانيكي على جودة طلاء الإيبوكسي مع اضافة ثاني أكسيد التيتانيوم TiO_2
170-141	رنيم صالح محمد د. علي الحاتم	موازنة أداء شبكات انترنت الاشياء المعتمدة على بروتوكول LEACH باستخدام التعلم المعزز

تحسين خوارزمية النهج التكراري للتحكم الأمثل في النظم الخطية غير المحددة جزئياً باستخدام القدم القائم على الحدث

م. إلياذة الإبراهيم

د.م. جمانا دياب

ملخص

تزايد الاهتمام مؤخراً بدراسة أنظمة التحكم من منظور عملي، أخذاً بعين الاعتبار تأثير البيئة المحيطة والاضطرابات الخارجية. في هذا السياق، برز مفهوم النظم غير المحددة (Uncertainty Systems) كمقابل للحالة المثالية التي تفترض أن جميع بارامترات النظام معلومة بشكل كامل. يعتبر التحكم الأمثل من أهم تقنيات التحكم، حيث يوفر إطاراً رياضياً منظماً للحصول على إشارة التحكم المثلى التي تحقق أفضل أداء ممكن للنظام وفق معيار محدد مسبقاً.

تقدم هذه الورقة منهجية مطورة للتحكم الأمثل في الأنظمة الخطية غير المحددة جزئياً، من خلال دمج خوارزمية النهج التكراري (Policy Iterative PI) مع آلية القذف القائم على الحدث (Event-Triggered ET). فرغم تحقيق خوارزمية PI للتوازن بين الأداء والدقة والعبء الحسابي، واعتمادها كأساس لتطوير العديد من التقنيات في حل مسائل التحكم الأمثل دون الحاجة إلى معرفة كاملة بالنظام، إلا أنها بقيت تعاني من التحديثات التكرارية المستمرة، مما يؤدي إلى زمن تنفيذ كبير واستهلاك متزايد للموارد.

ولمعالجة هذه المشكلة، تم دمج (ET) للتحكم في تنفيذ خطوات الخوارزمية التكرارية نفسها، وليس فقط لحظات أخذ العينات أو تحديث إشارة التحكم كما هو متبع في الأساليب التقليدية. كما تم اشتقاق شرط قذف ديناميكي وفق تحليل استقرار ليابونوف، مما يضمن استقرار النظام ويقلل التحديثات غير الضرورية.

أظهرت النتائج أن الطريقة المقترحة تقلل بشكل ملحوظ عدد التكرارات والعبء الحسابي دون التأثير على أداء النظام. وتم التحقق من فعالية المنهجية من خلال تطبيقها على نظام نواس مقلوب غير محدد جزئياً، حيث بينت النتائج تحقيق تقارب أسرع، وتقليل في زمن التنفيذ، وتحسين في استقرار النظام مقارنة بخوارزمية PI الكلاسيكية.

الكلمات المفتاحية: خوارزمية النهج التكراري - القوائم على الحدث - التحكم الأمثل - النظم الخطية غير المحددة جزئياً - عتبة قذح ديناميكية

Enhanced Policy Iterative optimal control for partially uncertainty linear systems by using Event-Triggered mechanism

Abstract

Recently, there has been growing interest in practical control systems considering environmental effects and external disturbances. In this context, uncertainty systems have emerged as a counterpart to the ideal case assuming full knowledge of system parameters. Optimal control is a technique providing a mathematical framework for obtaining control signals that achieve optimal system performance according to a predefined criterion.

This paper presents an enhanced methodology for optimal control of partially uncertainty linear systems by integrating the Policy Iterative (PI) algorithm with an Event-Triggered (ET) mechanism. Although PI provides a trade-off between performance, and computational cost and is widely used for solving optimal control problems without full system knowledge, it suffers from continuous updates that increase execution time and resource consumption. To address this issue, an ET mechanism is incorporated to regulate the execution of the PI algorithm itself. Unlike conventional approaches where ET is used for sampling or control updates, the proposed method applies it to the iterative process. A Lyapunov-based dynamic triggering condition is derived to ensure system stability while reducing unnecessary updates. Results show the proposed method reduces iterations and computational burden without degrading performance. Its effectiveness is validated on a partially uncertain

inverted pendulum system, showing faster convergence, reduced execution time, and improved stability compared to classical PI.

Keywords:

Policy Iterative Algorithm – Event-Triggered Control – Optimal Control – Partially Uncertainty linear Systems – Dynamic Triggering Threshold

I. مقدمة

الأمثلة هو مفهوم عام موجود في الكثير من العلوم مثل الهندسة والجيولوجيا والاقتصاد ويعني الحصول على الأفضل وفق معايير محددة. يشير التحكم الأمثل إلى صنف من التقنيات الرياضية، تتيح لنا إيجاد أفضل طريقة ممكنة للتحكم بالنظام، من خلال ضبط إشارة التحكم للحصول على القيمة الصغرى أو العظمى لمؤشر أداء محدد بشكل مسبق تبعا للحالة المطلوبة (تقليل خطأ أو تقليل استهلاك طاقة أو زيادة سرعة الاستجابة).

منذ أواخر ستينيات القرن الماضي، حظيت نظرية التحكم الأمثل باهتمام واسع. ركزت الدراسات المبكرة على النظم ذات البارامترات المعلومة كلياً [1-8]، لسهولة التصميم في غياب الاضطرابات البيئية. لكن للتغلب على قيود هذا الإطار النظري والتوجه نحو التطبيقات العملية، برزت الحاجة للتعامل مع الأنظمة التي تخضع لتأثيرات البيئة المحيطة، حيث تغدو المعلومات الدقيقة عن البارامترات غير متوفرة، مما يؤدي إلى حالة من عدم اليقين (Uncertainty). من هنا ظهرت فئة النظم غير المحددة، وهي النظم التي نمتلك عنها معلومات أولية غير دقيقة أو ثابتة، تحول دون تطبيق طرق الأمثلة التقليدية عليها مباشرة. ونتيجة لذلك، تحولت الجهود البحثية من النهج التقليدي القائم على الحل المسبق (Offline) إلى تطوير خوارزميات قادرة على حل مسألة الأمثلة بشكل آني (Online) بالاعتماد على قياسات النظام أثناء تشغيله، وهو النهج الذي يتبناه هذا البحث.

II. هدف البحث

تم في هذه الورقة إجراء دراسة تحليلية لأبرز طرق التحكم الأمثل في النظم الخطية غير المحددة جزئياً، واختيار خوارزمية PI كأساس للتطوير نظراً لتوازنها بين الأداء والعبء الحسابي. ورغم اعتمادها كأساس في مجالات أوسع، إلا أنها تعاني من التحديثات التكرارية المستمرة. لذا، تقدم الورقة منهجية مطورة

تتغلب على هذا التحدي بدمج آلية القدر القائم على الحدث (ET) للتحكم في تنفيذ الخوارزمية كاملاً، مما يقلل عدد التكرارات والعبء الحسابي وزمن التنفيذ.

III. أهمية البحث

تكمن أهمية هذه الدراسة من دورها في التغلب على بعض التحديات التي تواجه تطبيق التحكم الأمثل على النظم الخطية غير المحددة جزئياً، حيث تم تحسين خوارزمية PI من خلال تقليل عدد العمليات التكرارية واستهلاك الموارد والعبء الحسابي المترتب على ذلك، وفي تغيير مفهوم القدر القائم على الحدث حيث استخدم بصيغة مختلفة عن صيغته التقليدية، واعتمد لتحديد متى يتم تكرار تنفيذ الخوارزمية كاملة.

IV. منهج البحث

في هذه الورقة، تم استعراض طرق التحكم الأمثل الأبرز في النظم الخطية غير المحددة جزئياً، وتحليلها والمقارنة بينها من خلال توضيح نقاط القوة والضعف، ثم شرح آلية القدر القائم على الحدث وكيفية دمجها مع خوارزمية PI التقليدية ثم تطبيق الخوارزمية الكلاسيكية والمقترحة على النواس المقلوب بعد تمثيله كنظام غير محدد جزئياً، يليها الخلاصة والآفاق المستقبلية المعتمدة عليها.

V. مواد وطرائق البحث

اعتمدت معظم الأبحاث الحديثة عند التعامل مع النظم غير المحددة لحل مشكلة التحكم الأمثل على تقسيمها إلى:

- **نظم غير محددة بشكل جزئي:** أي في النظم الخطية يوجد معلومات كاملة ودقيقة عن المصفوفة B فقط، بينما المصفوفة A غير معروفة بشكل كامل ودقيق، هذه النظم يتم تمثيلها وفق المعادلة

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (1)$$

حيث A, B مصفوفات الحالة والتحكم وتمثل بارامترات النظام و x(t) شعاع الحالة و u(t) إشارة التحكم و y(t) خرج النظام.

تم في الأدبيات استخدام خوارزمية PI التي تعتمد على تحديث إشارة التحكم تبعاً لمقدار التفاوت بين القيمة الحالية والقيمة المطلوبة [9-12] ، وهناك دراسات توجهت لاعتماد الطرق الإحصائية لتخمين المصفوفة A للتغلب على عدم اليقين [13]

- **نظم غير محددة بشكل كامل:** لا يوجد معلومات دقيقة وكاملة عن كامل بارامترات النظام، أي المصفوفتين A.B غير دقيقتين. وللتعامل مع هذه الحالة تم دراسة آلية قريبة من PI تعتمد على استبدال المصفوفات غير المحددة بمصفوفات معروفة [14,15]، وأيضاً تم التوجه لدراسة data-driven التي تعتمد على قياسات الحالة والخرج لتخمين البارامترات غير المحددة، و تم تطبيق طرق الأمثلة التقليدية عليها [16] .

تم أولاً التوجه لدراسة طرق التحكم الأمثل الأبرز في مجال النظم الخطية غير المحددة جزئياً، للإضاءة على الطريقة الأكثر فعالية ومعرفة التحديات التي تواجهها، ليتم بعد ذلك العمل على التخلص منها أو تقليلها ما أمكن.

1. دراسة أبرز طرق التحكم الأمثل في النظم الخطية غير المحددة جزئياً:

1.1. التحكم الأمثل باعتماد خوارزمية PI

تعتبر وحدة تحكم أمثل تكيفية online، تتضمن خطوتين تكراريتين: تقييم السياسة policy evaluation وتحديث السياسة policy update، حيث يتم تحديث دالة الإنجاز وبارامترات التحكم بشكل مستمر، طالما الفرق بين دالة الإنجاز الحالية ودالة الإنجاز المطلوبة أكبر من عتبة معينة [9].

آلية العمل

تقوم خطوة Policy Evaluation بحساب دالة الإنجاز لتقييم سلوك النظام، وبناءً على هذا التقييم يتم تحسين أداء المتحكم من خلال خطوة Policy Update التي تمثل إشارة التحكم [10].

يتم أولاً إعطاء إشارة تحكم أولية، ثم إيجاد دالة الإنجاز، يليها إعادة إيجاد إشارة التحكم من خلال تحديث مصفوفة الريح الخلفي. تستمر هذه العملية التكرارية حتى يقوم policy evaluation بإيقاف policy update بسبب الوصول للمطلوب.

ليكن النظام الخطي المستمر (1) وتكون دالة الإنجاز الموافقة له ممثلاً بالمعادلة (2)

$$J = \int_0^{\infty} [x^T Q x + u^T R u] dt \quad (2)$$

حيث Q, R مصفوفة تربيعية متناظرة تضبط من قبل المصمم

يتم إيجاد إشارة التحكم المثلى من خلال جعل دالة الإنجاز أصغر، فنحصل على معادلة جبرية تابعة لمصفوفات النظام A, B تسمى معادلة ريكتي الجبرية ممثلة بالمعادلة (3)

$$A^T P + P A + Q - P B R^{-1} B^T P = 0 \quad (3)$$

حيث P هي المصفوفة المراد أمثلتها، ويتم إيجادها من خلال حل هذه المعادلة.

الخطوة التالية هي إيجاد مصفوفة الريج الخلفي K ، والتي تمثل بارامترات المتحكم، وتحسب من (4)

$$K = R^{-1} B^T P \quad (4)$$

وبعد ذلك، يتم حساب إشارة التحكم وفق قانون التحكم الخطي (5)

$$u = -Kx \quad (5)$$

ولكن في حالة النظم غير المحددة جزئياً، تكون المصفوفة A غير متوفرة بدقة، وبالتالي لا يمكن حل معادلة ريكتي (3) على وضعها الحالي. ويتعويض (5) في (1) تصبح معادلة النظام الجديدة (6)

$$\dot{x} = (A - BK)x \quad (6)$$

عندها تصبح معادلة ريكتي الجبرية (3) بالشكل الجديد (7)

$$(A - BK)^T P + P(A - BK) = -(K^T R K + Q) \quad (7)$$

وتصبح معادلة دالة الإنجاز الجديدة (8)

$$V = \int_0^{\infty} [x^T(\tau)(Q + K^T R K)x(\tau)] d\tau = x^T(t) P x(t) \quad (8)$$

تكون دالة الإنجاز لزمن منتهي محدد ممثلة بالمعادلة (9)

$$V(x(t)) = \int_t^{t+T} [x^T(\tau)(Q + K^T RK)x(\tau)]d\tau + V(x(t+T)) \quad (9)$$

وباعتبار k_1 هي مصفوفة الربح الخلفي لإشارة التحكم الأولية المعطاة، يمكن كتابة دالة الإنجاز كصيغة تكرارية (10) وإيجاد p في كل تكرار، حيث $i=1,2,\dots$ رقم التكرار

$$x_t^T P_i x_t = \int_t^{t+T} [x_t^T (Q + K_i^T R K_i) x_t] d\tau + x_{t+T}^T P_i x_{t+T} \quad (10)$$

وتصبح مصفوفة الربح الخلفي وفق المعادلة (11)

$$K_{i+1} = R^{-1} B^T P_i \quad (11)$$

إذا تم التوصل لحل معادلة ريكاتي دون الحاجة لمعرفة المصفوفة A بدقة، إذ هي مضمنة ضمن $x(t)$ $x(t+T)$ ويتم مراقبتهما online، لذا تكون الحاجة الى قياسات للحالة وللمصفوفة B لتحديث إشارة التحكم. ويستمر تكرار العملية حتى الوصول لشرط التقارب $|K_i - K_{i-1}| < \varepsilon$ وتحقيق الاستقرار.

المزايا والعيوب

تتميز هذه الطريقة بالتعامل مع الأنظمة دون الحاجة إلى المعرفة الكاملة والدقيقة لبارامتراتهما، وتحديث إشارة التحكم بشكل دائم طالما لم نحقق المطلوب. بينما تعاني من العبء الحسابي والزمني الناتج عن تكرار عملية الأمثلة بشكل كبير.

1.2. التحكم الأمثل باعتماد الطرق الإحصائية

تعتمد هذه الطريقة على مراقبة أداء النظام انطلاقاً من توزيع احتمالي للمصفوفة A ، وتضييق هذا التوزيع تدريجياً للوصول إلى القيمة الأكثر دقة. بعبارة أخرى، تهدف إلى الانتقال من مصفوفة A مجهولة بالكامل إلى مصفوفة A مُحَمَّنة بدقة متزايدة، ومن ثم استخدامها لحساب إشارة التحكم التي تحقق الاستقرار أو تتبع المسار المطلوب [13] تتميز هذه الخوارزمية بكونها آنية (Online)، أي لا تحتاج إلى محاكاة أو حسابات مسبقة خارج الزمن الحقيقي.

آلية العمل

تتعامل هذه الطريقة مع عدم اليقين في المصفوفة A من خلال منظور احتمالي. بدلاً من البحث عن قيمة محددة لـ A ، يتم التعامل مع كل سطر من أسطرها كمتجه عشوائي مستقل يتبع توزيعاً غاوسياً وفق المعادلة (12)

$$A = \begin{bmatrix} r_1^T \\ \vdots \\ r_n^T \end{bmatrix} \quad r_k \sim N(m_0, \Sigma_0) \quad \forall k = 1, \dots, n \quad (12)$$

حيث m_0 هو المتوسط الأولي، و Σ_0 هي مصفوفة التباين الأولية. وبهذا، يتم اختصار مشكلة البحث عن عناصر المصفوفة A كاملة إلى تقدير n متجه، لكل منها توزيع احتمالي يتم تحديثه بشكل مستقل.

في البداية، يتم تقسيم الفترة الزمنية الكاملة $[0, T]$ إلى فترات زمنية متساوية طولها Δt ، وبالتالي نحصل على M خطوة زمنية، نضعها في جولات كل جولة فيها S خطوة زمنية، ويكون لدينا $t_i^j = t_{i-1} + j\Delta t$ ، $j = 0, \dots, S$

تتكرر الخطوات التالية في كل جولة:

- حساب إشارة التحكم: في بداية كل جولة وباعتماد على التوزيع الاحتمالي من الجولة السابقة، توجد إشارة تحكم من خلال حل معادلة ريكتي بالاعتماد على القيمة المتوسطة لهذا التوزيع $\bar{A}_{i-1}$ وفق المعادلة (13)

$$\begin{cases} -\dot{P}(t) = \bar{A}_{i-1}^T P(t) + P(t) \bar{A}_{i-1} - P(t) B R^{-1} B^T P(t) + Q & t \in [t_{i-1}, T] \\ P(T) = Q_f \end{cases} \quad (13)$$

ونكون إشارة التحكم المثلى وفق المعادلة (14)

$$u_i^*(t) = -R^{-1} B^T P_i(t_i^j) x_i^j \quad j = 0, \dots, S-1 \quad (14)$$

حيث $x_i^j = x(t_i^j)$ هي الحالة المراقبة من أداء النظام خلال الجولة

- تطبيق إشارة التحكم ومراقبة الأداء: تُطبّق إشارة التحكم المحسوبة على النظام طوال الجولة (أي لـ S خطوة زمنية)، وتُراقب استجابة النظام ويسجل مسار الحالة.
 - تحديث التوزيع الاحتمالي: في نهاية كل جولة، يتم تحديث التوزيع الاحتمالي الحالي باستخدام صيغ بايز (Bayesian formulas) وهي أداة رياضية لتحديث الاحتمالات، بناءً على المسار المراقب خلال الجولة. وبالتالي نحصل على توزيع احتمالي جديد π_i .
- أي يتم تحديث الاحتمالات حيث العناصر التي تتبأ بمسار قريب مما حدث فعلا يزداد احتمالها. والعناصر التي تتبأ بمسار بعيد عما حدث فعلا يقل احتمالها. تكون خوارزمية العمل:

(1) تقسيم الفترة الزمنية $[0, T]$ الى M فترة زمنية طول كل منها Δt

(2) جمع هذه الفترات ضمن جولات كل جولة تضم S فترة زمنية

(3) اختيار توزيع احتمالي أولي لعناصر المصفوفة A

(4) لكل جولة من 1 إلى عدد الجولات:

- حساب متوسط التوزيع الحالي $\bar{A}_{i-1}$
- إيجاد إشارة التحكم المثلى من خلال حل ريكاتي وفق هذا المتوسط
- تطبيق إشارة التحكم الناتجة على النظام كامل الجولة
- مراقبة أداء النظام وتخزين مسار الحالة
- تحديث التوزيع الاحتمالي π_i وفقا للبيانات الناتجة عن مراقبة الأداء

المزايا والعيوب

استطاعت هذه الخوارزمية التعامل مع النظم الخطية غير المحددة بشكل جزئي بطريقة تكيفية من خلال اعتماد التوزيعات الاحتمالية لتخمين A ، ومراقبة أداء النظام. الامر الذي خفف من عدد مرات تنفيذ معادلة ريكاتي (حيث أصبحت تنفذ مرة واحدة كل جولة بدل من تكرار التنفيذ في كل خطوة زمنية).

لكنه، بالمقابل زاد التعقيد الحسابي بسبب حساب التوزيع الاحتمالي في كل جولة، وتزايد استهلاك الموارد بسبب تخزين أداء النظام ضمن كامل الجولة وتخزين التوزيعات الاحتمالية.

نتائج الدراسة التحليلية

بعد دراسة طريقتي التحكم الأمثل المذكورتين أعلاه في النظم الخطية غير المحددة جزئياً، وبالاستناد إلى مزايا وعيوب كل طريقة، يمكن تلخيصهما ضمن الجدول (1)، حيث n : عدد متغيرات الحالة، N : عدد التكرارات، Q : عدد الجولات،

الجدول (1): المقارنة بين طرق التحكم الأمثل في النظم الخطية غير المحددة جزئياً

الطريقة	آلية التعامل مع عدم اليقين	التعقيد الحسابي	الحاجة إلى الذاكرة واستخدام الموارد
PI	تتخلص من الحاجة إلى المصفوفة A من خلال إدخال قياسات الحالة $x(t)$ و $x(t+T)$ مباشرة في معادلة دالة الإنجاز التكرارية، وتحل هذه المعادلة بطريقة المربعات الصغرى (Least Squares) لإيجاد P	متوسط $O(N.n^6)$ بسبب square المستخدم للحصول على p بالإضافة إلى العمليات التكرارية	منخفضة نسبياً: تحتاج تخزين مصفوفتي P و K فقط، ويتم تحديثهما مع كل تكرار
الطريقة الإحصائية	تفرض توزيعاً احتمالياً أولياً لمصفوف المصفوفة A ، وتحسب إشارة التحكم في كل جولة باستخدام متوسط التوزيع الحالي. في نهاية كل جولة، تُراقب استجابة النظام وتُحدَّث التوزيع الاحتمالي	متوسط إلى مرتفع $O(Q \times (n^3 + S \times n^3 + n \times S^3))$. معادلة ريكاتي والتحديث البايزي ل n سطر	تخزين مسار النظام الكامل (S عينة من الحالة والتحكم) داخل كل جولة، بالإضافة إلى تخزين n توزيع إحصائي (متوسط

ومصفوفة تباير لكل سطر		باستخدام صيغة بايز، مما يضيق نطاق عدم اليقين تدريجياً	
-----------------------	--	---	--

كما هو موضح في الجدول (1)، نلاحظ أن خوارزمية PI الكلاسيكية تقدم نهجاً أكثر بساطة في التعامل مع عدم اليقين، حيث تستغني عن عبء بناء وتحديث النماذج الاحتمالية الذي يميز الطريقة الإحصائية. فرغم أن الطريقة الإحصائية تقلل من عدد مرات حل معادلة ريكاتي (مرة واحدة في بداية كل جولة)، إلا أن عملية التحديث البايزي المرافقة تفرض تعقيداً حسابياً إضافياً كبيراً واستهلاكاً مرتفعاً للذاكرة. لذا تظل خوارزمية PI أكثر فعالية في الحل، لكنها تعاني من مشكلة جوهرية تتمثل في كثرة التكرارات والعبء الحسابي المترتب على ذلك.

امتدادات أخرى لخوارزمية PI

تجدر الإشارة إلى أن خوارزمية PI لم تقتصر فعاليتها على فئة النظم الخطية غير المحددة جزئياً، بل شكلت أساساً متيناً للتعامل مع فئات أوسع من عدم اليقين:

- في النظم الخطية غير المحددة كلياً: حيث تكون كلتا المصفوفتين A و B مجهولتين، تم اعتماد مبدأ PI مع إضافة تعديلات على المعادلات الرياضية [14]، مما أتاح الاستغناء عن المصفوفات غير المعروفة والتعامل مع مصفوفات معلومة، بالاعتماد على قياسات الحالة وإشارة التحكم فقط.
- في أنظمة التتبع الخطية غير المحددة جزئياً: تم توسيع خوارزمية PI لتشمل مسائل التتبع في أفق منتهٍ [11,12] مع إدخال حد إضافي يعوض خطأ التتبع.

نستخلص مما سبق، أن خوارزمية PI أثبتت جدارتها كمنهجية أساسية ومرنة في التعامل مع عدم اليقين بمختلف أشكاله، وهو ما تؤكد الدراسات السابقة التي اعتمدتها باستمرار كنقطة انطلاق لتطوير حلولها. إلا أن التحدي المشترك الذي ظل قائماً في جميع هذه التطبيقات هو العدد الكبير للتكرارات وما يرافقه من زيادة في التعقيد الحسابي وزمن التنفيذ. انطلاقاً من هذه المكانة المتميزة لـ PI، نعتمدها في هذا البحث كأساس لعملنا، ونسعى إلى تطويرها من خلال دمج آلية القدر القائم على الحدث (Event-

(Triggered) بهدف تقليل عدد التكرارات والعبء الحسابي بشكل جوهري، دون المساس ببساطتها أو فعاليتها. ووعليه، فإن أي تحسين يُجرى على خوارزمية PI سيؤثر تلقائياً لأي امتداد مبني عليها. لذلك، ستركز المقارنة في هذا القسم على إثبات تفوق المنهجية المقترحة (ET-PI) على النسخة الكلاسيكية (PI) التي تمثل نقطة الانطلاق والأساس الذي بُنيت عليه التحسينات.

2. القدح القائم على الحدث (Event-Triggered)

كان تقليل التعقيد الحسابي واستهلاك الموارد عند تصميم المتحكمات نقطة اهتمام وبحث في العديد من الأدبيات السابقة، فتم اعتماد القدح القائم على الحدث كونه يؤمن فعالية حسابية كبيرة، حيث توجهت بعض الدراسات للتعامل مع الأنظمة الشبكية، وتقليل استهلاك الموارد بين الحساسات والمتحكم والمشغلات، من خلال دمج هذا النهج ضمن آلية العمل، الأمر الذي يجعل عملية نقل البيانات لا تتم بشكل دوري وإنما عند الحاجة فقط [17]. بينما في أنظمة التحكم التقليدية، تم دمج القدح القائم على الحدث بحيث لا يتم إرسال إشارة التحكم إلى النظام إلا عندما يكون هناك حاجة لذلك [18-19].

2.1. آلية عمل القدح القائم على الحدث Event-Triggered

يعتمد القدح القائم على الحدث في آلية عمله على مراقبة الاختلاف بين شعاع الحالة الحالي $x(t)$ المقاس بشكل مستمر وشعاع الحالة عند آخر لحظة قدح $x(t_k)$ ، وفق المعادلة (15)

$$e_j(t) = x(t) - x(t_k) \quad \forall t \in [t_k, t_{k+1}] \quad (15)$$

حيث $k=1,2,3,\dots$ يشير إلى عدد لحظات القدح، و t_k آخر لحظة قدح و t_{k+1} لحظة القدح التالية

ومقارنة هذا الاختلاف مع عتبة معينة $\delta_{trigger}$ ، ليحدد متى يتم تحديث إشارة التحكم، فإذا كان $e_j(t) > \delta_{trigger}$ عندها يحدث القدح، ويتم حساب إشارة تحكم جديدة، ويستمر تكرار هذه العملية طالما هناك تغير في الحالة [17]. أي تكون إشارة التحكم بين فترتي قدح ثابتة ومساوية لإشارة التحكم عند آخر لحظة قدح، وعندما يتحقق شرط القدح يتم تحديثها كما موضح بالمعادلة (16)

$$u(t) = \begin{cases} u_{constant} = u(t_k), & t \in \{t_k, t_{k+1}\} \\ u_{new} = u(t_{k+1}), & t = t_{k+1} \end{cases} \quad (16)$$

وتكون لحظة القدح التالية هي أصغر لحظة زمنية تحقق شرط القدح مجددا وفق المعادلة (17) [19].

$$t_{k+1} = \min\{t > t_k : ||x(t_k) - x(t)|| = \sigma ||x(t)||\} \quad (17)$$

أي آلية القدح تعتمد على وجود عتبة القدح التي تكون: إما قيمة ثابتة تحدد من قبل المصمم [18,20] ، أو تابع مرتبط بشعاع الحالة [17,19,21]، وتكون هذه العتبة هي أعلى اختلاف يتقبله النظام دون تحديث إشارة التحكم، بما لا يؤثر على استقراره.

توجهت بعض الدراسات لضبط هذه العتبة من خلال إضافة الخطأ ضمن دالة الإنجاز ، أي العمل على أكبر خطأ ممكن تحمله من قبل النظام، وليس فقط أصغر إشارة تحكم [17,21] ، بينما تناولت دراسات أخرى تحليل استقرار ليايونوف للنظام في الحلقة المغلقة ليتم تحديد عتبة القدح [18-19].

2.2. حساب عتبة القدح وفق تحليل استقرار ليايونوف

يتم حساب عتبة القدح وفق تحليل استقرار ليايونوف وفق التالي:

ليكن النظام الخطي المستمر وفق (1)، ويكون الاختلاف في شعاع الحالة ممثل بالمعادلة (15)، يتم تمثيل إشارة التحكم المطبقة بين فترتي قدح والمرتبطة بشعاع الحالة عند آخر لحظة قدح وفق (18)

$$u(t) = -K x(t_k) = -K[x(t) + e(t)] \quad (18)$$

وبالتالي تصبح معادلة النظام في الحلقة المغلقة بعد تعويض (18) فيها ممثلة بالمعادلة (19)

$$\dot{x} = (A - BK)x(t) + BKe(t) \quad (19)$$

وبما أن دالة ليايونوف $V(x) = x^T P x$ تحقق الفرضيتين التاليتين [18]

$$\underline{\alpha}|x|^2 \leq V(x) \leq \bar{\alpha}|x|^2$$

$$\frac{\partial V}{\partial x}(Ax + BKx + BKe) \leq -\alpha|x|^2 + b|e||x|$$

حيث $\alpha, \bar{\alpha}, \alpha, b \in R^+$ ، ووفق تحليل استقرار ليايونيوف، يجب المحافظة على تابع ليايونيوف متناقص أي

$$\alpha|x|^2 > b|e||x| \Rightarrow b|e| < \alpha|x|$$

$$|e| < \sigma|x| ; \sigma > 0$$

إذا لضمان تناقص تابع ليايونيوف، يجب تحقيق $|e(t)| < \sigma|x(t)|$ وإلا يحدث القدر.

اكتفت بعض الدراسات بهذا التحليل، وحددت شرط أن $\sigma < 1$ ، وتم اختيار قيم عشوائية ضمن هذا المجال [20]، بينما سيتم متابعة تحليل ليايونيوف في هذه الورقة للوصول لقيمة ملائمة لنظام خطي، محددة بناء على بارامترات.

يكون مشتق تابع ليايونيوف بالاعتماد على معادلة النظام في الحلقة المغلقة وفق المعادلة (20)

$$\dot{V}(x) = 2x^T P \dot{x} = 2x^T P[(A - BK)x(t) + BKe] \quad (20)$$

وتكون معادلة ريكاتي المولدة من مشتق ليايونيوف بالحالة الطبيعية (دون الخطأ والقدر) وفق (21):

$$(A - BK)^T P + P(A - BK) = -(Q + K^T R K) \quad (21)$$

إذا

$$2x^T P(A - BK)x = -x^T(Q + K^T R K)x \quad (22)$$

بتعويضها في المعادلة (20)، يصبح مشتق ليايونيوف (23)

$$\begin{aligned} \dot{V}(x) &= 2x^T P \dot{x} = 2x^T P[(A - BK)x(t) + BKe] \\ &= -x^T(Q + K^T R K)x + 2x^T P B K e \end{aligned} \quad (23)$$

ولضمان الاستقرار، يجب أن يبقى مشتق ليايونيوف أصغر من الصفر وفق (24)

$$-x^T(Q + K^T RK)x + 2x^T PBKe < 0$$

$$2x^T PBKe < x^T(Q + K^T RK)x \quad (24)$$

مع استخدام خاصية norm والتي تساعد في تقدير الحد الأقصى للخطأ، يكون

$$||e|| < \frac{\lambda_{\min}(Q + K^T RK)}{2||PBK||} ||x|| \quad (25)$$

حيث $\lambda_{\min}$ هو أصغر قيمة ذاتية لمصفوفة $(Q + K^T RK)$

تم اعتماد هذا الشرط في [19]، لكن مع إضافة عامل أمان له 0.99، لذا تم وضع $\rho \in (0, 1)$ فيصبح شرط القدح

$$||e|| < \rho \frac{\lambda_{\min}(Q + K^T RK)}{2||PBK||} ||x|| \quad (26)$$

ولكن في هذا البحث يتم التعامل مع نظام غير محدد جزئياً، ويحتاج لتطبيق PI للوصول للحل الأمثل، وبناء على بنية هذه الخوارزمية التكرارية وتغير قيم كل من K_i, P_i مع كل تكرار، عندها تصبح عتبة القدح الموافقة متغيرة مع كل تكرار، وممثلة بالمعادلة (27)

$$\delta_i = \rho \frac{\lambda_{\min}(Q + K_i^T RK_i)}{2||P_i BK_i||} ||x|| \quad (27)$$

ويحدث القدح عندها $e > \delta_i$

3. الخوارزمية المقترحة (ET Policy Iterative)

انطلاقاً من مزايا القدح القائم على الحدث ودوره الفعال في تقليل العمليات التكرارية والعبء الحسابي، تم دمجه مع PI، فكان الهدف لا يتمثل في تحديد أوقات إرسال إشارة التحكم إلى النظام، وإنما تحديد متى يجب تنفيذ خوارزمية PI بشكل كامل.

ومن هنا تتجلى أهمية هذا الدمج، إذ يسهم في تقليل عدد مرات تنفيذ خوارزمية الـ PI اللازمة للوصول إلى الحل الأمثل، مما يؤدي مباشرةً إلى تقليل عدد الحسابات المصفوفية المكلفة، وبالتالي خفض التعقيد الحسابي الكلي، مع الحفاظ على استقرار النظام وأدائه الأمثل. بمعنى آخر، يتحكم القدح بعدد PI، ويصبح عدد مرات تنفيذ الخوارزمية مساوٍ لعدد مرات القدح المطلوبة.

خوارزمية العمل

(1) تهيئة النظام

- نفرض إشارة تحكم ابتدائية u_0 ، وبالتالي نحصل على المصفوفة K_0 والمصفوفة P_0 .

(2) مراقبة شرط القدح

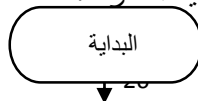
- يتم حساب عتبة القدح وفق (27)، وخطأ الحالة وفق (15)، ومقارنة هذا الخطأ مع عتبة القدح الحالية δ_i
- إذا لم يتحقق شرط القدح، أي $e_i(t) < \delta_i$ ، يتم المحافظة على إشارة التحكم المطبقة على النظام $u(t) = kx(t_k)$
- وفي حال تحقق الشرط، أي $e_i(t) \geq \delta_i$ ، يتم تنفيذ دورة واحدة من خوارزمية PI كما يلي:
تقييم السياسة Policy Evolution: حساب المصفوفة p_i م وفق المعادلة (10).

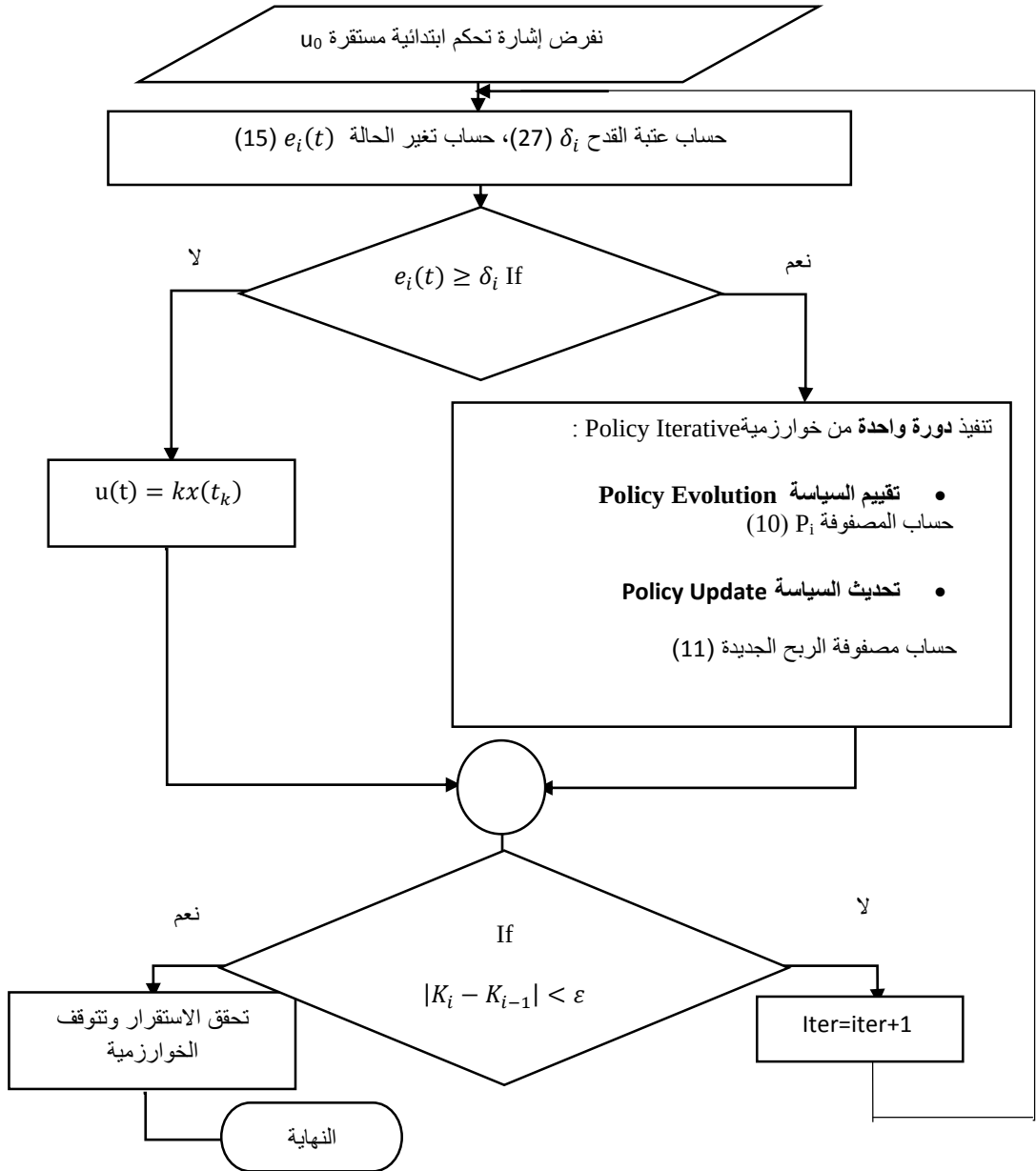
تحديث السياسة Policy Update: حساب مصفوفة الريح الجديدة وفق (11).

(3) شرط التوقف

يستمر تكرار العملية حتى الوصول إلى شرط التقارب $|K_i - K_{i-1}| < \varepsilon$ وتحقيق استقرار النظام.

يوضح الشكل (1) المخطط التدفقي للخوارزمية المقترحة.

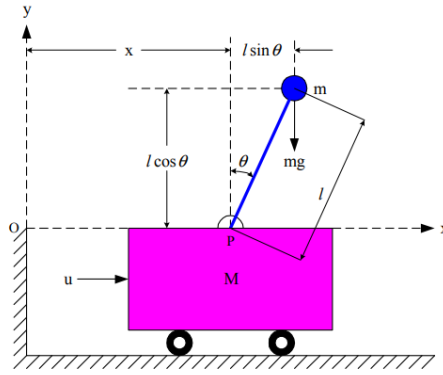




الشكل (1): بنية الخوارزمية المقترحة (ET-Policy Iterative)

VI. التطبيق والمحاكاة:

يعتبر نظام النواس المقلوب من النظم الأكثر اعتماداً كنظام فحص لنظريات التحكم، لبساطته وسهولة تطبيقه وفهمه [22]. لذا تم اعتماده في هذه الورقة لمقارنة أداء الخوارزمية المقترحة مع الخوارزمية الكلاسيكية. يتكون من نواس معلق بشكل مقلوب كتلته للأعلى على عربة قابلة للحركة أفقياً، كما موضح بالشكل (2). هذا النظام بطبعه غير مستقر، أي النواس سيقع بالحالة الطبيعية، لذا يتم تطبيق قوة خارجية على العربة لتسمح بتحريكها أفقياً، لضمان ثبات النواس بشكل عامودي [22]، يكون دخل النظام هو القوة المطبقة على العربة u ، وخرجه هو زاوية ميلان النواس عن الشاقول θ ، وتكون المعادلات التفاضلية للنظام [22]:



الشكل (2): نظام النواس المقلوب [23]

$$\ddot{x} = \frac{u + ml \sin \theta \dot{\theta}^2 - mg \cos \theta \sin \theta}{M + m - m \cos^2 \theta} \quad (28)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{u \cos \theta + (M + m)g \sin \theta - ml \cos \theta \sin \theta \dot{\theta}^2}{ml \cos^2 \theta - (M + m)l} \quad (29)$$

يتم بتحويل النظام إلى صيغته الخطية حول نقطة توازنه أي $\theta \approx 0, \cos \theta = 1, \sin \theta = \theta$ وتمثيله وفق (1) باعتبار متغيرات الحالة $[x, \dot{x}, \theta, \dot{\theta}]$ والمصفوفات A, B كالتالي:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{mg}{M} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{g(M+m)}{M} & 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{M} \\ 0 \\ -\frac{1}{lM} \end{bmatrix}$$

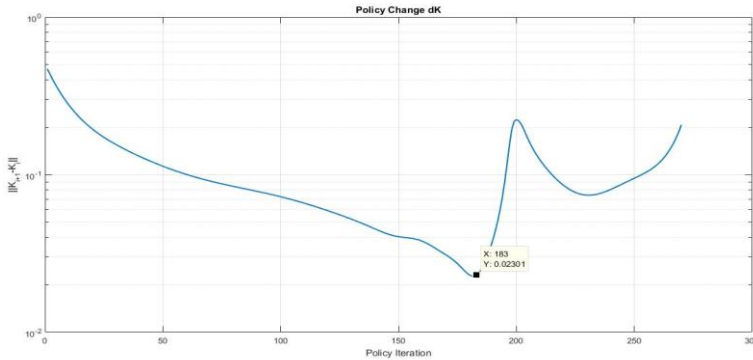
حيث بارامترات النواس المقلوب مبينة بالجدول (2)

الجدول (2): بارامترات النواس المقلوب

كتلة العربة M	كتلة النواس m	تسارع الجاذبية الأرضية g	طول النواس L
0.455 kg	0.21 kg	9.81 m/s ²	0.3 m

تم اعتماد النواس المقلوب كنظام غير محدد جزئياً انسجماً مع العديد من الدراسات السابقة [19,23] التي تناولت هذا النظام بافتراض وجود عدم يقين في بعض بارامترات النموذج أو في عناصر المصفوفة A.

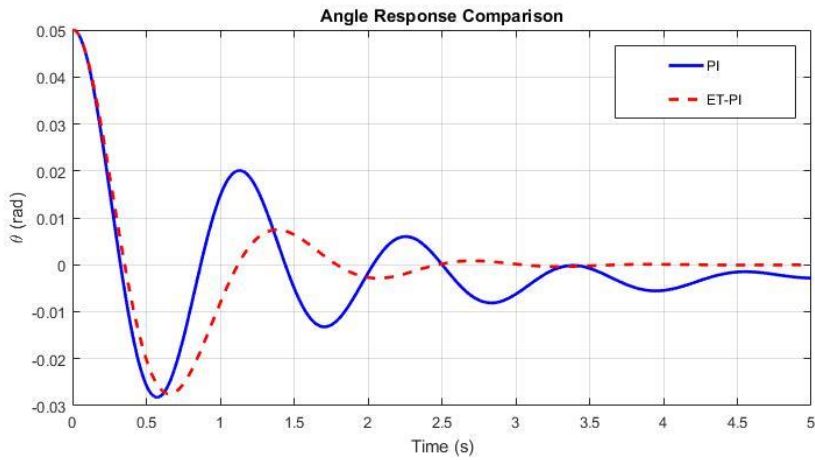
لتطبيق الخوارزمية، يتم إيجاد إشارة التحكم الأولية من خلال تطبيق LQR، وتوليد أول قيمة لعتبة القدرح الممثلة (27)، ويتم ضبط المصفوفات $Q = \text{diag}([10 \ 1 \ 500 \ 1])$ بهدف التركيز على زاوية النواس، و $R=0.2$ وتطبيق خوارزمية PI الكلاسيكية وخوارزمية ET-PI المقترحة، حيث تتوقف الخوارزمية تبعاً لشروط التقارب، وتم تحديد ε بعد مراقبة أداء النظام لفترة طويلة ولمرات عديدة، فتبين أن $\varepsilon \in \{0.02 - 0.05\}$ وهي القيم الصغرى للفرق بين $K_i - K_{(i-1)}$ والتي بعدها يصبح أي تغير في K يسبب انهيار لاستقرار كما موضح بالشكل (3)



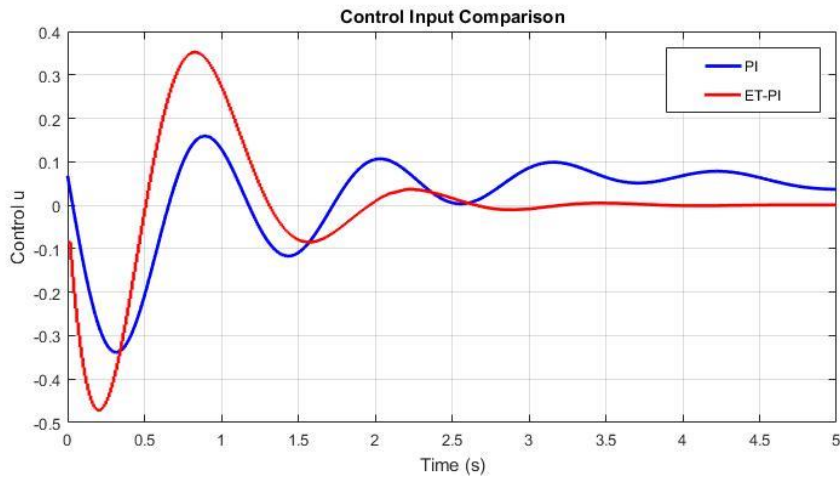
الشكل (3): تغيرات $|K_i - K_{(i-1)}|$

وكانت نتائج التنفيذ موضحة بالأشكال: الشكل (4) يمثل استجابة زاوية النواس عند تطبيق كلا الخوارزميتين، كما هو واضح من الشكل، أن الخوارزمية الكلاسيكية PI تعاني من اهتزازات بالإشارة، وهذا أمر متوقع كون تحديث إشارة التحكم يتم بشكل تكراري حتى وإن كان الاختلاف صغير جداً،

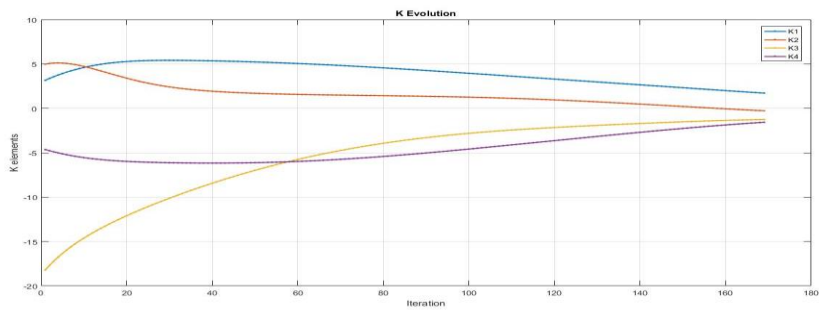
الأمر الذي يؤدي بدوره إلى التأخير في الوصول إلى الاستقرار. بينما حققت الخوارزمية المقترحة-ET-PI استقرار أسرع باهتزازات أقل، وذلك يعود إلى آلية القدح التي منعت تحديث إشارة التحكم إلا عند الضرورة. ويوضح الشكل (5) إشارة التحكم الناتجة من الخوارزميتين، ويلاحظ أن الإشارة الناتجة عن الخوارزمية المقترحة تكون ثابتة وتتغير عند القدح فقط، لكن مع مطال أكبر، وهذا أمر طبيعي ومتوقع كون إشارة التحكم لا تحدث سوى عند القدح، أي عندما يكون النظام على حافة انهيار الاستقرار. الأمر الذي يتطلب مطال أكبر لإعادة النظام إلى حالة مستقرة، ويوضح الشكل (6) والشكل (7) تغير عناصر المصفوفة k في كلا الخوارزميتين، ويلاحظ أن تغيير المصفوفة k عند تطبيق الخوارزمية PI استمر حتى التكرار 168، بينما عند تطبيق الخوارزمية ET-PI توقف التغير عند التكرار 89، وبالتالي تم تحقيق شرط التقارب بعدد تكرارات أقل. وللتأكيد على أن الخوارزمية المقترحة مازالت ضمن عمل الخوارزمية الكلاسيكية في تحقيق التحكم الأمثل، تم عرض تغير دالة الإنجاز وفق الشكل (8)، الذي يوضح أنها مازالت تسعى إلى القيمة الصغرى لها.



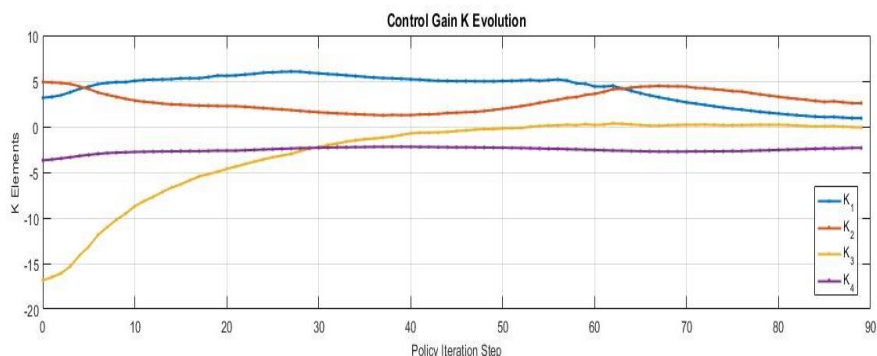
الشكل (4): استجابة زاوية النواس عند تطبيق الخوارزمية PI والخوارزمية ET-PI



الشكل (5): إشارة التحكم الناتجة عند تطبيق الخوارزمية PI والخوارزمية ET-PI

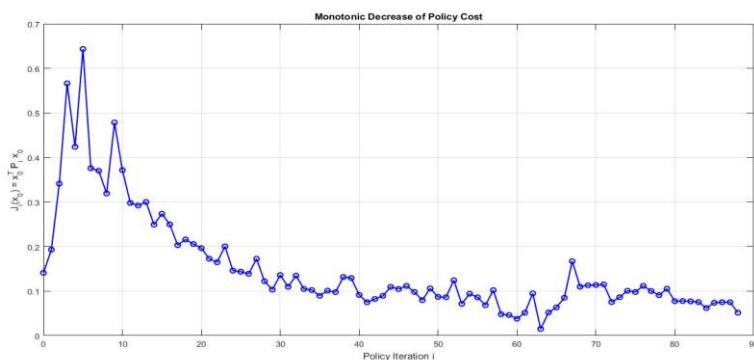


الشكل (6): تطور عناصر مصفوفة الربح الخلفي K عند تطبيق الخوارزمية الكلاسيكية PI



الشكل (7): تطور عناصر مصفوفة الربح الخلفي K عند تطبيق الخوارزمية المقترحة ET- PI

ET PI	PI	
0.1543 s	0.2117 s	زمن الارتفاع
2.2498 s	4.59372 s	زمن الاستقرار
89	168	عدد التكرارات
5.248266 s	14.224744 s	متوسط زمن التنفيذ



الشكل (8): تغير دالة الإنجاز عند تطبيق الخوارزمية المقترحة ET-PI

تم مقارنة الخوارزمية المقترحة بالخوارزمية الكلاسيكية وفق خصائص زمن الاستقرار وزمن الارتفاع وعدد التكرارات ومتوسط زمن التنفيذ وفق الجدول (3)

الجدول(3) : مقارنة بين الخوارزمية الكلاسيكية PI والخوارزمية المقترحة ET-PI

بمقارنة النتائج التي تم التوصل إليها، يمكننا ملاحظة أن الخوارزمية المقترحة ET-PI حققت الاستقرار بشكل أسرع، وهذا متوقع لأنها تجنبت تحديث إشارة التحكم بشكل مستمر، وإنما في حال الحاجة لها فقط، مع تأمين عدد تكرارات أقل والذي رافقه زمن تنفيذ أصغر وعبء حسابي أقل، كون عدد العمليات الحسابية بات أقل، الأمر الذي أدى بدوره إلى استهلاك أقل للموارد.

VII. الخلاصة والآفاق المستقبلية

تم في هذه الورقة عرض طرق التحكم الأمثل الأبرز في النظم الخطية غير المحددة جزئياً، وإيضاح آلية عملها ومزايا وعيوب كل طريقة، ليتم التوصل إلى أن خوارزمية PI توفر بنية أكثر بساطة وأقل تعقيد حسابي من الطرق الأخرى المدروسة، ولكنها تعاني من تحديات تتمثل بعدد التكرارات الكبير والاستهلاك المتزايد للموارد. وللتغلب على هذه المشاكل، تم دمجها مع Event-Triggered، مما أدى إلى تحقيق استقرار أسرع مع زمن تنفيذ أصغر وعدد تكرارات أقل، ولكن مازال هناك مجالات واسعة للعمل عليها في المستقبل، حيث يمكن التوجه إلى تطوير الخوارزمية المقترحة بما يجعل من الممكن تطبيقها على النظم الخطية غير المحددة بشكل كامل أيضاً، وإمكانية إضافة آلية تعلم تجعل عدد مرات تنفيذ الخوارزمية يصبح أقل من عدد مرات القدر المطلوبة.

VIII. المراجع

1. Xiang, Z., & Wei, W. (2021, June). Design of DC motor position tracking system based on LQR. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1887, No. 1, p. 012052). IOP Publishing.
2. Feng, X., Liu, S., Yuan, Q., Xiao, J., & Zhao, D. (2023). Research on wheel-legged robot based on LQR and ADRC. Scientific reports, 13(1), 15122.

3. Wen Sun, (2021) ,Note on Iterative Linear Quadratic Regulator
4. Rani, M., & Kamlu, S. S. (2025). Optimal LQG controller design for inverted pendulum systems using a comprehensive approach. *Scientific Reports*, 15(1), 4692
5. Ingabire, A., & Sklyarov, A. A. (2019). Control of longitudinal flight dynamics of a fixedwing UAV using LQR, LQG and nonlinear control. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 104, p. 02001).
6. Fink, M. (2021). Implementation of Linear Model Predictive Control–Tutorial. *arXiv preprint arXiv:2109.11986* .
7. Berberich, J., Köhler, J., Müller, M. A., & Allgöwer, F. (2022). Linear tracking MPC for nonlinear systems—Part I: The model-based case. *IEEE transactions on automatic control*, 67(9), 4390–4405.
8. Li, W., Zhang, X., Wang, Y., & Xie, S. (2024). Comparison of Linear and Nonlinear Model Predictive Control in Path Following of Underactuated Unmanned Surface Vehicles. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(4), 575
9. Vrabie, D., Pastravanu, O., Abu-Khalaf, M., & Lewis, F. L. (2009). Adaptive optimal control for continuous-time linear systems based on policy iteration. *Automatica*, 45(2), 477–484.
10. Ma, Y., Xu, D., Huang, J., & Li, Y. (2023). Robust Control of An Inverted Pendulum System Based on Policy Iteration in Reinforcement Learning. *Applied Sciences*, 13(24), 13181.
11. Li, C., Liu, D., & Li, H. (2015). Finite horizon optimal tracking control of partially unknown linear continuous-time systems using policy iteration. *IET Control Theory & Applications*, 9(12), 1791–1801.
12. Modares, H., & Lewis, F. L. (2014). Linear quadratic tracking control of partially-unknown continuous-time systems using reinforcement

- learning. *IEEE Transactions on Automatic control*, 59(11), 3051–3056.
13. Pacifico, A., Pesare, A., & Falcone, M. (2021, June). A new algorithm for the LQR problem with partially unknown dynamics. In *International Conference on Large-Scale Scientific Computing* (pp. 322–330). Cham: Springer International Publishing.
14. Jiang, Y., & Jiang, Z. P. (2012). Computational adaptive optimal control for continuous-time linear systems with completely unknown dynamics. *Automatica*, 48(10), 2699–2704.
15. Kiumarsi, B., & Başar, T. (2019, December). Secure Linear Quadratic Regulator Using Sparse Model-Free Reinforcement Learning. In *2019 IEEE 58th Conference on Decision and Control (CDC)* (pp. 3641–3647). IEEE.
16. Jha, S. K., Roy, S. B., & Bhasin, S. (2017). Data-driven adaptive LQR for completely unknown LTI systems. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 4156–4161.
17. Sahoo, A., Narayanan, V., & Jagannathan, S. (2018). A min-max approach to event-and self-triggered sampling and regulation of linear systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(7), 5433–5440.
18. Tabuada, P. (2007). ETreal-time scheduling of stabilizing control tasks. *IEEE Transactions on Automatic control*, 52(9), 1680–1685.
19. Rajan, A., & Tallapragada, P. (2022). Analysis of Inter-Event Times in Linear Systems under ETor Self-Triggered Control. *arXiv preprint arXiv:2201.02090*.

20. Etienne, L., Di Gennaro, S., & Barbot, J. P. (2015, July). Event triggered observer-based control for linear systems with time varying uncertainties. In *2015 American Control Conference (ACC)* (pp. 1531–1536). IEEE
21. Moghadam, R., Narayanan, V., & Jagannathan, S. (2022). ETOptimal adaptive control of partially unknown linear continuous-time systems with state delay. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 53(6), 3324–3337.
22. Varghese, E. S., Vincent, A. K., & Bagyaveereswaran, V. (2017, November). Optimal control of inverted pendulum system using PID controller, LQR and MPC. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 263, No. 5, p. 052007). IOP Publishing.
23. Prasad, L. B., Tyagi, B., & Gupta, H. O. (2014). Optimal control of nonlinear inverted pendulum system using PID controller and LQR: performance analysis without and with disturbance input. *International Journal of Automation and Computing*, 11(6), 661–670.
24. Jiang, Y., Wang, Y., Bortoff, S. A., & Jiang, Z. P. (2016). An iterative approach to the optimal co-design of linear control systems. *International Journal of Control*, 89(4), 680–690

إدارة الثقة في شبكات المركبات باستخدام سلاسل الكتل المستضافة في

السحابة: دراسة أثر الذاكرة المؤقتة في المركبات

د. علي الحاتم*

الملخص

تلعب VANET دوراً مهماً في دعم نظم النقل الذكي وتعزيز السلامة المرورية من خلال التطبيقات التي تعتمد على تبادل الرسائل بين المركبات والبنية التحتية. نحتاج إلى آليات موثوقة لإدارة الثقة في شبكات VANET للتحقق من المركبات وكشف السلوك الخبيث كونها تؤثر على كل من سلامة المركبات واتخاذ القرار بشكل يهدد حياة مستخدمي مركبات VANET. نقدم من خلال هذا البحث إطاراً متكاملاً لإدارة الثقة في شبكات VANET المعتمدة على سلاسل الكتل السحابية بحيث يتم مراقبة سلوك المركبات وتجميع الأدلة من خلال وحدات (RSUs) Road Side Units، في حين تستخدم سلسلة الكتل لتخزين الأدلة وقرارات الثقة. من خلال هذا الإطار يتم الفصل بين التحقق من الهوية والذي يتم من خلال سلطة الشهادات (CA) Certificate Authority، وبين إدارة الثقة والتي تتم من خلال سلسلة الكتل، وتُمثل حالة المركبة بإحدى الحالات التالية: موثوقة أو مشبوهة أو خبيثة. أظهرت نتائج التقييم تحسن نسبة التسليم (PDR) packet delivery ratio في سيناريو السرعات المتغيرة بينما أثرت على قرار الثقة، كما بينت النتائج أن وجود الذاكرة المؤقتة يسمح بالتوسع في الشبكة ويقلل الاعتماد على وحدات RSU والسحابة، لكنها لا تحسن معدل المنع الفعلي في بيئات متغيرة السرعة وذات كثافة مرورية عالية الأمر الذي يتطلب سياسات متقدمة في تحديث حالات الثقة المخزنة في ذاكرة V2V. الكلمات المفتاحية: شبكات VANET، إدارة الثقة، سلاسل الكتل، الذاكرة المؤقتة V2V.

* عضو هيئة تدريسية في جامعة حمص-كلية الهندسة المعلوماتية - قسم هندسة الشبكات والنظم الحاسوبية

Trust Management in VANETs Using Cloud-Hosted Blockchain: A Study of Cache Impact in Vehicles

Dr. Ali Alhatem*

Abstract

VANETs play an important role in supporting intelligent transportation systems and enhancing traffic safety through applications that rely on message exchange between vehicles and infrastructure. We need reliable mechanisms for trust management in VANETs to verify vehicles and detect malicious behaviour, as it affects both vehicle safety and decision making in a way that threatens the live of VANET vehicle users. In this research we present an integrated framework for trust management in VANETs based on cloud blockchains, where vehicle behaviour is monitored and evidence is collected by Roadside Units (RSUs), while the blockchain is used to store evidence and trust decisions. Through this framework, identity verification which is performed through the Certificate Authority (CA) is separated from trust management, which is performed through blockchain, and which represents the vehicle state as trusted, suspicious, or malicious.

The results showed an improvement in the packet delivery ratio (PDR) in the variable-speed scenario, while it affected the trust decision. The results also showed that the presence of the cache allows scalability in the network and reduces dependence on RSUs and the cloud, but it doesn't improve the

effective prevention rate in variable-speed environments with high traffic density, which requires advanced policies for updating trust states stored in the V2V cache.

Keywords: VANETs, Trust Management, Blockchains, V2V cache.

* Lecturer – Homs University– IT Faculty– Department Of Computer Networks & Systems Engineering

مشكلة البحث:

تتسم VANETs بأنها ذات طبيعة ديناميكية وتتضمن تبادل رسائل حساسة تتعلق بالسلامة المرورية واتخاذ القرار، الأمر الذي يتطلب تجنب السلوك الخبيث للمركبات. تجدر الإشارة إلى عدم كفاية هوية المركبة لضمان الموثوقية فمن الممكن أن يكون للمركبة شهادة صحيحة ولكن ترسل بيانات مزيفة أو تعيد إرسال رسائل قديمة.

تعتمد الكثير من حلول إدارة الثقة في VANETs على التحقق من الهوية أو الخلط بين إلغاء الهوية وإلغاء الثقة أو تتطلب الرجوع إلى جهة مركزية الأمر الذي يزيد من التأخير. توفر سلاسل الكتل سجلاً لا يمكن التلاعب فيه ولكنه في نفس الوقت يضيف عبئاً إضافياً إذا تم الرجوع إليه في كل مرة لمعرفة حالة الثقة. أضف إلى ذلك تؤثر ديناميكية VANETs من جهة حركة المركبات على نسبة تسليم الرزم واستقرار قرارات الثقة.

أهداف وأهمية البحث:

نهدف من خلال هذا البحث إلى كشف السوك الخبيث للمركبات في VANETs بطريقة مستقلة عن هوية المركبة، كما نهدف إلى تقليل الاعتماد على RSUs والسحابة باستخدام آلية تخزين مؤقتة V2V. تكمن أهمية البحث في إيجاد إطار متكامل لإدارة الثقة في VANETs قادر على الفصل بين هوية المركبة وتقييم الثقة بناءً على الأدلة التي يتم تجميعها من قبل RSUs وتخزينها في سلسلة كتل مركزية (في السحابة). كما تمكن أهمية البحث في دراسة نماذج الحركة المتنوعة بوجود الذاكرة المؤقتة وبدون وجودها بما يبرز محاسن ومساوئ تحقيق الذاكرة المؤقتة V2V في الإطار المقترح.

أدوات البحث:

تم اختبار البنية المقترحة من خلال تحقيق شبكة VANET باستخدام محاكي SUMO من أجل كثافات متنوعة من العقد (20,40,60,80,100) بحيث تعكس عدد مركبات قليل ومتوسط وكبير. تم تحقيق طبقات البنية عبر برنامج بايثون يعمل على محاكاة سلسلة الكتل في السحابة ومنح الشهادات الرقمية من قبل CA وتحقيق أربع أنواع من الهجمات.

مقدمة:

تلعب شبكات المركبات VANETs دوراً مهماً في أنظمة النقل الذكية حيث تتيح تبادل الرسائل بين مختلف مكونات هذه الشبكات وأبرزها V2V و Vehicle 2 Infrastructure (V2I) حيث تتيح هذه الوسائل تحقيق العديد من التطبيقات مثل تجنب الازدحام و التحذير من الحوادث و توجيه المركبات والاتصال بالانترنت. نظراً لحساسية بعض التطبيقات التي تدعمها VANETs فإن أي تأخير في

الرسائل أو الرسائل المزيفة أو التلاعب بالهوية أو إعادة استخدام رسائل سابقة قد يؤدي إلى كوارث تؤثر على سلامة مستخدمي هذه المركبات.

تعمل آليات المصادقة على جانب مهم من أمن VANETS من خلال التحقق من هوية المركبات باستخدام الشهادات الممنوحة من قبل CA ولكنها لا تكفي لوحدها بسبب إمكانية أن تقوم مركبة ذات هوية صحيحة بسلوك خبيث كأن ترسل معلومات غير صحيحة مثل الموقع أو السرعة أو تتلاعب بالمعلومات لذلك تتجه الأبحاث نحو دراسة إدارة الثقة بوصفها مكملة لآلية المصادقة ودعم أمان VANETS. تشير العديد من الدراسات إلى أن إدارة الثقة أصبحت جزءاً أساسياً في التصدي للهجمات حيث أن الحلول الحديثة تدمج الثقة و سلاسل الكتل والذكاء الصناعي والخصوصية والتوسع [1].

تتنوع استراتيجيات حساب الثقة والتي يمكن أن تتم باستخدام النماذج الإحصائية [2] أو نظرية الألعاب أو بالاعتماد على الذكاء الصناعي بهدف تقييم موثوقية المركبة أو الرسائل بناءً على السلوك أو التاريخ أو الأدلة المتاحة [7]. قمنا في بحثنا بحساب الثقة بدل الاعتماد على الهوية فقط من خلال تجميع الأدلة بهدف اتخاذ القرار بعد نافذة معينة يتم من خلالها تراكم الأدلة مما يجعل القرار المتخذ أكثر حذراً وتكيفاً.

تتوفر عدة حلول تتناول موضوع التوسع في بيئات تعتمد على سلاسل الكتل تشمل تجزئة سلاسل الكتل وسلاسل الكتل الجانبية وتقنيات الإجماع المحسنة وتخفيض تكلفة الوصول إلى سلسلة الكتل [1][5]. إن عملية الرجوع المستمر إلى سلسلة الكتل أو إدارة السلسلة من قبل RSUs قد يؤدي إلى تأخير وحمل مرتفع [5][6]. من خلال بحثنا حافظنا على مكان سلسلة الكتل وهي السحابة، وتم استخدام آليات لتقليل الرجوع المستمر إلى السحابة وتشمل Trust Token و BloomFilter و RSU Cache و V2V Cache.

هناك توجهات حديثة للتكامل مع VANETS وتشمل الحوسبة الطرفية والتوأمة الرقمية والتعلم الاتحادي بهدف تقليل العبء وتحسين زمن الاستجابة ودعم التنبؤ تحسين القدرة على التكيف [1]. بشكل مشابه

تقريباً للحوسبة الطرفية قمنا باستخدام RSU كمراقب ومجمع للأدلة [6] واستخدمنا السحابة في تخزين الأدلة وقرارات الثقة.

أكدت الدراسات على أن أنظمة الثقة في VANETs يجب أن تكون آمنة مع المحافظة على الخصوصية بسبب إمكانية اكتشاف كل من هوية المركبة وموقعها واتجاهها [1][8]. قمنا في البحث بتحقيق هذه الاعتبارات الأمنية من خلال تخزين الأدلة وقرارات الثقة في سلسلة الكتل لمنع التلاعب بها، كما تم الفصل بين التحقق من الهوية بجعل CA مسؤولاً عنها وإدارة الثقة في طبقة أخرى.

الدراسة المرجعية:

تعتبر إدارة الثقة في VANETs و Internet of Vehicles (IOVs) من المواضيع الرئيسية لحماية المركبات وضمان موثوقيتها وتبادل الرسائل بشكل آمن. لا تكفي طرق المصادقة التقليدية في اكتشاف سلوك المركبات كون المركبة التي تمتلك هوية صحيحة قد يكون لها سلوك مضلل. أظهرت الدراسات المرجعية أن تقنيات إدارة الثقة في VANETs تعمل على تقييم موثوقية المركبات والرسائل اعتماداً على السلوك وسمعة المركبة والأدلة المجمعة من قبل المركبات أو وحدات RSUs مع إبراز التحديات مثل السرعات العالية وتغيير الطوبولوجيا وقابلية التوسع [1] [2]، حيث تؤكد هذه الدراسات على الحاجة إلى آليات لإدارة الثقة بشكل يمكن معه التعامل مع الرسائل المزيفة والمركبات الخبيثة دون الاعتماد على هوية المركبة فقط.

اتجهت العديد من الأبحاث إلى الاعتماد على سلاسل الكتل في إدارة الثقة بسبب قدرتها على مقاومة التلاعب بالبيانات وإمكانية التتبع وتوفير سجل مشترك من قرارات الثقة. تتركز الأعمال البحثية حول أربعة محاور وهي: طرق حساب الثقة والتكامل مع تقنيات الاتصال الحديثة 5G/6G وقابلية التوسع وآليات الإجماع بالإضافة إلى آليات تتعلق بالأمان والخصوصية [1].

ركزت العديد من الأعمال على بناء آلية للثقة قائمة على سلاسل الكتل لتقييم كل من المركبات والرسائل، حيث اقترح الباحثون في [2] نموذجاً للإدارة الثقة في VANET بالاعتماد على تحليل السلوك وسلسلة الكتل وذلك باستخدام نموذج ماركوف المخفي الذي يعمل على تقييم الثقة ومن ثم حفظ معلومات الثقة في سلسلة الكتل لمنع التعديل. أظهر البحث أهمية الفصل بين هوية المركبة من جهة وسلوكها من جهة أخرى وهنا تم التركيز على حساب الثقة دون التطرق لتأثير التخزين المؤقت في المركبات على كل من قابلية التوسع وتقليل العبء على سلسلة الكتل.

صمم الباحثون في [3] نظام TrCoin يتعامل مع البيانات المزيفة والتغذية الراجعة غير الصادقة عبر خوارزمية تقيس قيمة الأمانة لكل مركبة وتستبعد التغذية الخبيثة قبل احتساب قيمة الثقة النهائية وتخزينها في سلسلة الكتل. كما اقترح [4] نموذج TrustedBlockMCDM الذي يستخدم سلسلة الكتل في اتخاذ قرار يعتمد على معايير متعددة لتحسين الكشف عن الرسائل المزيفة والمركبات الخبيثة في VANETs. تعمل هذه الأبحاث ضمن تحسين دقة الكشف وحساب الثقة دون التركيز على أثر V2V Cache كطبقة تخفف الحمل عن البنية السحابية وسلسلة الكتل.

تناولت بعض الأبحاث مشكلة قابلية التوسع في نظام إدارة الثقة المعتمد على سلاسل الكتل حيث قدم الباحثون في [5] نظام إدارة ثقة في VANETs يدعم قابلية التوسع والموثوقية وعدم التلاعب بالبيانات. أكد البحث على أن نقل كل عمليات الثقة إلى سلسلة الكتل تؤدي إلى عبء مرتفع، وبالتالي تم التركيز على البنية العامة لسلسلة الكتل وقابلية التوسع في حين نركز في بحثنا على V2V Cache مع تحليل المفاضلة بين تحسين معدل تسليم الرزم وتقليل العبء على سلسلة الكتل من جهة، ومعدل المنع الفعلي من جهة أخرى.

اقترحت عدة أبحاث حلولاً أكثر تعقيداً مثل [6] حيث تم اقتراح نموذج ثنائي الطبقة لإدارة الثقة في IOV، طبقة تتضمن سلسلة الكتل للمركبات وأخرى لوحدة RSU. في هذا البحث تم تخفيف العبء وتحسين التوسع من خلال التمييز بين الرسائل المهمة وغير المهمة، وبين القرارات التي تحتاج إلى تسجيل دائم أو التعامل معها محلياً. في بحثنا لا نقترح سلسلة كتل مزدوجة وإنما سلسلة واحدة في

السحابة وندعمها بطبقة V2V و Trust Tokens لتقليل العبء على السحابة. قدم الباحثون في [7] بنية مقترنة بالتعلم العميق تعالج هجمات إعادة الإرسال والانتحال الشخصية والتعديل. يفرض وجود سلسلتي كتل تحديات في تزامن القرار تعالجها بنيتنا المقترحة بوجود سلسلة كتل واحدة مع كاش محلية.

فيما يتعلق بالخصوصية والمصادقة قدم البحث [8] نموذجاً يجمع بين إدارة الثقة بالاعتماد على سلسلة الكتل ومخطط يحافظ على الخصوصية المشروطة حيث يُسمح بإرسال الرسائل برسائل بصورة مجهولة مع مزامنة الرسائل ومصادقتها عبر السلسلة وبذلك لا يتم ربط هوية المركبة بقرارات الثقة مباشرة. في بحثنا قمنا بفصل طبقة الهوية المسؤولة عنها سلطة الشهادات CA عن طبقة الثقة والتي تعمل على تصنيف المركبة حسب سلوكها وتخزين الأدلة وقرارات الثقة عوضاً عن هوية المركبة.

عملت العديد من الأبحاث على توظيف التخزين المؤقت في شبكات المركبات بهدف تخفيف الضغط عن البنية التحتية، إلا أن غالبيتها كان يهدف إلى تخزين المحتوى وليس إدارة الثقة كما في [9]. قدم الباحثون في [10] آلية للتخزين المؤقت بهدف الأمان وتحسين المصادقة وذلك بوجود مخدّم بين المركبات ووحدات RSUs الأمر الذي خفض التكلفة بنسب تتراوح بين 67% و 88%. يعد مرشح Bloom هيكلية بيانية فعالة في الفحص السريع بتكلفة منخفضة وهو ما يجعل استخدامه في VANETs خياراً فعالاً. تم استخدامها من قبل [11] لضغط قوائم الشهادات الملغاة Certificate Revocation List (CRL) بدلاً من نقلها بشكل كامل مما خفض حجم الرسائل. قدم الباحثون في [12] إطار مصادقة خفيف الوزن يجمع بين Tesla ومرشح Bloom لتوليد CRL واستخدم الباحثون في [13] مرشح Bloom للتحقق من حالة الشهادات محلياً في المركبات بدون وجود بنية مركزية. استخدم الباحثون في [14] مرشح Cuckoo بدلاً من مرشح Bloom إذ يدعم الحذف الفعلي للشهادات منتهية الصلاحية ويتجاوز ويتفادى مشكلة الإيجابية الكاذبة التي يعاني منها مرشح Bloom وتناول الباحثون في [15] كيفية توزيع CRL بكفاءة في بنية VANET الهرمية مؤكدين على أن حجم هذه القائمة ينمو خطياً مع عدد الشهادات الملغاة الأمر الذي يستدعي ضغطها.

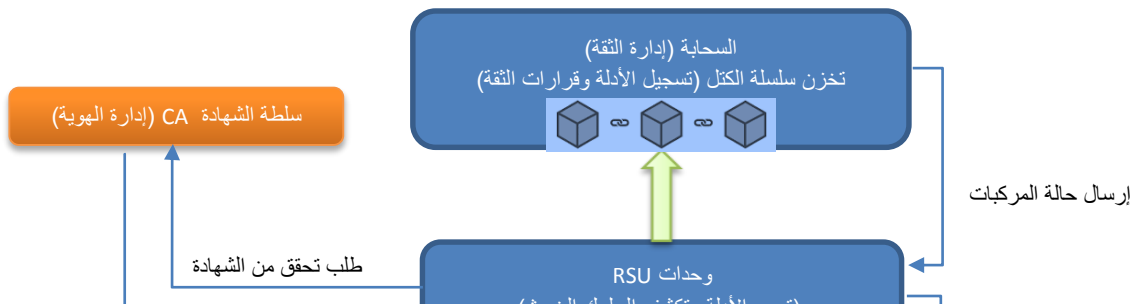
نستخدم مرشح Bloom في بحثنا ليس بهدف ضغط CRL فحسب، بل لتمثيل حالة الثقة الكاملة للمركبات المجاورة. أثبتت نتائج المحاكاة التي قمنا بها نسبة إصابة للكاش بلغت بالمتوسط لجميع التجارب 98.8% مما يؤكد أهمية هذا الاستخدام في تخفيف الحمل بنسبة تتراوح بين 49% إلى 74% حسب كثافة المركبات في الشبكة.

يمكن تلخيص مساهمتنا في هذا البحث من خلال تقديم إطار متكامل لإدارة الثقة في VANETs بالاعتماد على سلسلة كتل سحابية لتسجيل قرارات الثقة مع استخدام V2V Cache لتسريع اتخاذ القرار دون الرجوع الى السحابة. تعمل المنهجية المقترحة على فصل طبقة الثقة عن التحقق من الهوية وتعالج عدة أنواع من الهجمات مثل تزوير بيانات الحركة وإعادة الإرسال والتلاعب بالشهادات و هجوم الإغراق Flooding.

لن نتطرق إلى بنية VANETs أو الحديث عن سلاسل الكتل لوجود العديد من الأبحاث التي تتحدث عنهما، وسيتم التركيز على البنية المقترحة ونتائج التقييم.

المنهجية المقترحة:

سنقوم بالتعبير عن المنهجية المقترحة كما في الشكل (1) الذي يمثل ارتباط طبقات البنية التحتية مع بعضها.



RSU Cache

الشكل (1) الإطار المقترح لإدارة الثقة في VANETs باستخدام سلاسل الكتل

يشتمل الإطار المقترح على طبقات شبكة VANET المعتمدة على السحابة وهي: طبقة المركبات وطبقة وحدة الطريق وطبقة السحابة. تحتوي كل مركبة على ذاكرة V2V Cache تحتوي معلومات عن حالة الثقة للمركبات الأخرى. تحصل المركبة على معلومات الثقة من وحدات RSU التي تقوم بدورها بمراقبة سلوك المركبات وإرسال الأدلة إلى طبقة السحابة التي تقوم بتخزين الأدلة في سلسلة الكتل وحساب حالة الثقة لكل مركبة. سنأتي إلى شرح وظائف كل طبقة على حدى.

1- طبقة المركبات:

تمثل هذه الطبقة مركبات الشبكة والتي تتبادل الرسائل فيما بينها وهذه الرسائل قد تكون طبيعية أو خبيثة مثل رسائل الإغراق. تعتمد المركبات على ذاكرة الكاش V2V Cache للاحتفاظ بحالات الثقة للمركبات المجاورة مما يسمح باتخاذ قرارات أولية محلياً دون الرجوع للسحابة.

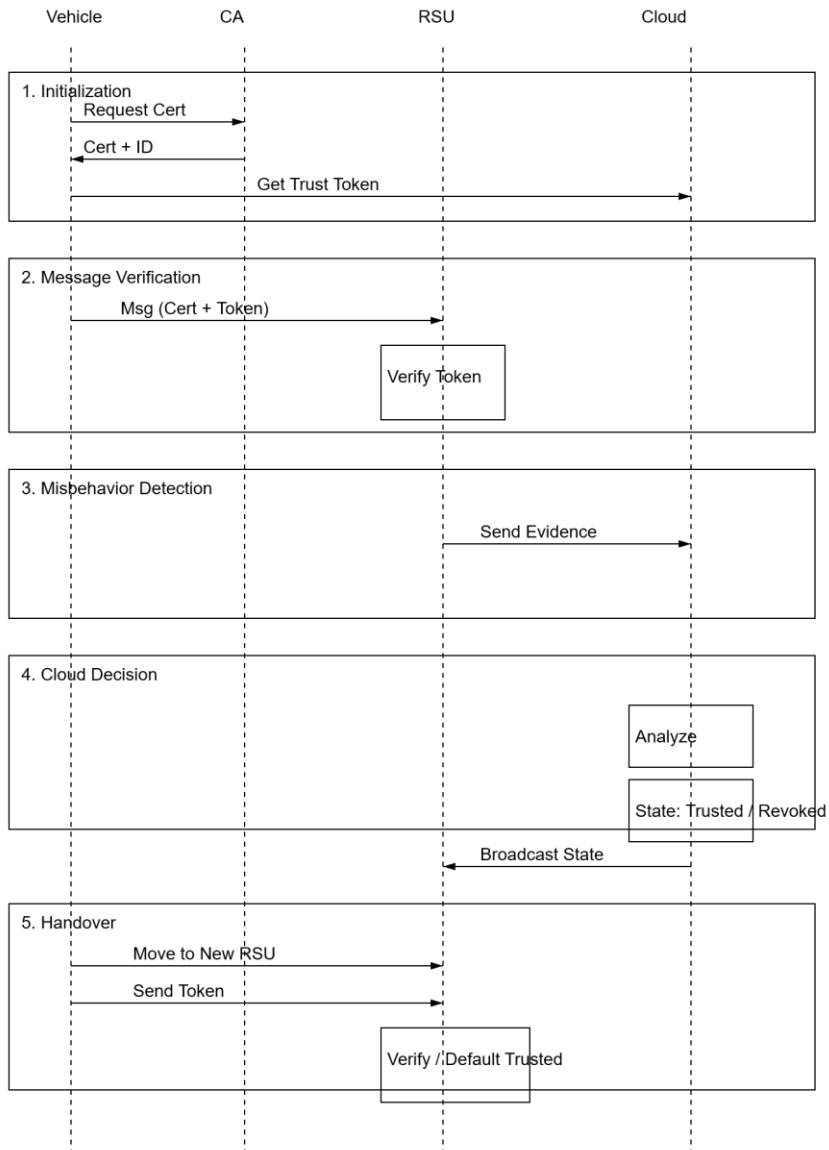
2- طبقة وحدات RSU:

تعمل كوسيط بين طبقة المركبات والسحابة ومهمتها تتمثل في التحقق من هوية المركبات عبر التواصل مع سلطة الشهادات وجمع الأدلة المتعلقة بسلوك المركبة واتخاذ قرارات ثقة أولية محلياً. عند اكتشاف سلوك غير طبيعي تقوم وحدة RSU بإرسال الأدلة إلى السحابة لتسجيلها ضمن سلسلة الكتل، وتقوم أيضاً بتحديث معلومات الثقة للمركبات المجاورة. يتوفر في وحدة RSU ذاكرة تخزين محلية كما يظهر في المخطط، وذلك كون RSU هي التي تستقبل الرسائل ولديها قدرة على تحليل سلوك المركبة واتخاذ قرار سريع. بفرض لم نحقق هذه الذاكرة المؤقتة في RSU سيحدث ضغط كبير في الشبكة يتسبب بتأخير عالٍ و PDR أقل. إن وجود RSU Cache يجعل فرق التأخير في حال وجود V2V Cache ويدونها، قليلاً وهو ما أظهرته التجارب.

3- طبقة السحابة:

تمثل هذه الطبقة مركز إدارة الثقة في الإطار المقترح حيث تحتوي على سلسلة الكتل التي تسجل الأدلة وقرارات الثقة بهدف عدم التلاعب بها. تقوم هذه الطبقة بتحليل الأدلة الواردة من RSU ومقارنتها مع عتبات لتحديد حالة الثقة للمركبة.

إدارة الثقة في شبكات المركبات باستخدام سلاسل الكتل المستضافة في السحابة: دراسة أثر الذاكرة المؤقتة في المركبات



الشكل (2) مخطط تسلسلي يوضح ارتباط مكونات الإطار المقترح

يلخص المخطط التسلسلي في الشكل (2) المنهجية المتبعة في الإطار المقترح لإدارة الثقة في VANETs. في البداية تطلب المركبة شهادة يتم الحصول عليها من CA التي تقوم بدورها بتزويد المركبة بشهادة رقمية موقعة وهوية مخفية. تتواصل المركبة مع السحابة وتحصل على Trust Token في البداية تكون قيمته Trusted أي المركبة موثوقة، وهي الحالة الافتراضية التي تبدأ بها المركبة.

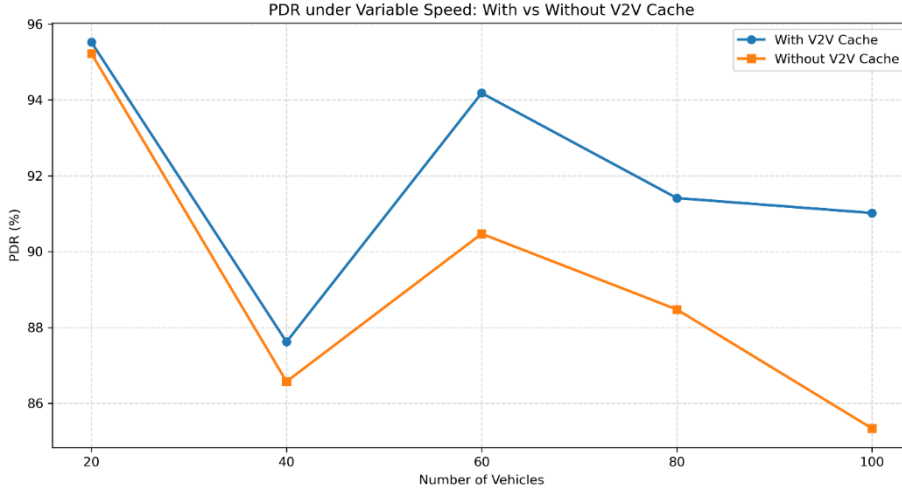
من أجل كل رسالة ترسلها المركبة، تستقبل RSU الرسالة مع الشهادة والرمز. تقوم RSU بالتحقق من الرمز وفي حال كان موثقاً يتم قبل الرسالة الأمر الذي نتجنب من خلاله سؤال السحابة من أجل كل رسالة. بالإضافة إلى عملية التحقق هذه تعمل RSU على مراقبة السلوك. في حال الاشتباه يتم إرسال دليل إلى السحابة، وبالتالي يمكن اعتبار RSU بمثابة المراقب ولكن لا يتخذ أي قرار يتعلق بحالة الثقة للمركبة. من خلال هذا البحث تم التعامل مع عدة أنواع من السلوك الخبيث الذي يمكن للمركبة أن تقوم به وهي: إرسال بيانات غير منطقية مثل السرعة والاتجاه وهجمات إعادة الإرسال وهجوم الإغراق. تجمع السحابة الأدلة من RSUs ويتم تحليلها ضمن نافذة زمنية ومقارنتها مع عتبات محددة وعليه تكون حالة المركبة إما موثوقة (Trusted) أو مشتبهاً بها (Suspected) أو إلغاء الثقة (Revoked).

بعد اتخاذ القرار يتم توزيع الحالة على جميع RSUs ويتم إصدار Token للمركبة. في حال انتقال مركبة من نطاق RSU1 إلى نطاق RSU2 تقوم بإرسال شهادتها والToken إلى وحدة RSU2. تقوم RSU2 بالتحقق من Token في حال كانت صالحة يتم قبول المركبة وفي حال عدم وجود Token يتم اعتبارها موثوقة مؤقتاً وهي ما يعتبر فراغ زمني صغير في الثقة يتطلب معالجته في أبحاث لاحقة.

تحقق المنهجية المقترحة اتصالات من نوع V2V وهنا يمكن اتخاذ قرارات محلية باستخدام V2V Cache. تم تصميم V2V Cache في هذه المنهجية بهدف تحقيق السرعة وتخفيف الحمل بحيث تتضمن المركبات المرفوضة وبالتالي عند استلام مركبة رسالة من مركبة أخرى إذا كانت المركبة المرسله في V2V Cache سيتم رفض الرسالة وإلا يتم قبولها. تجدر الإشارة إلى نقطتين أساسيتين: الأولى إن قبول الرسالة لا يعني أن المركبة المرسله موثوقة بشكل كامل، بسبب ديناميكية الشبكة وتأخر محتمل في تحديث V2V Cache والثانية إن V2V Cache يعتمد على مرشح Bloom filter الذي

قد يُنتج إيجابية كاذبة حيث تصنف بعض المركبات الموثوقة على أنها مرفوضة وذلك بسبب طبيعة عمل هذا المرشح ولكنه يعتبر مقبولاً لعدم وجود سلبية كاذبة بالإضافة إلى الفعالية العالية لهذا المرشح وانخفاض زمن المعالجة.

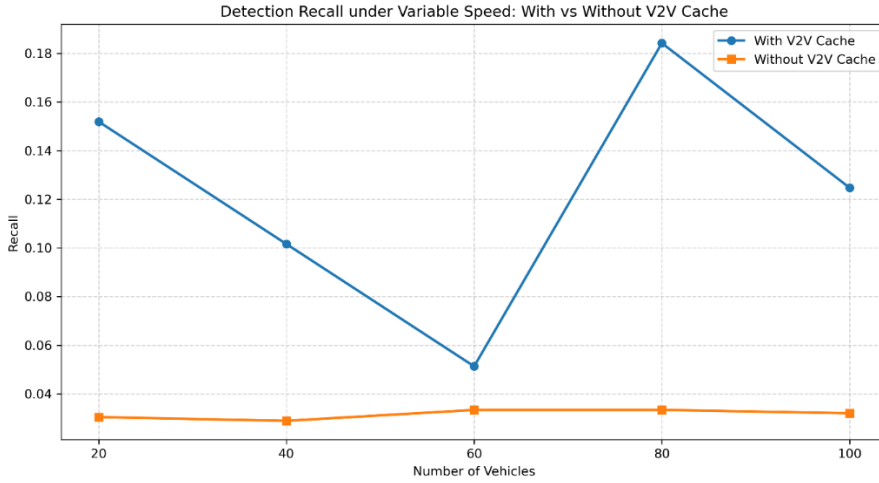
لضمان تخزين الأدلة بشكل غير قابل للتعديل أو التلاعب بالإضافة إلى تحديث حالات الثقة وتسجيل قرارات الحظر. تشكل سلسلة الكتل مرجعاً لحالة كل مركبة، ويتم الرجوع له في الحالات التي تتطلب تأكيد الموثوقية لمركبة ما في حال عدم توفرها في الكاش المحلي.



الشكل (3) معدل تسليم الرزم

يوضح الشكل (3) أثر V2V cache على نسبة تسليم الرزم المقبولة PDR في البيانات التي تكون فيها سرعة المركبات متغيرة وبالتالي أي رسالة لا ترسل أو تستقبل ستؤدي إلى انخفاض هذا المعدل ويشير PDR هنا إلى عدد الرسائل المقبولة بعد تطبيق طبقة الثقة. من أجل سيناريو عدد المركبات القليل 20 مركبة كان PDR مرتفعاً وهي نتيجة منطقية بسبب انخفاض الحمل والحجب على مستوى طبقة الثقة الأمر الذي يجعل عدد الرسائل المرسله يساوي تقريباً عدد الرسائل المستلمة. نلاحظ بوجود الكاش ومن أجل عدد المركبات المتوسطة الكثافة إلى العالية تفوق النموذج الذي يحقق V2V cache كونها تقلل الاعتماد على الـ RSU و السحابة بما يزيد من نسبة تسليم الرزم المقبولة. الانخفاض الواضح عند عدد مركبات 40 كونه مرتبط بقرارات طبقة الثقة وهذا ما تم التحقق منه من جدول النتائج حيث تبين أن عدد الرسائل المفقودة يكافئ عدد الرسائل المحجوبة بسبب الثقة. ولكن تجدر الإشارة إلى أن تحسن قيمة PDR في حالة استخدام V2V cache لا يعني تحسناً في المنع الفعلي إذ أظهرت النتائج أن V2V cache يحتاج إلى سياسات أكثر تكيفاً لتحديث معلومات الثقة. إن انخفاض معدل

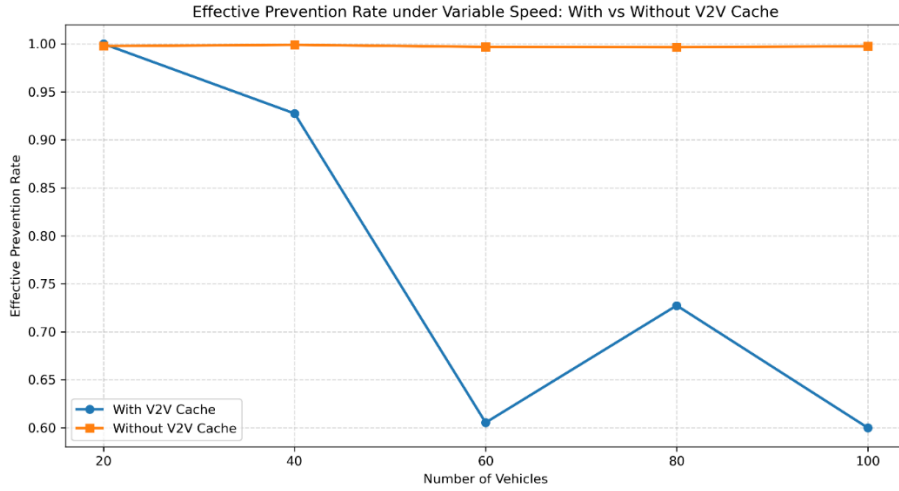
PDR مع زيادة عدد المركبات هو أمر مفهوم كون هذه الزيادة تعني زيادة عدد الرسائل واحتمال الازدحام وتداخل الاتصالات وزيادة عدد الرسائل التي يمكن أن ترفض في طبقة الثقة.



الشكل (4) أثر V2V Cache على مقياس Recall لاكتشاف الهجمات السلوكية

يُظهر الشكل (4) أثر V2V cache على مقياس Recall حيث أظهرت النتائج تحسن ملحوظ من أجل جميع الكثافات من العقد مقارنة مع الحالة التي لا يتوفر فيها V2V cache الأمر الذي يعزز أن تبادل معلومات الثقة مع المركبات يعزز قدرة النظام على كشف السلوك الخبيث. نلاحظ التباين الحاصل في قيم Recall حيث سجلت أعلى قيمة عند 80 مركبة وأقل قيمة عند 60 مركبة ويعزى هذا التباين إلى طبيعة توزيع الهجمات وعدد الاكتشافات المسجلة وآلية المنع عبر الكاش. تجدر الإشارة إلى مقياس Recall يستخدم الاكتشافات الصحيحة للهجمات السلوكية بالنسبة لإجمالي الهجمات السلوكية الفعيلة، وبالتالي في السيناريو بدون V2V Cache ستمر الرسائل عبر RSU والسحابة ويتم منع رسائل دون تسجيلها اكتشاف جديد الأمر الذي يفسر القيم المنخفضة لمقياس Recall بدون V2V Cache. نلاحظ انخفاض القيمة المطلقة للـ Recall في الحالتين، حيث بلغت 0.184 عند 80 مركبة كأفضل حال، ويعزى ذلك -كما أشارت إليه العديد من الأبحاث- إلى صعوبة اكتشاف سلوك المركبات في

بيئة VANET الديناميكية. إلى أن المهم في هذا البحث إظهار التحسن الملموس بوجود V2V Cache من عدمه.



الشكل (5) أثر V2V Cache على معدل المنع العام EPR

يوضح الشكل (5) معدل المنع الفعلي وقد أثبتت النتائج أن هذا المعدل بدون V2V cache يكون قريب من الواحد بمعنى منع معظم محاولات السلوك الخبيث في الشبكة. يفسر ذلك كون قرار المنع يتم في السحابة بالاعتماد على حالات ثقة محدثة وبالتالي سيكون قرار المنع أكثر استقراراً. أما في السيناريو الذي يتضمن V2V Cache نلاحظ أن معدل المنع كان عالياً بوجود عدد قليل من المركبات وبدأ بالانخفاض مع زيادة عدد المركبات بسبب التراجع في موثوقية المنع لوجود معلومات غير محدثة في V2V cache الأمر الذي يستدعي البحث عن سياسات لتحديث معلومات الثقة في الكاش.

يجب أن نميز بين المقياسين السابقين لتفسير النتائج، في حين أن مقياس Recall يقيس اكتشاف الهجمات السلوكية كاكشافات صحيحة أما معدل المنع الفعلي يقيس منع المحاولات الخبيثة من التأثير سواءً عن طريق الحظر أو رفض مركبة محظورة أو منع محاولة بعد أن أصبحت مركبة محظورة. لذلك يمكن القول بوجود V2V cache لدينا قيم Recall أعلى لأن نشر حالات الثقة في المركبات

يزيد من الكشف السلوكي، في حين أن معدل المنع الفعلي أقل لأن بعض القرارات قد تعتمد على حالات غير محدثة في الكاش. بالمقابل وبدون وجود V2V Cache تكون قيم Recall منخفضة لأن عدد الاكتشافات السلوكية أقل ويكون معدل المنع أعلى لأن السحابة تمنع المحاولات الخبيثة بصرامة انطلاقاً من حالات ثقة محدثة.

إن معدل المنع الفعال (EPR) Effective Prevention Rate في الشكل (5) يحسب نسبة الهجمات الممنوعة إلى مجموع الهجمات الواصلة إلى RSU وبالتالي يتجاهل الهجمات التي تم منعها في V2V Cache قبل وصولها إلى RSU. سنعمل على تعريف مقياس تقييم يجمع بين المنع على المستوى المحلي والمنع على مستوى سلسلة الكتل بهدف تقييم قدرة النظام الكلية على صد الهجمات، حيث لاحظنا في الأبحاث التي تم دراستها عدم وجود مثل هذا المقياس، كونها تركز على أحدهما.

سندعو المقياس بـ System Prevention Rate (SPR) ويعطى بالعلاقة التالية:

$$SPR = (V2Vp + BCp) / Total_Malicious_Attempts \quad (1)$$

حيث أن V2Vp يمثل الكشف على مستوى V2V cache و BCp يمثل الكشف على مستوى سلسلة الكتل و Total_Malicious_Attempts عدد الهجمات الكلي. تكون قيمة SPR ضمن المجال [0-1]. يقدم الجدول التالي مقارنة بين مقياس EPR و SPR من أجل كثافات مختلفة من المركبات بهدف تبيان مساهمة V2V Cache وسلسلة الكتل في قيمة SPR الإجمالية.

الجدول (1) مقارنة مقياسي EPR و SPR من أجل كثافات متنوعة من المركبات

العدد	EPR بدون V2V	EPR مع V2V	مع SPR V2V	V2V %	BC %	كسب SPR
20	0.997	1.0	1.0	77.1%	22.9%	+0.0
40	0.999	0.927	0.978	70.8%	27.1%	+5.1
60	0.996	0.605	0.823	55.3%	27.1%	+21.8
80	0.996	0.727	0.957	84.3%	11.5%	+23.0
100	0.997	0.600	0.914	78.6%	12.8%	+31.5

يظهر من الجدول (1) أنَّ SPR يصبح صورة EPR الذي يُخفق في تمثيل القدرة الفعلية للنظام عند تفعيل V2V Cache مما يوحي بأداء ضعيف لا يعكس الواقع. على سبيل المثال بوجود V2V، يبلغ EPR قيمة 0.6 عند عدد مركبات يساوي 100، في حين قيمة SPR بلغت 0.914 مما يكشف أن 31.5% كانت مخفية عن مقياس EPR كونها تعلقت بمنع محلي قبل الوصول إلى البنية التحتية للشبكة. تُظهر نتائج SPR مساهمة V2V Cache في المنع الكلي والذي يتصاعد مع زيادة عدد المركبات حيث بلغ 77.1% عند 20 مركبة ووصل لـ 84.3% عند 80 مركبة. يعزى الانخفاض عند 60 مركبة إلى حساسية الطوبولوجيا العشوائية عند الكثافات المتوسطة وهو ما يحتاج إلى آلية مخصصة لتحديث الكاش.

يمكننا القول أن مقياس SPR أثبت قدرة النظام على صد هجمات بين 82% إلى 100% في حين أظهر مقياس EPR قدرة النظام على صد هجمات بنسبة 62% إلى 100%، وبالتالي يمكن التوصية

باستخدام مقياس SPR في المنهجيات التي تعتمد طبقات متعددة كما هو الحال في الإطار المقترح. يوضح العمود الأخير من الجدول الكسب الحاصل بتطبيق مقياس SPR بمعنى أنه يشير إلى كم نقطة مئوية يتجاوز فيها مقياس SPR مقياس EPR عند تفعيل V2V Cache حيث يظهر أن EPR يخفي ما بين 0 إلى 31.5 نقطة مئوية ويزداد هذا الفرق مع زيادة كثافة المركبات.

الخلاصة:

قدمنا في هذا البحث إطاراً متكاملاً لإدارة الثقة في شبكات VANETs باستخدام سلاسل الكتل المستضافة في السحابة بهدف منع التلاعب والتعديل. يعتمد الإطار المقترح على ثلاث ركائز أساسية وهي: أولاً الفصل بين هوية وثقة المركبات وثانياً توظيف ذاكرة مؤقتة داخل المركبات V2V Cache مبنية على مرشح Bloom وثالثاً تخفيف الضغط على السحابة التي تستضيف سلسلة الكتل وتخزن بداخلها قرارات الثقة لكل مركبة.

أثبتت نتائج التجارب كفاءة استخدام V2V Cache حيث بلغت نسبة إصابة الكاش 98.8% الأمر الذي خفف الحمل عن السحابة بنسبة 49% إلى 74% وهذه النسبة متعلقة بكثافة المركبات في الشبكة وبالتالي يمكن القول بأن هذا الإطار مناسب في البيئات ذات الكثافات المرورية العالية. تم تحسين نسبة تسليم الرزم بوجود الكاش وتزداد هذه النسبة بزيادة عدد المركبات.

أظهرت نتائج التجارب حسب مقياس Recall أن وجود معلومات الثقة لدى المركبات ساهم في تحسين قدرة النظام على الكشف. تبين من خلال البحث قصور المقياس EPR الذي يركز على المنع على مستوى السحابة متجاهلاً المنع عبر V2V Cache الأمر الذي دفعنا لتعريف مقياس SPR الذي يجمع المنع على مستوى المركبات والسحابة. أظهر المقياس قدرة النظام على المنع بنسبة 82%-100% مقارنة بمقياس EPR الذي وصلت فيه النسبة 60%-100%. كشفت النتائج عن تحدي

يتمثل بمعلومات الكاش القديمة نتيجة تأخر التحديث وهو ما ظهر كانهخفاض في EPR في سيناريو 60 مركبة.

الآفاق المستقبلية:

يتيح لنا هذا البحث عدة آفاق لأعمال بحثية مستقبلية تتمثل بتعديل زمن صلاحية الكاش بشكل تكيفي حسب كثافة الشبكة ومعدل المنع في الشبكة لتخفيف أثر البيانات القديمة. كما يمكن أيضاً العمل على آلية لتحديث كاش المركبات بشكل فوري بدل الانتظار الدوري لعملية التحديث. تعزيز الخصوصية من خلال تقنيات متقدمة مثل Group Signatures و Ring Signatures و Zero Knowledge-Proof للتحقق من الهوية.

المراجع:

- [1] M. Razafimanjato, M. Saad, and D. Kim, "Blockchain-based trust management systems in the Internet of Vehicles: A comprehensive survey," ICT Express, 2025.
- [2] H. Liu, D. Han, and D. Li, "Behavior analysis and blockchain based trust management in VANETs," Journal of Parallel and Distributed Computing, vol. 151, pp. 61–69, 2021.

- [3] E. Memary, C.-C. Shen, H. Guo, and M. M. Nejad, "TrCoin: A blockchain-based robust trust management system for VANET," *ACM Journal on Autonomous Transportation Systems*, vol. 2, pp. 1–20, Apr. 2025.
- [4] C. Pu, "Blockchain-based trust management using multi-criteria decision-making model for VANETs," *TechRxiv*, 2020.
- [5] F. Ghovanlooy Ghajar, J. Salimi Sratakhti, and A. Sikora, "SBTMS: Scalable blockchain trust management system for VANET," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 24, p. 11947, 2021.
- [6] W. Ruan, J. Liu, Y. Chen, S. M. N. Islam, and M. Alam, "A double-layer blockchain based trust management model for secure Internet of Vehicles," *Sensors*, vol. 23, no. 10, p. 4699, 2023.
- [7] E. Memary, C.-C. Shen, H. Guo, and M. M. Nejad, "Blockchain and deep learning based trust management for Internet of Vehicles," *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 118, p. 102555, 2022.
- [8] W. Ahmed, D. Wu, and D. Mukathe, "Blockchain-assisted privacy-preserving and context-aware trust management framework for secure communications in VANETs," *Sensors*, vol. 23, no. 12, p. 5766, 2023.

- [9] E. Khatibi and M. Sharifi, "BusCache: V2V-based infrastructure-free content dissemination system for Internet of Vehicles," Vehicular Communications, vol. 46, p. 100746, Apr. 2024.
- [10] R. Tahir et al., "Blockchain enabled privacy provisioning scheme for location based services in VANETs," PLOS ONE, 2025.
- [11] M. Raya, D. Jungels, P. Papadimitratos, I. Aad, and J.-P. Hubaux, "Certificate revocation in vehicular networks," LCA Tech. Rep., EPFL, 2006.
- [12] F. Bao, I.-R. Chen, M. Chang, and J.-H. Cho, "A lightweight authentication and privacy-preserving scheme for VANETs using TESLA and Bloom Filters," ICT Express, vol. 3, no. 3, pp. 100–103, 2017.
- [13] G. Samara, W. A. H. Al-Salihi, and R. Sures, "Design of simple and efficient revocation list distribution in urban areas for VANETs," in Proc. 2nd Intl. Conf. on Network Applications, Protocols and Services (NETAPPS), 2010.
- [14] X. Guo, J. Lin, Z. Wu, and Y. Guan, "Improving efficiency of pseudonym revocation in VANET using Cuckoo Filter," in Proc. IEEE VTC-Fall, 2020, pp. 1–5.
- [15] M. Khodaei and P. Papadimitratos, "Efficient, scalable, and resilient vehicle-centric certificate revocation list distribution in VANETs," in Proc. ACM WiSec, 2018, pp. 172–183.

دراسة مقارنة لأداء بروتوكولات التوجيه المحسنة المعتمدة على AODV وبروتوكولي 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 ميزات 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 ميزات 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 ميزات 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 ميزات 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.

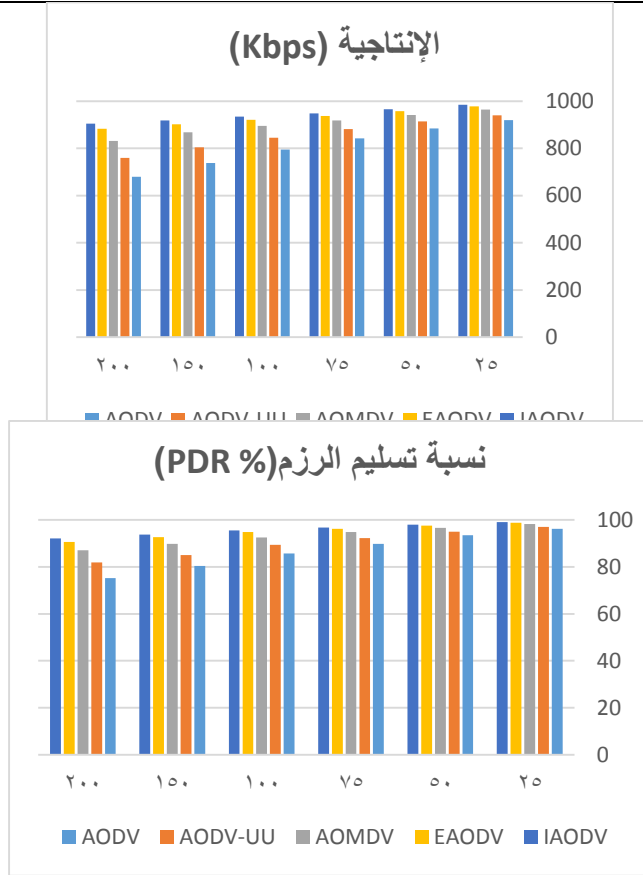
6. التطبيق العملي:

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 الرئيسية، 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]

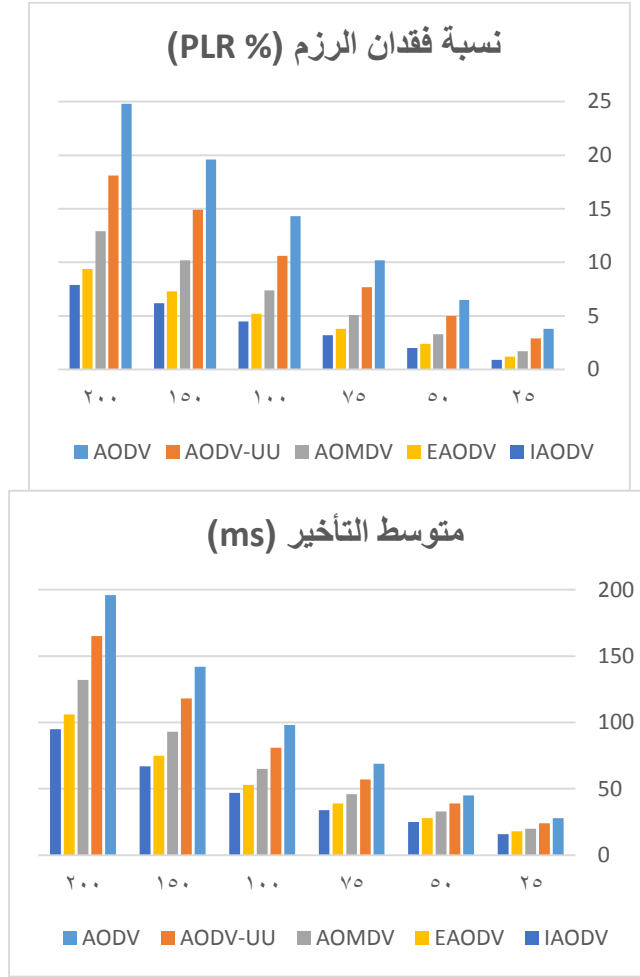
6.1 السيناريو الأول زيادة كثافة المركبات

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

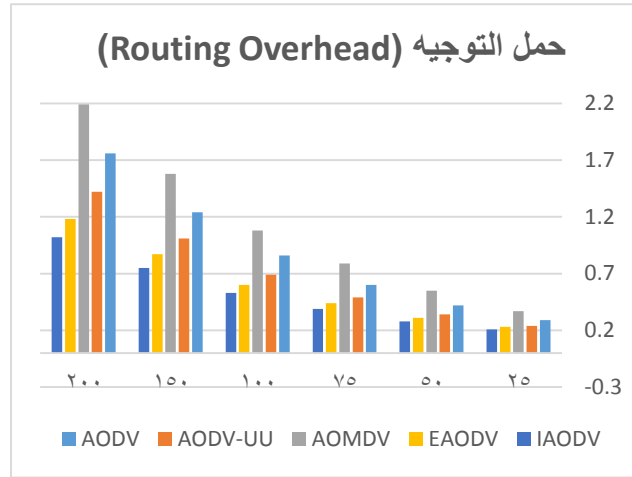


الشكل (1) الإنتاجية ونسبة تسليم الرزم عند زيادة كثافة المركبات في السيناريو الأول يظهر الشكل (1) أن زيادة كثافة المركبات تؤدي إلى انخفاض كل من نسبة تسليم الرزم (PDR) والإنتاجية (Throughput) لدى جميع بروتوكولات التوجيه، وذلك نتيجة زيادة ازدحام القناة اللاسلكية وارتفاع احتمالية تصادم الحزم وانقطاع الروابط. 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

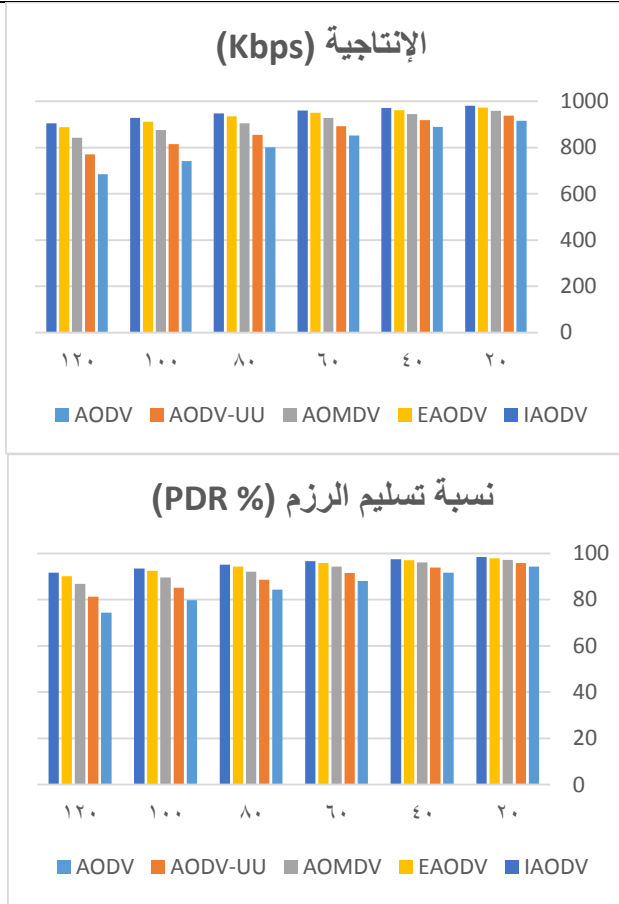
الشكل (3) حمل التوجيه عند زيادة كثافة المركبات في السيناريو الأول.

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).

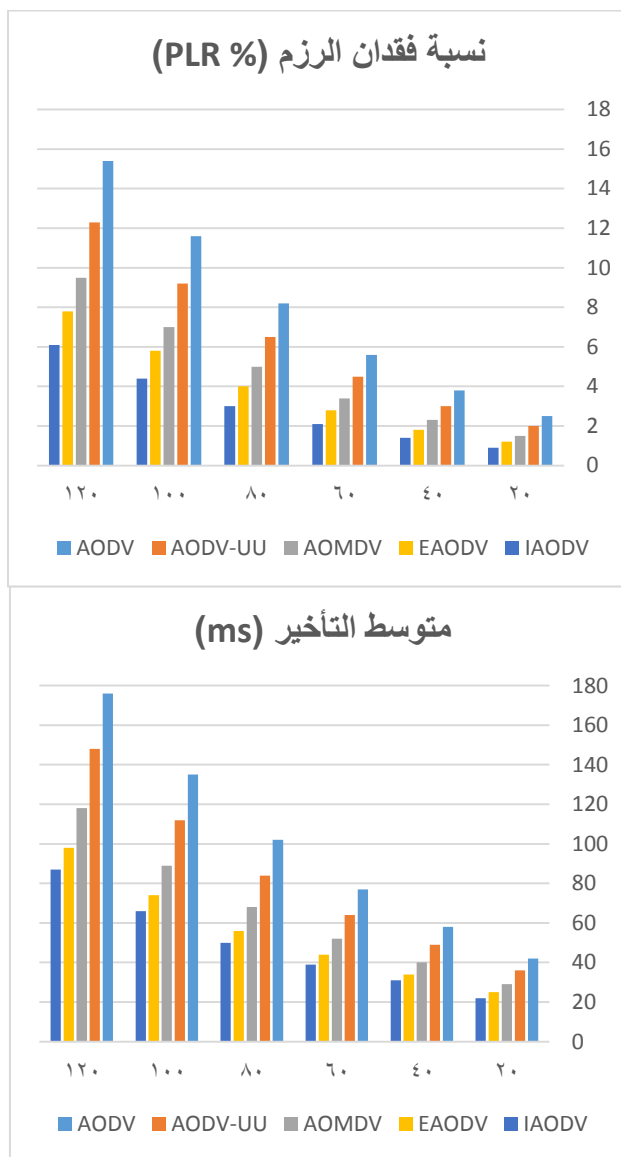
6.2 السيناريو الثاني تأثير سرعة المركبات على أداء بروتوكولات التوجيه في VANET

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

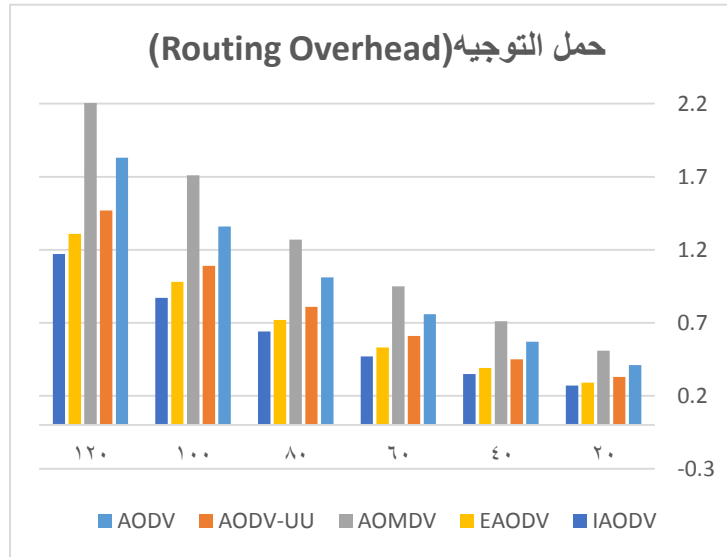
تأخير وأدنى نسبة فقدان للرزم في جميع مستويات السرعة، يليه EAODV ثم AOMDV، بينما جاء AODV-UU في المرتبة الرابعة، وسجل AODV أعلى قيم للتأخير وفقدان الرزم، خاصة عند السرعات العالية. وتشير هذه النتائج إلى أن IAODV يتمتع بقدرة أكبر على الحفاظ على استقرار المسارات وتحسين موثوقية الاتصال في شبكات VANET ذات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



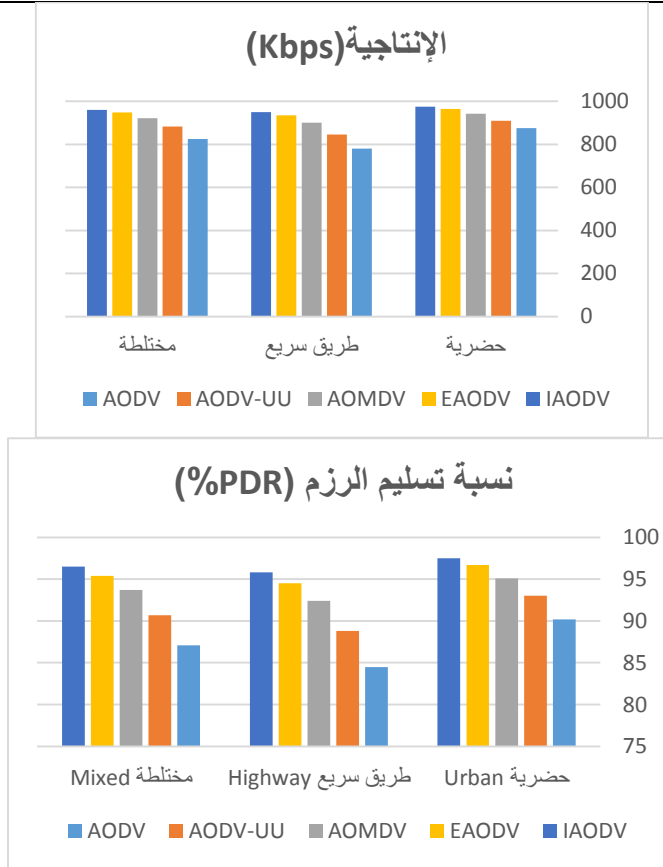
الشكل (6) حمل التوجيه مع زيادة سرعة المركبات في السيناريو الثاني.

6.3 السيناريو الثالث نوع البيئة المرورية

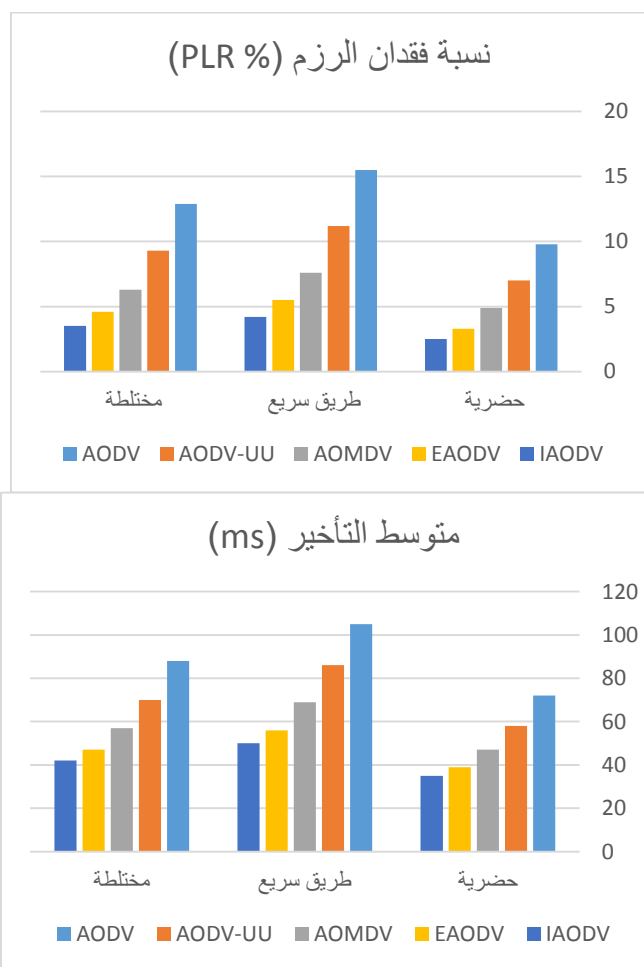
الجدول (3) بارامترات المحاكاة للسيناريو الثالث لدراسة تأثير نوع البيئة المرورية.

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

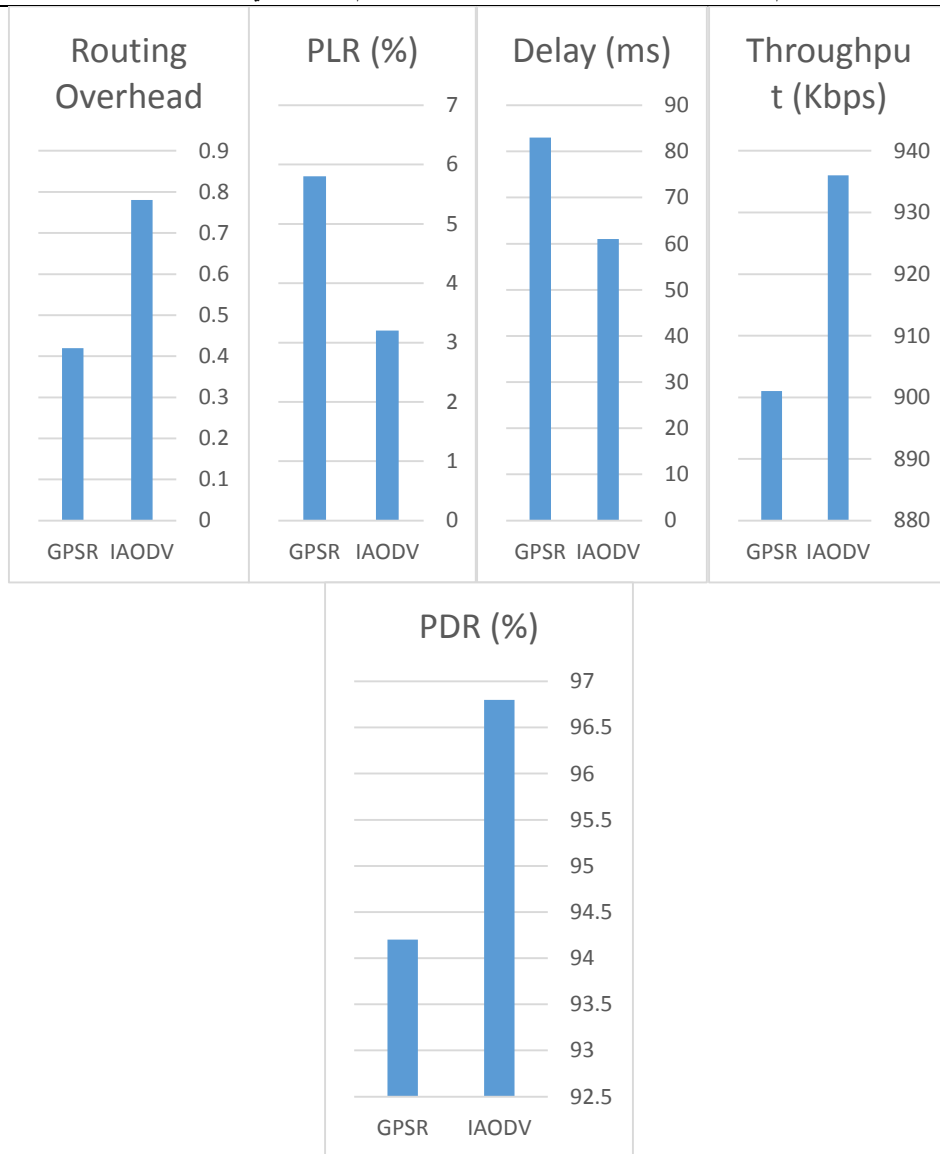
جدول (4): بارامترات المحاكاة للسيناريو الرابع لمقارنة IAODV و GPSR في البيئات المرورية المختلفة.

المعامل (Parameter)	القيمة (Value)
هدف السيناريو	مقارنة أداء بروتوكولي IAODV و GPSR في بيئات مرورية مختلفة
بروتوكولات التوجيه	IAODV، GPSR
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:

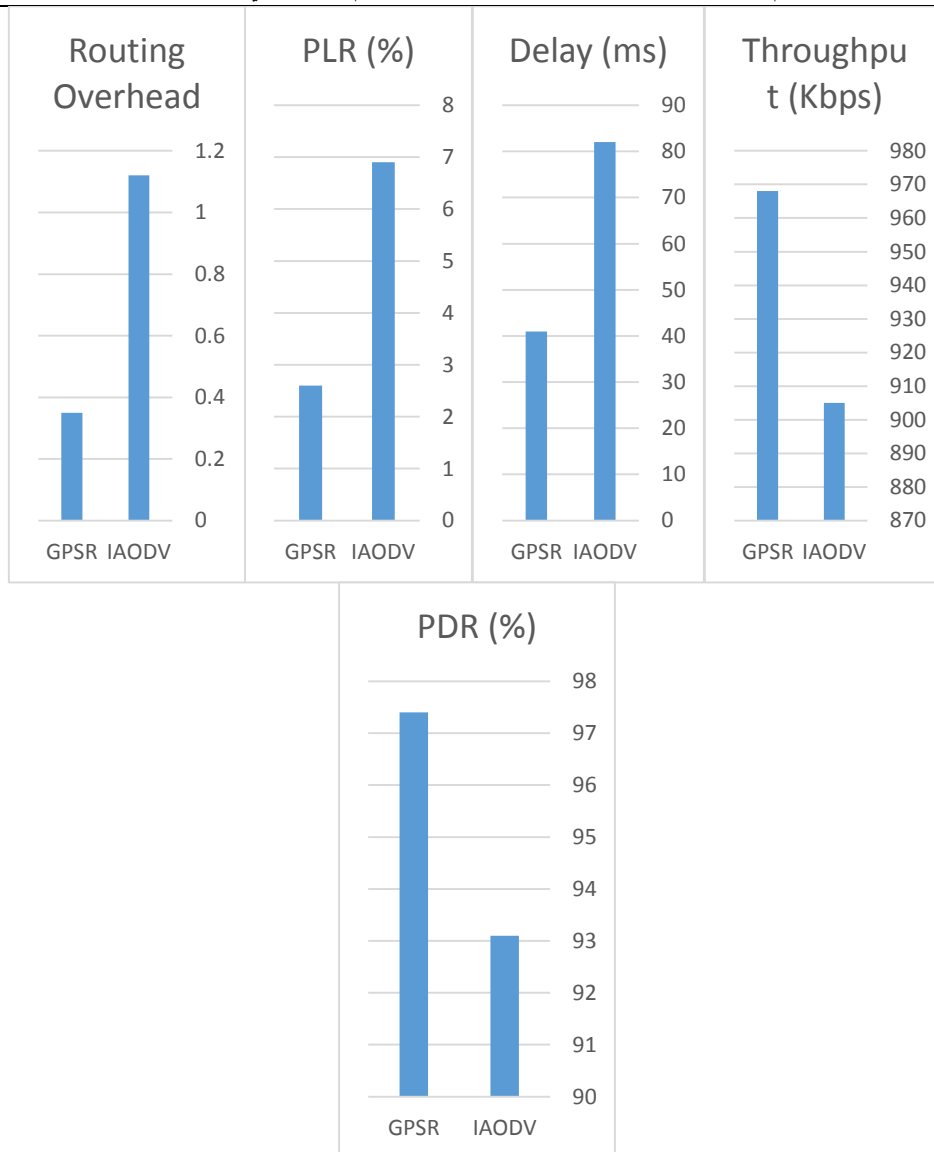


الشكل (9) المحاكاة للسيناريو الرابع لمقارنة IAODV و GPSR في البيئة الحضرية.

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

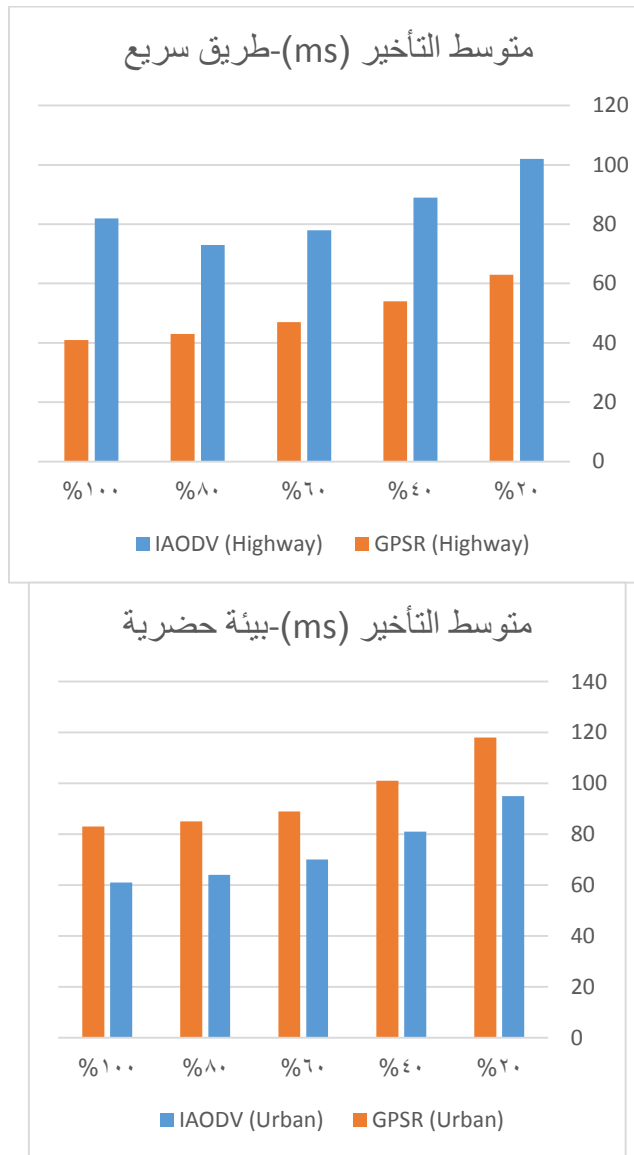
نسبة المركبات المشاركة	20%، 40%، 60%، 80%، 100%
عدد المركبات المشاركة	40، 80، 120، 160، 200 مركبة
سرعة المركبات	60 كم/ساعة (Urban)، 100 كم/ساعة (Highway)
زمن المحاكاة	600 ثانية
طبقة MAC	IEEE 802.11p
الطبقة الفيزيائية (PHY)	IEEE 802.11p
نموذج الانتشار	Two-Ray Ground Propagation Model
مدى الإرسال	250 متر
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.

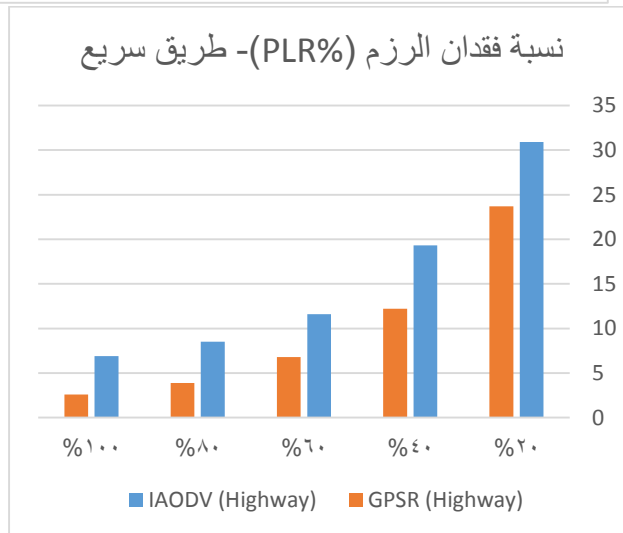
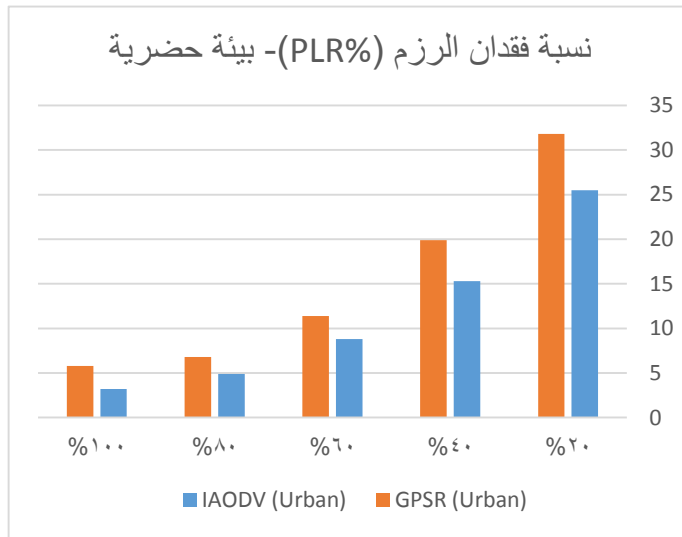
أظهرت النتائج أن نسبة تسليم الرزم (PDR) تزداد تدريجياً مع زيادة نسبة المركبات المشاركة في شبكة VANET لدى كلا البروتوكولين، مما يشير إلى أن ارتفاع نسبة المركبات المجهزة بوحدة الاتصال يحسن استقرار الاتصال ويزيد من فرص توفر المسارات بين المركبات. في البيئة الحضرية (Urban)، حقق IAODV أداءً أفضل من GPSR عند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

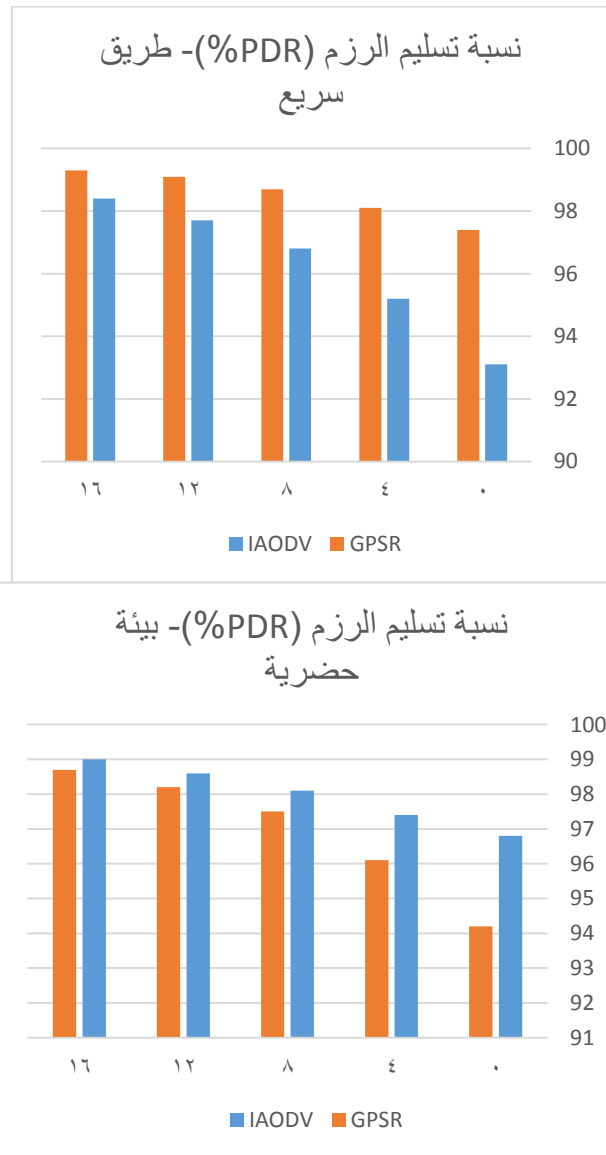
6.6 السيناريو السادس تأثير كثافة وحدات RSU

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

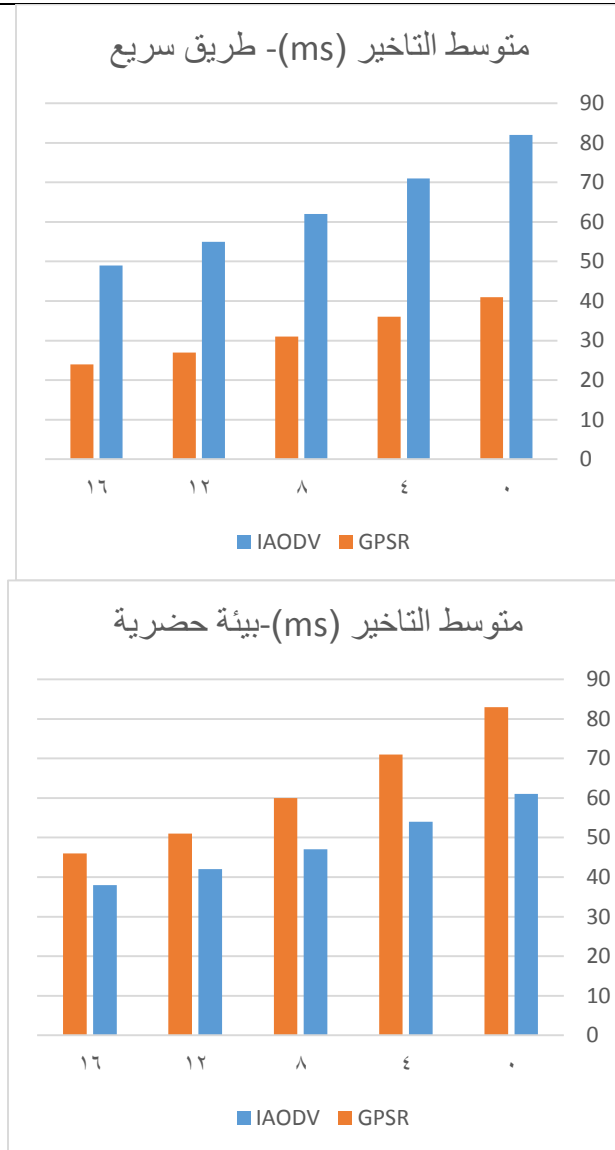
المعامل (Parameter)	القيمة (Value)
هدف السيناريو	دراسة تأثير كثافة وحدات البنية التحتية (RSUs) على أداء بروتوكولي IAODV و GPSR
بروتوكولات التوجيه	IAODV، GPSR
بيئة المحاكاة	حضرية (Urban) وطريق سريع (Highway)

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.



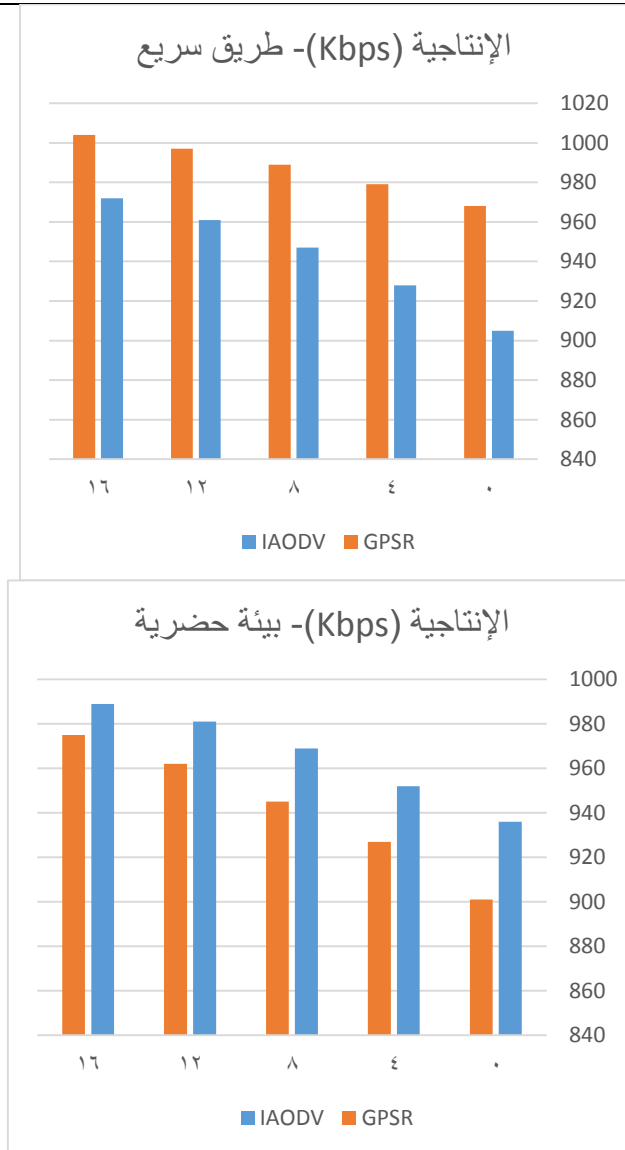
الشكل (14) نسبة تسليم الرزم مع تغير كثافة وحدات RSU في السيناريو السادس.



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

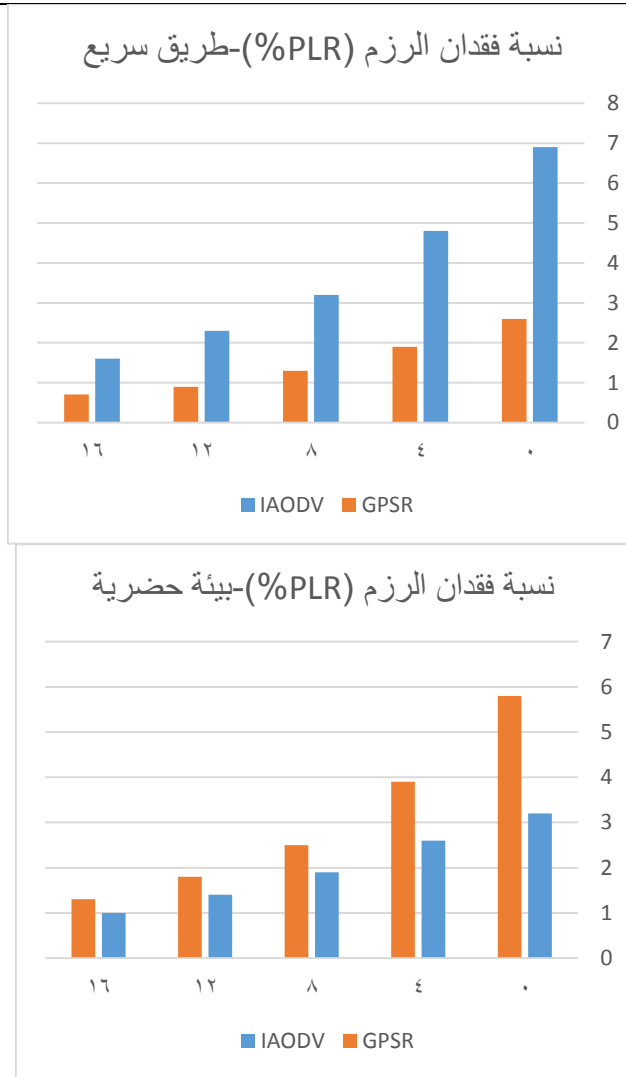
وتقليل زمن اكتشاف المسارات وإعادة توجيه البيانات. في البيئة الحضرية (Urban) ، حقق IAODV أقل متوسط تأخير مقارنةً بـ GPSR في جميع مستويات كثافة وحدات RSU ، بينما في بيئة الطريق السريع (Highway) تفوق GPSR وسجل أقل قيم للتأخير ، مستفيداً من طبيعة التوجيه الجغرافي والحركة المنتظمة للمركبات. تؤكد النتائج أن 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

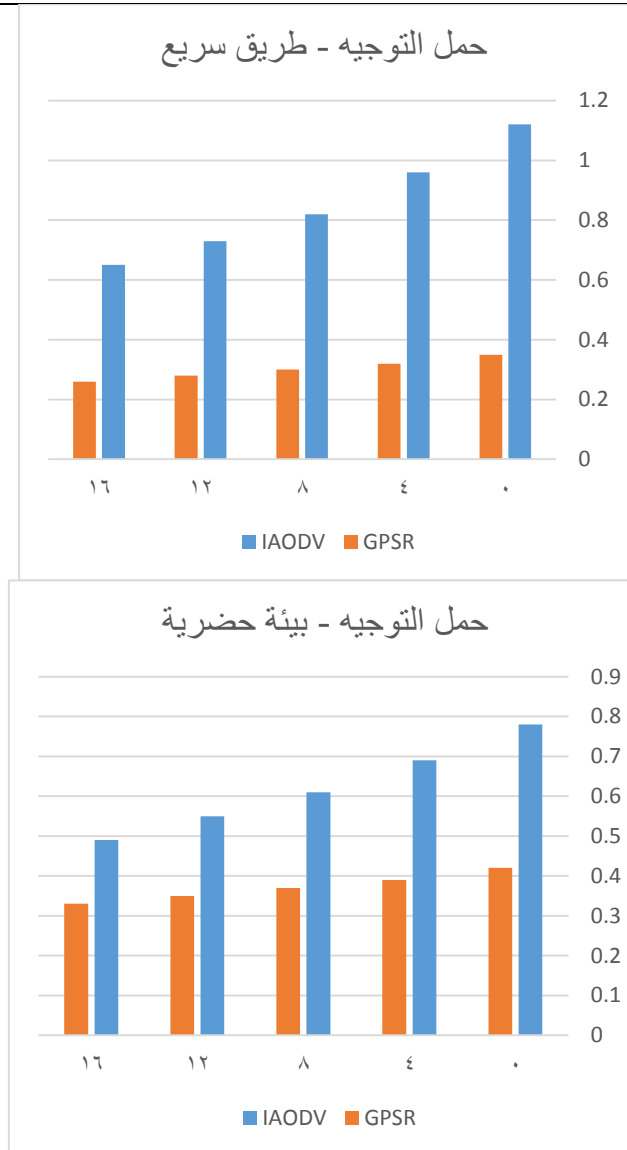
تحسين استقرار الاتصال وتقليل انقطاع المسارات، مما يزيد من عدد الحزم التي تصل بنجاح خلال زمن المحاكاة. في البيئة الحضرية (Urban)، حقق AODV أعلى إنتاجية في جميع مستويات كثافة وحدات RSU مقارنةً بـ GPSR، بينما في بيئة الطريق السريع (Highway) تفوق GPSR وسجل أعلى قيم للإنتاجية، مستفيداً من كفاءة التوجيه الجغرافي 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.

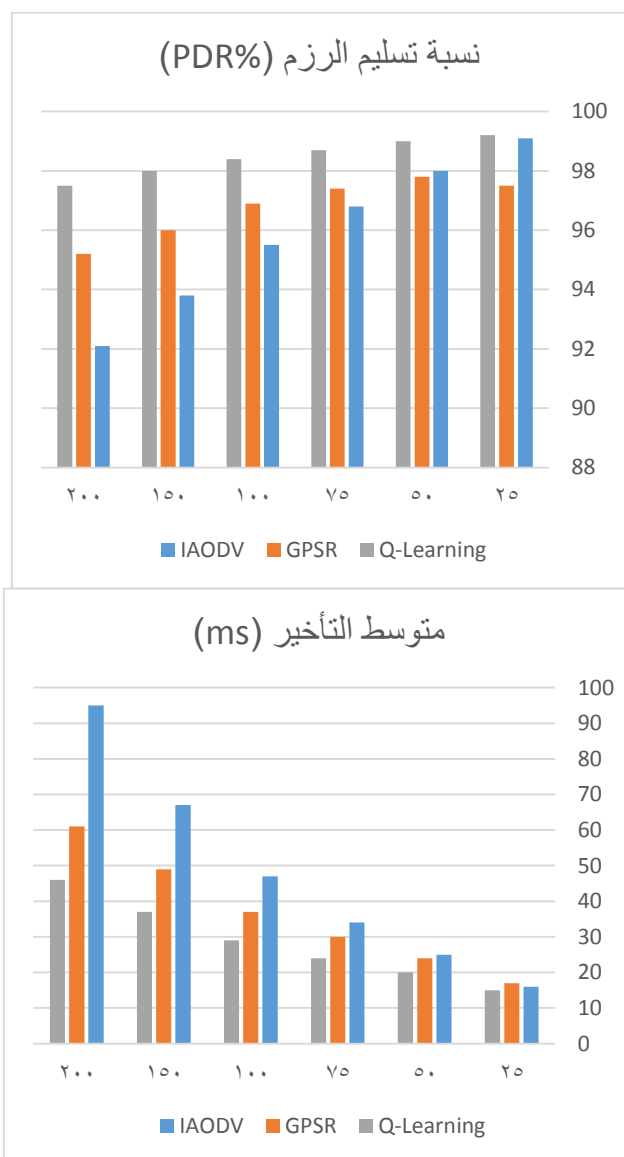
أظهرت نتائج السيناريو السادس أن زيادة عدد وحدات البنية التحتية (RSU) تؤدي إلى تحسين أداء بروتوكولي IAODV و GPSR بشكل ملحوظ، حيث ارتفعت نسبة تسليم الرزم (PDR) والإنتاجية (Throughput)، في حين انخفض متوسط التأخير (End-to-End Delay) ونسبة فقدان الرزم (PLR) وحمل التوجيه (Routing Overhead) مع زيادة عدد وحدات 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:

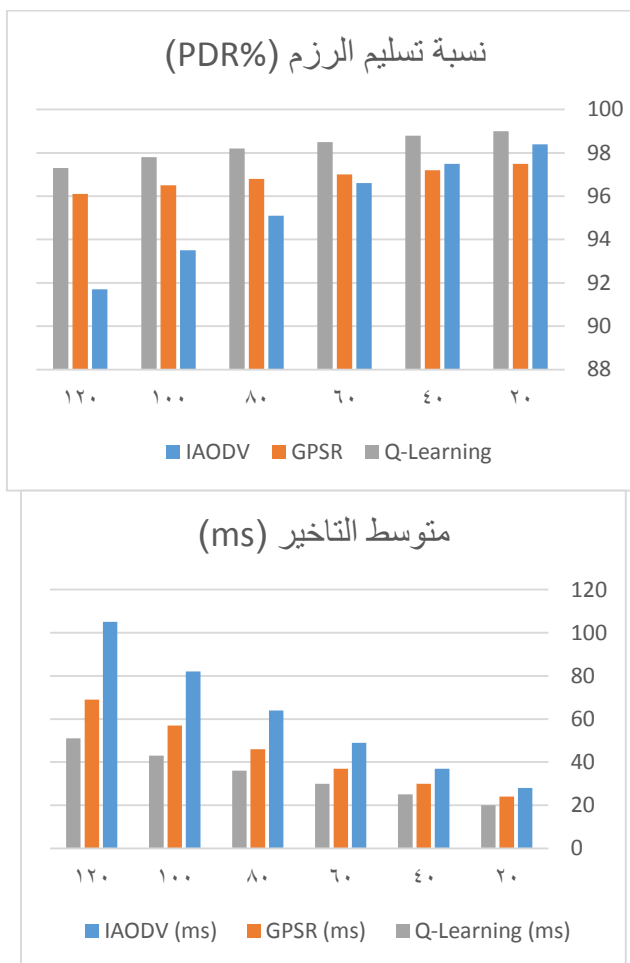


الشكل (19) نسبة تسليم الرزم ومتوسط التأخير للسيناريو السابع مع تغيير كثافة المركبات.

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



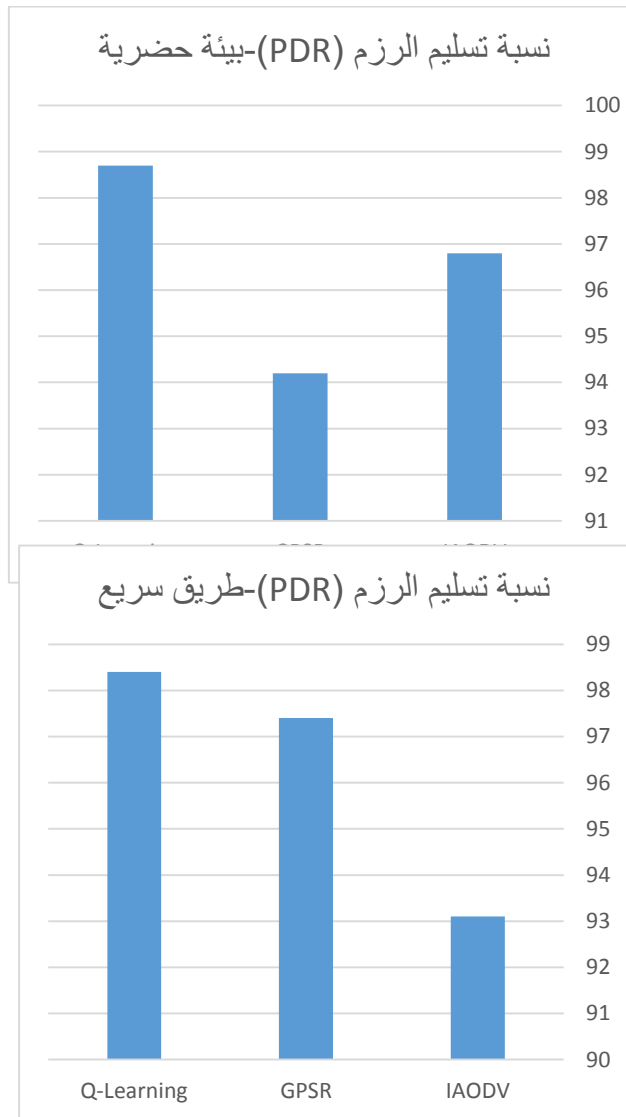
الشكل (20) نسبة تسليم الرزم ومتوسط التأخير للسيناريو السابع مع تغير سرعة المركبات.

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

تأثير بارامترات المزج الميكانيكي على جودة طلاء الإيبوكسي مع إضافة

ثاني أكسيد التيتانيوم TiO_2

*راما جعبري، ** د. أحمد سلامة، *** د. رامي منصور

الملخص

تستخدم الطلاءات لعزل السطوح الفولاذية عن البيئة المحيطة وحمايتها من التآكل ولتحسين مظهرها، وتم في هذه الدراسة التجريبية، إضافة ثاني أكسيد التيتانيوم TiO_2 ، كمادة مألثة الى طلاءات الإيبوكسي، بهدف تحسين درجة التصاق الطلاء بسطح المعدن، لمقاومة العوامل البيئية، لهذا السبب تم توجيه الاهتمام الى تحديد بارامترات عملية مزج TiO_2 مع الطلاء.

تم تحضير مجموعة من الخلائط التي تحتوي على الطلاء مع نسب مختلفة من TiO_2 (1-3-5) %، ودراسة تأثير عملية المزج الميكانيكي (سرعة مزج - زمن مزج) على تجانس المزيج، للوصول الى أفضل انتشار للأكسيد ضمن طلاء الإيبوكسي، دون التأثير بشكل سلبي على بنية الطلاء. ومن ثم تم تطبيق أفضل مزيج بشكل يدوي على عينات فولاذية معدة للاختبار.

تبين من خلال الدراسة الميكروسكوبية أن أفضل بارامترات لعملية المزج هي السرعة 1310 r.p.m، وزمن مزج هو min

30.

الكلمات المفتاحية: عينات فولاذية، سرعة المزج، زمن المزج، الالتصاق.

* طالبة دكتوراه - قسم هندسة التصميم والإنتاج - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة اللاذقية - اللاذقية - سورية.

ramajaabari87@gmail.com، rama.jaabari@tishreen.edu.sy

** أستاذ مساعد - قسم هندسة التصميم والإنتاج - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة اللاذقية - اللاذقية - سورية.

salamahamad@gmail.com

*** أستاذ - قسم هندسة التصميم والإنتاج - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة اللاذقية - اللاذقية - سورية.

Effect of mechanical mixing parameters on the quality of epoxy coating with the addition of titanium dioxide (TiO_2)

*Rama Jaabari , ** Dr.Ahmad salamah , ***Dr.Rami Mansour

Abstract

Coatings are used to isolate steel surfaces from the surrounding environment, protect them from corrosion, and improve their appearance. In this experimental study, titanium dioxide (TiO_2) was added as a filler to epoxy coatings to enhance the coating's adhesion to the metal surface and its resistance to environmental factors. Therefore, attention was focused on determining the parameters of the TiO_2 mixing process with the coating.

A range of mixtures containing the coating with varying percentages of TiO_2 (1%, 3%, and 5%) were prepared. The effect of mechanical mixing (mixing speed and mixing time) on mixture homogeneity was investigated to achieve optimal oxide dispersion within the epoxy coating without negatively impacting the coating structure. The optimal mixture was then manually applied to steel samples prepared for testing.

Microscopic analysis revealed that the best mixing parameters were a speed of 1310 rpm and a mixing time of 30 minutes.

Keywords: Steel samples, mixing speed, mixing time, adhesion.

* PHD student- Dept. of design and production Engineering - Faculty of Mechanical and Electrical Engineering -LattakiaUniversity- Lattakia -Syria.

rama.jaabari@tishreen.edu.sy, ramajaabari87@gmail.com

** Associate Professor- Dept. of design and production Engineering - Faculty of Mechanical and Electrical Engineering - Lattakia University- Lattakia – Syria.

salamahahmad@gmail.com

*** Professor- Dept. of design and production Engineering - Faculty of Mechanical and Electrical Engineering - Lattakia University - Lattakia -Syria.

1- مقدمة:

تُمثل مشكلة تأمين طلاءات جيدة من حيث درجة التصاقها وثباتيتها على السطوح المعدنية أمراً بالغ الأهمية في قطاع الانشاءات المعدنية، لعزل السطوح المعدنية عن البيئات الخارجية المحيطة، التي تسبب تآكلها، وبالتالي تأمين حماية جيدة لهذه السطوح المعدنية، عن طريق عزلها عن الوسط المحيط، مما يؤدي لزيادة عمرها الاستثماري، وتقليل تكاليف الصيانة.

إن تحسين خواص الطلاء وتطوير طلاءات جديدة مازال يشغل الباحثين، لتأمين أفضل عملية عزل وحماية للسطوح المعدنية من العوامل البيئية التآكلية القاسية [1].

يعد تآكل المنشآت المعدنية في البيئات البحرية والشاطئية تحدياً هندسياً كبيراً، ناتجاً عن تفاعلات كهروكيميائية متسارعة بفعل الأملاح، الرطوبة العالية والاكسجين. فهي تسبب تدهور الهياكل والمنشآت البحرية والشاطئية. ويزداد تآكل الفولاذ الكربوني في هذه البيئة البحرية. ولمنع حدوث ذلك تُستخدم طلاءات عضوية وغير عضوية متنوعة، كالطلاءات البولييمرية. وتبين أن استخدام طلاء بولييمري مع إضافة ثاني أكسيد التيتانيوم النانوي يؤمن حماية فائقة للفولاذ ضد التآكل، ويُظهر أداءً أفضل نسبياً من أنواع الطلاءات البولييمرية الأخرى [2].

وتعد راتنجات الإيبوكسي من أكثر الطلاءات البولييمرية المستخدمة، بسبب خواصها الفيزيائية والميكانيكية العالية. ويشكل المزج المناسب إحدى الخطوات الأولى لتحقيق هذه الخصائص، وهو أمر بالغ الأهمية، لضمان المعالجة الكاملة والسليمة والحفاظ على القوة والأداء الأمثل للإيبوكسي في المنتج النهائي. ويجب دائماً أن تتم عملية مزج راتنجات الإيبوكسي مع (المقسي والمواد المألثة) في درجات حرارة لا تتجاوز المجال الموصى به، لأن ذلك قد يؤثر على زمن المعالجة وخصائص المادة الناتجة [3].

يعتبر الإيبوكسي من البولييمرات المتصلبة حرارياً، ويتكون من جزأين هما الراتنج والمقسي. تبدأ عملية البلمرة بمزج الراتنج مع المقسي (يشار إليه أحياناً باسم المحفز). تتشكل راتنجات الإيبوكسي روابط متشابكة خلال هذه العملية، وتنتج شبكة بولييمرية ثلاثية الأبعاد، بخواص ميكانيكية عالية. نتيجة لهذه العملية الكيميائية الضرورية، يعدّ مزج الراتنج والمقسي بشكل صحيح، وبالنسب الصحيحة التي تحددها الشركة المصنعة أمراً بالغ الأهمية [3].

وتلعب طريقة مزج المكونات (إيبوكسي، مقسي، مواد مالئة) دوراً بالغ الأهمية في جودة الطلاء الناتج، حيث يتمثل المزج الصحيح بعدم وجود تكتلات في التركيبة اللاصقة، وعدم ترسب المكونات، وعدم وجود فقاعات غازية [4].

ومن طرق تحضير لاصق الإيبوكسي المحتوي على حبيبات مالئة هي طريقة المزج المباشر. وتتمثل هذه الطريقة في إدخال المادة المالئة مباشرة في الراتنج السائل وخط المكونات ميكانيكياً أو باستخدام الأمواج فوق الصوتية [4].

تُعتبر حبيبات ثاني أكسيد التيتانيوم (TiO_2)، مواد إضافة بالغة الأهمية في مجال الطلاءات، ويعود ذلك أساساً إلى خصائصها الاستثنائية، وفعاليتها في تعزيز مقاومة العوامل البيئية. وتشمل هذه الخصائص: الخمول الكيميائي (Chemical Inertness)، مقاومة الأشعة فوق البنفسجية (UV Resistance)، تأثير الطبقة الفاصلة (Barrier Effect) ضد العوامل المسببة للتآكل، تحسين الالتصاق (Enhanced Adhesion) مما يضمن عمر خدمة أطول وفعالية أفضل لطبقة الحماية (الطلاء) بمرور الزمن [1].

وانطلاقاً من أهمية تطوير الطلاءات البوليميرية لحماية المنشآت المعدنية في البيئة البحرية، يتم العمل في عديد من الأبحاث ضمن هذا المجال، حيث بينت دراسة أجريت لتصميم طلاءات ذكية من مركبات البوليمر المشترك poly(aniline-co-phenetidine) مع SiO_2 ، أن حبيبات SiO_2 تعيق التحلل الحراري لسلسلة البوليمر، عن طريق العمل كنقاط تشابك في مادة الإيبوكسي. وتم تعديل هذه الطلاءات، بإضافة مركبات إلى راتنجات الإيبوكسي. حيث أظهرت النتائج الكهروكيميائية من خلال دراسة السلوك الكهروكيميائي للطلاءات بعد غمر العينات في محلول كلوريد الصوديوم 3.5%، عن طريق قياس تغيرات Open Circuit Potential (OCP) مع الزمن، واستقطاب الجهد الديناميكي، والتحليل الطيفي للمقاومة الكهروكيميائية Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS). وجود تحسن واضح في مقاومة الطلاءات للتآكل عند دمج مركبات البوليمر مع الإيبوكسي. وتحمل الطلاءات المركبة للغمر في محلول كلوريد الصوديوم بنسبة 3.5 % لفترة زمنية أطول [5].

ولبيان تأثير طرق مزج الاضافات مع الإيبوكسي على بعض الخصائص الميكانيكية لبنية الإيبوكسي المعدلة. تم في الدراسة [4] تعديل راتنج الإيبوكسي من نوع Epidian 57 مع عامل تقسية Z-1، باستخدام ثلاثة مواد مألوفة: NanoBent ZR2 montmorillonite، وكربونات الكالسيوم $CaCO_3$ ، والكربون المنشط CWZ-22 للمقارنة بينها، بالإضافة الى عينات غير معدلة. وتمت عملية مزج التركيبات باستخدام ست طرق مختلفة، مع معايير متغيرة مثل (نوع ذراع المزج، ودرجة إزالة الهواء، ودرجة حرارة راتنج الإيبوكسي)، وطبقت ثلاث سرعات مزج -1170-460 r.p.m (2500). وأظهرت النتائج أن أعلى قوة شد للتركيبات اللاصقة كانت عند أعلى سرعة مزج.

ووفقاً للمراجع العلمية يعد المزج بالقص، كأحدى الطرق الجيدة، للوصول الى تشتت جيد للمواد المألوفة النانوية في البوليمر. حيث أجريت دراسة لتأثير سرعة وزمن مزج القص (Shear Mixing) على الخواص الميكانيكية، لمواد مركبة من صفائح الغرافين النانوي (GNP) Graphene nanoplatelet، فبهذه الطريقة تم تقطيع التكتلات (agglomerates) إلى جزيئات أصغر، وفي حالة صفائح الغرافين النانوية يُمكنها تقشير طبقات الغرافين. تم في هذه الدراسة مزج نسبة تتراوح بين 5-0.1% من صفائح الغرافين النانوية مع الإيبوكسي وذلك بسرعات مختلفة (5000-4000-3000-2000-1000) r.p.m ولفترات زمنية مختلفة (ساعة وساعتين). وأظهرت النتائج أن سرعة وزمن المزج بالقص يؤثران على حجم التكتلات، مما يؤثر بدوره على الخواص الميكانيكية للمركب [6].

وفي دراسة أخرى تم فيها تحضير وتوصيف وتحسين الخواص الحرارية والميكانيكية لمركبات الإيبوكسي، وأكسيد التيتانيوم النانوي، حيث تم أولاً تحضير حبيبات الأكسيد بأبعاد دون الميكرون، واستخدمت هذه الحبيبات لاحقاً كمادة مألوفة غير عضوية لبوليمرات الإيبوكسي المعالجة حرارياً. حضرت مركبات الإيبوكسي-أكسيد التيتانيوم النانوي من خلال مزج حبيبات الأكسيد ميكانيكياً مع راتنج الإيبوكسي السائل، وتراوحت نسبة حبيبات الأكسيد المضافة للإيبوكسي بين 2.5-10%. وُجد أن حبيبات الأكسيد التي يقل حجمها عن الميكرون تحسن بشكل ملحوظ درجة حرارة الانتقال الزجاجي (glass transition temperature)، والثباتية تجاه الأكسدة الحرارية، وقوة الشد، ومعامل

يونغ لبوليمرات الإيبوكسي. كما أظهرت مركبات الإيبوكسي - أكسيد التيتانيوم التي تحتوي على حبيبات بنسبة 5 % أفضل أداء [7].

وأظهرت دراسة أخرى تأثير طريقة المزج على الخواص الميكانيكية، ومقاومة التآكل لمركبات الإيبوكسي مع أكسيد الزنك، حيث تم تدعيم راتنجات الإيبوكسي بمواد مالئة نانوية مختلفة من أكسيد الزنك (حبيبات أكسيد الزنك النانوية التجارية (commercial ZnO nanoparticles)، وأكسيد الزنك المعاد تدويره (recycled ZnO)، وحبيبات أكسيد الزنك النانوية المعدلة وظيفياً (functionalized ZnO NPs))، بهدف الحصول على مركبات أكسيد الزنك-إيبوكسي ذات خواص ميكانيكية مناسبة، وقوة تماسك عالية، ومقاومة جيدة للتآكل. حيث تعتمد الخواص النهائية لمركبات أكسيد الزنك-إيبوكسي على عدة عوامل، مثل نوع وكمية المواد المالئة النانوية، ونوع راتنج الإيبوكسي، وعامل التصلب، وطرق التحضير واستخدمت فيها ثلاث طرق وهي: البلمرة الموضعية (in situ polymerization)، والمزج في المحلول (solution blending)، والمزج الميكانيكي (mechanical mixing). وقد أثبتت هذه المركبات أنها مواد قيّمة لمجموعة واسعة من التطبيقات، بما في ذلك تطوير الطلاءات المقاومة للتآكل والواقية من الأشعة فوق البنفسجية، وفي صناعة المواد اللاصقة والصناعات الكيميائية، أو في مواد البناء أو الإلكترونيات [8].

ومن الطرق الأخرى المستخدمة للحصول على مركبات معدلة من الإيبوكسي مع مواد مالئة، المزج بالأمواج فوق الصوتية (sonication)، حيث أجريت دراسة لمعرفة تأثير سعة الأمواج فوق الصوتية (sonication amplitude) وزمن المزج على الخواص الميكانيكية والحرارية لراتنج الإيبوكسي المعدل بإضافة 1% من الطين النانوي (nanoclay). وأثبت أن الخواص الميكانيكية لمادة الإيبوكسي تعتمد على مدى تشتت الطين النانوي فيها، والذي يتأثر بدوره بمعايير المزج. وقد تم الحصول على أفضل الخواص عند سعة موجات فوق صوتية تبلغ $260 \mu m$ وزمن مزج 10 min [9].

كما تم اعتماد طريقة المزج بالأمواج فوق الصوتية لبوليمير الإيبوكسي مع إضافة حبيبات كربيد السيليكون الميكروية بأقطار μm (2-4) وينسب تدعيم متدرجة من حبيبات الكربيد (%35-30-25-20-15-10-5) لتحسين الخصائص الميكانيكية للإيبوكسي بهدف استخدامه في مجالات عديدة كاللواصق النوعية والطلاءات الحرارية. وبينت نتائج التوصيف الميكانيكي تحسناً ملحوظاً في الخصائص الميكانيكية المدروسة لراتنج الإيبوكسي المدعم بحبيبات كربيد السيلكون مقارنة مع راتنج الإيبوكسي النقي، وكانت النسبة المثلى للتدعيم 25% [10].

ويهدف تحسين الحماية من التآكل للفولاذ، تم تحضير طلاءات بوليميرية مركبة نانوية ذات أساس بوليمري من البولي ميثيل ميثاكريلات (PMMA)، مدعم بحبيبات أكسيد تيتانيوم نانوي بقطر وسطي للحبيبات 75 نانومتر وينسب (%2-1.5-1-0.5-0). رسبت الطلاءات على سطوح العينات الفولاذية، باستخدام طريقة الغمر، وتم اجراء اختبار التآكل من خلال الغمر في محاليل حمضية وملحية عند درجة حرارة الغرفة. وأظهرت النتائج أن مقاومة التآكل للطلاءات المركبة النانوية PMMA/TiO₂ تبدي تحسناً ملحوظ مقارنة بطلاءات PMMA النقية في أوساط التآكل الحمضية والملحية [11].

ولفهم العوامل الرئيسية المؤثرة في درجة التصاق الطلاء بشكل أفضل، تم إجراء اختبار التصاق الشريط المقطعي، وفقاً للمواصفة القياسية (ASTM D3359-22)، باستخدام جهاز اختبار مقطعي بمسافة قطع تبلغ 2mm، لعينات فولاذية مطلية بالإيبوكسي النقي وإيبوكسي مدعم بالغرافين، بنسب مختلفة (%4-2-1-0.5). أظهرت النتائج أن لطلاء الإيبوكسي النقي تصنيف B5 مما يشير إلى عدم إزالة الطلاء والتصاق ممتاز، بينما الطلاءات المدعمة بالغرافين كانت بتصنيف B3 وهو ما يتوافق مع إزالة جزئية للطلاء على طول خطوط القطع الشبكية [12].

كما تم تقييم جودة الالتصاق، وفقاً للمواصفة القياسية (ASTM D3359-22)، لطلاء الإيبوكسي- زنك، المطبق بطريقة البخ على عينات فولاذية، مع التمديد باستخدام التتر، بنسب مختلفة (%50-40-30-20-10)، وذلك بالاعتماد على الطريقتين (B,A) لهذه المواصفة، وأظهرت نتائج الاختبارات التصاق ممتاز بتقييم 5، مما يشير إلى عدم وجود تقشر [13].

2- أهمية البحث وأهدافه:

تكمُن أهمية البحث في تحديد تأثير بارامترات عملية المزج الميكانيكي (زمن - سرعة) من خلال:

- دراسة بارامترات عملية المزج المؤثرة على تجانس طلاءات (إيبوكسي - ثاني أكسيد التيتانيوم الميكروي) باعتماد التحليل الوصفي من خلال إجراء الفحص البصري بالميكروسكوب الرقمي للطلاءات المحضرة (بعد تكبيرها بمقدار 500X) لتقويم تجانسها.
- دراسة الطلاءات المحضرة من خلال طلاء عينات فولاذية مخبرية مع الأخذ بعين الاعتبار سماكة الطلاء وقوة التصاقه.
- تحديد أفضل بارامترات المزج المحققة للتجانس والالتصاق المناسب.

3- طرائق البحث ومواده:

■ المواد المستخدمة في البحث:

- عينات من الفولاذ Kst37-3 ، وله التركيب الكيميائي الموضح في الجدول 1.

الجدول 1. التركيب الكيميائي للفولاذ المستخدم Kst37-3 .

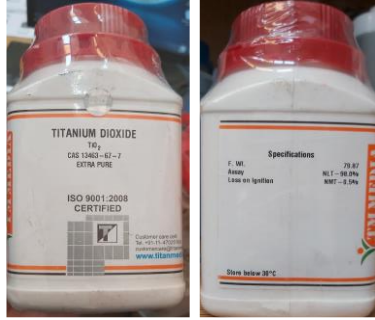
العنصر	Fe	C	Ni	Cr	Mn	Si	Mo	S	P
الوزن %	98.5	0.170	0.070	0.0571	0.246	0.222	0.0074	0.040	0.040

- طلاء إيبوكسي تجاري من شركة (Alboughli) المحلية الموضح في الشكل 1.



الشكل 1. طلاء الإيبوكسي المستخدم.

- ثاني أكسيد التيتانيوم (TiO_2) المخبري، المتوافر في السوق المحلية، بشكل عبوات لها المواصفات الموضحة بالشكل 2. والمواد المخبرية العامة (Extra Pure)، هي ذات حجم حبيبات بمقياس ميكروي بين $0.5-2 \mu\text{m}$.



الشكل 2. ثاني أكسيد التيتانيوم المستخدم.

■ أدوات القياس المستخدمة في البحث:

- ميزان إلكتروني من نوع sartorius بدقة ± 0.01 غرام.
- ميكروسكوب رقمي (Digital Microscope) بتكبير $500 \times$ ، المبين في الشكل 3 لمراقبة عينات المزج المحضرة .



الشكل 3. الميكروسكوب الرقمي (Digital Microscope) بتكبير $500 \times$.

-جهاز قياس السماكة TT260 الموضح بالشكل 4، لمعرفة سماكة طبقة الطلاء.



الشكل 4. جهاز قياس سماكة طبقة الطلاء.

- تم إجراء اختبار التصاق الطلاء، باختبار الشريط وفقاً للمواصفة القياسية ASTM D3359، ويصف هذا الاختبار طريقتين لاختبار تقييم التصاق الشريط بالطلاء، الطريقة A (اختبار شريط القطع X) والطريقة B (اختبار شريط الشبكة المتقاطعة) كما هو مبين في الشكل 5. وتعتمد الطريقة المختارة على السماكة الكلية للطلاء المراد تقييمه. حيث تستخدم الطريقة A بشكل أساسي على الطلاءات التي تزيد سماكتها عن (125 ميكرومتر)، بينما تُستخدم الطريقة B بشكل عام لاختبار الطلاءات التي تقل سماكتها عن (125 ميكرومتر). وطُوِّر هذا الاختبار لتقييم التصاق الطلاء بالفولاذ، ولكن يمكن استخدامه على ركائز صلبة أخرى. كما استُخدم بنجاح على ركائز أكثر ليونة (مثل الخشب والجص) [14]. وفي هذه الدراسة تم اعتماد الطريقة A.

CLASSIFICATION OF ADHESION TEST RESULTS		
CLASSIFICATION	PERCENT REMOVED	SURFACE OF CROSS-CUT AREA FROM WHICH FLAKING HAS OCCURRED FOR SIX PARALLEL CUTS AND ADHESION RANGED BY PERCENT
5B	0% None	
4B	Less than 5%	
3B	5 - 15%	
2B	15 - 35%	
1B	35 - 65%	
0B	Greater than 65%	
Classification		Surface of "X" - Cut from which flaking/peeling has occurred
5A	No peeling or removal	None
4A	Trace peeling or removal along incisions or at their intersection	
3A	Jagged removal along incisions up to 1/16" on either side	
2A	Jagged removal along most of incisions up to 1/8" on either side	
1A	Removal from most of the area of the X under the tape	
0A	Removal beyond the area of the X	

الشكل 5. تصنيف نتائج اختبار الالتصاق وفق الطريقة A و B.

■ تحضير عينات الاختبار:

تم تحضير عينات من الفولاذ بأبعاد $(100 \times 80 \times 5)$ mm، وأجري تنظيف أسطح هذه العينات، بواسطة فرشاة فولاذية مثبتة على فارزة عامودية، للحصول على سطح أملس ونظيف. ومن بعدها تم تنظيفها بواسطة الاستيون، للتأكد من عدم وجود بقايا صدأ أو أوساخ أو شحوم على سطحها قبل تطبيق الطلاء.

ولتحضير المزيج من طلاء الايبوكسي مع ثاني أكسيد التيتانيوم بنسب $(1,3,5)\%$ ، تم استخدام طريقة المزج الميكانيكي، بواسطة خلاط كهربائي، والذي يؤمن سرعة وقوة ثابتتين، مزود بريشة مزج مخبرية خاصة ذات الأبعاد التالية (قطر عمود الدوران 5mm، قطر الريشة 22mm، عدد الشفرات 4، عرض الشفرة الواحدة 9mm)، لمزج كميات صغيرة من الطلاء تكفي لتحضير العينات المطلوبة كما هو موضح في الشكل 6.



الشكل 6. عملية المزج الميكانيكي بواسطة

خلاط كهربائي مزود بشفرة مزج.

واستخدمت سرعات مزج مختلفة $(560, 920, 1310, 1510)$ r.p.m، وذلك عند أزمنة مزج مختلفة حسب كل سرعة، للوصول الى أفضل انتشار للأكسيد، ضمن الايبوكسي دون التأثير بشكل سلبي في بنية الايبوكسي.

تأثير بارامترات المزج الميكانيكي على جودة طلاء الإيبوكسي مع اضافة ثاني أكسيد التيتانيوم TiO_2

وبعدها طبقت على سطح العينات الفولاذية طبقة أولى من أساس إيبوكسي يدوياً، بواسطة فرشاة، ووضعت جانباً لتجف لمدة 24 ساعة، وتليها طبقة ثانية من المزيج المحضر عند كل نسبة من الاكسيد بعد إضافة المقسي وأيضاً استغرقت عملية الجفاف 24 ساعة، وتم تكرار هذه العملية لـ (3) عينات عند كل نسبة مضافة من ثاني أكسيد التيتانيوم.

وذلك بآلية مشابهة للخطوات المتبعة في عملية تحضير تركيبات لاصقة غير معدلة باستخدام طريقة المزج الميكانيكي، الموصى بها من قبل الشركات المصنعة [4].

وتم قياس السماكة لكل طبقة طلاء، ويوضح الجدول 2 بارامترات المزج المستخدمة في تحضير الطلاء لكل من العينات المطلوبة المحضرة، ويبين الجدول 3 عدد طبقات الطلاء المطبقة على العينات الفولاذية وسماكتها.

الجدول 2. بارامترات المزج المستخدمة في تحضير الطلاء لكل من العينات المطلوبة المحضرة

رقم العينة	نوع الطلاء	سرعة المزج r.p.m	زمن المزج Min
العينة 1 EP (إيبوكسي فقط)	أساس إيبوكسي + طبقة إيبوكسي	-	-
العينة 2	أساس إيبوكسي + إيبوكسي مع TiO_2 (1%)	560، 920، 1310، 1510	10، 15، 20، 30، 45، 60، 75، 90، 120
العينة 3	أساس إيبوكسي + إيبوكسي مع TiO_2 (3%)	560، 920، 1310، 1510	10، 15، 20، 30، 45، 60، 75، 90، 120
العينة 4	أساس إيبوكسي + إيبوكسي مع TiO_2 (5%)	560، 920، 1310، 1510	10، 15، 20، 30، 45، 60، 75، 90، 120

الجدول 3. عدد طبقات الطلاء المطبقة على العينات الفولاذية وسماكاتها.

رقم العينة	عدد طبقات الطلاء	سماكة طبقة الأساس μm	سماكة طبقة طلاء الثانية μm	السماكة الكلية للطلاء μm
العينة 1 (EP)	2	159	123	282
العينة 2	2	138	143	281
العينة 3	2	121	195	316
العينة 4	2	155	157	312

-4

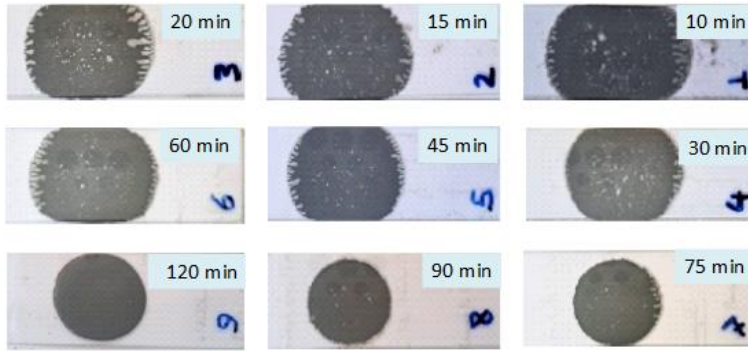
النتائج والمناقشة:

4-1 تحديد سرعة وزمن المزج الأفضل بالفحص البصري باستخدام الميكروسكوب الرقمي:

تمت عملية المزج لنسب مختلفة من ثاني أكسيد التيتانيوم (TiO_2) مع طلاء الايبوكسي للوصول الى أفضل سرعة وزمن مزج كما يلي:

- مزج طلاء الايبوكسي مع ثاني أكسيد التيتانيوم TiO_2 بنسبة 3%، عند سرعة مزج r.p.m 560:

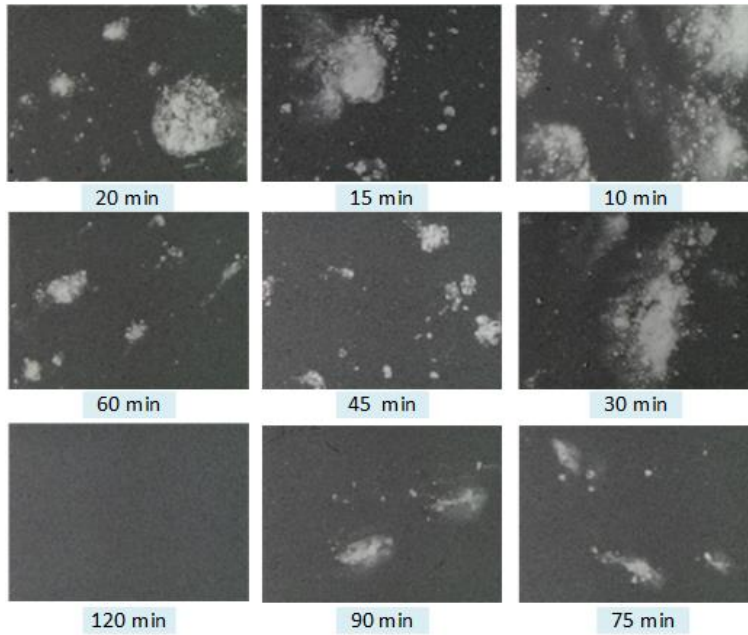
أخذت عينات من المزيج عند فترات زمنية مختلفة (10,20,30,45,60,90,120)min، كما هو موضح في الشكل 7 لمراقبة التغيرات الحاصلة على مدى انتشار الاكسيد ضمن بنية الطلاء.



الشكل 7. صور فوتوغرافية لعينات من طلاء الإيبوكسي الحاوي على ثاني أكسيد

التيتانيوم TiO_2 بنسبة 3%، سرعة المزج 560 r.p.m.

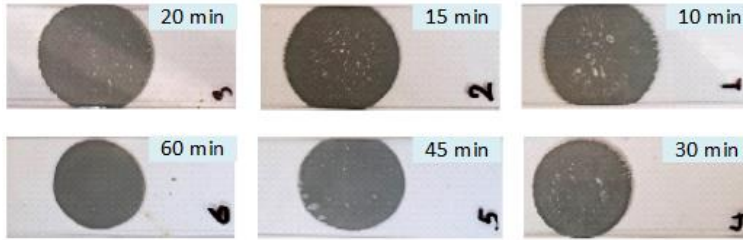
وبعدها تم أخذ صور مجهرية لهذه العينات بواسطة الميكروسوب، كما هو مبين في الشكل 8.



الشكل 8. صور ميكروسكوبية بتكبير 500 X لطلاء الإيبوكسي الحاوي على ثاني أكسيد

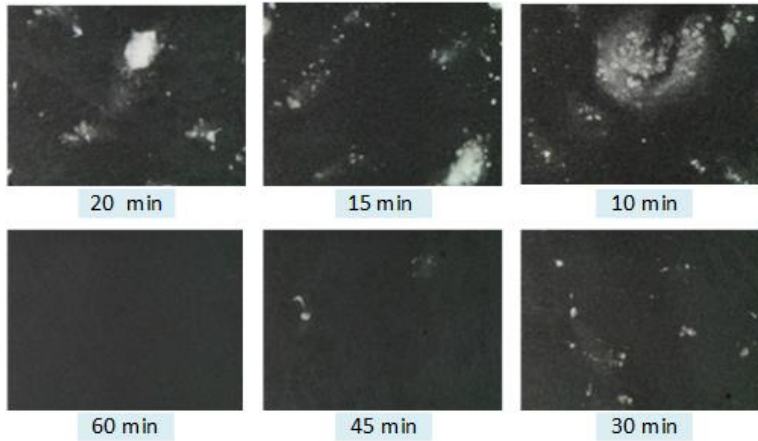
التيتانيوم TiO_2 بنسبة 3%، وسرعة المزج 560 r.p.m.

● مزج طلاء الايبوكسي مع ثاني أكسيد التيتانيوم TiO_2 بنسبة 3%، سرعة مزج 920 r.p.m: تمت عملية المزج عند أزمنة مختلفة (10-15-20-30-45-60) min، وأخذت عينات من المزيج عند كل زمن محدد، ولوحظ عند المزج بعد 30 min زيادة كثافة المزيج، وتبين من خلال المراقبة البصرية أن أفضل زمن مزج عند السرعة 920r.m.p كان ساعة واحدة، حيث لم تلاحظ أية تكتلات للأوكسيد على السطح. كما هو موضح في الشكل 9 الذي يمثل صور فوتوغرافية للعينات.



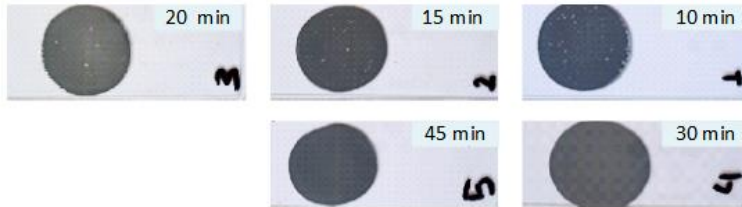
الشكل 9. صور فوتوغرافية لعينات من طلاء الإيبوكسي الحاوي على ثاني أكسيد التيتانيوم TiO_2 بنسبة 3%، سرعة المزج 920 r.p.m .

وبعدها وضعت العينات جانباً في درجة حرارة المخبر لكي تجف، ليتم أخذ صور ميكروسكوبية لها، كما هو موضح بالشكل 10:



الشكل 10. صور ميكروسكوبية بتكبير $500 \times$ لطلاء الايبوكسي الحاوي على ثاني أكسيد التيتانيوم TiO_2 بنسبة 3%، سرعة المزج 920 r.p.m.

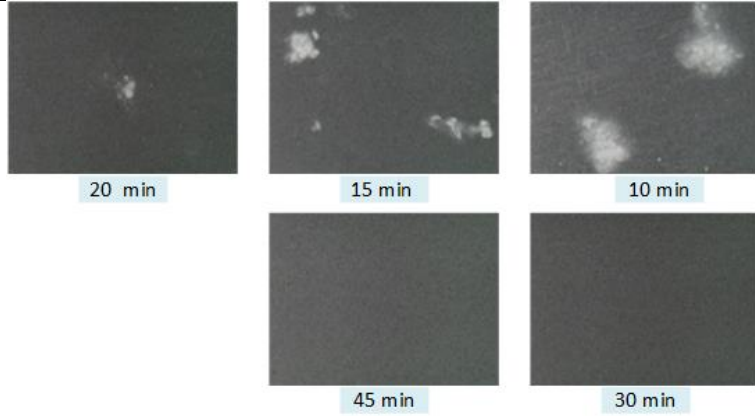
- مزج طلاء الايبوكسي مع ثاني أوكسيد التيتانيوم TiO_2 بنسبة 3%، سرعة مزج r.p.m 1310: أخذت عينات من المزيج عند فترات زمنية مختلفة (10,20,30,45)min كما يظهر الشكل 11.



الشكل 11. صور فوتوغرافية لعينات من طلاء الإيبوكسي الحاوي على ثاني أكسيد التيتانيوم TiO_2 بنسبة 3%، سرعة المزج 1310 r.p.m.

يوضح الشكل 11 أن أفضل عينة للمزج، تم الحصول عليها كانت عند الفترة الزمنية 30 min، حيث لوحظ بعد هذه المدة الزمنية تولد حرارة كبيرة أثناء عملية المزج عند هذه السرعة، وأثر ذلك بدوره على طلاء الايبوكسي وأدى إلى تدهوره حرارياً وأصبح ذا قوام عجيني (مطاطي) حيث بلغت درجة حرارة المزيج حوالي $47^{\circ}C$. وحسب الارشادات الصناعية وفق شركة United Resin تتراوح درجة الحرارة المثالية لمزج ومعالجة راتنج الإيبوكسي عادة بين $21-29^{\circ}C$. ضمن هذا المجال، تكون اللزوجة أقل، مما يسهل عملية المزج ويعطي مزيجاً أكثر تجانساً. فقد تُسرّع درجات الحرارة المرتفعة عملية المعالجة، مما يؤدي إلى تقصير وقت العمل واحتمال حدوث تفاعلات ناشرة للحرارة غير مرغوب فيها، وقد يؤدي إلى تشقق حراري وإضعاف تماسك الطلاء. اما عند درجات الحرارة المنخفضة، قد يصبح الإيبوكسي شديد اللزوجة، كما تزداد احتمالية ظهور فقاعات الهواء. من المهم عدم المزج بالقرب من مصادر الحرارة (بما في ذلك ضوء الشمس) أو التبريد [3].

ويظهر الشكل 12 صور ميكروسكوبية المأخوذة للعينات عند السرعة 1310 r.p.m و الأزمنة (10,20,30,45) min .

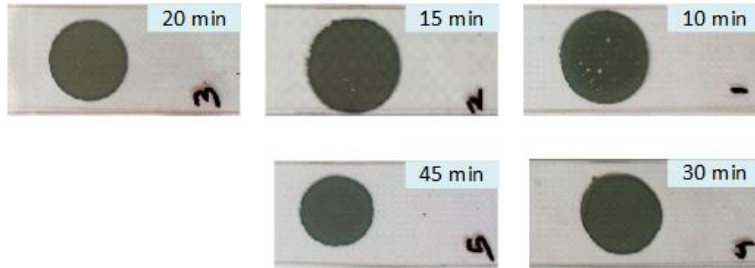


الشكل 12. صور ميكروسكوبية بتكبير $500\times$ لطلاء الايبوكسي الحاوي على ثاني أكسيد التيتانيوم TiO_2 بنسبة 3%، سرعة المزج 1310 r.p.m.

مما يؤكد أن المدة الزمنية 30 min كافية لمزج الاكسيد بشكل متجانس مع الطلاء وقبل أن تبدأ بنية الطلاء بالتدهور.

- مزج طلاء الايبوكسي مع ثاني أكسيد التيتانيوم TiO_2 بنسبة 3%، عند سرعة مزج r.p.m. 1510:

أخذت عينات من المزيج عند فترات زمنية مختلفة (10, 20, 30, 45) min كما هو في الشكل 13.

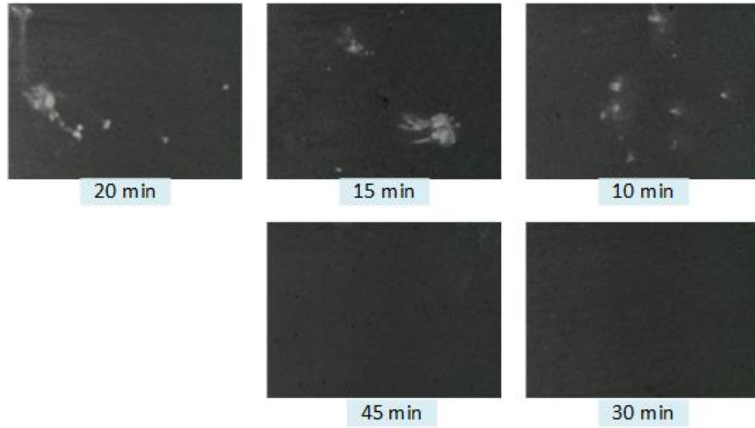


الشكل 13. صور فوتوغرافية لعينات من طلاء الايبوكسي الحاوي على ثاني أكسيد التيتانيوم TiO_2 بنسبة 3%، سرعة المزج 1510 r.p.m.

يبين الشكل 13 أن أفضل عينة للمزيج تم الحصول عليها عند الزمن 30 min، حيث لوحظ بعد هذا الزمن تولد حرارة كبيرة أثناء عملية المزج مما أثر بدوره على طلاء الايبوكسي وأدى إلى

تدهوره حرارياً وأصبح ذو قوام عجيني (مطاطي)، وهذه النتيجة مشابهة لمثيلتها التي تم الحصول عليها عند السرعة 1310 r.p.m والزمن 45min، مما يشير الى عدم إمكانية اعتماد هذه المدة الزمنية.

وبعدها أخذت صور ميكروسكوبية لهذه العينات، كما هو موضح بالشكل 14:

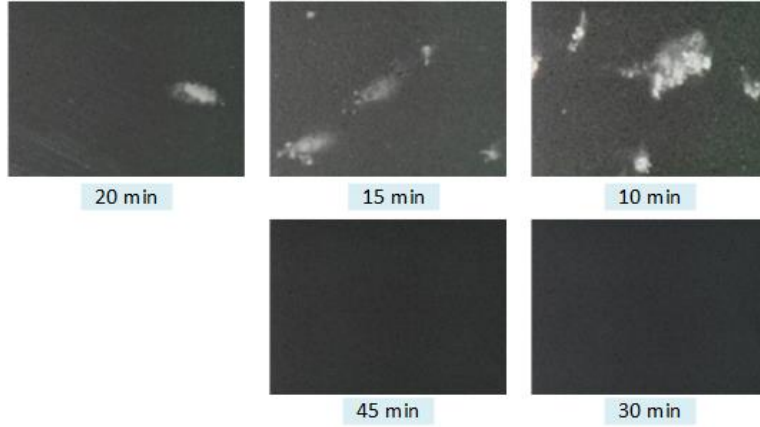


الشكل 14. صور ميكروسكوبية بتكبير $500 \times$ لطلاء الإيبوكسي الحاوي على ثاني أكسيد التيتانيوم TiO_2 بنسبة 3%، سرعة المزج 1310 r.p.m.

ومن خلال الشكل 14 وجد أن أفضل زمن مزج عند السرعة 1310 r.p.m كان عند الزمن 30 min، نلاحظ بعدها تكون فقاعات إضافة لتدهور بنية الإيبوكسي عند الزمن 45min. أظهرت نتائج الصور الميكروسكوبية المبينة بالأشكال (7-9-11-13) أن لكل سرعة دوران زمن مزج خاص بها، وبما أن الهدف من الدراسة التجريبية هو الحصول على تجانس البنية بأقل فترة زمنية، تم اعتماد السرعة 1310 r.p.m مع الزمن 30 min عند تحضير الطلاءات التي ستستخدم لاحقاً.

ويهدف التأكد من صحة بارامترات عملية المزج المعتمدة عند السرعة 1310 r.p.m، تم مزج طلاء الإيبوكسي مع ثاني أكسيد التيتانيوم بنسبة 5%، كما هو موضح في الشكل 15.

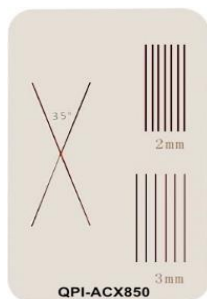
وأثبتت النتائج تطابق من حيث زمن المزج الذي يحقق أفضل تجانس للبنية وهو 30 min.



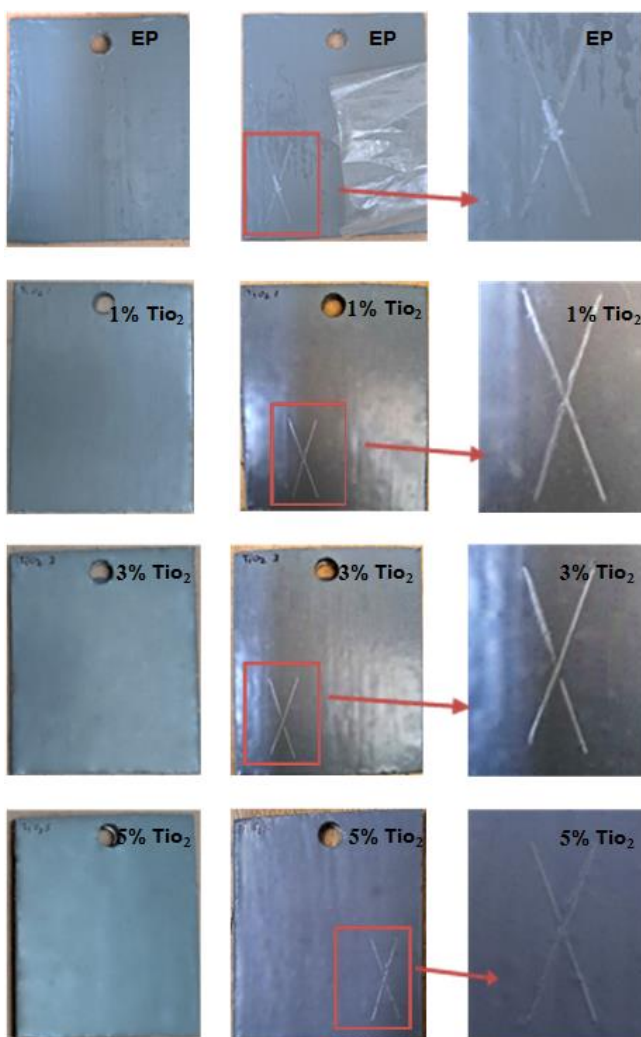
الشكل 15. صور ميكروسكوبية بتكبير 500 X لطلاء الإيبوكسي الحاوي على ثاني أكسيد التيتانيوم TiO_2 بنسبة 5%، سرعة المزج 1310 r.p.m.

4-2 طلاء العينات واختبار الالتصاق:

بعد تحضير طلاء الإيبوكسي مع إضافة النسب الثلاث من ثاني أكسيد التيتانيوم (5-3-1)، وفق بارمترات المزج (سرعة 1310r.p.m ، وزمن 30 min) باعتبارها حققت أفضل تجانس للبنية، تم طلاء العينات الفولاذية بطبقة أساس إيبوكسي وطبقة طلاء (إيبوكسي - TiO_2) بشكل يدوي، ثم أجري اختبار الالتصاق وفق الطريقة A من المواصفة القياسية ASTM D3359، حيث تم خدش سطوح العينات المطلية بواسطة رأس حاد لمشروط استناداً للمسطرة المستخدمة لقياس قوة التصاق الطلاء المبينة في الشكل 16، بهدف تحديد مدى ثباتية طبقة الطلاء وفق ما هو موضح في الشكل 17.



الشكل 16. المسطرة المستخدمة لقياس قوة التصاق الطلاء.



الشكل 17. اجراء اختبار ASTM D3359 على عينات الاختبار الفولاذية المطلوبة.

وقد أظهرت نتائج الاختبارات وفق المواصفة القياسية ASTM D3359 أن للعينات التصنيف

الموضح بالجدول 4:

جدول 4. نتائج اختبار الالتصاق وفق المواصفة القياسية ASTM D3359.

العينات المدروسة	نسبة TiO_2 المضافة لطلاء الايبوكسي	درجة تصنيف الالتصاق وفق اختبار القطع X
عينة 1 (EP)	–	4A
2	%1	5A
3	%3	5A
4	%5	5A

يتبين من الشكل 17 والجدول 4، أن إضافة ثاني أكسيد التيتانيوم TiO_2 أدت الى تحسين التصاق طلاء الإيبوكسي بسطح الفولاذ للدرجة 5A وفق المواصفة القياسية المذكورة أعلاه.

5-الاستنتاجات والتوصيات:

- أظهرت النتائج التجريبية أن أفضل بارامترات مزج ميكانيكي لتحقيق تجانس الطلاء المحضر هي السرعة 1310r.p.m والزمن 30min.
- تبين من خلال اختبار الالتصاق أن النتيجة متشابهة تقريباً للنسب الثلاث المدروسة % (5-3-1) لثاني أكسيد التيتانيوم المضاف لطلاء الايبوكسي، وهي 5A حسب التوصيف المتبع للمواصفة القياسية.
- دراسة تأثير استخدام أنواع أخرى من شفرات المزج على جودة الطلاء.
- دراسة الخواص الميكانيكية للطلاء المحضر وفق البارامترات التي تم اختيارها.

6- المراجع:

- [1] Ezzeddin B., Al-khalidi M. T. A. An investigation into the effect of using different metal oxide nanoparticles on the anti-corrosion properties of coatings a comparative study. Moroccan Journal of Chemistry. Vol12,Issue2.Page657-675.2024. <https://doi.org/10.48317/IMIST.PRSM/morjchem-v12i2.43008>.
- [2] Mardare L., Benea L. Development of Anticorrosive Polymer Nanocomposite Coating for Corrosion Protection in Marine Environment. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 209 .2017.
- [3] Mixing Epoxy: Tips and Techniques for Optimal Results. United Resin.2024.<https://www.unitedresin.com/mixing-epoxy-tipstechniques-optimal-results>
- [4] Izabela M., Anna R., Miroslav M., Monika H. The Influence of Mixing Methods of Epoxy Composition Ingredients on Selected Mechanical Properties of Modified Epoxy Construction Materials. Materials . 2021. <https://doi.org/10.3390/ma14020411>
- [5] Pradeep S., Gazala R., Ridham D., Sundeep K. D. Designing of smart coatings of conducting polymer poly(aniline-co-phenetidine)/SiO₂ composites for corrosion protection in marine environment. Elsevier. SCT-20794;No of Pages10.2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.12.038>
- [6] Edward P., Wentao Z., Matthieu G., Costas S.The Effect of Shear Mixing Speed and Time on the Mechanical Properties of GNP/Epoxy Composites. Springer. 2016.
- [7] Zakya R., Adeel A., HumairaM. S., Shaukat S. Preparation, Characterization, and Enhanced Thermal and Mechanical Properties of Epoxy-Titania Composites. Hindawi Publishing Corporation, Scientific World Journal,Vol, Article ID 515739.7pages.2014. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/515739>.
- [8] Raluca S., Augustin S., Vili P., Oana R. Ch.,Dan F. N., Drago F. M., Bogdan F. The Impact of ZnO Nanofillers on the Mechanical and Anti-Corrosion Performances of Epoxy Composites. MDPI/Polymers. 16. 2054.2024. <https://doi.org/10.3390/polym16142054>
- [9] Med B., Marcin K., Anita B. Effect of mixing parameters on the mechanical and thermal properties of a nanoclay-modified epoxy resin. High Performance Polymers 26(3) p298-206,2014.

- [10] Yomen a., Issa k., Mohammad d. Enhancement of the mechanical properties of the epoxy polymer by adding silicon carbide micro- grains. Homs University Jurnal, Syria, Volume 43, Issue 10, 2021(In Arabic)
- [11] Ahlam M. I. Improving the corrosion protection of steel using polymeric nano composite coatings (PMMA/TiO₂). Homs University Journal, Syria, Volume 44, Issue 14, 2022. (In Arabic)
- [12] Kazem S. B., Kevin P. P. Application of AC-DC-AC Accelerated Aging to Assess the Galvanic Corrosion Risk of Mild Steel Coated with Graphene-Embedded Epoxy Coatings. MDPI / Coatings. 2025.
<https://doi.org/10.3390/coatings15050501>.
- [13] Novi A. L., Tri A. K. Experimental Study on The Effect of Epoxy Zinc and Thinner Ratio on Platform Structure Coating Quality. journal of ocean science and technology innovation. zonalaut. eISSN: 2721-5717; pISSN: 2747-2124, Vol. 6. No. 2.2025.
<https://journal.unhas.ac.id/index.php/zonalaut>
- [14] American Society for Testing and Materials - ASTM D3359-17 Standard Test Methods for Rating Adhesion by Tape Test, West Conshohocken, PA, 2017.

موازنة أداء شبكات انترنت الاشياء المعتمدة على بروتوكول LEACH

باستخدام التعلم المعزز

المهندسة رنيم صالح محمد¹

إشراف: الدكتور علي الحاتم²

المخلص

تمثل محدودية الطاقة وموثوقية التسليم تحديين رئيسيين في الحساسات اللاسلكية ضمن شبكات انترنت الاشياء، مما يجعل من التوجيه وإدارة استهلاك الطاقة عاملين حاسمين لضمان استمرار وكفاءة عمل الشبكة. ويعتبر بروتوكول LEACH من أبرز بروتوكولات التجميع الهرمي بفضل قدرته على تجنب استنزاف طاقة العقد من خلال الاختيار الدوري لرؤوس التجمعات (CHs) (Cluster Heads)، إلا أن أدائه ما يزال يتأثر بعشوائية اختيار هذه الرؤوس، وارتفاع كلفة إعادة التجميع عند تنفيذها دورياً. لذا ظهرت العديد من التطويرات على البروتوكول ومن أبرزها بروتوكول LEACH-RLC، الذي جمع بين تحسين تشكيل التجمعات بما فيه اختيار رؤوس التجمعات والعقد المرتبطة بها باستخدام البرمجة الخطية الصحيحة المختلطة (MILP) وبين اتخاذ قرار إعادة التجميع بشكل تكيفي باستخدام التعلم المعزز. لكن يفترض هذا البروتوكول وجود بيئة اتصال مثالية ومعدل تسليم كامل، لذا يعمل هذا البحث على تحسين بروتوكول LEACH-RLC بهدف الحفاظ على أدائه والموازنة بين إدارة الطاقة وموثوقية التسليم في ظل ظروف شبكة غير مثالية، وذلك من خلال تحسين دالة المكافأة وتوسيع متجه حالة الشبكة لدى وكيل التعلم المعزز (DQN) بالإضافة ثمانية ميزات جديدة تعبر عن جودة الاتصال. وأظهرت نتائج الدراسة أن ظروف الاتصال غير المستقرة أدت إلى تدهور واضح في مؤشرات عمر الشبكة ومعدل التسليم عند تشغيل البروتوكول الأصلي، في حين أظهرت النسخة المحسنة المقترحة زيادة في عمر الشبكة ومعدل التسليم وانخفاض في عدد الحزم المفقودة، بالمقابل كان هنالك كلفة تشغيلية تمثلت بزيادة طفيفة في استهلاك الطاقة ناجمة عن الزيادة في عدد حزم التحكم المرتبطة بقرارات إعادة التجميع عند تراجع جودة الاتصال.

¹ طالبة ماجستير - قسم هندسة الشبكات والنظم الحاسوبية - كلية الهندسة المعلوماتية - جامعة حمص - سورية

² مدرس - قسم هندسة الشبكات والنظم الحاسوبية - كلية الهندسة المعلوماتية - جامعة حمص - سورية

الكلمات المفتاحية: بروتوكول LEACH، بروتوكول LEACH-RLC، انترنت الاشياء،

شبكات الحساسات اللاسلكية، الطاقة، موثوقية التسليم، موازنة الأداء، التعلم

المعزز . Performance Balancing of LEACH-Based IOT Networks Using Reinforcement Learning

Eng. Raneem Mohammad¹

Supervision: Dr. Ali Alhatem²

Abstract

Energy constraints and delivery reliability represent two major challenges in wireless sensor networks within Internet of Things (IoT) environments, making routing and energy consumption management critical factors for ensuring network continuity and operational efficiency. The LEACH protocol is one of the most prominent hierarchical clustering protocols due to its ability to reduce node energy depletion through the periodic selection of Cluster Heads (CHs). However, its performance is still affected by the randomness of CH selection and the high cost of reclustering when it is performed periodically. Accordingly, several enhancements to LEACH have been proposed, among which LEACH-RLC is a notable protocol. LEACH-RLC combines optimized cluster formation, including the selection of Cluster Heads and their associated nodes using Mixed-Integer Linear Programming (MILP), with adaptive reclustering decisions based on reinforcement learning. Nevertheless, this protocol assumes an ideal communication environment and a complete packet delivery rate. Therefore, this research aims to improve LEACH-RLC in order to preserve its performance and balance energy management with delivery reliability under non-ideal network conditions. This is achieved by enhancing the reward function and expanding the network state vector of the reinforcement learning agent, based on Deep Q-Networks (DQN), through the addition of eight new features that reflect link quality. The results show that unstable communication conditions caused a clear degradation in network lifetime indicators and packet delivery rate when the original protocol was used. In contrast, the proposed enhanced version

¹ Master's Student – Department of Network and Computer Systems Engineering, Faculty of Informatics Engineering, Homs University, Syria

² Lecturer – Department of Network and Computer Systems Engineering, Faculty of Informatics Engineering, Homs University, Syria

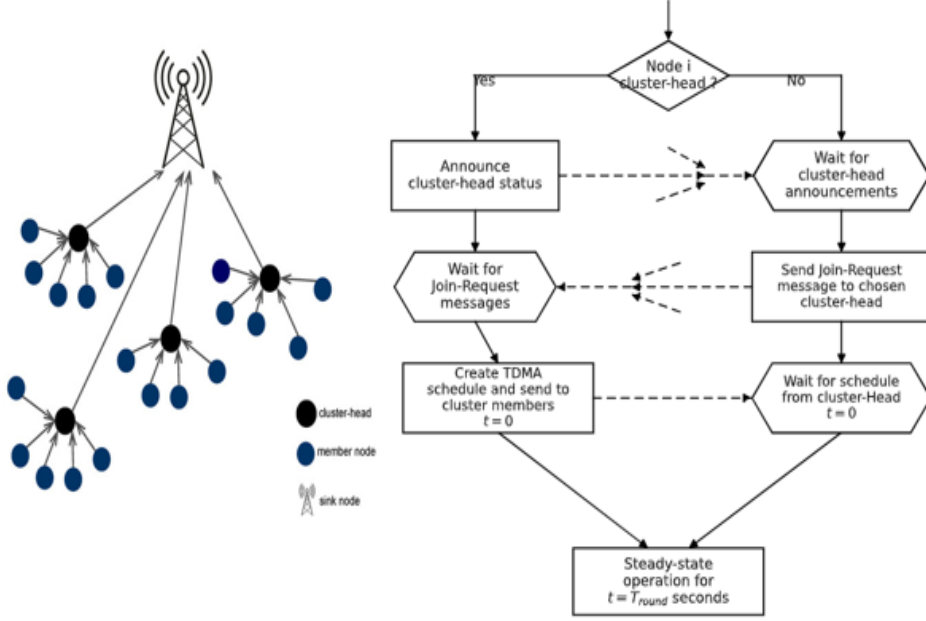
achieved improvements in network lifetime and delivery rate, along with a reduction in the number of lost packets. However, this improvement incurred an operational cost, represented by a slight increase in energy consumption due to the higher number of control packets associated with reclustering decisions when link quality deteriorates.

Keywords: LEACH protocol, LEACH-RLC protocol, Internet of Things, Wireless Sensor Networks, energy, delivery reliability, performance balancing, reinforcement learning.

1. مقدمة

تؤدي شبكات الحساسات اللاسلكية دوراً محورياً في بنية انترنت الأشياء، إذ تُستخدم في تطبيقات متنوعة مثل المراقبة البيئية، والأتمتة الصناعية، والمدن الذكية، والرعاية الصحية. وتشكل إدارة الطاقة تحدي جوهري في هذه الشبكات نظراً لاعتماد الحساسات على بطاريات محدودة السعة يصعب استبدالها أو إعادة شحنها في كثير من البيئات العملية [1,2,3]. وفي هذا السياق برزت البروتوكولات الهرمية المعتمدة على التجميع بوصفها من أكثر البروتوكولات فاعلية في إدارة استهلاك الطاقة، لأنها تخفف من كلفة الاتصال المباشر مع المحطة الأساسية من خلال تجميع البيانات محلياً داخل كل تجمع في عقدة تمثل رأس التجمع وهي من تقوم بإرسال البيانات المجمعة إلى المحطة القاعدية.

وجسد بروتوكول LEACH هذا المفهوم بشكل عملي، حيث يعتمد على تقسيم الشبكة إلى تجمعات وتدوير اختيار رأس التجمع بين العقد بهدف منع استنزاف طاقتها، يبين الشكل (1) آلية عمل البروتوكول [1,2].



الشكل (1): آلية عمل بروتوكول LEACH

يعاني LEACH في بنيته التقليدية من عدة محدوديات، أهمها أن اختيار رؤوس التجمعات يتم بطريقة احتمالية لا تراعي بشكل كافٍ الطاقة المتبقية، أو موضع العقد، أو جودة الروابط، مما يؤدي إلى إعادة تشكيل التجمعات بشكل متكرر والذي بدوره يزيد من كلفة حزم التحكم ويؤثر سلباً في الكفاءة العامة للشبكة [4,5,6]. لذا ظهرت العديد من التحسينات على هذا البروتوكول، برز من بينها بروتوكول LEACH-RLC الذي قدّم تطويراً مهماً من خلال الجمع بين تحسين تشكيل التجمعات باستخدام البرمجة الخطية الصحيحة المختلطة (MILP) وبين متحكم يعتمد على التعلم المعزز لاتخاذ قرار إعادة التجميع بشكل تكيفي [7].

لكن ما يزال اتخاذ قرار إعادة التجميع في LEACH-RLC قريباً من افتراضات تشغيل مثالية، في حين تتسم الكثير من بيانات الانترنت الاشياء الواقعية بتذبذب جودة الاتصال، وخسارة الحزم، وتفاوت نجاح الإرسال، وهو ما ينعكس مباشرة على معدل التسليم، وإعادة الإرسال، والطاقة المستهلكة فعلياً [3,8,9,10,11]. ومن هنا تتطوّر مساهمة هذا البحث، بهدف تطوير LEACH-RLC ليصبح أكثر إدراكاً لحالة الشبكة الواقعية عند اتخاذ قرار إعادة التجميع، وأتاح استخدام

التعلم المعزز تحقيق هذه المساهمة عبر مراعاة خصائص الاتصال غير المستقر داخل دالة المكافأة المحسنة وتمثيل المزيد من الميزات في متجه الحالة في DQN، بما يحقق موازنة أفضل لأداء الشبكة في ظل ظروف الشبكة غير المثالية.

2. أهداف وأهمية البحث

يهدف هذا البحث إلى تحسين بروتوكول LEACH-RLC ليصبح أكثر قدرة على التعامل مع ظروف الاتصال غير المثالية في شبكات انترنت الأشياء، من خلال جعل قرار إعادة التجميع أكثر ارتباطاً بالحالة الفعلية للشبكة. ويمكن تحديد هدف البحث في النقاط الآتية:

- 1) تحسين آلية اتخاذ قرار إعادة التجميع في بروتوكول LEACH-RLC بحيث لا تعتمد فقط على مؤشرات الطاقة أو البنية الحالية للتجمعات، بل تراعي أيضاً جودة الاتصال وحالة الشبكة في البيئات غير المستقرة.
- 2) تطوير دالة المكافأة المستخدمة في وكيل التعلم المعزز لتصبح أكثر شمولاً، من خلال إدخال عوامل مرتبطة بمعدل التسليم، والطاقة المستهلكة، وإعادة الإرسال، وحجم حزم التحكم، والتباين في استهلاك الطاقة، وقرار إعادة التجميع.
- 3) توسيع متجه الحالة داخل نموذج DQN بإضافة ثماني ميزات جديدة تعبر عن خصائص الاتصال غير المثالي، مثل تذبذب جودة الرابط، واحتمال نجاح الإرسال، ومعدل التسليم، وحجم الحزم المعاد إرسالها.
- 4) تمكين وكيل التعلم المعزز من اتخاذ قرار أكثر دقة وتكيفاً عند المفاضلة بين الإبقاء على البنية التجمعية الحالية أو إعادة تشكيلها، وفقاً لحالة الشبكة الفعلية وليس وفق مؤشرات تقليدية محدودة.
- 5) تحقيق موازنة أفضل في أداء الشبكة من خلال الجمع بين كفاءة الطاقة، وموثوقية التسليم، وتقليل فقد الحزم، وضبط حمل التحكم في ظل ظروف الاتصال غير المستقرة.
- 6) تقييم النسخة المحسنة LEACH-RLC-NI (NI كاختصار لغير مثالي (Non Ideal)) ومقارنتها بالبروتوكول المرجعي LEACH-RLC ضمن ظروف الشبكة نفسها، لقياس أثر دمج خصائص الاتصال الواقعية في قرار إعادة التجميع.

3. دراسة مرجعية

شمل تطوير بروتوكول LEACH تحسين بنية التجمعات والتوجيه بينها، والتحكم في توقيت إعادة تشكيل التجمعات بالإضافة إلى تحسين آلية اختيار رؤوس التجمعات [4,3,5,6,12]. وارتبط هذا التطور بالانتقال التدريجي من الأساليب المعتمدة على القواعد الثابتة إلى استراتيجيات أكثر تكيفاً تعتمد على تقنيات الذكاء الصناعي.

قدّم بروتوكول E-FLEACH [13] في هذا السياق استراتيجية تعتمد على المنطق الضبابي لتحسين اختيار رؤوس التجمعات، اعتماداً على مجموعة من العوامل، بينما عملت دراسة NN_ILEACH [14] على استبدال آلية الاختيار الاحتمالي التقليدية داخل بروتوكول LEACH بآلية تعليمية تعتمد على شبكة عصبية تستفيد من خصائص حالة الشبكة عند اختيار رؤوس التجمعات. وكذلك قدّم بروتوكول LEACH-OCW-IACO [15] في مقترح يجمع بين التحسين الاستدلالي والتوجيه الذكي تطويراً مزدوجاً استهدف كلاً من اختيار رؤوس التجمعات والتوجيه بين التجمعات، من خلال الاعتماد على الأوزان لاختيار الرؤوس وخوارزمية مستعمرة النمل المحسنة لتحديد المسارات. في حين حقق بروتوكول EDK-LEACH [16] خوارزمية K-means لتشكيل تجمعات أكثر انتظاماً واختيار رؤوس التجمعات. ومن الدراسات الحديثة التي قدمت تحسين فريد على بروتوكول LEACH الدراسة [7] والتي عمل الباحثون خلالها على تطوير بروتوكول LEACH-RLC وعالجوا من خلاله مسألة اختيار رؤوس التجمعات إضافة إلى اتخاذ قرار توقيت إعادة التجميع، وجمعت هذه المنهجية بين البرمجة الخطية الصحيحة المختلطة (MILP) من أجل اختيار رؤوس التجمعات وتحديد العقد المرتبطة بها، وبين التعلم المعزز لاتخاذ قرار يقضي إما بالإبقاء على تشكيل التجمع الحالي أو إعادة تشكيله. يلخص الجدول (1) منهجية الدراسات السابقة مع التركيز على التقنيات المستخدمة والعوامل المدروسة ضمن الاستراتيجيات المقترحة مع النتائج.

الجدول (1): ملخص الدراسات المرجعية

الدراسة	المنهجية المقترحة	التقنية المستخدمة	العوامل	النتائج
E-FLEACH [13]	تحسين اختيار رؤوس التجمعات في LEACH	المنطق الضبابي Fuzzy Logic	الطاقة المتبقية، المسافة إلى المحطة	تحسن FND بنسبة 60.38%، و HND بنسبة 32.5%، و LND

الدراسة	المنهجية المقترحة	التقنية المستخدمة	العوامل	النتائج
	بالاعتماد على تقييم متعدد العوامل		الأساسية، مركزية العقدة	بنسبة 17.13% مقارنةً بـ LEACH، مع انخفاض في استهلاك الطاقة في الجولات الأولى
NN_ILEACH [14]	استبدال الاختيار الاحتمالي التقليدي لرؤوس التجمعات بألية تعلمية تعتمد على حالة الشبكة	شبكة عصبية Neural Network	الطاقة، توزيع العقد، خصائص حالة الشبكة	ارتفاع عمر الشبكة من 505 جولات في LEACH إلى 11361 جولة، وانخفاض استهلاك الطاقة بنحو 40%، وزيادة throughput بنحو 30%، وتحسن معدل التسليم بنحو 25%
LEACH-OCW-IACO [15]	تحسين اختيار رؤوس التجمعات والتوجيه بين التجمعات	أوزان اختيار الرؤوس + خوارزمية مستعمرة النمل المحسنة IACO	الطاقة المتبقية، كثافة الجوار، المسافة إلى المحطة الأساسية، عدد القفزات، توازن الطاقة	ارتفاع FND من 141 في LEACH إلى 199 في ILEACH ثم إلى 329 في IACO، وارتفاع LND من 2338 إلى 3487 جولة، مع انخفاض استهلاك الطاقة
EDK-LEACH [16]	تشكيل تجمعات أكثر انتظاماً وتحسين	K-means clustering	إحداثيات العقد، الطاقة المتبقية، القرب من مركز العقدة، المسافة إلى	تأخر FND من نحو 1983 إلى 4285 جولة، وارتفاع LND إلى أكثر من 8000 جولة،

موازنة أداء شبكات انترنت الاشياء المعتمدة على بروتوكول LEACH باستخدام التعلم المعزز

الدراسة	المنهجية المقترحة	التقنية المستخدمة	العوامل	النتائج
	اختيار رؤوس التجمعات		المحطة الأساسية	وانخفاض متوسط الطاقة المستهلكة من J 0.052 إلى J0.036
LEACH-RLC [7]	تحسين اختيار رؤوس التجمعات وتحديد توقيت إعادة التجميع	MILP + Reinforcement Learning	الطاقة داخل العنقود، الطاقة بين رأس التجمع والمحطة الأساسية، عدد رؤوس التجمعات، كلفة إعادة التشكيل	تفوق على LEACH و LEACH-C و LEACH-CM في عمر الشبكة وتوازن الطاقة، وبلغ HND نحو 1050 جولة مقابل نحو 950 في LEACH-C و LEACH-CM، مع معدل تسليم أعلى وحمل تحكم أقل

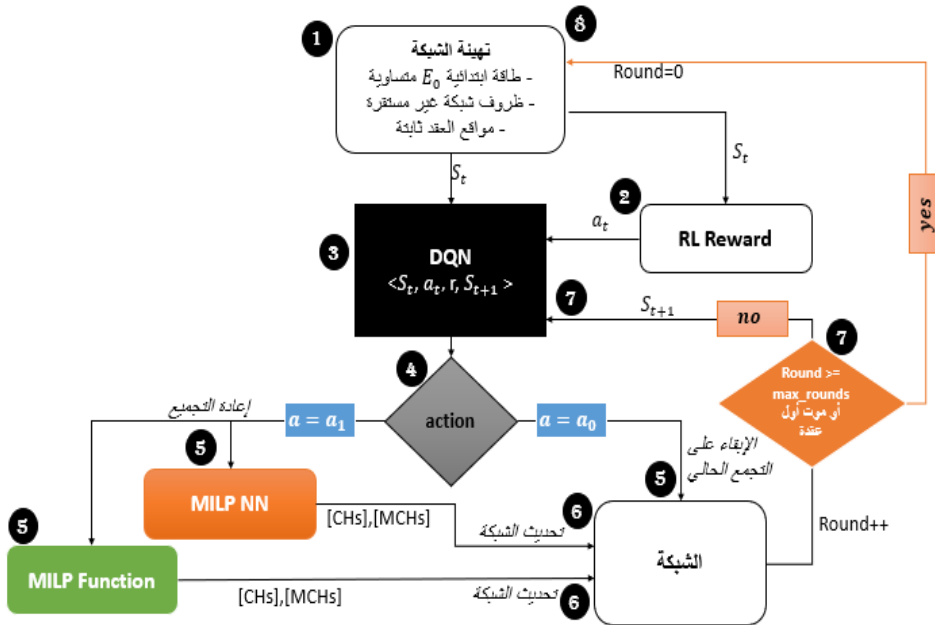
تبيّن من الدراسات المرجعية أن معظم التحسينات على LEACH ركزت على الطاقة المتبقية، والمسافة إلى المحطة الأساسية، وتوازن التجمعات، في حين ما زالت العوامل المرتبطة بجودة الاتصال الواقعية، وموثوقية التسليم، وفقد الحزم، وإعادة الإرسال أقل مراعاة. من هنا تنطلق مساهمة هذا البحث الذي يهدف إلى التطوير على LEACH-RLC ليصبح أكثر إدراكاً للحالة الواقعية للشبكة، من خلال دمج خصائص الاتصال غير المثالي داخل كل من دالة المكافأة ومتجه الحالة، بما يحقق موازنة أفضل بين استهلاك الطاقة وموثوقية التسليم في ظل ظروف الشبكة غير المثالية.

4. مواد وطرائق البحث

1.4. البنية العامة للمنهجية المقترحة

تحافظ المنهجية المقترحة على البنية العامة لبروتوكول LEACH-RLC، حيث تتم على مرحلتين متكاملتين [7]:

- (1) تشكيل التجمعات واختيار رؤوسها باستخدام دالة MILP.
 - (2) اتخاذ قرار إعادة التجميع أو الإبقاء على التجمع الحالي باستخدام التعلم المعزز .
بينما يكمن الاختلاف بين التطوير المقترح والمنهجية الأصلية في أن وكيل التعلم المعزز لا يعتمد فقط على حالة الطاقة وبنية الشبكة كما في بروتوكول LEACH-RLC، بل يتعلم أيضاً من عوامل مرتبطة بجودة الاتصال، مثل معدل التسليم، وإعادة الإرسال، وحجم حزم التحكم، واحتمال نجاح رابط الاتصال.
- يوضح الشكل (2) البنية العامة للمنهجية المقترحة، حيث نستخدم دالة MILP لتشكيل التجمعات من خلال اختيار رؤوس التجمعات والعقد المرتبطة بكل منها، بينما يتولى DQN اتخاذ القرار بالإبقاء على التجمع الحالي أو إعادة تشكيله وفق حالة الشبكة في كل جولة.



الشكل (2): البنية العامة للمنهجية المقترحة

تبدأ المنهجية بتهيئة شبكة الحساسات وتحديد مواقع العقد ومستوى الطاقة الابتدائي لكل عقدة. بعد ذلك يتم نمذجة حالة الاتصال بين العقد وفق سيناريوهين: روابط مثالية وروابط غير مثالية.

في حالة الروابط غير المثالية، لا يُفترض أن الاتصال بين العقد مضمون، بل يتم تمثيله باحتمالية نجاح تعتمد على جودة الرابط والمسافة وعدد محاولات إعادة الإرسال المسموح بها. بعد بناء نموذج الشبكة، يتم اتخاذ قرار إعادة التجميع من قبل وكيل التعلم المعزز DQN المدرب بناءً على قرار دالة المكافأة وحالة الشبكة، في حال قرار إعادة تجميع يتم اختيار رؤوس العناقيد باستخدام دالة هدف تجمع بين عاملين رئيسيين: الحفاظ على الطاقة وتحسين موثوقية الاتصال. وتهدف هذه الدالة إلى تجنب اختيار عقد منخفضة الطاقة كرؤوس عناقيد، وتقليل تكلفة الإرسال، وتحسين معدل تسليم الحزم. في هذا السياق كما هو مبين في الشكل ، يوجد شبكة عصبونية كمقاربة لدالة MILP تستخدم فقط كبديل أثناء مرحلة تدريب نموذج التعلم المعزز (DQN) بهدف تسريع عملية التدريب وتقليل الكلفة الحسابية الناتجة عن تكرار إعادة التجميع عبر عدد كبير من الجولات (حتى أقصى عدد من الجولات أو حتى موت أول عقدة)، في حين تستخدم دالة MILP الأصلية أثناء التشغيل الفعلي لضمان دقة اختيار رؤوس التجمعات والعقد التابعة لها.

2.4. فضاء الأحداث (actions)

يعتمد قرار DQN في هذا العمل على فضاء أحداث مُعرّف كما يأتي:

$$a_t \in \{a_0, a_1\}$$

وتمثل الأحداث كل مما يلي:

- a_0 : الإبقاء على التجمع الحالي.
- a_1 : إعادة تشكيل التجمعات باستخدام MILP.

حيث يحدد القرار في كل جولة ما إذا كانت البنية الحالية للتجمعات ما تزال ملائمة، أو أنه من الأفضل إعادة تشكيل التجمعات من جديد.

3.4. متجه الحالة الأصلي والموسع

يصف متجه الحالة في بروتوكول LEACH-RLC بنية الشبكة من حيث الطاقة والتجمعات والقرار السابق، ويمكن تعريفه كما يأتي [7]:

$$S_t^{base} = [E_t^{total}, E_t, CH_t, N_t^{CH-rep}, M_t, \alpha_{t-1}]$$

تمثل المعلومات الأساسية في هذا المتجه: الطاقة المتبقية الكلية (E_t^{total})، والطاقة المتبقية للعقد (E_t)، ورؤوس التجمعات الحالية (CH_t)، وعدد مرات تكرار مجموعة الرؤوس والأعضاء داخل التجمعات (M_t)، والقرار المتخذ في الجولة السابقة (α_{t-1}).
وعملنا في هذا البحث على توسيع متجه الحالة ليصبح أكثر قدرة على تمثيل ظروف الاتصال غير المثالية، وذلك بإضافة ثماني ميزات جديدة مرتبطة بجودة الاتصال، بحيث يصبح:

$$S_t^{NI} = [S_t^{base}, PDR_t, \bar{E}_t^{cons}, OH_t, R_t^{retx}, P_t^{succ}, N_{max}^{retx}, L_t^{dist}, V_t^{ch}]$$

حيث تمثل الحدود المضافة ما يلي:

- PDR_t : معدل التسليم من طرف إلى طرف في الجولة t.
- $\bar{E}_t^{cons}$: متوسط الطاقة المستهلكة في الجولة.
- OH_t : حجم حزم التحكم في الجولة.
- R_t^{retx} : عدد الحزم المعاد إرسالها.
- P_t^{succ} : احتمال نجاح الاتصال.
- N_{max}^{retx} : العدد الأعظمي لمحاولات إعادة الإرسال.
- L_t^{dist} : تدهور الرابط مع المسافة.
- V_t^{ch} : التذبذب الزمني لقناة الاتصال.

تمنح هذه الميزات المضافة وكيل التعلم المعزز إدراكاً لا يقتصر على بنية الشبكة واستهلاك الطاقة ضمنها فقط، بل يمتد أيضاً إلى خصائص الاتصال الفعلية، وهو ما يجعل قرار إعادة التجميع أكثر ارتباطاً بالسلوك التشغيلي الحقيقي للرابط والشبكة في البيئات غير المستقرة.

4.4. دالة المكافأة المحسنة

تتمثل مهمة دالة المكافأة في توجيه قرار وكيل التعلم المعزز نحو السياسة المطلوبة. بالنظر إلى الدالة الأصلية في LEACH-RLC المبينة في المعادلة (1):

$$R(S_t, a_t) = \begin{cases} 1 & \text{if } a_t = a_2 \text{ and } E_{net} > 0 \text{ for all } n \in N \\ 1.1 & \text{if } a_t = a_1 \text{ and } E_{net} > 0 \text{ for all } n \in N \\ 2 & \text{if } E_{net} \leq 0 \text{ for some } n \in N \end{cases} \quad \text{(المعادلة 1)}$$

حيث أن a_1 يمثل حدث إعادة التجميع و a_2 حدث الإبقاء على التجميع الحالي و E_{net} طاقة العقد في الشبكة)، وجدنا أنها ركزت على إبقاء العقد جميعها حية قبل موت أول عقدة (FND) لأطول فترة ممكنة مع مراعاة آخر جولة تم فيها إعادة التجميع [7]، بينما يقترح هذا البحث دالة مكافأة أكثر شمولاً تأخذ في الاعتبار إضافة إلى ما تم مراعاته في البروتوكول الأصلي، العوامل المرتبطة بموثوقية التسليم وكلفة الاتصال في البيئات غير المثالية، ويمكن التعبير عنها كما في المعادلة (2):

$$\begin{aligned} R(S_t, a_t) = & w_{alive} \cdot A_t + w_{pdr} \cdot PDR_t - w_E \cdot \bar{E}_t^{cons} \\ & - w_{retx} \cdot R_t^{retx} - w_{oh} \cdot OH_t - w_{\sigma} \cdot \sigma_{E_t} \\ & - w_{recluster} \cdot I(a_t == a_1) \end{aligned} \quad \text{المعادلة (2)}$$

حيث أن:

- A_t : مؤشر بقاء كافة العقد حية في الجولة t .
- σ_{E_t} : التباين في مستويات طاقة العقد.
- $I(a_t == a_1)$: مؤشر يساوي 1 عند تنفيذ إعادة التجميع و 0 عدا ذلك .
- $w_{alive}, w_{pdr}, w_E, w_{retx}, w_{\sigma}, w_{recluster}$: أوزان ضبط تمثل عقوبة أو مكافأة وتكون قيمتها حسب أهمية كل عامل، وتم ضبط كل من الأوزان السابقة بالتجريب، حيث تم اختبار عدة قيم لكل وزن ضمن مجال محدود وتم التجريب ضمن مجالات أوزان أعلى [0.7-1.5] للمكونات الأساسية مثل بقاء العقد وموثوقية التسليم، ومجالات أوزان أصغر [0.1-0.5] للعقوبات الخاصة بالمؤشرات مثل حمل التحكم وتكرار إعادة التجميع، حتى لا يصبح الوكيل متردداً في إعادة التجميع عند وجود تدهور حقيقي في جودة الاتصال. ثم تم تقييم كل إعداد باستخدام مؤشرات الأداء الأساسية: FND و PDR ومتوسط الطاقة المستهلكة وكلفة التحكم، وبالاعتماد على نتائج التجريب تم اختيار الإعداد الذي يحقق أفضل توازن بين هذه المؤشرات، مع إعطاء أولوية خاصة لاستقرار الشبكة وموثوقية تسليم الحزم في حالة الروابط غير المثالية.

تزداد المكافأة عندما يتحسن استقرار الشبكة ومعدل التسليم، ويقابلها عقوبة في حال ارتفع معدل أي من استهلاك الطاقة أو حزم التحكم أو إعادة الإرسال أو تزايد تباين الطاقة بين العقد. ويصبح قرار إعادة التجميع يوازن بين الكلفة والمنفعة، بدلاً من ارتباطه فقط ببقاء العقد أو بتوقيت زمني ثابت بين عمليتي تجميع متتاليتين. وتعد هذه الموازنة متوافقة مع ما أشارت إليه الأدبيات الحديثة في هندسة دالة المكافأة (reward engineering)، بأنه يجب على تصميم المكافأة أن يعكس الأهداف الحقيقية متعددة الجوانب للمهمة حتى لا ينحاز الوكيل إلى تحسين جزئي مضر [17].

5. النتائج ومناقشتها

حققت المنهجية المقترحة على مرحلتين، في المرحلة الأولى اختبر بروتوكول LEACH-RLC تحت ظروف روابط غير مثالية بهدف إظهار أثر عدم استقرار الاتصال وإثبات الحاجة إلى التحسين عملياً. أما المرحلة الثانية فتمثلت في إدخال التعديلات المقترحة على دالة المكافأة ومتجه الحالة، ثم إعادة تقييم البروتوكول في بنيته الجديدة LEACH-RLC-NI تحت الظروف نفسها، مما يظهر أثر التحسين نفسه على البروتوكول الأصلي عند الانتقال من فرضية مثالية إلى بيئة أكثر واقعية.

1.5. بيئة التجريب ومقاييس التقييم

تم تنفيذ التجارب باستخدام محاكي PyNetSim المطور بلغة Python [18]، مع توزيع 100 عقدة داخل حقل استشعار بمساحة 100×100 متر، ووضع محطة الأساس عند الإحداثيات (50,175)، بما يطابق إعدادات الدراسة المرجعية الأصلية [7].

أُجريت التجارب عبر خمس تشغليات مستقلة بهدف تقليل أثر العشوائية الناتجة عن توزيع العقد وحالة القناة. وتم تشغيل كل تجربة حتى حد أقصى قدره 1500 جولة، أو حتى تحقق مؤشرات نهاية عمر الشبكة بحسب آلية المحاكاة. وبعد ذلك تم استخراج مؤشرات الأداء لكل seed على حدة، ثم حساب المتوسط، والانحراف المعياري، وفاصل الثقة، واختبار الدلالة الإحصائية للمقارنة بين البروتوكول المرجعي LEACH-RLC [7] والنسخة المقترحة.

تم توليد ظروف القناة غير المستقرة من خلال تغيير معاملات التذبذب الزمني ضمن نموذج قناة مترابط correlated مستلهم من نموذج Gilbert–Elliott [19-21]، حيث يُمثل هذا النموذج حالة جيدة وحالة رديئة للقناة مع احتمالات انتقال بينهما، لتمثيل الفقد المتعاقب أو التذبذب الزمني في جودة الرابط اللاسلكي عبر الجولات. تحدد المعاملات (مثل احتمال أن يبدأ الرابط في الحالة الجيدة (p_{init_good})، واحتمال الانتقال من الحالة الجيدة إلى الحالة الرديئة (p_{gb})، واحتمال الانتقال من الحالة الرديئة إلى الحالة الجيدة (p_{bg})، ومعامل تحسين جودة الرابط في الحالة الجيدة ($good_mult$)، ومعامل تدهور جودة الرابط في الحالة الرديئة (bad_mult)) سلوك الرابط واحتمالات انتقاله بين الحالتين الجيدة والرديئة، وبذلك تعكس التشغيليات الخمسة حالة اتصال أكثر اضطراباً، مع احتمالية أعلى لتدهور الرابط وفقد الحزم، مع إبقاء إعدادات الشبكة الأخرى (حجم الشبكة، عدد العقد، موضع المحطة القاعدية) ثابتة لضمان عدالة المقارنة.

واعتمد التقييم على مجموعة من المقاييس الرئيسية، وهي:

• مقاييس عمر الشبكة:

- FND (First Node Dead): رقم الجولة عند موت أول عقدة .
- LND (Last Node Dead): رقم الجولة عند موت آخر عقدة.
- avg_energy_per_round: متوسط الطاقة المستهلكة في الجولة.
- avg_overhead_per_round: متوسط حمل التحكم في الجولة.
- avg_pdr_e2e: معدل التسليم من طرف إلى طرف.
- avg_pkts_lost: متوسط عدد الحزم المفقودة.

يبين الجدول (2) إعدادات المحاكاة المعتمدة في الدراسة:

الجدول (2): إعدادات المحاكاة

الإعداد	القيمة
المحاكي	PyNetSim
عدد العقد الحسية	100
مساحة الحقل	100 * 100

الإعداد	القيمة
موضع محطة الأساس	(50,175)
مدى الإرسال	70 متر
عدد الجولات الأقصى	1500 جولة
عدد البذور العشوائية	5 seeds
نماذج المقارنة	NI-RLC-LEACH و RLC-LEACH
طريقة تشكيل التجمعات	MILP
متحكم قرار إعادة التجميع	DQN
نموذج القناة	correlated non-ideal channel
عدد محاولات الإرسال	3

2.5. نمذجة القناة غير المثالية

تتأثر بيانات شبكات الحساسات اللاسلكية وإنترنت الأشياء بتغير جودة الإشارة مع المسافة، وباحتمال فقد الحزم، والحاجة إلى إعادة الإرسال عند ضعف الرابط [23][22]. لذلك تم تمثيل كل رابط بين العقدتين (i) و (j) باحتمالية نجاح (p_{ij}) بدلاً من افتراض وجود قناة اتصال مثالية لا تسبب أي فقد.

تم اعتماد نموذج احتمالي مبسط مستند إلى المبادئ المستخدمة في نمذجة الروابط غير المثالية، حيث تتدهور جودة الرابط ومعدل استقبال الحزم مع المسافة وظروف القناة [22-25]. تبين المعادلة (3) احتمالية نجاح الرابط كما يلي:

$$p_{ij} = p_{\min} + (p_{\max} - p_{\min}) e^{-\eta \frac{d_{ij}}{d_{\max}}} \quad (3) \text{ المعادلة}$$

حيث تمثل (p_{ij}) احتمالية نجاح الرابط بين العقدتين (i) و (j)، ويمثل $(p_{\min})$ و $(p_{\max})$ الحدين الأدنى والأعلى لاحتمالية نجاح الإرسال، استُخدم الحد $(p_{\min})$ لضمان وجود حد أدنى لاحتمالية نجاح الإرسال حتى في الروابط الضعيفة بدلاً من افتراض أن الرابط يصبح معدوماً تماماً عند تدهور القناة [24][22]، بينما يحدد الفرق $(p_{\max} - p_{\min})$ مجال التغير الممكن بين أسوأ

وأفضل حالة للرباط بما يسمح بتمثيل تدريجي لجودة الاتصال بدلاً من نموذج ثنائي يفترض أن الرباط إما مثالي أو منقطع [25][23]. أما العامل الأسّي $e^{-\eta \frac{d_{ij}}{d_{max}}}$ فيمثل تناقص جودة الرباط مع زيادة المسافة، حيث تؤدي الزيادة في المسافة بين العقدتين (d_{ij}) إلى انخفاض قيمة هذا العامل تدريجياً ويستند هذا الافتراض إلى نماذج فقد المسار ونمذجة الروابط منخفضة الطاقة، التي تبين أن معدل استقبال الحزم (PRR) وجودة الرباط يتأثران بالمسافة ونسبة الإشارة إلى الضجيج (SNR) [24][22]، بينما تمثل (d_{max}) أكبر مسافة مرجعية داخل الشبكة وتستخدم لتطبيع المسافة وجعل أثرها مناسباً لمجال المحاكاة، بينما يتحكم η بدرجة تدهور الرباط مع زيادة المسافة بشكل مشابه لاستخدام معاملات فقد المسار أو معاملات التدهور في نماذج القناة اللاسلكية [24][22].

ولتمثيل أثر إعادة الإرسال، تم حساب احتمالية نجاح الحزمة بعد عدد محدود من المحاولات كما هو مبين في المعادلة (4):

$$P_{ij}^{succ} = 1 - (1 - p_i)^A \quad \text{المعادلة (4)}$$

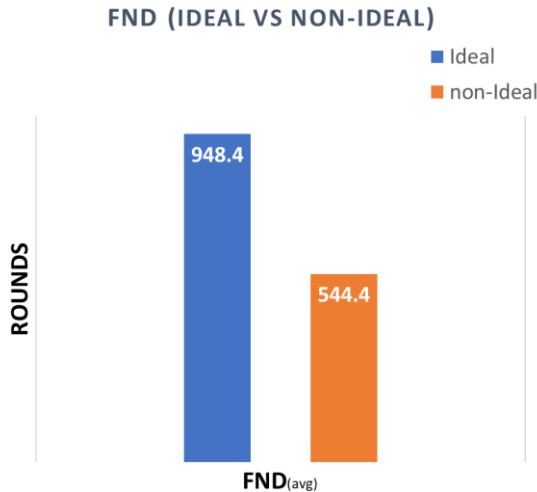
حيث يمثل A عدد محاولات إعادة الإرسال الكلية المسموح بها. وتعتمد هذه المعادلة على نموذج المحاولات المستقلة للإرسال، إذ إن احتمال فشل محاولة واحدة يساوي $(1 - p_i)$ ، واحتمال فشل جميع المحاولات يساوي $(1 - p_i)^A$ ، وبالتالي تكون احتمالية نجاح الحزمة في محاولة واحدة على الأقل مساوية إلى متمم احتمال فشل جميع المحاولات [26]. ويستخدم هذا النوع من النمذجة في تحليل موثوقية الروابط اللاسلكية في شبكات محدودة الطاقة، لأن عدد محاولات إعادة الإرسال يؤثر مباشرة في احتمالية التسليم وفي الطاقة المستهلكة [27][26]. كما يمكن ربط ما سبق بمفهوم عدد الإرسالات المتوقع (ETX)، الذي يقدر كلفة تسليم الحزمة عبر رباط غير مثالي، حيث تزداد قيمة (ETX) عندما تنخفض احتمالية نجاح التسليم [28]. وبناءً على احتمالية النجاح بعد عدد محدود من المحاولات، يمكن حساب (ETX) وفق المعادلة (5):

$$ETX_{ij} = \frac{1}{p_{ij}^{succ}} \quad \text{المعادلة (5)}$$

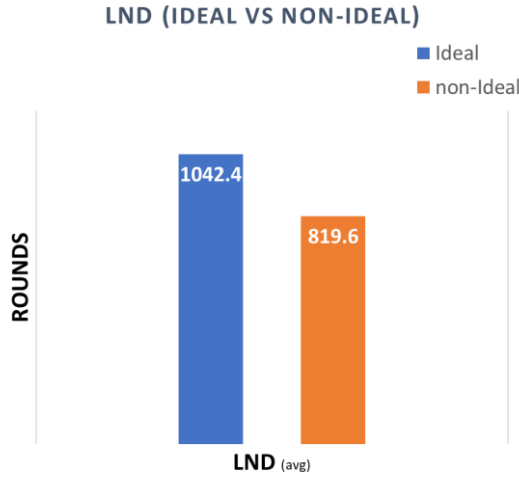
3.5. النتائج

1.3.5 أثر الروابط غير المثالية على أداء بروتوكول LEACH-RLC

أظهرت نتائج اختبار البروتوكول LEACH-RLC تدهور واضح في مؤشرات عمر الشبكة عند الانتقال من ظروف شبكة تشغيلية مثالية إلى ظروف غير مثالية. حيث انخفضت قيمة FND بنسبة (42.6%) من 948.4 في الحالة المثالية إلى 544.4 في الحالة غير المثالية، كما انخفضت قيمة LND من 1042.4 إلى 819.6 بنسبة (21.4%)، كما يوضحه الشكلان (3) و(4). وتشير هذه النتائج إلى تأثير فترة الاستقرار والعمر الكلي للشبكة بوضوح تحت ظروف الاتصال غير المستقرة.

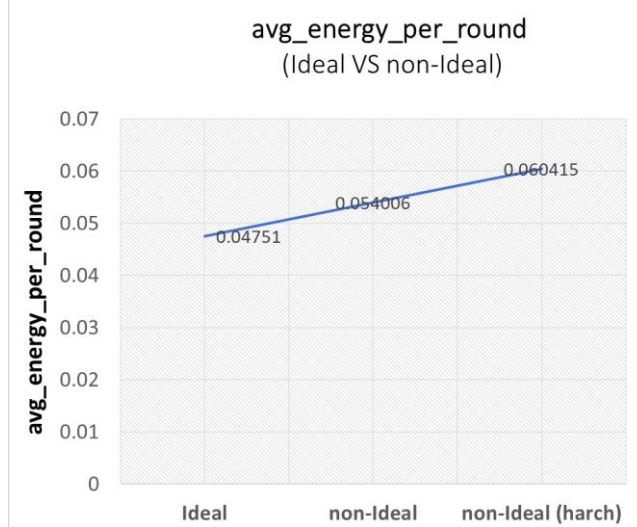


الشكل (3): مقارنة FND بين حالي الروابط المثالية وغير المثالية لبروتوكول LEACH-RLC.



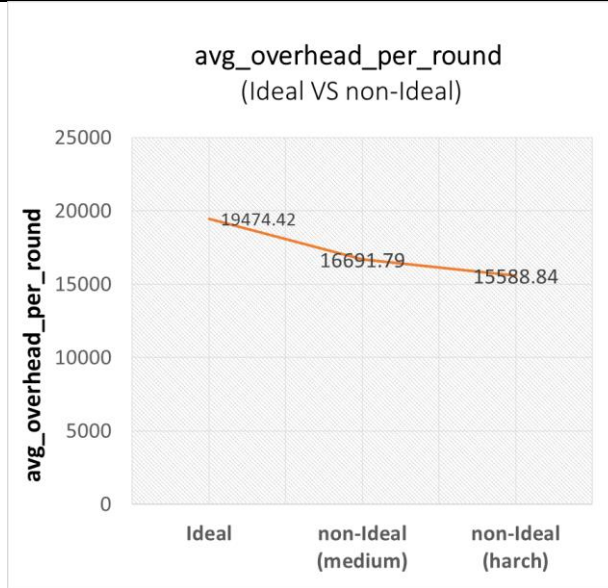
الشكل (4): مقارنة LND بين حالتي الروابط المثالية وغير المثالية لبروتوكول LEACH-RLC.

بينما ارتفع متوسط الطاقة المستهلكة في الجولة من 0.04751 في الحالة المثالية إلى 0.054006، ثم إلى 0.060415 بنسبة (21.4%) تدريجياً مع تدهور الاتصال في الشبكة، كما هو موضح في الشكل (5). ويشير هذا الارتفاع إلى زيادة الكلفة التشغيلية مع ازدياد فشل الإرسال وإعادة الإرسال.



الشكل (5): ارتفاع معدل استهلاك الطاقة في الجولة مع تبدل استقرار الشبكة من مثالية إلى غير مثالية

وفي المقابل انخفض متوسط حمل التحكم من 19474.42 في الحالة المثالية إلى 16691.79، ثم إلى 15588.84 بنسبة (19.95%) تدريجياً عند الانتقال إلى ظروف أسمى غير مثالية، كما هو موضح في الشكل (6). لكن هذا الانخفاض لا يشير بالضرورة إلى كفاءة القرار كونه يوجد ارتفاع في استهلاك الطاقة بسبب إعادة التجميع المتكررة، بل قد يكون السبب في ذلك الموت المبكر للعقد وبالتالي انخفاض عدد حزم التحكم في الشبكة.

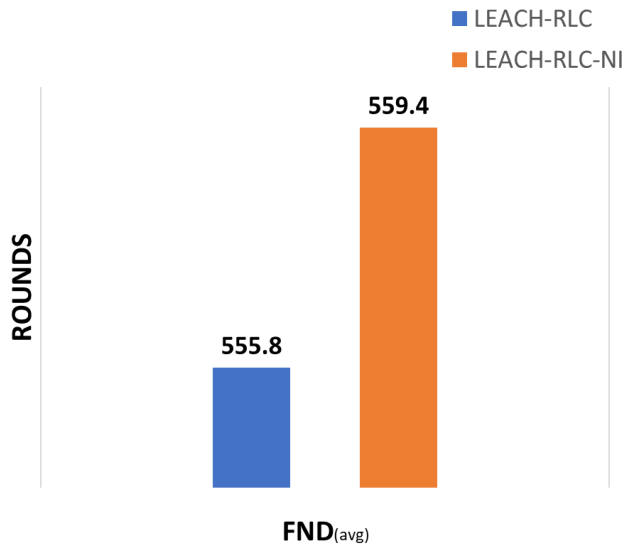


الشكل (6): انخفاض معدل حمل التحكم في الجولة مع تبدل استقرار الشبكة من مثالية إلى غير مثالية

2.3.5 نتائج أداء البروتوكول LEACH-RLC-NI تحت ظروف شبكة غير مستقرة

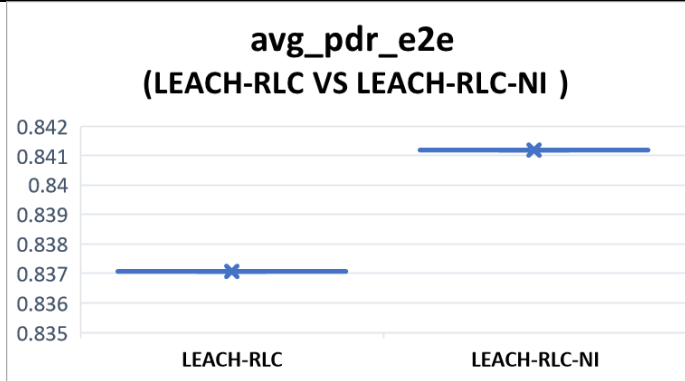
أظهرت النسخة المقترحة LEACH-RLC-NI بعد تطوير دالة المكافأة ومتجه الحالة تحسناً في عدد من مقاييس الأداء مقارنة بالبروتوكول LEACH-RLC تحت الظروف غير المستقرة نفسها. حيث بينت النتائج ازدياد بسيط بمؤشر عمر الشبكة FND بنسبة 0.65% من 555.8 إلى 559.4، كما يوضحه الشكل (7)، وهو ما يشير إلى تحسن محدود في فترة الاستقرار الأولى للشبكة.

FND (LEACH-RLC VS LEACH-RLC-NI)

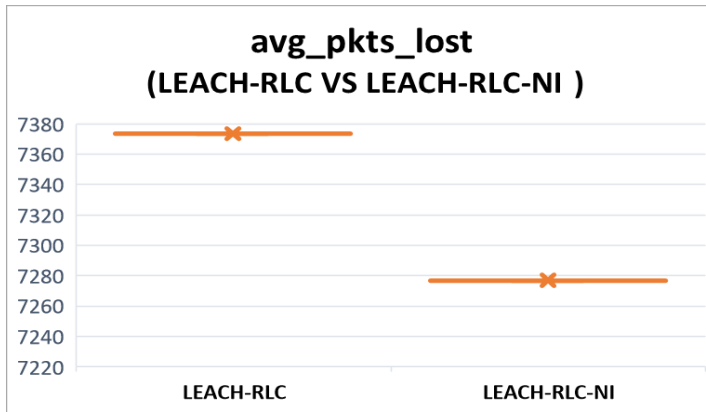


الشكل (7): مقارنة FND بين LEACH-RLC و LEACH-RLC-NI تحت ظروف الشبكة غير المستقرة.

كذلك ارتفع معدل التسليم (avg_pdr_e2e) بنسبة 0.49% من 0.837069 إلى 0.841195، كما انخفض متوسط عدد الحزم المفقودة بنسبة 1.31% من 7373.4 إلى 7277.0، كما هو موضح في الشكلين (8) و (9). بما يبين أن البروتوكول المقترح حسن موثوقية التسليم تحت ظروف الاتصال غير المستقرة.

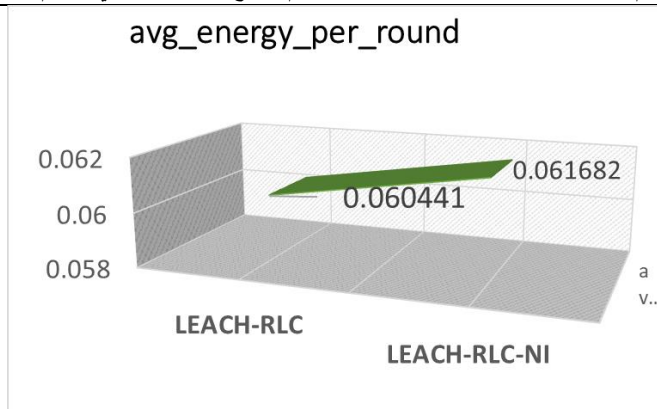


الشكل (8): مقارنة متوسط معدل التسليم بين LEACH-RLC و LEACH-RLC-NI

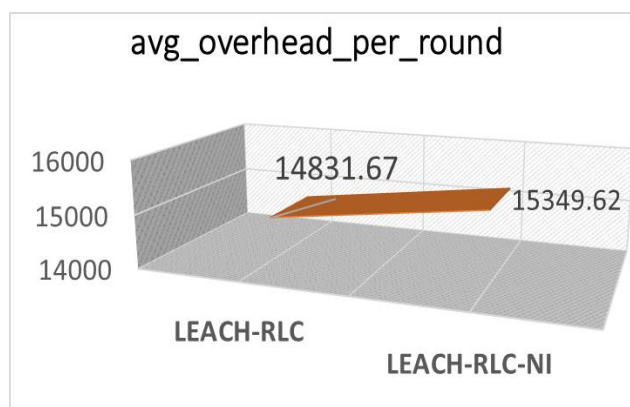


الشكل (9): مقارنة متوسط عدد الحزم المفقودة بين LEACH-RLC و LEACH-RLC-NI

في المقابل كان هناك كلفة تشغيلية طفيفة بسبب قرارات إعادة التجميع عند تدهور جودة الاتصال، مما أدى إلى ارتفاع متوسط الطاقة المستهلكة في الجولة بنسبة 2.05% من 0.060441 إلى 0.061682، وكلفة حزم التحكم من 14831.67 إلى 15349.62، مبين في الشكلين (10) و(11).



الشكل (10): مقارنة متوسط الطاقة المستهلكة في الجولة بين LEACH-RLC و LEACH-RLC-NI.



الشكل (11): مقارنة متوسط حمل التحكم في الجولة بين LEACH-RLC و LEACH-RLC-NI.

يلخص الجدول (3) نتائج تقييم أداء البروتوكول المقترح بالمقارنة مع البروتوكول LEACH-RLC [7] كما يلي:

الجدول (3): تقييم أداء البروتوكول المحسن LEACH-RLC-NI مقابل بروتوكول LEACH-RLC في ظروف الشبكة غير المستقرة

موازنة أداء شبكات انترنت الاشياء المعتمدة على بروتوكول LEACH باستخدام التعلم المعزز

المقياس	LEACH-RLC	LEACH-RLC-NI	النسبة المئوية	p-value
FND	555.8	559.4	%0.65+	0.712
avg_pdr_e2e	0.837069	0.841195	%0.49+	0.529
avg_pkts_lost	7373.4	7277.0	%1.31-	0.097
avg_energy_per_round	0.060441	0.061682	%2.05+	0.189
avg_overhead_per_round	14831.67	15349.62	%3.49+	0.038

4.5. مناقشة النتائج

تؤكد النتائج أن الانتقال من دالة مكافأة تركز بصورة رئيسية على مؤشر موت أول عقدة (FND) إلى دالة مكافأة متعددة العوامل أدى إلى نقل قرار التعلم المعزز من منظور يعتمد على الطاقة فقط إلى منظور أوسع يأخذ في الاعتبار موثوقية التسليم وكلفة الاتصال. ففي المنهجية الأصلية يميل الوكيل إلى الإبقاء على البنية التجمعية الحالية ما دامت مؤشرات الطاقة لم تصل إلى مستوى حرج، حتى لو بدأت مؤشرات الاتصال مثل معدل التسليم أو عدد الحزم المفقودة بالتدهور. أما في المنهجية المقترحة فقد أصبح القرار أكثر ارتباطاً بحالة الاتصال الفعلية بفضل إدخال مؤشرات مثل معدل التسليم، وإعادة الإرسال، وحمل التحكم، واحتمالية نجاح الرابط ضمن كل من دالة المكافأة ومتجه الحالة.

وتشير النتائج العددية إلى أن التحسينات المحققة كانت محدودة لكنها ذات دلالة تفسيرية مهمة في سياق الروابط غير المثالية. فقد ارتفعت قيمة (FND) من 555.8 إلى 559.4 جولة، أي بنسبة تحسن بلغت (0.65%)، إلا أن هذا الفرق لم يكن ذا دلالة إحصائية عند مستوى (0.05) حيث بلغت قيمة (p=0.712). كما ارتفع معدل التسليم من طرف إلى طرف من 0.837069 إلى 0.841195 بنسبة (0.49%) مع قيمة (p=0.529)، وهي أيضاً زيادة محدودة وغير دالة

إحصائياً. لذلك لا يتم تفسير التحسن في (FND) أو (PDR) بوصفه دليلاً منفرداً على تفوق حاسم للمنهجية، بل بوصفه اتجاهاً إيجابياً ضمن محاولة موازنة الأداء في بيئة اتصال غير مثالية. بينما أظهرت النتائج انخفاض عدد الحزم المفقودة من 7373.4 إلى 7277.0 بنسبة انخفاض بلغت (1.31%) مع قيمة ($p=0.097$). ورغم أن هذه القيمة لا تصل إلى مستوى الدلالة الإحصائية التقليدي (0.05)، فإنها تعكس اتجاهاً أوضح نحو تحسين موثوقية التسليم مقارنة بمؤشر (FND). وهذا يدعم الفكرة الأساسية للمنهجية المقترحة وهي أن جودة الأداء في شبكات إنترنت الأشياء لا ينبغي أن تُقاس فقط بتأخير موت أول عقدة بل أيضاً بقدرة الشبكة على المحافظة على تسليم البيانات وتقليل الفقد تحت ظروف اتصال غير مستقرة.

لكن مقابل هذا التحسن في الموثوقية كان هناك كلفة تشغيلية محدودة. فقد ارتفع متوسط الطاقة المستهلكة في الجولة من 0.060441 إلى 0.061682 بنسبة (2.05%) مع قيمة ($p=0.189$)، كما ارتفع حمل التحكم من 14831.67 إلى 15349.62 بنسبة (3.49%)، وكانت هذه الزيادة دالة إحصائياً حيث بلغت قيمة ($p=0.038$). ويمكن تفسير ذلك بأن الوكيل المحسن أصبح أكثر حساسية لتدهور حالة الاتصال، مما يجعله أكثر ميلاً إلى توليد قرارات أو تغييرات مرتبطة بإعادة التجميع عند ظهور مؤشرات ضعف في الرابط. وعليه فإن زيادة حمل التحكم لا تُقرأ بوصفها فشلاً في المنهجية بل بوصفها الكلفة التشغيلية المباشرة لإدخال موثوقية الاتصال ضمن قرار إعادة التجميع.

وتكشف هذه النتائج أيضاً عن سبب محدودية التحسينات المحققة، فعلى الرغم من أن دالة المكافأة ومتجه الحالة أصبحا أكثر إدراكاً للروابط غير المثالية، فإن عملية تشكيل التجمعات نفسها ما زالت تعتمد على دالة (MILP) الأصلية المطورة أساساً ضمن افتراضات أقرب إلى الاتصال المثالي، حيث تركز على الطاقة والموقع والبنية التجمعية أكثر من تركيزها على احتمالية نجاح الرابط أو كلفة إعادة الإرسال. لذلك فإن وكيل (DQN) يستطيع اتخاذ قرار أفضل حول توقيت إعادة التجميع، لكنه لا يتحكم بالكامل في جودة التشكيل الناتج عن (MILP) إذا لم تكن دالة التشكيل نفسها مدركة لجودة الاتصال. وهذا يفسر أن التحسين ظهر بصورة أوضح في تقليل الفقد وتحسين اتجاه الموثوقية، بينما بقي أثره محدوداً على مؤشرات عمر الشبكة مثل (FND).

بناءً على ذلك لا تتمثل مساهمة هذا العمل في تحقيق تفوق عددي كبير في جميع المؤشرات، بل في تقديم إطار أولي يربط قرار إعادة التجميع بخصائص الروابط غير المثالية داخل التعلم المعزز.

ويُظهر التحليل الإحصائي أن المنهجية المقترحة تتجه نحو تحسين موثوقية التسليم وخفض الفقد، لكنها تحتاج إلى ضبط أدق للأوزان وتطوير إضافي لدالة تشكيل التجمعات حتى تتحول هذه الاتجاهات إلى فروق أقوى وأكثر دلالة إحصائية. وهذا يجعل النتائج الحالية أساساً تجريبياً مناسباً لتطوير لاحق يدمج جودة الرابط داخل (MILP) نفسها، بدلاً من الاكتفاء بإدخالها في دالة المكافأة ومتجه الحالة فقط.

6. الاستنتاجات والتوصيات

قدم هذا البحث تطويراً عملياً على بروتوكول LEACH-RLC من خلال مراعاة خصائص الروابط غير المثالية داخل كل من دالة المكافأة ومتجه الحالة في DQN، وذلك بهدف جعل قرار إعادة التجميع أكثر ارتباطاً بالحالة الواقعية للشبكة. وتمثل هذا التطوير في بروتوكول مُحسّن أشرنا إليه باسم LEACH-RLC-NI، يجمع بين الحفاظ على البنية العامة لبروتوكول LEACH-RLC وبين تعزيز رؤية وكيل التعلم المعزّز لمؤشرات الاتصال غير المثالي.

وأظهرت نتائج اختبار أداء بروتوكول LEACH-RLC في ظل ظروف اتصال غير مستقرة أنه يتأثر بصورة واضحة عند الانتقال من فرضية الروابط المثالية، حيث تراجعت مؤشرات عمر الشبكة (كل من FND و LND)، وازدادت الطاقة المستهلكة نتيجة فشل الإرسال وإعادة الإرسال وهو ما يؤكد أهمية عدم الاكتفاء بفرضية الاتصال المثالي عند تقييم بروتوكولات التجميع في شبكات إنترنت الأشياء.

وأشارت النتائج أن إدخال مؤشرات جودة الاتصال داخل قرار التعلم المعزز في النسخة المقترحة LEACH-RLC-NI أدى إلى زيادة حساسية الوكيل تجاه تدهور الروابط، لكنه أضاف في الوقت نفسه كلفة تشغيلية مرتبطة بحزم التحكم وإعادة التجميع. لذلك فإن دلالة النتائج لا تكمن في تحقيق تفوق مطلق في جميع المقاييس، بل في إظهار إمكانية توجيه قرار إعادة التجميع نحو موازنة أكثر واقعية بين موثوقية التسليم والكلفة التشغيلية في بيئة اتصال غير مثالية.

ولتحقيق موازنة أفضل نوصي بتوسيع هذا العمل مستقبلاً عبر تطوير دالة (MILP) نفسها لتراعي احتمالية نجاح الرابط، وكلفة إعادة الإرسال، وموثوقية الاتصال عند اختيار رؤوس التجمعات وتحديد العقد التابعة لها. كما نوصي بإجراء ضبط آلي لأوزان دالة المكافأة بدلاً من الاعتماد على ضبط تجريبي محدود لاختيار أوزان تحقق توازناً أفضل بين (FND) ، و (PDR)، والطاقة، وحمل التحكم. ويتطلب ذلك إعادة تدريب وكيل التعلم المعزز على المخرجات الجديدة

المراجع:

- 167

- [8] Baccour, N., Koubaa, A., Mottola, L., Zúñiga, M. A., Youssef, H., Boano, C. A., & Alves, M. (2012). Radio link quality estimation in wireless sensor networks: A survey. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 8(4), Article 34. <https://doi.org/10.1145/2240116.2240123>
- [9] Ding, X., Sun, G., Yang, G., & Shang, X. (2016). Link investigation of IEEE 802.15.4 wireless sensor networks in forests. *Sensors*, 16(7), Article 987. <https://doi.org/10.3390/s16070987>
- [10] Almutairi, H., & Zhang, N. (2024). A survey on routing solutions for low-power and lossy networks: Toward a reliable path-finding approach. *Network*, 4(1), 1–32. <https://doi.org/10.3390/network4010001>
- [11] الهلالي، م.، مرعي، أ.، وعباس، م. (2025). تصميم وتحقيق مقياس جودة وصلة اتصال جديد يحقق توازن الحمل داخل شبكات إنترنت الأشياء التي تعتمد على بروتوكول التوجيه (RPL). مجلة جامعة حمص، سلسلة العلوم الهندسية الميكانيكية والكهربائية والمعلوماتية، 47(6)
- [12] شاهين، خ.، والحمصي، أ. (2024). مقارنة أداء شبكات الحساسات اللاسلكية المعتمدة على طريقة دورة العمل مع تلك المعتمدة على بروتوكولات التوجيه التراتبية. مجلة جامعة حمص، سلسلة العلوم الهندسية الميكانيكية والكهربائية والمعلوماتية، 46(7).
- [13] Al-Husain, E. A., & Al-Suhail, G. A. (2021). E-FLEACH: An improved fuzzy based clustering protocol for wireless sensor network. *Iraqi Journal for Electrical and Electronic Engineering*, 17(2), 190–197. <https://doi.org/10.37917/ijeec.17.2.21>
- [14] El-Sayed, H. H., Abd-Elgaber, E. M., Zanaty, E. A., Alsubaei, F. S., Almazroi, A. A., & Bakheet, S. S. (2024). An efficient neural network LEACH protocol to extended lifetime of wireless sensor networks. *Scientific Reports*, 14, Article 26943. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-75904-1>
- [15] Cheng, X., Xu, C., Liu, X., Li, J., & Zhang, J. (2022). LEACH protocol optimization based on weighting strategy and the improved ant colony algorithm. *Frontiers in Neurorobotics*, 16, Article 840332. <https://doi.org/10.3389/fnbot.2022.840332>
- [16] Lechani, T., Ourari, S., Rahmoune, F., Amari, S., & Termeche, H. (2025). EDK-LEACH: Improving LEACH protocol-based machine learning in wireless sensor networks. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 37(2), 1251–1261. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v37.i2.pp1251-1261>
- [17] Ibrahim, S., Mostafa, M., Jnadi, A., Salloum, H., & Osinenko, P. (2024). Comprehensive overview of reward engineering and shaping in

- advancing reinforcement learning applications. *IEEE Access*, 12, 175473–175500. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3504735>
- [18] Jurado-Lasso, F. F., Jurado, J. F., & Fafoutis, X. (2025). *PyNetSim* [Computer software]. GitHub. <https://github.com/fdojurado/PyNetSim.git>
- [19] Gilbert, E. N. (1960). Capacity of a burst-noise channel. *Bell System Technical Journal*, 39(5), 1253–1265. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1960.tb03959.x>
- [20] Elliott, E. O. (1963). Estimates of error rates for codes on burst-noise channels. *Bell System Technical Journal*, 42(5), 1977–1997. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1963.tb00955.x>
- [21] Haßlinger, G., & Hohlfeld, O. (2008). The Gilbert-Elliott model for packet loss in real time services on the Internet. *Proceedings of the 14th GI/ITG Conference on Measurement, Modeling, and Evaluation of Computer and Communication Systems (MMB)*, 269–286.
- [22] Zuniga, M., & Krishnamachari, B. (2004). Analyzing the transitional region in low power wireless links. *Proceedings of the First IEEE International Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks (SECON)*.
- [23] Baccour, N., Koubaa, A., Mottola, L., Zúñiga, M. A., Youssef, H., Boano, C. A., & Alves, M. (2012). Radio link quality estimation in wireless sensor networks: A survey. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 8(4), Article 34.
- [24] Mamun, M. M. I., Hasan-Al-Mahmud, T., Kumar, S., & Islam, M. Z. (2010). Analyzing the low power wireless links for wireless sensor networks. *arXiv:1002.4838*. <https://arxiv.org/abs/1002.4838>
- [25] Cerar, G., Yetgin, H., Mohorčič, M., & Fortuna, C. (2018). Machine learning for wireless link quality estimation: A survey. *arXiv:1812.08856*. <https://arxiv.org/abs/1812.08856>
- [26] Mahmood, A., Hossain, M. M. A., & Gidlund, M. (2017). Cross-layer optimization of wireless links under reliability and energy constraints. *arXiv:1705.01774*. <https://arxiv.org/abs/1705.01774>
- [27] Mahmood, A., Hossain, M. M. A., Cavdar, C., & Gidlund, M. (2018). Energy-reliability aware link optimization for battery-powered IoT devices with non-ideal power amplifiers. *arXiv:1810.11902*. <https://arxiv.org/abs/1810.11902>

- [28] De Couto, D. S. J., Aguayo, D., Bicket, J., & Morris, R. (2003). A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing. Proceedings of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom), 134–146. <https://doi.org/10.1145/938985.939000>