

وثوقية شبكات الحساسات اللاسلكية المستخدمة للكشف المبكر عن الحرائق دراسة حالة : محمية الشوح والأرز في محافظة اللاذقية، سورية

الدكتور مثنى القبيلي*

الدكتور أحمد سليمان أحمد**

نيروز علي***

تاريخ الإيداع 14 / 9 / 2015. قُبل للنشر في 14 / 1 / 2016

□ ملخص □

وجهت العديد من الأبحاث الحديثة تركيزها على مسألة وثوقية شبكات الحساسات اللاسلكية المستخدمة في التطبيقات المختلفة، وخاصة في الكشف المبكر عن حرائق الغابات لضمان وثوقية إنذارات التنبه المرسل من قبل الحساسات والتقليل من معدّل الإنذارات غير الصحيحة. لذا حاولنا في هذا البحث تقييم وثوقية هذه الشبكات المستخدمة للكشف المبكر عن الحرائق في محمية الشوح والأرز بشكل رئيسي، من خلال تصميم شبكة حساسات لاسلكية هجينة تحاكي تضاريس المحمية ونذجتها باستخدام برنامج المحاكاة Opnet14.5. تمت المحاكاة وفقاً لعدة سيناريوهات من حيث سماحية عطل متزايدة للشبكة ناتجة عن اندلاع الحريق وانتشاره بدءاً بسماحية 0%، ومقارنة نتائجها مع نتائج تطبيق المعادلات الرياضية للوثوقية وفق حالات السيناريوهات ذاتها. إضافة لحساب التوافرية النهائية من خلال اقتراح آلية لتحسين وثوقية الشبكة المستخدمة باستخدام الفائضية، أي إضافة العقد الحساسة الاحتياطية والتي تحل مكان العقد التالفة نتيجة الحريق، وقد أثبتت النتائج زيادة الوثوقية بشكل ملحوظ. كما تم التنبؤ بوثوقية الشبكة المصممة بناءً على قيم وثوقية مختلفة للعقد المستخدمة باستخدام أحد أدوات الوثوقية وهو المخطّط الصندوقي.

الكلمات المفتاحية: شبكات الحساسات اللاسلكية، الوثوقية، سماحية العطل، التوافرية، الفائضية، التنبؤ بالوثوقية.

* مدرس، قسم هندسة الاتصالات والالكترونيات، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة تشرين، اللاذقية سورية .
** أستاذ مساعد، قسم هندسة الطاقة الكهربائية، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة تشرين، اللاذقية سورية.
*** طالبة دراسات عليا "ماجستير"، قسم إدارة الجودة MQM، الجامعة الافتراضية السورية SVU، دمشق سورية.

The Reliability of Wireless Sensor Networks Used For Early Detection of Fire, Status: Fir & Cedar Preserve in Lattakia, Syria.

Dr. Mothanna Alkubaily *

Dr. Ahmad S. Ahmad **

Nairouz Ali ***

(Received 14 / 9 / 2015. Accepted 14 / 1 / 2016)

□ ABSTRACT □

A lot of research directed its concern to the reliability of Wireless Sensor Networks (WSNs) used in various applications, especially in early detection of forest fires to ensure the reliability of warning alarms sent by sensors and reduce the average of false warnings.

In this research we have tried to evaluate the reliability of WSN used in early detection of fires in Fir and cedar preserve, mainly. By designing hybrid WSN network, similar to the terrains of the preserve and modeling it using program Opnet14.5. We have studied several scenarios, to allow increasing malfunction of the network resulting from fire break out and spreading: starting in allowance of 0% and comparing its results the results of mathematical equations of reliability according to the same scenarios. In addition, we have calculated the final availability through suggesting a mechanism to improve WSN reliability using the redundancy, i.e add sensitive spare nodes, which replace the damaged ones as the result of fire. The results have proved the remarkable increasing of reliability. Also, it has been predicted of the reliability of the network designed according to reliability of different values of the nodes used by using one of the reliability devices "the Block Diagram".

Key words: Wireless Sensor Networks, Reliability, Fault Tolerance, Availability, Redundancy, Reliability Prediction.

* Assistant Professor, Departement of Communication and Electronics, Faculty of mechanical and electrical engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

** Associate Professor, Departement of Electrical Energy, Faculty of mechanical and electrical engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

*** Postgraduate student, Departement of Quality Management, Syrian Virtual University, Damascus, Syria.

مقدمة:

تتكوّن شبكات الحساسات اللاسلكية من عقد ذكية صغيرة الحجم، لا تعتمد على أي بنية تحتية، تعمل معاً لمراقبة ظاهرة أو منطقة محدّدة لتجميع بيانات المعلومات المطلوبة ومن ثم إرسالها لاسلكياً إلى مركز معالجة مركزي يدعى Sink [1]، حيث تتطلب عملية التّحسس للظواهر المدروسة وثوقية البيانات المجمّعة وعدم ضياعها، والقدرة على الصيانة السريعة في حال حدوث عطل في أي جزء من أجزاء الشبّكة، لذا فمن الضّروري ضمان استمرارية أداء الشبّكة بالعمل مع وجود حالات تعطلّ في بعض العقد.

تدعم سماحية العطل وثوقية أداء الشبّكة بفعالية من خلال محاولة استمرارها بالتّحسس وإرسال البيانات بوثوقية على الرغم من وجود الأعطال في النظام، حيث لا يؤثر وجود حالات التّعطل في الشبّكة على طبيعة عملها، بل تهدف لدراسة إمكانية عمل النظام بوثوقية مع وجود حالات متزايدة من الأعطال، وتعدّ سماحية العطل قضية هامّة في تقييم أداء وفعالية التطبيقات المختلفة لشبكات الحساسات اللاسلكية [2,3].

وتعدّ العقد الحساسات مكونات غير قابلة للإصلاح، حيث أن تعرّضها للخطأ أو العطل سيؤدي إلى فشل المكوّن، لذا يتم استخدام الفائضية المادية Physical Redundancy أي استخدام العقد الاحتياطية البديلة ذات المواصفات المطابقة للعقد المتعطّلة والتي تحل محلها، وهذه الطريقة هي طريقة فعّالة لعودة النظام إلى العمل بفعالية في حال الفشل الدائم للعنصر المستبدل [4] على الرغم من تكلفتها الاقتصادية الزائدة.

أهمية البحث وأهدافه:

تعدّ سماحية العطل مسألة هامّة لأجهزة الحساسات المتوضّعة في أماكن يصعب استبدالها ، وتعبّر عن مقدرة الوحدة الوظيفية على تنفيذ المهمة المطلوبة في حال وجود عدد من الأعطال، أي لأي مدى تبقى الشبّكة تؤدي عملها المطلوب بوثوقية عالية مع وجود تعطلّ في العقد الحساسات بنسب مختلفة، وكلّما كانت الشبّكة تؤدي المهمة المطلوبة منها مع نسبة تعطلّ عالية كانت وثوقيتها أعلى [5,6].

يعدّ هذا البحث من أوائل الأبحاث التي تدرس وثوقية شبكة حساسات لاسلكية هجينة مستخدمة للكشف المبكر عن حرائق المحميات الطبيعية في سورية، والتأكد من وثوقية البيانات المستلمة في اتّخاذ الإجراءات والتدابير المطلوبة للحد من الكوارث البيئية، ليصبح نواة أساسية مستقبلاً لأي نظام حيوي، أو بيئي، أو خدمي حديث يسعى لتطبيق واستخدام شبكة WSN للحد من الأضرار الكارثية بضمن وثوقية عمل هذه الشبّكة.

يهدف البحث لدراسة أثر سماحية العطل في شبكات الحساسات اللاسلكية على وثوقية الشبّكة الكلية، من خلال تحديد المراحل والخطوات الإجرائية الضّرورية للتأكد من وثوقية الشبّكة أي وثوقية البيانات، والتي يتم استقبالها من العقد الحساسات عن طريق نمذجتها، ودراسة طرائق تحسين الوثوقية للوصول إلى أعلى وثوقية ممكنة لشبكة الحساسات اللاسلكية المستخدمة في الإنذار والكشف المبكر عن حرائق محمية الشّوح والأرز الطبيعية - محافظة اللاذقية - سورية، الأمر الذي يساعد مستقبلاً على وضع منظومة قابلة للتّنفيد الواقعي تحمي البيئات الحرجية.

طرائق البحث ومواده:

أجريت المحاكاة باستخدام محاكي الشبكة Opnet 14.5 [7]، والذي يعد طريقة فعّالة للبرمجة غرضية التّوجه Object Oriented، كما يعدّ لغة برمجة فعّالة، سهلة التعلّم، ذات بنية معطيات عالية المستوى، يعتمد على لغات

البرمجة المتطورة ++C، ويتبع البناء الهرمي في عملية تصميم ونمذجة الشبكة وعناصرها، جاءت التسمية من اختصار Optimized Network Engineering Tool. يوفر البرنامج مكتبة غنية من النماذج لتنفيذ سيناريوهات محاكاة شبكات سلكية ولاسلكية، ويمكنه التعامل مع مجموعة واسعة من البروتوكولات، حيث يمكن تحليل سلوك وأداء النظام الذي تتم نمذجته من خلال محاكاة الأحداث المنفصلة، ولا يضع قيوداً على أنواع العقد التي يمكن توزيعها في الشبكة، كما أنه لا توجد قيود على عدد نماذج العقد، أو حالاتها في الشبكة، إضافة إلى أن العناصر والمعايير التي يدعمها هي عناصر تجارية متوفرة في سوق الشبكات بشكل واسع وحقيقي، مما يجعل النتائج دقيقة جداً وتكاد تكون واقعية، وينقسم الهيكل الهرمي للبرنامج لثلاثة مجالات رئيسية: مجال الشبكة، ومجال العقدة، ومجال العملية، وقد استخدمنا في بحثنا هذه النسخة من البرنامج كونها متطورة ومجانية ومتوفرة.

أجريت الحسابات الرياضية اعتماداً على معادلات تقوم بحساب بارامترات الوثوقية، والتوافرية [8,9]، بناءً على معطيات الأعطال خلال فترة زمن العمل، والممتلئة لأشهر الصيف في محمية الشوح والأرز حيث يزداد اندلاع الحرائق نتيجة الجفاف، والرطوبة العالية، والرياح الجافة، وتطلبت آلية الحساب توثيق عدد الأعطال، وعدد الإصلاحات لكل حالة حريق، وزمن العمل حتى حدوث عطل العقد TTF، وزمن إصلاح العطل TTR. كما قمنا بالتنبؤ بثوقية شبكة WSN باستخدام المخطط الصندوقي للوثوقية بناءً على وثوقية الحساسات المكونة لها.

1- وثوقية شبكات الحساسات اللاسلكية Reliability Of WSNs:

يُعبّر عنها بلزمن الوسطي حتى حدوث العطل [8] "MTTF- Mean Time To Fail" وهي مقدرة الوحدة الوظيفية على تلبية مواصفات أداء محددة بشكل جيد خلال فترة زمنية محددة [5,6]، وكذلك تعبر عن دراسة سماحية العطل في WSN وهي مقدرة الوحدة الوظيفية على أداء المهمة المطلوبة في حال وجود عدد من الأعطال، أي لأي مدى تبقى الشبكة تؤدي عملها المطلوب بثوقية عالية مع وجود تعطل في العقد الحساسة بنسب مختلفة، وكلما كانت هذه الشبكة تؤدي الهدف المطلوب منها مع نسبة تعطل عالية كلما كانت الشبكة ذات وثوقية عالية [5,6].

1-1 وثوقية شبكات الحساسات اللاسلكية المستخدمة للكشف المبكر عن الحرائق:

تُستخدم WSNs كأهم طرق الوقاية من حرائق الغابات، وتُعد الوثوقية واحدة من أهم مقاييس أدائها، حيث أن المستوى العالي من الوثوقية شرط هام لاستخدامها في البيئات الطبيعية، ويمكن تقييم مستوى وثوقية الشبكة باستخدام نمذجة الوثوقية، ويتبع المنهجية التالية للتحقق من وثوقية WSNs [10]:

1. وضع نموذج رياضي لقياس وثوقية الشبكة.

2. قياس أو تقدير بارامترات النموذج.

3. حساب وثوقية الشبكة على أساس النموذج الموضوع، والمعايير المحددة.

وتعني الوثوقية "فترة حياة شبكات الحساسات اللاسلكية، ومدى إمكانية انتعاشها بعد الهجمات الخبيثة"، وإن الاستخدام الموثوق هو القضية الأكثر أهمية عند نشر شبكات الحساسات اللاسلكية، والهدف من النموذج الموثوق المعتمد هو تصميم نظام سماحية عطل مقبول للحفاظ على عمل الشبكة بفعالية [5,13].

2- سماحية العطل Fault Tolerance:

هي مقدرة النظام على الاستجابة بأمان وفعالية والاستمرار بالعمل حتى في حالة فشل غير متوقع للأجهزة، وتُصنّف الأنظمة بناءً على قدرتها للتعامل مع حالات الأعطال لثلاثة أنظمة [3]: نظام كشف العطل والذي يستطيع اكتشاف الأعطال فقط، ونظام تشخيص العطل والذي يمكنه إضافة للسابق تعيين سبب حدوث العطل، والنظام الآمن

من الأعطال والذي يقدّم تعريفاً للعطل الحاصل، ويمنع انتشاره للمناطق الأخرى، الأمر الذي يجعله مناسباً للأنظمة التي تستعيد حالة العمل الطبيعي بعد تصليح العطل. توجد أيضاً تقنيات حديثة لسماحية الأعطال تتعامل مع نماذج الأعطال المختلفة عند مختلف الطبقات لبنية الشبكة، [14,15]:

- a. منع العطل: بهدف ضمان التّجنب المسبق لحدوث الأعطال.
- b. كشف العطل: باستخدام معايير مختلفة لتقييم مؤشرات الأعطال المحتملة.
- c. عزل العطل: بتحديد العلاقة بين المؤشرات المختلفة لوقوع العطل، وتحديد مسبق لكافة نماذج العطل.
- d. تحديد نوع العطل: تعريفه وتحديد موضعه بدقة.
- e. تغطية العطل: لإلغاء التأثيرات السلبية الناتجة عن حدوث العطل.

3- الفائضية Redundancy:

يُطلق مصطلح "الإدارة الفعالة" أحياناً على سماحية العطل نظراً للاستخدام الواسع للعناصر الفائضة في النظام [4]، ويصنّف الفائض اعتماداً على نوع العطل إلى: زمني ومادي ومعلوماتي.

أ- الفائض الزمني Time Redundancy:

يتعامل مع الأعطال المؤقتة والدورية، ويستخدم لضمان سماحية العطل على المستوى البرمجي، حيث تستطيع البرمجيات استرجاع وضعها الأولي للزمن الذي يسبق لحظة حدوث الخلل وتكون هي الأكثر ملائمة للتقنيات التي تعتمد الفائض في الزمن [4].

ب- الفائض المادي Physical Redundancy:

وهي مضاعفة الموارد، وتستخدم لضمان سماحية العطل على مستوى العتاد الصلب، كتعطل أحد المكونات المادية فيتمّ استبداله بعنصر مماثل له قادر على إنجاز مهام العنصر الذي فشل، وتكون عالية الفعالية في حال الفشل الدائم للعنصر المستبدل [4].

ت- الفائض المعلوماتي Information redundancy:

أي استخدام معلومات إضافية لاكتشاف الأخطاء الحاصلة، مثل رسائل جس النبض لتحديد حالة العقدة للتأكد أنها على قيد الحياة [4].

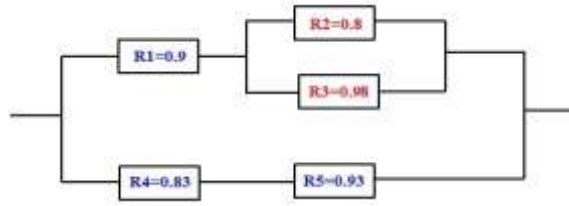
4- التنبؤ بالوثوقية Reliability Prediction:

تعدّ عملية التنبؤ بالوثوقية عملية أساسية في تقويم تصميم المنتج خلال كافة مراحل الإنتاج بدءاً من دراسة الجدوى،

يبدأ التنبؤ بالوثوقية من مستوى العنصر لمستوى النظام down-up approach، كما تعطي عملية التنبؤ معياراً لشؤون التصميم والمفاضلة بين الاختيارات والمستويات المختلفة لجودة العناصر المختارة أثناء مرحلة التصميم.

4-1. المخطّط الصندوقي للوثوقية Reliability Block Diagram:

وهو مخطّط يمثّل وثوقية جهاز أو نظام بدلالة وثوقية عناصره على شكل صناديق وعلاقتها مع بعضها البعض، وقيم تمثّل وثوقية كل صندوق. يعدّ المخطّط RBD من أهم الطرق لنمذجة الوثوقية، ويتكوّن من صناديق مرتبطة على التسلسل أو التفرع، ويمثّل كل صندوق وثوقية جزء من النظام [8,9].



الشكل (1): نموذج المخطط الصندوقي للوثوقية

أ. الرّيب على التسلسل **Serial Components**: يعمل النظام بنجاح إذا عملت جميع مكوناته بنجاح ، ويفشل بفشل واحد أو أكثر من مكوناته، تعطى وثوقية النظام والتي تكون أصغر من وثوقية أي عنصر بالعلاقة:

$$R_{sys} = R_1 \times R_2 \times \dots \times R_n \quad (1)$$

ب. الرّيب على التفرع **Parallel Components**: يعمل النظام بنجاح إذا عمل واحد على الأقل من مكوناته، ويفشل بفشل جميع مكوناته، وتكون وثوقية النظام أكبر من وثوقية عناصره، وتعطى بالعلاقة:

$$R_{sys} = 1 - (1 - R_1) \times (1 - R_2) \times \dots \times (1 - R_n) \quad (2)$$

ت. الرّيب المختلط: يتضمن الرّيب التسلسلي والتفرعي، ويتم التنبؤ بوثوقية النظام بناءً على معادلات الرّيب التسلسلي والتفرعي.

5- التوافرية **Availability**:

هي قابلية مكون لتنفيذ وظائفه المطلوبة تحت شروط محدّدة بفترة زمنية معينة عند لحظة الطلب [17]، ويوجد فارق بين الوثوقية والتوافرية، حيث تشير الوثوقية لعملية خالية من الفشل أثناء فاصل زمني، والتوافرية لعملية خالية من الفشل في لحظة محدّدة من الوقت، كما ترتبط التوافرية بالوثوقية حيث تتطلب الوثوقية المنخفضة توفير مكونات الاحتياط اللازمة لتأمين توافرية عالية، ويجب توفير الإمكانيات لجعل النظام ذو توافرية عالية ووثوقية عالية.

6- المعادلات الرياضية لحساب محدّدات الوثوقية والتوافرية:

ترتكز المعادلات الرياضية للوثوقية ومحدّداتها، والتوافرية على عدّة بارامترات، والتي يجب أن تكون معلومة، أو قابلة للحساب الرياضي [8,16]، وتتمثل بالآتي:

أ. عدد حالات العطل n_1 : تمثل حالات تعطل العقد الحساسة النهائية الناتج عن اندلاع الحرائق، وانهايار العقد نتيجة ارتفاع درجة الحرارة عن عتبة تحملها، وبالتالي تعطلها عن العمل.

ب. عدد الإصلاحات n_2 : تعدّ العقد الحساسة مكونات غير قابلة للإصلاح، لذا تتمثل الإصلاحات في هذا البحث باستبدال العقد التالفة بعقد أخرى مطابقة تماماً للمواصفات أي استخدام الفائض المادي، وبالتالي فإنّ "عدد الإصلاحات=عدد الأعطال".

ت. زمن العمل حتى التّعطل **Time to Fail - TTF**: الزمن بدءاً من دخول العقدة مجال العمل، وحتى انهايارها وفقد قدرتها على التّحسس وجمع المعلومات.

ث. الزمن الوسطي بين الأعطال **MTBF-Mean Time Between Failure** : يعطى بالمعادلة الآتية:

$$MTBF = (TTF_1 + TTF_2 + \dots + TTF_{n_1}) / n_1 \quad (3)$$

ج. معدّل الفشل **Failure rate**: والذي يرمز له بـ λ

$$\lambda = 1 / MTBF \quad (4)$$

د. **الوثوقية Reliability**: تعطى في فترة الحياة المفيدة للعقدة كتابع أسي لزمن المهمة t ، ومعدل الفشل λ ، وفق المعادلة الآتية:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (5)$$

د. **زمن إصلاح العطل TTR–Time to Repair**: هو الزمن المستغرق بدءاً من تعطل العقدة، وحتى استبدالها بعقدة جديدة مطابقة للمواصفات، والبدء بعملية التحسس.

د. **الزمن الوسطي للإصلاح MTTR–Mean Time To Repair**: يعطى بالمعادلة الآتية:

$$MTTR = (TTR_1 + TTR_2 + \dots + TTR_{n_2}) / n_2 \quad (6)$$

د. **التوافرية Availability**: ويعبر عنها كمياً بنسبة الزمن التي يكون النظام فيها جاهزاً لنسبة الزمن الكلي، وتعطى بالعلاقة الآتية:

$$Av = (MTBF) / (MTBF + MTTR) \quad (7)$$

7- آلية تحسين انخفاض الوثوقية الناتج عن سماحية العطل المتزايدة:

تم اقتراح الآلية الآتية:

من الملاحظ أنه بزيادة سماحية العطل تنخفض الوثوقية النهائية للشبكة، لذا فإن الطريقة المتبعة لزيادة الوثوقية هنا هي بزيادة العتاد الصلب، حيث يُستبدل كل عنصر من المكونات المادية المتعطلة بعنصر مماثل قادر على إنجاز مهام العنصر الذي فشل، وخاصةً أن الحساسات اللاسلكية غير قابلة للإصلاح، فأى خطأ أو عطل يسبب الفشل الدائم، وهذا الفائض سينعكس إيجابياً على وثوقية الشبكة ذلك لأن العقد كافةً ستصبح قادرة على التحسس ضمن مجال تغطيتها وإرسال المعلومات المجمعّة من جديد. وسيتم من خلال المحاكاة دراسة الطريقة المقترحة وإظهار سلبياتها إن وجدت، واقتراح طريقة لتلافي السلبيات تكون الأفضل لأخذها بالحسبان في المستقبل.

النتائج والمناقشة:

8- المحاكاة وإظهار النتائج:

8-1 الشبكة المستخدمة للمحاكاة:

تمّ تصميم شبكة حساسات لاسلكية هجينة Heterogeneous WSN لمحمية الشّوح والأرز باستخدام المحاكاة ممتدة على مساحة 1350 هكتار، اختيرت العقد الحساسة بناءً على التحسس لخطر اندلاع الحريق، وقُسمت مساحة العمل لـ 6 قطاعات مستخدمةً طبولوجيا الشجرة العنقودية Cluster–Tree. يتكوّن كل قطاع من نوعين من العقد هي: "15" عقدة نهائية بسيطة Waspnote [18] تقوم بمهمة التحسس وجمع المعلومات، ومن عقدة قوّة وحيدة كقائد للعنقود Plug & Sense Waspnote [19]، وعقدة مجمعة Sink وحيدة للشبكة كاملةً هي Meshlium [18]، حيث تعمل جميع العقد على البروتوكول ZigBee–Pro [20]. تقوم العقد الحساسة المختارة برصد العوامل البيئية التالية [21]: درجة الحرارة، الرطوبة النسبية، أول أكسيد الكربون CO، ثاني أكسيد الكربون CO₂.

استُخدم في البحث آلية الاتصال وحيد الفقرة ومتعددة الفقرات للعقد النهائية مع قائد العنقود في كل قطاع وبحيث لا تتصل العقد فيما بينها. وتتصل قادة العناقيد مباشرةً بفقرة واحدة مع العقدة الرئيسية Sink، ولا تتصل فيما بينها أيضاً، وتتصل جميع العقد بشكل لاسلكي، واستُخدم لتوصيل الشبكة بروتوكول التوجيه عند الطلب AODV.

2-8 بارامترات الأداء Performance Parameters:

هي البارامترات التي تقيّم أداء وثوقية شبكة الحساسات اللاسلكية [7,22]:

1 البيانات المفقودة (Data Dropped (Retry Threshold Exceeded bits/sec):

وهو حركة البيانات الإجمالية الفاشلة للطبقات الأعلى بالبت/ثانية، والمنقلة بواسطة طبقة التحكم بالوصول المتعدّد MAC 802.15.4 في الشبكة، نتيجةً لعمليات إعادة الإرسال غير النّاجحة.

2 حركة البيانات المستقبلية (Data Traffic Received (bits/sec):

وهو مجموع حركة البيانات المستقبلية بنجاح للشبكة، بواسطة طبقة التحكم بالوصول المتعدّد MAC من الطبقة الفيزيائية، وتقاس بـ bits/sec، ويشمل هذا البارمتر إعادة الإرسال للبيانات المفقودة.

3 حركة البيانات المرسلّة (Data Traffic Sent (bits/sec):

تمثّل الحركية المتقلّبة بواسطة جميع طبقات التحكم بالوصول المتعدّد MACs 802.15.4 في الشبكة.

4 حمل الشبكة Network Load:

هو حمل الشبكة الكلي مقدراً بـ bit/sec، والمقدّم من الطبقات الأعلى للأدنى في العقد اللاسلكية المكونة للشبكة. أي عند تواجد حركة نقل كبيرة على الشبكة من الصّعب معالجة الحركية، وهذا ما يُدعى حمل الشبكة، حيث أن الشبكة الفعّالة والموثوقة يمكنها أن تدبر بسهولة هذه الحركية.

5 إدارة الحركة المستقبلية (Management Traffic Received (bits/sec):

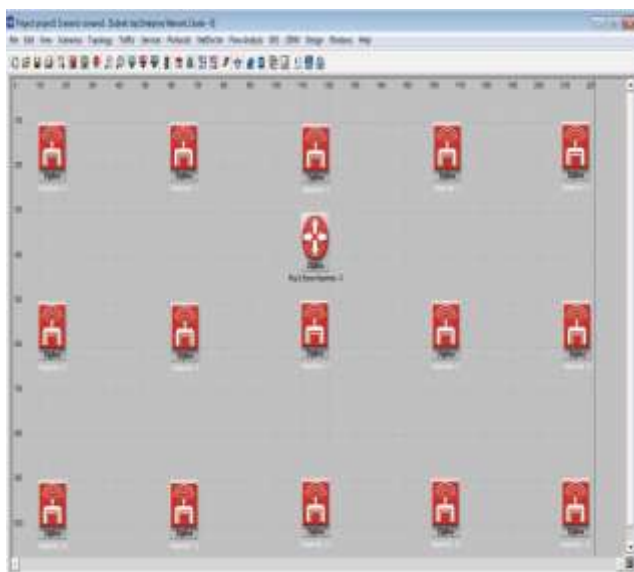
إدارة الحركة الإجمالية للبيانات التي استقبلت بنجاح بواسطة طبقة التحكم بالوصول المتعدّد من كافّة العقد عبر الطبقة الفيزيائية مقدراً بالبت/ثانية، ويتضمن هذا البارمتر الإشارات اللاسلكية، وطلبات التّزويد بهذه الإشارات.

6 إدارة الحركة المرسلّة (Management Traffic Sent (bits/sec):

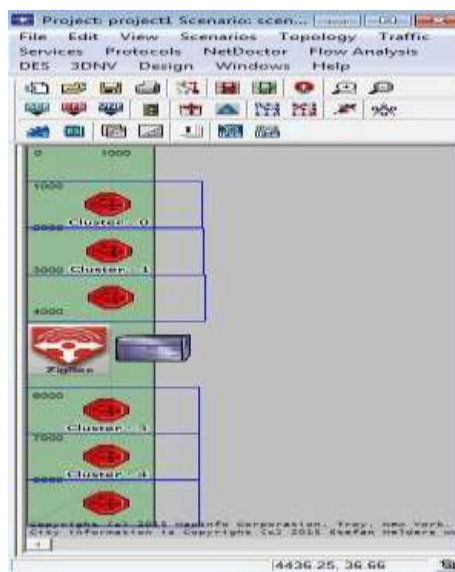
إدارة حركة البيانات الإجمالية المرسلّة بواسطة MAC من كافّة العقد، وحيث أنّ حساب حجم الحزم المرسلّة يتضمّن الطبقة الفيزيائية، وترويسات الـ MAC من الحزمة، والإشارات اللاسلكية، وطلبات التّزويد بها.

3-8 سيناريوهات المحاكاة:**• أولاً: تقييم مدى وثوقية شبكات الحساسات اللاسلكية دون وجود عطل:**

- السيناريو الأول: إجراء محاكاة للشبكة في حالة مثالية حيث جميع العقد نشيطة، أي تولّد جميع العقد بيانات وتقوم بإرسالها لـ Sink، وعلى اعتبار أنّ سماحية العطل تقريباً " 0% ". تتألف الشبكة إجمالاً من 97 عقدة، وبزمن محاكاة 30 دقيقة، علماً أنّ الصّياغات المختلفة غير مأخوذة بالحسبان، وتمّ أخذ وثوقية نقل البيانات بالحسبان من خلال دراسة حركتها، والذي يمثّل كمّيّة البيانات التي تتحرك بنجاح من مكان لآخر في واحدة الزمن.
- الغاية: تقييم وثوقية شبكة الحساسات اللاسلكية الهجينة التي تغطّي محميّة الشّوح والأرز، في حال عدم حدوث حريق وانهايار العقد نتيجة الحرارة.



الشكل (3): القطاع الأول من الشبكة المدروسة، المطابق للقطاعات الخمسة الباقية



الشكل (2): شبكة WSN على واجهة البرنامج Opnet 14.5

• ثانياً: **تقييم وثوقية شبكة WSN بسماحيات أعطال متزايدة 10%، 25%، 35%**، تم استخدام السيناريوهات

الثلاثة الآتية:

- **السيناريو الثاني:** بفرض اندلاع حريق لأحد الأسباب في الجهة الشمالية الغربية من القطاع الأول للشبكة المصممة، وبوجود العوامل المؤدية لانتشار الحريق، وزيادته كسرعة الرياح. ينتشر الحريق في الاتجاهين الشمالي الشرقي، والجنوبي الغربي، بحيث ينتشر بسرعة $3m.s^{-1}$ بالاتجاه الأول و $5m.s^{-1}$ بالاتجاه الآخر، وعند وصول الحريق لكل عقدة حساسة، وبعد تجاوز عتبة الحرارة التي يتحملها الحساس $+65^{\circ}C$ [18]، يحدث انهيار وتعطل للعقد، وتصل سماحية العطل لـ 10% من الشبكة كاملةً، وعدد العقد المتعطلة تبلغ 9 عقد من أصل 97 عقدة.

الغاية: تقييم وثوقية الشبكة كاملة آخذين بعين الاعتبار سماحية العطل 10%، وبزمن محاكاة يبلغ 30 minutes، وإظهار نتائج المحاكاة كمساحيات قيم متوسطة Average.

- **السيناريو الثالث:** بفرض اشتداد الرياح بالاتجاهين المذكورين في السيناريو الثاني بسرعة $5m.s^{-1}$ بالاتجاه الأول، و $7m.s^{-1}$ بالاتجاه الآخر، أي يمتد الحريق ليغطي مساحات أكبر من المحمية تشمل مساحة القطاع الأول كاملةً، و 8 حساسات من القطاع الثاني حيث تنهار العقد وتتعرض عند تجاوز عتبة الحرارة التي يتحملها الحساس $+65^{\circ}C$ [18]، وتصل سماحية العطل لـ 25% من الشبكة الحية كاملةً، ويبلغ عدد العقد المتعطلة والميتة 23 عقدة في الشبكة.

الغاية: تقييم وثوقية الشبكة آخذين بالحسبان سماحية العطل 25%.

- **السيناريو الرابع:** تستمر الرياح بالاشتداد بالاتجاهين المذكورين في السيناريو الثالث وبنفس السرعة، مما يساهم بامتداد الحريق ليغطي مساحة القطاعين الأول والثاني بالكامل من المحمية، وعقدتين من القطاع الثالث، وتصل سماحية العطل لـ 35% من الشبكة الحية كاملةً، وعدد العقد المتعطلة والميتة تبلغ 32 عقدة في الشبكة.

الغاية: تقييم وثوقية الشبكة آخذين بالحسبان سماحية العطل 35%.

• ثالثاً: تقييم وثوقية شبكة WSN باستخدام الفائض المادي لحالة الشبكة بسماحية العطل الأعلى المدروسة

35%، تم استخدام السيناريو الآتي:

- **السيناريو الخامس:** بهدف تحسين وثوقية الشبكة استخدمنا آلية الفائضية من حيث الفائض المادي، حيث تم إضافة عقد حساسة ذات مواصفات مطابقة، ومن نفس المصدر المصنَّع، وذات جودة مماثلة للعقد التي تنهار حرارياً، كاحتياطي تحل محلها عند موتها وخروجها عن العمل.
- **الغاية:** دراسة أثر الطريقة المقترحة لتحسين الوثوقية باستخدام الفائضية لـ 32 عقدة متعطلة ناتجة عن سماحية عطل 35%.

8-4 نتائج المحاكاة:

في نتائج المحاكاة كافةً استُخدم المحور الأفقي للزمن Time مقدراً بالثانية، والمحور الشاقولي للبيانات Data مقدراً بالبتات وذلك وفقاً للبارامترات المدروسة، وموضَّح اسم هذا البارمتر أعلى كل منحنى من المنحنيات في النتائج.

8-4-1 نتيجة السيناريو الأول:

يبين الشكل (4) نتائج عمليات المحاكاة للبارامترات التي تم تنفيذها على السيناريو الأول.



الشكل (4): نتائج محاكاة الشبكة في حال عدم وجود عطل وقبل اندلاع الحريق

تظهر نتائج المحاكاة من خلال المنحنيات الممثلة للبارامترات المدروسة أن شبكة WSN الهجينة المصممة للكشف المبكر عن الحرائق قد أظهرت نتائج مميزة للوثوقية بمقارنة كمية البيانات المرسله والمستقبله والمبينة من القيم على محور البيانات، إضافة لإدارة حركة البيانات المرسله والمستقبله، وذلك من خلال حركة البيانات الإجمالية للطبقات الأعلى، نتيجة لعمليات إعادة الإرسال غير الناجحة، حيث يوجد حركة نقل كبيرة كحمل على الشبكة. كما أظهرت منحنيات حركة البيانات المستقبله استقبال البيانات بنجاح للشبكة والذي شمل إعادة الإرسال للبيانات المفقودة، والذي يمثل ضعف المنحني مقارنة مع المنحني الذي يمثل حركة البيانات المرسله بواسطة جميع الطبقات مضافاً إليها البيانات الناتجة عن عمليات إعادة الإرسال غير الناجحة والناجحة للبيانات المفقودة التي لم تصل. وبمقارنة إدارة

الحركة الإجمالية للشبكة المرسله والمستقبله نجد أن منحنى البارامتر الأخير يُقابل ضعف قيم منحنى الحركة المرسله، وهذا يدلّ على استقبال البيانات المرسلة بوثوقية عالية.

2-4-8 نتيجة السيناريو الثاني:

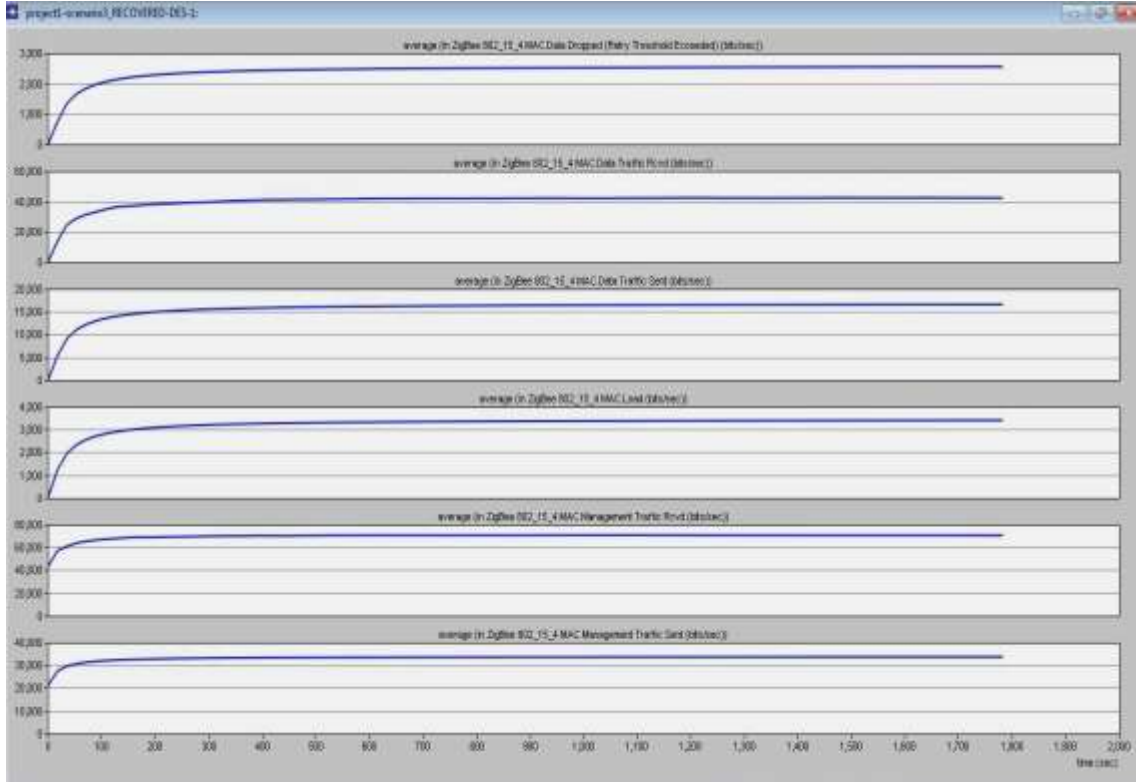
يبين الشكل (5) نتائج عمليات المحاكاة للبارامترات التي تم تنفيذها في السيناريو الثاني.



الشكل (5): نتائج محاكاة الشبكة بوجود سماحية عطل 10%

3-4-8 نتيجة السيناريو الثالث:

يبين الشكل (6) نتائج عمليات المحاكاة للبارامترات التي تم تنفيذها في السيناريو الثالث.



الشكل (6): نتائج محاكاة الشبكة بوجود سماحية عطل 25%

4-4-8 نتيجة السيناريو الرابع:

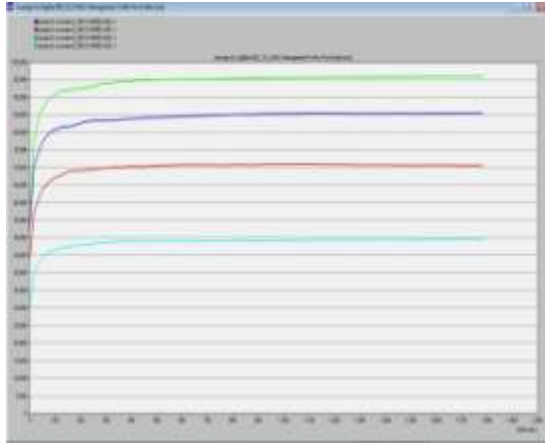
يبين الشكل (7) نتائج عمليات المحاكاة للبارامترات التي تم تنفيذها في السيناريو الرابع.



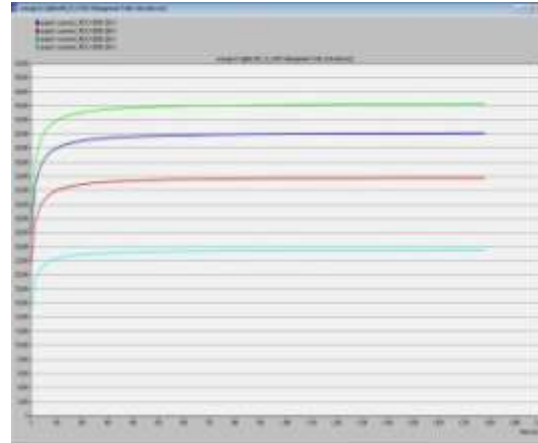
الشكل (7): نتائج محاكاة الشبكة بوجود سماحية عطل 35%

تظهر نتائج المحاكاة في الأشكال (5,6,7) أنّ شبكة WSN بيّنت نتائج متفاوتة للوثوقية نتيجة سماحيات العطل المتزايدة، فعند سماحية عطل 10% كانت المنحنيات مطابقة تقريباً بفروق بسيطة للشكل (4) وهذا يدلّ أنّ شبكة WSN تتمتع بالقدرة على التعامل مع الظروف الآتية، حيث أنّ انضمام عدّة عقد جديدة أو خروجها من الشبكة

الكبيرة نسبياً لايؤثر على فاعلية أدائها بشكل كبير كما في حال نسبة العقد المتعطلة عالي. أما عند سماحيات العطل 25% و 35% نلاحظ انخفاض منحنيات الحركة المرسله والمستقبله بشكل ملحوظ إلى النصف أو أقل تقريباً وهذا يدل على أداء الشبكة مهامها بفعالية ولكن أخفض من حالة عدم وجود أعطال، حيث تبين انخفاض الوثوقية النهائية للشبكة عكساً مع ازدياد نسبة سماحية العطل، ولكن رغم حالات التّعطّل المتزايدة إلا أنّ استمرار عمل الشبكة بوثوقية يدلّ على فعالية أداء عمل هذه الشبكة، ويبين الشكلين (8,9) مقارنة للسيناريوهات الأربعة من حيث البارمترين إدارة الحركة المرسله والمستقبله، وهذا يوضّح انخفاض كمية بيانات الشبكة مع ازدياد سماحية العطل.



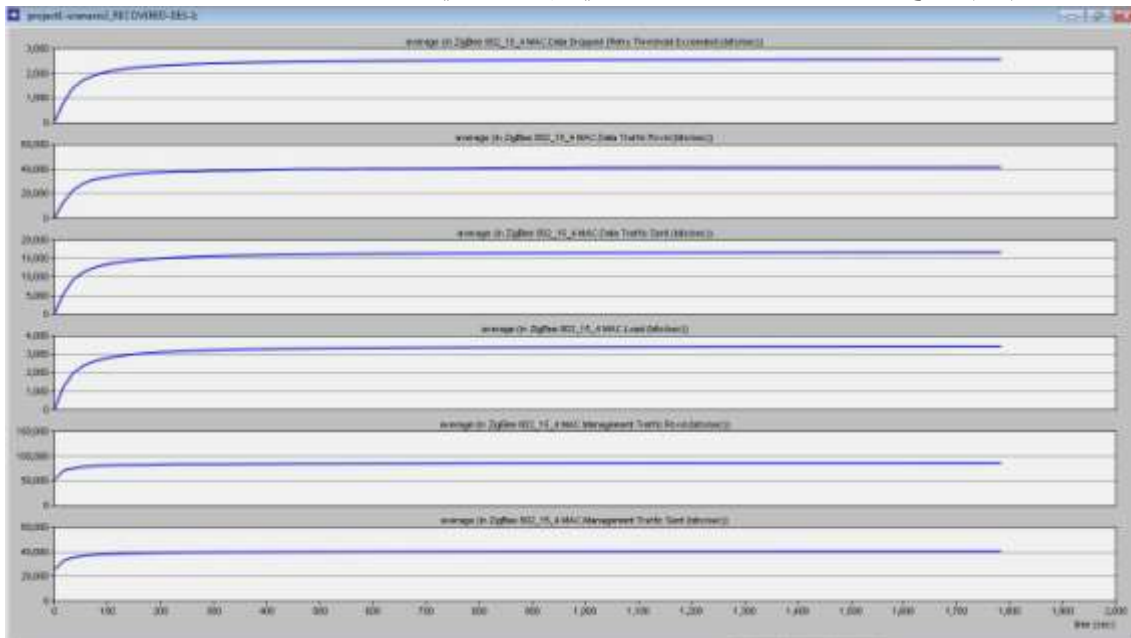
الشكل(9): مقارنة السيناريوهات الأربعة من حيث MTR



الشكل(8): مقارنة السيناريوهات الأربعة من حيث MTS

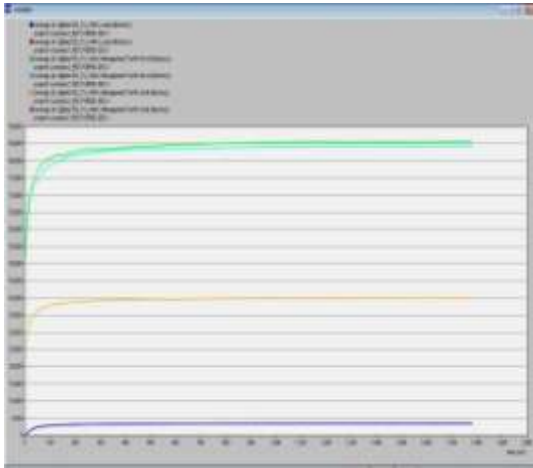
8-4-5 نتيجة السيناريو الخامس:

يبين الشكل (10) نتائج عمليات المحاكاة للبارمترات التي تم تنفيذها في السيناريو الخامس.

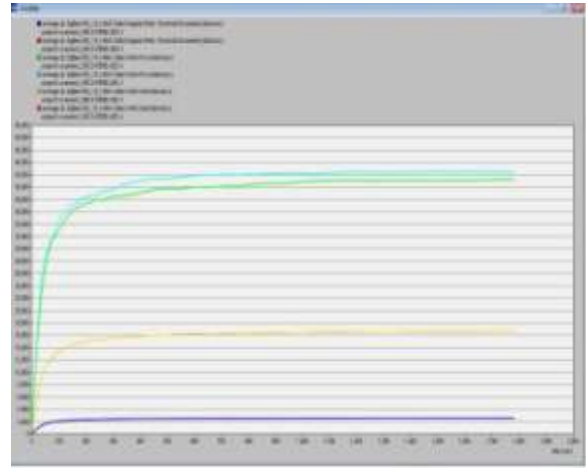


الشكل (10): نتائج محاكاة الشبكة مع العقد الاحتياطية " الفانضية"

تظهر نتائج المحاكاة في الشكل (10) والذي يمثل دراسة فعالية الاقتراح المفروض وهو استخدام الفائض المادي للشبكة في حالة سماحية العطل 35%، وبالمقارنة مع حالة الشبكة المثالية في الشكل (4) نجد حالة تطابق تقريبية بين المنحنيات وهذا يدل على زيادة وثوقية الشبكة، وعلى فعالية هذا الاقتراح والاختلاف البسيط بين منحنيات البارامترات ناتج إما عن الضجيج والتشويش في وسط الاتصال اللاسلكي أو لأسباب أخرى، لكن من الناحية الاقتصادية فإن الفائضية تسبب تكلفة اقتصادية عالية نتيجة مضاعفة الموارد، وتم اقتراح دراسة مستقبلية لتقليل التكلفة العالية بإضافة عدة عقد حساسات متقلة كعقد احتياطية بناءً على طوبولوجيا الشبكة وانتشار العقد وتضاريس المنطقة. يبين الشكلين (11,12) مقارنة منحنيات البارامترات السنّة للسيناريوهين الأول والخامس.



الشكل (12): مقارنة السيناريوهات الأربعة بالنسبة لـ Load & MTS & MTR



الشكل (11): مقارنة السيناريوهات الأربعة بالنسبة لـ DD & DTR & DTS

9- حساب محددات الوثوقية والتوافرية :

بالتعويض في المعادلات الرياضية الواردة في الفقرة 6، ووفقاً لحالات السيناريوهات الخمسة المدروسة في الفقرة 8، يتم حساب الوثوقية والتوافرية بهدف التأكد من وثوقية النّمدجة الحاسوبية بشكلٍ رياضي للتأكد ومطابقة النتائج، حيث التوافرية تنتج بعد تطبيق الفائض المادي للعقد كآلية لتحسين الوثوقية، ونورد مثالاً عن آلية التطبيق في حالة الشبكة بوجود سماحية عطل 25%، وعلى اعتبار أنّ الحرائق تحدث خلال أشهر الصيف في سورية.

9-1 الشبكة بسماحية عطل 25%:

يبدأ الحريق منتصف الشهر الأول من الصيف، تقريباً بعد ثلاثة عشر يوماً = 312 ساعة من بدء عمل الشبكة.
أ. وثوقية الشبكة:

- عدد حالات العطل $n_1::23$ عقدة معطّلة.

- زمن العمل حتى التّعطل TTF: يحدث انهيار العقدة الأولى وتعطلها بعد 312 ساعة من بدء العمل، وتتوالى

بقية أعطال العقد بفارق ساعة بين تعطل كل عقدتين.

- الزمن الوسطي بين الأعطال MTBF:

$$MTBF = 7094/23 = 308.4 \text{ Hrs}$$

- معدّل الفشل λ : بالمليون ساعة.

$$\lambda = (1/308.4) * 10^6 = 3242.5 \text{ FPHrs}$$

- الوثوقية: احتمال نجاح الشبكة بالاستمرار في الكشف عن الحرائق، مع وجود سماحية عطل 25% لمدة 93 ساعة.

$$R(t) = e^{-0.3} = 0.74$$

تستمر الشبكة بوثوقية بالتحسس والكشف عن بارمترات الحريق، بالرغم من تعطل عدد من العقد وخروجها عن العمل.

ب. توافرية الشبكة:

- عدد الإصلاحات n_2 : 23 إصلاح.

- زمن إصلاح العطل TTR: الزمن اللازم لاستبدال كل عقدة معطلة بأخرى جاهزة للتحسس هو أربع ساعات باستخدام رويوت آلي للنشر من أجل التسريع في عملية الإصلاح، ومع إعداد دراسة مسبقة لاستخدام العقد الاحتياطية وأماكن توضعها، حتى قبل اندلاع الحريق.

- الزمن الوسطي للإصلاح MTTR:

$$MTTR = 4 \text{ Hrs}$$

- التوافرية:

$$A_v = (308.4) / (308.4 + 4) = 0.89$$

نستج كفاءة الاقتراح المفروض لتحسين الوثوقية باستخدام الفائض المادي الاحتياطي، من خلال زيادة التوافرية مقارنة مع وثوقية الشبكة بوجود الأعطال، وقبل استخدام آلية التحسين.

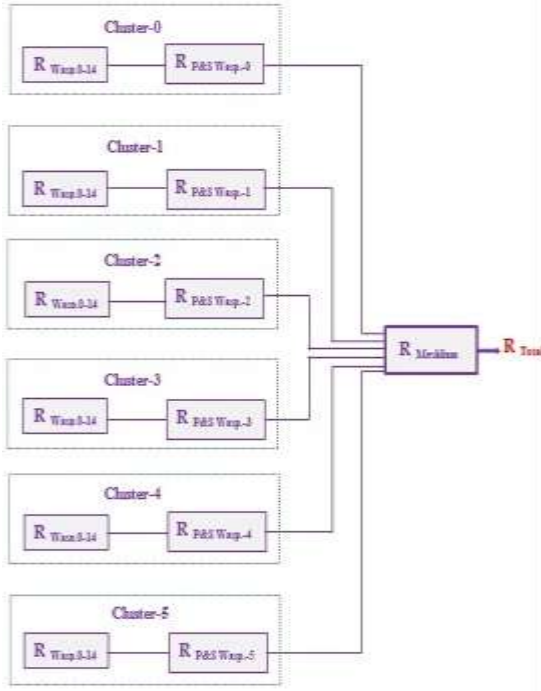
الجدول(1): يُبين قيم محدّات الوثوقية والتوافرية وفقاً لسيناريوهات الشبكة المدروسة

حالة الشبكة	سماحية عطل %1	سماحية عطل %10	سماحية عطل %25	سماحية عطل %35	البارمتر المدروس
عدد حالات العطل n_1	عطل واحد	تسعة أعطال	23 عطل	32 عطل	
عدد العقد النشيطة	96 عقدة	88 عقدة	74 عقدة	65 عقدة	
الوثوقية R	0.82	0.79	0.74	0.7	
عدد الإصلاحات n_2	إصلاح واحد	تسعة إصلاحات	23 إصلاح	32 إصلاح	
التوافرية A_v	0.93	0.91	0.89	0.87	

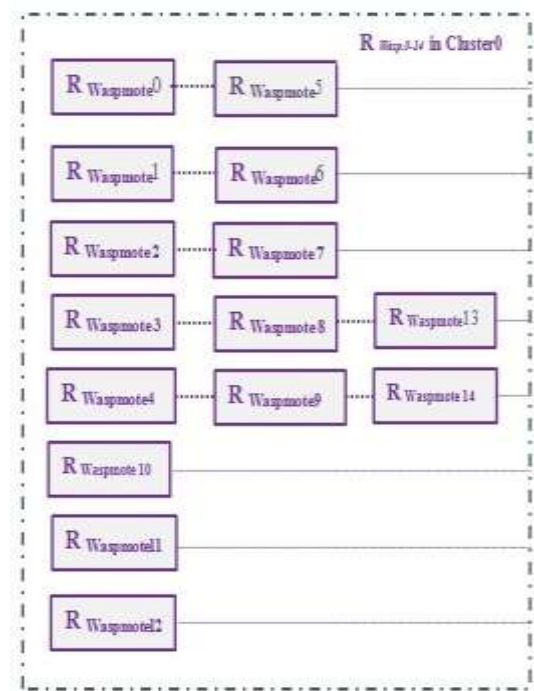
تبيّن من خلال قيم البارمترات في الجدول (1) أنّ الوثوقية تتخفّف مع ازدياد سماحية العطل، وأنّ التوافرية بعد استخدام الفائض المادي كطريقة للإصلاح تزداد بشكل ملحوظ وهي الرّديف لمفهوم الوثوقية، وهذا ينطبق مع نتائج التّمنّجة المنفّذة باستخدام برنامج Opnet14.5 ، ويؤكّد فعالية آلية التحسين "الفائضية".

10- التنبؤ بوثوقية شبكة WSN باستخدام المخطط الصندوقي للوثوقية:

استُخدم المخطط الصندوقي كميّار للتنبؤ بوثوقية الشبكة بناءً على وثوقية العقد المكونة لها وعلى جودة تصميمها من قبل الشركة المصنّعة، وذلك وفق عدّة قيم لوثوقية العقد المختارة لتصميم الشبكة، وباعتبار أن الشبكة المدروسة في هذا البحث هي شبكة هجينة، فيجب أن تكون العقد المجمعّة والـ Sink ذات وثوقية أعلى من العقد النهائية الحساسّة، وبالتّعويض بالعلاقات الموجودة في الفقرة (1-4)، ووفقاً للمخطط الصندوقي في الشكلين (14,13) اللذان يمثّلان الشبكة المدروسة.



الشكل (14): المخطط الصندوقي الممثّل لشبكة الحساسات اللاسلكية المصمّمة



الشكل (13): المخطط الصندوقي لمسارات الاتصال بين العقد في كل قطاع

وفيما يلي نورد مثال لطريقة التنبؤ بوثوقية بنية الشبكة بناءً على وثوقية عقدها، وذلك تبعاً لنمط الاتصال في كل قطاع ، وطريقة توصيل القطاعات كافة مع عقدة الـ Sink ، وفق الشكلين الواردين أعلاه.

• وثوقية الشبكة في الحالة 1:

وثوقية العقد الحساسّة النهائيّة في كل قطاع $R_{Waspnode} = 0.9$

وثوقية العقد المجمعّة كقادة عناقيد للقطاعات الستة $R_{plug\&Sense\ Waspnode} = 0.95$

وثوقية عقدة الـ Sink $R_{Meshlium} = 0.95$

- وثوقية العقد النهائيّة في كل قطاع :

$$R_0 = R_{Wasp.0} * R_{Wasp.5} = 0.9 * 0.9 = 0.81$$

$$R_1 = R_{Wasp.1} * R_{Wasp.6} = 0.9 * 0.9 = 0.81$$

$$R_2 = R_{Wasp.2} * R_{Wasp.7} = 0.9 * 0.9 = 0.81$$

$$R_3 = R_{Wasp.3} * R_{Wasp.8} * R_{Wasp.13} = 0.9 * 0.9 * 0.9 = 0.729$$

$$R_4 = R_{Wasp.4} * R_{Wasp.9} * R_{Wasp.14} = 0.9 * 0.9 * 0.9 = 0.729$$

$$R_{Wasp.0-14} = 1 - [(1 - R_{Wasp.0}) * (1 - R_{Wasp.1}) * (1 - R_{Wasp.3}) * (1 - R_{Wasp.14})]$$

$$R_{Wasp.0-14} = 1 - [(1 - R_0)^3 * (1 - R_3)^2 * (1 - R_{10})^3]$$

$$R_{Wasp.0-14} = 0.999$$

- وثوقية القطّاع الأوّل Cluster-0:

$$R_{cluster-0} = R_{Wasp.0-14} * R_{P\&S\ Wasp.0} = 0.999 * 0.95 = 0.949$$

- وثوقية القطّاعات السّنة:

$$R_{cluster} = 1 - [(1 - R_{cluster-0}) * (1 - R_{cluster-1}) * (1 - R_{cluster-2}) * (1 - R_{cluster-3}) * (1 - R_{cluster-4}) * (1 - R_{cluster-5})]$$

$$R_{cluster} = 1 - [(1 - 0.949)^6] = 0.99$$

- وثوقية الشّبكة الكلّية:

$$R_{Total} = R_{cluster} * R_{Meshium} = 0.99 * 0.95 = 0.94$$

الجدول(2): يبيّن نتائج التنبؤ بالوثوقية لقيم وثوقية العقد المختلفة

الحالة	وثوقية العقد النهائيّة	وثوقية العقد المجمّعة	وثوقية عقدة Sink	وثوقية الشّبكة الكلّية
الشّبكة 1	0.9	0.95	0.95	0.94
الشّبكة 2	0.8	0.9	0.9	0.89
الشّبكة 3	0.75	0.85	0.85	0.77
الشّبكة 4	0.7	0.8	0.8	0.75

نجد من نتائج الجدول (2) ازدياد وثوقية الشّبكة الكلّية بازدياد وثوقية العقد المكوّنة لها، وتبلغ أكبر قيمة لها عند أعلى قيم وثوقية للعقد المفروضة، لذا كلّما كانت جودة المنتج أعلى، كان مردود وثوقية الشّبكة أعلى، ونحصل على شبكة ذات فعالية عالية، وذات أداء موثوق.

الاستنتاجات والتوصيات:

- قمنا في هذا البحث بتطبيق مبدأ الفائضية لتحسين وثوقية شبكة WSN للكشف المبكر عن الحرائق، وقدر زمن التحسين، بالرّمن اللازم لاستبدال العقد بالبديل لها، والبدء بعملية التحسس وإرسال البيانات المجمّعة لقادة العناقيد، وأثبت من خلال إجراء المحاكاة باستخدام البرنامج Opnet14.5، والمعادلات الرّياضية ما يلي:
1. أظهر استخدام الفائضية في الشّبكة بوجود سماحية العطل المتزايدة نتائج جيدة، حيث تمكنت الآلية من تحسين الوثوقية المطلوبة بنسبة 100% تقريباً.
 2. أظهرت نتائج المعادلات الرّياضية لقياس الوثوقية والتّوافرية نتائج جيدة، حيث تطابقت مع نتائج النّمذجة وأظهرت تحسناً في التّوافرية باستخدام الفائض المادّي.
- كما قمنا في هذا البحث بالتنبؤ بوثوقية الشّبكة بناءً على وثوقية العقد المكوّنة لها، ووجد ما يلي:

3. أثبتت النتائج أنه كلما كانت وثوقية العقد أعلى، كان مردود وثوقية الشبكة أعلى، ونحصل على شبكة ذات فعالية عالية، وذات أداء موثوق عند قيم الوثوقية شبه المثالية للعقد أي أكثر من 90%.
- وقد تمّ التّوصّل إلى التّوصيات التّالية:
1. استخدام مفهوم الفائضية مع الشبكات صغيرة الحجم ذات عدد العقد المحدود، بسبب التكلفة الاقتصادية التي تزداد بالتوازي مع ازدياد نسبة العطل نتيجة استخدام الفائض المادي.
 2. اختيار العقد الحساسة من المنتجات المتوفرة في سوق العمل ذات الوثوقية الأعلى.
 3. اقتراح دراسة مستقبلية بإضافة عقد حساسة متقلبة كعقد احتياط تقوم بمهمة التحسس في حال تعطل العقد الأساسية.

المراجع:

- [1] QIU, W.; SKAFIDAS, E. and HAO, P. "Enhanced tree routing for wireless sensor networks". Ad Hoc Networks, 2009, 638-650.
- [2] XIA, F.; TIAN, Y.C.; LI, Y.J.; and SUN, Y.X. "Wireless sensor/actuator network design for mobile control applications". Sensor, 7(10), 2007, 2157-2173.
- [3] KOUSHANFAR, F.; POTKONJAK, M. and VINCENNELLI, A.S. "Fault Tolerance in Wireless Sensor network". In Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Sensing Systems, CRC press, Chp. 36, 2004, 1-15.
- [4] KRISHNAN, A. "A multipath fault tolerant protocol for routing packet switched communication networks". PhD Master Thesis, University of NORTH TEXAS, 2003, 13.
- [5] JOLLY, V.; BEIN, D.; KUMAR, B. and LATIFI, S. "Reliability Modeling in Wireless Sensor Networks". International Journal of Information Technology, 11(2), 2005, 15760-15785.
- [6] SHAIKH, F.K.; KHELIL, A. and SURI, N. "On Modeling the Reliability of Data Transport in Wireless Sensor Networks". 15th EUROMICRO International Conference on Parallel, Distributed and Network-Based Processing, Naples, Italy, 2007, 8.
- [7] SETHI, A.S. and HNATYSHIN, V.Y. "The Practical OPNET User Guide for Network Simulation". CRC Press, Taylor & Francis Group, International Standard Book Number-13, 2013, 978.
- [8] MIL-HDBK-338B, Military Handbook "Electronic Reliability Design Handbook". Department Of Defense, USA, 1998, 1046.
- [9] STANISAVLJEVIC, M.; SCHMID, A. and LEBLEBICI, Y. "Reliability of Nanoscale Circuits and Systems Methodologies and Circuits Architectures". chapter2, XXVII, 2011, 195.
- [10] VENKATESAN, L.; SHANMUGAVEL, S. and SUBRAMANIAM, C. "A Survey on Modeling and Enhancing Reliability of Wireless Sensor Network". Velammal Engineering College, Anna University, Chennai, India, 2013, 41-51.

- [11] DISTEFANO, S. "*Evaluating Reliability of WSN with Sleep/Wake-up Interfering Nodes*". International Journal of Systems Science, 44(10), 2013, 1793-1806.
- [12] FERNANDEZ, J. et al. "*Early forest fire detection by vision-enabled wireless sensor networks*". International Journal of WILDLAND FIRE, 21(8), 2012, 938-949.
- [13] REASON, J.M. and RABAEY, J.M. "*A Study of Energy Consumption and Reliability in a Multi-Hop Sensor Network*". In ACM Mobile Computing and Communications Review, 8 (1), 2004, 84-97.
- [14] KHADEM, M.I. and SGARCIU, V. "*Forest fire detection system based on Node wireless sensor Network*". Faculty of Automatic Control and Computer Science, University of Bucharest, Bucharest, Romania, 2012, 159-164.
- [15] TANENBAUM, A. S. and STEEN, M.V. "*Distributed Systems: Principles and Paradigms*". Prentice Hall, 2002,705.
- [16] HEDDAYA, A. and HELAL, A. "*Reliability, Availability, Dependability & Performability : A User-centered View*". Technical Report, Computer Science Department, College of Arts and Sciences, Boston University, Boston, 1996, 13.
- [17] SILVA, I.; GUEDES, L.A.; PORTUGAL, P. and VASQUES, F. "*Reliability and Availability Evaluation of Wireless Sensor Networks for Industrial Applications*". Sensors, 12(1), 2012, 806-838.
- [18] WASPMOTE & MESHLIUM "*Wireless Sensor Networks with Waspote and Meshlium, Libelium*". v4.2, 2014, 22.
- [19] WASPMOTE ZIGBEE "*Waspote ZigBee_Networking Guide, Libelium*". v4.5, Cop.: Libelium Comunicaciones Distribuidas S.L, 2014, 56.
- [20] WASPMOTE PLUG & SENSE "*Waspote Technical Guide, Libelium*". v5.6, Cop.: Libelium Comunicaciones Distribuidas S.L., 2014, 19.
- [21] GASES 2.0 "*Gases 2.0_Technical Guide, Libelium*". v4.8, Cop.: Libelium Comunicaciones Distribuidas S.L., 2014, 59.
- [22] MOHAMMAD, M. "*Performance parameters*". Opnet, Providing learning materials and tutorial about Opnet, 2011, 3.