

تقييم أداء شبكات المنطقة الشخصية المنخفضة الطاقة

د. ناجي محمد *

(تاريخ الإيداع ٢٠٢٥/١/٨ . قبل للنشر في ٢٠٢٦/٢/١٧)

□ ملخص □

يُمثل إنترنت الأشياء (internet of things) تحدي كبير لمجتمع البحث العلمي و يحظى باهتمام بحثي كبير مؤخرًا . ونظرًا لمحدودية الطاقة وعرض النطاق الترددي والذاكرة وموارد المعالجة، فإن كثافة حركة البيانات في شبكات (Low-Power Wireless Personal Area Networks) تُسبب ازدحامًا يُؤدي إلى انخفاض كبير في أداء الشبكة، ويؤثر سلبيًا على جودة الخدمة. ويُسبب فقدان الرزم واستهلاك الطاقة وانخفاض الإنتاجية. تتلخص آلية العمل من خلال تحديد الرزم الضائعة في الشبكة. وتم استخدام محاكي Cooja لتحديد الرزم الضائعة في المخزن المؤقت (Buffer) ، وذلك من خلال تغيير أعداد العقد الطرفية ، وأحجام مختلفة للمخزن المؤقت (buffer sizes) ، وعند أحمال متنوعة. تحديد النماذج الاحتمالية المحددة لسلوك المنحنيات. اقتصر البحث على دراسة وجود عقدة وسيطة وعقدة جذر واحدة مما سهل آلية العمل واستخراج النتائج. زيادة عدد الرزم المستقبل يزداد بإنقاص عدد الرزم المحيطة في الشبكة و يزداد مع زيادة حجم المسجل في العقد المحيطة بالإضافة زيادة حمل العقد إلى أن تصل إلى قيمة محددة لتتخفف عدد الرزم المستقبلية مع زيادة حمل العقد المحيطة وذلك بسبب الازدحام وطوفان المسجلات في العقد المحيطة والعقدة الوسيطة.

الكلمات المفتاحية: شبكات LOWPAN ، نظرية الأرتال، التحكم الازدحام

Evaluating the performance of low-energy personal area networks

Dr. Naji Mohamad *

(Received 8/1/2026 . Accepted 17/2/2026)

□ ABSTRACT □

The Internet of Things (IoT) presents a significant challenge to the scientific research community and has recently garnered considerable research attention. Due to limited power, bandwidth, memory, and processing resources, the high data traffic density in LOWPAN networks causes congestion, leading to a significant decrease in network performance and negatively impacting quality of service. This results in packet loss, increased power consumption, and reduced throughput. The methodology involves identifying lost packets in the network. The Cooja simulator was used to identify lost packets in the buffer by varying the number of terminal nodes, different buffer sizes, and under varying loads. Specific probabilistic models were then defined to determine the behavior of the curves. The study was limited to an intermediate node and a single root node, which simplified the methodology and facilitated the extraction of results. The number of received packets increases by decreasing the number of peripheral packets in the network and increases with the increase in the size of the register in the peripheral nodes, in addition to increasing the load of the nodes until it reaches a specific value, at which point the number of received packets decreases with the increase in the load of the peripheral nodes due to congestion and flooding of registers in the peripheral nodes and the intermediate node.

Key Words: LOWPAN networks, queuing theory, congestion control.

* Assistant Professor, Communication Technology Engineering Department, Information and communication Technology Engineering, Tartous University, Syria.

١- المقدمة:

يُمثل إنترنت الأشياء (IoT) تحدي كبير لمجتمع البحث العلمي و يحظى باهتمام بحثي كبير مؤخرًا [١]. يتألف إنترنت الأشياء من مليارات الأجهزة المتصلة التي تمتد عبر حدود العالم السيبراني لتشمل كيانات فيزيائية ومكونات افتراضية [٢، ٣]. وتعد بروتوكولات IPv6 عبر شبكة المنطقة الشخصية اللاسلكية منخفضة الطاقة (Low-Power Wireless Personal Area Networks) (LOWPAN) جزءًا أساسيًا من إنترنت الأشياء. ونظرًا لمحدودية الطاقة وعرض النطاق الترددي والذاكرة وموارد المعالجة، فإن كثافة حركة البيانات في شبكات LOWPAN تُسبب ازدحامًا يؤدي إلى انخفاض كبير في أداء الشبكة، ويؤثر سلبًا على جودة الخدمة. ويُسبب فقدان الرزم واستهلاك الطاقة وانخفاض الإنتاجية.

٢- أهمية البحث أهدافه:

تكمن أهمية البحث من أن عقد الحساسات في تطبيقات إنترنت الأشياء تستضيف أنواعًا متعددة من التطبيقات في آن واحد (تطبيقات قائمة على الأحداث، وتطبيقات مستمرة، تطبيقات قائمة على الاستعلام والتطبيقات الهجينة) بناءً على طريقة نقل البيانات [4,5] وتكون تلك التطبيقات ذات متطلبات متنوعة، وبعض هذه التطبيقات هي تطبيقات تعمل في الزمن الحقيقي، حيث تكون بيانات التطبيق حساسة للزمن ومقيدة بالتأخير بالإضافة إلى ضياع الرزم المؤثر على أداء الشبكة. يُضيف هذا تحديات جديدة لخوارزميات وآليات التحكم في الازدحام المصممة لمراعاة أولويات التطبيقات وأولويات العُقد. ويركز تحليل الازدحام في شبكات LOWPAN على نظرية الأرتال (Queuing theory). يتم حساب معدل الرزم الضائعة من المخزن المؤقت (Buffer) وعدد الرزم المُستلمة. تُستخدم طريقتان لحل مشكلات الازدحام أو التخفيف من تأثيرها في شبكات الحساسات اللاسلكية: التحكم في حركة البيانات والتحكم في الموارد. والطريقة الضرورية لإنجاز التحكم بالازدحام يتم من خلال تقييم وتحديد سلوكية المنحنيات من خلال معرفة تابع التوزيع الاحتمالي الممثل لها.

٣- طرائق البحث ومواده:

١-٣ بروتوكول التوجيه لشبكات منخفضة الطاقة و الضياع (RPL) :

يُعدّ RPL (Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks) بروتوكول توجيه يعتمد على متجه المسافة [6] ، وهو مصمم استنادًا إلى الطبقتين الفيزيائية وطبقة التحكم في الوصول إلى الوسائط (MAC) في معيار IEEE 802.15.4 [6]. وتتكون شبكات RPL من ثلاثة أنواع من العُقد: عُقد الجذر (root) التي توفر الاتصال بالشبكات الأخرى، والعُقد الوسيطة (intermediate) التي تُعيد توجيه الرزم إلى عُقد الجذر، وعُقد الأوراق أو العُقد الطرفية (Leaf) [7].

٣-٢ نظرية الأرتال (Queuing theory):

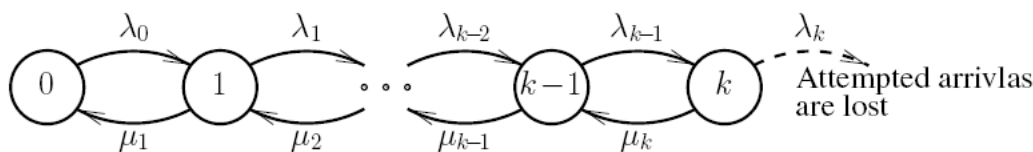
تُعدّ نظرية الأرتال من أهم الأدوات لدراسة وتحليل أداء شبكات الحاسوب [8] ، [9] . يُعتبر تحليل الرتل حالة خاصة من سلاسل ماركوف. في مسجلات العقد (nodes' buffers) حيث تتنافس الرزم على المعالجة بواسطة المخدمات مثل عقد التحسس. كما تلعب السعة الفعالة لقناة IEEE 802.15.4 دور هام في حدوث التصادمات في القناة اللاسلكية. يحدث الازدحام عندما تبدأ عدة عقد حساسات بإرسال رزم بيانات في وقت واحد وبمعدل بيانات عالٍ، أو عندما تقوم عقدة واحدة بإعادة توجيه العديد من تدفقات البيانات عبر الشبكة. وبالتالي، يحدث تصادم في الروابط على القناة اللاسلكية، وتجاوز في سعة الرزم عند عقد التخزين المؤقت (Buffer) في الشبكة [4] . تُؤدّ التطبيقات (application) في العقد الطرفية رزم بمعدل بيانات متوسط قدره $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M$ (Mbps). ثم تُخزّن الرزم الطرفية في وحدات التحكم في الوصول إلى الوسائط (MACs) ليتم إرسالها بواسطة بروتوكول MAC إلى العقدة الوسيطة (intermediate). نفترض أن العقد الطرفية ترسل الرزم بمعدل مغادرة متوسط قدره $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_M$ (Mbps) على التوالي. قبل وصول الرزم إلى العقدة الوسيطة ، يُفقد عدد منها على قناة الاتصال اللاسلكي باحتمالية $P_{ch-loss}$ و بسبب الضياع عبر قناة الاتصال ستصل الرزم إلى العقدة الوسيطة بمعدلات ترتبط بمعدل المغادرة من العقدة الطرفية و احتمالية الضياع في قناة الاتصال وفق العلاقة (١) .

$$\lambda_j^I = (1 - P_{ch-loss}^j) \mu_j^I \quad (1)$$

يعبر الرمز j عند العقدة الطرفية المرسله والرمز I عن العقدة الوسيطة. ويصبح معدل الوصول الكلي عند العقدة الوسيطة كما في العلاقة (٢)

$$\lambda_{total}^I = \sum_{j=1}^M \lambda_j^I \quad (2)$$

عندما تستقبل العقدة الوسيطة الرزم تخزنهم في المسجل الخاص بها ثم تعيد توجيههم إلى العقدة الجذر S بمعدل خدمة (معدل مغادرة) μ^I . نستخدم سلسلة ماركوف لحساب احتمالية اسقاط المسجل $P_{buffer-loss}$. و يعبر عن الحالة لسلاسل ماركوف بعدد الرزم المخزنة في المسجل. باعتبار أن وصول الرزم تتبع لتابع بواسون بمعدل وصول λ (packets/sec) و بمعدل خدمة μ (packets/sec) و حجم المسجل K . وبالتالي وفقا لقانون كاندل فإن نمط الرتل من الشكل $M/M/1/K$. نأخذ خطوة زمنية (time step) لانتقالات الحالة تساوي مقلوب معدل البيانات الأقصى، عند كل خطوة زمنية رزمة واحدة يمكن أن تصل أو تغادر المسجل [10]. نفترض أنه في خطوة زمنية معينة، يكون احتمال وصول الرزمة هو احتمال مغادرة رزمة البيانات للرتل هو، فإن أبعاد مصفوفة الانتقال $(K+1)(K+1)$ ، إن المقدار $(K+1)$ يشير إلى سعة النظام الذي يتألف من سعة المسجل (K) و رزمة تخدم. و يمثل الشكل (١) مخطط انتقال الحالة. و تبين العلاقة (٣) معدلات الانتقال



الشكل (١) مخطط انتقال الحالة لنمط الرتل M/M/1/K

$$\lambda_i = \lambda, \quad i = 0, \dots, k-1$$

$$\mu_i = \mu, \quad i = 1, \dots, k \quad (3)$$

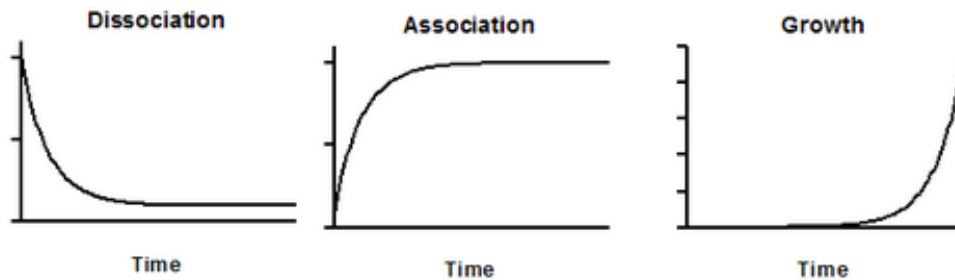
$$\mu_0 = 0, \quad \text{of course}$$

شعاع التوزيع في حالة التوازن (الحالة المستقرة) لمصفوفة الانتقال كما في العلاقة (4)

$$\pi = [\pi_0 \quad \pi_1 \quad \pi_2 \quad \dots \quad \pi_K] \quad (4)$$

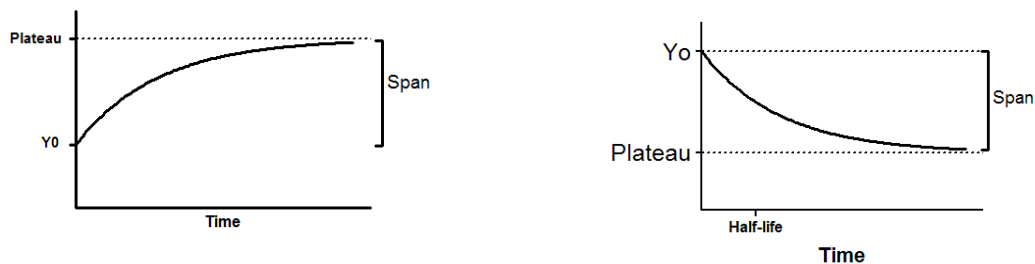
لتبسيط التحليل، افترض أن التطبيقات الموجودة في العقد الطرفية تولد رزم بيانات بمعدل بيانات متساوٍ في المعدل $\lambda_i = \lambda, \quad i = 0, \dots, k-1$. تُفقد الرزم عندما يمتلئ مخزن العقدة الطرفية وتصل رزمة بيانات ولا تغادر رزمة المخزن. يتم تحديد احتمالية فقدان الحزم في مخزن العقدة الطرفية من خلال نسبة عدد الرزم الساقطة على احتمالية وصول الرزم. وكذلك الأمر تحدد احتمالية فقدان الرزم في العقد الوسيطة كنسبة عدد الرزم نسبة عدد الرزم الساقطة على احتمالية وصول الرزم الكلية للعقدة الوسيطة. ويعتمد احتمال ضياع الرزم على عدد العقد الطرفية ومعدل إرسالها وحجم المسجل وسعة القناة. يحدث ضياع للرزم في القنوات اللاسلكية ضمن الشبكات المعتمدة على المعيار IEEE802.15.4 [11] و المستخدم تقنية النفاذ CSMA/CA بسبب فشل الوصول إلى القناة فعندما تحاول عقدة إرسال رزمة بيانات، فإنها تُجري فحصاً لقناة الاتصال اللاسلكية (CCA) لاستشعار حالة القناة. إذا كانت القناة غير مستخدمة، تبدأ العقدة بالإرسال. وإلا، فإنها تزيد قيمة مُعاملين [12]: عدد مرات التراجع (NB: number of backoffs) ومعامل التراجع (BE: backoff exponent) يتم حساب فترة وحدة التراجع عن طريق ضرب عدد الرموز في المدة الزمنية لكل رمز، عدد مرات التراجع (NB) هو عداد ينتبع عدد المرات التي حاولت فيها خوارزمية CSMA/CA الوصول إلى قناة الاتصال واضطرت لاحقاً إلى "التراجع" (تأخير محاولة الإرسال). يعبر معامل التراجع (BE) هو متغير يستخدم لتحديد نطاق أوقات الانتظار العشوائية التي سيلاحظها الجهاز قبل محاولته التالية للوصول إلى القناة. أما الحد الأقصى لعدد عمليات إعادة الإرسال: عندما تُرسل العقدة حزمة بيانات، فإنها تنتظر استلام حزمة تأكيد الاستلام (ACK). إذا لم تستلم العقدة حزمة التأكيد بسبب تصادم أو انتهاء مهلة التأكيد، فإنها تزيد عدد عمليات إعادة الإرسال وتحاول إعادة إرسال الحزمة. إذا وصل عدد عمليات إعادة الإرسال إلى الحد الأقصى المحدد في المعيار، فسيتم إسقاط الحزمة.

3-3 عمليات نماذج النمو الأسي: تتبع العمليات نماذج النمو الأسي عندما يعتمد معدل حدوث شيء ما على الكمية الموجودة [13]. يمكن تمييز ثلاث حالات: التفكك الأسي (Exponential dissociation) مقابل التجمع (الارتباط) الأسي (Exponential association) مقابل النمو الأسي (Exponential growth)، يتجه نموذج التفكك دائمًا نحو الانحدار التدريجي حتى يصل إلى مرحلة استقرار. يتجه نموذج التجمع دائمًا نحو الصعود، ويصل أيضًا إلى مرحلة استقرار. يستمر نموذج النمو في الارتفاع بشكل متزايد، ويزداد انحداره، دون أن يصل إلى مرحلة استقرار، كما في الشكل (٢).



الشكل (٢) مقارنة بين نماذج التفكك و التجمع و النمو الأسي

من نماذج التابع الأسي المستخدمين، الارتباط أحادي الطور (One phase association) و التناقص أحادي الطور (One phase decay) المعبر عن تغير العلاقة بين المعاملات كما في الشكل (٣)



$$Y = Y_0 + (\text{Plateau} - Y_0) * (1 - \exp(-K * x))$$

$$Y = (Y_0 - \text{Plateau}) * \exp(-K * X) + \text{Plateau}$$

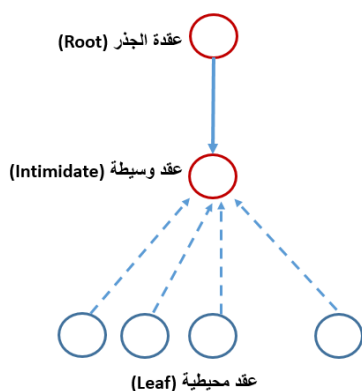
Y0 قيمة Y عند الزمن صفر، plateau قيمة Y عند أزمنة لانهاية، K ثابت المعدل، Span الفرق بين Y0 و Plateau.

الشكل (٣) تابع الارتباط و التناقص أحادي الطور للتابع الأسي

٤ - النتائج والمناقشة:

تتلخص آلية العمل من خلال تحديد الرزم الضائعة في الشبكة الموضحة بالشكل (٤) من خلال عدة سيناريوهات، تتألف الشبكة المدروسة المكونة من M عقدة طرفية (أوراق)، وعقدة وسيطة واحدة، وعقدة جذر (مصدر) واحدة و تحديد النماذج الاحتمالية المحددة لسلوك المنحيات و تقييم آلية العمل. نعرض نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها باستخدام نظام التشغيل Contiki 3.0 ومحاكي Cooja لتحديد الرزم الضائعة في

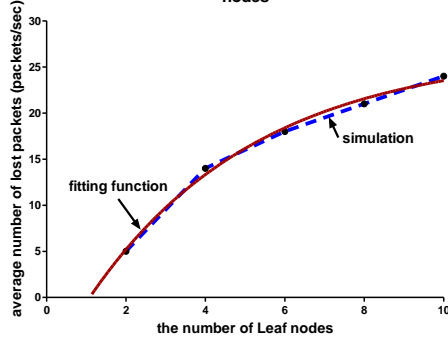
المخزن المؤقت (Buffer) ، وذلك من خلال تغيير أعداد العقد الطرفية ، وأحجام مختلفة للمخزن المؤقت (buffer sizes) ، وعند أحمال متنوعة . و بهدف تحديد متطلبات العمل تم استخدام في المحاكاة دالة الهدف ذات الرتبة الدنيا مع التباطؤ (MRHOF) التي تعتمد على مقياس توجيهه ETX . وتم ضبط المدة الإجمالية لكل محاكاة على ١٠٠ ثانية، وخلال هذه المدة، ترسل كل عقدة طرفية رزم بيانات بشكل دوري إلى العقدة المركزية بمعدل ٣٠ رزمة/ثانية. تحتوي كل عقدة في الشبكة على مخزن مؤقت بحجم (B) حزمة. نفترض أن سعة القناة اللاسلكية موزعة بين العقد، حيث تتميز العقدة الوسيطة بأنها تستقبل وترسل في الوقت ترسل البيانات فقط باتجاه العقدة الوسيطة. نفترض أن عقد التحسس تعمل بروتوكول IEEE 802.15.4 MAC القائم على التنافس مع CSMA/CA كآلية وصول. عند حدوث ازدحام، تُفقد الرزم إما عند عقدة الحساس (بسبب تجاوز سعة المخزن المؤقت) أو على قناة الاتصال اللاسلكي.



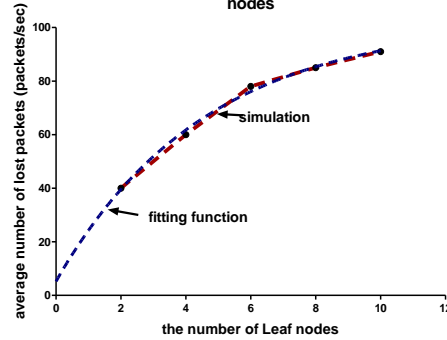
الشكل (٤) المخطط للشبكة المدروسة

في السيناريو الأول، تم تغيير عدد العقد الطرفية من ٢ إلى ٤، ٦، ٨، و ١٠، حيث يُولد تطبيق كل عقدة طرفية حزم بيانات بمعدل ٣٠ حزمة/ثانية . يوضح الشكل (٥) متوسط عدد الرزم الضائعة في الثانية الواحدة نتيجةً لامتلاء المخزن المؤقت في العقدة الطرفية والعقدة الوسيطة، وذلك وفقاً لتقديرات المحاكاة وتحديد تابع التوزيع الاحتمالي الذي يمثل سلوكية المنحني نلاحظ أنه مع ازدياد عدد العقد الطرفية في الشبكة، يزداد عدد الرزم المفقودة نتيجةً لامتلاء المخزن المؤقت في كلٍ من العقدة الطرفية والعقدة الوسيطة . ويعود السبب في ذلك إلى أنه مع ازدياد عدد العقد الطرفية، تقل نسبة سعة القناة المتاحة لكل عقدة، وبالتالي يتباطأ معدل إرسال كل عقدة، ويزداد احتمال فقدان البيانات من المخزن المؤقت. و يسلك المنحني الممثل للرزم الضائعة في المسجلين (العقد الطرفية، العقدة الوسيطة) سلوك التابع الاسي من النمط (One phase association) . و يبين الجدول (١) بارامترات التوابع الممثلة للرزم الضائعة كتابع لعدد العقد الطرفية

Average number of lost packets (at leaf node) vs the number of leaf nodes



Average number of lost packets (Intermediate node) vs the number of leaf nodes

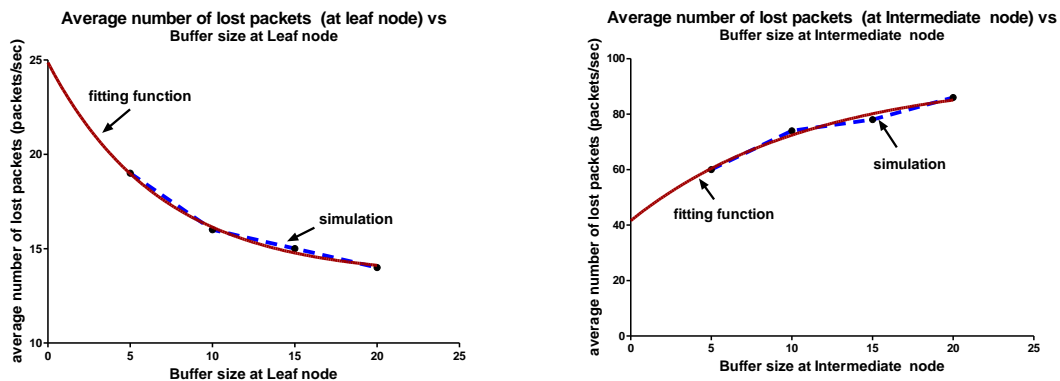


الشكل (٥) معدل الرزم الضائعة كتابع لعدد عقد الطرفية في العقد الطرفية و القعدة الوسيطة

الجدول (١) بارامترات التوزيع الممثلة للرزم الضائعة كتابع لحجم المسجل لعدد عقد الطرفية

البارامترات للتابع one phase association عند العقدة الوسيطة			البارامترات للتابع one phase decay عند العقدة الطرفية		
1	One-phase association		1	One-phase association	
2	Best-fit values		2	Best-fit values	
3	Y0	5.235	3	Y0	-7.829
4	Plateau	102.3	4	Plateau	26.78

في السيناريو الثاني، قمنا بتحديد عدد العقد الطرفية إلى 6 عقدة، وتم تغيير حجم المخزن المؤقت من ٥ إلى 10، ثم 15، ثم 20 رزمة. يوضح الشكل (6) متوسط معدل فقدان الرزم نتيجةً لامتلاء المخزن المؤقت في العقدة الطرفية والعقدة الوسيطة. من الواضح أنه مع زيادة حجم المخزن المؤقت، ينخفض متوسط عدد الرزم المفقودة نتيجةً لامتلاء المخزن المؤقت في العقدة الطرفية، بينما يزداد معدل الفقد في العقدة الوسيطة. يعود السبب إلى أنه مع زيادة حجم المخزن المؤقت في العقدة الطرفية، ينخفض احتمال فقدان الرزم، ويزداد معدل مغادرة الرزم منها. وبتزايد معدل مغادرة الرزم من العقدة الطرفية، يزداد معدل وصول الرزم إلى العقدة الوسيطة، وبالتالي يرتفع احتمال فقدان الرزم نتيجةً لامتلاء المخزن المؤقت في العقدة الوسيطة. في هذه الحالة سيتغير نمط و سلوك تابع التوزيع الاحتمالي الممثل لعدد الرزم الضائعة حسب مكان تواجد المسجل، ففي العقد الطرفية سيأخذ شكل التابع الاسي (Exponential dissociation: one phase decay). أما عند العقد الوسيطة (intermediate) سيأخذ سلوك تابع التوزيع الاحتمالي الممثل لعدد الرزم الضائعة كتابع لحجم المسجل سلوك التابع (one phase association) وفق البارامترات في الجدول (٢).



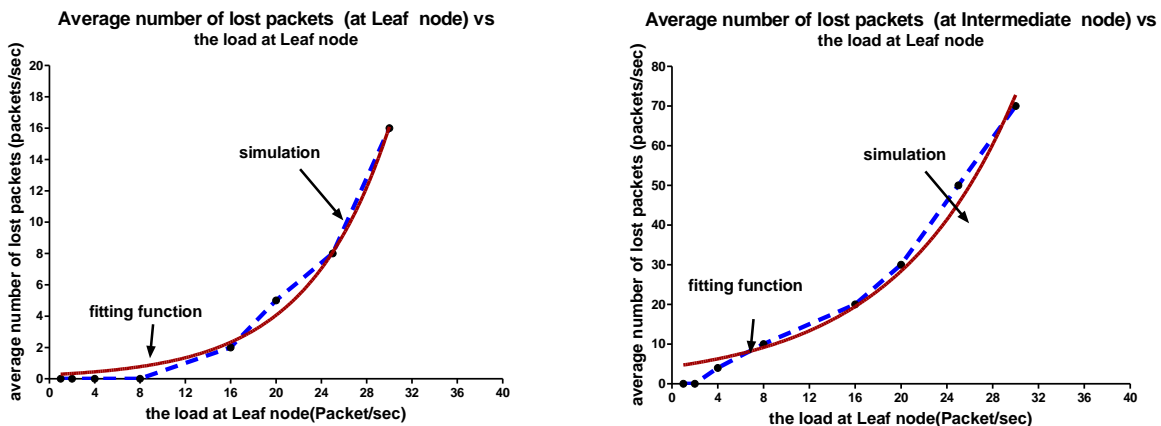
الشكل (٦) تغير معدل الرزم الضائعة كتابع لحجم المسجل عند العقدة الطرفية و العقدة الوسيطة

الجدول (٢) بارامترات التوابع الممثلة للرزم الضائعة كتابع لحجم المسجل

البارامترات للتتابع one phase association عند العقدة الوسيطة			البارامترات للتتابع one phase decay عند العقدة الطرفية		
1	One-phase association		1	One phase decay	
2	Best-fit values		2	Best-fit values	
3	Y0	41.58	3	Y0	24.86
4	Plateau	93.86	4	Plateau	13.51

في السيناريو الثالث، تم تغيير الحمل بين القيم (١ حتى ٣٢) رزمة بالثانية يوضح الشكل (٧) عدد

الرزم المفقودة في مخازن العقد الطرفية والوسيطه كل ثانية مع اختلاف الاحمال المقدمه



الشكل (٧) تغير معدل الرزم الضائعة كتابع لحمل العقد الطرفية و القعدة الوسيطة

ومن أجل عدد العقد الطرفية يساوي ٦ . نلاحظ أنه مع زيادة الحمل المقدم، يزداد متوسط عدد الحزم المفقودة في مخازن العقد الطرفية والوسيطه. ليقتررب السلوك الممثل للمنحى المعبر عن عدد الرزم الضائعة كتابع لحمل العقد الطرفية السلوك الاسي . و يوضح الجدول(٣) بارامترات التوابع الممثلة للرزم الضائعة كتابع لحمل العقد الطرفية

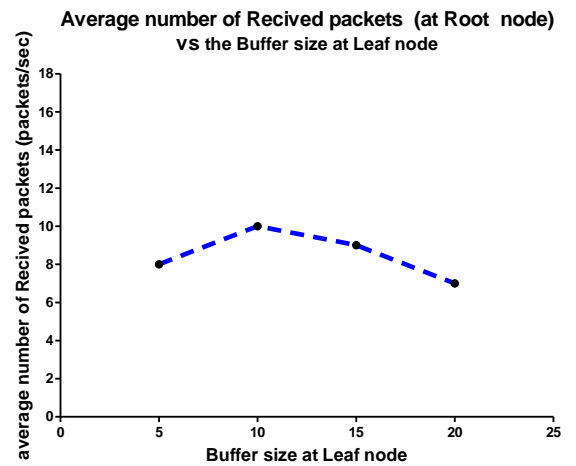
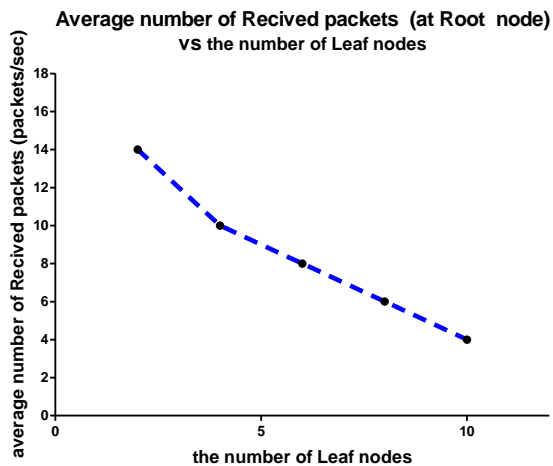
الجدول (٣) بارامترات التتابع الممثلة للوزم الضائعة كتابع لحمل العقد الطرفية

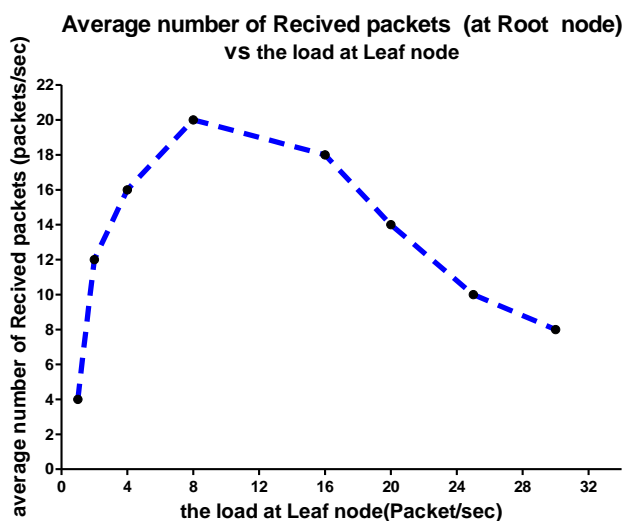
		Y			Y
1	Exponential growth equation		1	Exponential growth equation	
2	Best-fit values		2	Best-fit values	
3	Y0	0.2576	3	Y0	4.320
4	k	0.1378	4	k	0.09415
العقدة المحيطة			العقدة الوسيطة		

قياس عدد الرزم المستقبلية عند الجذر (Root) :

تم قياس عدد الرزم المستقبلية عند الجذر (Root) من أجل السيناريوهات الثلاثة كما في الشكل (٨). والمتضمنة زيادة عدد العقد الطرفية، زيادة حجم المسجلات في العقد الطرفية والعقدة الوسيطة بالإضافة إلى تغيير الحمل في العقد الطرفية.، يمكننا أن نستنتج ما يلي:

- زيادة عدد الرزم المستقبل يزداد بإنقاص عدد الرزم المحيطة في الشبكة
- زيادة عدد الرزم المستقبل يزداد مع زيادة حجم المسجل في العقد المحيطة
- زيادة عدد الرزم المستقبل يزداد مع زيادة حمل العقد إلى أن تصل إلى قيمة محددة (8packets/sec) لتتخفص عدد الرزم المستقبلية مع زيادة حمل العقد المحيطة وذلك بسبب الازدحام وطوفان المسجلات في العقد المحيطة والعقدة الوسيطة.





الشكل (٨) عدد الرزم المستقبلية للعقدة الجذر من أجل الحالات الثلاثة

5-الاستنتاجات و التوصيات:

يمكن الاستنتاج من هذا البحث النقاط التالية:

- تعد الشبكات منخفضة الطاقة والضياع مجال بحثي هام كون نواة انترنت الأشياء .
- يهدف انترنت الأشياء إلى ربط العناصر المنخفضة الطاقة والضياع بهدف وصول المعلومات بدون تأخير ة انخفاض عالي لاستهلاك الطاقة
- تم إجراء تقييم لحالة شبكة تحتوي عقدة جذر واحدة وعقدة وسيطة واحدة وعدة عقد محيطية
- تعد عمليات نماذج النمو الأسي من أكثر الأنماط الاحتمالية لتمثيل سلوك المنحنيات .
- تركز الهدف الرئيس للبحث على قياس عدد الرزم الضائعة وارتباطه بعدة متغيرات
- يسلك المنحني الممثل للرزم الضائعة في المسجلين (العقد الطرفية، العقدة الوسيطة) سلوك التابع الاسي من النمط (One phase association) كتابع لعدد العقد الطرفية.
- سيتغير نمط وسلوك تابع التوزيع الاحتمالي الممثل لعدد الرزم الضائعة حسب مكان تواجد المسجل، ففي العقد الطرفية سيأخذ شكل التابع الاسي (Exponential dissociation: one) phase decay. أما عند العقد الوسيطة (intermediate) سيأخذ سلوك تابع التوزيع الاحتمالي الممثل لعدد الرزم الضائعة كتابع لحجم المسجل سلوك التابع (one phase association) .
- يقترب السلوك الممثل للمنحى المعبر عن عدد الرزم الضائعة كتابع لحمل العقد الطرفية السلوك الاسي

- لتخفيف ازدحام الشبكات باستخدام التوزيع الاحتمالي، نستخدم نماذج رياضية لوصف تدفق البيانات وتوقع الذروات وتحديد سلوكية المنحنيات، مما يسمح بتوزيع الحمل (Traffic Engineering) عبر مسارات مختلفة وتحديد أولويات المرور (QoS)
- زيادة عدد الرزم المستقبل يزداد مع زيادة حمل العقد الطرفية إلى أن تصل إلى قيمة محددة لتتخفض عدد الرزم المستقبلية مع زيادة حمل العقد المحيطة وذلك بسبب الازدحام وطوفان المسجلات في العقد المحيطة والعقدة الوسيطة. ويمكن أن نتجنب حدوث الازدحام من خلال تحديد معدل إرسال العقدة الطرفية عند عتبة محددة.
- اقتصر البحث على دراسة وجود عقدة وسيطة وعقدة جذر واحدة مما سهل آلية العمل واستخراج النتائج.
- لا بد من دراسة وجود أكثر من عقدة وسيطة بهدف توازن الحمل إلا أنه يزيد من تعقيد الدراسة ويظهر كيفية توزيع سعة القناة بين العقد الوسيطة.

٦-المراجع:

- [1] Z. SHELBY AND C. BORMANN, 6LoWPAN: The Wireless Embedded Internet. John Wiley & Sons, 2009.
- [2] S. LI, L. DA XU, AND S. ZHAO, “The Internet of Things: A Survey,” Information Systems Frontiers, vol. 17, no. 2, pp. 243–259, 2015.
- [3] L. ATZORI, A. IERA, AND G. MORABITO, “The Internet of Things: A Survey,” Computer Networks, vol. 54, no. 15, pp. 2787–2805, 2010
- [4] A. GHAFARI, “Congestion Control Mechanisms in Wireless Sensor Networks: A Survey,” Journal of Network and Computer Applications, vol. 52, pp. 101–115, 2015.
- [5] M. A. KAFI, D. DJENOURI, J. BEN-OTHTMAN, AND N. BADACHE, “Congestion Control Protocols in Wireless Sensor Networks: A Survey,” IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 16, no. 3, pp. 1369–1390, 2014.
- [6] Anil K Prajapati, Emmanuel S Pilli, Ramesh B Battula, Vijay Varadharajan, Abhishek Verma, R C Joshi, “A comprehensive survey on RPL routing-based attacks, defences and future directions in Internet of Things” Computers & Electrical Engineering, Vol. 123, Part A, pp. 110, Elsevier, 2025
- [7] T. TSVETKOV, “RPL: IPv6 Routing Protocol for Low Power and Lossy Net works,” Sensor Nodes–Operation, Network and Application (SN), vol. 59, p. 2, 2011

[8] F. Gebali, Analysis of Computer Networks. Springer, 2015.

[9] S. KESHAV, Mathematical Foundations of Computer Networking. Addison Wesley, 2012.

[10] Djamila Talbi, Zoltan Gal “*Integrating Reinforcement Learning into M/M/1/K Retry Queueing Models for 6G Applications, Faculty of Informatics, University of Debrecen, 4032 Debrecen, Hungary. Sensors 2025, 25(12), 3621*

[11] MUHAMMAD ALI ADNAN, “*Performance Enhancement of IEEE 802.15.6 Using Collision Avoidance Technique*” . 2021, Journal of Sensor and Actuator Networks

[12] Matthew Boeding ,Paul Scalise. “*Exponential Backoff and Its Security Implications for Safety-Critical OT Protocols over TCP/IP Networks*” Department of Electrical and Computer Engineering, University of Nebraska-Lincoln, Lincoln, NE 68588, USA 26 June 2025

[13] E. MAMONTO, K. HANSEN, “*Associations and dissociations with time-dependent reaction coefficients in finite polymer mixtures: The model and analytical-numerical method for solution by successive approximations*”, Applied Mathematical Modelling, Volume 51, November 2017, Pages 109-128

[14] <https://sourceforge.net/projects/contiki/files/Instant%20Contiki/Instant%20Contiki%203.0/InstantContiki3.0.zip/download>