

ضغط ترويسة بروتوكول الانترنت في شبكات الحساسات اللاسلكية باستخدام العناوين الافتراضية

الدكتور جمال خليفه*

ميلاد ايوب**

(تاريخ الإيداع 26 / 10 / 2014. قُبِلَ للنشر في 23 / 12 / 2014)

□ ملخص □

تفرض محدودية موارد شبكات الحساسات اللاسلكية تحدياً كبيراً على نقلها لرزم IPv6؛ في هذا الإطار، يكتسب ضغط ترويسة IPv6، وخاصة حقلي العنونة فيها، أهمية كبيرة؛ لكونها تشغل حوالي 31% من الحجم الأقصى لحمولة الطبقة الفيزيائية في هذه الشبكات.

ندرس في هذا البحث نموذج ضغط ترويسة IPv6 في شبكات الحساسات اللاسلكية المعتمدة على بروتوكول الانترنت، بناءً على الحالة الافتراضية للضغط وفق التراسل: (حساس - عقدة خارجية). ونقدم نموذج ضغط معدلاً يعتمد على التعيين المسبق لعدد محدد من عناوين مستخدم الشبكة كعناوين افتراضية. يوفر النموذج المقترح زيادة في نسبة ضغط ترويسة IPv6 عند التراسل بين الحساسات والمستخدمين الافتراضيين، ويخفف حمل تبادل البيانات اللازمة للضغط.

يتم تقييم النموذجين الأصلي والمقترح باستخدام المحاكاة البرمجية، والدراسات المخبرية التي قمنا بإجرائها في مخبر FlockLab التابع لقسم هندسة الحاسبات والشبكات في المعهد السويسري الفيدرالي للتقانة، زوريخ، سويسرا.

الكلمات المفتاحية: شبكات الحساسات اللاسلكية المعتمدة على بروتوكول الانترنت، IPv6، LoWPAN،

LOWPAN_IPHC

* أستاذ مساعد - قسم هندسة الاتصالات - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

** طالب دراسات عليا (ماجستير) - قسم هندسة الاتصالات - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Using Default Addresses for IP Header Compression in Wireless Sensor Networks

Dr. Jamal Khalifeh*
Milad Ayyoub**

(Received 26 / 10 / 2014. Accepted 23 / 12 / 2014)

□ ABSTRACT □

The limited resources of wireless sensor networks impose a major challenge on their transporting of IPv6 packets. In this context, the compression of IPv6 header, and especially its two addressing fields, acquires great importance given that it occupies about 31% of the physical layer's maximum payload size in these networks.

In this paper, we study IPv6 header compression scheme in IP-based wireless sensor networks, based on the default case for compression according to (sensor-external node) communications. We also introduce a modified compression scheme which relies on the pre-allocation of a specific number of network users' addresses as default addresses. For communications between sensors and the default users, the proposed scheme increases IPv6 header compression ratio, and reduces the load of data exchange required for compression.

The proposed scheme and the original one are evaluated using software simulation, and the laboratory studies which we performed at FlockLab laboratory of the Computer Engineering and Networks Department in the Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Switzerland.

Keywords: IP-based Wireless Sensor Networks; IPv6; 6LoWPAN; LOWPAN; IPHC.

* Associate Professor; Department of Communications Engineering; Faculty of Mechanical & Electrical Engineering; University of Tishreen University, Lattakia, Syria.

** Postgraduate Student; Department of Communications Engineering; Faculty of Mechanical & Electrical Engineering, University of Tishreen; Lattakia, Syria.

مقدمة:

يمثل مفهوم انترنت الأشياء (Internet of Things) النظرة المستقبلية للانترنت؛ إذ يهدف لتفعيل تقنية IP في جميع أجهزة الاتصال والأجهزة المدمجة (embedded devices): كالهواتف النقالة، والحساسات، وأجهزة نظم المراقبة والتحكم، وغيرها، ودمجها بالانترنت، مما يعد بتأمين جيل جديد من الخدمات والتطبيقات [1]. تشكل شبكات الحساسات اللاسلكية المعتمدة على بروتوكول الانترنت إحدى ركائز انترنت الأشياء. وتعمل وفق معيار IPv6 عبر شبكات المناطق الشخصية اللاسلكية منخفضة الاستطاعة (6LoWPAN over- Low-) (power Wireless Personal Area Networks) [2]. يبين الشكل (1) نموذج الطبقات والبروتوكولات وفق هذا المعيار؛ إذ يتم إضافة طبقة ملاءمة بين طبقة الشبكة وطبقة التحكم بالوصول إلى الوسط (MAC Medium- Access Control) لتوفير إمكانية نقل رزم IPv6 عبر شبكات المعيار IEEE 802.15.4 (ZigBee) [1]. يحدد المعيار IEEE 802.15.4 الحجم الأقصى لإطار (frame) طبقة الـ MAC بـ 127 بايت، تشغل ترويسة IPv6 40 بايت منه (حوالي 31%)؛ لذلك تعمل طبقة الملاءمة على تقسيم رزم IPv6 التي لا يمكن إرسالها في إطار وحيد، وضغط ترويسة IPv6 لإتاحة المجال لإرسال كمية أكبر من بيانات طبقة التطبيقات في الرزمة [4] [3].

يشغل حقل العنونة 80% من حجم ترويسة IPv6 [5]؛ لذا تتأثر فعالية ضغط هذه الترويسة بشكل كبير بمدى القدرة على ضغط عناوين IPv6. بدأ العمل على ضغط ترويسة IPv6 وفق معيار 6LoWPAN بتصميم نموذج LOWPAN_HC1 [3]، والذي يعمل وفق آلية عديمة الحالة (stateless)، إلا أن عناوين IPv6 العامة (IPv6 global addresses) [6] غير قابلة للضغط وفق هذا النموذج؛ لذا يفقد فعاليته عند قيام الحساسات بالتراسل مع عقد خارج شبكتها.

تم لاحقاً تصميم نموذج ضغط الترويسة المعتمد على السياق (Context-based Header- Compression) ليكون بديلاً عن النموذج السابق [4]. يتيح هذا النموذج الجديد ضغط عدد محدد من العناوين العامة وفق آلية مصحوبة بالحالة (stateful) اعتماداً على سياقات (contexts) مشتركة بين جميع عقد الشبكة. سنوضح مبدأ عمل هذا النموذج وفقاً للحالة الافتراضية للضغط عند التراسل بين الحساسات وعقد خارج شبكتها. وفي ضوء محدودية موارد شبكات الحساسات اللاسلكية، وخصوصاً بالنسبة للطاقة المتوفرة، القدرة على المعالجة والتخزين، وعرض الحزمة المتاحة، سنقدم نموذجاً محسناً للضغط اعتماداً على نموذج ضغط الترويسة المعتمد على السياق. وسنقوم بتقييم أداء النموذجين من حيث النفاذية المفيدة (goodput)، التأخير من نهاية إلى نهاية (end-to-end delay)، استهلاك الطاقة الوسطي، ومتطلبات الذاكرة.

(applications)	طبقة التطبيقات	بروتوكولات التطبيقات
(transport)	طبقة النقل	بروتوكولات النقل
(network)	طبقة الشبكة	IPv6
(adaptation)	طبقة الملاءمة	6LoWPAN
(data link)	طبقة ربط المعطيات	IEEE 802.15.4 MAC
(physical)	الطبقة الفيزيائية	IEEE 802.15.4 PHY

الشكل (1): نموذج الطبقات والبروتوكولات وفق معيار 6LoWPAN

أهمية البحث وأهدافه:

يقدم البحث مساهمة في تصميم نظم المراقبة والتحكم باستخدام شبكات الحساسات اللاسلكية المعتمدة على بروتوكول الانترنت كأحد تطبيقات الانترنت الأشياء. وتتجلى أهمية البحث في تقديمه أسلوباً جديداً في الدراسة يعتمد على الدراسة المخبرية إضافة للمحاكاة البرمجية، مما يعطي تصوراً أكثر دقة وواقعية عن الدراسة. تتلخص أهداف البحث في دراسة الحالة الافتراضية لضغط ترويسة IPv6 في شبكات الحساسات اللاسلكية في تطبيقات (مستخدم - حساس)؛ إذ لا تتوفر دراسات تفيد في تقييم أداء هذا النموذج في هذه الحالة، كما يهدف لتحسين نموذج الضغط اعتماداً على العناوين الافتراضية لمستخدمي شبكة الحساسات، ودراسة تأثير النموذجين الأصلي والمحسن على موارد شبكات الحساسات، وتقييم نتائج الدراسة بالدراسة المخبرية، وبحث مجالات تطبيق النموذج المعدل.

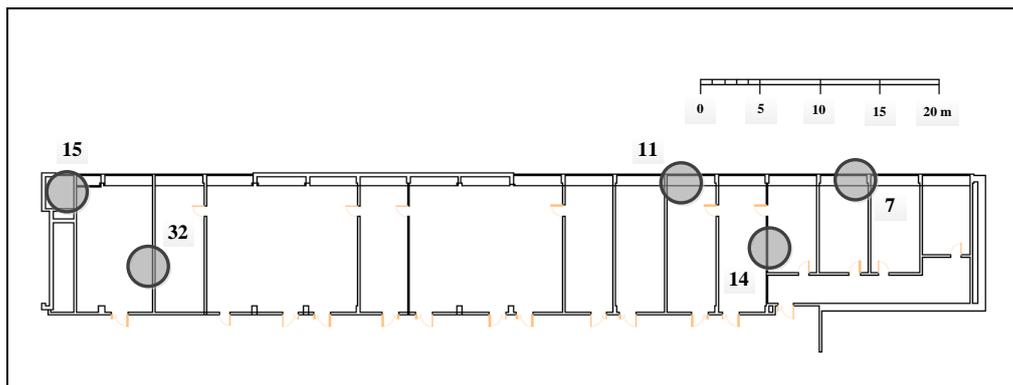
طرائق البحث ومواده:

درسنا في هذا البحث ترويسة IPv6 وفق ثلاثة نماذج: دون ضغط الترويسة، ضغط بالنموذج الأصلي وفق الحالة الافتراضية، ضغط بالنموذج المقترح. اعتمدنا نظام التشغيل Contiki-OS [7] ولغة البرمجة (C) لإعداد البرامج اللازمة للمحاكاة البرمجية والدراسة المخبرية. استخدمنا للمحاكاة البرمجية برنامج COOJA المخصص لمحاكاة برامج Contiki [8].

تمت الدراسة المخبرية خلال الفترة (كانون الثاني - آب) 2014، بعد مراسلة إدارة مخبر FlockLab [9] والحصول على الموافقة بالوصول عن بعد إلى المخدم المركزي للمخبر. يتطلب إجراء تجربة ما حجز فترة زمنية للعمل على المخبر، ورفع برامج Contiki الخاصة بالتجربة إلى المخدم المركزي ليتم برمجة الحساسات وفقاً لها، ثم رفع ملف بلغة XML يحدد إعدادات التجربة (زمن البداية والنهاية، الحساسات المستخدمة، جهد التغذية... الخ). يبدأ المخدم المركزي تلقائياً بإجراء التجربة وفقاً لإعدادات ملف الـ XML الذي قمنا برفعه. أثناء التجربة، يعمل المخدم على قراءة خرج الحساسات والقياس الدوري لاستهلاكها للتيار، ويرسل بعد انتهاء التجربة القراءات والقياسات إلينا عبر البريد الإلكتروني لنقوم بتحليلها.

يبين الشكل (2) جزءاً من مخبر FlockLab، وهو الجزء المستخدم في دراستنا، ويظهر في الشكل الحساسات المستخدمة في الدراسة مع أرقامها. يتألف المخبر من 30 حساساً معظمها موزع داخل بناء المعهد، ويتصل بكل حساس عقدة مراقبة (observer node) ذات قدرة معالجة أعلى منه تعمل عمل الوسيط بين المخدم المركزي والحساس، بشكل يتيح للمخدم جمع بيانات الحساسات والتحكم بها وفق إعدادات التجربة [9].

سنوضح فيما يلي آلية العنونة وفق معيار 6LoWPAN، ومبدأ عمل نموذج ضغط الترويسة المعتمد على السياق، واعتبارات استخدامه، ثم سنبيين مبدأ عمل النموذج المقترح للضغط.



الشكل (2): بنية مخبر FlockLab والحاسبات المستخدمة في الدراسة

1- أنماط العنونة في شبكات الحاسبات اللاسلكية المعتمدة على IPv6:

نميز نوعين من عناوين الـ MAC في الشبكات التي تتبع المعيار IEEE 802.15.4 : عنوان قصير مؤقت بطول 16 بت، وعنوان فريد موسع بطول 64 بت [10]. تعدّ العناوين الموسعة عناويناً ثابتة يتم إسنادها من قبل المصنّع، ويفترض أن تكون مميزة وفريدة عالمياً.

يتألف عنوان IPv6 من قسمين كل منهما بطول 64 بت: الأول هو معرف الشبكة ويسمى البادئة (prefix)، والثاني هو معرف الواجهة (Interface Identifier) [6]. يتمتع IPv6 بخاصية التكوين التلقائي للعناوين عديم الحالة (Stateless Address Autoconfiguration) التي توفر إمكانية توليد الحاسبات لعناوين IPv6 تلقائياً اعتماداً على عناوين MAC الخاصة بها [3].

تتميز عناوين IPv6 المشتقة من عناوين MAC الفريدة الموسعة بكونها فريدة على الشبكة، وتعتبر عن حساس محدد بذاته دون غيره. يلغي هذا النمط من العناوين الحاجة لعملية التحقق من العنوان المزدوج (Duplicate Address Detection) [11]. ويوفر إمكانية ربط كل حساس مع عنوان IPv6 محدد مما يسهل إدارة الشبكة، ويساعد على تشخيص مشاكل الحاسبات اعتماداً على عناوينها.

2- ضغط الترويسة المعتمد على السياق:

سندرس هذا النمط من الضغط في حالات التراسل (حساس-عقدة خارجية) حيث تمثل العقدة الخارجية عقدة من شبكة IP أخرى غير شبكة الحاسبات، واعتماداً على بروتوكول حزم بيانات المستخدم (User-Datagram Protocol) (UDP). نفترض اعتماد جميع الحاسبات على عناوين MAC الفريدة الموسعة لتوليد عناوين IPv6 الخاصة بها باستخدام تقنية التكوين التلقائي للعناوين عديم الحالة، كما نفترض وجود بادئة عامة (global prefix) [6] وحيدة لشبكة الحاسبات. تتم الدراسة للشبكات ذات البنية البسيطة، والتي لها موجه حدودي (border router) وحيد يقوم بتأمين إدارة الشبكة وربطها مع شبكات IP الأخرى والانترنت [1].

يبين الشكل (3) بنية ترويسة IPv6 [5]. ويبين الشكل (4) بنية رزمة UDP/IPv6 مضغوطة بالضغط المعتمد على السياق؛ حيث يتم ضغط ترويسة IPv6 (IPHC: IP Header Compression)، وضغط الترويسة التالية (Next Header Compression) NHC في الرزمة (ترويسة UDP)، ويتم إضافة ترويسة LOWPAN_IPHC (الشكل 5) و LOWPAN_NHC لترميز الحقول المضغوطة من ترويسة IPv6 و UDP على

الترتيب، وتضاف حقول الترويسة غير القابلة للضغط بعد ترويسة الترميز الموافقة، أما حمولة الرزمة فلا يتم ضغطها [1] [4].

يعتمد هذا النموذج على ضغط حقل الطول (length) لترويسة UDP وحقلي الإصدار (version) وطول الحمل (payload length) لترويسة IPv6 دوماً دون ترميزهما؛ وذلك لكون قيمة الإصدار هي 6، وإمكانية الاستدلال على قيم حقول الطول المذكورة اعتماداً على حقل الطول في ترويسة MAC، كما يمكن ضغط حقل فئة المرور ووسم التدفق TF (Traffic class & Flow label) بافتراض أن قيمتهما صفر (لهذين الحقلين قيمة غير صفرية في تطبيقات محددة)، ويتم ضغط الترويسة التالية NH (Next Header) والدلالة على قيمة هذا الحقل في ترويسة LOWPAN_NHC، أما حقل حد القفزة HLIM (Hop LIMit) فلا يمكن ضغطه عند التراسل عبر قفزات IPv6 متعددة [4].

بناءً على ما سبق، ووفقاً للشكلين (3،4)، يكون بعد الضغط: حجم حقول IPv6 غير الخاصة بالعنونة هو 1 بايت، وحجم ترويسة UDP هو (6=8-2) بايت. لذا نلخص ما سبق بالنتيجة الآتية:

النتيجة 1: بعد الضغط يصبح حجم ترويسة UDP مع ترويسة ترميزها وحقول IPv6 غير الخاصة بالعنونة = 1+1+6= 8 بايت.

الإصدار (4)	فئة المرور (8)	وسم التدفق (20)	
طول الحمل (16)		الترويسة التالية (8)	حد القفزة (8)
عنوان المصدر (128)			
عنوان الوجهة (128)			

الشكل (3): بنية ترويسة IPv6 وأحجام حقولها (بت)

2-3 Bytes		1 Byte		
LOWPAN_IPHC	حقول غير مضغوطة لترويسة IPv6	LOWPAN_NHC	حقول غير مضغوطة لترويسة UDP	الحمل

الشكل (4): بنية رزمة UDP/IPv6 مضغوطة بالضغط المعتمد على السياق.

2 Bytes															
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0	0	1	TF	NH	HLIM	CID	SAC	SAM	M	DAC	DAM				

الشكل (5): بنية ترويسة LOWPAN_IPHC (CID=0)

يعبر البايت الثاني من ترويسة LOWPAN_IPHC عن طريقة ضغط حقلي عنوان المصدر (Source) وعنوان الوجهة (Destination). تدل قيمة (M) على ضغط عناوين البث المجموعاتي (multicast). فيما يخص عناوين IPv6 العامة، تدل القيمة (0) لحقل ضغط عنوان المصدر/الوجهة (SAC/DAC) (Source/Destination) (Address Compression) على إرسال عنوان المصدر/الوجهة دون ضغط، والقيمة (SAC/DAC=1) على ضغط عنوان المصدر/الوجهة وفق نمط مصحوب بالحالة اعتماداً على السياقات المشتركة [1] [4].

يعرّف السياق على أنه بادئة عنوان ما يتم إسناد رقم ثابت لها وإعداد الموجه الحدودي ليقوم بتوزيعها مع رقمها على كافة عقد الشبكة. ويمكن أن يتواجد في الشبكة حتى 16 سياق مختلف تتراوح أرقامها بين (0-15)؛ بحيث تحتفظ كل عقدة في الشبكة بجدول يسمى جدول السياقات (context table) يحوي قيم السياقات المشتركة مع أرقامها، وتكون قيم هذا الجدول هي نفسها لجميع العقد، ويمكن أن تستخدم السياقات في ضغط عنوان المصدر أو الوجهة أو كليهما، كما يمكن ضغط العناوين بسياقين مختلفين [1] [4].

يمكن النظر لضغط عنوان ما باستخدام السياقات على أنه اختصار بادئة هذا العنوان برقم محدد، بحيث يتم الضغط بإرسال هذا الرقم ضمن بايت إضافي عوضاً عن البادئة، ويتم إسناد القيمة (1) لحقل معرف السياق (Context Identifier) في ترويسة LOWPAN_IPHC للدلالة على أن حجمها أصبح 3 بايت. توافق هذه الحالة الضغط بسياق رقمه (1-15)، أما عند الضغط اعتماداً على السياق ذو الرقم (0) لوحده، والذي يعرف بالسياق الافتراضي [1]، فلا يتم إرسال رقم هذا السياق، ويبقى حجم ترويسة LOWPAN_IPHC (2) بايت ويتم إسناد القيمة (CID=0) فيها. نبر عن محدّدات هذين النمطين من الضغط بالعلاقين الآتيتين:

- (1) $(SAC \vee DAC=1) \wedge (CID=0) \leftrightarrow$ فقط (رقم 0)
 - (2) $(SAC \vee DAC=1) \wedge (CID=1) \leftrightarrow$ الضغط بسياق غير افتراضي
- حيث تمثل \vee ، \wedge العمليتين المنطقيتين OR، AND على الترتيب.

عادةً يكون السياق الافتراضي هو البادئة العامة لشبكة الحساسات [1]، هذا اختيار بديهي نظراً لكون جميع عقد الشبكة تعتمد هذه البادئة في عناوينها العامة. تستخدم الحساسات العناوين العامة عند التراسل فيما بينها في بعض من عمليات اكتشاف الجوار (Neighbor Discovery) [11]، وعند التراسل مع عقد خارجية. حيث يتيح السياق الافتراضي ضغط بادئة شبكة الحساسات عند التراسل مع هذه العقد ولا يتيح ضغط بادئة أي شبكة أخرى، وهو ما نعتبر عنه بالنتيجة الآتية:

النتيجة 2: يتيح الضغط بالاعتماد على السياق الافتراضي وحده ضغط البادئة العامة لشبكة الحساسات بشكل كامل (ضغط 8 بايت)، ولا يتيح ضغط بادئات شبكات IP الأخرى.

يحدد حقل نمط عنوان المصدر/الوجهة (Source/Destination Address Mode) SAM/DAM طريقة ضغط معرف الوجهة لعنوان المصدر/الوجهة [4]. لا يتيح السياق الافتراضي ضغط معرف الوجهة للحساسات أو للعقد الخارجية. في هذه الحالة، وعند التراسل مع عقد خارجية، يمكن ضغط معرف الوجهة لعنوان الحساس المشتق من عناوين MAC القصيرة إلى 16 بت، أما العنوان المشتق من عناوين MAC الفريدة الموسعة (المستخدم في دراستنا) فلا يمكن ضغط معرف الوجهة الخاص به، وهو ما يقودنا للنتيجة الآتية:

النتيجة 3: لا يتيح الاعتماد على السياق الافتراضي لوحده ضغط معرف الوجهة لعنوان المصدر أو الوجهة عند التراسل مع عقد خارجية.

اعتماداً على النتيجتين 2 و3، وفي حالة التراسل بين حساس وعقدة خارجية يتم ضغط العناوين بضغط بادئة عنوان الحساس (ضغط 8 بايت) فقط. ويبقى طول ترويسة الترميز LOWPAN_IPHC هو 2 بايت، ونعبر عن هذه الحالة بالنتيجة الآتية:

النتيجة 4: عند التراسل مع عقد خارجية، يتم ضغط حقل العنونة في ترويسة IPv6 بالاعتماد على السياق الافتراضي إلى 24 بايت، ويكون طول ترويسة LOWPAN_IPHC هو 2 بايت. بناءً على النتيجتين (1،4)، يكون حجم ترويسات رزمة UDP/IPv6 بعد الضغط بالسياق الافتراضي هو 34 بايت.

3- اعتبارات استخدام ضغط الترويسة المعتمد على السياق:

تم لاحقاً تقديم المزيد من الإيضاحات حول مفهوم السياقات؛ إذ تتطلب مزامنة السياقات بين عقد الشبكة قيام الموجه الحدودي بتوزيع كل سياق على مرحلتين، وتوزيع السياقات على كامل عقد الشبكة، ويتوجب على الحساسات التي تعمل كموجهات أن تقوم دورياً ببيت كافة السياقات ضمن إعلانات التوجيه (routing-advertisements). أضف إلى ذلك أن التعديلات على السياقات: كإضافة سياق جديد، إطالة فترة حياة سياق ما، تعديل قيمة سياق ما أو سحبه من الخدمة، يجب أن تشمل جميع عقد الشبكة [11]. يسبب كل ما سبق ذكره توليد كميات بيانات كبيرة في الشبكة ويستنزف مواردها، خصوصاً إذا كان عدد عقد الشبكة كبيراً.

4- النموذج المقترح للضغط:

يشمل النموذج العام لتطبيقات شبكات الحساسات اللاسلكية وفق معيار 6LoWPAN التراسل مع مستخدم مركزي بعيد (عبر الانترنت) ومع عدد من المستخدمين المحليين (عبر الايثرنت مثلاً) [1]. تختلف خصائص الشبكة (عدد الحساسات، مدى محدودية الموارد، وغيرها) باختلاف التطبيق المستخدمة وفقه، ويمكن لعدد محدد من عقد الشبكة أن تعمل كمحكّمات محلية LC (Local Controllers) بهدف التحكم بالحساسات وجمع بياناتها [12]. يرتكز نموذج الضغط المقترح على تعريف عناوين IPv6 لعدد محدد من مستخدمي شبكة الحساسات كعناوين افتراضية لعقدتها، بشرط أن تكون هذه العناوين ثابتة ومميزة عالمياً (هذا متاح بفضل فضاء العنونة الهائل لـ IPv6)؛ ويتم ذلك بإسناد أرقام محددة لها، وبرمجتها مسبقاً في الحساسات قبل النشر بحيث تخزن الحساسات قيم هذه العناوين وأرقامها كقيم ثابتة ضمن جدول جديد نسميه جدول السياقات الافتراضية.

يعتمد النموذج المقترح على تعديل نموذج ضغط الترويسة المعتمد على السياق بتوسيع مفهوم السياق الافتراضي بشكل يوفر المزيد من المرونة، ويتيح زيادة نسبة ضغط العناوين عند التراسل بين الحساسات والمستخدمين الافتراضيين. ويمكن تلخيص أهم تعديلاتنا بما يلي:

• يمكن الإبقاء على جدول السياقات الأصلي والضغط بالاعتماد على سياقاته، ولكن بعد إلغاء تعيين السياق رقم (0) كسياق افتراضي، ومعاملته كباقي السياقات الأصلية الـ 15 الأخرى؛ بحيث يتم إرسال رقم هذا السياق عند استخدامه في الضغط، وهذا يلغي العمل وفق العلاقة (1)، مما يعني أن أي عملية ضغط اعتماداً على السياقات الأصلية تتم وفق العلاقة:

$$(3) \quad \text{الضغط وفق النموذج الأصلي} \leftrightarrow (CID=1) \wedge (SAC \vee DAC=1)$$

• نستخدم محددات العلاقة (1) للدلالة على الضغط وفق النموذج المقترح. يعمل هذا النموذج على ضغط عنواني المصدر والوجهة عند التراسل بين الحساسات والمستخدمين الافتراضيين؛ لذا نستبدل القيمة $(SAC \vee DAC=1)$ بالقيمة $(SAC \wedge DAC=1)$ ، ونعيد صياغة العلاقة (1) لتصبح:

$$(4) \quad (SAC \wedge DAC=1) \wedge (CID=0) \leftrightarrow \text{الضغط بالنموذج المقترح}$$

• يتم ضغط بادئة عنوان الحساس تلقائياً نظراً لكونها معروفة لجميع عقد الشبكة. ويتم ضغط عنوان المستخدم الافتراضي كاملاً اعتماداً على السياقات الافتراضية.

• يتم إرسال بايت إضافي عند تحقق الشرط (4) ندعوه معرف السياق الافتراضي، تستخدم قيمته للدلالة على رقم السياق الافتراضي المستخدم في الضغط وفقاً لجدول السياقات الافتراضية. هذا الباييت يكفي للدلالة على 256 قيمة في جدول السياقات الافتراضية؛ لذا يمكن إضافة حتى 256 سياقاً افتراضياً (بحسب حجم الذاكرة المتاحة، وهو ما سنوضحه لاحقاً عند دراسة متطلبات الذاكرة للنموذج المقترح).

• يعتمد النموذج المقترح دلالات خاصة لقيم SAM/DAM تستخدم لتمييز العنوان الذي يجب فك ضغطه تلقائياً (عنوان الحساس) عن العنوان الذي يجب فك ضغطه بحسب قيمة السياق الافتراضي (عنوان المستخدم الافتراضي):

▪ SAM/DAM=00 عنوان حساس ذو بادئة مضغوطة (ضغط 8 بايت).

▪ SAM/DAM=01 محجوز لضغط العناوين الافتراضية الداخلية كما سنوضح لاحقاً.

▪ SAM/DAM=10 عنوان خارجي غير مشمول بأي سياق (لا يتم ضغطه).

▪ SAM/DAM=11 عنوان افتراضي مضغوط بشكل كامل (ضغط 16 بايت).

• لا يتم تعديل أسلوب ضغط حقول ترويسة UDP، وحقول ترويسة IPv6 غير الخاصة بالعنونة.

• عندما يكون المصدر والوجهة حساسين من الشبكة، يتم ضغط بادتيهما وفق نموذجنا، واستخدام القيمتين $(SAM=DAM=00)$ للدلالة على أن العنوانين هما من نفس الشبكة. في هذه الحالة لا يتم إرسال بايت معرف السياق الافتراضي، ويبقى حجم ترويسة LOWPAN_IPHC مساوياً لـ 2 بايت.

لتوضيح آلية عمل النموذج المقترح ندرس حالة الإرسال من حساس (المصدر) إلى مستخدم افتراضي (الوجهة)، في هذه الحالة يتم الضغط وفق الخطوات الآتية:

1. يتم ضغط بادئة عنوان الحساس تلقائياً $(SAC=1)$ ، وإرسال معرف الوجهة له دون ضغط $(SAM=00)$.
2. يتم ضغط عنوان المستخدم اعتماداً على جدول السياقات الافتراضية $(DAC=1)$ ، ويتم ضغط هذا العنوان بشكل كامل $(DAM=11)$.
3. يتم إسناد القيمة $(CID=0)$ ، فتصبح العلاقة (4) محققة، وهذا يدل على أن الضغط يتم وفق النموذج المقترح.

4. يتم إرسال رقم السياق الافتراضي المستعمل في ضغط عنوان المستخدم في بايت إضافي (معرف السياق الافتراضي)، ويصبح حجم ترويسة LOWPAN_IPHC هو 3 بايت.

وفقاً لهذه الحالة، يتيح النموذج المقترح ضغط عنوان المستخدم بشكل كامل (ضغط 16 بايت)، وضغط بادئة عنوان الحساس فقط (ضغط 8 بايت). عند التراسل بالاتجاه المعاكس يتم الضغط بنفس النسبة، وهذا يقودنا للنتيجة الآتية:

النتيجة 5: عند التراسل مع المستخدمين الافتراضيين، يتم ضغط حقل العنوان في ترويسة IPv6 باستخدام النموذج المقترح إلى 8 بايت، ويكون طول ترويسة LOWPAN_IPHC هو 3 بايت. يتفوق النموذج المقترح على نموذج الضغط المعتمد على السياق بكونه يضغط العناوين الافتراضية وفق نمط عديم الحالة (دون الحاجة لتبادل سياقاتها بين عقد الشبكة)؛ نظراً لكون سياقاتها مخزنة مسبقاً في الحساسات قبل النشر، مما يتيح العمل وفق عدد أكبر من السياقات مع تجنب التعقيدات المرافقة لمزامنة ونشر هذه السياقات الإضافية في الشبكة. بمقارنة النتيجة (5) و (4) نستنتج أن نموذج الضغط المقترح يتيح ضغط عناوين المستخدمين الافتراضيين بنسبة 75%، في حين أن الضغط بالسياق الافتراضي لوحده وفق نموذج الضغط المعتمد على السياق يضغط تلك العناوين بنسبة 25%، كما نستنتج أن حجم ترويسة UDP/IPv6 بعد الضغط بالنموذج المقترح هو 19 بايت.

يمكن استخدام النموذج المقترح لضغط عناوين عدد من عقد الشبكة (حساسات أو متحكمات محلية) إضافة للعناوين الافتراضية؛ إذ يمكن مثلاً تعيين 8 عناوين افتراضية فقط للمستخدمين (تحتاج 3 بت للدلالة على أرقامها)، واستخدام البتات الخمس المتبقية من بايت معرف السياق الافتراضي للدلالة على أرقام 32 عنواناً من عناوين عقد الشبكة (أو يكفي معرفات الواجهة لعناوين هذه العقد لكون البادئة معروفة لكل العقد الأخرى) مخزنة ضمن جدول آخر نسميه جدول العناوين الافتراضية الداخلية، ويتم الدلالة على ضغط عناوين هذه العقد باستخدام القيمة المحجوزة للنموذج المقترح (SAM/DAM=01).

النتائج والمناقشة:

للسهولة في الإيضاح والتعبير، نستخدم فيما تبقى من دراستنا مصطلح الضغط بالسياق (0) للدلالة على الحالة الافتراضية (الضغط اعتماداً على السياق الافتراضي فقط) لنموذج الضغط المبني على السياق. تمت الدراسة وفق 3 نماذج: دون ضغط الترويسات، الضغط بالسياق (0)، الضغط بالنموذج المقترح. قمنا بتقييم أداء النماذج المذكورة وفقاً للنفاذية المفيدة، والتأخير من نهاية إلى نهاية، واستهلاك الطاقة الوسطي، ومتطلبات الذاكرة.

أ- الإعدادات العامة للدراسة:

تمت الدراسة بتكوين تطبيق يولد بيانات ذات حجم ثابت يتم إرسالها من حساس مرسل إلى حساس مستقبل لهما بادئة مشتركة تمثل البادئة العامة لشبكة الحساسات. زدنا الحساس المستقبل بعنوان IPv6 آخر ذو بادئة غير مشتركة مع المرسل، يمثل هذا العنوان عنواناً خارجياً لشبكة الحساسات، وتم الإعداد بحيث يتم الإرسال إلى العنوان الخارجي للمستقبل، وذلك بعد ضبط جدول التوجيه للحساس المرسل يدوياً بتحديد الحساس المستقبل على أنه العقدة التالية على مسار الإرسال. عند دراسة استهلاك الطاقة استخدمنا آلية مشابهة ولكن مع إضافة حساس ثالث يمثل عقدة وسيطية تقوم بتوجيه الرزم من المرسل إلى المستقبل. لدى دراسة الضغط بالسياق (0) تم تعريف البادئة المشتركة للحساسين على أنها السياق الافتراضي، وعند دراسة النموذج المقترح تم تعريف العنوان الخارجي للمستقبل كأحد العناوين الافتراضية. جميع الحساسات المستخدمة في الدراسة هي من نوع Tmote Sky [13].

عادةً تعمل الحساسات وفق أحد بروتوكولات توفير الطاقة، مثل بروتوكول ContikiMAC المستخدم في نظام التشغيل Contiki-OS، والذي ينظم عمل الحساسات وفق دورات تشغيل (duty cycles)؛ بحيث يتم إيقاف تشغيل

المرسل-المستقبل الراديوي (radio transceiver) خارج هذه الدورات لتوفير الطاقة وهو ما يسمى الإسبات (sleep) [14].

يعيق استخدام هذا البروتوكول الدراسة الدقيقة للنفاذية المفيدة والتأخير من نهاية إلى نهاية؛ فالحساس الذي يستيقظ بمعدل 8 مرات بالثانية لا يمكنه أن يستقبل أكثر من 8 رزم بالثانية، كما أن انتظار استيقاظ المستقبل يزيد تأخير الإرسال. في المقابل يعدّ المرسل-المستقبل الراديوي أكثر عنصر مستهلك للطاقة في الحساس [14]؛ ونظراً لكون دراستنا للطاقة تتم مخبرياً لفترات طويلة نسبياً، بحيث من المحتمل التقاط الحساس لإشارات من أجهزة اتصال لاسلكي مجاورة بشكل يعطي قيمة غير دقيقة عند حساب الطاقة، فإن عدم دخول الحساس في فترات إسبات يزيد هذا التأثير. يساعد ContikiMAC على تخفيف الأثر الوارد ذكره، ووفقاً له يتعلق زمن تشغيل المرسل-المستقبل الراديوي بحجم البيانات المرسل/المستقبل، وهو ما يفيد في الدراسة الدقيقة لتأثير الضغط على استهلاك الطاقة؛ لذا تم استخدام هذا البروتوكول فقط عند دراسة استهلاك الطاقة.

تمت الدراسة لعمولة تطبيق يصل حجمها إلى 100 بايت، ويبين الجدول (1) أحجام ترويسات رزم UDP/IPV6 وكمية بيانات التطبيق المتاح نقلها مع ودون تقسيم الرزم. حيث نستخدم في دراستنا الحجم الأقصى لترويسة MAC وهو 25 بايت؛ مما يعني أن الحجم الأقصى للرزمة الذي يمكن إرساله دون تقسيم هو: (127-25=102 Bytes). نشير إلى أنه عند عدم الضغط تستهلك ترويسات UDP و IPV6 (40+8=48 Bytes) من حجم الرزمة، وتستهلك طبقة الملازمة 1 بايت تستخدمه كمعرف لها (dispatch) [3].

الجدول (1) : أحجام ترويسات رزم UDP/IPV6 للنماذج المدروسة، وأحجام عمولة التطبيق المتاح نقلها مع ودون تقسيم الرزم

النموذج	إجمالي حجم الترويسات (بايت)	الحجم الأقصى لعمولة التطبيق دون تقسيم الرزم (بايت)	قيم عمولة التطبيق التي تستدعي تقسيم الرزم (بايت)
بلا ضغط	49	53	100-54
ضغط بالسياق (0)	34	68	100-69
النموذج المقترح	19	83	100-84

ب- نتائج المحاكاة البرمجية:

1- النفاذية المفيدة:

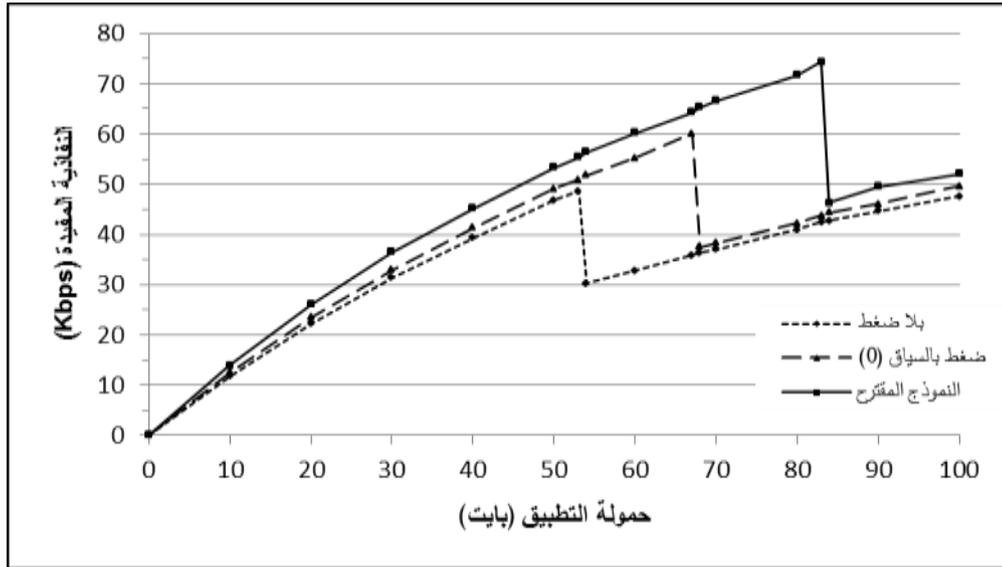
قمنا بدراسة النفاذية على مستوى طبقة التطبيقات، وهي ما تسمى بالنفاذية المفيدة، ويتم حسابها بكمية البتات المستقبلية في طبقة التطبيقات للمستقبل في واحدة الزمن.

شكل اختيار معدل الإرسال تحدياً كبيراً لدراستنا؛ إذ أن اختيار معدل مرتفع جداً أدى لإهمال إرسال عدد كبير من الرزم بسبب محدودية قدرة الحساسات على معالجة الرزم وتخزينها، وخاصة على مستوى طبقة الملازمة. لذا قمنا بتعريف وحدة تخزين مؤقتة (buffer) في طبقة الـ MAC ذات حجم أقل من حجم وحدة التخزين لطبقة الملازمة. تقوم هذه الوحدة بتجميع الرزم بعد معالجتها من قبل طبقة الـ MAC، وإرسالها تبعاً. تم إعداد طبقة التطبيقات لتوليد

البيانات بمعدل مرتفع جداً، وبحيث يتوقف توليد البيانات عند عدم قدرة وحدة التخزين التي قمنا بتعريفها على استيعاب رزم إضافية. ويتم استئناف توليد البيانات فور توافر مساحة كافية.

يبين الشكل (6) قيم النفاذية المفيدة لكل نموذج وفق المحاكاة البرمجية. يبدي النموذج المقترح تحسناً ملحوظاً في النفاذية المفيدة مقارنة بالنموذجين الباقيين، ذلك مرده إلى أن النفاذية المفيدة تزداد بزيادة نسبة ضغط الترويسة. تتزايد النفاذية المفيدة لكل نموذج بزيادة حجم حمولة التطبيق لتبلغ أعلى قيمه لها عندما يصل حجم الحمولة إلى الحد الأقصى المتاح نقله دون تقسيم الرزمة (المبين وفق الجدول 1)، وبزيادة حجم حمولة التطبيق عن هذا الحد، يتم اللجوء إلى تقسيم الرزم عند الإرسال.

تفرض عمليات التقسيم وإعادة التجميع زيادة في زمن معالجة الرزم، وزمن إرسالها واستقبالها، كما أنها تزيد نسبة الرزم الضائعة؛ وذلك لكون الإرسال يتم على دفعتين، وبالتالي فإن ضياع أي جزء من الرزمة يؤدي لضياعها كاملة. لذا تتخفف النفاذية المفيدة بشكل حاد عند قيم حمولة التطبيق: 84 و 69 و 54 بايت للنموذج المقترح والضغط بالسياق (0) وعدم الضغط على الترتيب، وتزداد تدريجياً عند قيم الحمولة الأعلى؛ نظراً لكون التقسيم يتم بإرسال الترويسات في القسم الأول فقط، أما القسم الثاني من كل رزمة مقسمة فيحوي حمولة التطبيق فقط.



الشكل (6): تغير النفاذية المفيدة للنماذج المدروسة تبعاً لحمولة التطبيق، وفق المحاكاة البرمجية

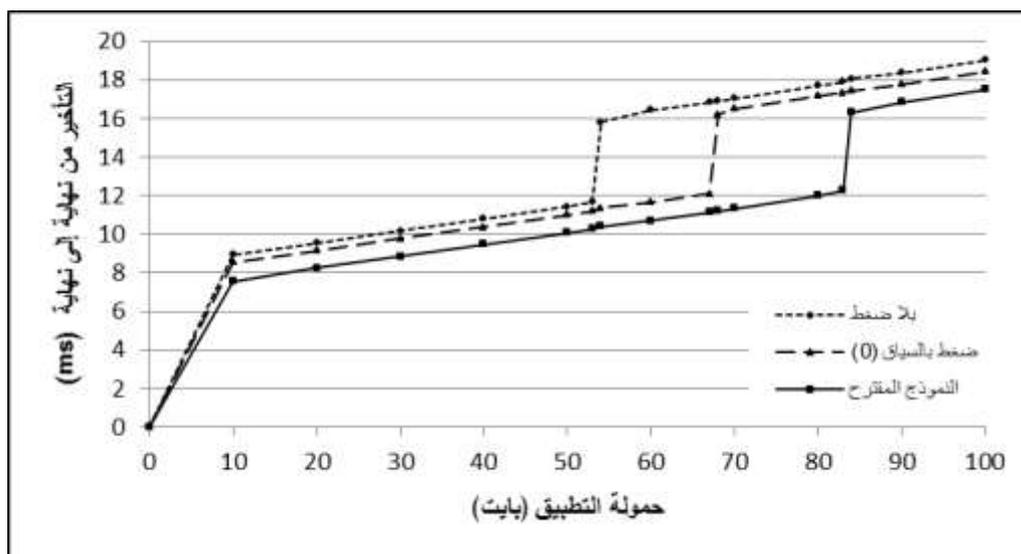
2- التأخير من نهاية إلى نهاية:

قمنا بدراسة التأخير من نهاية إلى نهاية على مستوى طبقة التطبيقات، وذلك بحساب الفارق الزمني بين إرسال الحمولة من طبقة التطبيقات للمرسل واستقبالها عند طبقة التطبيقات للمستقبل. تمت دراسة التأخير لكل قيمة لحمولة التطبيق بإرسال رزمة كل ثانية لمدة 3 دقائق، وحساب متوسط التأخير الزمني لجميع الرزم المستقبلية. ويبين الشكل (7) قيم التأخير من نهاية إلى نهاية للنماذج المدروسة تبعاً لحجم بيانات التطبيق.

يعاني نمودجا الضغط من زيادة في التأخير تفرضها عمليات الضغط وفك الضغط، وبالمقابل يزداد تأخير الإرسال والاستقبال عند عدم الضغط؛ نظراً لكون حجم الرزم أكبر. يبين الشكل (7) أن التأخير من نهاية إلى نهاية

ينخفض بزيادة نسبة الضغط، هذا يعني أنه عند ضغط الترويسة يتم تخفيض زمن الإرسال والاستقبال بقيمة تفوق قيمة الزمن الإضافي اللازم لضغط الرزم وفك ضغطها.

يزداد التأخير من نهاية إلى نهاية لكل نموذج بشكل كبير عند تقسيم الرزم؛ إذ يفرض التقسيم زيادة كبيرة في التأخير تنجم عن إرسال كل رزمة على دفعتين، وعن عمليات التقسيم وإعادة التجميع التي تفرض تأخيراً إضافياً على معالجة الرزم. لقد تبين أن إرسال أدنى قيمة لحمولة التطبيق عند تقسيم الرزم وفق الجدول (1) يسبب زيادة التأخير من نهاية إلى نهاية بحوالي 33% للنماذج الثلاثة.



الشكل (7): تأثير حجم حمولة التطبيق على التأخير من نهاية إلى نهاية للنماذج المدروسة، وفق المحاكاة البرمجية

ج. نتائج الدراسة المخبرية:

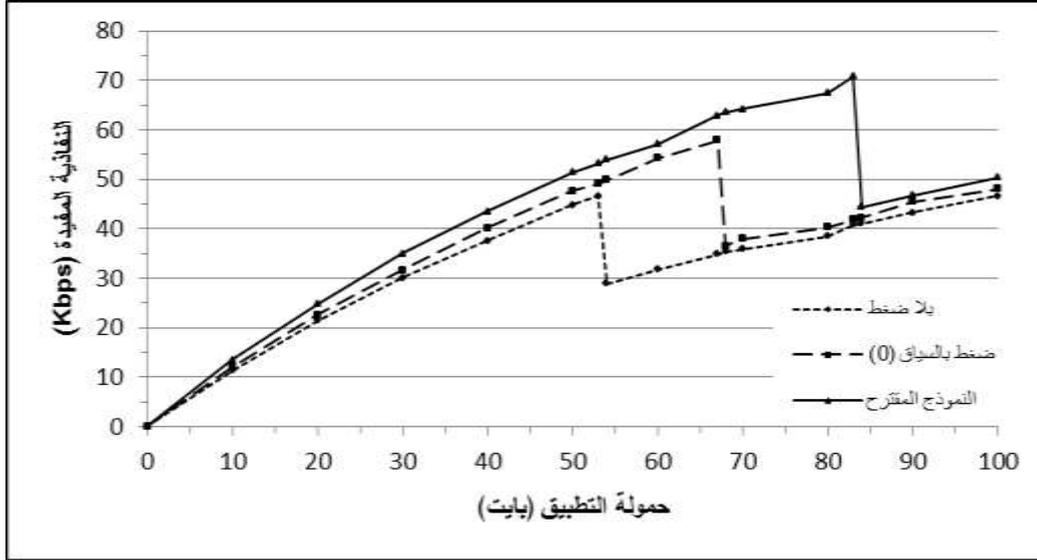
1- النفاذية المفيدة:

قمنا بإعادة تقييم نتائج النفاذية المفيدة التي حصلنا عليها بالمحاكاة البرمجية بتطبيق نفس البرامج على الحساسين 15 (المرسل) و 32 (المستقبل) في المخبر والمبينين وفق الشكل (2).

يبين الشكل (8) نتائج دراسة النفاذية المفيدة مخبرياً. تسلك منحنيات النفاذية المفيدة في الشكل (8) سلوكاً مشابهاً لسلوكها في الشكل (6)، وتبين أن قيم النفاذية المفيدة لكل نموذج في الشكل (8) تقل عن مثيلتها في الشكل (6) بنسبة لا تزيد عن 5%، وهي قيمة خطأ مقبولة للمحاكاة البرمجية؛ نظراً لكون الدراسة المخبرية تتم ضمن بيئة مغلقة (indoor)، مما يجعل الإرسال عرضة لتأثيرات الامتصاص والانعكاس التي تسببها الجدران والعوائق الأخرى، إضافة لتأثر الحساسات بالضجيج من أجهزة الاتصال المجاورة.

وجدنا أن القيم النسبية للفرق بالنفاذية المفيدة بين النماذج الثلاث وفق المحاكاة البرمجية قريبة جداً من مثيلتها وفق الدراسة المخبرية، فمثلاً وجدنا عند الدراسة المخبرية أن النموذج المقترح يحقق عند القيمة 54 بايت زيادة في النفاذية المفيدة بمقدار 86.6% مقارنة بعدم الضغط، وزيادة عند القيمة 69 بايت بمقدار 73.85% مقارنة بالضغط بالسياق (0)، النسب المقابلة لهذه النسب وفق المحاكاة البرمجية هي 86.67% و 73.94% على الترتيب.

ولاحظنا انخفاض النفاذية المفيدة للنماذج المدروسة بنسبة 38% لدى إرسال أدنى قيمة لحمولة التطبيق عند تقسيم الرزم مقارنة بإرسال أكبر قيمة لحمولة التطبيق دون تقسيم (قيم الحمولة هذه مبينة بالجدول 1).



الشكل (8) : تغير النفاذية المفيدة للنماذج المدروسة تبعاً لحمولة التطبيق، وفق الدراسة المخبرية

2- استهلاك الطاقة الوسطي:

تم الإعداد بحيث يقوم المرسل (الحساس 11) بالإرسال إلى المستقبل (الحساس 7) عبر الموجه (الحساس 14) وذلك بحسب الشكل (2). تم استخدام عقدة وسيطية وحيدة في الدراسة لتخفيف تأثير التصادم الذي يزداد بزيادة عدد العقد الوسيطة.

لحساب تأثير عمليتي الضغط وفك الضغط معاً على استهلاك الطاقة قمنا بدراسة استهلاك الطاقة للحساس (7) فقط؛ لكونه يقوم بفك ضغط الرزم المستقبلية ثم إعادة ضغطها وإرسالها. تمت الدراسة لكل قيمة لحمولة التطبيق لمدة 5 دقائق وبمعدل إرسال (1 رزمة/ثانية)، وتم الإعداد بحيث يقوم المخدم المركزي للمخبر بالقراءة الدورية لاستهلاك الحساس للتيار بمعدل (2880 قراءة/ثانية)، وقمنا بحساب متوسط استهلاك التيار في الثانية اعتماداً على قيم هذه القراءات الدورية، ومن ثم حساب الاستطاعة المتوسطة بجداء متوسط استهلاك التيار في الثانية بقيمة جهد التغذية المستمر المطبق، وهو (3.3V).

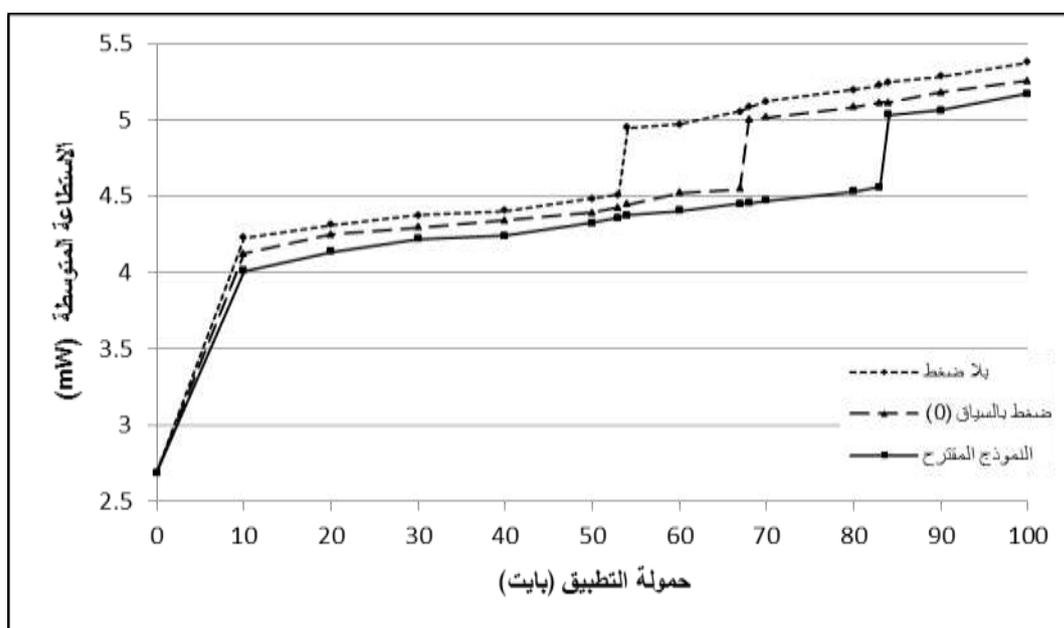
تمت الدراسة بحيث تعمل الحساسات وفق فترات إسبات دورية مدتها (0.125) ثانية، وذلك اعتماداً على بروتوكول ContikiMAC، والذي يتيح مزامنة الإرسال بما يتناسب مع توقيت استيقاظ المستقبل، ويعمل على إعادة الحساس إلى وضع الإسبات فور انتهاء الإرسال والاستقبال. مما يعطي فكرة واضحة عن تأثير حجم الرزم على زمن الإرسال والاستقبال.

وجدنا سابقاً عند دراسة التأخير من نهاية إلى نهاية أن ضغط الترويسة يحقق تخفيضاً في زمن إرسال واستقبال الرزم قيمته تفوق قيمة زيادة التأخير الناجمة عن معالجتها. هذه النتيجة تنعكس بشكل مباشر على مدة تشغيل المرسل-المستقبل الراديوي والمعالج، وبالتالي على استهلاك الحساس للطاقة؛ إذ تشير قيم استهلاك التيار الأسمية للحساسات المستخدمة في دراستنا [13] إلى أن قيمة استهلاك التيار الناتجة عن تشغيل المعالج دون تشغيل المرسل-المستقبل الراديوي (radio off) تزداد بحدود 10 أضعاف أو 11 ضعفاً عند تشغيل المرسل-المستقبل الراديوي. مما يعني أنه،

وعلى الرغم من استهلاك الطاقة الذي تتطلبه عمليات الضغط وفك الضغط، فإنه بزيادة نسبة الضغط يزداد توفير الطاقة نظراً لتشغيل المرسل-المستقبل الراديوي لمدة أقل، وهو ما توصلنا له عند حساب قيم الاستطاعة المتوسطة للنماذج الثلاثة، والموضحة بالشكل (9).

تبين أن الاستطاعة المتوسطة دون إرسال أي حمولة للتطبيق (الشكل 9) تكون قيمتها (2.69 mW). تشمل هذه القيمة فترات الاستيقاظ الدوري، والتي يتم خلالها تشغيل المرسل-المستقبل الراديوي لفترات قصيرة جداً. وتوصلنا إلى أن هذه القيمة تزداد بنسبة 57.4% عند إرسال حمولة قدرها 10 بايت، وذلك بسبب استهلاك الطاقة الناتج عن معالجة الرزم (على مستوى كافة الطبقات)، وإرسال الرزم واستقبالها.

لقد لاحظنا أن الاستطاعة المتوسطة للنماذج الثلاثة تزداد بنسبة 10% لدى إرسال أدنى قيمة لحمولة التطبيق عند تقسيم الرزم مقارنة بإرسال الحجم الأقصى لحمولة التطبيق دون تقسيم. يعود ذلك إلى زيادة في استهلاك المعالج للطاقة بفعل عمليات تقسيم وتجميع الرزم، والزيادة في استهلاك الطاقة التي تنتج عن تشغيل المرسل-المستقبل الراديوي لفترات أطول؛ نظراً لأن الرزم المقسمة يتم إرسالها على دفعتين.



الشكل (9): تأثير حجم حمولة التطبيق على استهلاك الطاقة الوسطي للنماذج المدروسة، وفق الدراسة المخبرية

3- استخدام الذاكرة:

قمنا بحساب حجم ذاكرة القراءة فقط (Read Only Memory) ROM وحجم ذاكرة الوصول العشوائي RAM (Random Access Memory) اللازمين لبرمجة الحساسات وفق النماذج الثلاثة دون وجود أي تطبيق. وذلك بإعداد الحساسات بحيث تقوم بطباعة حالة الذاكرة عند الإقلاع.

يبين الجدول (2) قيم الذاكرة المطلوبة وفقاً لكل نموذج. يتبين من الجدول أن عدم الضغط يتطلب حجم ذاكرة أقل من نمودجي الضغط، وبالمقابل يتطلب النموذج المقترح زيادة في حجم الذاكرة ROM نظراً لاستخدامنا هذه الذاكرة للتخزين المسبق لقيم السياقات الافتراضية. وبشكل عام لاحظنا أن النموذج المقترح يتطلب زيادة قدرها 18 بايت من

مساحة الـ RAM و 16 بايت من مساحة الـ ROM لكل سياق افتراضي تتم إضافته. يذكر أن حجم ذاكرتي RAM و ROM لحساسات Tmote Sky هو: 10 KByte و 48 KByte على الترتيب [13].

الجدول (2): حجم الذاكرة المستخدم وفق النماذج المدروسة

ROM (Bytes)	RAM (Bytes)	عدد السياقات	نوع الضغط
22884	4158	-	بلا ضغط
25562	4172	1	الضغط بالسياق (0)
25646	4182	2	الضغط بالسياق (0)
25654	4322	16	الضغط بالسياق (0)
26002	4345	16 أصلي + 1 افتراضي	النموذج المقترح
26212	4471	16 أصلي + 8 افتراضي	النموذج المقترح

د. تأثير حجم حمولة التطبيق على الأداء:

تبين من نتائج دراستنا للتأخير من نهاية إلى نهاية، ودراستنا المخبرية للنفذية المفيدة واستهلاك الطاقة الوسطي، أن تقسيم الرزم يسبب انخفاضاً كبيراً في الأداء؛ إذ أنه بإرسال الحجم الأدنى لحمولة التطبيق للرزم المقسمة، تتخفض النفذية المفيدة بحوالي 38% ويزداد التأخير من نهاية إلى نهاية بنسبة 33% واستهلاك الطاقة الوسطي بنسبة 10% للنماذج المدروسة مقارنة بإرسال الحجم الأقصى لحمولة دون تقسيم. يساعد النموذج المقترح على الحماية من هذا الأثر من خلال إمكانية إرسال حتى 83 بايت دون تقسيم، وهو ما يفسر التحسين الكبير في الأداء مقارنة بعدم الضغط في المجال (54-83) بايت لحمولة التطبيق، والذي يبلغ وسطياً: 12.24% لاستهلاك الطاقة الوسطي، و 79.3% للنفذية المفيدة، و 33.45% للتأخير من نهاية إلى نهاية. وتكون القيم المقابلة لتحسين الأداء في المجال (69-83) بايت مقارنة بالضغط بالسياق (0) هي وسطياً: 10.88% لاستهلاك الطاقة الوسطي، و 69.9% للنفذية المفيدة، و 33% للتأخير من نهاية إلى نهاية.

لاحظنا في دراستنا أنه بزيادة حجم حمولة التطبيق، ينخفض الفارق بالأداء بين النماذج المدروسة. وذلك باستثناء حالات المقارنة التي يعتمد بها أحد النماذج دون الآخر على تقسيم الرزم. فبالنسبة لتحسين النموذج المقترح للنفذية المفيدة مثلاً، تكون قيم التحسين الموافقة لأحجام قدرها 10 و 50 و 100 بايت هي: 18.8% و 14.5% و 8% على الترتيب مقارنة بعدم الضغط، و 11.7% و 7.6% و 5% على الترتيب مقارنة بالضغط بالسياق (0). يعود ذلك إلى أنه بزيادة حجم حمولة التطبيق تتناقص نسبة حجم الترويسات إلى حجم الرزمة الإجمالي، مما يخفف من تأثير ضغط الترويسات.

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

- يحقق النموذج المقترح تحسناً في النفاذية المفيدة، والتأخير من نهاية إلى نهاية، واستهلاك الطاقة الوسطي تختلف قيمته باختلاف قيمة حمولة التطبيق.
- يساعد النموذج المقترح على تأخير تقسيم الرزم حتى القيمة 84 بايت لحمولة التطبيق؛ لذا يتحسن الأداء بالنسبة للنفاذية المفيدة، والتأخير من نهاية إلى نهاية، واستهلاك الطاقة الوسطي بشكل كبير في المجال (54-83) بايت مقارنة بعدم الضغط، وفي المجال (69-83) بايت مقارنة بالضغط بالسياق (0).
- يسبب تقسيم الرزم انخفاضاً حاداً في الأداء.
- يساعد ضغط الترويسة في تقليص مدة عمل المرسل-المستقبل الراديوي بنسبة تتعلق بنسبة الضغط، هذا الأثر له دور كبير في تقليل استهلاك الطاقة الوسطي وتخفيض التأخير من نهاية إلى نهاية وزيادة النفاذية المفيدة.
- ينخفض تأثير ضغط الترويسة بزيادة حجم بيانات التطبيق.
- يتيح النموذج المقترح إمكانية العمل وفق عدد أكبر من السياقات وينمط عديم الحالة، مما يلغي مشاكل توزيع السياقات وإدارتها في الشبكة.
- يتطلب النموذج حجم ذاكرة أكبر يزداد بزيادة عدد السياقات الافتراضية، لذا يجب مراعاة هذه النقطة عند استخدام تطبيقات تشغل حجماً كبيراً في الذاكرة.

التوصيات:

- استخدام النموذج المقترح دون السياقات الأصلية، وبيئات افتراضية محددة مسبقاً، في النظم محدودة الموارد كنظم المراقبة البيئية. هذا يلغي تبادل السياقات في الشبكة، ويخفف استهلاك مواردها.
- استخدام النموذج المقترح بالسياقات الـ 16 الأصلية وبيئات افتراضية داخلية ديناميكية يديرها الموجه الحدودي، وبيئات افتراضية خارجية محددة مسبقاً، في النظم ذات عدد المستخدمين الكبير والموارد الجيدة كنظم مراقبة الأبنية. هذا يزيد عدد العناوين المشمولة بالسياقات.
- تطوير نموذج لتخفيف أثر تقسيم الرزم عند التراسل مع المستخدمين الافتراضيين.

المراجع:

- [1] SHELBY, Z.; BORMANN, C. *6LoWPAN: The Wireless Embedded Internet*. John Wiley & Sons Ltd., U.K, 2009, 1-69.
- [2] KUSHALNAGAR, N.; MONTENEGRO, G.; SCHUMACHER, C. *IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPANs): Overview, Assumptions, Problem Statement and Goals*. RFC 4919, IETF, 2007, 12.
- [3] MONTENEGRO, G.; KUSHALNAGAR, N.; HUI, J.; CULLER, D. *Transmission of IPv6 Packets over IEEE 802.15.4 Networks*. RFC 4944, IETF, 2007, 30.
- [4] HUI, J.; THUBERT, P. *Compression Format for IPv6 Datagrams over IEEE 802.15.4-Based Networks*. RFC 6282, IETF, 2011, 24.
- [5] DEERING, S.; HINDEN, R. *Internet Protocol Version 6 (IPv6) Specification*. RFC 2460, IETF, 1998, 1-5.
- [6] DEERING, S.; HINDEN, R. *IP Version 6 Addressing Architecture*. RFC 4291, IETF, 2006, 25.

- [7] DUNKELS, A.; GRNOVAL, B. ; VOIGT, T. *Contiki – a Lightweight and Flexible Operating System for Tiny Networked Sensors*. In The 29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks U.S.A, 2004, 455-462.
- [8] OSTERLIND, F.; DUNKELS, A.; ERIKSSON, J.; FINNE, N.; VOIGT, T. *Cross-Level Simulation With COOJA*. In Proceedings of the 31st IEEE Conference on Local Computer Networks U.S.A, 2006, 641-648.
- [9] LIM, R.; FERRARI, F.; ZIMMERLING, M.; WALSER, C.; SOMMER, P.; BEUTEL, J. *FlockLab: A Testbed for Distributed, Synchronized Tracing and Profiling of Wireless Embedded Systems*. In Proceedings of the 12th International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN) U.S.A, 2013, 153-166.
- [10] IEEE Std 802.15.4™. *Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)*. IEEE Computer Society, 2011, 1-8.
- [11] SHELBY, Z. et al. *Neighbor Discovery Optimization for IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPANs)*. RFC 6775, IETF, 2012, 55.
- [12] KIM, E. ; KASPAR, D. ; VASSEUR, J. *Design and Application Spaces for IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPANs)*. RFC 6568, IETF, 2012, 28.
- [13] MOTEIV CORPORATION. *Tmote Sky Datasheet*, 2006, 16 Sept. 2014. <<http://www.moteiv.com/products/docs/tmote-sky-datasheet.pdf>>
- [14] DUNKELS, A. *The ContikiMAC Radio Duty Cycling Protocol*. Technical Report T2011:13, Swedish Institute of Computer Science, Dec. 2011, 11.