

## تحليل أداء بروتوكولات MAC الخاصة بشبكات الحساسات اللاسلكية

الدكتور رضوان دندة\*

الدكتور قاسم قبلان\*\*

مضر وينس\*\*\*

(تاريخ الإيداع 21 / 4 / 2013. قُبِلَ للنشر في 1 / 9 / 2013)

### ▽ ملخص ▽

عند تصميم بروتوكولات Medium Access Control (MAC) للشبكات التقليدية يؤخذ بعين الاعتبار تأمين انتاجية عالية وتأخير منخفض، لكنّ تركيبة عقد شبكات الحساسات البسيطة (قدرة المعالجة والذاكرات ومحدودية مصدر الطاقة) فرضت إيجاد حلول تعتمد على البساطة لتخفيض استهلاك الطاقة على حساب الأداء، بحيث توائم بروتوكولات MAC الخاصة بشبكات الحساسات اللاسلكية بين الأداء والتوفير في استهلاك الطاقة لضمان عمل الشبكة لفترات طويلة. تم اقتراح العديد من بروتوكولات MAC لشبكات الحساسات اللاسلكية يدير كل منها عمل القسم الراديوي في العقدة بشكل مختلف، بحيث يؤمن اتصالية الشبكة والاستخدام الأمثل للطاقة.

بشكل عام توجد أربعة أصناف لبروتوكولات MAC بحسب طريقة ولوجها للوسط اللاسلكي. قمنا في هذا البحث باستعراض آلية عمل كل من البروتوكولات S-MAC و T-MAC و B-MAC و L-MAC و Crankshaft والتي تشمل الأصناف الأربعة. وقمنا بتحليل أداء كل منها ببناء نموذج الشبكة، واختبار كل من هذه البروتوكولات ومقارنة النتائج. هدف هذه الاختبارات معرفة كيف تتفاعل كل من هذه البروتوكولات مع ظروف شبكة الحساسات النموذجية وتلازمها مع استهلاك الطاقة لتحديد البروتوكول الأمثل لكل تطبيق.

تم إجراء هذا البحث في جامعة تشرين في الفترة الواقعة بين 2012/10/25 و 2013/1/7.

**الكلمات المفتاحية:** شبكات الحساسات اللاسلكية، بروتوكولات MAC، المحاكاة.

\* أستاذ - قسم النظم والشبكات الحاسوبية- كلية الهندسة المعلوماتية- جامعة تشرين - اللاذقية- سورية.

\*\* مدرس - قسم النظم والشبكات الحاسوبية- كلية الهندسة المعلوماتية- جامعة تشرين - اللاذقية- سورية.

\*\*\* طالب دراسات عليا (دكتوراه) - قسم النظم والشبكات الحاسوبية- كلية الهندسة المعلوماتية- جامعة تشرين - اللاذقية- سورية.

## Performance Analysis of MAC Protocols for Wireless Sensor Networks

Dr.Radwan Dandeh\*  
Dr.Kassem Kabalan\*\*  
Muddar Wainis\*\*\*

(Received 21 / 4 / 2013. Accepted 1 / 9 / 2013)

### ▽ ABSTRACT ▽

Designing MAC protocol for traditional network considered high throughput and low latency, but the hardware simplicity of a WSN node (processor, memory, and power source) forced solutions depend on simplicity to reduce power consumption at the cost of performance, so they balance between power consumption and performance to make the network working as long as possible. Many MAC protocols were proposed each one of them manage the radio in a different way to maintain the network connectivity with the optimum power consumption.

Generally there are four classes of MAC protocols due to how the node organizes the access to the shared radio channel. In this paper, we study the protocols (S-MAC, T-MAC, B-MAC, L-MAC, and Crankshaft) which cover the four classes, analyzes their performances and compare the results. The purposes of this experiment are to know how these protocols interact with a typical network conditions and how energy consumed to determine the optimal protocol for each application.

**Keywords:** WSN, MAC Protocols, Simulation

---

\* Professor, Department of Computer Systems and Networks, Faculty of Information Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria.

\*\* Assistant Professor, Department of Computer Systems and Networks, Faculty of Information Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria.

\*\*\* Postgraduate Student, Department of Computer Systems and Networks, Faculty of Information Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria

**مقدمة:**

تتألف شبكات الحساسات اللاسلكية من عدد كبير من الحساسات التي يتم نشرها في بيئة ما بهدف مراقبة حالة فيزيائية أو كيميائية دون الحاجة لوجود البشر. وقد أصبحت تطبيقاتها واسعة الانتشار ما أنتج تحديات علمية كبيرة أبرزها إطالة عمر الشبكة. تهتم معظم الأبحاث في شبكات الحساسات اللاسلكية في تطوير أنظمة يمكنها العمل لوحدها لعدة سنوات ما يتطلب البحث عن حلول فعالة لتوفير الطاقة على مستوى العتاد والبرمجيات. وبما أن الراديو هو الجزء الرئيس من عقدة الحساس الذي يستهلك معظم الطاقة، فإنه يتوجب عند تصميم بروتوكولات MAC (المسؤولة بشكل أساس عن إدارة عمل الراديو) المفاضلة بين الأداء والتوفير في استهلاك الطاقة بحيث يلزم أحياناً تخفيض أدائه مقابل الحصول على توفير أكبر في الطاقة. لكن ولحسن الحظ فإن معظم تطبيقات شبكات الحساسات اللاسلكية لا تتطلب عرض حزمة كبير، ويمكننا التغاضي عن بعض التأخير في إيصال البيانات، إضافةً لذلك فإن محدودية موارد عقد الشبكة (قدرة المعالجة-الذاكرات- الطاقة) تفرض علينا اللجوء إلى حلول تتطلب معالجة بسيطة وحجم ذاكرة منخفض وأقل قدر ممكن من استهلاك الطاقة. تشكل هذه العوامل مجتمعة القيود المفروضة على تصميم بروتوكولات MAC.

**أهمية البحث وأهدافه:**

على الرغم من التحديات الكبيرة والقيود المفروضة على تصميم بروتوكولات MAC الخاصة بشبكات الحساسات اللاسلكية، فقد تم تطوير عدد كبير منها بحيث يفاضل كل منها بين الأداء وتوفير الطاقة بشكل مختلف. لاختيار البروتوكول المناسب لتطبيق معين كان لا بد من تحليل أداء كل بروتوكول منها ومقارنته مع باقي البروتوكولات. فمن هذا البحث بتحليل أداء مجموعة من البروتوكولات تشمل التقنيات المعروفة المستخدمة للولوج للقناة اللاسلكية وتم تحليل النتائج وتمثيلها بيانياً.

**طرائق البحث ومواده:**

تم إجراء هذا البحث باستخدام بيئة المحاكاة Objective Modular Network Test-bed in C++ (OMNeT++) [1] إضافةً إلى البنية MiXiM [2] التي تحتوي نموذجاً للبروتوكولين B-MAC و L-MAC، والبنية Castalia [3] التي تحوي نموذجاً للبروتوكولين S-MAC و T-MAC و نموذج البروتوكول Crankshaft من البنية MAC framework [4].

**4- بروتوكولات MAC في شبكات الحساسات اللاسلكية:**

إن اختيار البروتوكول لشبكة حساسات لاسلكية معينة يعتمد على عدة عوامل مثل: نوع الحساس المستخدم وفعالية البروتوكول للطاقة والمدة المتوقعة للتطبيق، وكم البيانات المتوقع إرسالها وحجم الذاكرة التي يتطلبها البروتوكول. يمكن تصنيف بروتوكولات MAC تبعاً لآلية تنظيم الولوج للقناة الراديوية إلى أربعة أنواع [5]:

1- العشوائي Random: لا تقوم العقد بتنظيم الولوج للقناة اللاسلكية زمنياً إنما تتم المنافسة على القناة الراديوية. تقوم البروتوكولات من هذا النوع بتوسيع ترويسة البروتوكول MAC عند المرسل (مثلاً استخدام

الاستهلاك (Preamble) هذا الأمر يزيد من استهلاك الطاقة عند المرسل، لكن يسمح بتقليص فترة التنصت في حالة اللاعمل، إذ تسمح للعقد بفحص القناة الراديوية بشكل دوري وتكون خاملة معظم الوقت الباقي.

2- **الحيز الزمني Slotted**: الفكرة الرئيسية منها هي توفير الطاقة بتأمين التوافق بين العقد وفق نموذج من التنشيط والخمول sleep/active أي السماح للعقد بالتحكم بعمل الراديو بشكل قسري وفق دور منخفض. يتم تقسيم الزمن إلى أحياز Slots تتم مزامنتها مع مرجع معين بحيث يمكنها التنشط عند بداية كل حيز وتتبادل الرسائل عند وجودها، ومن ثم العودة إلى حالة الخمول لباقي الحيز الزمني. يتم اللوج إلى القناة الراديوية بالاعتماد على التنافس كما في البروتوكولات العشوائية، لكن تكون احتمالية التصادم أكبر بكثير كون جميع الاتصالات يتم تجميعها في الجزء الصغير الفعال من الحيز. لذلك يصبح حل مسألة التنافس ذا أهمية كبيرة وفي بعض البروتوكولات يتم ذلك عن طريق استخدام إشارات تقادي التصادم (Request To Send (RTS)/ Clear To Send (CTS) handshaking) بالرغم مما تسببه من زيادة كبيرة نسبياً في ترويسة البروتوكول. تتميز البروتوكولات التي تستخدم الأحياز عن بعضها في تحديد متى تنتقل من الطور الفعال إلى طور الخمول.

3- **الإطار Frame**: تجمع الأحياز في البروتوكولات من هذا النوع في إطارات، ويحدد من سيقوم بالإرسال في كل حيز. من أهم ميزات البروتوكولات التي تستخدم هذه الطريقة أنها تقادي التصادمات ويمكنها تخفيض التنصت والإصغاء في حالة اللاعمل بشكل كبير. يقوم البروتوكول بجدولة روابط الاتصالات، أي تحديد زوج (المرسل-المستقبل) في كل حيز، وهكذا لا يلزم للعقدة سوى التنصت على الأحياز التي تكون معنية فيها وتتخلص بشكل كامل من مشكلة الاستماع، أو يقوم البروتوكول بجدولة العقد المرسله فقط فيتوجب على العقد أن تنصت لكل الأحياز التي تشغلها، ويمكن تقادي التصادمات بإطفاء القسم الراديوي بعد استقبال ترويسة البروتوكول واكتشاف عدم عاندية البيانات لها. في كلا النوعين (جدولة روابط الاتصالات وجدولة العقد المرسله) ينحصر التنصت في حالة اللاعمل فقط عند فحص الحيز إن كان مستخدماً أم لا.

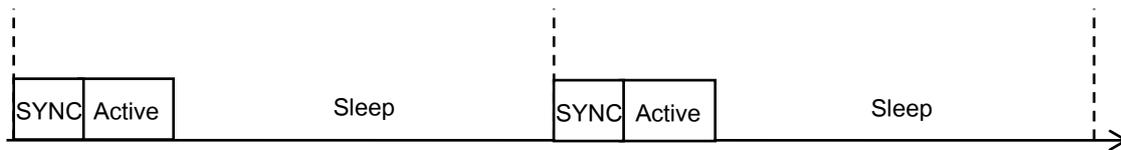
4- **الهجين Hybrid**: يمكن اعتبار البروتوكولات التي تعتمد على الأحياز حلاً وسطياً بين الوصول العشوائي والوصول الذي يعتمد الإطارات. فهي تفرض بعض البنى من حيث تحديد متى يمكن للعقد أن تتواصل، ويكون لديها مرونة من حيث التكيف مع تغير تدفق البيانات وتغير توزيع العقد. من أبرز مساوئ "بروتوكولات الأحياز الزمنية" أن جميع الاتصالات يتم تجميعها في بداية الحيز ما يزيد فرص حدوث تصادمات. مما يجعل مجال استخدام بروتوكولات الأحياز الزمنية مقتصر على التطبيقات ذات تدفق البيانات المنخفض. وللاستفادة من ميزات كلا النوعين تم مزج تقنية الوصول العشوائي والوصول المعتمد على الأحياز فيما يسمى بالنوع الهجين، وبما أن البروتوكولات من هذا النوع تستخدم تقنية الوصول العشوائي فقد اكتسبت مرونة في التعامل مع تغير تدفق البيانات وتغير كثافة العقد في الشبكة، واستخدامها لتقنية الوصول المعتمد على الأحياز ساهم في تخفيض التصادمات، لكنها أصبحت محدودة بالتطبيقات ذات تدفق البيانات المنخفض.

سنقوم في هذا البحث بدراسة ومقارنة فعالية الطاقة للبروتوكولات (S-MAC, T-MAC, B-MAC, ) وهي تشمل التصنيفات الأربعة المذكورة أعلاه.

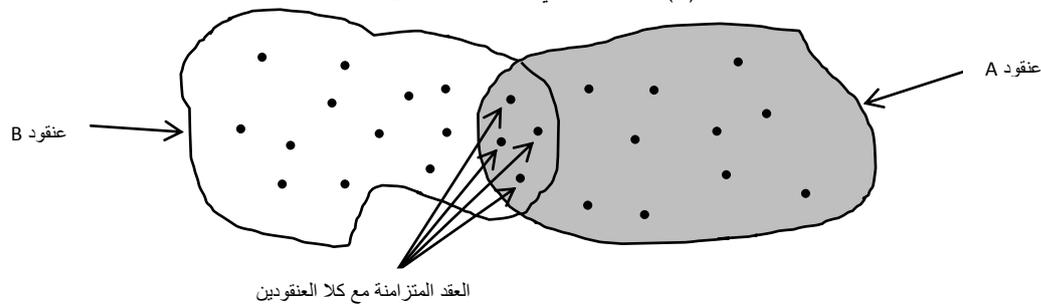
#### 1-4 البروتوكول (S-MAC) Sensor MAC :

يستخدم S-MAC دورة عمل ثابتة يكون خلال 10% منها في الحالة الفعالة ويتم فيها تبادل المعلومات مع العقد المجاورة وخلال 90% من دورة عمله يكون في حالة خمول (يتم إطفاء المستقبلات اللاسلكية) كما يظهر

الشكل (1). يؤدي ذلك لتحسين عمر العقد بمقدار 10 مرات [6]. المشكلة الرئيسية في هذا النوع من البروتوكولات هي تأمين التزامن بين العقد لذلك تقوم العقد بإرسال رزم مزامنة تتضمن معلومات عن التوقيت في بداية الحيز الزمني، عند نشر الحساسات تنصت العقد لرسالة المزامنة، إذا لم تتلق العقد إشارة مزامنة قبل زمن محدد تقرر أنها الأولى في تشكيل العنقود الافتراضي، وتقوم بإرسال رسالة مزامنة بحيث يمكن لباقي العقد التزامن معها. تقوم العقد المجاورة التي تتلقى هذه الرسالة بمزامنة جدولها مع العقدة المرسله، ويتم إرسال رسائل المزامنة بشكل دوري لتصحيح انزياح التوقيت والمحافظة على دورة الخمول للعناقيد الافتراضية. إذا تلقت عقدة رسالتي مزامنة تقوم بالتكيف مع كلا الدوريتين (تشكل العقد ما يشبه الجسر) للمحافظة على اتصالية الشبكة كما هو مبين في الشكل (2)، ويتم استخدام إشارات RTS/CTS لتفادي التصادمات. تتضمن رزم التحكم RTS/CTS معلومات عن طول رزمة البيانات ما يسمح للعقد التي تستمع لهذه الرسائل (العقد غير المعنية بالبيانات) بإطفاء مستقبلاتها اللاسلكية (حتى رزمة المصادقة ACK) كما هو الحال في شعاع حيز الشبكة (NAV) المعتمد في IEEE802.11. من أهم ميزات آلية تفادي الاستماع في S-MAC أن استهلاك الطاقة ينخفض عندما تزداد كمية البيانات المرسله في الشبكة، لأنه في الشبكة الخالية من البيانات تضيع العقدة كامل الفترة الفعالة فيها على التنصت في حالة اللاعمل بينما التنصت على سيل البيانات العائدة لعقد أخرى يسمح لها أن تطفئ مستقبلاتها اللاسلكية.



الشكل (1) بنية الحيز في S-MAC و دورة عمله



الشكل (2) عنقودان افتراضيان والعقد التي تتزامن مع كليهما لتشكيل جسر

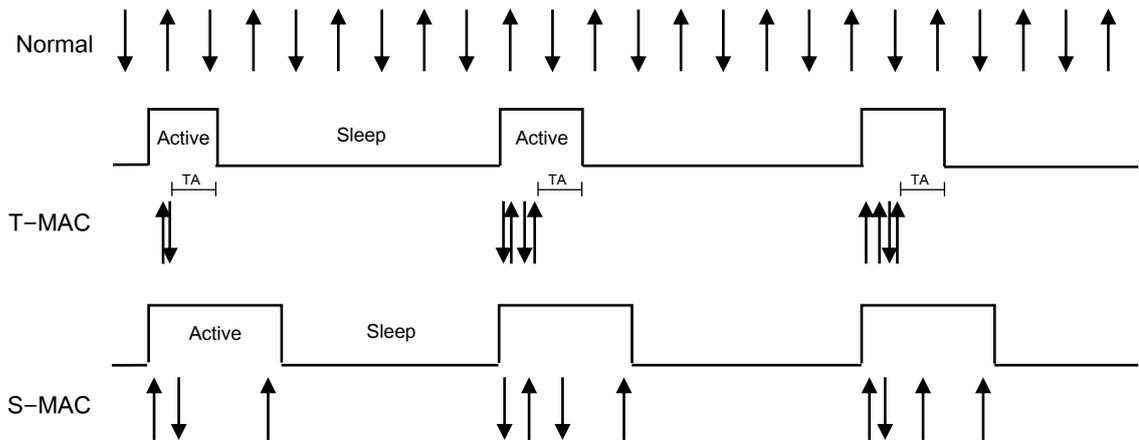
#### 2-4 البروتوكول (T-MAC) Timeout-MAC:

إن استخدام البروتوكول S-MAC لدورة عمل ثابتة له سيئتان، الأولى: على مطور التطبيقات أن يحدد دورة العمل المثالية قبل تطبيقه، والثانية: لا يمكن التعامل مع تغير تدفق البيانات إلا من خلال التحميل الزائد، أي جعل دورة العمل تتناسب الحمل الأعظم في أية لحظة وفي أي مكان من الشبكة. هذا يعني أن S-MAC يبذل الكثير من الطاقة. لتحسين هذا الأمر قام Van Dam et al [7] بتطوير البروتوكول (T-MAC) وذلك بجعل الفترة الفعالة من دورة عمل البروتوكول متكيفة مع حجم البيانات، وهذا واضح من خلال الشكل (3). تقوم العقد بالتنصت لمدة قصيرة (300 ميلي ثانية بالنسبة للبروتوكول S-MAC و 15 ميلي ثانية بالنسبة للبروتوكول T-MAC) في بداية الحيز

الزمني، ثم تعود لحالة الخمول عند عدم وجود اتصالات خاصة بها. في حال تلقت العقدة بيانات تخص عقد أخرى فإنها ستجدول فترة تنصت ثانية بعد انتهاء تمرير تلك البيانات وتقرر إن كانت ستنقل إلى حالة الخمول أم لا. تبقى العقد في الحالة الفعالة لحين مضي (TA) adaptive timeout دون وجود بيانات. بحسب [7] تحدد TA بحسب الزمن الأعظم الذي يجب أن تنتظره "عقدة مختفية" hidden node قبل سماع بداية رسالة الاستجابة CTS كما يلي:

$$TA = 1.5 \times (C + R + T)$$

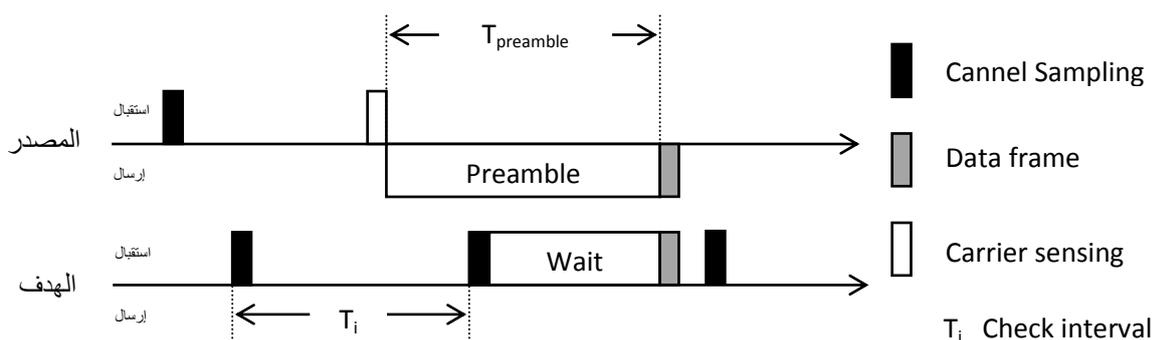
حيث C طول فترة التنازع، و R زمن إرسال رزمة RTS، و T الزمن بين نهاية رزمة RTS وبداية رزمة CTS. لقد بينت عملية النمذجة أن T-MAC قادر على التكيف مع تغير تدفق البيانات وأنه يتفوق على S-MAC من ناحية استهلاك الطاقة بحوالي خمسة أضعاف [7].



الشكل (3) مقارنة دورة عمل البروتوكول T-MAC مع S-MAC

### 3-4 البروتوكول B-MAC:

قامت جامعة بيركلي بتطوير البروتوكول (B-MAC) وسمي كذلك نسبةً إليها Berkeley Media Access Control. وهو أحد البروتوكولات التي تعتمد على (CSMA) Carrier Sense Multiple Access مع آلية الاستهلال preamble [8]. إذ يستخدم تقنية التنصت منخفض القدرة (LPL) low-power listening لتوفير استهلاك الطاقة. تقوم العقد التي تستخدم تقنية LPL بالتنشط خلال دور ثابت وتقوم بفحص القناة اللاسلكية للبحث عن بايتات استهلال صالحة من عقد أخرى. إذ تقوم العقد التي لديها بيانات لإرسالها بإرسال استهلال أطول من دور فحص القناة اللاسلكية للمستقبل، وذلك للتأكد من أن كل العقد المجاورة ستمكن من اكتشاف الاستهلال واستقبال البيانات.



الشكل (4) العملية الأساسية للبروتوكول B-MAC

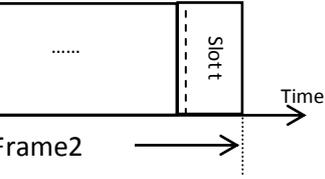
يتم تحديد دور فحص القناة بحسب عدد العقد ومعدل النقل في الشبكة، في [9] بين Polastre et al أنه في ظروف مثالية يمكن أن يكون للبروتوكول B-MAC دورة عمل 1% في الشبكات ذات سيل البيانات المنخفض، يشرح الشكل (4) العملية الأساسية للبروتوكول B-MAC.

#### 4-4 البروتوكول L-MAC:

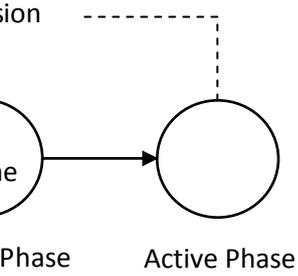
قدم Van Hoesel et al في [10] البروتوكول (L-MAC) Lightweight Medium Access Protocol

بوصفه بروتوكولاً فعالاً تجاه الطاقة لشبكات الحساسات اللاسلكية. تقوم الشبكة التي تستخدم البروتوكول L-MAC بتنظيم نفسها عن طريق تخصيص أحياز زمنية ومزامنتها. حيث يستخدم البروتوكول (TDMA) الذي يخصص كل حيز زمني لحساس محدد و بهذه الطريقة يمكن للعقد أن تتخاطب بشكل يخلو من التصادمات "بعد أن تستقر الشبكة". وقد قام Van Hoesel et al بإثبات أن استخدام البروتوكول L-MAC يؤدي إلى تحسين كبير في عمر الشبكة.

وكما في بروتوكولات MAC التي تعتمد على الجدولة، ينظم الزمن في L-MAC على شكل أحياز زمنية time slots ويتم تجميع هذه الأحياز بشكل إطارات، لاحظ الشكل (5). تقوم العقدة المتحركة في كل حيز زمني وبشكل دائم بإرسال رسالة تحكم ذات طول ثابت 12 بايتاً [10] وذلك للمحافظة على التزامن، بالإضافة لذلك تتضمن رسائل التحكم معرف العقدة ID للحيز الزمني وحجم البيانات، والمستقبل المقصود. بشكل عام تكون رسائل التحكم حرجة بالنسبة لإرسال المعلومات فيما يخص الحيز الزمني الذي تشغله. لهذا السبب فإن العقد التي تتضمن لاحقاً يمكنها اختيار الأحياز الشاغرة فقط. ويترك القسم الباقي من الحيز الزمني للبيانات الاختيارية إن كان لها حاجة. ويبلغ الحجم الأعظم للبيانات 254 بايتاً حسب [10]. يمكن للعقد خلال كل إطار إرسال بياناتها فقط في الحيز الزمني المخصص لها، وفي باقي الوقت يمكنها استقبال الرسائل فقط، وبهذه الطريقة يكون استهلاك الطاقة بحدده الأصغر.



الشكل (5) يبين بنية الإطارات في البروتوكول L-MAC



الشكل (6) يبين مخطط عمل البروتوكول L-MAC

في بداية طور التهيئة للشبكة تكون كل العقد غير متزامنة، ولكي يحصل تزامن تبدأ عقدة أو أكثر (تسمى الرئيسية) بالمبادرة للبدء في التحكم بالإطار الزمني وتصبح العقدة الرئيسية. يتم استقبال رسائل التحكم من قبل جيرانها التاليين لها مباشرةً (one-hop). وحالما تحصل تلك العقد على حيزها الزمني تبدأ بإرسال رسائل التحكم إلى جيرانها التاليين. تصبح الشبكة مستقرة حالما تحصل وتحجز جميع العقد على حيز زمني خاص بها. عندها يمكن لهذه العقد أن تتواصل مع بعضها بشكل خالٍ من التصادمات، يشرح الشكل (6) عمل L-MAC في أطواره الأربعة:

1- طور التهيئة: عند وصل العقدة بالطاقة تكون غير متزامنة في هذا الطور وتحاول العقدة اكتشاف جيرانها، فإذا اكتشفت عقدة مجاورة واحدة على الأقل تقوم بالتزامن معها وتنتقل إلى وضع الانتظار.

2- طور الانتظار: تم وضع هذا الطور للتخفيف من الحالات التي تقوم العقد باختيار نفس الوحدة الزمنية التي تساعد في التقليل من احتمال التصادم. في هذا الطور تنتظر العقد عدداً عشوائياً  $k$  من الإطارات حيث  $k$  هو عدد صحيح من 0 إلى  $r$  و  $r$  عدد مرات (back off time) التراجع الأعظم. بعد انتظار  $k$  إطار تنتقل العقد إلى طور الاكتشاف.

3- طور الاكتشاف: قبل أن تبدأ العقدة باختيار الحيز الزمني تقوم بتسجيل كل الأحياز الزمنية المتوفرة لتختار من بينها فقط. يحدث هذا في طور الاكتشاف، إذ تقوم العقد بمعالجة معلومات الأحياز الشاغرة بالاعتماد على رسائل التحكم. بعد ذلك تقوم باختيار حيز واحد من الأحياز الزمنية المتوفرة بشكل عشوائي وتنتقل إلى الطور الفعال. تبقى العقد بمقدار إطار زمني واحد في هذا الطور.

4- الطور الفعال: بعد أن تقوم العقد باختيار الحيز الزمني في طور الاكتشاف، تبدأ بإرسال واستقبال الرسائل من العقد المجاورة. إذا حدث وقامت عقدتان أو أكثر بالإرسال في نفس الوقت يحدث تصادم. تكتشف العقد المجاورة هذا التصادم وتقوم بإرسال رسائل تحكم تطلب منهم التخلي عن أحيازهم الزمنية والعودة إلى طور الانتظار.

## 4-5 البروتوكول Crankshaft:

المبدأ الأساس للبروتوكول Crankshaft هو انتقال العقد إلى الحالة الفعالة (التنشيط) لاستقبال الرسائل فقط في وقت محدد وثابت من بداية الإطار الزمني. وذلك يشبه عامود المرفق (Crankshaft) في محرك الاحتراق الداخلي حيث يكون التوقيت الذي يتحرك فيه المكبس محدداً وثابتاً من لحظة بدء دوران عامود المرفق، ومن هنا جاء أصل التسمية. بهذه الطريقة يتيح هذا البروتوكول للعقد المختلفة التنشيط للاستقبال في مواقيت مختلفة من لحظة بدء الإطار ما يعني أن التنصت يكون في حدوده الدنيا وينشر الاتصالات بين مختلف العقد المستقبلية [11].

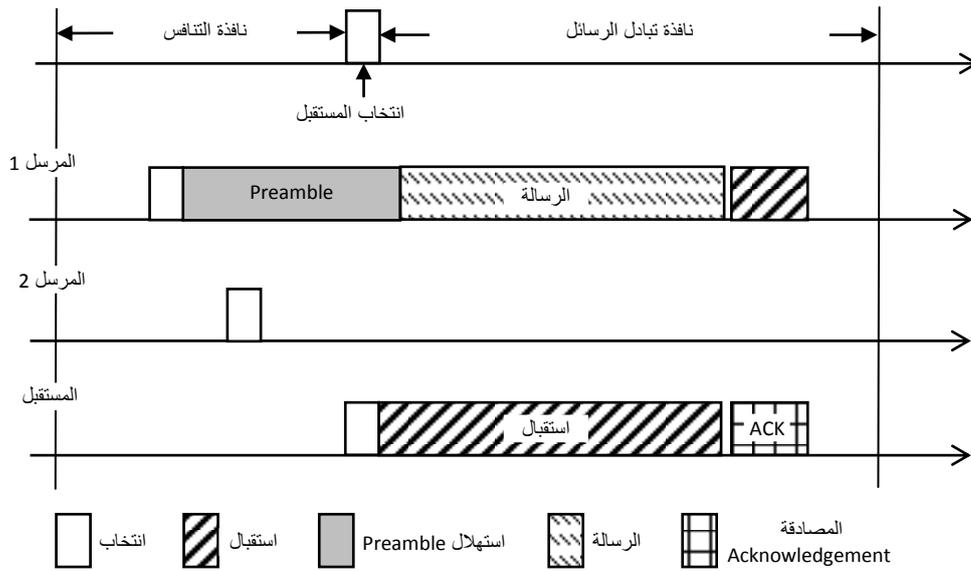
يقسم البروتوكول Crankshaft الزمن إلى إطارات ويقسم كل إطار إلى أحياء زمنية. يوجد نوعان من الأحياء الزمنية في هذا البروتوكول: أحياء زمنية للإرسال المتعدد، وأحياء زمنية للإرسال الأحادي. خلال الحيز الزمني للإرسال المتعدد تنتشط جميع العقد للتنصت على الرسالة القادمة. وتتنافس كل العقد التي لديها رسالة إرسال متعدد مع بعضها لترسل تلك الرسالة. يبدأ الإطار بكل الأحياء الزمنية للإرسال الأحادي متبوعاً بالأحياء الزمنية للإرسال المتعدد.

أيضا تنتصت كل عقدة لحيز زمني واحد (الإرسال الأحادي) في كل إطار. خلال ذلك الحيز يمكن للعقد المجاورة إرسال رسالة لها وتسمح لها بالفوز بالتنافس. يتم تحديد الحيز الزمني الذي تنتشط فيه العقدة من قبل عنوان MAC للعقدة. لذلك فإن العقد التي تريد إرسال رسالة تعلم بدقة في أي حيز سينتشط الهدف. يستخدم الـ Crankshaft إشارات Data/Ack للرسائل أحادية الإرسال، ويكون الحيز الزمني طويلاً بما يكفي لفترة التنافس وطول البيانات الأعظم والمصادقة. إذا لم يحصل المرسل على المصادقة، يقوم البروتوكول بإعادة المحاولة ثلاث مرات في الإطارات التالية. ولتقليل التنافس عند إعادة الإرسال تقوم العقدة فقط بإعادة المحاولة في الإطار التالي باحتمالية 70%. والإستتظار حتى إطار آخر.

يؤخذ تدبير احتياطي للمحطة الرئيسية أو للعقد النهائية التي تقوم بالتنصت على كل الأحياء للإرسال الأحادي. سبب ذلك أن العقد النهائية هي هدف لمعظم الرسائل في الشبكة لذلك تتطلب عرض حزمة أكبر للاستقبال. بالإضافة لذلك فإن العقد النهائية تكون موصولة إلى مصدر طاقة أكبر مما يتيح لها صرف مقدار طاقة أكبر دون الخوف من استنفاد طاقتها، كما أنها تستخدم عنواناً خاصاً بها لتمكين باقي العقد من تحديد إن كانت العقدة المجاورة هي عقدة نهائية.

يستخدم البروتوكول Crankshaft آلية بسيطة لإسناد الأحياء الزمنية وذلك لتوفير الطاقة التي ستستهلك خلال عملية المعالجة. باعتبار أن كل إطار له  $n$  حيز إرسال أحادي يتم حجز الأحياء بحساب باقي قسمة عنوان الـ MAC على  $n$ . لكن استخدام هذه الطريقة قد يؤدي لإسناد نفس الحيز لعقدتين متجاورتين. لذلك ولتمكين هاتين العقدتين من تبادل المعلومات يسمح للعقد بالتصرف كمرسل خلال حيز الاستقبال الخاص بها. تعود العقدة التي تتصرف كمرسل خلال حيز الاستقبال الخاص بها "إلى نمط الاستقبال إن خسرت التنافس.

إن استخدام الإطارات يتطلب أن تكون العقد متزامنة. ويتم تأمين التزامن من خلال عقدة مرجعية (مثلاً المحطة الرئيسية أو العقدة النهائية)، أو من خلال خوارزمية توزيع مثل Global Schedule Algorithm (GSA) [12]. يمكن استخدام هذا التزامن لتحقيق زيادة في توفير الطاقة. تنتشط العقد لفترة قصيرة من الزمن بعد إزاحة ثابتة من بدء الإطار ولا يلزمها البقاء في حالة التنشيط طيلة فترة الحيز كما هو مبين في الشكل (7).



الشكل (7) تبادل الرسائل في البروتوكول Crankshaft

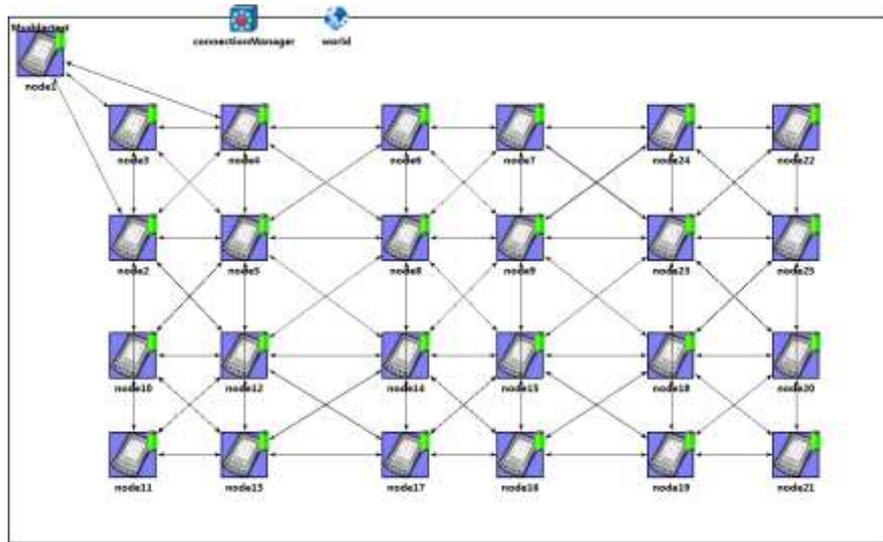
تستخدم الفترة بين لحظة بدء الإطار ولحظة تشغيل العقدة المستقبلية للراديو لحل مسألة التنافس، وتختار العقدة (التي تريد أن ترسل رسالة في حيز محدد) لحظة خلال نافذة التنافس، تنتصت العقدة المرسله لفترة قصيرة من الزمن قبل ( لحظة الاختيار) لاكتشاف وجود عقد أخرى تنافسها على نفس الحيز الزمني. إذا لم تكتشف وجود عقد أخرى في حالة الإرسال تقوم العقدة المرسله بالبدء بإرسال استهلال لإعلام باقي العقد أنها تريد الإرسال. وبعد أن يتم إعلام العقدة المستقبلية تقوم العقدة المرسله ببث رمز بدء الرسالة وتتبعه بالبيانات. نلاحظ أنه خلال نافذة التنافس تنتشط العقد المتنافسة لكن العقدة التي تفوز بالتنافس هي الوحيدة التي تبقى في الحالة الفعالة ذلك يعني توفيراً كبيراً في الطاقة خلال حل مسألة التنافس.

### النتائج والمناقشة:

تم استخدام بيئة المحاكاة OMNet++ وهو محاكي شبكات مفتوح المصدر متوفر بشكل مجاني للعمل الأكاديمي وتم إضافة نماذج البروتوكولات S-MAC و T-MAC و B-MAC و L-MAC و Crankshaft من البنى المذكورة في الفقرة 3، و قمنا بتقييم أداء هذه البروتوكولات من خلال ثلاثة بارامترات:

1. استهلاك الطاقة: وهو عبارة عن الطاقة المستهلكة لتوصيل عدد معين من الرزم من المصدر إلى الهدف.
2. التأخير: الذي يلزم لتسليم البيانات من طرف إلى طرف آخر.
3. معدل تسليم الرزم: وهو معدل الرزم التي تصل بنجاح بالنسبة لعدد الرزم الكلي.

قمنا بإجراء عدة اختبارات بهدف تقييم أداء كل من البروتوكولات آنفة الذكر لناحية استهلاك الطاقة من أجل حركة بيانات معينة ومعدل تسليم البيانات والتأخير الحاصل في الشبكة. تم وضع سيناريو يحاكي تطبيق عملي لشبكة حساسات لاسلكية [13]، حيث العقد موزعة بشكل منتظم في الحقل المراقب والمحطة الرئيسية موجودة في إحدى زوايا الحقل كما في الشكل (8):



الشكل (8) نموذج الشبكة المختبر

وباستخدام البارامترات في الجدول (1) تم تنفيذ المحاكاة للشبكة باستخدام معدل إرسال بيانات (50-75-100-150-175-200-250) بت/ثانية، لكل بروتوكول من البروتوكولات T-MAC و B-MAC و L-MAC و Crankshaft مع زمن محاكاة 500 ثانية في كل مرة، وقمنا بإعادة المحاكاة 10 مرات ( الحالة الابتدائية في كل مرة عشوائية)، وبعد تجميع النتائج وأخذ محصلتها تم تمثيلها بيانياً بالأشكال (9 - 10 - 11).

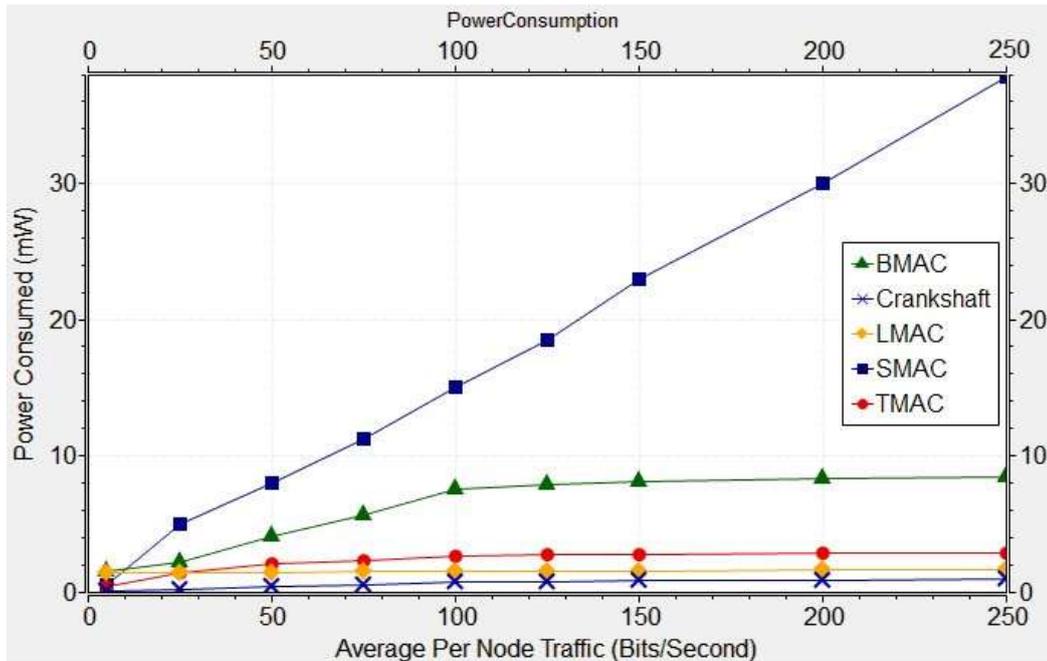
الجدول (1) المحددات المستخدمة في النمذجة

Frequency	2.4 GHz	Battery capacity	1000 mAh		
Tx Current	17 mA	Battery voltage	3 V		
Rx Current	16.4 mA	Sleep Current	0.02 mA		
T-MAC	Frame length	610 ms	Poll length	0.3 ms	
	Contention window	9.15 ms	Maximum data length	64 bytes	
	Packet header	8 bytes	Sift nodes parameter	512	
	Maximum data length	250 bytes	Packet header	11 bytes	
	Activity timeout	15 ms	Unicast slots	8	
L-MAC	Maximum data length	64 bytes	Broadcast slots	8	
	Slots per frame	20	B-MAC	Check Interval	0.3 Sec
	Packet header	24 bytes		Slot Duration	1 Sec
	Slot Number	8	S-MAC	Active period	20 ms
	Queue Length	50		sleep period	180 ms

### 1-5 استهلاك الطاقة:

استهلاك الطاقة لكل من البروتوكولات المختبرة بالنسبة لتغير معدل تدفق البيانات مبين في الشكل (9) حيث نلاحظ أن Crankshaft فعال جداً تجاه الطاقة كما بينت المحاكاة أن استهلاك الطاقة فيه منخفض بالنسبة لباقي البروتوكولات المختبرة وهو لا يتجاوز 1 ميلي واط عند 250 بت/ثانية. بالنسبة للبروتوكول L-MAC فإن معدل استهلاك الطاقة بالنسبة لتغير تدفق البيانات يبقى ثابتاً تقريباً وهو بحدود 1.5 ميلي واط، وذلك لأنه في البروتوكول

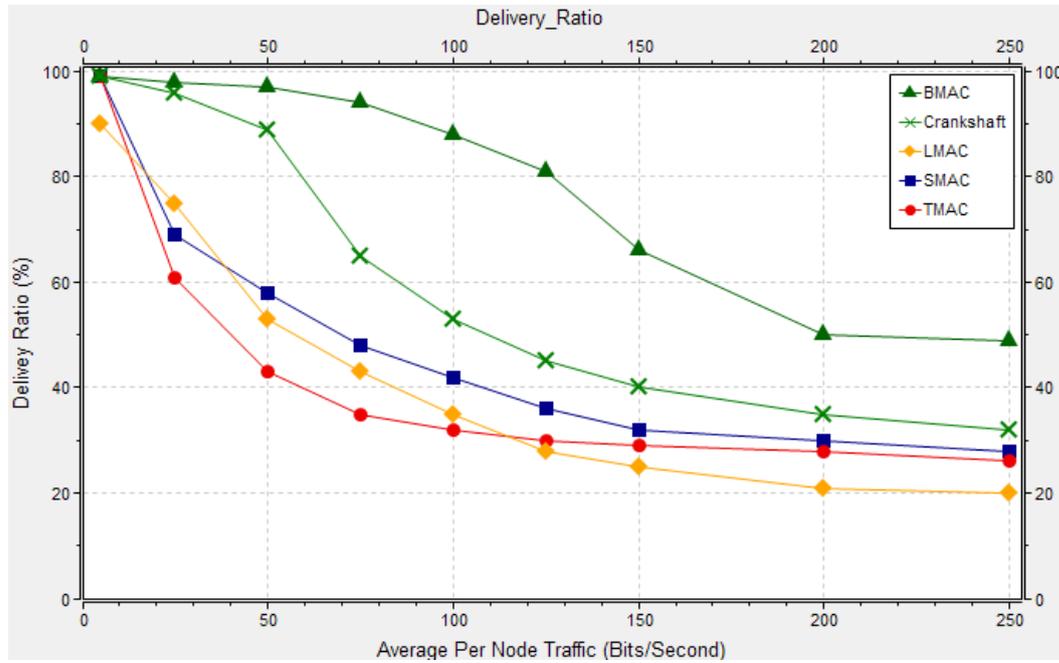
L-MAC تقوم العقد دائماً بإرسال رزم تحكم حتى لو لم توجد بيانات لإرسالها لذلك فهي تستهلك نفس مقدار الطاقة حتى عند عدم وجود بيانات، الزيادة البسيطة في استهلاك الطاقة سببه عدد الرسائل الإضافية التي عليه نقلها إلى جيرانه. بالنسبة للبروتوكول T-MAC يزيد استهلاك الطاقة مع زيادة تدفق البيانات في الشبكة فقد بينت المحاكاة ارتفاع في استهلاك الطاقة بمقدار 0.75 ميلي واط عند تغير تدفق البيانات من 50 إلى 250 بت/ثانية، وسبب ذلك أن البروتوكول T-MAC يقوم بتعديل TA لتناسب تدفق البيانات، لكن مع زيادة الـ TA يزداد استهلاك الطاقة. في B-MAC يزداد أيضاً استهلاك الطاقة بمعدل كبير عند تدفق البيانات المنخفض، إذ يزداد الاستهلاك من 4.1 ميلي واط عند 50 بت/الثانية إلى 7.5 ميلي واط عند 100 بت/الثانية، ليعود ويصبح ازدياد استهلاك الطاقة معتدلاً (يصبح 8.4 ميلي واط عند 250 بت/الثانية). نلاحظ أيضاً أن استهلاك الطاقة في B-MAC أكبر من باقي البروتوكولات (ماعدا S-MAC) وذلك بسبب الترابط الكبير بين العقد الذي يؤدي إلى حدوث تسميع بين العقد عند كل عملية نقل للبيانات. وبالنسبة للبروتوكول S-MAC نلاحظ الاستهلاك الهائل للطاقة بالنسبة لباقي البروتوكولات الذي يزداد بشكل طردي مع ازدياد معدل تدفق البيانات حيث بينت المحاكاة زيادة استهلاك الطاقة بحدود 4 أضعاف ضمن المجال المدروس.



الشكل (9) استهلاك الطاقة بالنسبة لتدفق البيانات

### 2-5 معدل تسليم البيانات:

معدل تسليم البيانات بالنسبة لتغير تدفق البيانات في الشبكة لكل من البروتوكولات المختبرة مبين في الشكل (10) حيث نلاحظ أن البروتوكول B-MAC يملك أعلى معدل لتسليم البيانات (97%) وخاصة عندما يكون تدفق البيانات منخفضاً وينخفض هذا المعدل إلى 50% مع زيادة تدفق البيانات.



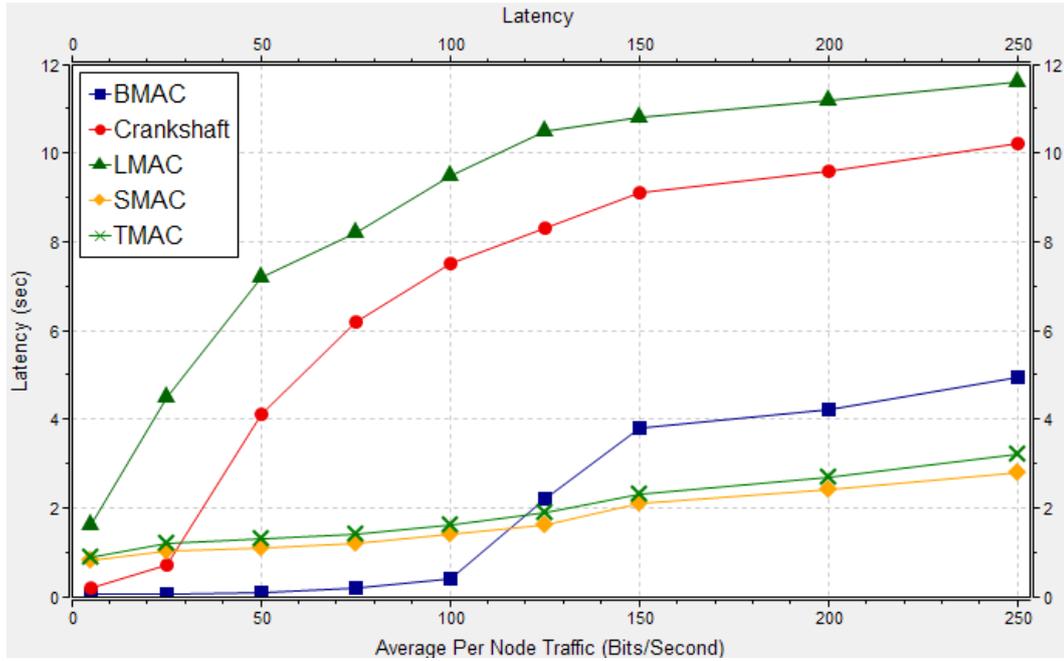
الشكل (10) معدل تسليم البيانات بالنسبة لتدفق البيانات

كذلك الأمر بالنسبة للبروتوكول Crankshaft لكن ينخفض معدل التسليم من 89% عند تدفق بيانات 50 بت/ثانية ليصل إلى 32% عند 250 بت/ثانية. بالنسبة للبروتوكول L-MAC نلاحظ أن معدل التسليم يكون 53% عند تدفق بيانات 50 بت/ثانية، وسبب هذا المعدل المنخفض أن البروتوكول L-MAC يحتاج لتخصيص أحياز زمنية خالية من التنازع لكل العقد في الشبكة (في شبكتنا المختبرة لدينا 20 حيز) وبالتالي يكون عرض الحزمة لكل عقدة منخفض جداً، وعند معدل إرسال مرتفع يصبح L-MAC البروتوكول ذو أسوأ معدل تسليم حيث ينخفض معدل التسليم إلى 20%. في البروتوكولين S-MAC و T-MAC فإن تبادل المعلومات يتم في الفترة الفعالة فقط ويتم الدخول بشكل قسري في حالة الخمول مما يمنع البروتوكولين من الاستجابة لزيادة معدل الإرسال وينتج معدل تسليم منخفض.

### 3-5 التأخير:

يبين الشكل (11) التأخير بالنسبة لتدفق البيانات إذ نلاحظ أن B-MAC له أخفض معدل تأخير (0.1 ثانية) عندما يكون تدفق البيانات منخفضاً وذلك لأن ليس على العقدة الانتظار لدورة إطار لترسل بياناتها بل يمكنها إرسال بياناتها في أي لحظة. أما عند زيادة معدل تدفق البيانات في الشبكة، يحدث تأخير أكبر (يصل إلى 4.9 ثانية) كونه يجب على البيانات الانتظار لإتمام إرسال البيانات السابقة لها. في Crankshaft يزداد التأخير بشكل كبير (من 4.1

إلى 10.2 ثانية) مع زيادة التدفق وذلك كون العقد التي تخسر التنازع أو لا تستقبل إشارة ACK عليها الانتظار لدورة إطار كاملة لتعيد المحاولة. يعاني البروتوكول L-MAC من أعلى نسبة تأخير تصل إلى 11.6 ثانية، وذلك بسبب الأحمال الزمنية المتعددة ضمن الإطار والتي تلزم كل عقدة بتبادل المعلومات ضمن حيزها الزمني فقط.



الشكل (11) التأخير بالنسبة لتدفق البيانات

بيدي البروتوكولان T-MAC و S-MAC تأخير أقل من باقي البروتوكولات (حوالي 3 ثانية) ولا سيما عند معدل الرسائل المرتفع لكن وبالعودة إلى مخطط معدل تسليم البيانات المبين في الشكل (10) نلاحظ أن معدل التسليم منخفض جداً عند تدفق البيانات المرتفع أي أن التأخير المنخفض الذي يبديه كلا البروتوكولين في الشكل (11) هو للبيانات التي يستطيع البروتوكول تسليمها والتي لا تتعدى 30% من البيانات المرسلة.

### الاستنتاجات والتوصيات:

قمنا في هذا البحث بتحليل آلية عمل خمسة بروتوكولات MAC وهي تغطي الأنواع الأربعة حسب آلية تنظيم الولوج للقناة الراديوية، وبعد اختبار شبكة افتراضية مؤلفة من مجموعة عقد تستخدم في كل مرة إحدى هذه البروتوكولات ضمن بيئة المحاكات OMNet++، تم تحليل النتائج وتمثيلها بيانياً وبعد المناقشة أظهرنا مكان الضعف والقوة لكل بروتوكول بحيث يمكن اختيار البروتوكول الأنسب بحسب التطبيق المستخدم بعد المفاضلة بين أهمية المحددات التي تم اختبارها (استهلاك الطاقة-معدل التسليم-التأخير). يمكن متابعة البحث بإجراء اختبارات أمان على هذه البروتوكولات لاكتشاف مكان الضعف فيها والعمل على إيجاد آليات لتحسين أدائها.

## المراجع:

- 1- VARGA, A. ,*The OMNeT++ discrete event simulation system. In: Proc. of the European Simulation Multiconference (ESM'2001)*. Prague, Czech Republic (2001), 7 .
- 2-FORSTER, A. ,*Implementation of the B-MAC Protocol for WSN in MiXiM*. Networking Laboratory, University of Applied Sciences of Southern SwitzerlandK 2009, 2 .
- 3- CASTALIA, 28/7/2013. <<http://castalia.npc.nicta.com.au/>>
- 4- THE  $\lambda$ -MAC FRAMEWORK, 28/7/2013.< <http://www.st.ewi.tudelft.nl/~koen/software.html> >
- 5- LANGENDOEN, K. ,*Medium access control in wireless sensor networks*. Preprint of a book chapter in "Medium Access Control in Wireless Networks, Volume II: Practice and Standards", Nova Science Publishers in 2008, 22 .
- 6- YE, W. ; HEIDEMANN, J. ; ESTRIN, D. *Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks*. IEEE/ACM Trans. Netw., vol. 12, no. 3, pp. 493–506, Jun. 2004.
- 7- VAN DAM, T. ; LANGENDOEN, K. An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks. 1st ACM Int. Conf. Embedded Netw. Sensor Syst., Nov. 2003, pp. 171–180.
- 8- SINGH, H. ; BISWAS, B. *Comparison of CSMA based MAC protocols of wireless sensor networks*. International Journal of AdHoc Network Systems, Vol2, N2, 2012, Pages 10.
- 9-POLASTRE, J. ;HILL J. ;CULLER D. *Versatile low power media access for wireless sensor networks*. in Proc. 2nd ACM Int. Conf. Embedded Netw. Sensor Syst., 2004, pp. 95–107.
- 10- L.F.W. van Hoesel and P.J.M. Havinga. *A lightweight medium access protocol (lmac) for wireless sensor networks: Reducing preamble transmissions and tranceiver state switches*. In 1st International Workshop on Networked Sensing Systems (INSS 2004), pages 205–208. Society of Instrument and Control Engineers(SICE), 2004.
- 11- HALKES, G. ;LANGENDOEN, K. *Crankshaft: An Energy-Efficient MAC-Protocol for Dense Wireless Sensor Networks*. EWSN 2007.LNCS vol 4373 pp.228-244. Springer, Heidelberg, 2007. 17 .
- 12- LI, Y.; Ye, W.; HEIDEMANN, J. *Energy and latency control in low duty cycle MAC protocols*. In: Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf, New Orleans, LA, USA 2005. 7 .
- 13- LANGENDOEN, K.; BAGGIO, A.; VISSER, O. *Murphy loves potatoes: Experiences from a pilot sensor network deployment in precision agriculture*. In Proc. of the 14th Int. Workshop on Parallel and Distributed Real-Time Systems (WPDRTS), Rhodes, Greece, 2006, 8 pages.
- 14- CHAARI, L.; KAMOUN, L. *Wireless sensors networks MAC protocols analysis*. Journal of Telecommunications, Vol. 2, ISSUE 1, APRIL 2010, 7 .
- 15- SINGH, S.; PHULERIYA, K.; LADDHANI, L. *Study and Analysis of MAC Protocols Design Approach for Wireless Sensor Networks*. International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering, Vol. 2, Issue 4, April 2012, 5 .
- 16- JOSHI, S.; JAISWAL, A.; TYAGI, P. *A Novel Analysis of T Mac and S Mac Protocol for Wireless Sensor Networks Using Castalia*. International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE), Vol.2, Issue-6, January 2013, 128-131.