نمذجة و محاكاة شبكة إيثرنت صناعيّة تستخدم برتوكول MODBUS TCP/IP

طالب الدكتوراه: رضوان صبحي المحمد كلية الهمك – جامعة البعث

اشراف الدكتور: مسعود الأتاسي

الملخص:

تعتمد العديد من المعامل في وقتنا الحاضر على شبكات إيثرنت الصناعيّة و التي تتكون من عدة عقد تتبادل البيانات فيما بينها بشكل موثوق.

يُعتبر برتوكول MODBUS TCP/IP هو أحد أشهر أنواع هذه الشبكات الصناعيّة حيث لاقى هذا البرتوكول انتشاراً واسعاً نظراً لأدائه العالي في أتمتة العمليات الصناعيّة.

إنّ دراسة أداء الشبكات الصناعية و تحسين جودة الخدمة يعد هدفاً أساسياً، لذا تمّ من خلال هذا البحث نمذجة شبكة صناعيّة تستخدم برتوكول MODBUS TCP/IP باستخدام محاكي الشبكات OPNET و تمت دراسة العديد من بارامترات الأداء مثل (زمن التأخير للشبكة، عدد الأطر المستقبلة بالزمن، و الانتاجية للوصلات).

قدّم هذا البحث تحليل لأداء الشبكة الصناعيّة عبر تغيير أحجام الأطر و كذلك زيادة عدد الوصلات بين العقد، و تمّ تحسين جودة الخدمة للشبكة الصناعيّة المدروسة عبر تغيير طوبولوجيا الشبكة و تطبيق بروتوكول HSRP و تحقيق موازنة الحمولة في الشبكة.

الكلمات المفتاحية: برتوكول MODBUS TCP/IP ، تحليل أداء الشبكات الصناعية، العوامل المؤثرة في أداء الشبكات، تحليل الأداء باستخدام OPNET.

Modeling and Simulation of Industrial Ethernet Network Using MODBUS TCP/IP Protocol

Abstract:

Many factories today rely on industrial Ethernet networks, which consist of several nodes that exchange data with each other reliably. MODBUS TCP/IP protocol is one of the most popular types of these industrial networks, and this protocol has gained wide popularity due to its high performance in automating industrial processes.

Studying the performance of industrial networks and improving quality of service is a main goal, so in this paper an industrial network was modeled using MODBUS TCP/IP protocol using the OPNET network simulator and many performance parameters were studied such as (network delay time, number of frames received in time, and throughput of connections).

Through this paper, we were able to analyze the performance of the industrial network by changing the frame sizes as well as increasing the number of connections between nodes, and the quality of service for the studied industrial network was improved by changing the network topology, implementing the HSRP protocol and achieving load balancing in the network.

Key words: MODBUS TCP/IP protocol, industrial network performance, performance analysis using OPNET.

1- المقدمة:

يُعتبر برتوكول MODBUS TCP/IP بروتوكول اتصال صناعي يعمل على طبقة التطبيق حيث يتم وضعه في المستوى السابع من نموذج (OSI)، يوفر اتصال ذو النمط (Client/Server) بين الأجهزة المتصلة بالشبكة الصناعيّة، و بدأ العمل به منذ عام 1979 حيث مكّن ملايين أجهزة الأتمتة الصناعيّة بتبادل البيانات فيما بينها، و يمكن الوصول إلى MODBUS عبر الانترنيت من خلال منفذ محجوز برقم (502).[1]

يندرج برتوكول MODBUS TCP/IP تحت ما يعرف بشبكات إيثرنت الصناعية حيث يستخدم المعيار Ethernet/IEEE 802.3 و الذي ينتمي إلى عائلة الشبكات المحلية (LAN) و التي تدعم سرعات نقل بيانات تصل إلى (1 Gbps) بمختلف أنواع وسائط النقل المعروفة سواء المحورية أو المجدولة أو الضوئية و التي تؤمن عملية الاتصال الفيزيائي بين مختلف أنواع العقد المكوّنة للشبكات الصناعيّة مثل (PLCs, Hubs, Switches and Routers)، و يدعم المعيار تقنية الوصول المتعدد مع كشف التصادم (CSMA/CD) أثناء تبادل رزم البيانات.[2]

تدعم بيئة OPNET نمذجة و محاكاة مختلف أنواع الشبكات و لا سيما شبكات إيثرنت حيث توجد فيها مختلف أنواع الأجهزة و الوصلات المستخدمة في بناء شبكات إيثرنت و كذلك يدعم OPNET عملية بناء العقد الغير موجودة أو تعديل عقد موجودة مما يتيح إضافة التفاصيل و المكونات المرغوبة في نمذجة أي نوع من أنواع الشبكات بما فيها الصناعيّة.[3]

تم اختيار شبكة صناعيّة تعمل على برتوكول MODBUS TCP/IP و تمت محاكاتها باستخدام برنامج OPNET مما أتاح دراسة و تحليل العديد من بارامترات الأداء بشكل مكّن من فهم سلوك الشبكة و إجراء عمليات التحسين لرفع أداءها.

2- مشكلة البحث:

- ❖ صعوبة إجراء عمليات التنبؤ و الاختبار على شبكة صناعيّة واقعيّة.
- ❖ الصعوبة في توسعة و تطوير الشبكة دون التأثير على الأداء العام لها.

- ❖ عدم القدرة على تحديد أهم العوامل المؤثرة في أداء الشبكات الصناعيّة أثناء عملها.
- ❖ مشكلة مادية كبيرة عند عدم تلبية الشبكة لمتطلبات العمل في الأداء المطلوب.

3- هدف البحث:

إنّ الهدف الرئيسي هو بناء نموذج يحاكي سلوك شبكة إيثرنت صناعيّة تعمل على برتوكول MODBUS TCP/IP آخذين بعين الاعتبار جميع الخصائص التي يدعمها و من ثم إجراء عمليات التحليل و الاختبار بهدف:

- ✓ تحديد أهم العوامل المؤثرة في بارامترات الأداء.
- ✓ المقارنة بين بارامترات الأداء عند كل سيناريو اختباري لتحديد القيم الأفضل.
- ✓ إجراء عمليات التطوير على النموذج قبل تنفيذها على الشبكة الواقعية.
- ✓ دراسة التكلفة المادية و متطلبات التوسعة للشبكة من خلال النموذج المُصمّم.
- ✓ القدرة على التنبّؤ بسلوك الشبكة المستقبلي عند إضافة معدات جديدة على الشبكة.
- ✓ القدرة على تحسين جودة الخدمة في الشبكة الصناعية المدروسة.

4- الدراسات المرجعيّة:

اهتمّ العديد من الباحثين حول العالم بمجال نمذجة شبكات إيثرنت الصناعيّة و تحليل أدائها و بالأخص التي تستخدم برتوكول MODBUS TCP/IP نظراً لانتشاره الواسع و سنذكر بعض الأبحاث التي تمّ الوقوف عندها و النظر في نتائجها:

- اقترح الباحثان Yao Yuanyuan, Chen Meng خوارزمية محسّنة لطول إطار الاتصال التكيفي استناداً على بروتوكول Modbus TCP لتعديل طول الإطار بهدف تحديد حجم الإطار الأفضل للإرسال وفقاً لمتوسط معدل خطأ الإطار في الفترة الزمنيّة، و تمّ استخدام طريقة "تقليل سريع ، زيادة بطيئة" لضبط طول إطار البيانات عند مستويات مختلفة من FER (Frame Error Rate) معدل خطأ الإطار، لا تعمل هذه

الخوارزمية على تحسين معدل الإرسال فحسب بل أيضاً على تحسين استقرار الاتصال و بتالي الأداء.[4]

– الورقة البحثيّة [5] درست العديد من المعايير لتقييم أداء أجهزة الشبكات من نوع Modbus TCP، وتتضمّن: 1) وقت الاستجابة لطلبات Modbus، 2) الحد الأقصى لعدد الطلبات التي يمكن التعامل معها بنجاح بواسطة أجهزة Modbus في فترة زمنيّة مُحدّدة، و3) مراقبة أجهزة Modbus عند تعرضها لهجوم رفض مُوزّع للخدمة (Distributed Denial of Service)، و تمّ استخدام دارتين الكترونيتين ذات تكلفة منخفضة و هي (ESP8266 و Raspberry Pi / OpenPLC) لتقييم أداء برتوكول Modbus.

– الهدف من المقال [6] هو تقييم أداء شبكة صناعية وآليات تنفيذ دورة الرسائل حيث قدّم نموذجاً يستند على شبكة بتري الملونة لإجرائيات الإرسال و تنفيذ دورة الرسائل (MAC)(Medium Access Control) لطبقة ربط المعطيات للبرتوكولات Fieldbus، وأكدت النتائج على الحاجة لتحديد بارامتر زمن التشغيل وهو معكوس معدل الإرسال (transmission rate) بشكل مناسب من أجل ضمان الأداء الأمثل لشبكة Fieldbus.

– قام الباحثان Beata Krupanek and Ryszard Bogacz بإجراء بحث [7] باستخدام المحاكي OPNET لدراسة أداء الأنظمة اللاسلكية متعددة العقد، وتمَ من خلال هذا البحث نمذجة شبكة صناعية مؤلفة من عدة عقد لاسلكية باستخدام برنامج OPNET و دراسة جودة الخدمة و الأداء للشبكة من حيث تلبيتها لمُحدّدات الزمن الحقيقي و دراسة التأخيرات في عملية نقل البيانات.

– في الدراسة المرجعيّة [8] قدّم الباحثون تحليلاً لأداء بروتوكول الاتصال ModbusTCP باستخدام محاكي الشبكات (NS–3)، و يُركّز البحث على تقييم الأداء من خلال زمن الاستجابة مرتبطاً بعدد العقد والطوبولوجيا، و أظهرت النتائج أن طول الحزمة ليس له تأثيراً كبيراً على وقت الاستجابة في كلا النوعي للطوبولوجيا (الناقل و النجمي) و بتالي ليس له أثراً كبيراً على الأداء.

– في البحث [9] ناقش الباحثون أداة لتحليل وقت الاستجابة والجدولة لاتصالات برتوكول Modbus عبر ناقل RS–485، حيث يتم جمع أزمنة استجابة الرسائل بواسطة جهاز Modbus مُتخصّص ثم إرسالها إلى البرنامج حيث يتم التحليل، ثم يتم ارسال تطبيق Modbus عبر شبكة RS–485 بشكل يتناسب مع الأداء.

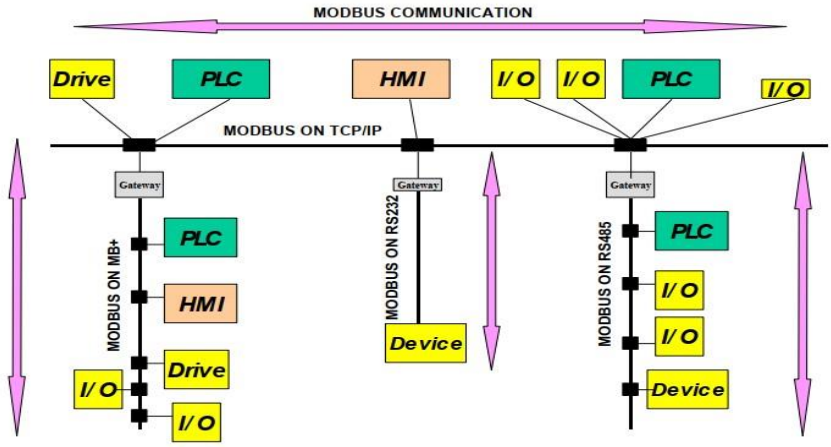
– قدم الباحثون Jia Hao, Jiechang Wu, Chaoyou Guo بحثاً [10] تمّ من خلاله نمذجة و تحليل أداء برتوكول CAN الصناعي باستخدام OPNET ، حيث تم بالبداية نمذجة الناقل بشكل هرمي انطلاقاً من نموذج الشبكة و من ثم نموذج العقدة و من ثم نموذج العمليّة مع الأخذ بعين الاعتبار كلاً من وظائف معالجة الأخطاء و تحسس حالة القناة و أولويّة العقد لتفادي التصادم، و بعد الانتهاء من بناء النموذج تمّ دراسة بعض العوامل المؤثرة في الأداء مثل أولوية العقدة و حجم الإطار و الأزمنة الفاصلة بين عمليات الإرسال.

– تمّ في البحث [11] دراسة بعض العوامل المؤثرة في تصميم الشبكات الصناعية Fieldbus من خلال المحاكاة باستخدام برنامج Opnet و أثر هذه العوامل عل أداء الشبكات، و تم اختيار ثلاث عوامل وهي معدل الإرسال (إما 2.5Mbps أو 1.5Mbps) و طبولوجيا الشبكة (إما حلقي أو نجمي) و نوع مجمّع الشبكة المركزي (إما hub أو switch) مما يقود إلى اختبار ثمانية سيناريوهات (2^3) في المحاكي OPNET، و تم في كل سيناريو تشغيلي حساب مجموع عدد الرزم المرسلة بالمقارنة مع عدد الرزم المستقبلة و تقسيم المجموعين للحصول على نسب تعكس أداء كل حالة اختبار.

– قام الباحث قتيبة علي بنشر مقال [12] لدراسة و تحليل أداء شبكات إثرنيت الصناعية باستخدام برنامج المحاكاة أوبنيت ، ففي البداية تمّ التأكد من قابلية برنامج OPNET في نمذجة الشبكات الصناعيّة من خلال مقارنة نتائج تجارب شبكة عمليّة مع نتائج المحاكاة و من ثمّ تم دراسة تأثير عدد من العوامل على الأداء مثل طول الحزمة و عدد العقد و معدل إنتاجية العقد و حمل FTP مُوجه لعقدة محددة، وأظهرت النتائج أنه يمكن استخدام برنامج OPNET بكفاءة لمحاكاة الشبكات الصناعيّة.

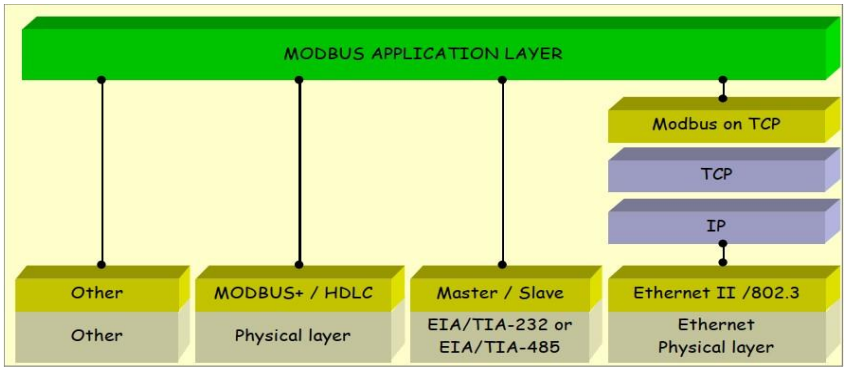
5- برتوكول MODBUS TCP/IP:

يعتمد بروتوكول MODBUS TCP/IP على نموذج (CLIENT / SERVER) لتبادل رسائل المعلومات في الزمن الحقيقي بين مختلف أنواع الأجهزة الموجودة في الشبكة الصناعية سواء كانت أجهزة (CLIENT) و (SERVER) الطرفية أو أجهزة الاتصال البيني مثل (Bridge, Router , Gateway) و التي تؤمن اتصال الشبكة مع الشبكات و النواقل الفرعية الأخرى، و يُظهر الشكل (1) هيكلية شبكة صناعية تستخدم برتوكول MODBUS TCP/IP.[1]



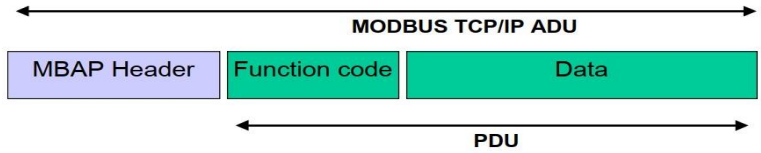
الشكل (1) : هيكليّة شبكة صناعية لبرتوكول MODBUS TCP/IP .

يتكون برتوكول MODBUS TCP/IP من أربعة طبقات رئيسية و يوضح الشكل (2) هذه الطبقات بالمقارنة مع أنواع برتوكول MODBUS الأخرى ذات الناقل التسلسلي.[1]



الشكل (2) : طبقات MOBDUS حسب وسط الارسال.

إن الإطار العام لبرتوكول MODBUS TCP/IP يتكون من ثلاثة أقسام رئيسية كما هو موضح بالشكل (3).[13]



الشكل (3) : الإطار العام لبروتوكول MODBUS TCP/IP.

يبلغ طول الإطار الكلي (260 Byte) حيث يتم تقسيمها كالتالي:

- **حقل البيانات (Data):** أقصى حجم هو (252 Byte) يمكن أن تكون هذه البيانات رسالة الطلب من الجهاز العميل للجاهز الخادم حسب نوع الوظيفة المحدد في حقل "Function" أو قد تكون الاستجابة من الجهاز الخادم إلى الجهاز العميل.
- **حقل الوظيفة (Function Code):** بطول (1 Byte) و يشير إلى رمز الوظيفة للجهاز الخادم أي نوع الإجراء الذي يجب القيام به حيث يتم ترميزها برقمين ستة عشريين يُحجز لكل رقم أربع بتات.
- **الترويسة (MBAP):** بطول(7 Byte) و تتكون بدورها من أربعة حقول و هي:

a) معرف الإجرائية (Transaction Identifier): بطول (2 Byte) يتم استخدامه لعملية الاقتران بين العميل و الخادم ، حيث يقوم خادم MODBUS بنسخ معرف الإجرائية في الاستجابة.

b) معرف البروتوكول (Protocol Identifier): بطول (2 Byte) يتم استخدامه لتعدد الإرسال داخل النظام، أي نظام يحتوي العديد من بروتوكولات الاتصال، حيث يتم تحديد بروتوكول MODBUS بالقيمة (0).

c) حقل الطول(Length): بطول (2 Byte) و هو عدد البايتات للحقول التالية، بما في ذلك مُعرّف الوحدة وحقول البيانات.

d) معرف الوحدة (Unit Identifier): بطول (1 Byte) و يُستخدم هذا الحقل لغرض التوجيه داخل النظام، و يتم استخدامه عادةً للاتصال بين شبكة Ethernet TCP-IP و ناقل MODBUS التسلسلي، و يتم تعيين هذا الحقل بواسطة MODBUS Client في الطلب ويجب إعادته بنفس القيمة في استجابة الخادم.

6- محاكي الشبكات OPNET:

إنّ OPNET عبارة عن أداة من شركة MIL3 طوّرها الطالب Alain Cohen في عام 1986 وهو اختصار لـOptimized Network Engineering Tools أي أدوات هندسة الشبكات المُحسّنة، وهو أحد أشهر المحاكيات الشبكيّة وأكثرها شعبية بسبب استخدامه الكبير والواسع في مجالي الصناعة والأبحاث الشبكية، وهو نظام هندسي قادر على محاكاة شبكات الاتصال الضخمة مع نمذجة تفصيليّة للبروتوكولات والتطبيقات والأجهزة وتحليل الأداء، و تمّ استخدام نسخة OPNET الأكاديمية ذات الاصدار (14.5) في بحثنا.**[3]**

أهم خصائص برنامج OPNET:

a) دورة النمذجة والمحاكاة: إنّ OPNET يُوفر أداة فعالة لمساعدة المستخدم في تحقيق المراحل الثلاث الأولى من طور التصميم وهي: بناء نموذج، تنفيذ المحاكاة، تحليل الخرج.

b) النمذجة الهرمية: إنّ OPNET يوظف بنية هرميّة مكونة من ثلاث مستويات من أجل النمذجة وكل مستوى من الهرميّة يصف مفاهيم مختلفة من النموذج الكامل الذي يتم مُحاكاته، و هي (مستوى الشبكة و مستوى العقدة و مستوى العمليّة).

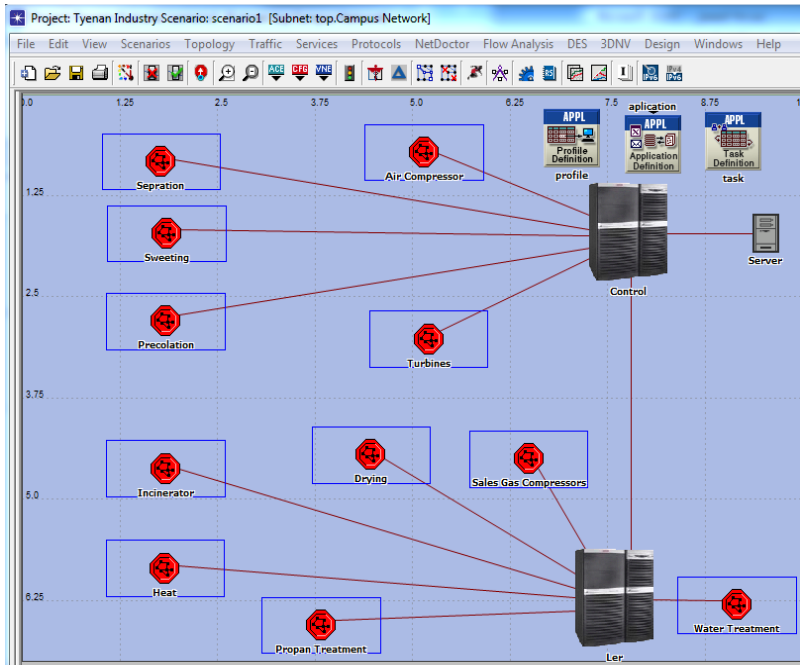
c) تُخصص لشبكات الاتصال: OPNET يملك مكتبات مُفصّلة تقدم دعم كبير لبروتوكولات الاتصال ويتيح للباحثين تعديل النماذج الموجودة أو تطوير نماذج جديدة خاصة بهم.

d) توليد المحاكاة بشكل أوتوماتيكي: إنّ نموذج OPNET يترجَم إلى شيفرة مصدريّة قابلة للتنفيذ وهذه الشيفرة الخاصة بمحاكاة الأحداث المُتقطّعة، يتم تنفيذها ببساطة والحصول على نتائج الخرج.

7- نموذج الشبكة الصناعية المدروسة باستخدام OPNET:

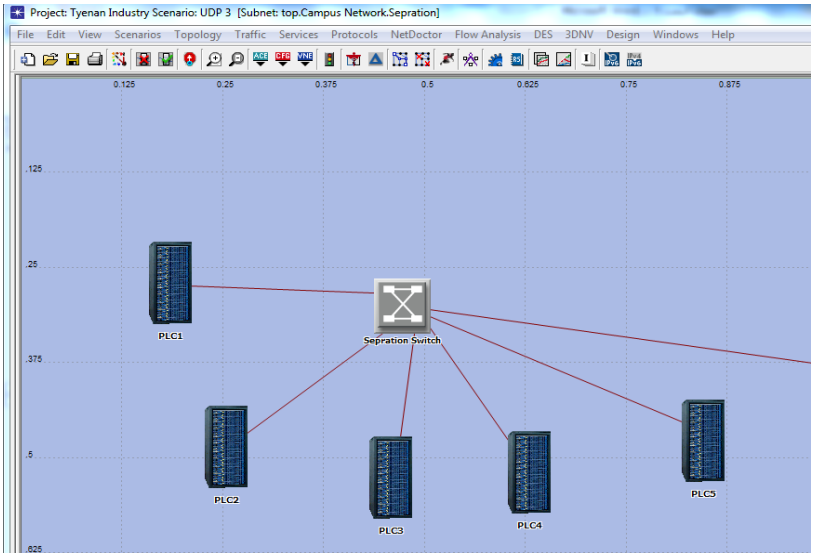
تتألف من 11 وحدة متوزعة كما في الشكل (4) تتصل هذه الوحدات مع المخدم الرئيسي "Server" إما مباشرة عن طريق غرفة التحكم "Control" أو بشكل غير مباشر عن طريق غرفة المعدات المحلية "LER" حيث تحتوي كل وحدة عدد معين من العقد "PLCs"، ويدير عملية تبادل البيانات بين عقد الشبكة برتوكول MODBUS TCP/IP.

إنّ هذه الشبكة الصناعية ترجع للشبكة الصناعية المُطبقة في معمل غاز شمال المنطقة الوسطى (تويناان)، علماً أنّ الدراسة المُقدمة تصلح لأي نوع من أنواع الشبكات الصناعية.



الشكل (4): نموذج الشبكة الصناعية المدروسة باستخدام المحاكي OPNET.

يُظهر الشكل (5) مكونات إحدى الوحدات الفرعية للشبكة و هي وحدة الفصل "separation" و التي تتألف من 5 عقد (PLCs) حيث يدير كلاً منها العديد من عمليات الانتاج و تمّ تجميعها عن طريق Switch مركزي خاص بالوحدة يمكن من خلاله الوصول لغرفة التحكم و التي بدورها تتصل بالمخدم الرئيسي للشبكة الصناعية المدروسة.

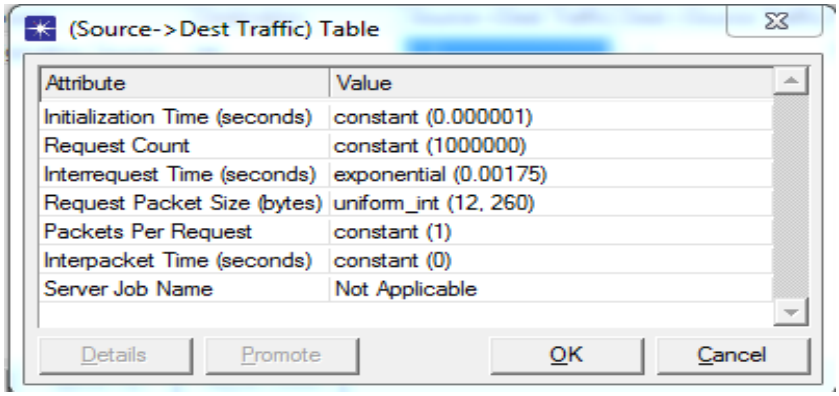


الشكل (5): نموذج وحدة الفصل "Sepration" باستخدام المحاكي OPNET.

8- خصائص مكونات الشبكة الصناعية المدروسة:

- خصائص الأيقونة Task:

يتيح برنامج OPNET بناء التطبيقات الخاصة "Custom" عبر هذه أيقونة و من خلال الولوج إلى خصائصها "Attributes" يمكن وضع توصيف كامل للتطبيق المرغوب و بشكل يدوي من خلال "Manual Configration"، حيث تم ضبط خصائص الأطر المتبادلة بين العقد بشكل يتوافق مع خصائص برتوكول MODBUS TCP/IP كما يظهر في الشكل (6) حيث نلاحظ أن حجم الأطر المرسلة محصور بين القيمتين (12) و (260) بايت و الزمن الفاصل بين الأطر يُقدر (1.75 ms) ، و غيرها من القيم التي حددتها "The Modbus Organization". [1][13]

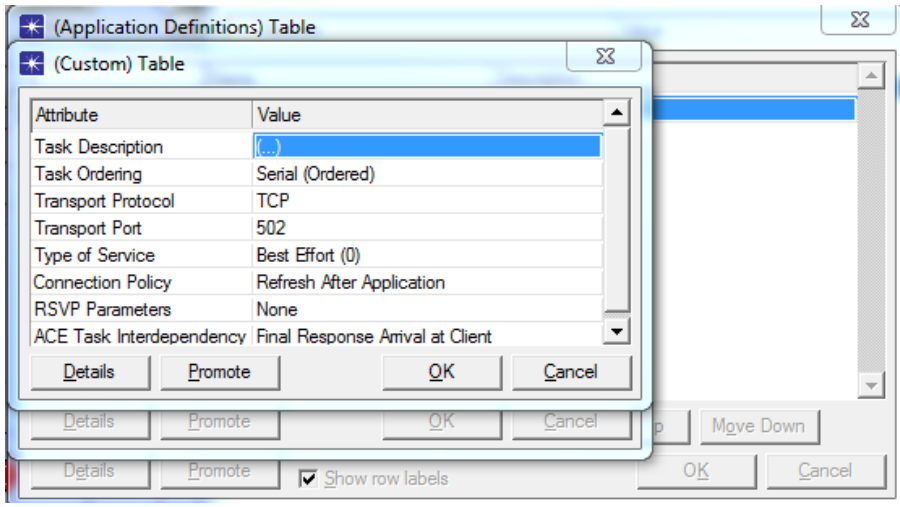


الشكل (6): خصائص الأطر المتبادلة بين العقد.

خصائص الأيقونة Application :

يتم من خلال هذه الأيقونة "Application" ضبط خصائص التطبيق المستخدم في الشبكة الصناعية المدروسة و الذي تم تحديد نوعه " Industrial Ethernet" كما جاء في الأيقونة "Task".

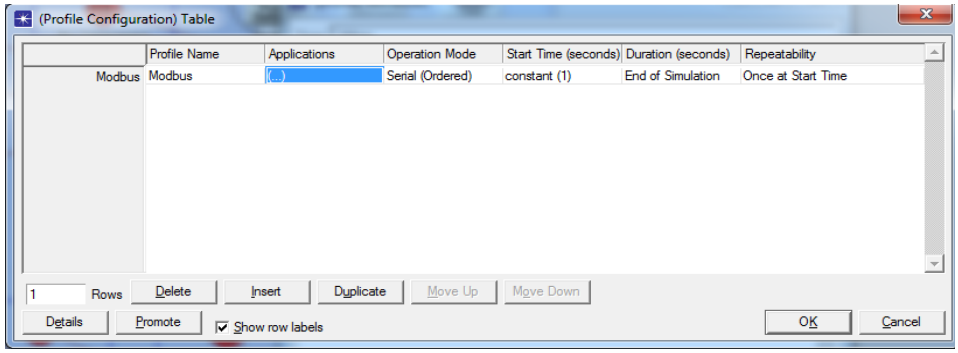
يُظهر الشكل (7) بعض الخصائص المختارة حيث تم تحديد آلية الارسال التسلسلية "Serial" و نوع برتوكول طبقة النقل "TCP" و كذلك رقم المنفذ "502" و غيرها من الخصائص.



الشكل (7): تحديد خصائص التطبيق Modbus TCP/IP في الشبكة المدروسة.

خصائص الأيقونة Profile :

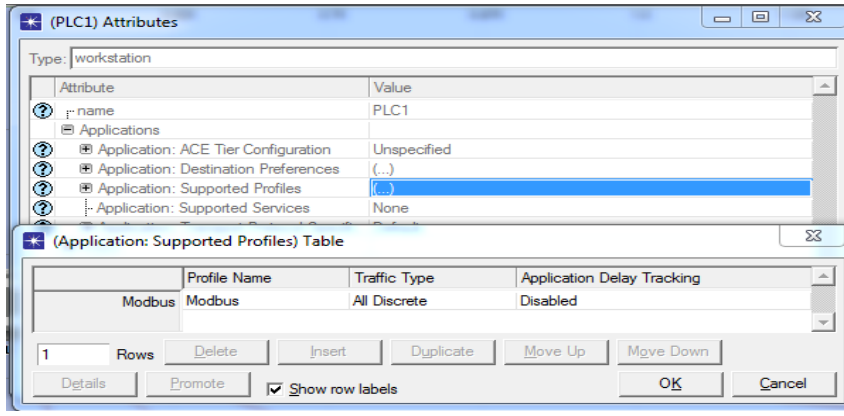
يمكن من خلال هذه الأيقونة ضبط ملف التعريف للتطبيق كما يظهر في الشكل(8) حيث تم تسمية ملف التعريف "Modbus" و اختيار التطبيق الموصوف في الأيقونة "Application"وتحديد زمن لبدأ عمل التطبيق" :Start Time (seconds) "constant(1)".



الشكل (8): ضبط ملف التعريف للتطبيق المستخدم في الشبكة الصناعية.

خصائص العقد (PLCs) في الوحدات:

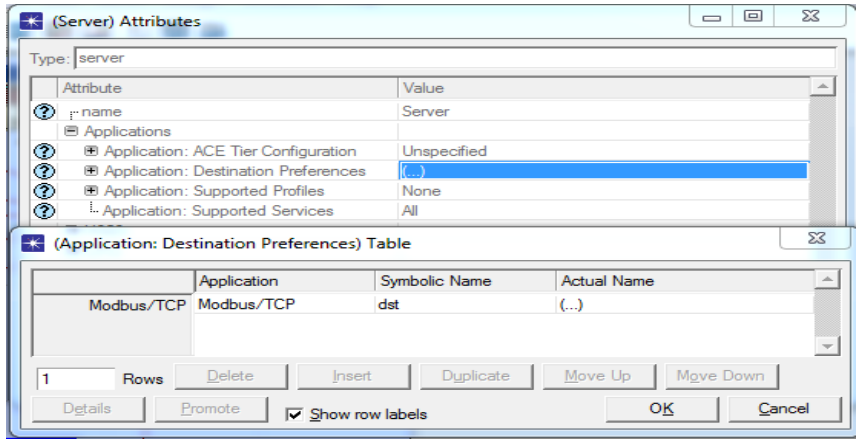
تم اختيار جميع العقد في الشبكة من النوع "workstation" و هذا النوع يتيح للعقدة تحديد ملف التعريف المرغوب و من خلال خصائصها "Attributes" تم تحديد ملف التعريف "Modbus" المحدد في الأيقونة "Profile"، و يُظهر الشكل (9) أحد خصائص العقد المختارة.



الشكل (9): خصائص العقدة PLC في الشبكة المدروسة.

خصائص العقدة Server:

يوفر هذا المخدم خدمة التطبيق MODBUS TCP/IP للشبكة الصناعية المدروسة وتم ضبط خصائصه كما في الشكل (10)، و يعتبر الوجه "dst" الأساسية لكافة عقد الشبكة و يمكن الوصول إليه عن طريق عقدة "Control".



الشكل (10): خصائص العقدة Server في الشبكة الصناعية المدروسة.

– تم اختيار كلاً من العقدتين "Control" و "Ler" من النوع "router switch" و هذا النوع يتيح لها العمل كمبدل و موجه في آن واحد و كذلك يدعم وجود العديد من المنافذ التي تتيح وصل جميع أنواع خطوط النقل سواء المحورية منها أو الضوئية.

– تم اختيار الوصلات التي تربط بين العقد و المبدلة المركزية في الوحدة من النوع "100BaseT" في حين تم اختيار الوصلات التي تربط بين الوحدات من جهة و العقدتين (Ler و Control) من جهة أخرى من النوع "1000Basex" و تم اختيار الوصلة التي تربط بين العقدتين Ler و control من النوع الضوئي "FDDI" بسرعة تصل إلى (1 Gbps).

9- بارامترات أداء شبكة صناعية:

يرتبط مفهوم أداء الشبكات الصناعيّة بعدد كبير من البارامترات نذكر منها (الاستخدامية للشبكة "Utilization"، و مقدار الخطأ في البت "BER"، و نسبة عدد البتات المرسلة

إلى المستلمة، و زمن تأخير الأطر في الشبكة "End To End Delay"، وعدد التصادمات للأطر "Collisions"، و زمن الاستجابة "Time Response"، و الانتاجية "Throughput") و غيرها.

يتيح برنامج OPNET دراسة الكثير من الإحصائيات المرتبطة بالأداء حيث تُقسم إلى ثلاثة أنواع رئيسية:

1) (Global Statistics): تتيح دراسة بارامترات تؤثر على كامل الشبكة.
2) (Node Statistics): يمكن من خلالها دراسة بارامترات تؤثر في العقدة المرتبطة بالشبكة.
3) (Link Statistics): يمكن من خلالها دراسة بارامترات تؤثر في خطوط النقل التي تربط بين عقد الشبكة.

البارامترات المختارة في الشبكة المدروسة:

i. (Packet Network Delay): و هو من النوع (Global Statistics) و يُمثل زمن التأخير اللازم لارسال الأطر من المصدر و استلام الاستجابة من الوجهة و يقاس بالثانية و يتناسب عكساً مع الأداء العام للشبكة أي بانخفاضه يزداد أداء الشبكة.
ii. (Traffic Received): و هو من النوع (Global Statistics) و يُعبر عن عدد الأطر المستقبلة من قبل جميع عقد الشبكة بالزمن و يقاس بـ (Packet/Sec)، و بازدياده يزداد الأداء.

10- العوامل المؤثرة في بارامترات الأداء للشبكات الصناعية:

يوجد العديد من العوامل المؤثرة في بارامترات أداء الشبكات الصناعية مثل (طوبولوجيا الشبكة، عدد العقد في الشبكة و أنواعها ، طول و نوعية وسائط النقل) و غيرها من العوامل الأخرى، في درستنا اختيار العوامل الآتية:

a) العامل (MTU): و الذي هو اختصار للعبارة (Maximum Transmission Unit) و يُعرّف بوحدة الارسال العظمى أي حجم أكبر بيانات مرسلة في حقل الـ (Data) للإطار MODBUS TCP/IP ، حيث تمّ تغيره بالترتيب (12، 50، 150 ، 200 ،260) و تم رصد أثره على بارامترات الأداء.

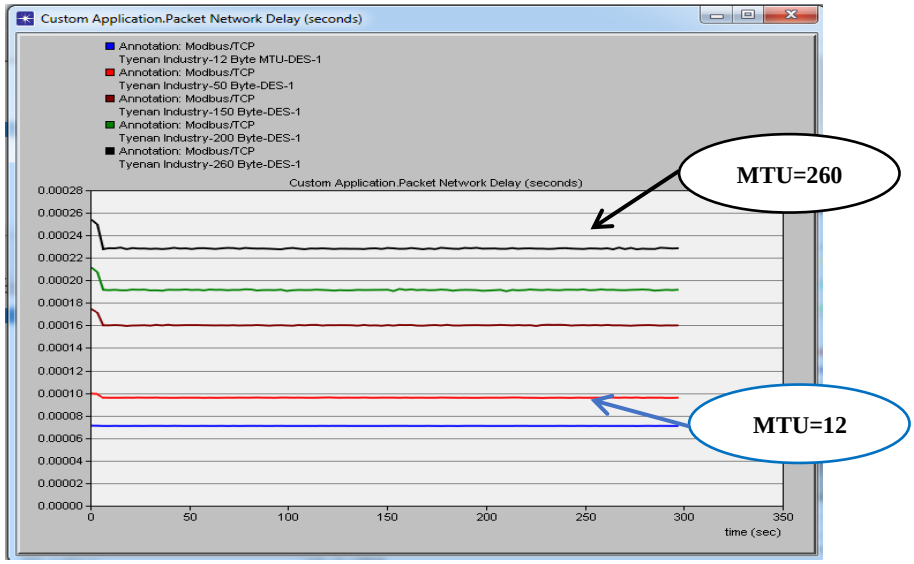
b) زيادة عدد الوصلات: تم ربط بعض الوحدات القريبة من كلا العقدتين "control" و "Ler" بخطي نقل بحيث تستطيع الوحدة الوصول إلى المخدم إما طريق العقدة "Control" أو عن طريق العقدة "Ler" و درسنا أثر هذه الزيادة على بارامترات الأداء.

c) تغيير طوبولوجيا الشبكة: حيث تمّ إضافة عقدة "Core" من النوع " router switch" أتاحت لنا هذه الزيادة تطبيق أحد خدمات (QoS) جودة الخدمة للشبكة و هو برتوكول HSRP و يشير إلى " Hot Standby Router Protocol " و هو أحد أنواع برتوكولات القفزة الأولى " First Hop Redundancy Protocols " و تم رصد تأثير هذا البرتوكول على أداء الشبكة الصناعية المدروسة.

11- دراسة و تحليل النتائج المرتبطة ببارامترات الأداء:

الحالة الأولى: تم تشغيل المحاكاة على خمسة سيناريوهات و في كل سيناريو تم تغيير حجم البيانات لأطر الشبكة و تمّ تحديد زمن المحاكاة بمقدار (5) دقائق.

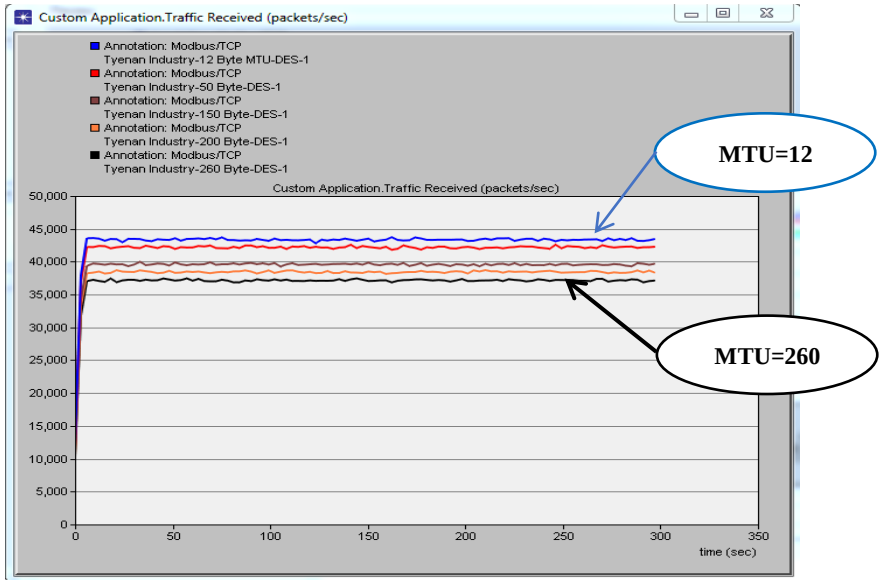
- البارامتر (Packet Network Delay): يُظهر الشكل (11) أنه مع ازدياد حجم الإطار يزداد التأخير حيث أعطى قيمة (0.07 ms) عند (MTU=12 Byte) و قيمة (0.23 ms) عند (MTU=260 Byte).



الشكل (11): تغير البارامتر (Packet Network Delay) مع ازدياد حجم الإطار.

النتائج التي حصلنا عليها مقبولة عند تغيير حجم الإطار من القيمة [Byte]12 إلى القيمة [Byte]260 كونها لا تُسبب تغيير في تأخير الشبكة أكبر من القيمة 0.5ms و التي تحدد متطلبات الزمن الحقيقي للشبكة الصناعية.[14]

- البارامتر (Traffic Received): يُظهر الشكل (12) أنه مع ازدياد حجم الإطار ينقص عدد الأطر المستلمة من قبل عقد الشبكة بواحدة الزمن فسجلت المحاكاة القيمة (43463) عند الحجم (MTU=12 Byte) و القيمة (37129) عند الحجم (MTU=260 Byte).



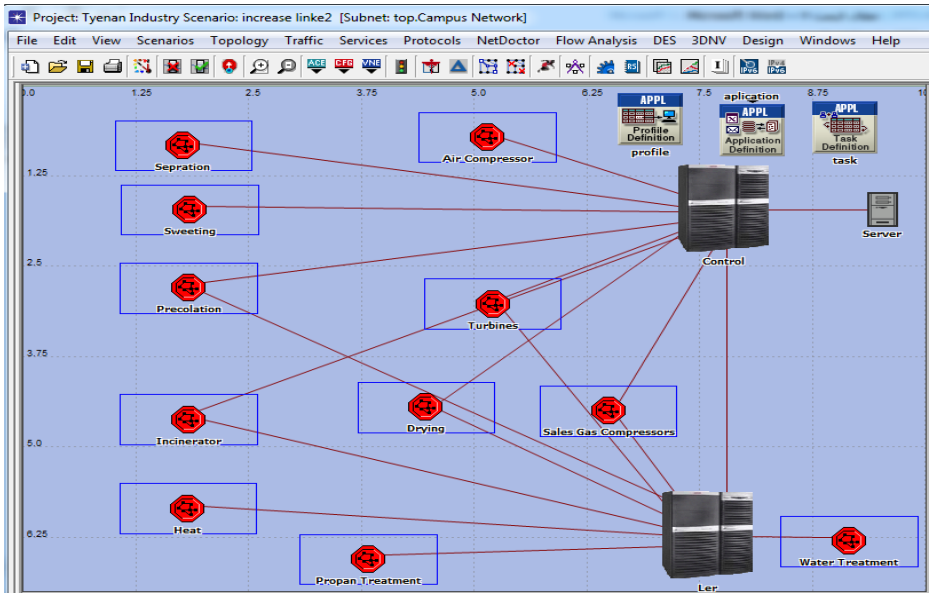
الشكل (12): تغير البارامتر (Traffic Received) مع ازدياد حجم الإطار.

إنّ القيم التي حصلنا عليها تعكس عدد الأطر المتبادلة في الشبكة بتغيير حجم الإطار و تم رصد عدد أقل بازدياد حجم الإطار و هذا مقبول، و الفائدة من رصد هذا البارامتر أخذ مؤشر عن زيادة استخدامية الشبكة حيث نلاحظ ازداد في عدد البتات المستلمة بواحدة الزمن مع زيادة حجم الإطار المرسل مما يُسبب زيادة في الأداء للشبكة.

الحالة الثانية : في هذه الحالة تم تشغيل المحاكاة على سيناريوهين و لمدة خمسة دقائق.

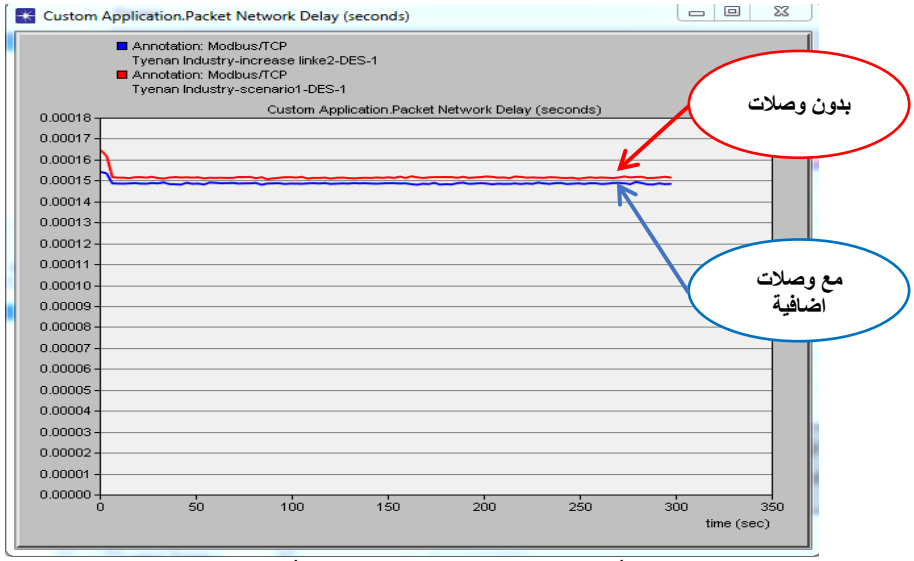
- السيناريو الأول: بقيت الشبكة الصناعية المدروسة بدون وصلات إضافية حيث ترتبط كل وحدة بخط نقل وحيد إما للعقدة "Control" أو للعقدة ""Ler و تمّ ضبط الخصائص للتطبيق بحيث يتم اختيار أحجام أطر محصورة بين (12 Byte) و(260 Byte) بشكل عشوائي.
- السيناريو الثاني: تمّ إضافة بعض الوصلات الإضافية لبعض الوحدات التي تقع على مسافة جغرافية وسط بين العقدتين (contro و Ler) بحيث تصبح كل

وحدة من تلك الوحدات تتصل مع كلتا العقدتين بخطي نقل كما يظهر في الشكل (13).



الشكل (13): الشبكة المدروسة بعد زيادة عدد الوصلات للوحدات.

- البارامتر (Packet Network Delay): من خلال الشكل (14) نلاحظ انخفاض في زمن التأخير من القيمة (0.152 ms) بدون وصلات اضافية إلى القيمة (0.148 ms) مع وجود وصلات إضافية.

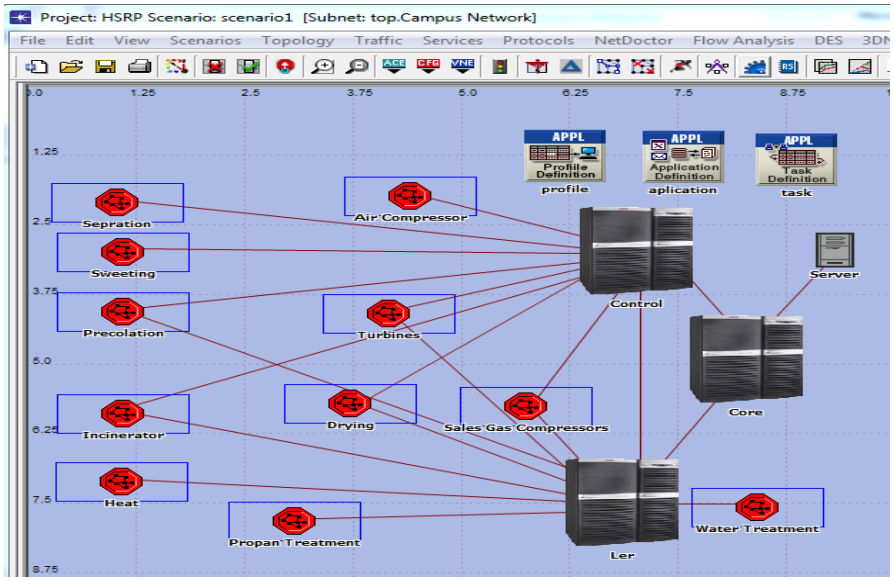


الشكل (14): أثر الوصلات الإضافية على تأخير الشبكة المدروسة.

السبب في انخفاض زمن التأخير بعض إضافة الوصلات هو انخفاض زمن التأخير المرتبط بزمن الانتشار للأطر ففي الحالة الأولى قبل إضافة الوصلات كان على الأطر المرسلة من وحدة التجفيف "Drying " على سبيل المثال أن تمر عبر المبدلة (Ler) ثمّ المبدلة (Control) وصولاً للمخدم (Server) في حين بوجود خط النقل الإضافي يمكن الوصول مباشرة عبر المبدلة (Control) مما يقلل من زمن تأخير الانتشار .

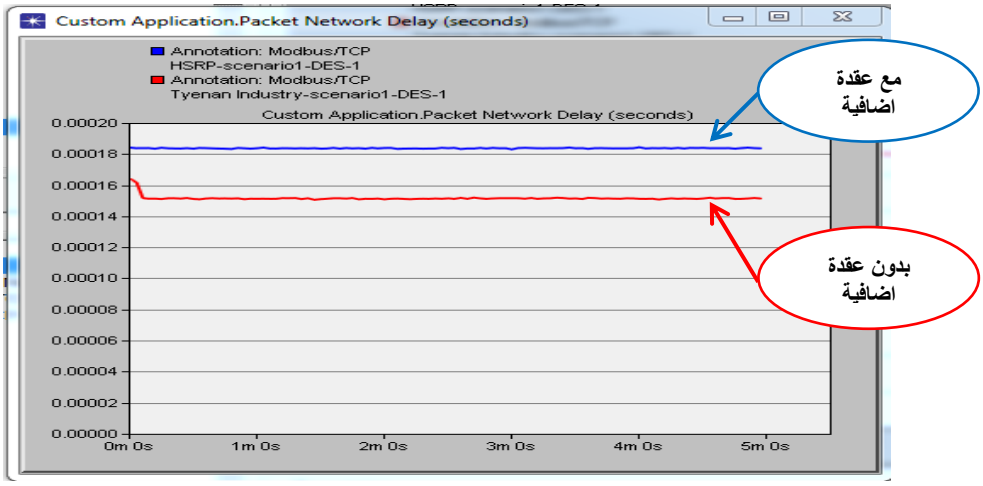
علماً أن التحسين الذي حصلنا عليه قليل لكن يمكن من خلال هذه النتيجة التأكيد على ضرورة أخذ البعد الجغرافي بعين الاعتبار حتى و إن كانت الوصلات ذات سرعات عالية.

الحالة الثالثة: تم تغيير شكل طبولوجيا الشبكة من خلال إضافة عقدة "Core" من النوع "router switch" للشبكة المدروسة ذات الوصلات الإضافية كما يظهر في الشكل (15).



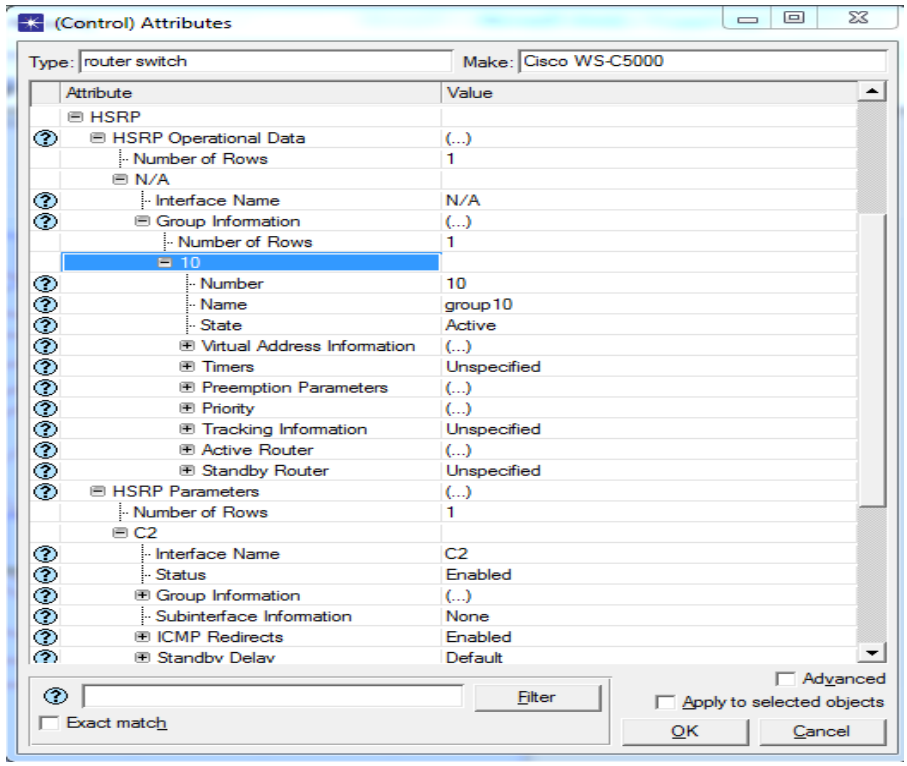
الشكل (15): تغيير طوبولوجيا الشبكة بشكل يتيح تطبيق بارامترات QoS.

- البارامتر (Packet Network Delay): من الشكل (16) نلاحظ ازدياد في زمن التأخير للشبكة من القيمة (0.152 ms) في حالة عدم اضافة عقد جديدة إلى القيمة (0.182 ms) عند إضافة عقد جديدة و تغيير طوبولوجيا الشبكة.



الشكل (16): التأخير الزمني للشبكة مع زيادة عقدة إضافية و تغيير طوبولوجيا الشبكة.

تتيح الطوبولوجيا الجديدة للشبكة و التي تظهر بالشكل (15) تطبيق برتوكول جودة الخدمة HSRP و الذي يساعد في تحقيق الاتصال بالمخدم الرئيسي "server" عند حدوث انقطاع بأحد الوصلات التي تربط الوحدات بالعقدتين "control" و "Ler" و الذي من شأنه أن يؤدي إلى خروج الوحدة من الخدمة أو عند حدوث توقف في عمل العقدة "control" مما يؤدي إلى توقف الشبكة بشكل كامل و انقطاع الخدمة عن كافة وحدات الشبكة، تم ضبط خصائص برتوكول HSRP في العقدتين "control" و "Ler" كما يظهر في الشكل(17).



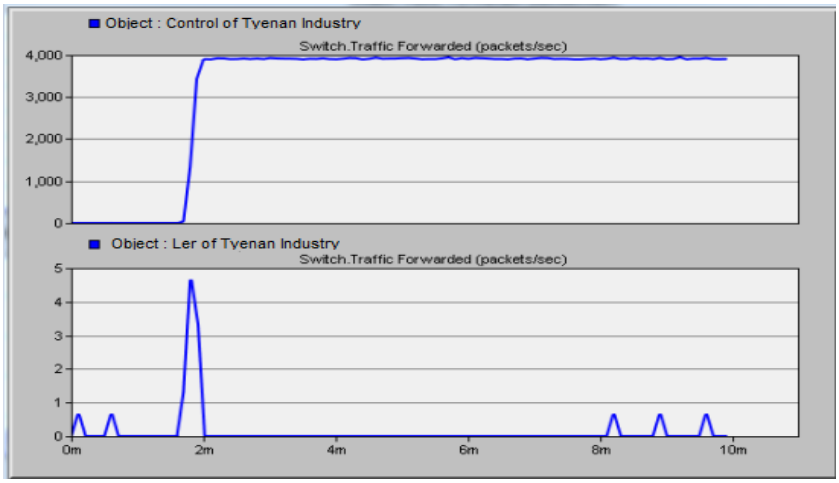
الشكل (17): تفعيل بروتكول HSRP في الشبكة المدروسة.

الحالة الرابعة: تم فيها دراسة الشبكة ذات العقدة الإضافية و تم تشغيلها على سيناريوهين و لمدة 5 دقائق:

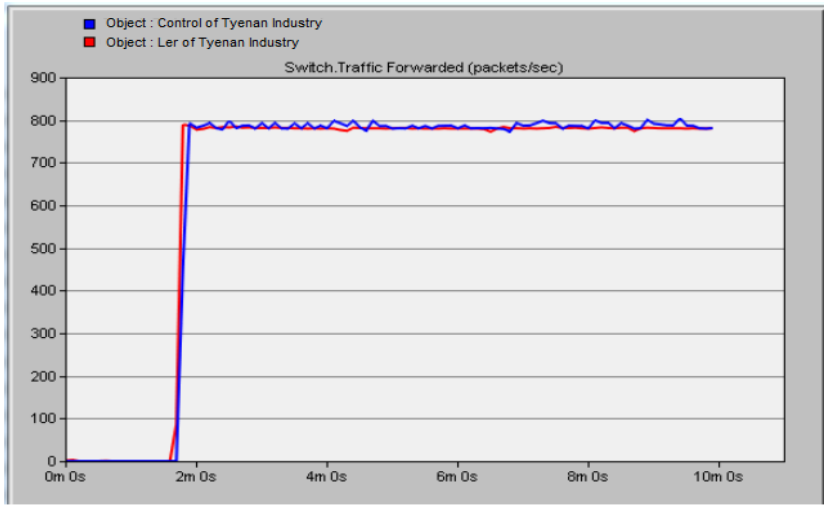
- السيناريو الأول : بتطبيق برتوكول HSRP بدون موازنة حمولة حيث تم دراسة البارامتر (Traffic Forwarded) و هو من النوع "Node Statistics "

والذي يعبر عن عدد الرزم المارة في العقدة باتجاه المخدم الرئيسي و يقدر بـ (Packet/Sec) كما يظهر في الشكل (18).

❖ السيناريو الثاني : بتطبيق برتوكول HSRP مع موازنة الحمولة من خلال إنشاء مجموعتين افتراضيتين: في المجموعة الأولى تكون فيها العقدة "control" في حالة "Active" بينما العقدة "Ler" في حالة "Standby" ، و العكس تماما في المجموعة الثانية كما يظهر في الشكل(19).



الشكل (18): عدد الرزم المارة في العقدتين control و Ler بدون موازنة حمولة.



الشكل (19): عدد الرزم المارة في العقدتين control و Ler مع موازنة الحمولة.

12- النتائج و الاستنتاجات:

استطعنا من خلال برنامج OPNET نمذجة و محاكاة شبكة صناعية تعمل على برتوكول MOBUS TCP/IP الصناعي و تمّ تحليل النتائج للشبكة المدروسة على أربع مراحل:

ففي الحالة الأولى: مع زيادة حجم الإطار من قيمة صغرى (12 Byte) وصولاً للقيمة العظمى (260 Byte) لوحظ ازدياد في أزمنة التأخير بشكل ملحوظ من جهة و ازدادت استخدامية الشبكة من جهة أخرى ، فالبارامتر (Traffic Received) أعطى عدد الأطر المستلمة من قبل عقد الشبكة بمقدار (43463) عند طول إطار(12 Byte) في حين وصل إلى (37129) عند طول إطار (260 Byte)، و بإجراء عملية تحويل بسيطة بضرب عدد الأطر بطول الإطار الواحد نلاحظ أن عدد البتات المستلمة من قبل عقد الشبكة يزداد بشكل كبير عند زيادة حجم الإطار و بتالي زيادة في استخدامية الشبكة و هذا يقود بدوره إلى زيادة الأداء، و على الرغم من الازدياد الكبير في الأداء بزيادة حجم الإطار إلا أنه يُفضل بقاءها ضمن المجال (150 إلى 200) بايت من أجل الحفاظ على متطلبات الزمن الحقيقي لعمل الشبكة الصناعية و المُتعلقة بأزمنة التأخير فتبقى نماذج المحاكاة مثالية و لا تظهر فيها عيوب الشبكات الواقعية و التي تسبب تأخيرات زمنية أخرى في الشبكة.

في الحالة الثانية: مع زيادة عدد الوصلات لبعض وحدات الشبكة لوحظ انخفاض في زمن التأخير للشبكة بشكل طفيف و بتالي زيادة بأداء الشبكة بمقدار صغير (4%) تقريباً.

في الحالة الثالثة: فعلى الرغم من ازدياد أزمنة التأخير إلا أنه بتطبيق برتوكول HSRP زدنا من متانة الشبكة الصناعية المدروسة من خلال الحفاظ على عملية الاتصال بالمخدم عند حدوث انقطاع في أحد الوصلات أو فشل في عمل أحدى العقدتين الرئيسيتين بالشبكة "Control" أو "Ler"، وبتالي حقق هذا التغيير في الطوبولوجيا زيادة في جودة الخدمة للشبكة.

في الحالة الرابعة: لوحظ توزع غير عادل لحمولة الشبكة إذ أنّ معظم الحمل يمر عبر العقدة "cotrol" و لا يمر سوى حمل صغير عبر العقدة "Ler" و ذلك نتيجة التصميم

للشبكة و الذي يعطي أولوية أكبر للعقدة "Control" ، و مع استخدام خاصية موازنة الحمولة و التي يدعمها برتوكول HSRP أجرينا توزيع عادل لحمولة الشبكة مما انعكس إيجاباً على جودة الخدمة.

13- التوصيات و الآفاق المستقبلية:

- ✓ يمكن استخدام نموذج الشبكة المصمّم لدراسة عوامل أخرى مُؤثرة في بارامترات الأداء.
- ✓ إجراء نماذج لشبكات صناعية أخرى و تحليل أدائها.
- ✓ تصميم دارة عمليّة للمقارنة بين أنماط ارسال MODBUS و اختبار أدائها.

المراجع:

[1] MODBUS.Org,2012-MODBUS APPLICATION PROTOCOL SPECIFICATION . US,50p.

[2] https://userpages .uni-koblenz.de /~ros/ Rechnerorganisation/ Ethernet .pdf.14p.

[3] LU YANG,H2012-Unloking The Power of OPNET Modeler. CAMBRIDGE, UK, 253p.

[4] Yunyuan.Y, Meng.C,2020-An Improved Algorithm for Adaptive Communication Frame Length Based on Modbus Protocol. IEEE, Shenyang Institute of Technology, China,8p.

[5] Gamess.E, Smith.B, and Francia.G,2020 - PERFORMANCE EVALUATION OF MODBUS TCP IN NORMAL OPERATION AND UNDER A DISTRIBUTED DENIAL OF SERVICE ATTACK. IJCNC, Florida,US, Vol.12, No.2,21p.

[6] Mnaouer.A, Fujii.Y, Sekiguch.T,2017- Colored Petri Nets Based Evaluation of Transmission Procedures at a Fieldbus Data Link Layer Protocol.IEEE, Yokohama University,Brazil,12p.

[7] Krupanek.B , Bogacz.R,2016- OPNET Modeler simulations of performance for multi nodeswireless systems. Silesian University of Technology, Poland,10p.

[8] Kim.B, Lee.D, Choi.T,2015- Performance Evaluation for Modbus/TCP Using Network Simulator NS3.IEEE, Kyungpook National University, Korea,10p.

[9] Künzel.G, Ribeiro.C, Pereira.C,2014- A Tool for Response Time and Schedulability Analysis in Modbus Serial Communications. IEEE, Federal Institute of Education, Brazil,12p.

[10] Hao.J, Wu.J, Guo.C,2011- Modeling and Simulation of CAN Network Based on OPNET. IEEE, Naval University, China,10p.

[11] Oh.E,2009- Study of Network Design Factors That Influence Industrial Fieldbus Network-Based System Integration . The Ohio State University, Korea,84p.

[12] Ali.Q,2007- Measurements and Performance Analysis of Industrial Ethernet. IEEE, University of Mosul, Iraq,16p.

[13]MODBUS.Org,2012- MODBUS MESSAGING ON TCP/IP IMPLEMENTATION GUIDE . US,45p.

[14] Mahmood,M and Al-Naima,F, OPNET SIMULATION OF DATA TRANSMISSION NETWORK: A CASE STUDY FOR CONTROL SYSTEM IN A PETROLEUM REFINERY COMPLEX IN IRAQ.IEEE. Nahrain University, Baghdad, Iraq. 2015,p12