# خوارزمية حيويّة ذاتيّةِ التّأقلمِ لتوضيعِ الخدماتِ في الشبكاتِ المستقبليّةِ

منار الجبر* علي ذياب** جمانة الدياب ***

(الإيداع: 21 شباط 2021 ، القبول: 29 نيسان 2021)

**الملخّص:**

قمنا من خلالِ هذهِ الورقةِ البحثيّةِ بدراسةِ مسألةِ توضيعِ الخدماتِ ضمن الشبكاتِ المستقبليّةِ، واقتراحِ خوارزميّةٍ حيويّة لتوضيعِ نسخِ الخدماتِ في الشبكةِ بالاعتمادِ على المعلوماتِ المستوحاةِ من الحملِ الذي تولّده العقدُ الزبائنُ، وبنيةِ الشبكةِ المتغيّرة باستمرارٍ وفقاً لتغيّرِ مواقعِ العقدِ وحركيتها. ومن المعلومِ أنّ الشبكاتِ المستقبليّةِ تتطلّبُ درجةً عاليةً من التأقلمِ الذاتيّ من أجلِ مواكبةِ التغيّراتِ المستمرةِ مع المحافظةِ على مستوى أداءٍ مثالي. إحدى التحدياتِ العلميّةِ الهامّةِ ضمنَ هذا السياق هي مسألةُ توضيعِ الخدماتِ (Service Placement). تشيرُ مسألةُ توضيعِ الخدماتِ إلى اختيارِ العقدةِ الأنسب ضمنَ الشبكةِ من أجل استضافةِ الخدمة، إذ يقّللُ التوضيعُ المثاليُّ لنسخ الخدماتِ من كلفة تخديمِ الزبائن، كما يحسّن من الاتصالِ بين الزبائن والمخدّمات، ويمكّن من المحافظةِ على جودة الخدمةِ وتحسينِ استخدامِ المصادر المتوفّرة. بينت التجربةُ والنتائجُ أنّ الخوارزميّةَ المقترحةَ تحقّقُ تحسيناً في الأداءِ من ناحيةِ تلبيةِ الخدماتِ المطلوبةِ خلال زمنٍ أقصر وعرض حزمةٍ أصغر، وبالتالي كلفة أقلّ مقارنةً بنموذج الشبكة (زبون / مخدم) في الحالة العامّة، حيث تقوم هذه الخوارزميّة بإنجاز التوضيع المثاليّ لنسخِ الخدماتِ من خلال مراقبةِ الحمل ضمن العقدة المخدّم وجوارها، واختيار العقدة التي يرد منها أكبرَ حملٍ ونسخ الخدمة إليها، بحيث تصبحُ المسافةُ التي تعبرها الطلباتُ القادمة من العقد الزبائن أصغر ما يمكن نتيجةَ توضيعِ الخدمات في مواقع قريبةٍ منهم.

**الكلمات المفتاحية:** نسخة الخدمة (replica)، توضيع الخدمات، كلفة الاتصال، التأقلم الذاتي، last hop.

* طالبة دكتوراه– قسم هندسة التحكم الآلي والحواسيب–جامعة البعث

** أستاذ مساعد– قسم هندسة التحكم الآلي والحواسيب–جامعة البعث

*** أستاذ مساعد– قسم هندسة التحكم الآلي والحواسيب–جامعة البعث

# Self-Organized Bio-inspired Service Placement Algorithm in Future Networks

Manar-Jabr * Ali- DIAB ** Jomana AL-Diab ***

(Recived: 21 February 2021 ,Accepted: 29 April 2021 )

**Abstract:**

Through this research paper, we studied the service placement issue in future networks, and proposed a Bio-inspired algorithm for placing replicas of services in the network based on inspired information of the load generated by client nodes, and the network topology that is constantly changing due to the change in the locations of the nodes and their mobility. It is known that future networks demand a high degree of self-organization to enable coping with the high dynamics of the networks while keeping performance optimized. One of the main challenging tasks in this context is a self-organized service placement. Service placement issue refers to the problem of selecting which node in the network is most suitable for hosting a service. An optimal placement of service instances (replicas) in a network minimizes the cost of serving clients, improves the connectivity between clients and servers, enables maintaining the quality of service and improves the use of available resources. Experience and results have shown that the proposed algorithm achieves an improvement in performance in terms of meeting the required services within a shorter time and a smaller bandwidth, and thus lower cost compared to the general network model (client / server). As this algorithm achieves the ideal placement of service replicas via monitoring the load within the server node and its neighborhood, selecting the node from which the largest load is received and copying the service to it, so that the distance crossed by requests coming from the client nodes becomes as small as possible as a result of placing services in locations close to them.

**Key words:** service instance (replica), service placement, communication cost, self-organization, last hop.

* PhD student, Auto Control and Computers Dep., Al-baath Univ.

** Professor, Auto Control and Computers Dep., Al-baath Univ.

*** Professor, Auto Control and Computers Dep., Al-baath Univ.

## 1- مقدّمة والهدف من البحث:

تمتاز الشبكات الخلويّة المستقبليّة بمرونةٍ عاليةٍ تجاه التغيراتِ المستمرّةِ (تغيّر مستمر في البنية، الحمل، الخدمات، المصادر وغيرها)، وبالتالي تتطلّبُ درجةً عاليةً من التأقلم الذاتي من أجل مواجهةِ هذه التغييراتِ المستمرّةِ مع المحافظة على مستوى أمثل في الأداءِ.

إنّ التقنياتِ المستخدمةَ من أجلِ نسخِ وتوزيعِ المحتوى ضمنَ الشبكاتِ التقليديّةِ (CDNs)( Content Distribution Networks) من حيثُ نسخ المحتوى إلى مكانٍ قريبٍ من الزّبون، غيرُ كافيةٍ ضمنَ شبكاتِ الاتّصالاتِ اللّاسلكيّةِ الحديثةِ، لاسيّما في ظروفِ عرضِ الحزمةِ الكبيرِ المطلوبِ تلبيتهُ في هذه الشبكاتِ، نتيجةَ الطّلبِ المتزايدِ من قبلِ الزبائنَ على الخدماتِ، وخاصّةً خدمات الملتميديا والفيديو (Hachem وزملاؤه، 2015)، إذ إنّ انتشار خدماتِ الهاتفِ المحمولِ المبتكرةِ تحتاجُ إلى تقنياتِ وصولٍ من أجل استخدامِ المصادرَ المتاحة بزمن استجابةٍ صغيرٍ جداً، وهذا لا يمكن تحقيقه من خلال الأنظمةِ المركزيّةِ الحاليّةِ، ومن المتوقّع أن يستمرّ هذا الاتّجاه دون هوادةٍ وأن يلعب دوراً مهماً في شبكات الجيل الخامس 5G من أجل دعم كلّ من الخدماتِ ذاتِ العمليّاتِ المعقّدةِ حسابياً والخدمات الحسّاسةِ للزمن (Poularakis وزملاؤه، 2019). ومن أجلِ التأقلمِ مع هذا النموّ المتسارعِ في حجمِ حركةِ البياناتِ ضمنَ الشبكاتِ الخلويّةِ المستقبليّةِ، لا بدّ من تحقيقِ متطلباتٍ أكثرَ تعقيداً في البنى التحتيّة لهذه الشبكاتِ مع الحفاظِ على جودةِ الخدماتِ المقدّمة.

يتمّ تحقيقُ الشبكاتِ ذاتيةِ التأقلم Self-Organizing Networks (SON) من خلال تفعيلِ مجموعةٍ من الوظائفَ الخاصّة بالتنظيم الذاتي التلقائي، والحدّ من التدخّلِ البشريّ في التخطيطِ، النشرِ، وتحسينِ الأداءِ والصّيانةِ (Ramiro وHamied، 2012).

يُعتبر توضيعُ الخدماتِ ذاتيّة التأقلمِ (Self-organized Service Placement) جزءاً من عملياتِ التنظيمِ والتأقلمِ الذاتيّ في الشبكاتِ المستقبليّةِ، ويمثّل إحدى التحدّياتِ العلميّة الهامّة ضمنها. تُشكّل بنيةُ الخوارزميّةِ التي تنجزُ التوضيعَ المحورَ الأساسَ في بناء نظامِ توضيع الخدمات، وقد تكون مركزيّةً تعملُ ضمن عقدةٍ واحدةٍ أو موزّعةً على مجموعةٍ من العقد المتشاركةِ فيما بينها قرارَ التوضيعِ.

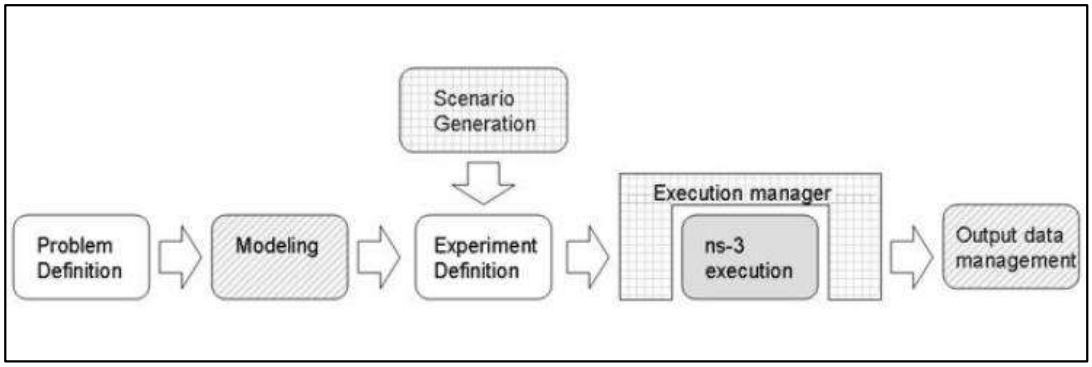
ولا بدّ ضمنَ هذا السياقِ من توضيحِ وتعريفِ بعض المصطلحاتِ والمفاهيم:

- **الخدمة (Service):** سوف نقدّم تعريفَ الخدمةِ كما ورد ضمن (SOAs) (Service Oriented Architectures، على أنّها آليّةٌ تمكّنُ من الوصول إلى مجموعةٍ من الإمكانيّاتِ المتاحةِ عبر واجهةٍ موصوفةٍ بشكلٍ مسبقٍ، مع تقييدِ الوصولِ من خلال قواعدَ وأذوناتٍ محدّدة (Mackenzie وزملاؤه، 2006). يتمّ منحُ الخدمةِ من خلال مكوّنٍ برمجيٍّ تنفّذه عقدةٌ واحدةٌ أو أكثرَ ضمنَ الشبكةِ، دون توفُّر معلوماتٍ مسبقةٍ لديها عن المستفيدينَ من هذه الخدمةِ.
- **نسخة (مثيل) الخدمة (Service Replica):** هي عبارة عن نسخةٍ من المكوّنِ البرمجيّ للخدمةِ، تعملُ ضمن عقدٍ مختلفةٍ في الشبكة. يجبُ أن تتبادلَ النسخ المعلوماتِ فيما بينها من أجل المحافظةِ على مزامنةِ الحالةِ العامّةِ للخدمةِ، فيما يتعلّقُ بطلباتِ الزبائن وترابطِ المعطياتِ بينها (Wittenburg، 2010).
- **نظامُ توضيعِ الخدمةِ (Service Placement System):** هو عبارة عن مجموعةٍ المكوّناتِ البرمجيّةِ التي تقومُ بإنجازِ التشكيلِ المطلوبِ للخدمة بناءً على التغيّرات الآنيّةِ الحاصلةِ في الشبكةِ، من خلالِ مجموعةٍ من الوظائفَ، منها قياس جودةِ الخدمةِ، وبالتالي اتّخاذ قرارِ إعادةِ التوضيعِ وإجراء التغييراتِ اللّازمة (Wittenburg، 2010).

**تهدفُ هذه الورقةُ البحثيّةُ إلى** دراسةِ مسألةِ توضيعِ الخدماتِ ذاتيّةِ التأقلمِ في الشبكاتِ المستقبليّةِ، ومن ثمّ اقتراحِ خوارزميّةٍ حيويّةٍ ذاتية التأقلم قادرة على التعلّم من معطياتِ الشبكةِ واتّخاذِ قرارِ توضيعِ نسخِ الخدمةِ ضمن عقدٍ قريبةٍ من الزبائن، ممّا

يحقّق وفرةً في عرضِ الحزمةِ المستخدم وإنقاص زمنِ تلبية هذه الخدمةِ، وبالتالي كلفة الاتصال بين الزبائن والمخدّمات.
تُقسم بقية الورقة البحثية على النحو الآتي: نستعرضُ في القسم الثاني لمحةً مختصرةً عن المحاكي ns3 المستخدم في الدراسةِ، بينما نقدّم في القسمِ الثالث بعض الدراسات المرجعية لمسألةِ توضيعِ الخدماتِ في الشبكات. يركّز القسم الرابع على توصيفِ المسألةِ والخوارزميّة المقترحةِ، إضافةً إلى توصيف نموذج تابع الكلفة. نستعرضُ في القسمِ الخامسِ النتائج التي توصّلنا إليها عند تنفيذِ الخوارزميّةِ الحيويّةِ، إذ تسهمُ في تحسينِ الأداءِ من ناحيةِ إنقاصِ زمنِ تلبيةِ الخدمةِ (زمن الاستجابة) وتوفيرِ عرضِ الحزمةِ (كلفة الاتصال). نلخّصُ أخيراً نتيجةَ البحثِ والأهدافَ المستقبليّةَ في القسم السادس.

2- مواد **وطرائق البحث:** تمّ تنفيذُ الخوارزميّةِ المقترحةِ ضمن برنامجِ المحاكاةِ (ns-3)، وهو عبارة عن برنامجِ محاكاةٍ للشبكات، يأخذُ بالحسبانِ الأحداثَ المنفصلةَ غير المستمرة من ناحيةِ أزمنةِ حدوثها، ويُستخدم في تطويرِ الشبكات من أجل تحقيق أهدافٍ بحثيةٍ وتعليميّةٍ. يبين الشكل (1) مخطّطاً يمثّل تسلسل تنفيذِ العملياتِ ضمن المحاكي ns-3.

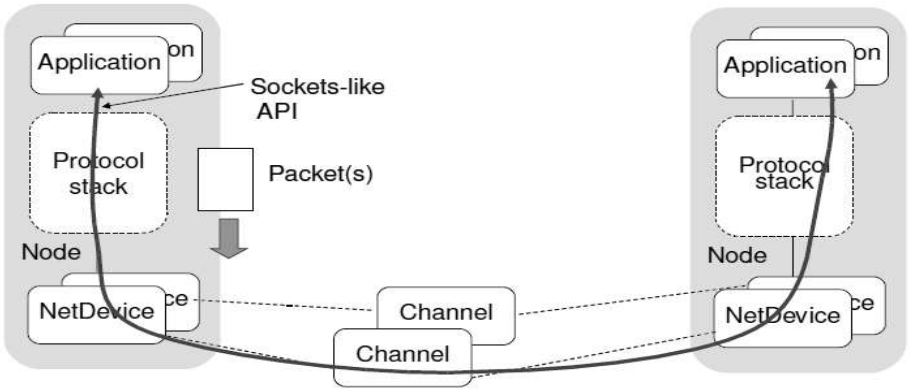



**الشكل رقم (1): مخطّط تسلسل تنفيذ العمليات ضمن المحاكي ns-3.**

تمّت كتابةُ برنامجِ المحاكاة (Ns3) بلغة c++ وPython، وهو يندرجُ ضمن اتفاقيات (GNU GPLv2) للبرامجِ مفتوحة المصدر. توجد عدّة منصّات تشغيلٍ تدعم البرنامج (Ns3) أهمها: (Linux، OS X) و(FreeBSD).

يمتازُ المحاكي بمرونةٍ عاليةٍ تجاه مراقبة الأحداث الهامّةِ ضمنَ المحاكاةِ، وربطها بتوابعَ تحدّد الوظائف المراد تنفيذها عند وقوعها من خلال (trace sources and sinks)، فيمكنُ بالتالي تتبّع التغير في قيمةٍ معينةٍ وهذا يجنّب المبرمجَ عمليّةَ الدخول إلى الكود المصدر وتعديله.

قمنا بإجراء الاختبارات وتنفيذ المحاكاة على حاسب بنظام تشغيل (linux) ضمن بيئة (Ns-3)، وباستخدام لغة c++ تمّت كتابة الكود البرمجي للخوارزمية المقترحة بالإضافة إلى تعريف التوابع والإجرائيات الخاصة بالتعرف على جوار العقدة ضمن الشبكة، وإرسال الطلبات بين العقد المخدمات والزبائن. يمكن تلخيص الخطوات الأساسية بإضافة العقد ثمّ إضافة البروتوكولات والعناوين، وأخيراً إضافة التطبيقات التي توصف وظائف العقدة. يتضمّن الشكل (2) العناصر الأساسية السابقة آنفة الذكر:




**الشكل رقم (2): العناصر الأساس لإعداد الشبكة وبيئة المحاكاة ضمن المحاكي ns-3.**

**3- دراسةً مرجعيّة لمسألةِ توضيعِ الخدماتِ في الشبكات:**

يُمكنُ اعتبارُ مسألةِ توضيعِ الخدماتِ كتطبيقٍ لنظريةِ مواقعِ الخدماتِ (Facility Location Theory) ضمنَ شبكاتِ الاتصالاتِ اللاسلكيّة (Laoutaris وزملاؤه، 2007). تقدّمُ المفاهيمُ التي تعتمدُ على هذه النظريّةِ حلّاً لمشكلةِ إيجادِ مواقع الخدماتِ غيرَ محدودةِ المصادر (Un Capacitated Facility Location Problem)(UFLP)، من خلال إيجادِ العددِ المطلوبِ من نسخِ الخدماتِ تبعاً لبنيةِ الشبكة والطّلب على هذه الخدمات، ولا تهتمّ كثيراً بالحملِ الزائدِ الناتجِ عن المزامنةِ بين النسخِ. يمكنُ تصنيفُ تقنياتِ توضيعِ الخدماتِ إلى مركزيّةٍ وموزّعةٍ وهجينةٍ بين الصنفين السابقين، وتوجدُ العديد من الخوارزمياتِ التي تندرجُ في تصنيفها تحت هذه التقنيات (MITSCHELE-THIEL وزملاؤه، 2011).

قام (GRAMOLI وزملاؤه، 2008) بتطويرِ خوارزميّةِ (SONDe) من أجلِ إيجادِ العددِ المثاليّ للمخدّماتِ ومواقعها ضمنَ الشبكةِ، وذلك من خلالِ الكشفِ والتحرّي الدوريّ ضمنَ الجوارِ عن وجودِ عقد مخدّمات وتَحوّل العقدة الزبون إلى مخدّم في حال عدم وجوده ضمن جوارها. أثبتت نتائجهم أنّ عددَ المخدّماتِ يصلُ إلى حالةِ الاستقرارِ بعد فترةٍ قصيرةٍ من الزمن ممّا يحقّقُ وفرةً في المصادرِ المتاحةِ وتلبيةِ الخدماتِ بزمنٍ أقصر، وتوفير عرضِ الحزمةِ المستخدم.

قام (Sahoo وزملاؤه،2016) بدراسةِ مسألةِ توضيعِ المخدّمات (Server Placement) في كلّ من شبكاتِ توزيع المحتوى التقليدية (Traditional CDN) والحديثةِ المعتمدةِ على السحابةِ (Cloud based CDN)، وكذلك المعتمدة على وظائف الشبكةِ الافتراضيّة (NFV). أشارَ الباحثونَ إلى تعدّدِ الأهدافِ من الخوارزميّاتِ المقترحةِ وفقاً للمعاييرِ الآتيّة (زمن الاستجابة RTT (Round Trip Time)، التّأخير (latency)، عدد القفزات (hop-count) ، جودةِ الوصلةِ (link quality)، الكلفة (cost)، عدد المخدّمات (number of servers)، عدد مرّاتِ إعادةِ التشكيلِ (number of reconfigurations)، عرض الحزمةِ في الشبكةِ (network traffic)).

وبرهنوا أنّ النموذجَ الأكثرَ ملاءمةً لحلّ المسألةِ هو نموذجُ البرمجةِ الخطيّةِ (Integer Programming)، وقد اعتمدت معظمُ الخوارزميّاتِ بمعدّلِ 42% في فكرتها الأساس على الخوارزميّة الجشعةِ (greedy)، والبعضُ منها اعتمدَ على الطرقِ الاسترشادية بمعدّل 6%. لخّصتِ المقالةُ في نتيجتها السبلَ المحتملةِ من أجلِ الأبحاثِ المستقبليّةِ في مجالِ توضيعِ نسخِ الخدماتِ.

قامَ (Martin وزملاؤه، 2019) بتطويرِ طريقةٍ حيويّةٍ تعتمدُ على البحثِ الهجينِ (effective hybrid search heuristic) بالاستفادةِ من القدرةِ الحسابيّةِ العاليةِ التي تقدّمها طريقةُ البحثِ المحليّةِ الجشعةِ (greedy local search) من أجل إيجاد المواقعِ المثاليّةِ لعقدِ المراقبةِ ضمنَ شبكاتِ الاتصالاتِ، وتوزيع العدد المناسب منها في الشبكة بحيث يتمّ تحقيقُ وفرةِ

المصادرِ مع التّأقلمِ مع التغييراتِ التي تطرأ على بنيةِ الشبكةِ. بينت النتائج أنّ هذه الطريقةَ تعملُ بشكلٍ جيدٍ في حالاتِ التغيّرِ في البنيةِ في الزمنِ الحقيقي ومن أجلِ أعداد عقدٍ كبيرةٍ تصلُ إلى الملايين مقارنةً مع العديد من الخوارزمياتِ التطورية (Evolutionary Algorithm (EA)).

يمكنُ نمذجةُ مسألةِ توضيعِ الخدماتِ كمسألةِ إيجادِ حلّ أمثل (Optimization Problem)، وهذا ما قام به (Donassolo وزملاؤه، 2019) من أجلِ نمذجةِ مسألةِ توضيعِ الخدماتِ المكرويّةِ في إنترنت الأشياء (IoT)، وقاموا باقتراحِ استراتيجيّة توفير خدمة السحابةِ المُحسَّنة (Optimized Fog Service Provisioning strategy) المسمّاة (O–FSP)، وقد أثبتوا أنّ الحلّ المقترحَ مقبولٌ من ناحيةِ الكلفةِ واستهلاكِ المصادرِ مقارنةً ببعضِ المفاهيمِ التقليديّةِ مثلَ خوارزميّةِ (best–fit).

**4- توصيف المسألةِ والخوارزميّةِ المقترحةِ:**

على فرض أنّه لدينا البيان الآتي الممثّل للشبكةِ، والمعرّف بالشكل: $G=(V,E)$، حيثُ تمثّلُ $V$ مجموعةُ الرؤوس وتقابلُ العقد في الشبكاتِ المستقبليّةِ، بينما تمثّل $E$ الحوافَ للبيانِ الممثّلة للوصلاتِ بين العقد، فيكونُ بالتالي $E \subseteq V*V$ (Diestel، 2017).

على فرض أنّ متحولَ القرارِ $X_{ij}$ يمثّلُ عمليّةَ التوضيعِ أو الإسنادِ (Allocation Variable) فتكونُ قيمته:

$$x_{ij}=\begin{cases}1 & ;\text{إذا اسند الرأس } V_j \text{ إلى الرأس } V_i\\ 0 & ;\text{في الحالات الأخرى}\end{cases}$$

نفرضُ أنّ العقدةَ المضيفةَ للخدمةِ h، وأنّ العقدةَ الزبون c. فتكونُ كلفةُ توفيرِ الخدمةِ لزبونٍ معطاةٌ بالعلاقةِ: $d_{h,c}\delta(s,c)$ حيث تمثّل $d_{h,c}$ المسافةَ بين الزبونِ والعقدةِ المضيفةِ (عدد القفزات)، بينما تمثّل $\delta(s,c)$ عرضَ الحزمةِ المطلوبِ مقدّراً بالبايتِ من أجلِ توفيرِ الخدمةِ للزبون(Wittenburg، 2010). يتمّ في حالِ وجودٍ أكثر من نسخةٍ للخدمةِ، اختيارُ العقدةِ الأقرب للزبونِ من أجلِ الحصولِ على الخدمةِ، حيث تمثّل عمليةُ انتخابِ العقدة المزوّدةِ للخدمةِ بالمعادلة:

$$\eta(s,c)=\arg\min_{h\in H} d_{h,c}$$

يمكن ممّا سبقَ تمثيلُ تابعِ الكلفةِ للزبائنِ ضمنَ عقدةٍ محدّدة على النحو الآتي:

$$C_{clients}(s,h)=\sum_{c\in C_{s,h}} d_{\eta(s,c)}\delta(s,c).$$

والهدفُ هو إيجاد التوضيعِ المثاليّ للخدماتِ بحيثُ تكونُ الكلفة أصغر ما يمكن. تمّ في هذه الورقةِ البحثيّةِ تطوير خوارزميّةٍ حيويّة مستوحاةٍ من سلوكِ النملِ باعتمادها على المعلومات المتعلّقةِ ببنيةِ الشبكةِ والحمل ضمنها من أجل اتّخاذِ قرارِ نسخِ الخدمةِ وتوضيعها، إذ يتمّ الاتصال بين العقدِ من خلالِ تتبّعِ الأثرِ الذي تتركه حركةُ الرزمِ (packets) المتبادلةِ بين الزبائن والمخدماتِ بدلاً من تبادلِ الرسائلِ وهذا يسهمُ في توفيرِ عرضِ الحزمةِ المستخدم.

يتمّ تقسيمُ الخوارزميّةِ إلى طورين:

**الطورُ الأوّل:** طورُ التهيئةِ، وفيهِ تقومُ العقدُ التي تحوي الخدماتِ بالإعلانِ عن وجودها كعقدٍ مخدّمات ضمنَ الشبكة، بينما تقومُ العقدُ الزبائنُ التي تلقّت هذه الرسالةَ بتخزينِ معلوماتِ المخدّماتِ ضمنَ ذاكرةٍ خاصّةٍ بها من أجلِ التقصّي والكشفِ الدوريّ عن وجودِ مخدّمات، ومعرفةِ مواقعِ وعناوينَ هذهِ العقد (service discovery) قبل البدءِ بإرسالِ الطلباتِ إليها.

**الطورُ الثاني:** تعملُ خوارزميّةُ التوضيعِ المقترحةِ ضمنَ العقدةِ المخدّمِ، حيثُ توظّف هذهِ العقدةُ بدورها عميلٍ (agent) عند بدءِ أو اقلاعِ الخدمةِ مهمّته مراقبةُ الحملِ واختيارِ العقدةِ المناسبةِ التي سيتمّ نسخُ الخدمة إليها.

تقومُ العقدُ الزبائنُ بالبدءِ بإرسالِ الطلباتِ إلى المخدماتِ التي تمّ استكشافها في المرحلةِ الأولى، من خلالِ الكشفِ عن وجودها ضمنَ الذاكرةِ الخاصّةِ بها، واختيارِ المخدّم الأقربِ للعقدةِ في حالِ تعدّدِ المخدمات.

**4-1- نموذج الكلفة (Cost Model):**

على فرض أنّ عددَ العقدِ ((Autonomous Entity (Ae) التي يمكنُ أن تستضيفَ الخدماتِ ضمن الشبكةِ هو $I$ بسعةِ تخزينٍ محدّدةٍ $S_i$ بايت، كما يقومُ الزبائنُ بطلبِ الخدمةِ بمعدّلٍ تراكمي يُقدَّر بـ $\lambda_i$ .

على فرض أنَّ عددَ الخدماتِ هو $J$ وحجمُ كلّ منها $b_j$ حيث أنّ $j \in \{1,2,.....J\}$ ، وأنّ احتمال طلبَ الخدمةِ من قبلِ الزبونِ هو $P_j$ . وعلى فرض أنّ $P_{ij}$ يمثّلُ احتمالَ طلبِ الخدمةِ $j$ من العقدةِ $Ae_i$ .

فيمكنُ تعريفُ متحوّل الإسناد على النحو الآتي:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & if\ service\ \ j\ is\ \ available\ \ in\ \ Ae_i \\ 0 & otherwise \end{cases}$$

وذلك ضمن القيد:

$$\sum_{j=1}^{J} b_j x_{ij} \le S_i \qquad i = 1,.....I$$

والهدفُ هو حصولُ الزبونِ على الخدمةِ من أقربِ موقعٍ، أي أن يكونَ عددَ القفزاتِ (hops) التّي يعبرها الطلبُ من أجلِ تلبيةِ الخدمةِ أصغر ما يمكن.

نفترض بدايةً أنّ كلّ خدمة يتمّ توفيرها ضمن مخدّم أصلي $O_j$ . وتدلُّ القيمة $X_o$ على تخزينِ نسخةِ الخدمةِ الأصليّةِ ضمن هذه العقدة. يكونُ العددُ الوسطيّ للقفزاتِ من أجلِ توفيرِ الخدمةِ ضمن $Ae_i$ مساوٍ إلى:

$$C_i(X) = \sum_{j=1}^{J} P_j d_{ij}(X)$$

حيثُ تمثّلُ $d_{ij}(X)$ أصغرَ مسافةٍ يمكنُ عبورها من أجلِ توفيرِ الخدمةِ $j$ ضمنَ $Ae_i$ عندَ اعتمادِ التوضيعِ X. تكونُ هذه الخدمةُ موجودةٌ إمّا ضمنِ العقدةِ الأصليّةِ أو ضمنَ عقدةٍ أخرى مضيفةٍ لنسخةِ الخدمةِ. بفرض أنّه يتمّ دوماً توجيهُ الزبون إلى النسخةِ الأقرب، وبفرض أنّ معدّل الطلبِ الكلّي معطى بالعلاقة $\mu = \sum_i \lambda_i$ يكون عندها:

العددُ الوسطيّ للقفزاتِ من جميعِ العقدِ معطى بالعلاقة:

$$C\ (X) = \frac{1}{\mu}\sum_{i=1}^{I}\lambda_i C_i(X)$$

$$= \frac{1}{\mu}\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\lambda_i P_j d_{ij}(X)$$

$$= \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J} S_{ij} d_{ij}(X)$$

$$S_{ij} = \frac{\lambda_i P_j}{\mu} \qquad \text{حيث أنّ}$$

ويكونُ التوضيعُ X خاضعاً للقيدِ:

$$\sum_{j=1}^{J} b_j x_{ij} \le S_i \qquad i = 1,.....I$$

يكونُ من أجلِ عددٍ كبيرٍ من الخدماتِ والمخدّماتِ، من الصعبِ إيجادُ حلّ مثاليّ لهذهِ المسألةِ، وهي من النوعِ NP–Complete.

**4-2- إثبات (NP–Completeness):**

نقومُ من أجلِ إثباتِ أنّ هذهِ المسألةَ ذاتُ تعقيدٍ من النوع NP–Completeness، بصياغتها على شكلِ مسألةِ قرارٍ أمثلٍ كما في الآتي:

على فرض أنّ عددَ القفزاتِ الأعظمِ هو $T$ فيكونُ:

$$\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J} S_{ij} d_{ij}(X) \le T$$

ضمنَ القيودِ:

$$\sum_{j=1}^{J} b_j x_{ij} \le S_i \qquad i = 1,.....I$$

سوف نقومُ بإثبات أنّ هذهِ المسألةَ تنتمي إلى المسائلِ (NP)، وأنّ مسألةَ الحقيبةِ (knapsack) تؤولُ إلى حالةٍ خاصّةٍ من هذه المسألةِ، هذا يثبتُ (NP completeness).

من أجلِ توضيعٍ $X$ لنسخِ الخدماتِ، وعدد محدّدٍ من القفزاتِ $T$، يمكنُ التحقّقُ خلال زمنٍ كثيرِ الحدودِ (polynomial) فيما إذا كانت المسألةُ قابلةٌ للحلّ، أي إيجاد التوضيع الأمثلِ بكلفةٍ وسطى أقلّ من $T$ قفزةٍ.

بعد ذلك نأخذُ بالحسبانِ الحالةَ الخاصّة $S_1 = S$ ، $S_i = 0 \quad i = 2....., I$ ، $\lambda_i = \lambda \quad i = 1,.....I$ ، $P_j = P \quad j = 1,.....J$ أي لدينا عقدةٌ واحدةٌ $Ae$ لتوضيعِ كلّ الخدماتِ فيها وجميعُ الخدماتِ متساويةٌ في الحجم، وجميع

العقد تمتلكُ معدلاتِ طلبٍ متساويةٍ. بفرض أنّ كلّ خدمةٍ $J$ متوفرةٌ دوماً ضمنَ المخدّم الأصلي $Oj$ . فتكونُ كلفةُ تخديمِ زبونٍ معين بهذا الطلب من العقدة $Ae$ هي $d_{ij}(X_o)$ .

على فرض أنّه يتمّ دوماً تخديمُ الزبونِ من النسخةِ الأقربِ، فإنّ توضيعَ نسخةِ الخدمة في العقدةِ الوحيدةِ المتوفّرةِ يمكنُ أن ينقصِ الكلفةَ من أجلِ أيّ زبونٍ، أي أنّ:

$$d_{ij}(X) \le d_{ij}(X_0)$$

يمكنُ تعريفُ الربحِ أو الفائدةِ نتيجةَ توضيعِ الخدمةِ ضمن العقدةِ $Ae_i$ بالتابع الآتي:

$$u(j) = \sum_i \left[ d_{ij}(X_0) - d_{ij}(X) \right]$$

ويمثّل مقدارَ النقصانِ الحاصلِ في عددِ القفزاتِ فيما لو تمّ توضيعُ الخدمةِ ضمنَ هذهِ العقدةِ.

على فرض أنّ مقدار النقصانِ الحاصلِ هو $T'$ عندها يكونُ السؤالُ فيما إذا كانت توجدُ مجموعةٌ من الخدماتِ $J'$ تحقّق:

$$\sum_{j \in J'} b_j \le S \quad and \quad \sum u(j) \ge T'$$

تشبهُ هذه المسألةُ مسألةَ الحقيبةِ في تابعِ الهدفِ المرادِ إيجاد الحلّ الأمثل له، ممّا يثبتُ أنّ هذهِ المسألةَ تنتمي إلى المسائلِ من النوعِ NP complete. ويمكنُ اختصار أو تخفيض (reduced) مسألةِ الحقيبة إليها.

بما أنّ هذه المسألة من NP complete فإنّ إيجادَ الحلّ المثاليّ لها غيرُ ممكنٍ، لذا تمّ تطويرُ طريقةٍ حيويّةٍ تعتمدُ على معلوماتِ البنيةِ والإحصائيّاتِ التي يتمّ جمعها من حركةِ المعطياتِ على الشبكةِ من أجلِ إيجادِ العددِ المثاليّ من نسخ الخدمات ومواقعها المثالية وتلبية الطلبات من العقد الأقرب للزبائن وبالتالي إنقاص الكلفة.

يعتمدُ الحملُ الذي تتمُّ مراقبتهُ على تجميعِ المعلوماتِ الإحصائيّةِ الخاصّة به عبر الشبكة ضمن العقدِ وتخزينها ضمن جدول قيم الفرمون (Pheromone Values). تمثل قيمة الفرمون في هذه الحالة حجم البايتات المولدة من قبل الزبون (traffic) والتي تعبر العقدة. يمكنُ القول كمحاكاةٍ لخوارزميةِ النملِ (Bonabeau، Dorigo، وTheraulaz، 1999) أنّ الخدمةَ تمثّلُ مصدرَ الطعامِ (source of food) بينما تمثّل الطلباتُ (requests) المولّدةُ من قبلِ الزبائنِ النملاتِ (ants)، إذ كلّما عبرت رزمةٌ العقدةَ تتركُ قيمةً تمثّل حجمها ضمن العقدة. تعطى المعادلةُ العامّةُ لتحديثِ قيمةِ الفرمونِ بالعلاقةِ:

$$P_S(t+1) = \frac{P_S(t) + \delta p(h)}{1 + \delta p(h)}$$

تمثّل $\delta p(h)$تغيّرَ قيمةِ الفرمونِ وهو تابعٌ لحجمِ الباكيت. يتمُّ اتّخاذُ قرارُ نسخِ الخدمةِ بشكلٍ تلقائي إلى العقدةِ الأخيرةِ المجاورة للعقدة المخدّم (last hop)، والتي وردَ منها أكبرُ عددٍ من الطلباتِ أي الحمل الأكبر بعد احتسابِ كلفةِ الاتصالِ بين الزبونِ والمخدّم ومقارنتها بعتبةٍ محدّدةٍ، ثمّ البدءُ بنسخ الخدمةِ إذا كانت كلفةُ الاتصالِ أكبرَ من عتبةٍ محدّدةٍ وكانت كميّةُ المصادرِ المتوفّرةِ في العقدةِ كافيةٌ لاستضافةِ الخدمةِ.

تجلبُ كلّ رزمةٍ (packet) تأتي من الطالبِ قيمةَ المسافةِ الافتراضيّةِ التي عبرتها (virtual distance) والممثلة بعدد القفزاتِ بين المصدرِ والعقدةِ الحالية. تعطى الكلفةُ الناجمةُ عن الرزمةِ الواحدةِ بالعلاقة:

Communication cost= virtual distance * packet size

بينما تكونُ الكلفةُ الكليّةُ الناتجةُ عن الطلباتِ المولّدةِ من العقدةِ الزبونِ إلى العقدةِ المخدّمِ خلال زمنٍ معطى هي مجموع

الكلفِ النّاتجةِ عن جميعِ الرزمِ المولّدة من قبلِ هذه العقدةِ إلى المخدّم.

يعودُ قرارُ النسخِ إلى الخدمةِ ذاتها فهي تعملُ بشكلٍ تلقائيّ ضمن العقدةِ وتراقبُ الحمل وتجمعُ المعلومات الإحصائيّة، ثمّ تقوم باتّخاذِ القرارِ المناسبِ، إذ يتمّ تبادلُ معلوماتِ البنيةِ عن طريقِ الرزمِ نفسها المكوّنةِ للطلباتِ الواردةِ من الزبائنِ.

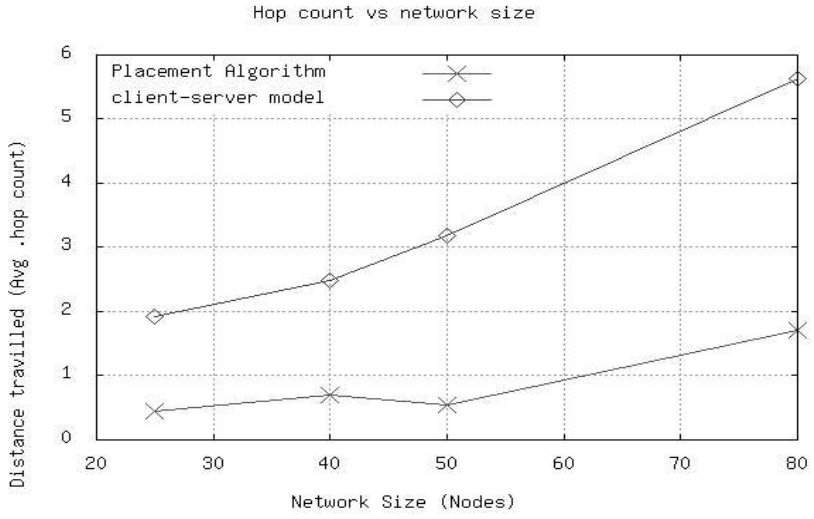
تجمعُ في العقدةِ المخدّمِ المعلوماتِ الإحصائيّةِ المتعلّقةِ بالزبائنِ ومعلوماتِ العقدةِ الأخيرةِ التي وردت منها الطلباتُ ( last hop)، ثمّ يتمّ انتخابُ العقدةِ التي وردَ منها أكبرُ حجم من الطلباتِ لتصبحَ مزوّداً للخدمةِ نفسها. تعتبر المعلوماتُ الإحصائيّة مقاييس خاصّة تسهمُ في اتّخاذِ قرارِ التوضيعِ الأمثل، وتتضمّنُ القيمَ الآتية:

- عدد الطلبات (Request count).
- عدد القفزات أو المسافة ((Hop count(distance).
- عنوان آخر عقدة مرّرت الطلب (Address of last hop).
- معدّل نقل المعطيات Data rate(kb/s).
- حجم الرزمة مقدّراً بالبايت ((Packet size(byte ).

عندما يتمّ اتّخاذ القرارِ بنسخِ الخدمةِ إلى مخدّمٍ جديدٍ تقومُ العقدةُ الأصليّةُ بتنبيهِ جميع العقدِ من أجلِ تحديثِ الذاكرةِ لديها وإضافةِ قيمةِ المخدّم الجديدِ إليها. وفي حال تمّ اتّخاذُ القرارِ بحلّ الخدمةِ في العقدةِ الأصليّة. يتمّ إعلامُ العقدِ الأخرى أيضاً من أجل حذفِ هذهِ العقدةِ من القائمةِ الموجودةِ لديها.

**5- النتائجُ والمناقشة:**

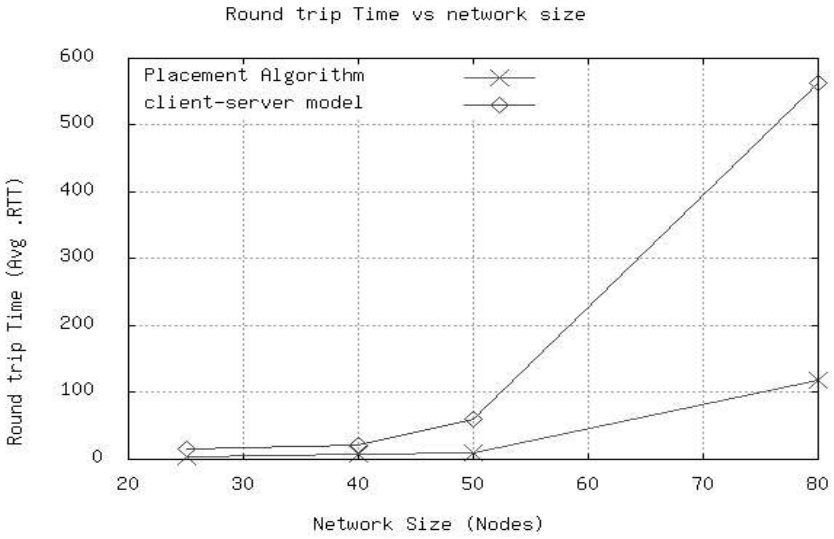
قمنا من أجلِ تقييمِ الخوارزميّةِ المقترحةِ بتنفيذها ضمنَ المحاكي ns-3 ومقارنةِ نتائجِ تطبيقها مع الحالةِ العامّةِ في نموذجِ (مخدّم / زبون) دون تطبيقِ خوارزميّةِ التوضيعِ ضمن العقدِ.



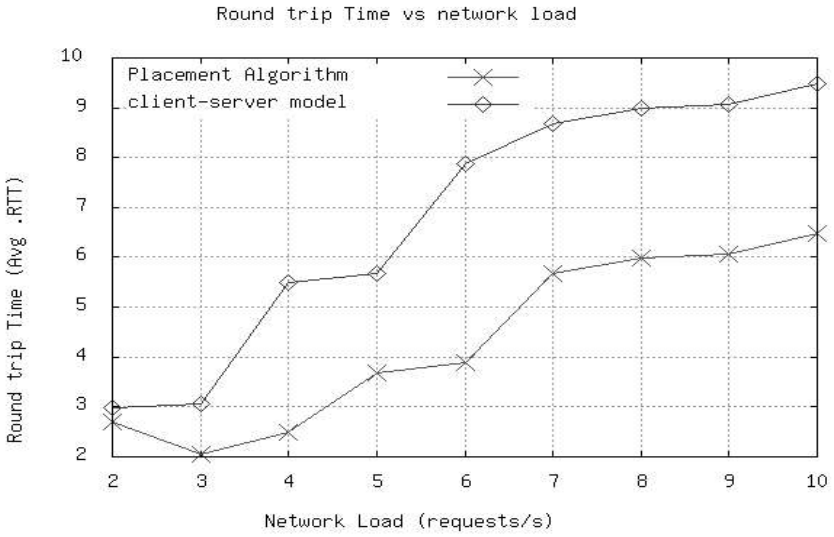

**الشكل رقم (3): العدد الوسطي للقفزات التي تعبرها الطلبات على الخدمات بالنسبة لأحجام مختلفة للشبكة**

تمّ استخدامُ الإصدارِ 3.29 من المحاكي ns من أجلِ نمذجةِ بنى شبكاتٍ بحجومٍ مختلفةٍ من ناحيةِ أعدادِ العقدِ المشاركةِ في المحاكاةِ (25، 40، 50، 80)، ومن أجلِ قيمِ أحمالٍ مختلفةٍ. تمّ توزيعُ العقدِ بشكلٍ عشوائي ضمن الشبكةِ وتطبيقِ المحاكاةِ لمدّةٍ زمنيّةٍ بعد الاختيارِ العشوائيّ للعقد المخدّمات في الشبكةِ. نلاحظُ ازديادَ عددِ المخدّماتِ خلال فترةِ المحاكاةِ عندَ تطبيق خوارزميّةِ التوضيعِ نتيجةَ القيامِ بنسخِ الخدمةِ إلى مواقع قريبةٍ من الزبائن مع مراعاةِ عدمِ تجاوزِ كلفةِ الاتصالاتِ لعتبةٍ محدّدةٍ عند القيامِ بعمليةِ النسخِ وقدرةِ العقدةِ المختارةِ على استضافةِ الخدمةِ.

يُظهرُ الشكلُ (3) وكنتيجةٍ لتطبيقِ خوارزميّةِ التوضيعِ وتوزيعِ نسخ الخدمةِ ضمن مواقع قريبةٍ من الزبائنِ أنّ القيمةَ الوسطيّةَ للمسافةِ الافتراضيّةِ أي عدد القفزاتِ بينَ الزبائنِ والمخدماتِ هي أصغرُ منها في حالةِ المحاكاةِ ضمنَ نفس الشروطِ في الحالةِ العامّةِ دون استخدامِ خوارزميّةِ التوضيعِ.




**الشكل رقم (4): الزمن الوسطي (RTT) لتلبية الطلبات على الخدمات بالنسبة لأحجام مختلفة للشبكة**

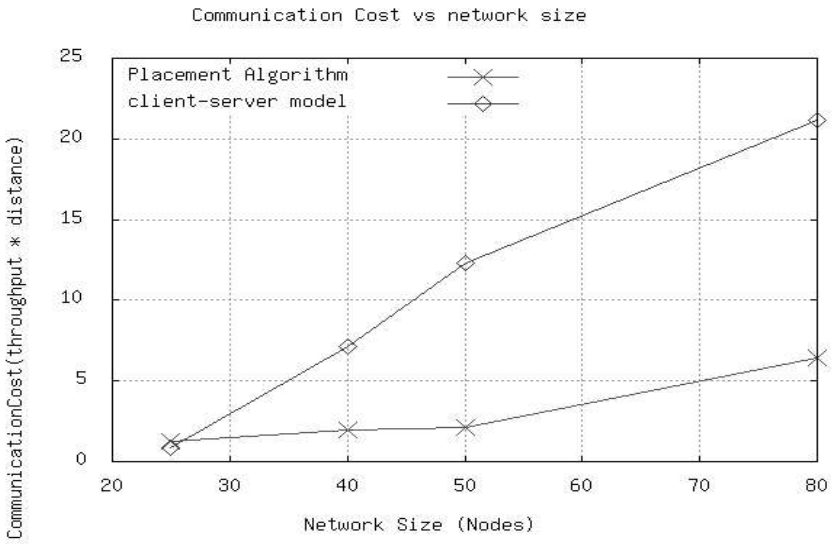



**الشكل رقم (5): الزمن الوسطي(RTT) لتلبية الطلبات على الخدمات بالنسبة لقيم أحمال مختلفة ضمن الشبكة**

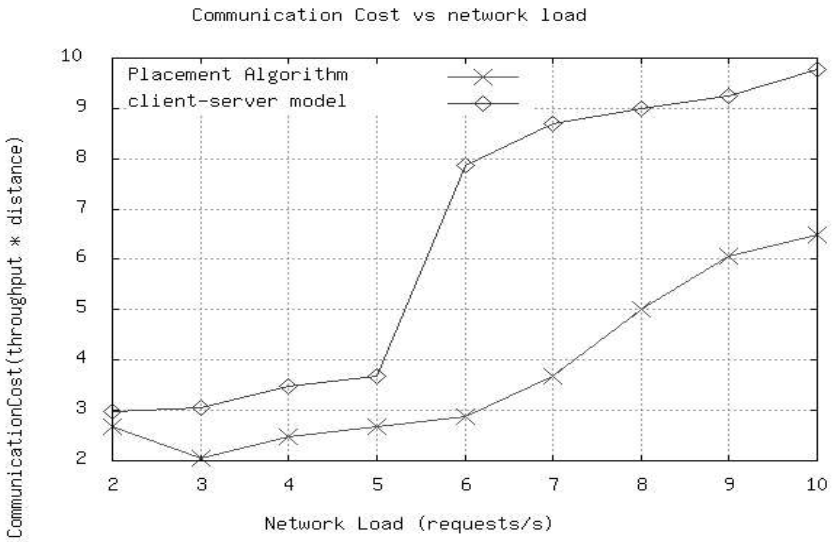
يبيّنُ الشكلانِ (4) و (5) أنّ خوارزميّة التوضيعِ الحيوية المقترحةِ تسهمُ في إنقاصِ زمنِ تلبيةِ الخدمةِ RTT(round trip time) بمعدّل 21% تقريباً من أجلِ أحجامِ شبكاتٍ مختلفةٍ وقيم أحمالٍ مختلفةٍ، وبالتالي تحقّقُ تحسيناً في الأداءِ.

قمنا أيضاً في الأشكالِ(6) و(7) بتقييمِ كلفةِ الاتصالِ بين الزبائنِ والمخدّماتِ وفقاً لمعيار عرض الحزمة، ورسمِ منحني هذهِ الكلفةِ من أجلِ حجومِ شبكاتٍ مختلفةٍ وقيم أحمالٍ مختلفةٍ في حالةِ تطبيقِ خوارزميّةِ التوضيعِ والحالةِ العامّةِ. أثبتتِ النتائجُ

أنّ هذهِ الكلفةَ أصغرَ بمقدارِ 26% من مثيلتها في حالةِ عدم تطبيقِ خوارزميّة التوضيعِ.

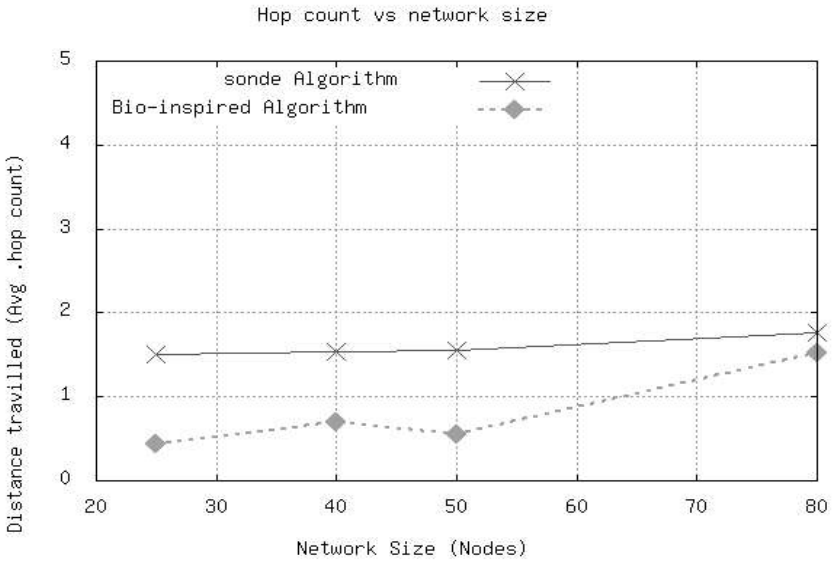



**الشكل رقم (6): كلفة الاتصال بين الزبائن والمخدمات بالنسبة لأحجام مختلفة للشبكة**

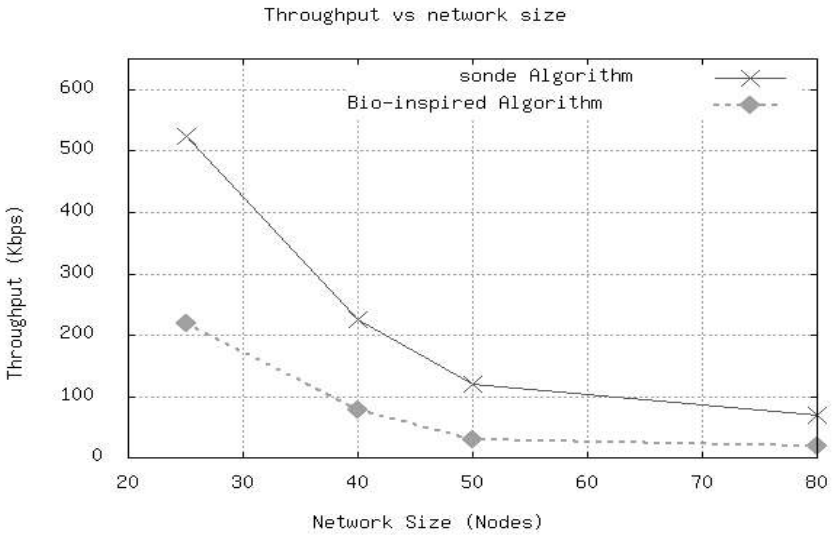



**الشكل رقم (7): كلفة الاتصال بين الزبائن والمخدمات بالنسبة لقيمِ أحمالٍ مختلفةٍ للشبكة**

قمنا أخيراً بمقارنة أداء الخوارزمية المقترحة مع خوارزمية (SONDE)، إحدى الخوارزميات الشهيرة في مجال توضيع الخدمات والتي تمّت الإشارة إليها في الدراسة المرجعية. فمن أجلِ حجومِ شبكاتٍ مختلفةٍ أثبتتِ النتائجُ أنّ العدد الوسطي للقفزات التي تعبرها الطلبات مستقر في كلتا الخوارزميتين، ويكون في الخوارزمية المقترحة أقل منه بالنسبة الى نظيره في خوارزمية (SONDE) وبالتالي كلفة الاتصالات أقل. تمّت المقارنة أيضاً وفقاً لمعيار عرض الحزمة المستخدم حيث يكون صغير جداً في الخوارزمية المقترحة مقارنةً مع (SONDE) كون الاخيرة تعتمد بشكل أساسٍ على الرسائل المتبادلة بين العقد من اجل اتخاذ قرار التوضيع. توضح الأشكال (8) و (9) نتائج المقارنة بين الخوارزميتين السابقتين.




**الشكل رقم (8): العدد الوسطي للقفزات التي تعبرها الطلبات على الخدمات بالنسبة لأحجام مختلفة للشبكة في حال تطبيق خوارزمية (SONDE) والخوارزمية المقترحة**




**الشكل رقم (9): عرض الحزمة المستخدم بالنسبة لأحجام مختلفة للشبكة في حال تطبيق خوارزمية (SONDE) والخوارزمية المقترحة**

### 6- الاستنتاجات والتوصيات:

قمنا في هذا البحث بتطويرِ خوارزميةٍ حيويةٍ ذاتيّةِ التأقلمِ من أجل تحقيق التوزيع المثالي للخدمات ضمن الشبكة من خلال نسخها إلى مواقع قريبة من الزبائن، بهدف إنقاص الكلفة الناجمة عن الاتصالات بين العقد الزبائن والمخدمات.

قدّم هذا البحثُ في قسمهِ الأوّل دراسةً لمسألة توضيعِ الخدمات وبعض الدراساتِ المرجعيّةِ ضمن هذا المجالِ، وفي قسمهِ الثاني قدّم توصيفاً رياضياً للمسألة من خلال نمذجة تابع الكلفة كتابعٍ لإيجاد الحل الأمثل بإنقاص المسافة التي تعبرها الطلبات المقدّمة من الزبائن (عدد القفزات). استعرض البحث في القسم الثالث الخوارزميّة الحيويّةً المقترحة والمستوحاة من سلوكِ النمل. بيّنتِ الدراسةُ التجريبيةُ والنتائجُ أنّ هذه الخوارزميّةَ تنجزُ توضيعَ الخدماتِ بطريقةٍ مثاليّةٍ تُسهمُ في إنقاصِ الكلفةِ

(عرضِ الحزمةِ المستخدمِ)، من حيثُ أنّها تقومُ بنسخِ الخدماتِ إلى مواقعَ قريبةٍ من الزبائنِ ومن ناحيةِ زمن الاستجابة، إلّا أنّها لا تأخذُ بالحسبانِ حالةَ وجودِ أكثرِ من خدمةٍ ضمنَ الشبكةِ تتنافسُ على المصادر المتوفّرة في العقدِ، كما أنّ تقسيم الشبكة إلى بنى فرعية ووجود خدمة مديرة تنسق بين الخدمات والعقد محليّاً يمكنُ أن يحقّق تحسيناً ملحوظاً في الأداءِ، وهذا ما سيتمّ تناولهُ في الدراساتِ والأبحاثِ المستقبليّةِ ضمنَ مجالِ توضيعِ الخدماتِ في الشبكاتِ المستقبليّةِ.

**المراجـــع:**


1) ALI, S & MITSCHELE-THIEL, A & DIAB, A. (2011)- A Survey of Services Placement Mechanisms for Future Mobile Communication Networks, 1-5p.
2) Diestel, R.: Graph Theory, Graduate Texts in Mathematics, vol. 173, 5th edn. Springer, Berlin (2017). https://doi.org/10.1007/978-3-662-53622-3
3) Donassolo, B., Fajjari, I., Legrand, A., & Mertikopoulos, P. (2019). Fog Based Framework for IoT Service Provisioning. 2019 16th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC), 1–6.
4) Eric Bonabeau, Marco Dorigo, and Guy Theraulaz. Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems. Oxford University Press, New York, NY, 1999.
5) GRAMOLI, V & KERMARREC, A & ATLANTIQUE, I. B. (2008)- SONDe, a Self-Organizing Object Deployment Algorithm in Large-Scale Dynamic Systems. 163–172p.
6) HACHEM, J & KARAMCHANDANI, N & DIGGAVI, S, (2015)- Content Caching and Delivery over Heterogeneous Wireless Networks, IEEE INFOCOM 2015-IEEE Conference on Computer Communications, (3), 756–764p.
7) LAOUTARIS, N , SMARAGDAKIS, G, OIKONOMOU, K.(2007)-Distributed Placement of Service Facilities in Large-Scale Networks. IEEE Communications Society subject, 2144–2152p.
8) MACKENZIE, C. M & LASKEY,K MCCABE,F & BROWN,P & Metz, R & Hamilton ,B.(2006)- Reference Model for Service Oriented Architecture 1.0. OASIS Standard, 31p.
9) Martin, R. M., Inmaculada, K., & Palomo-lozano, F. (2019). An evolutionary hybrid search heuristic for monitor placement in communication networks. Journal of Heuristics. https://doi.org/10.1007/s10732-019-09414-z
10) POULARAKIS, K & LLORCA, J & TULINO, A. M & TAYLOR, I & TASSIULAS, L.(2019)- Joint Service Placement and Request Routing in Multi-cell Mobile Edge Computing Networks. IEEE INFOCOM 2019-IEEE Conference on Computer Communications, 10–18p.
11) RAMIRO,J & HAMIED,K.(2012)-self-organizing networks, self-planning,self-optimization, and self-healing for gsm, umts and lte. John Wiley, J & Sons, Ltd.,Publication, 309p.

12) Sahoo, J., Salahuddin, M. A., Glitho, R., Elbiaze, H., & Ajib, W. (2016). A Survey on Replica Server Placement Algorithms for Content Delivery Networks.

13) WITTENBURG, G.(2010)– Service Placement in Ad Hoc Networks, Doctoral Dissertation, freie Universität Berlin, 219p.

14) NS–3 web site available on: https://www.nsnam.org/.