Task Offloading in Fog Computing for IoT Applications

Obada Hatem *
Dr. Ahmed Saker Ahmed **
Dr. Ali Esmaeel ***

(Received 28 / 4 / 2026. Accepted 21 / 5 / 2026)

□ ABSTRACT □

The rapid expansion of the Internet of Things has led to an unprecedented number of connected devices generating massive amounts of data requiring real-time processing. Traditional cloud computing architectures often fail to meet these demands due to high latency and limited bandwidth. Fog computing has emerged as a promising solution that extends cloud capabilities to the network edge through intermediate fog nodes. In fog environments, task offloading enables resource-constrained IoT devices to transfer computational workloads to more powerful fog nodes or cloud servers. This paper presents a simulation-based comparative analysis of three task processing architectures: cloud-only processing, fog processing without task offloading, and fog processing with task offloading. Performance is evaluated using latency, energy consumption, and network utilization across 100 to 750 IoT devices. Results show that fog with offloading achieves 59% lower latency and 77% lower energy consumption compared to cloud-only processing at 750 devices. However, offloading increases network usage by 50% within the fog layer. This trade-off is justified by significant performance improvements for time-sensitive IoT applications.

Keywords: Fog Computing - Internet of Things - Fog Nodes – Task Offloading.

Copyright **:**Latakia University journal (formerly Tishreen) -Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

* **PhD Student- Department of Computer Systems and Networks - Faculty of Information Engineering- Latakia University (formerly Tishreen)- Latakia - Syria -Email Address : obada.hatem@latakia-univ.edu.sy**
** **Professor- Department of Computer Systems and Networks Engineering - Faculty of Information Engineering - Latakia University (formerly Tishreen)- Latakia – Syria-Email Address : ahmad.s.ahmad@latakia-univ.edu.sy**
*** **Associate Professor - Department of Computer Systems and Networks Engineering - Faculty of Information Engineering - Latakia University (formerly Tishreen)- Latakia – Syria. Email Address aliesmaeel@latakia-univ.edu.sy**

تفريغ المهام في الحوسبة الضبابية لتطبيقات إنترنت الأشياء

عباده حاتم *

د. أحمد صقر أحمد **

د.علي اسماعيل ***

(تاريخ الإيداع 28 / 4 / 2026. قُبِل للنشر في 21 / 5 / 2026)

ملخّص

أدى التوسع السريع لإنترنت الأشياء إلى ظهور عدد غير مسبوق من الأجهزة المتصلة التي تولد كميات هائلة من البيانات التي تتطلب معالجة فورية. غالبًا ما تعجز بنى الحوسبة السحابية التقليدية عن تلبية هذه المتطلبات نظرًا لارتفاع زمن الاستجابة ومحدودية النطاق الترددي. وقد برزت الحوسبة الضبابية كحل واعد يوسع إمكانيات الحوسبة السحابية إلى حافة الشبكة عبر عقد ضبابية وسيطة. في بيئات الحوسبة الضبابية، يُمكّن تفريغ المهام أجهزة إنترنت الأشياء ذات الموارد المحدودة من نقل أحمال العمل الحسابية إلى عقد ضبابية أو خوادم سحابية أكثر قوة. تقدم هذه الورقة البحثية تحليلًا مقارنًا قائمًا على المحاكاة لثلاث بنى لمعالجة المهام: المعالجة السحابية فقط، والمعالجة الضبابية بدون تفريغ المهام، والمعالجة الضبابية مع تفريغ المهام. تم تقييم الأداء باستخدام زمن التأخير واستهلاك الطاقة واستخدام الشبكة عبر ما بين 100 و750 جهازًا من أجهزة إنترنت الأشياء. تُظهر النتائج أن الحوسبة الضبابية مع تفريغ المهام تحقق زمن تأخير أقل بنسبة 59% واستهلاكًا أقل للطاقة بنسبة 77% مقارنةً بالمعالجة السحابية فقط عند 750 جهازًا. مع ذلك، يؤدي تفريغ البيانات إلى زيادة استخدام الشبكة بنسبة 50% ضمن طبقة الضباب. ويُبرر هذا التنازل بتحسينات الأداء الكبيرة لتطبيقات إنترنت الأشياء الحساسة للوقت.

الكلمات المفتاحية: الحوسبة الضبابية – انترنيت الأشياء – عقد ضبابية–تفريغ المهام.

حقوق النشر : مجلة جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً)– سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص CC BY–NC–SA 04

* طالب دكتوراه – قسم هندسة النظم والشبكات الحاسوبية – كلية الهندسة المعلوماتية – جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً) – اللاذقية – سورية – البريد الالكتروني obada.hatem@latakia-univ.edu.sy

** استاذ– قسم هندسة النظم والشبكات الحاسوبية – كلية الهندسة المعلوماتية – جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً) – اللاذقية – سورية– البريد الالكترونيahmad.s.ahmad@latakia-univ.edu.sy

*** أستاذ مساعد– قسم هندسة النظم والشبكات الحاسوبية – كلية الهندسة المعلوماتية – جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً) – اللاذقية – سورية – البريد الالكترونيaliesmaeel@latakia-univ.edu.sy

مقدمة:

شهد إنترنت الأشياء نموًا سريعًا في السنوات الأخيرة، مع انتشار مليارات الأجهزة المتصلة في المدن الذكية، وأنظمة الرعاية الصحية، والبيئات الصناعية، وشبكات النقل. تُولّد هذه الأجهزة باستمرار كميات هائلة من البيانات التي تتطلب معالجة فورية لدعم اتخاذ القرارات في الوقت الفعلي. غالبًا ما تواجه بنى الحوسبة السحابية التقليدية، التي تُركّز الحوسبة والتخزين في مراكز بيانات بعيدة، صعوبة في تلبية هذه المتطلبات بسبب زمن الاستجابة العالي وازدحام الشبكة الناتج عن الاتصال لمسافات طويلة بين الأجهزة وخوادم السحابة. ولمعالجة هذه التحديات، برزت الحوسبة الضبابية كنموذج حوسبة موزعة يُوسّع قدرات الحوسبة السحابية بإضافة عُقد وسيطة، تُسمى عُقد الضباب، تقع بالقرب من حافة الشبكة. تُوفّر هذه العُقد موارد الحوسبة والتخزين والشبكات، مما يُتيح معالجة البيانات بالقرب من مصدرها. ونتيجةً لذلك، تُقلّل الحوسبة الضبابية زمن استجابة الاتصال، وتُخفّض استهلاك النطاق الترددي، وتُحسّن استجابة التطبيقات الحساسة لزمن التأخير. يتكون هذا النموذج عادةً من ثلاث طبقات: طبقة إنترنت الأشياء، التي تشمل أجهزة الاستشعار والأجهزة الذكية؛ طبقة الضباب، التي تشمل البوابات وخوادم الحافة والموجهات؛ وطبقة السحابة، التي توفر الحوسبة واسعة النطاق والتخزين طويل الأمد [1].

في مجال الحوسبة الضبابية، يُعدّ تفريغ المهام نمط تشغيل تُفوّض فيه أجهزة إنترنت الأشياء مهام الحوسبة إلى عُقد الضباب القريبة أو خوادم السحابة. يُقلّل التفريغ من عبء المعالجة على الأجهزة ذات الموارد المحدودة، مما يُتيح تنفيذ المهام بواسطة بنية تحتية أكثر كفاءة. في المقابل، يُمكن للحوسبة الضبابية العمل بدون تفريغ المهام، حيث تُرسل الأجهزة جميع المهام مباشرةً إلى عُقد الضباب دون معالجة وسيطة في عُقد الضباب المجاورة. لكل نمط خصائصه وتأثيراته على أداء النظام [2].

في بيئة الحوسبة الضبابية المستقلة عن تفريغ المهام، تُولّد أجهزة إنترنت الأشياء البيانات وتُرسلها إلى عُقد الضباب، حيث تُعالج كل عُقدة ضباب جميع المهام التي تتلقاها محليًا. قد يؤدي هذا النهج إلى زيادة استهلاك الطاقة، حيث تستنفد الأجهزة طاقة بطارياتها المحدودة لمعالجة المهام. كما قد ينتج عنه أوقات معالجة أطول للمهام المعقدة أو كثيفة الحساب [3].

في المقابل، تستفيد الحوسبة الضبابية التي تعتمد على تفريغ المهام من قوة الحوسبة لعُقد الضباب. في هذا الوضع، تُفوّض أجهزة إنترنت الأشياء المهام إلى عُقد الضباب القريبة لتنفيذها. يُقلّل هذا من عبء المعالجة على الأجهزة، ويؤدي غالبًا إلى تقليل زمن التأخير، لا سيما للتطبيقات الحساسة للوقت. كما يسمح هذا الوضع لطبقة الضباب بالعمل كمرحلة معالجة وسيطة قبل إرسال البيانات إلى السحابة. ويؤثر اختيار هذا الوضع على معايير النظام، مثل وقت تنفيذ المهام، واستهلاك الطاقة، والاستخدام الكلي للموارد [4].

تركز هذه الدراسة على أهمية هذا الوضع في شبكة الضباب لتطبيقات إنترنت الأشياء، وتحلل تأثير وجوده على زمن التأخير ، واستهلاك الطاقة، واستخدام موارد الشبكة.

أهمية البحث وأهدافه:

تتلخص المساهمات الرئيسية لهذه الورقة البحثية فيما يلي:

تحليل مقارن قائم على المحاكاة: مقارنة منهجية لثلاثة بنى لمعالجة المهام لتطبيقات إنترنت الأشياء – المعالجة السحابية فقط، ومعالجة الضباب بدون تفريغ المهام، ومعالجة الضباب مع تفريغ المهام – في ظل ظروف تجريبية متطابقة.

تقييم قابلية التوسع: تقييم كمي لأداء النظام مع زيادة عدد أجهزة إنترنت الأشياء (100، 250، 500، و750 جهازًا)، مما يوفر رؤى حول كيفية توسع كل بنية مع زيادة حجم العمل.

تقييم الأداء متعدد المقاييس: تحليل تجريبي لثلاثة مقاييس أداء رئيسية – زمن التأخير ، واستهلاك الطاقة، واستخدام الشبكة – عبر البنى الثلاث.

إطار محاكاة قابل للتكرار: نموذج محاكاة كامل مُنفذ بلغة جافا، مع توثيق جميع البارمترات والإجراءات التجريبية لضمان إمكانية التكرار.

طرائق البحث ومواده:

تستخدم هذه الدراسة إطار محاكاة قائم على لغة جافا لنمذجة بنية ضبابية ثلاثية الطبقات تتضمن أجهزة إنترنت الأشياء، وخمس عقد ضبابية (بمعدل 4000 مليون عملية حسابية في الثانية لكل منها)، وخادم سحابي (بمعدل 16000 مليون عملية حسابية في الثانية). وتقارن الدراسة ثلاثة سيناريوهات: المعالجة السحابية فقط، والضبابية بدون تفريغ، والضبابية مع تفريغ باستخدام سياسة ديناميكية تراعي عبء العمل (تفريغ عندما يتجاوز استخدام وحدة المعالجة المركزية 70%). أُجريت التجارب باستخدام 100، و250، و500، و750 جهاز إنترنت أشياء لتوليد مهام (من 100 كيلوبايت إلى 10 ميجابايت، ومن 500 إلى 5000 مليون عملية حسابية في الثانية). يسجل كل محاكاة مدتها 60 ثانية متوسط زمن التأخير (بالمللي ثانية)، وإجمالي الطاقة (بالجول)، واستخدام الشبكة (بالكيلوبايت) لتقييم الأداء.

1-الدراسات المرجعية:

ركزت العديد من الدراسات على تفريغ المهام في بيئات الحوسبة السحابية، ولا سيما دورها مقارنةً بالمعالجة المحلية. تُقدم هذه الدراسات رؤى تحليلية حول كيفية تفاعل تفريغ المهام مع بنى الحوسبة السحابية وتأثيره على مؤشرات الأداء مثل زمن التأخير ، واستهلاك الطاقة، وتوزيع الحمل الحسابي.

عرض الباحثون في [5] بحثًا حول الترحيل الحسابي الآمن في بيئات الحوسبة السحابية، موضحين كيف أن ترحيل المهام من الأجهزة المحمولة إلى خوادم الحوسبة السحابية أمرٌ أساسي لتلبية متطلبات جودة الخدمة في أنظمة إنترنت الأشياء الحساسة لزمن الاستجابة. كما سلطت الدراسة الضوء على اعتبارات إضافية، مثل الأمن والسلامة، التي قد تؤثر على قرارات الترحيل وسلوك النظام. وبينما ينصب التركيز الأساسي على الأمن، أوضحت مناقشة الورقة البحثية أن ترحيل المهام يُعد مكونًا تشغيليًا أساسيًا للحوسبة السحابية، وهو أمر بالغ الأهمية لدعم متطلبات أداء تطبيقات إنترنت الأشياء.

وقدّمت ورقة بحثية أخرى [6] منظورًا جديدًا لتفريغ المهام في سياق الحوسبة السحابية للمركبات، حيث يمكن تفريغ بعض العمليات الحسابية المتعلقة بأنظمة النقل الذكية إلى وحدات على جانب الطريق أو مركبات قريبة. أظهرت هذه الدراسة كيف يمكن للتفريغ تقليل زمن التأخير الإجمالي مقارنةً بالتنفيذ المحلي في بيئات إنترنت الأشياء عالية التنقل. وأكدت أن الاختيار بين التنفيذ المحلي والتفريغ يؤثر بشكل مباشر على استجابة النظام في سيناريوهات إنترنت الأشياء القائمة على الحوسبة الضبابية، لا سيما عندما تكون الاستجابة في الزمن الحقيقي بالغة الأهمية، كما هو الحال في القيادة الذاتية.

تم تسليط الضوء في دراسة أخرى [7] على دور عقد الحوسبة الضبابية في معالجة مهام إنترنت الأشياء لتقليل زمن التأخير والحفاظ على موارد الأجهزة، مقارنةً بنماذج الحوسبة السحابية المركزية. وأظهرت الدراسة أن تفريغ العمليات يؤدي إلى كفاءة في استهلاك الطاقة في الحوسبة الضبابية، وأكدت تحليليًا أن إجراءات التفريغ تُغير بشكل جذري مكان وكيفية حدوث الحوسبة في أنظمة الحوسبة الضبابية، على عكس التطبيقات المحلية أو السحابية فقط.

في [8]، حققت المعالجة على طبقة الحوسبة الضبابية – من خلال تفريغ المهام – زمن تأخير أقل وحملًا أقل على الشبكة مقارنةً بالمعالجة السحابية المركزية، مما يؤكد أن موقع التنفيذ سمة أساسية لأنظمة الحوسبة الضبابية.

في [9] وصف الباحثون بنى الحوسبة الضبابية وعرّفوا تفريغ المهام بأنه نقل العمليات الحسابية من نقاط نهاية إنترنت الأشياء إلى عقد الحوسبة الضبابية لتقليل زمن التأخير واستهلاك الطاقة. وقد أرست هذه الدراسة فهمًا أساسيًا لعملية التفريغ ، والعوامل المؤثرة فيها (مثل نسب التفريغ ومراحل اتخاذ القرار)، وكيفية تنفيذها ضمن أنظمة الحوسبة الضبابية. كما استكشفت الدراسة كيف يُخفف التفريغ من مشكلات زمن التأخير الشائعة في الحوسبة السحابية من خلال تقريب العمليات الحسابية من أجهزة إنترنت الأشياء.

على الرغم من المساهمات القيّمة لهذه الدراسات، لا تزال هناك فجوات بحثية عديدة. أولًا، تركز معظم الأعمال الحالية إما على بنى الحوسبة السحابية فقط أو الحوسبة الضبابية فقط، دون تقديم مقارنة مباشرة ومضبوطة بين الحوسبة الضبابية مع تفريغ المهام، والحوسبة الضبابية بدون تفريغ المهام، والمعالجة السحابية فقط في ظل ظروف متطابقة. ثانيًا، لم يتم فحص قابلية توسع آليات تفريغ المهام مع ازدياد عدد أجهزة إنترنت الأشياء (من 100 إلى 750 جهازًا) بشكل كافٍ، لذلك تتناول هذه الورقة البحثية هذه الفجوات من خلال تقديم مقارنة منهجية قائمة على المحاكاة لثلاث بنى: المعالجة السحابية فقط، ومعالجة الحوسبة الضبابية بدون تفريغ المهام، ومعالجة الحوسبة الضبابية مع تفريغ المهام. تقوم الدراسة بقياس زمن التأخير واستهلاك الطاقة واستخدام الشبكة عبر 100 و250 و500 و750 جهاز إنترنت الأشياء، مما يوفر رؤى تجريبية حول فوائد ومقايضات تفريغ المهام في بيئات الحوسبة الضبابية.

2-تعريف الحوسبة الضبابية:

الحوسبة الضبابية هي نموذج حوسبة موزعة يوسع إمكانيات الحوسبة السحابية لتشمل حافة الشبكة، وذلك بنشر عقد ضبابية مزودة بموارد معالجة وتخزين وشبكات بالقرب من أجهزة إنترنت الأشياء. على عكس الحوسبة السحابية التقليدية، التي تعاني من زمن تأخير عالٍ نتيجة نقل البيانات لمسافات طويلة، تُمكّن الحوسبة الضبابية من معالجة البيانات بزمن استجابة منخفض لتطبيقات إنترنت الأشياء الحساسة للوقت. تتطلب معظم تطبيقات إنترنت الأشياء معالجة فورية، مثل أنظمة المراقبة والأمن والحماية من الحرائق، حيث يمكن أن يؤدي أي عطل إلى عواقب وخيمة. لذلك، فإن الاعتماد كليًا على الحوسبة السحابية لإدارة هذه الأنظمة غير عملي [10]، كما يظهر الشكل (1):

الشكل (1) الحوسبة الضبابية

على الرغم من أن مصطلح الحوسبة الضبابية صاغته شركة سيسكو [11] في الأصل، حيث عرّفته بأنه مجموعة من الأجهزة غير المتجانسة الموزعة على مواقع متعددة دون وجود عقدة معالجة مركزية، توفر خدمات المعالجة والتخزين الفورية للمستخدمين سواء بمساعدة طرف ثالث أو بدونها، فقد تم تعريف الحوسبة الضبابية من قبل العديد من الباحثين والمنظمات من وجهات نظر مختلفة. (يي وآخرون). [12] قدّم تعريفًا عامًا للحوسبة الضبابية بأنها "بنية حوسبة موزعة جغرافيًا، تتألف من مجموعة موارد تضم جهازًا واحدًا أو أكثر من الأجهزة غير المتجانسة المتصلة في جميع أنحاء حافة الشبكة، وغير مدعومة تحديدًا بخدمات الحوسبة السحابية، وذلك لتوفير حوسبة وتخزين واتصال مرنة في بيئات معزولة لعدد كبير من العملاء المتقاربين". كما عرّف اتحاد OpenFog [13] الحوسبة الضبابية بأنها "بنية أفقية على مستوى النظام، توزع موارد وخدمات الحوسبة والتخزين والتحكم والشبكات في أي مكان على امتداد سلسلة الحوسبة السحابية إلى الأشياء (Cloud2Things)".

3-تعريف تفريغ المهام :

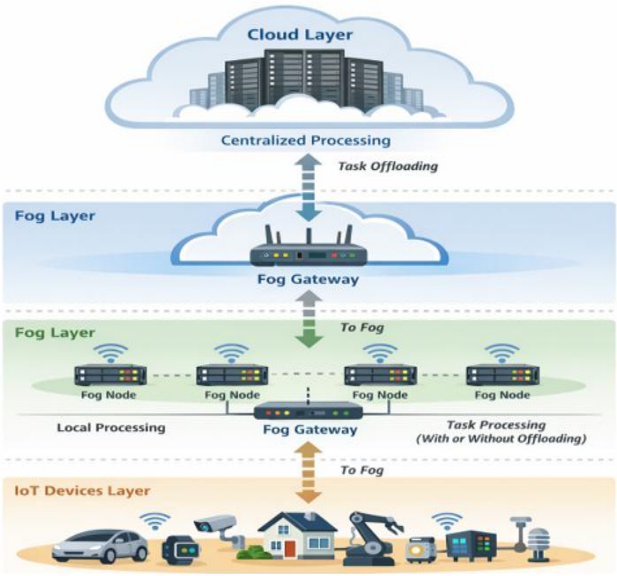
يُعدّ تفريغ المهام أحد الآليات المهمة لتحسين أداء أنظمة الحوسبة الضبابية. ويشير تفريغ المهام إلى عملية نقل المهام الحسابية من الأجهزة ذات الموارد المحدودة إلى عُقد حوسبة أكثر قوة، مثل عُقد الحوسبة السحابية أو خوادم الحوسبة السحابية. ومن خلال التوزيع الفعال للمهام عبر موارد الحوسبة المتاحة، يُسهم تفريغ المهام في تقليل تأخيرات المعالجة وتحسين أداء النظام. في بيئات الحوسبة الضبابية، تسمح تقنية تفريغ المهام لأجهزة إنترنت الأشياء بتفويض مهام المعالجة إلى عقد الحوسبة الضبابية القريبة. يمكن لهذا النهج أن يقلل زمن التأخير بشكل ملحوظ ويحسن كفاءة استهلاك الطاقة، لا سيما في الحالات التي تولد فيها أجهزة إنترنت الأشياء كميات هائلة من البيانات. مع ذلك، يُعد فهم كيفية تغير أداء النظام مع تقنية تفريغ المهام وبدونها أمرًا أساسيًا لتقييم أثرها العملي [14].

4-منهجية البحث:

4-1بنية النظام:

تعتمد بنية النظام المستخدمة في هذه الدراسة على نموذج الحوسبة الضبابية متعدد الطبقات، مصمم لدعم تطبيقات إنترنت الأشياء. تتكون هذه البنية من ثلاث طبقات رئيسية: طبقة إنترنت الأشياء، وطبقة الحوسبة الضبابية ، وطبقة الحوسبة السحابية. تعمل هذه الطبقات معًا لإدارة توليد البيانات ومعالجتها وتخزينها عبر الشبكة، كما هو موضح في الشكل (2).

1- طبقة إنترنت الأشياء: تمثل طبقة إنترنت الأشياء أدنى مستوى في بنية النظام، وتشمل مختلف أجهزة الاستشعار والأجهزة الذكية التي تولد البيانات وتجري العمليات الحسابية. من أمثلة هذه الأجهزة: أجهزة الاستشعار البيئية، والكاميرات الذكية، والأجهزة القابلة للارتداء، ومكونات البنية التحتية للمدن الذكية. عادةً ما تكون قدرة المعالجة والذاكرة وسعة البطارية لأجهزة إنترنت الأشياء محدودة. لذلك، تعتمد هذه الأجهزة على موارد حوسبة خارجية للتعامل مع المهام الحسابية المكثفة. في هذه البنية، تعمل أجهزة إنترنت الأشياء كمصادر رئيسية للبيانات التي تُرسل إلى طبقة الحوسبة الضبابية للمعالجة.



الشكل (2) (بنية النظام المستخدمة)

٢- طبقة الحوسبة الضبابية: تعمل طبقة الحوسبة الضبابية كوسيط بين أجهزة إنترنت الأشياء وخوادم الحوسبة السحابية. تتكون هذه الطبقة من عُقد ضبابية، قد تشمل بوابات، وموجهات، وخوادم طرفية، أو مراكز بيانات مصغرة تقع بالقرب من حافة الشبكة. توفر العُقد الضبابية موارد حوسبة تُمكّن من معالجة البيانات بالقرب من مصدرها، مما يقلل من زمن التأخير وازدحام الشبكة. من خلال معالجة المهام محليًا داخل طبقة الحوسبة الضبابية، يمكن للنظام دعم التطبيقات التي تتطلب زمن تأخير منخفض واستجابات فورية. في هذا البحث، تتولى العُقد الضبابية مسؤولية معالجة غالبية مهام الحوسبة التي تُولدها أجهزة إنترنت الأشياء. تقدم هذه الدراسة معالجة الحوسبة الضبابية في وضعين تشغيليين: مع وبدون تفريغ المهام.

3- طبقة الحوسبة السحابية: تمثل طبقة الحوسبة السحابية أعلى مستوى في بنية الشبكة، وتتألف من مراكز بيانات مركزية ذات قدرات حوسبة وتخزين هائلة. توفر خوادم الحوسبة السحابية قوة معالجة عالية وتخزينًا طويل الأمد للبيانات. على الرغم من أن الحوسبة السحابية توفر موارد حوسبة كبيرة، إلا أن الاتصال بخوادمها يؤدي عادةً إلى زيادة زمن التأخير نظرًا لطول مسافات الإرسال. لهذا السبب، تُستخدم الحوسبة الضبابية لمعالجة المهام بالقرب من حافة الشبكة مع الحفاظ على دعم الحوسبة السحابية عند الحاجة.

4- الربط الشبكي : يتم التواصل بين مكونات النظام عبر اتصالات شبكية تربط أجهزة إنترنت الأشياء وعُقد الحوسبة الضبابية وخوادم الحوسبة السحابية. تُرسل البيانات التي تُولدها أجهزة إنترنت الأشياء عبر الشبكة إلى عُقد الحوسبة الضبابية حيث تتم معالجتها.

4-2 أجهزة وتطبيقات إنترنت الأشياء:

في بيئة المحاكاة المقترحة، تمثل أجهزة إنترنت الأشياء أنظمة استشعار ذكية تُولّد تدفقات بيانات مستمرة تتطلب معالجة حاسوبية. تعمل هذه الأجهزة كمولدات رئيسية لأحمال العمل ضمن بنية الحوسبة الضبابية. تُرسل المهام التي تُولّدها هذه الأجهزة إلى عُقد ضبابية قريبة للمعالجة، مما يُتيح تحليل البيانات بزمن تأخير منخفض واتخاذ القرارات في الوقت الفعلي. ولتمثيل بيئات إنترنت الأشياء بشكل واقعي، تُحاكي الأجهزة في المحاكاة التطبيقات الشائعة في المدن الذكية والبيئات الذكية. تشمل هذه التطبيقات أجهزة استشعار مراقبة حركة المرور، وكاميرات المراقبة، وأجهزة استشعار مراقبة البيئة، وأجهزة الرعاية الصحية القابلة للارتداء. يُولّد كل جهاز بيانات استشعار بشكل دوري، والتي يجب معالجتها بواسطة بنية الحوسبة الضبابية. تُحاكي المهام التي تُولّدها البيانات أحمال عمل إنترنت الأشياء في العالم الحقيقي، مثل تحليل الصور من كاميرات المراقبة، ومعالجة البيانات البيئية من أجهزة الاستشعار، أو بيانات مراقبة الصحة من الأجهزة القابلة للارتداء. ضمن المحاكاة، يُولّد كل جهاز من أجهزة إنترنت الأشياء مهامًا حاسوبية ذات متطلبات محددة للمعالجة واستخدام الذاكرة والشبكات. تُرسل هذه المهام إلى عُقد ضبابية حيث تُعالج محليًا أو تُوزع عبر شبكة الحوسبة الضبابية، وذلك حسب وضع التشغيل للتجربة.

4-3 نموذج المهمة:

تتميز كل مهمة حسابية يُنشئها جهاز إنترنت الأشياء بمجموعة من الخصائص:

$$T = (d_i, c_i, t_i)$$

حيث:

d_i = حجم بيانات المهمة (كيلوبايتKB)

c_i = دورات المعالج المطلوبة (مليون تعليمةMI)

t_i = أقصى وقت انجاز مقبول (مللي ثانيةms) تُعتبر المهام التي تتجاوز موعدها النهائي متأخرة، وهو أمر بالغ الأهمية لتطبيقات إنترنت الأشياء الحساسة للوقت مثل القيادة الذاتية ومراقبة الرعاية الصحية.

الجدول (1) خصائص المهام لتطبيقات إنترنت الأشياء النموذجية

نوع التطبيق	البيانات لكل مهمة (كيلوبايت)	المهام في الثانية	استخدام الشبكة (750 جهازًا، 60 ثانية)
كاميرا مراقبة ذكية	500	1	22.5 جيجابايت
مستشعر درجة الحرارة	1	1	0.045 جيجابايت
جهاز مراقبة صحة القلب	100	10	450 جيجابايت
هذه الدراسة	500	1	22.5 جيجابايت

يوضح الجدول (1) خصائص مهام تتوافق مع تطبيقات إنترنت الأشياء، في هذه الدراسة تتبع معلمات المهام توزيعًا منتظمًا حيث $d_i \in [100, 10000]$ KB (بمتوسط 500 كيلوبايت) و $c_i \in [500, 5000]$ MI و $t_i \in [50, 500]$ ms , مما يمثل أحمال عمل واقعية لإنترنت الأشياء مثل معالجة الصور، وتجميع بيانات المستشعرات، ومراقبة الحالة الصحية.

4-4 بيئة المحاكاة:

لتقييم أداء الحوسبة الضبابية في ظل ظروف تشغيل مختلفة، تستخدم هذه الدراسة محاكي iFogSim، وهو إطار محاكاة واسع الانتشار مصمم لنمذجة وتقييم بيئات الحوسبة الضبابية. يُمكّن هذا المحاكي من تحليل إدارة الموارد، وتخصيص المهام، وسلوك التطبيقات في البنى التحتية الضبابية القائمة على إنترنت الأشياء. يُوسّع iFogSim إمكانيات CloudSim، مما يسمح بنمذجة بنى ضبابية هرمية تشمل أجهزة إنترنت الأشياء، وعُقد الحوسبة الضبابية، ومراكز بيانات الحوسبة السحابية. من خلال منصة المحاكاة هذه، يُمكن إنشاء سيناريوهات واقعية، ومراقبة أداء النظام في ظل تكوينات متنوعة. في هذه الدراسة، استُخدمت بيئة محاكاة لنمذجة بنية الحوسبة الضبابية التي تتكون من أجهزة إنترنت الأشياء، وعُقد الضباب، وخوادم الحوسبة السحابية. تُولّد أجهزة إنترنت الأشياء مهامًا حسابية تُرسل عبر الشبكة إلى عُقد الضباب للمعالجة. تُجري طبقة شبكة الضباب عمليات حسابية وسيطة، بينما تُوفر طبقة الحوسبة السحابية دعمًا حسابيًا وتخزينيًا إضافيًا حسب الحاجة. يسمح برنامج المحاكاة بضبط العديد من معايير النظام، بما في ذلك عدد أجهزة إنترنت الأشياء، والقدرات الحسابية لعُقد الضباب، وعرض النطاق الترددي بين الطبقات. من خلال التحكم في هذه المعايير، تُهيئ الدراسة ظروفًا تجريبية قابلة للمقارنة لكل وضع تشغيل: الحوسبة الضبابية مع تفريغ المهام، الحوسبة الضبابية بدون تفريغ المهام، و الحوسبة السحابية. أثناء المحاكاة، يُسجل النظام مقاييس الأداء المتعلقة بتنفيذ المهام واستخدام الموارد. ثم تُحلل هذه المقاييس لتقييم كيفية تأثير وجود أو غياب تفريغ المهام على أداء النظام في بيئة الحوسبة الضبابية [15].

4-5 مقاييس الأداء:

لتقييم أداء الحوسبة السحابية ،الحوسبة الضبابية مع وبدون تفريغ المهام ، تستخدم عدة مقاييس أداء في تجارب المحاكاة. توفر هذه المقاييس رؤى حول كفاءة معالجة المهام، واستهلاك الطاقة ، وأداء النظام بشكل عام.

4-5-1 التأخير:

إجمالي الوقت من إنشاء المهمة إلى إنجازها، بما في ذلك تأخير الإرسال، وتأخير الانتظار، وتأخير المعالجة،و يحسب بالعلاقة الرياضية التاليه[16]:

$$L_total = L_trans + L_queue + L_proc \quad (1)$$

حيث :

L_trans = d_i / B : زمن الإرسال (B = عرض النطاق الترددي بالميغابت في الثانية)

L_queue : زمن الانتظار في قائمة انتظار الحوسبة الضبابية/السحابية

L_proc = c_i / MIPS : تأخير المعالجة (MIPS = سرعة معالجة العقدة)

4-5-2 استهلاك الطاقة:

إجمالي الطاقة المستهلكة أثناء تنفيذ المهمة، بما في ذلك طاقة الإرسال وطاقة المعالجة، ويحسب بالعلاقة الرياضية الاتيه[16]:

$$E_total = E_trans + E_proc \quad (2)$$

حيث:

E_trans = P_trans × L_trans (طاقة الإرسال × الزمن)

E_proc = P_busy × L_proc (طاقة الانشغال: الطاقة التي تستهلكها العقدة أثناء معالجة المهام بنشاط × زمن المعالجة)

4-5-3 استخدام الشبكة:

إجمالي حجم البيانات المنقولة عبر الشبكة، وتحسب بالعلاقة الرياضية الاتيه:

$$U_{network} = \Sigma d_i \quad (3)$$

مجموع أحجام البيانات لجميع المهام المنقولة.

4-6 أنماط المحاكاة:

تم تقييم أداء الحوسبة السحابية والحوسبة الضبابية باستخدام ثلاث استراتيجيات متميزة لمعالجة المهام. تمثل هذه الاستراتيجيات مناهج معمارية مختلفة للتعامل مع أحمال عمل إنترنت الأشياء، وتُشكل أساسًا للتحليل المقارن في هذه الدراسة.

1- المعالجة السحابية: في سيناريو المعالجة السحابية، تُرسل جميع المهام التي تُنشئها أجهزة إنترنت الأشياء مباشرةً إلى مركز بيانات سحابي مركزي للتنفيذ. لا تُستخدم عُقد ضبابية في هذا التكوين. يقوم الخادم السحابي بتنفيذ جميع المهام الحسابية، مستفيدًا من قدرته العالية على المعالجة. مع ذلك، تُؤدي المسافة المادية بين أجهزة إنترنت الأشياء والخوادم السحابية إلى تأخيرات كبيرة في الاتصال. ونتيجةً لذلك، يُسجل هذا السيناريو عادةً أعلى زمن تأخير بين البنى الثلاث. يُمثل هذا التكوين بنية إنترنت الأشياء التقليدية التي تتمحور حول السحابة، ويُشكل أساسًا لتقييم فوائد الحوسبة الضبابية وتفريغ المهام.

2- المعالجة الضبابية بدون تفريغ المهام: في هذا السيناريو، تُرسل أجهزة إنترنت الأشياء مهامها المُنشأة إلى أقرب عقدة ضبابية للمعالجة. تقوم كل عقدة ضبابية بمعالجة جميع المهام الواردة محليًا باستخدام مواردها الحاسوبية المتاحة. لا يُسمح بإعادة توجيه المهام بين العقد الضبابية في هذا التكوين. ونتيجةً لذلك، تعمل كل عقدة ضبابية بشكل مستقل، وتعالج فقط المهام الواردة من أجهزة إنترنت الأشياء المرتبطة بها. مع ازدياد عدد أجهزة إنترنت الأشياء، يجب على كل عقدة ضبابية التعامل مع جميع المهام الواردة من أجهزتها المرتبطة بها دون توزيعها على عقد أخرى، مما قد يؤدي إلى زيادة الحمل عليها وتأخيرات في المعالجة.

3- المعالجة الضبابية مع تفريغ المهام: في السيناريو الثالث، يُسمح للعقد الضبابية بتفريغ المهام فيما بينها. عندما تتلقى عقدة ضبابية مهامًا من أجهزة إنترنت الأشياء، فإنها تراقب باستمرار عبء العمل الحالي وتوافر الموارد. إذا تجاوز استخدام وحدة المعالجة المركزية للعقدة عتبة محددة مسبقًا (مثل 70%) أو أصبح طابور المهام طويلًا جدًا، فإنها تُفرغ بعض المهام إلى عقد ضبابية أخرى ضمن طبقة الضباب. تُمكّن هذه الآلية من توزيع عبء العمل ديناميكيًا عبر بنية الضباب التحتية، مما يقلل من تأخيرات المعالجة ويُحسّن أداء النظام بشكل عام. يمثل هذا السيناريو بنية حوسبة ضبابية تعاونية، حيث تتعاون عقد الضباب لتحسين تنفيذ المهام والحفاظ على زمن تأخير منخفض في ظل ظروف ضغط العمل العالي.

تُطبّق هذه المعالجة سياسة تفريغ مهام ديناميكية تراعي عبء العمل في بيئة الضباب مع سيناريو التفريغ. تعمل السياسة على النحو التالي:

If F_current.current_load < THRESHOLD:(%70)

```
    Process T locally at F_current
Else:
    Find fog node F_target with minimum current_load
    Offload T to F_target
    Update network usage counter
```

حيث : لكل مهمة واردة T إلى عقدة الضباب F_current ، إذا كان الحمل الحالي لـ F_current أقل من العتبة (70%) فان المهمة T تعالج محليًا في F_current ، وإلا فانه يتم تحديد عقدة الضباب F_target ذات أقل حمل حالي و تُفرغ المهمة T إلى F_target وثم تُحدّث عداد استخدام الشبكة.

4-7 اعدادات المحاكاة:

يصف هذا القسم الإعدادات المستخدمة لإجراء تجارب المحاكاة في بيئة الحوسبة الضبابية. أُجريت التجارب باستخدام iFogSim، الذي يُتيح نمذجة وتقييم بنى إنترنت الأشياء والحوسبة الضبابية والحوسبة السحابية. تتكون بيئة المحاكاة من أجهزة إنترنت الأشياء التي تُولّد مهام حسابية، وعُقد ضبابية تُعالج هذه المهام، ومركز بيانات سحابي يُوفر موارد حوسبة إضافية. أُجريت التجارب في ثلاثة أوضاع تشغيل: الحوسبة السحابية، والحوسبة الضبابية بدون تفريغ المهام، والحوسبة الضبابية مع تفريغ المهام. ولضمان مقارنة عادلة بين هذه الأوضاع، استُخدمت نفس إعدادات النظام ومعلمات المحاكاة.[17] يُبين الجدول (2) البارمترات المستخدمة في المحاكاة:

الجدول (2) بارمترات المحاكاة

PARAMETER	Value
Number of IoT Devices	100,250,500,750
Number of Fog Nodes	5
Cloud Data Centers	1
Fog Node CPU	4000 MIPS
Fog Node RAM	4 GB
Network Bandwidth	1000 Mbps
Network Latency	2ms (IoT→Fog), 10 ms (Fog→Cloud)
Simulation Time	60 seconds
IoT Devices cpu	1000 MIPS
IoT Devices RAM	512 Mbps

لتقييم قابلية التوسع لكل نمط، تم تغيير عدد أجهزة إنترنت الأشياء في الشبكة بشكل منهجي خلال تجارب المحاكاة. يؤدي زيادة عدد الأجهزة إلى زيادة أحمال العمل الحسابية، مما يسمح بتقييم شامل لكيفية تعامل كل بنية

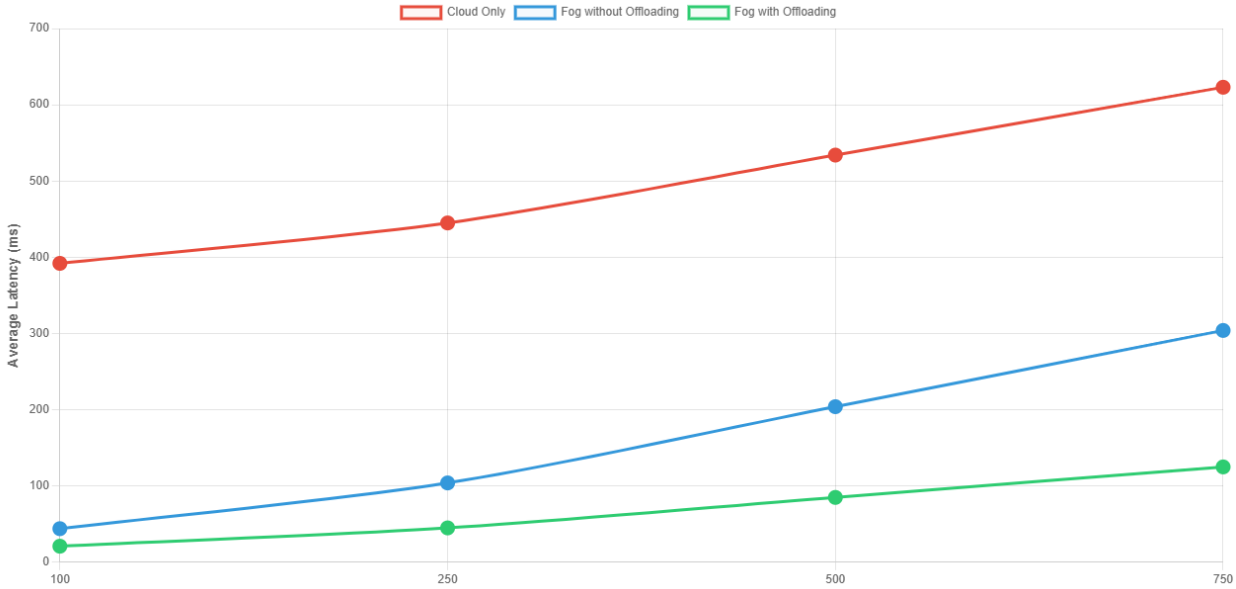
مع متطلبات المعالجة المتزايدة. تم اختبار أربعة تكوينات مختلفة لأجهزة إنترنت الأشياء: 100، 250، 500، و750 جهازًا. بقيت جميع معايير المحاكاة الأخرى ثابتة في جميع التجارب لضمان مقارنة عادلة.

5-النتائج والمناقشة:

يعرض هذا القسم نتائج المحاكاة التي تقارن بين ثلاث بنى لمعالجة المهام: المعالجة السحابية فقط، ومعالجة الضباب دون تفريغ المهام، ومعالجة الضباب مع تفريغ المهام. أُجريت التجارب على 100 و250 و500 و750 جهازًا من أجهزة إنترنت الأشياء.

أولا: من حيث التأخير :

يوضح الشكل (3) متوسط زمن التأخير لكل سيناريو مع تزايد عدد أجهزة إنترنت الأشياء. ينتج عن المعالجة السحابية فقط أعلى زمن تأخير، يتراوح من 392 مللي ثانية عند 100 جهاز إلى 623 مللي ثانية عند 750 جهازًا. ويعود ذلك إلى ضرورة انتقال جميع المهام إلى مركز بيانات السحابة البعيد، مما يتسبب في تأخيرات كبيرة في الاتصال.



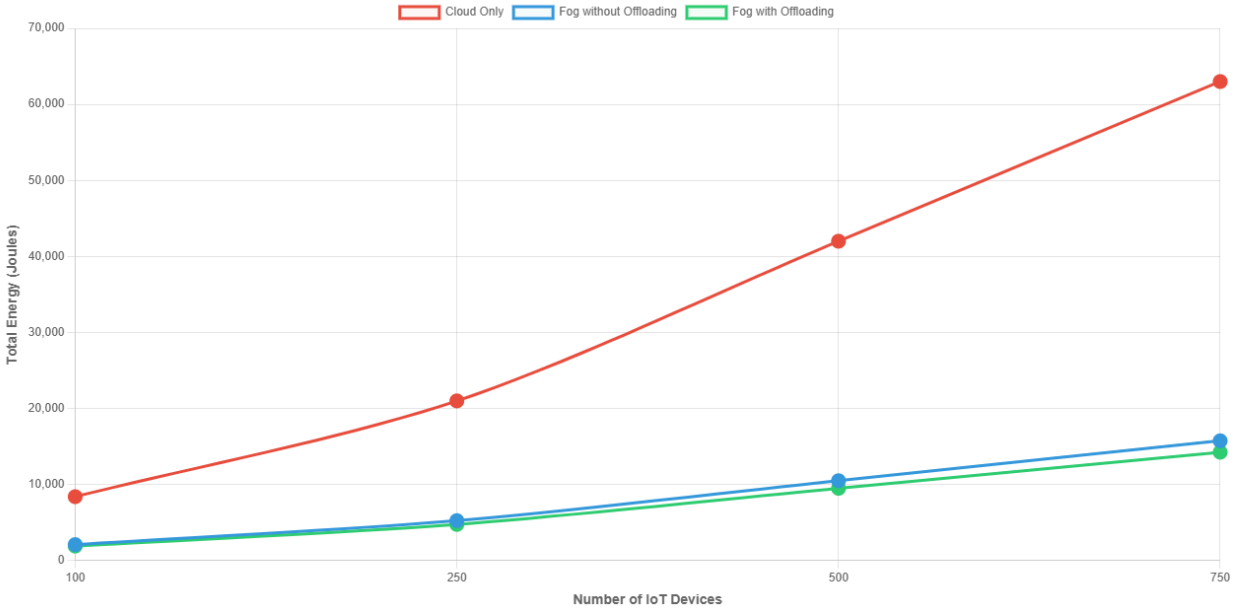
الشكل (3) نتائج المقارنة من حيث التأخير

تحقق المعالجة الضبابية بدون تفريغ البيانات زمن تأخير أقل، يتراوح من 44 مللي ثانية إلى 304 مللي ثانية. ومع ذلك، مع زيادة عدد الأجهزة عن 500 جهاز، يبدأ زمن التأخير في الارتفاع بشكل حاد نتيجةً لزيادة الحمل على عقد الضباب الفردية.

تحقق المعالجة الضبابية مع تفريغ البيانات أقل زمن تأخير ، يتراوح من 21 مللي ثانية إلى 125 مللي ثانية. عند استخدام 750 جهازًا، يقلل تفريغ المهام زمن التأخير بنسبة 59% مقارنةً بالمعالجة الضبابية بدون تفريغ (125 مللي ثانية مقابل 304 مللي ثانية)، وبنسبة 80% مقارنةً بالمعالجة السحابية فقط (125 مللي ثانية مقابل 623 مللي ثانية). وهذا يُظهر أن التوزيع الديناميكي لأعباء العمل عبر عُقد المعالجة الضبابية يحافظ بفعالية على استجابة النظام حتى في ظل ظروف الأحمال العالية.

ثانيا: من حيث استهلاك الطاقة:

يوضح الشكل (4) إجمالي استهلاك الطاقة لكل سيناريو. يستهلك المعالجة السحابية فقط أكبر قدر من الطاقة، حيث يصل إلى ٦٣٠٠٠ جول عند ٧٥٠ جهازًا، وذلك بسبب نقل البيانات المستمر لمسافات طويلة والمعالجة المركزية.

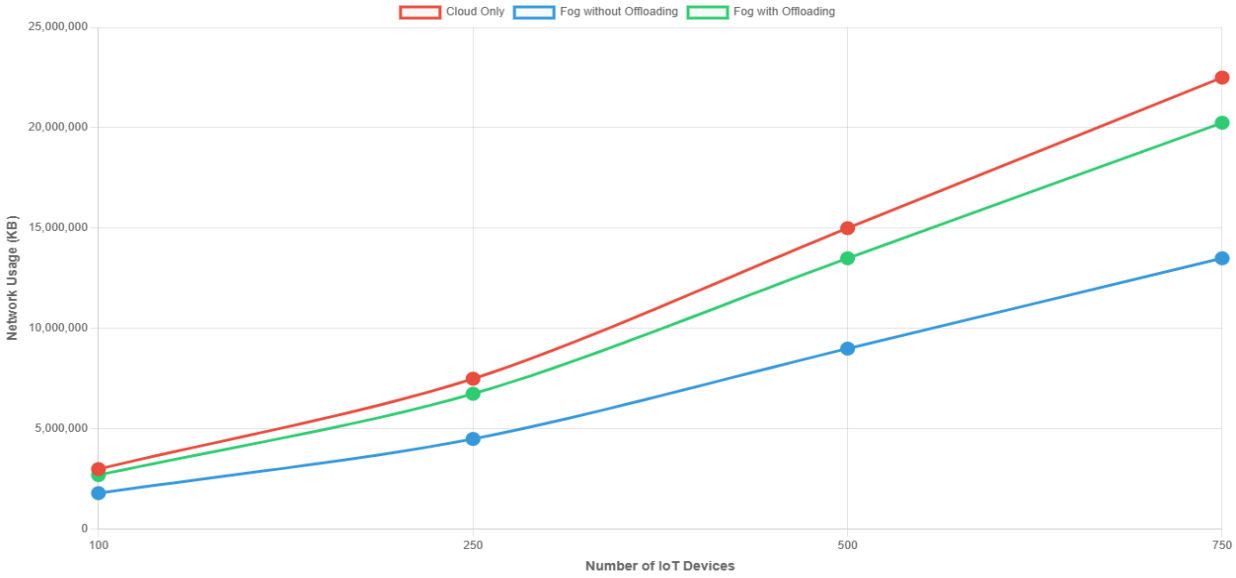


الشكل (4) نتائج المقارنة من حيث استهلاك الطاقة

يستهلك نظام الضباب بدون تفريغ ١٥٧٥٠ جول عند ٧٥٠ جهازًا، وهو ما يمثل انخفاضًا بنسبة ٧٥٪ مقارنةً بالمعالجة السحابية فقط. أما نظام الضباب مع تفريغ الطاقة فيستهلك طاقة أقل (١٤٢٥٠ جول عند ٧٥٠ جهازًا)، أي أقل بنسبة ٩.٥٪ من نظام الضباب بدون تفريغ الطاقة، وأقل بنسبة ٧٧٪ من المعالجة السحابية فقط. ويعود تحسن كفاءة الطاقة في تفريغ المهام إلى التوزيع المتوازن لأعباء العمل، مما يمنع تحميل عقد الضباب الفردية فوق طاقتها.

ثالثا: من حيث استخدام الشبكة:

يوضح الشكل (5) استخدام الشبكة في السيناريوهات الثلاثة. تولّد المعالجة السحابية فقط أعلى حجم لحركة البيانات على الشبكة (22.5 غيغا بايت على 750 جهازًا) لأن جميع البيانات يجب أن تمر عبر الشبكة واسعة النطاق للوصول إلى السحابة.



الشكل (5) نتائج المقارنة من حيث استخدام الشبكة

يُولّد نظام الضباب بدون تفريغ البيانات أقل حجم لحركة البيانات على الشبكة (13.5 غيغا بايت على 750 جهازًا) لأن المهام تُعالج محليًا بواسطة أقرب عقدة ضباب. يُولّد نظام الضباب مع تفريغ البيانات حجمًا متوسطًا لحركة البيانات على الشبكة (20.25 غيغا بايت على 750 جهازًا)، وهو أعلى بنسبة 50% من نظام الضباب بدون تفريغ البيانات. تعود هذه الزيادة إلى إعادة توزيع المهام بين عقد الضباب. على الرغم من أن التفريغ يزيد من استخدام الشبكة داخل طبقة الضباب، إلا أن هذا التنازل مُبرر بالتحسينات الكبيرة في زمن التأخير المُحققة.

رابعا: ملخص النتائج:

تؤكد النتائج أن الحوسبة الضبابية مع تفريغ المهام توفر أفضل أداء شامل لتطبيقات إنترنت الأشياء، لا سيما في ظل ظروف الأحمال العالية. عند استخدام 750 جهازًا من أجهزة إنترنت الأشياء، حققت الحوسبة الضبابية مع تفريغ المهام ما يلي، كما يظهر الجدول (3):

الجدول (3) ملخص الأداء عند 750 جهاز إنترنت الأشياء

المقياس	السحابة فقط	ضباب بدون تفريغ	ضباب مع التفريغ	التحسين
التأخير (ميللي ثانية)	623	304	125	انخفاض بنسبة 59% مقارنةً بعدم تفريغ البيانات، وانخفاض بنسبة 80% مقارنةً بالحوسبة السحابية
الطاقة(جول)	63000	15750	14250	انخفاض بنسبة 9.5% مقارنةً بعدم تفريغ البيانات، وانخفاض بنسبة 77% مقارنةً بالسحابة.
الشبكة(غيغا بايت)	22.5	13.5	20.25	زيادة بنسبة 50% مقارنةً بعدم تفريغ البيانات، وانخفاض بنسبة 10% مقارنةً بالسحابة.

1-انخفاض زمن التأخير بنسبة 59% مقارنةً بالحوسبة الضبابية بدون تفريغ المهام

2-انخفاض زمن التأخير بنسبة 80% مقارنةً بالمعالجة السحابية فقط

3-انخفاض استهلاك الطاقة بنسبة 77% مقارنةً بالمعالجة السحابية فقط

4-انخفاض استهلاك الطاقة بنسبة 9.5% مقارنةً بالحوسبة الضبابية بدون تفريغ المهام

يتمثل المفاضلة (trade-off) الرئيسية في زيادة استخدام الشبكة بنسبة 50% ضمن طبقة الحوسبة الضبابية مقارنةً بالحوسبة الضبابية بدون تفريغ المهام. ومع ذلك، تُعد هذه الزيادة مقبولة نظرًا للتحسينات الكبيرة في زمن التأخير المطلوبة لتطبيقات إنترنت الأشياء الحساسة للوقت، مثل القيادة الذاتية، ومراقبة الرعاية الصحية، والأتمتة الصناعية.

6-الاستنتاجات والتوصيات:

قدم هذا البحث أداء بنى الحوسبة الضبابية لتطبيقات إنترنت الأشياء في ظل استراتيجيات معالجة مهام مختلفة. كان الهدف الرئيسي للدراسة هو تقييم تأثير تفريغ المهام داخل طبقة الحوسبة الضبابية على أداء النظام مقارنةً بالمعالجة السحابية التقليدية والمعالجة المحلية في طبقة الحوسبة الضبابية دون تفريغ. أُجريت التجارب باستخدام محاكي مخصص قائم على لغة جافا، مصمم وفقًا لمبادئ iFogSim. يتكون النظام المُحاكى من أجهزة إنترنت الأشياء التي تعمل كمولدات مهام، وعُقد الحوسبة الضبابية التي توفر موارد الحوسبة الطرفية، ومركز بيانات سحابي يمثل البنية التحتية المركزية للحوسبة.

أظهرت نتائج المحاكاة أن المعالجة السحابية تُسبب أعلى زمن تأخير (623 مللي ثانية عند 750 جهازًا) نظرًا لزيادة مسافة الاتصال بين أجهزة إنترنت الأشياء ومركز البيانات السحابي. تُقلل الحوسبة الضبابية هذا الزمن بشكل ملحوظ من خلال تمكين تنفيذ المهام بالقرب من مصدر البيانات. عند معالجة المهام محليًا في عُقد الحوسبة الضبابية دون تفريغ، يتحسن أداء النظام مقارنةً بالمعالجة السحابية، حيث يصل زمن التأخير إلى 304 مللي ثانية عند 750 جهازًا.

تحسّن أداء النظام عند معالجة المهام محليًا في عُقد الحوسبة الضبابية دون تفريغ، مقارنةً بالمعالجة السحابية، حيث يصل زمن التأخير إلى 304 مللي ثانية عند 750 جهازًا. يُحسّن إدخال خاصية تفريغ المهام ضمن طبقة الحوسبة الضبابية أداء النظام بشكل ملحوظ من خلال توزيع أحمال العمل على عدة عقد حوسبة ضبابية. تُمكّن هذه الآلية النظام من الحفاظ على زمن تأخير منخفض (125 مللي ثانية عند 750 جهازًا) واستخدام أكثر توازنًا للموارد مع ازدياد عدد أجهزة إنترنت الأشياء. تحديدًا، يُحقق تفريغ المهام انخفاضًا في زمن التأخير بنسبة 59% مقارنةً بالحوسبة الضبابية بدون تفريغ، وانخفاضًا بنسبة 80% مقارنةً بالمعالجة السحابية فقط عند 750 جهازًا.

أما من حيث كفاءة الطاقة، فتستهلك الحوسبة الضبابية مع تفريغ المهام 14,250 جول عند 750 جهازًا، ما يُمثل انخفاضًا بنسبة 77% مقارنةً بالمعالجة السحابية فقط (63,000 جول)، وانخفاضًا بنسبة 9.5% مقارنةً بالحوسبة الضبابية بدون تفريغ (15,750 جول). مع ذلك، يؤدي تفريغ المهام إلى زيادة بنسبة 50% في حركة مرور الشبكة (20.25 مليون كيلوبايت مقابل 13.5 مليون كيلوبايت) ضمن طبقة الحوسبة الضبابية مقارنةً بالمعالجة الضبابية المحلية، وهو ما يُعدّ حلاً وسطاً مقبولاً نظراً للتحسينات الكبيرة في زمن الاستجابة.

بشكل عام، تؤكد النتائج أن بنى الحوسبة الضبابية قادرة على تحسين كفاءة أنظمة إنترنت الأشياء بشكل ملحوظ، لا سيما عند استخدام آليات تفريغ المهام لموازنة أحمال العمل الحسابية عبر عُقد الحوسبة الضبابية.

References:

[1]- W. D. Issa and M. A. Mohammed, "An integrated fog computing approach to improve quality of service in IoT environment with dynamic task scheduling and resource allocation," Zanco J. Pure Appl. Sci., vol. 38, no. 1, pp. 142–161, 2026.

[2]- I. A. Elgendy, W. Z. Zhang, H. He, B. B. Gupta, and A. A. Abd El-Latif, "Joint computation offloading and task caching for multi-user and multi-task MEC systems: Reinforcement learning-based algorithms," Wireless Netw., vol. 27, no. 3, pp. 2023–2038, 2021.

[3]- M. Sheikh Sofla, M. Haghi Kashani, E. Mahdipour, and R. Faghih Mirzaee, "Towards effective offloading mechanisms in fog computing," Multimedia Tools Appl., vol. 81, no. 2, pp. 1997–2042, 2022.

[4]- X. Gao, X. Huang, S. Bian, Z. Shao, and Y. Yang, "PORA: Predictive offloading and resource allocation in dynamic fog computing systems," IEEE Internet Things J., vol. 7, no. 1, pp. 72–87, 2019.X. Gao et al., "PORA: Predictive offloading and resource allocation in dynamic fog computing systems," arXiv:2008.00204, 2020.

[5]- V. Thangaraj and T. Raja Sree, "MSCO: Mobility-aware secure computation offloading in blockchain-enabled fog computing environments," J. Cloud Comput., vol. 13, no. 1, p. 88, 2024.

[6]- A. S. Alfakeeh and M. A. Javed, "Intelligent data-enabled task offloading for vehicular fog computing," Appl. Sci., vol. 13, no. 24, p. 13034, 2023.

[7]- W. N. W. Muhamad et al., "Energy-efficient task offloading in fog computing for 5G cellular network," Eng. Sci. Technol. Int. J., vol. 50, p. 101628, 2024.

[8]- K. Lone and S. A. Sofi, "A review on offloading in fog-based Internet of Things: Architecture, machine learning approaches, and open issues," High-Confidence Comput., vol. 3, no. 2, p. 100124, 2023.

[9]- N. Kumari, A. Yadav, and P. K. Jana, "Task offloading in fog computing: A survey of algorithms and optimization techniques," Comput. Netw., vol. 214, p. 109137, 2022.

[10]- Y. Yang, "FA2ST: Fog as a service technology," in Proc. IEEE 41st Annu. Comput. Softw. Appl. Conf. (COMPSAC), pp. 708–708.2017.

[11]- Cisco, "Fog computing and the Internet of Things: Extend the cloud to where the things are," White Paper, 2015.

[12]- S. Yi, Z. Hao, Z. Qin, and Q. Li, "Fog computing: Platform and applications," in Proc. IEEE 3rd Int. Workshop Hot Topics Web Syst. Technol. (HotWeb), , pp. 73–78.2015.

[13]- M. Yannuzzi et al., "Toward a converged OpenFog and ETSI MANO architecture," in Proc. IEEE Fog World Congr. (FWC), 2017, pp. 1–6.

[14]- C. P. Sneha, A. S. Chakravarthy, and T. Veni, "A comprehensive review of task offloading methods in vehicular fog computing," Comput. Electr. Eng., vol. 129, p. 110847, 2026.

[15]- R. Paesani, G. Paolone, P. Di Felice, D. Iachetti, and M. Marinelli, "iFogSim simulations on IoT computational alternatives," Eng. Proc., vol. 31, no. 1, p. 44, 2022.

[16]- Z. He et al., "Energy-efficient computation offloading strategy with task priority in cloud assisted multi-access edge computing," Future Generation Computer Systems, vol. 148, pp. 298–313, 2023.

[17]- H. S. Hossam, H. Abdel-Galil, and M. Belal, "An energy-aware module placement strategy in fog-based healthcare monitoring systems," Cluster Comput., vol. 27, no. 6, pp. 7351–7372, 2024