تحسين بُنية الشبكات المُعرّفة برمجيّاً وحيدة المُتحكّم باستخدام بُنية شبكات البيانات المُسمّاة

د.م. يمان غازي[١] م. علي مصطفى[٢]

المُلخّص

ظهر حديثاً تكامُل للشبكات المُعرّفة برمجيّاً (SDN) وشبكات البيانات المُسمّاة (NDN) ضمن بُنية جديدة عملت على تحسين توزّع المحتوى في الجيل الحديث من بُنى الشبكات. حيث تُوفّر الشبكات SDN مستوى تحكّم مركزيًا يُحسّن قرارات التوجيه؛ كما إنَّ الميّزات ضِمن مستوى بيانات شبكات NDN، مثل التسليم المُعتمد على الاسم، والتخزين المؤقت داخل الشبكة، والتوجيه المُتكيّف، تُسهّل من آلية نشر البيانات والوصول إليها.

تهدُف هذه الدراسة إلى تحقيق البنية الجديدة SD-NDN ذات المُتحكّم الوحيد في بنية المحاكي ndnSIM وسنقوم بذلك عن طريق كتابة الترميز المصدري المُحاكي لعملها وتضمينها في المُحاكي وأيضاً تحقيق البنية IP-Based المُشابهة لها ضمن المحاكي Mininet من أجل المُقارنة بين البُنيتين في البيئة NDN-Based والبيئة IP-Based حيث سيتم اسقاط ذلك من خلال إضافة تحديد طوبولوجيا مُوحّدة لكل سيناريو وتحديد وسطاء تجربة مُناسبة، ومن ثم سيتم التحقيق خلال تنفيذ سيناريو عملي على كلا المُحاكيين، وفي الجُزء الأخير من الدِراسة سيتم تقييم أداء البُنى المُحقّقة ومُقارنة كل شبكة IP-Based مع مثيلتها ضمن البيئة NDN-Based. أثبتت النتائج تفوّق البُنى ضمن بيئة NDN من ناحية عدِة وسطاء أداء مثل الإنتاجية وعدد الرُزم المفقودة والتأخير مُقارنةً مع البيئة التقليدية IP-Based، بينما كان استخدام عرض الحزمة أكبر في البُنى NDN-Based.

[١] استاذ مُساعد، قسم هندسة الشبكات والنظم الحاسوبية، كلية الهندسة المعلوماتية، جامعة حمص
[٢] طالب دراسات عليا (ماجستير)، قسم هندسة الشبكات والنظم الحاسوبية، كلية الهندسة المعلوماتية، جامعة حمص

الكلمات المفتاحية: شبكات البيانات المُسمّاة، الشبكات المُعرّفة برمجيّاً وحيدة المُتحكّم، الشبكات المركزيّة، إنترنت المستقبل، شبكات SDN NDN (SD-NDN).

Improving Single -Controller Software-Defined Networks Architecture Using Named Data Networks Architecture

Eng. Ali Mustafa[٤] Dr. Eng. Yaman Ghazi[٣]

ABSTRACT

Recently, software-defined networking (SDN) and named data networking (NDN) have merged into a new architecture that improves content distribution in the next generation of network architectures. SDN provides a centralized control plane that improves routing decisions, while features within the NDN data plane, such as name-based delivery, in-network caching and adaptive routing, facilitate data dissemination and access. This study aims to implement the new single-controller SD-NDN architecture in the ndnSIM simulator. We will do this by writing the simulated source code and including it in the simulator. We will also implement a similar IP-based architecture in the Mininet simulator to compare the two architectures in an NDN-based and IP-based environment. This will be achieved by adding a unified topology to each scenario and specifying appropriate experimental parameters. The implementation will then be executed through a practical scenario on both simulators. The final part of the study will evaluate the performance of the

[3] Assistant Professor, Department of Network Engineering and Computer Systems, Informatics Engineering Faculty, Homs University.

[4] Postgraduate Student (M.A), Department of Network Engineering and Computer Systems, Informatics Engineering Faculty, Homs University.

implemented architectures and compare each IP-based network with its counterpart in an NDN-based environment. The results proved that the NDN environment outperformed the IP-based architectures in terms of several performance parameters, such as throughput, number of packets lost, and delay, compared to the traditional IP-based environment, Bandwidth utilization was higher in the NDN-based architectures.

Keywords: Named Data Networking, Software-Defined Networks, Information Centric Networks, Future Internet, SDN-NDN Single-Controller Networks (SD-NDN).

١. مُقدمة:

تعتمد بُنية عُنق الزجاجة للإنترنت (Hourglass Internet Architecture) اليوم على طبقة الشبكة العالمية الحالية Internet Protocol (IP). لقد تم تصميم شبكات الـ IP في الأصل للاتصال بين نقطتي نهاية. الآن ومع النمو الهائل والمستمر للتجارة الإلكترونية والشبكات الاجتماعية والوسائط الرقمية وتطبيقات الهواتف الذكية، يهيمن توزيع المحتوى واسترجاعه بشكل متزايد على الاتصال عبر الإنترنت. هذا الاستخدام المهيمن للإنترنت مثل شبكة التوزيع تسبب مشاكل التوزيع. يُعتبر حل مشاكل التوزيع في الشبكة المُوزّعة عبر بروتوكول الاتصال من نقطة إلى نقطة(IP-Based) عُرضَة للخطأ ومُعقد. تقوم المُوجّهات في مستوى التوجيه بتبادل تحديثات التوجيه واختيار أفضل المسارات لإنشاء جدول إعادة التوجيهforwarding Information Base (FIB) ، تقوم أجهزة التوجيه بإعادة توجيه الرُزم باستخدام هذا الجدول FIB. [1]

إن البروتوكول IP لديه نهج توجيه ذكي ونهج إعادة توجيه، ويتم استخدام شبكات البيانات المُسمّاة Named Data Networks (NDN) لتعزيز أسلوب إعادة التوجيه. توجد بُنى إنترنت مستقبلية حالية كثيرة وأشهرها الشبكات المُرتكِزة على المُحتوى Content-Centric Networks (CCN)، وإنّ المفهوم الرئيسي وراء CCN هو أنهُ يتم انشاء الطلب من قِبل طالب البيانات أو المُستهلك (Consumer) حتى يتم بعدها توجيه ذلك

الطلب في اتجاه ذلك الموقع في الشبكة الذي تتُوفّر فيه هذه البيانات. يتم اجتياز بعض العُقد التي على المسار المؤدي إلى مُنتج البيانات المطلوبة (Producer). تحتوي هذه العُقد على ذاكرات تخزين مؤقت (Cash) يتم فحصها أثناء النقل، حيث من الممكن وجود نسخ من المعلومات المطلوبة من قبل المُستهلك عند تلك العُقد الوسيطة. [1]

قُدّمت الكثير الدِراسات عن طريقة إدارة شبكات SDN لعمليات التوجيه والتدفّق ضِمن مُبدّلات SDN التقليدية، ولكن لن يُفيدنا هذا الأمر بتاتاً في بُنية الشبكات SDN–NDN Networks (SD–NDN) المُتكاملة نظرًا لوجود قواعد توجيه قائمة على الاسم (Name-Based Forwarding). يمكن لعُقد NDN التعرف على طلبات مختلفة لنفس المحتوى أو توفير البيانات مباشرةً من المخزن المؤقت CS الخاص بها دون اللجوء إلى المُتحكّم وانتظار قراراته. لذلك، يمكن للوسطاء المُتعلّقة بالمحتوى، مثل تواتر الطلب وشعبيته، أن تؤثر على حالة إشغال قاعدة بيانات FIB وإدارتها، ونسبة التفاعلات مع المُتحكّم. حتى الآن، قامت أغلب الأبحاث في مجال دمج وتكامل بُنيتي SDN وNDN بشكل أساسي على تصميم البُنية المعماري وتقييم أداء توصيل المحتوى دون النظر في تأثير إعادة التوجيه المستند إلى الاسم على أداء FIB ودون النظر والتفصيل بإمكانيّة دمجها مع شبكات SDN وتحديد التحسينات. [2]

٢. الهدف من البحث:

إنّ المُساهمة الأساسيَة في هذا البحث هي تطبيق بنية شبكات NDN على بنية SDN ذات المُتحكّم الوحيد ضمن المُحاكي ndnSIM وذلك بكتابة الترميز المصدري الذي يحاكي عمل هذه البُنى وتضمينها في المحاكي ثم استخدام المُحاكي Mininet لمُحاكاة نفس هذه البُنى. وتحديد أهم مُعامِلات الأداء، وتحديد التحسينات التي سنحصل عليها من ناحية البُنية عند تحقيق هذا الاندماج.

٣. الشبكات المُعرّفة برمجيّاً (Software-Defined Networks)

تحوي الشبكات الحاسوبيّة عدد كبير من أجهزة الشبكة، مثل أجهزة التوجيه والمُبدّلات وأنواع عديدة من الأجهزة التي تتعامل مع المرور لأغراض أخرى غير توجيه الرُزم، مع العديد من البروتوكولات المعقدة التي يتم تنفيذها عليها. إنّ مُشغّلوا الشبكة ومُديروها مسؤولون عن إعداد السياسات بقصد إعداد مجموعة واسعة من تطبيقات وأحداث الشبكة، وعليهم تحويل هذه الإعدادات عالية المستوى يدوياً إلى أوامر مُنخفضة المستوى للتكيّف مع ظروف الشبكة المُتغيّرة، ولذلك تك اقتراح فِكرة "الشبكات القابلة للبرمجة" لتجاوز السلبيات الموجودة في الشبكات التقليدية، حيث تم تطوير الشبكات المُعرَّفة برمجيّاً (SDN) للحُصول على تحكُّم مُستقل ولتسهيل التطوير والابتكار وتمكين التحكُّم البرمجيّ البسيط لمسار (أو مسارات) بيانات الشبكة. إن فصل المُوجّهات عن منطق التحكُّم يسمح بنشر أسهل للبروتوكولات والتطبيقات الجديدة، وتصوّر وإدارة الشبكة بشكل واضح، فبدلاً من إعداد وتطبيق السياسات وتنفيذ البروتوكولات على الأجهزة المُتناثرة جغرافيّاً، يتم اختصار الشبكة إلى أجهزة توجيه بسيطة ووحدة تحكُّم (أو وحدات تحكُّم) بالشبكة هي من تقوم بصُنع القرار ونشره إلى جميع الأجهزة الشبكيّة المسؤولة عنها. [3]

٤. شبكات البيانات المُسمّاة (Named Data Networks)

إنّ شبكة البيانات المُسمّاة (NDN) هي بُنية شبكات مركزيّة للمعلومات (ICN) تقوم على تحويل نموذج الإنترنت المعروف حاليّاً من نموذج مُتمركز على المُضيف (host-centric) إلى نموذج مُتمركز على المعلومات (information-centric)، مع استخدام أسماء مُحتوى التطبيق مباشرةً في طبقة الشبكة للبحث عن البيانات واسترجاعِها.

تُعدُّ هذه الشبكات بُنية إنترنت جديدة تمامًا مُستوحاة من سنوات من البحث التجريبي في استخدام الشبكة. ترتبط NDN بالشبكات التي تركز على المحتوى (Content Centric Networking). الميزة الفريدة لـ NDN هي مستوى التوجيه المُتكيّف (adaptive forwarding plane). حيث تحمل الرُزم في شبكات NDN اسم البيانات بدلاً من عنوان المصدر والوجهة. يتم في شبكات NDN الاتصال عن طريق تبادل رُزم البيانات Data

والطلب Interest، حيث يُرسل مستهلكوا البيانات (Consumers) رُزم Interest على شكل أسماء.

تقوم أجهزة التوجيه بإعادة توجيه رُزمة Interest بِناءً على اسم البيانات وتُحافظ أيضًا على معلومات حالة الاهتمامات المُعلّقة التي تُمكّن أجهزة توجيه NDN من اكتشاف الحلقات وقياس أداء المسار المختلف واكتشاف حالات الفشل بسرعة وإعادة المحاولة عبر مسار بديل. يردُّ المُنتِج (Producer) برُزمة بيانات تأخذ مسار طلب الرسالة Interest العكسيّ.

ترِثُ شبكات NDN شكل بُنية الساعة الرمليّة لمعمارية شبكات IP ولكنه يستبدل طريقة تبادل البيانات عبر العنوانين IP بنموذج استرجاع بيانات (data retrieval model) عند الخصر النحيف للساعة الرمليّة. [1]

٥. البُنية الجديدة SD-NDN:

إنّ البُنيتين في شبكات NDN وشبكات SDN تهدُفان إلى التغلّب على قيود بنية الإنترنت الحالية مثل ضعف الأداء، والتأخير، وفقدان الرُزم، وضعف الأمان، وضعف قابلية التوسع. يُعدّ NDN نهجًا يُركّز على المحتوى، حيث يستخدم أسماءً يسهل على البشر قراءتها لطلب البيانات وتسليمها، بغض النظر عن مكان تخزينها أو استضافتها. بالإضافة إلى ذلك، يُعزّز الأمان بفضل الأمان المُدمج الذي يتحقق من سلامة البيانات وأصالتها ومصدرها من قِبل أي عقدة في الشبكة، دون الحاجة إلى آليات خارجية مثل الشهادات أو التشفير. على النقيض، يعتمد نهج SDN على الفصل بين مستوى التحكم ومستوى البيانات في أجهزة الشبكة، حيث تتولى وحدة تحكم مركزية مسؤولية إدارة وظائف الشبكة والتحكم بها، بينما تقتصر مهام الأجهزة على إعادة توجيه الرُزم وفقًا للتعليمات الصادرة عن وحدة التحكم. يوفّر هذا النهج العديد من المزايا مقارنةً بالأسلوب الموزّع التقليدي، إذ يُحسّن أداء الشبكة وكفاءتها واستقرارها، مستفيدًا من رؤية شاملة تُمكّن وحدة التحكم من مراقبة حالة جميع الأجهزة داخل الشبكة وتوظيف هذه المعلومات لتعزيز أدائها. بالإضافة إلى ذلك، يوفّر هذا

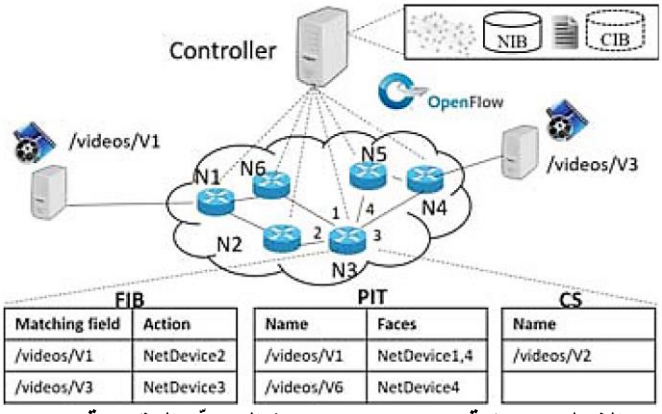
النموذج مرونة عالية وقابلية للتوسع، بفضل التكوين الديناميكي الذي يسمح لوحدة التحكم بتكييف أداء الشبكة في الوقت الفعلي وفقًا للظروف والمتطلبات المتغيرة. [4]

يتيح دمج شبكات SDN و NDN تحسين آلية التوجيه في NDN عبر SDN، وذلك من خلال إدارة قاعدة معلومات إعادة التوجيه (FIB) الخاصة بشبكات NDN. حيث تقوم وحدة تحكم SDN بحساب مُدخلات FIB المُثلى استنادًا إلى رؤية شاملة لحالة الشبكة، ثم تُحدّث FIB ديناميكيًا لضمان التكيف مع التغييرات والملاحظات المستمرة. [4]

إلا أنّ هذا التكامل يفرض تحديات ومخاطر أمنية جديدة تستوجب المعالجة. فعلى سبيل المثال، قد يتمكن مهاجم من اختراق مُتحكّم SDN والتلاعب بإدخالات FIB لعُقد NDN، مما يؤدي إلى تعطيل عملية توصيل المحتوى، ويهدد توافر بيانات NDN وسلامتها وسريتها. علاوةً على ذلك، قد لا تتوافق إدخالات FIB لعُقد NDN مع الرؤية الشاملة لوحدة تحكم SDN، مما قد يتسبب في أخطاء توجيهية وانخفاض في الكفاءة، الأمر الذي يؤدي في النهاية إلى تدهور أداء بيانات NDN وموثوقيتها. [4]

إنَّ شبكات NDN مُعرّضة للهجمات التي تستغل ميزات بنية NDN، مثل إغراق الاهتمامات، أو تسميم المحتوى، أو اختطاف وتزوير التسمية، وهو ما يمكن أن يؤثر على توافر البيانات وسلامتها وصحتها عبر شبكة NDN. تجدُر الإشارة إلى أن SDN قد لا تتمكن من اكتشاف أو منع مثل هذه الهجمات لأنها فريدة من نوعها لبروتوكول NDN ودلالاته. بالتالي، يُشكّل الأمان عُنصرًا حاسمًا يجب أخذه بعين الاعتبار عند دمج شبكتي SDN و NDN. فمن الضروري تنسيق آليات الأمان في كلا النموذجين لضمان حماية بيانات NDN وضبط التحكم في SDN. إضافةً إلى ذلك، يتعيّن تطوير حلول أمنية مبتكرة للتصدي للتحديات والمتطلبات الفريدة التي تفرضها هذه البنية المدمجة. تُحدثُ الشبكات NDN و SDN تحولًا جذريًا في بنية الشبكات عبر إعادة تشكيل أسسها، حيث تنقل NDN الاتصال من نموذج قائم على المُضيف (IP-Based) إلى نموذج يعتمد على المحتوى (Content-Based)، في حين تُحوّل SDN آلية التحكم من التوزيع إلى المركزيّة. إن الاستفادة من نقاط القوة المتكاملة في كلا النموذجين يمكن أن تُسهم في تطوير بنية الإنترنت، بما يواكب احتياجات المستقبل وتحدياته. [4]

يُوضّح الشكل (١) البنية وحيدة المُتحكّم المُقترحة لشبكات SD-NDN وِفق المرجع [2]:



الشكل (١) بنية SD-NDN وحيدة المُتحكّم المُقترحة [2]

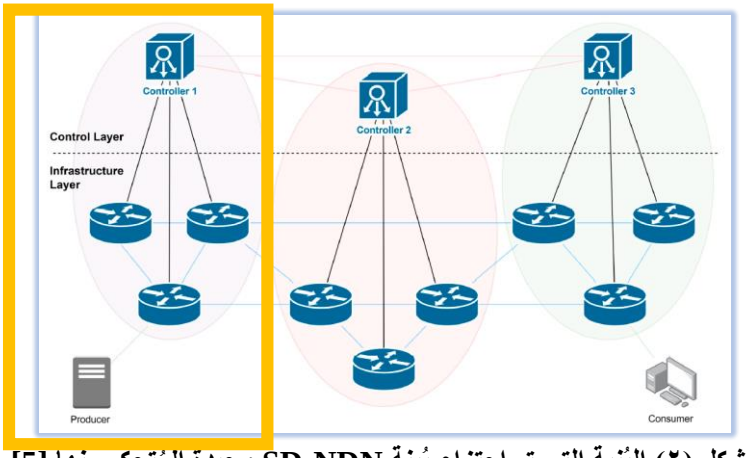
يجب الحِرص عند دمج SDN ضمن شبكات NDN على تجنّب التعديلات الجذرية، حيث إن التغييرات الكبيرة قد تُفقد NDN العديد من مزاياه الأساسية، مما قد يؤدي إلى جعل نموذج SD–NDN أقل كفاءة مقارنةً بنموذج NDN البحت أو النموذج المُعتمِد على المُضيف.

يوضّح الشكل (٢) مثالًا على بنية مقترحة لمواجهة هذه الإشكالية، حيث تُقسَّم الشبكة إلى طبقتين :طبقة التحكم وطبقة البنية التحتية .تتألف طبقة التحكم من مجموعة من عُقد التحكم، التي تُشرف على إدارة العديد من مُوجّهات NDN. ولتجنّب إرهاق وحدات التحكم، ينبغي أن يكون عدد مُوجّهات NDN المُخصصة لكل وحدة تحكم متناسبًا مع إمكاناتها وقدرتها التشغيلية.

أما طبقة البنية التحتية، فتتكوّن من مُوجّهات NDN إلى جانب المنتجين والمستهلكين. وعلى عكس شبكات NDN التقليدية، فإن عُقد التوجيه هنا تقتصر مسؤوليتها على إعادة توجيه الحزم وعمليات التبديل، بينما يُنقل عبء التوجيه إلى وحدات التحكم.

تُبرز هذه البنية الموضحة في الشكل (٢) نقطة أساسية، وهي أن العديد من بُنى SD– NDN قد تُؤدي بشكل غير مقصود إلى تقويض المزايا التي يُفترض أن يُحققها NDN،

مما قد يجعل نموذج SD–NDN أقل كفاءة من NDN الخالص أو من النهج القائم على المضيف. [5]



الشكل (٢) البُنية التي تم اجتزاء بُينة SD-NDN وحيدة المُتحكم منها [5]

سنقوم باعتماد جُزء من هذه البينة (الشكل ٢) ضمن البنية SD-NDN وحيدة المُتحكّم، وسنستخدم وسطاء خاصة بالمُحاكاة (سنُوضّحها لاحقاً ضمن **القسم 1.8**).

٦. أدوات البحث

قمنا في هذا البحث باستخدام المُحاكيين التاليين لتحقيق البنية العمليّة ضمن البيئتين IP-Based و NDN-Based:

1.6 مُحاكي الشبكات Mininet

يُعد Mininet برنامج محاكاة قائمًا على Linux يُستخدم للنمذجة السريعة للشبكات المعرفة برمجيّاً. يتيح تشغيل وإدارة مجموعة من الأجهزة المضيفة، والمبدّلات، والمُوجّهات، والوصلات، مستفيدًا من تقنيات المحاكاة الافتراضية لجعل نظام واحد يعمل وكأنه شبكة متكاملة. يتم إنشاء هذه العناصر، بما في ذلك المضيفات والمبدّلات ووحدات التحكم، عبر البرمجيات بدلًا من hardware، ومع ذلك، فإن سلوكها يُحاكي إلى حد كبير نظيراتها من مكونات الأجهزة الفعلية. [6]

يُوفّر المُحاكي Mininet طريقة بسيطة ومنخفضة التكلفة لاختبار الشبكات وتطوير تطبيقات OpenFlow، حيث يُتيح اختبار طوبولوجيا شبكية واسعة ومعقدة دون الحاجة إلى بنية تحتية مادية. كما يُمكّن المستخدم من التحكّم في الشبكة الافتراضية وإدارتها من Console واحد. يتضمّن Mininet واجهة سطر أوامر مُدرِكة للشبكة (CLI) التي تتيح إنشاء الشبكة واختبارها بمرونة وسرعة. [7]

2.6 مُحاكي الشبكات ndnSIM

تُعد بيئة المحاكاة ndnSIM أداةً بالغة الأهمية للباحثين المهتمين بدراسة شبكات NDN، إذ تُمكّنهم من تنفيذ تجارب المحاكاة، وتحليل نتائجها، وتقييم الأداء. تُوفر هذه البيئة إمكانيات واسعة، بما في ذلك إنشاء طوبولوجيا الشبكة، وتحديد معايير المحاكاة، وتنفيذ نموذج بروتوكول طبقة الاتصال، فضلًا عن محاكاة الاتصال بين عُقد NDN المختلفة، وتسجيل أحداث المحاكاة، وعرض النتائج بشكل مرئي.

يُعتبر ndnSIM برنامجًا مفتوح المصدر يعتمد على المُحاكي ns-3، مما يسمح بإجراء تجارب على بنية NDN في الشبكات السلكية واللاسلكية. يتميز ndnSIM بتكامله الكامل مع نماذج NDN في العالم الحقيقي، بما في ذلك ndn-cxx و NDN Forwarding Daemon (NFD).

كما يُوفّر ndnSIM مجموعة واسعة من التوابع المساعدة (Helpers)، التي تُتيح تتبّعًا تفصيليًا لسلوك كل مكوّن، بالإضافة إلى تدفق حركة مرور NDN. يستخدم المحاكي مكتبة ndn-cxx ومكتبة C++ مع توسعات تجريبية، إلى جانب NFD لضمان واقعية عمليات المحاكاة وإمكانية إعادة إنتاجها في بيئات حقيقية، دون الحاجة إلى تغييرات كبيرة في التعليمات البرمجية المصدر. يتم الاعتماد على صفوف C++ المختلفة لنمذجة سلوك كل كيان. [8]

تم تنفيذ تجارب وسيناريوهات المحاكاة باستخدام ndnSIM 2.9 (وهو الإصدار الحاليّ)، بعد تثبيته ضمن بيئة NS-3 على توزيعة Ubuntu Desktop 20.04 LTS من نظام التشغيل Linux.

٧. الدِراسات السابِقة:

هناك العديد من الدراسات التي تناولت موضوع التكامل بين شبكات NDN وشبكات SDN، وقد اتسم الكثير منها بالطابع النظري. تركّز غالبية الأبحاث على دراسة شبكات NDN وتحسينات التوجيه فيها، بما يشمل اختيار أفضل المسارات وتحديد وسطاء الأداء مثل التأخير، والتغيّرات، وعرض الحزمة وغيرها، ووجب التنويه هنا إلى قِلة المقالات الاختصاصيّة ذات الطابع العمليّ التفصيليّ حول البُنية SD-NDN لذلك حاولنا قدر الإمكان إنجاز وتحقيق سيناريوهات تتوافق مع المقالات المرجعية وما تحويه من توصيف للبنية ووسطاء.

غالبًا ما يتم مقارنة مختلف السيناريوهات استنادًا إلى وسطاء ذات صلة بعملية التوجيه، مما أدى إلى بعض التحديات في المراحل الأولى، خاصة عند تحديد سيناريوهات المحاكاة والمعايير المستخدمة في التقييم.

فمثلاً يقوم الباحثين في الورقة البحثية [2] بتطبيق بنية SDN-NDN باستخدام OpenFlowكواجهة Southbound Interface كما هو مُستخدم في المراجع [1] و [9]، حيث هنا تم استخدام المتحكّم لاتخاذ قرارات التوجيه بدلاً من الطريقة التقليدية ضمن NDNوتم الحصول على تحسينات في توجيه الطلبات. سنعتمد في هذه الورقة على دراسة هذه البنية واحتمال استخدامها لاحقاً ضمن أي توسعات مستقبلية مع بنية الشبكات SDN.

بينما اقترح الباحثون في الورقة البحثيّة [10] بنية وبروتوكول شبكة جديدين، وتم إعطاء كلاهما المسمى NDN-Fab، للسماح بالتفاعل بين بنى الشبكة المُعتمدة على العناوين (Ip-based)والمحتوى (Content-based) وتسمح NDN-Fab للشبكة الطرفية بالعمل باستخدام بنياتContent-based ، مثل NDN، بينما يمكن للشبكة الأساسية (Core Network)أن تعمل بنموذج اتصال عالي الأداء مُعتمد على العناوين (IP-

Based) وتم استخدام SDN Controller لتوجيه الرُزم ضمن ال NDN Fabric. تم التوصية ضمن هذا البحث بتطبيق NDN–Fabric على مجال أوسع وبالتالي اعتبرنا هذا البحث دافع وخطوة باتجاه تطوير SDN–like كمستوى تحكّم لل NDN Data plane على كل طبقات الشبكة.

قامت الدِراسة [11] بتقييم فعالية شبكات البيانات المُسمّاة (NDN) في سياق شبكات الحافة التكتيكيّة (tactical edge networks) وإمكانية اعتمادها. وضّح الباحثون هنا أنّه على الرغم من أنّ بُنية الشبكات ICN تُقدّم بعض الفوائد الهيكلية للبيئات التكتيكية (المتحرّكة) أكثر من بُنية شبكات TCP / IP، إلا أن عددًا من التحديات بما في ذلك التسمية والأمن وضبط الأداء وما إلى ذلك، لا تزال بحاجة إلى المعالجة من أجل التبنّي العملي . كما قاموا بشرح للميزات التي تجعل NDN مؤهلة للتطبيق ضمن الشبكات المُتحرّكة (الشبكات التكتيكيّة العسكريّة). يمكن أن نقوم بدراسة وفهم هذه التحدّيات والميزات كي تكون كتوصيف ضمن أي تصميم مُحتمل عند التكامل مع شبكات SDN.

بينما قد تم ضمن الدراسة [5] استكشاف تكامل شبكات SDN و NDN، وتحديد مجموعة من التحديات وطرح العديد من أسئلة البحث. يتمثل أحد الشواغل الرئيسية في قابلية توسع نماذج SD–NDN، حيث تم اختبار معظم النماذج الحالية ضمن نطاقات شبكات محدودة فقط. علاوة على ذلك، يُمثل التوافق بين وحدات تحكم SDN الحالية وإطار عمل NDN مشكلة كبيرة، مما يستلزم تطوير برامج تحكم متخصصة شبيهة بـ SDN ومصممة خصيصًا لشبكات NDN. توضح البُنية التي قدمناها نقطة رئيسية، وهي أن غالبية بنيات SD–NDN قد تُقوّض، عن غير قصد، الفوائد التي تهدف NDN إلى توفيرها، مما قد يجعل نموذج SD–NDN أقل فعالية من نموذج NDN خالص أو نموذج مُركّز على المضيف. سنقوم باعتماد جزء من البيئة المُقترحة في هذه الورقة ضمن البُنية SD–NDN وحيدة المُتحكّم، كما سوف نتبناها ضمن البنية المُوزَعة الخاصة بنا.

قام الباحثون في الورقة البحثيّة [12] بدراسة بنية الشبكات المُعرّفة برمجيّاً وإثبات الفائدة من الانتقال إلى هذا النوع من الشبكات عن طريق مقارنة قيم معاملات الأداء بين هذه الشبكات والشبكات التقليدية، كما قاموا بعرض لتصنيفات شبكات SDN من حيث بُنيتها

(البُنية المركزيّة والبُنية المُوزّعة) بالإضافة لمُقارنة بين هذه البُنى لتحديد البُنى الأفضل والتي من خلالها يمكن تحقيق أداء أفضل وإتاحية أعلى. اعتمدنا على هذه الدِراسة في فهم نظريّ وعمليّ للبُنية المركزيّة (وحيدة المُتحكّم) مما سهّل عملية التحقيق لدينا أكثر.

قدّم الباحثون في الورقة البحثيّة [13] دِراسة لمِعمارية الشبكات NDN وطريقة عملها وآلية تقييم الأداء باستخدام المُحاكي ndnSIM، كما عملوا على دِراسة منهجية إعادة توجيه رُزم الاهتمام (Interest) واستراتيجيات إعادة التوجيه المختلفة في الشبكات NDN بقصد تحديد خصائص كل استراتيجية مع التركيز على اختبار مستوى توافقها مع سياسة استبدال ذاكرة التخزين المؤقت

Improved Cache replacement policy based-on Content Popularity (ICCP) المُرتبطة بمفهوم ال Cashing. ساعدتنا هذه الدِراسة في فهم والتعرّف على معمارية شبكات NDN آلية تحقيقها واختبارها ضمن المُحاكي ndnSIM.

رأينا في الدراسات السابقة دراسات للبُنى SDN و NDN كُلّاً على حِدى كما رأينا عدة نماذج وطوبولوجيا مُقترحة للبنية الجديدة SD-NDN مع عدم وجود وسطاء مُحاكاة مُناسبة لبحثنا لكن تم إيجاد الحل في القسم 1.8. لقد قمنا ضمن كل دراسة بتبيان دورها ومدى استخدامها في بحثنا وكان أهمها اعتماد البُنية المُقترحة ضمن الورقة البحثيّة [5].

حقّقنا في دراستنا البنية وحيدة المُتحكّم وبعدها قمنا بتوسعتها لتشمل البنية المُوزّعة ضمن البيئتين IP-based و NDN-Based، كما وقمنا بالمقارنة بين أهم مُعاملات الأداء من إنتاجية وتأخير وفقدان الرُزم واستهلاك عرض الحزمة بصدد إظهار التحسينات التي أضافتها شبكات NDN ضمن بنيتنا الجديدة SD-NDN وحيدة المُتحكّم.

٨. تحقيق البُنية SD-NDN وحيدة المُتحكّم في المُحاكيين Mininet و ndnSIM:

سيتم بعد تحديد وسطاء التجارب، تحقيق البُنيتين وحيدة المُتحكّم ضمن البيئتين IP-Based (على المُحاكي Mininet) والبيئة NDN-Based (على المُحاكي ndnSIM).

١,٨ وسطاء التجارب

لم نجِد ضمن الدِراسات ما هو واضح من وُسطاء لتطبيق المُحاكاة، فقُمنا بالاستِعانة بوسطاء وِفقاً لقيم نموذجيّة مأخوذة من شبكات البنية الجديدة SDN-Based Internet2 (+2014)مع شبكات NDN.

إنّ Internet 2 هي عِبارة عن شبكة تعاونية للأبحاث والتعليم تم تطويرها بواسِطة اتحاد Internet2 consortium، وهي مُنظمة غير ربحية مقرُّها الولايات المُتحدة الأمريكيّة تعمل على تشغيل تقنيات الشبكات المتقدمة للمؤسسات الأكاديمية والبحثية.

يُوضّح الجدول (١) القيم النموذجية لوسطاء المُحاكاة فيما يتعلّق بشبكات NDN:

جدول (١) القيم النموذجية لوسطاء المُحاكاة وِفق Internet 2

Metric	Description	Typical Values
Simulation Time	The total duration of the simulation.	100s - 1000s (depends on the network size and objectives)
Average Latency (Delay)	The round-trip time (RTT) for packets to travel from consumer to producer and back.	30ms - 180ms (depends on network scale and path length)
Queue Size	The maximum number of packets that can be stored in a router's queue before dropping.	50 - 200 packets (varies with network load and traffic)
Data Rate	The rate at which data is transmitted over the network.	100 Mbps - 10 Gbps (depending on link speed and capacity)
Content Store Size	The maximum number of entries (packets/data chunks) that can be stored in the Content Store (CS).	1000 - 5000 entries
Interest Request Frequency	The frequency of Interest packets sent by consumers to request data.	1 per second to 10 per second (depends on consumer behavior and simulation setup)

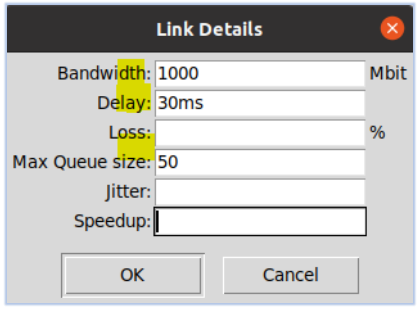
بينما نُوضّح بالجدول (٢) الوسطاء التي سنستخدمها ضمن سيناريو البنية SD-NDN بمُتحكّم وحيد (Single Controller):

جدول (2) وسطاء مُحاكاة البنية SD-NDN Single Controller

الوسطاء	القيمة
زمن المُحاكاة	100 (Sec)
عدد المتحكمات	1
عدد العقد NDN	3 (Mesh)
عدد أزواج ال Producers/Consumers	1
حجم البيانات المُرسلة (Payload Size)	10 (MB)
التأخير على الوصلات (Delay)	30 (ms)
معدّل نقل البيانات (Data Rate)	1 (Gbps)
حجم الرتل على منافذ العُقد (Queue Size)	50 (packets)
حجم ذاكرة تخزين المحتوى (Content Store)	1000 (entries)
تردد الطلبات (Interest Request Frequency)	10 (pkt per second)

عدد تكرارات المُحاكاة	5

إن تحديد هذه الوسطاء ضمن المُحاكي Mininet لا يتطلّب مجهود كبير بل يتم عبر واجهة المُحاكي: (الشكل (٣))



الشكل (٣) تحديد وسطاء المُحاكاة ضمن المُحاكي Mininet

أما ضِمن المُحاكي ndnSIM لا بد من تعديل قيم هذه الوسطاء ضمن الشيفرة المصدريّة وِفق التالي (الشكل (٤))

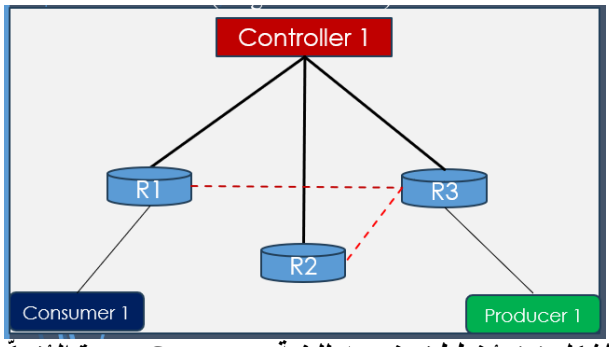
الشكل (٤) تحديد وسطاء المُحاكاة ضمن المُحاكي ndnSIM

قُمنا بتحقيق الشيفرة المصدريّة وبناء الملف الخاص بالطوبولوجيا الشبكيّة :

https://github.com/Ali-Mustafa96/Single-SD-NDN.git

٢,٨ تحقيق البنية SD-NDN وحيدة المُتحكّم

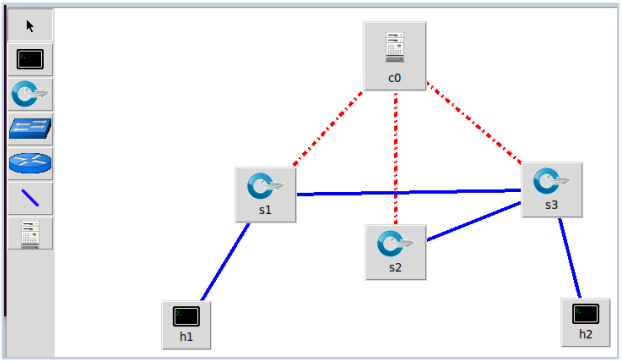
يُوضّح الشكل (٥) مُخطط البُنية وحيدة المُتحكّم التي سنعتمدها، والتي ستتضمّن مُتحكّم وحيد (Controller 1) وثلاث عُقد NDN (R1, R2, R3) وعقدة المُستهلِك المُرسل للطلبات (Consumer 1) وعقدة المُنتج المُستقبِل للطلبات (Producer 1):



الشكل (٥) مُخطط توضيحيّ للبنية SD-NDN وحيدة المُتحكّم

تم تحقيق هذه البنية ضمن المُحاكي Mininet (بيئة IP–Based) وتشغيل الطوبولوجيا وإرسال حجوم بيانات بين عقدتي الإرسال والاستقبال وِفقاً للحجم المُتفق عليه ضمن وسطاء المُحاكاة.

نُوضّح بالشكل (٦) شكل الطوبولوجيا وحيدة المُتحكّم الناتجة ضمن المُحاكي Mininet.



الشكل (٦) تحقيق البنية SDN IP-Based ضمن المُحاكي Mininet

ثمّ تم تحقيق هذه البنية ضمن المُحاكي ndnSIM (بيئة NDN–Based) وتشغيل الشيفرة المصدريّة وإظهار الطوبولوجيا ومن ثُمّ إرسال حُجوم بيانات بين عُقدتي الإرسال والاستقبال وِفقاً للحجم المُتفق عليه ضِمن وسطاء المُحاكاة.

نُوضّح بالشكل (7) الملف النصيّ الخاص بالطوبولوجيا والذي ستتم قراءتهُ ضمن الشيفرة المصدريّة الخاصة بإعدادات المُحاكاة. يتكوّن هذا الملف من قِسمين رئيسيين، الأول لبِناء العُقد وتحديد مواقِعُها (وِفق مِحوريّ x و y) والقِسم الثاني لإنشاء الوصلات وتحديد خصائصها من سرعة وتأخيرات وحجم الأرتال.

```
**/
router
#node   city    y   x   mpi-partition
leaf-1  NA  -80 -40 1
leaf-2  NA  -80 20  2
rtr-3   NA  -70 -10 0
rtr-1   NA  -60 -20 1
rtr-2   NA  -60 0   2
Cont1   NA  -40 -10 0

link

# from      to      capacity    metric  delay   queue
leaf-1      rtr-1   1Gbps       1   30ms    1000
leaf-2      rtr-2   1Gbps       1   30ms    1000
rtr-3       rtr-2   1Gbps       1   30ms    1000
rtr-3       Cont1   1Gbps       1   30ms    1000
rtr-1       rtr-2   1Gbps       1   30ms    1000
rtr-1       Cont1   1Gbps       1   30ms    1000
rtr-2       rtr-3   1Gbps       1   30ms    1000
rtr-2       rtr-1   1Gbps       1   30ms    1000
rtr-2       Cont1   1Gbps       1   30ms    1000
```

الشكل (٧) بُنية الملف النصيّ الخاص بالطوبولوجيا ضمن المُحاكي ndnSIM

نعرُض بالشكل (٨) كيفيّة إضافة عُقد التحكُّم (لدينا عُقدة مُتحكّم واحِدة في السيناريو المُوحّد المُوضّحة ضمن القسم 1.8).

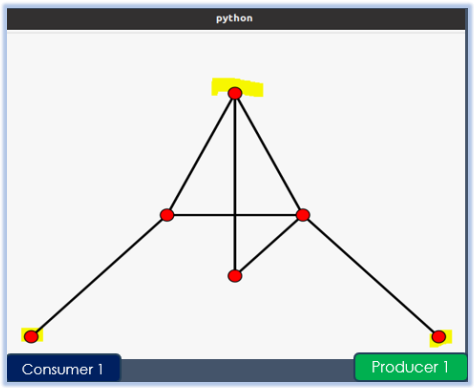
حيث أنشأنا غرض من الموديول الفرعيّ "LearningController" (الخاص ببناء عُقد المُتحكّم) المُستورد من الموديول الأساسيّ "OpenFlow" وربطنا هذا الغرض مع العُقدة المُمثّلة للمُتحكّم والتي قُمنا بقراءتها من ملف الطوبولوجيا مع تحديد ال Container الحاوية للعّقد المّتبقيّة (Consumer, Producer and NDN nodes) بالشكل المُناسب.

```
// Creating nodes  from topology text file
AnnotatedTopologyReader topologyReader("", 1);
topologyReader.SetFileName("src/ndnSIM/examples/topologies/topo-tree-Single.txt");
topologyReader.Read();

   // Getting containers for the consumer/producer and controller Cont1
Ptr<Node> consumer = Names::Find<Node>("leaf-1");
Ptr<Node> producer = Names::Find<Node>("leaf-2");
Ptr<Node> switchNode = Names::Find<Node>("Cont1"); // The controller node
```

```
//Ptr<Node> switchNode = SwitchContainer.Get (0);
OpenFlowSwitchHelper swtch;

if (use_drop)
  {
    Ptr<ns3::ofi::DropController> controller = CreateObject<ns3::ofi::DropController> ();
    swtch.Install (switchNode, switchDevices, controller);
  }
else
  {
    Ptr<ns3::ofi::LearningController> controller = CreateObject<ns3::ofi::LearningController> ();
    if (!timeout.IsZero ()) controller->SetAttribute ("ExpirationTime", TimeValue (timeout));
    swtch.Install (switchNode, switchDevices, controller);
  }
```

الشكل (٨) إضافة عُقدة المُتحكّم ضِمن الشيفرة المصدريّة في المُحاكي ndnSIM

نُوضّح بالشكل (٩) شكل الطوبولوجيا وحيدة المُتحكّم الناتجة ضمن المُحاكي ndnSIM.



الشكل (٩) تحقيق البنية SDN NDN-Based ضمن المُحاكي ndnSIM.

٩. اختبار أداء البنيتين وحيدة المُتحكّم ضمن البيئتين IP–Based و NDN–Based وتحديد التحسينات في البنية الجديدة:

سيتم ضمن كل السيناريوهات اختبار الأداء بما يتعلّق بالإنتاجية والتأخير وفقدان الرُزم واستهلاك عرض الحزمة. (حصلنا على نتائج مُقارِبة مع تكرار عملية المُحاكاة عدة مرات)

1.9 اختبار أداء البُنيتين وحيدة المُتحكّم ضمن البيئتين IP-Based و NDN-Based:

– من ناحية الإنتاجية (Throughput):

إنّ الإنتاجية Throughput تُعبّر عن كمية البيانات المُستلمة بشكل صحيح خلال زمن مُحدّد.

ضمن البيئة IP-Based: لقد فرضنا ضمن وسطاء المُحاكاة أن حجم حِمل البيانات يبلغ ١٠ MB وتساوي ١٠،٢٤٠ KB (10,240,000 Bytes) أي ما يُعادل ١٥٨ رسالة ICMP بحجم ٦٥،٠٠٠ بايت للرسالة. نتج لدينا Throughput بمقدار 0.473 Mbps

بينما ضمن البيئة NDN-Based: بسبب ندرة الرُزم المفقودة بلغت الإنتاجية 0.8 Mbps.

- **من ناحية التأخير الحاصل على إيصال الرُزم (Delays):**

ضمن البيئة IP-Based: كان أدنى تأخير 128.773 ms (ميلي ثانية) بين الرُزم وأعظم تأخير ٥٩٧,٤٨٧ ms ، بينما بلغ مُتوسّط التأخير لجميع الرُزم: ١٩٩,٥٧٨ ms.

بينما ضمن البيئة NDN-Based: كان التأخير أفضل وأقل وبلغ ١٨٠,٢٥٣ ms.

- **من ناحية فُقدان الرُزم (Dropped Packets):**

ضمن بيئة IP-Based: اكتشفنا وجود 14 رُزم مفقودة. تحتاج الموجهات لبعض الزمن كي تستقبل أوامرها من المُتحكّم مما يسبب ضياع بعض الرُزم بالإضافة لأسباب أخرى سنحدّدها ضمن قسم **تحديد التحسينات التي قامت بها شبكات NDN في البنية الجديدة.**

ضمن بيئة NDN-Based: لم نلحظ أي فقدان للرُزم وسبب ذلك خاصية التخزين المؤقت ضمن شبكات NDN وبالتالي القدرة على تلبية الطلبات Interest دون حصول فقد.

- **من ناحية استهلاك عرض الحِزمة المُستخدَم (Bandwidth):**

ضمن بيئة IP-Based:

قمنا بتحديد عرض الحزمة الكليّ 1 Gbps على جميع الوصلات، لكن تستهلك SDN في السيناريوهات الصغيرة من 1 % (أو أقل حسب حجم الشبكة) إلى 5 % من عرض ال Bandwidth الكليّ. وقد بلغ مقدار عرض الحزمة المستخدم 0.52 Mbps.

ضمن بيئة NDN-Based:

بما أنه لا يوجد رُزم Dropped، تكون جميع الرُزم المرسلة مُستلمة ويكون عرض الحُزمة المُستهلك هو حجم البيانات المُرسلة (Payload) خلال زمن المُحاكاة (100 sec) وقد بلغ0.8 Mbps .

وضعنا ضِمن الجدول (٣) مُجمل النتائج التي حصلناه عليها من ناحية التأخير وخسارة الرُزم والإنتاجية:

جدول (3) مُجمل نتائج المُحاكاة من تأخير وخسارة رُزم وإنتاجية

Architecture	AVG Delay(ms)	DROP number	Throughput (Mbps)
IP-Based (Single Controller)	199.578	14	0.473
NDN-Based (Single Controller)	180.253	0.4	0.8
IP-Based (Multi-Controller)	330.141	9	0.486
NDN-Based (Multiple Controller)	300.421	0.4	0.8

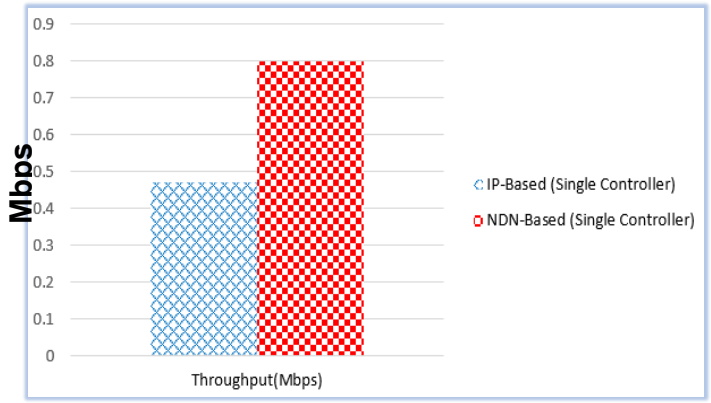
كما نُوضّح بالجدول (٤) قيم استهلاك عرض الحزمة:

جدول (4) الفرق باستهلاك عرض الحزمة بين البيئتين IP-Based و NDN-Based

Architecture	Bandwidth(Mbps)
IP-Based Architectures	0.52
NDN-based Architectures	0.8

2.9 تحديد التحسينات التي قامت بها شبكات NDN في البنية الجديدة:

إن التحسُّن في الإنتاجية كما في الشكل (١٠) سببه قِلة الرِّزم المفقودة في البيئة NDN–Based وسنشرح الأسباب عند استعراض مُخطّطات فقدان الرُزم.



الشكل (١٠) مُخطط يُوضّح الفرق بالإنتاجية ضمن البُنيتين IP-Based Single Controller

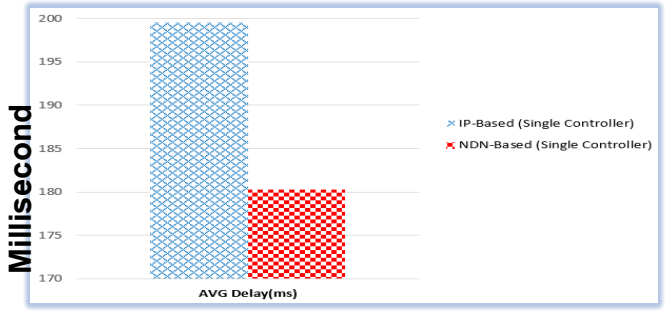
نعرِض فيما يلي أسباب التحسينات التي أضافتها شبكات NDN ضمن البنية SD–NDN فيما يتعلّق بالتأخير الحاصِل كما في الشكل (١١):

١– التوجيه المُتكيّف (Adaptive Forwarding):

تدعم شبكة NDN إعادة التوجيه متعدد المسارات وفي حال ازدحام الرابط، تُعيد شبكة NDNتوجيه حركة المرور تلقائيًا عبر مسارات بديلة) تُقلل شبكة NDN من التأخيرات من خلال اختيار أفضل مسار ديناميكيًا دون انتظار تحديثات وحدة تحكّم (SDN) بينما تعتمد شبكة SDN القائمة على IP عادةً على مسارات مُحددة مسبقًا، وتتطلب إعادة التوجيه تدخل وحدة التحكم، مما يُسبب تأخيرات. كما أنّهُ **لا حاجة للاتصال نهاية إلى نهاية (End–to–End Connectivity)**، حيثُ تقوم شبكات NDN بتوجيه البيانات بناءً على أسماء المحتوى بدلاً من عناوين IP، مما يُلغي الحاجة إلى اتصالات End–to–End. تتيح هذه الخاصية استرجاع البيانات من أي عقدة تُخزّن المحتوى مؤقتًا، مما يُقلل من التأخيرات المرتبطة بإعدادات الاتصال. [14]

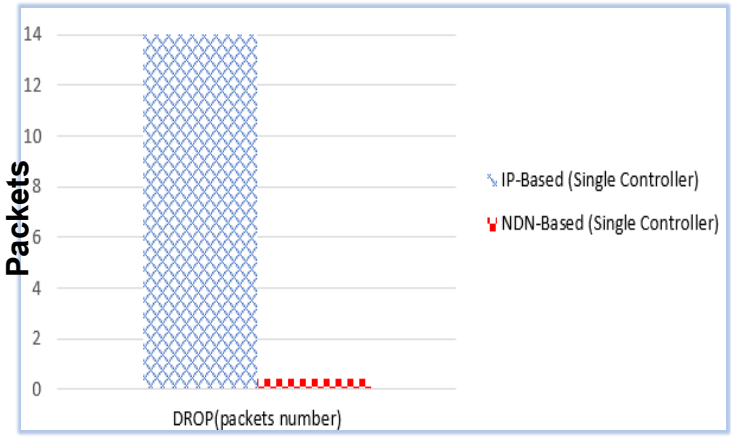
٢- لا يوجد عِبء TCP/IP:

يؤدي التخلّص من تكلفة TCP/IP ضمن بيئة NDN إلى تقليل تأخيرات المعالجة وتحسين أداء الشبكة. لا تزال شبكة SDN القائمة على IP تستخدم بروتوكول TCP/IP، مما يتطلب تأكيدات ACK وإعادة الإرسال ومُعالجة الأخطاء، مما يزيد من التأخير. [15]



الشكل (11) مُخطط يُوضّح الفرق بالتأخير ضمن البُنيتين Single Controller

وكما نرى التحسُّن الملحوظ من ناحية فُقدان الرُزم كما في الشكل (١٢) والذي أدّى بدورهِ إلى التحسّن في الإنتاجية. ونعزو ذلك إلى خاصي **التخزين المؤقت داخل الشبكة –In Network Caching)**، حيثُ يُتيح التخزين المؤقت داخل شبكات NDN والمعروفة أيضاً باسمContent-Centric Network (CCN) استرجاع البيانات من العقد الوسيطة، مما يقلل الحاجة إلى إعادة الإرسال من المصدر الأصليّ، وبالتالي تقليل فقدان الرُزم. بينما يؤدي فقدان الرُزم في شبكات SDN القائمة على بروتوكول الإنترنت (IP)، إلى إعادة الإرسال من المصدر الأصلي، مما يزيد من الازدحام والتأخير. كما أنّ نقل البيانات فقط عند الطلب عبر رُزم ال Interest، مما يساعد في التحكم في الازدحام وتقليل نقل البيانات غير الضروري، مما يؤدي إلى تقليل فقدان الرُزم. [15]



الشكل (١٢) مُخطط يُوضّح الفرق بفقدان الرُزم ضمن البُنيتين Single Controller

لكن البُنية SD-NDN ليست دائمًا أفضل من SDN المستند إلى IP من حيث استهلاك النطاق الترددي كما نلاحظ ضمن الشكل (١٣)، للأسباب التالية:

١- تستهلك حركة مرور مزامنة ذاكرة التخزين المُؤقت (Cache Synchronization Traffic) نطاقًا ترديديًا إضافيًا:

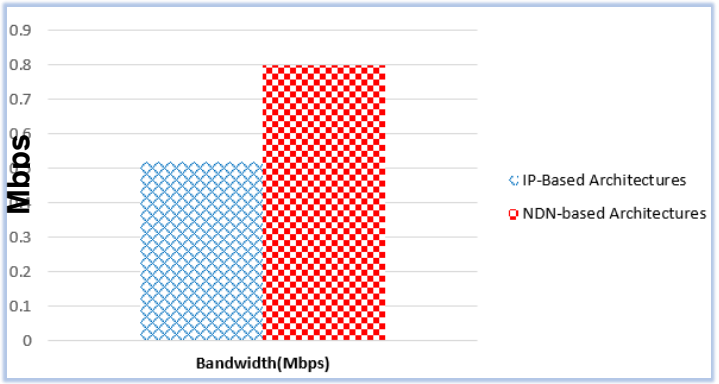
تُولّد آليات مزامنة ذاكرة التخزين المؤقت في شبكات NDN (للحفاظ على الاتساق بين أجهزة التوجيه) بيانات تحكم إضافية. بينما في شبكات IP-Based SDN، لا تحتاج أجهزة التوجيه إلى مزامنة ذاكرة التخزين المؤقت نظرًا لعدم وجود تخزين مؤقت داخل الشبكة.

باختصار: تستهلك تحديثات ذاكرة التخزين المؤقت في شبكة NDN نطاقًا ترديديًا إضافيًا، خاصةً في الشبكات عالية الديناميكية. [16]

٢- تزيد بادئات الأسماء الكبيرة من حجم الرُزمة(Large Name Prefixes) :

يستخدم NDN أسماء المحتوى بدلاً من عناوين IP، مما يعني أنه ممكن أن تحتوي ترويسات الرُزم على أسماء هرمية طويلة. بينما إنّ العنونة تكون ذات حجم ثابت في الأنظمة القائمة على بروتوكول الإنترنت (IP-Based). [16]

إذاً تستهلك البنية SD–NDN نِطاقًا ترددِيًا أكبر بسبب زيادة تكلفة رُزم البيانات، والطلبات المتكررة، ورؤوس البيانات الأكبر، وبيانات مزامنة ذاكرة التخزين المؤقت. بينما تتميّز IP–Based SDN بكفاءة أعلى في استخدام النطاق الترددي بفضل دعم البث المتعدد، ورؤوس رُزم البيانات المُدمجة، وانخفاض تكلفة التحكّم.



الشكل (13) مُخطط يُوضّح الفرق باستهلاك عرض الحزمة بين البيئتين IP-Based و-NDN Based

لكن على أية حال تمت التوصية ضمن شبكات البنية الجديدة SDN–Based Internet2 (٢٠١٤+) مع شبكات NDN بأن يكون عرض الحزمة كافي ومن مرتبة ١ Gbps وما فوق، وبالتالي فإنّ استهلاك عرض الحزمة لن يكون عائق أو تحدٍ كبير عند تحقيق الاندماج بين البُنيتين.

١٠. الخاتِمة والتطلُّعات المُستقبليّة

قدّمنا في هذه الورقة البحثيّة نموذج وتحقيق فعليّ للبنية الجديدة SD-NDN وطرحنا ما يناسبها من وسطاء مُحاكاة، وقد شمل هذا التحقيق البُنية المركزيّة (وحيدة المُتحكّم) ضمن كِلا البيئتين IP-Based التقليديّة و NDN-Based، كما حدّدنا جميع التحسينات المُمكنة التي سبّبتها البُنية NDN ضمن هذه البُنية الجديدة وقمنا بقياس أهم وسطاء الأداء ووضع التفسيرات المُناسبة لكل تحسّن تم إيجادُه.

نتطلّع الآن إلى تطوير الشيفرة المصدريّة الخاصة بالبُنية SD–NDN وحيدة المُتحكّم وتوسعتها لتُصبِح داعِمة للبَنية المُوزّعة بالإضافة لإمكانية تخصيص خوارزميات مُوازنة

الحِمل بين المُتحكّمات وتحديد أي وسطاء تتعلّق بذلك. يُمكن أن تتم مجالات أخرى على هذا البحث هي تطبيق البيئة SD-NDN على بنية مُوزّعة تشابكيّة هرميّة، ودِراسة الأداء الناتج عن هذا التكامل والتوزيع.

جدول المُختصرات:

CCN	Content-Centric Network
CS	Content Store
ICCP	Improved Cache replacement policy based-on Content Popularity
ICN	Information-Centric Network
NDN	Named Data Network
SDN	Software-Defined Network
SD-NDN	Software-Defined Named Data Network

١١. المراجِع:

[١] S. S. M.Micheal و .. Dr.K، "A SURVEY ON NAMED DATA NETWORKING."، *IEEE SPONSORED 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELETRONICS AND COMMUNICATION SYSTEM (ICECS)*، ٢٠١٥.

[٢] A. Marica و &.others، "Understanding Name-based Forwarding Rules in Software-Defined Named Data

Authorized licensed use limited to: University of "،.Networking *New South Wales. Downloaded on September 26,2020 at 18:20:29 UTC from IEEE Xplore*، ٢٠٢٠.

[٣] "A Survey of Software-Defined ،others& و N. Bruno Networking: Past,Present, and Future of Programmable *HAL Id: hal-00825087 https://hal.inria.fr/hal-* "،.Networks *00825087v5*، ١٩ January 2024.

[٤] "A review of SDN-enabled ،A. Jamali و N. Naja ،Y. Sembati *Engineering* "،.routing protocols for Named Data Networking *.Sons Ltd & Reports published by John Wiley*، ٦ March 2024.

[٥] "Software-Defined Named Data ،B. Abdelfettah و A. Albatool *Future Internet 2024, 16,* "،Networking in Literature: A Review *258.*، ٢٣ July 2024.

[٦] L. Bob و others& ، Introduction to Mininet . ، ٢٠١٧.

[٧] Development of a performance measurement tool ،M. Marion for SDN، ٢٠١٥.

[٨] "NDN"، [متصل]. Available: https://named-data.net/.

[٩] "A Named Data Networking (NDN), ،others& و J. Zain ul Abidin New Approach to Future Internet Architecture Design: A *Communication & International Journal of Informatics* "،.Survey *Technology (IJ-ICT) Vol.2, No.3*، December 2013.

[١٠] "NDN Fabric: Where the Software- ،others& و L. R. M. André *IEEE* "،.Defined Networking Meets the Content-Centric Model

TRANSACTIONS ON NETWORK AND SERVICE MANAGEMENT, VOL. 18, NO. 1، March 2021.

[١١] C. Lorenzo و &others، "Considerations on the Adoption of Named Data Networking (NDN) in Tactical Environments."، *International Conference on Military Communications and Information Systems (ICMCIS)*، ٢٠١٩.

[١٢] د. م. عبود و م. م. الضاهر، "تحليل الأداء في الشبكات المعرفة برمجياً،" *مجلة جامعة حمص المجلد ٤١*، ٢٠١٩.

[١٣] د. ي. غازي و م. ع. الحمصيه، "تقييم أداء السياسة المُحسّنة لاستبدال ذاكرة التخزين المؤقت بالاعتماد على شعبية المُحتوى (ICCP) عند استراتيجيات إعادة التوجيه المختلفة في شبكات البيانات المُسمّاة،" *مجلة جامعة حمص المجلد ٤٦ العدد ٧*، ٢٠٢٤.

[١٤] K. Sarantis و &others.، "Logically-Centralized SDN-Based NDN Strategies for Wireless Mesh Smart-City Networks."، *Future Internet 2023, 15, 19. https://doi.org/10.3390/fi15010019*، ٢٩ December 2022.

[١٥] R. S. Nana و &others.، "Performance Comparison of Named Data and IP-based Network—Case Study on the Indonesia Higher Education Network."، *Journal of Communications Vol. 13, No. 10*، October 2018.

[١٦] A. Manar و &others، "Leveraging ICN and SDN for Future Internet Architecture: A Survey."، *Electronics 2023, 12, 1723. https://doi.org/10.3390/electronics12071723*، ٤ April 2023.