مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية
المجلد41 العدد (3) – 2025: 1-22

Damascus University Journal for engineering sciences
Vo 41 number (3) -2025: 1-22

تحسين جودة الخدمة في الشبكات المعرفة بالبرمجيات بناءً على خوارزمية توجيه متكيّف مع تغيرات النطاق الترددي

أحمد زيدان*[1] طلال حمود[2]

*[1]. طالب دكتوراه، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق، اتصالات متقدمة.
ah.zaidan88@damascusuniversity.edu.sy

[2]. أستاذ، دكتور، مهندس في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق.
talal64.hammoud@damascusuniversity.edu.sy

الملخص:

أصبحت المؤتمرات الفيديويّة وسيلة اتصال سائدة حالياً على شبكة الانترنت، ولكنها تواجه مشاكل يمكن أن تؤثر بشكل مباشر على جودة الخدمة. تؤثر التغيرات السريعة وشبه العشوائية في عرض النطاق الترددي على جودة الصورة والصوت للمشاركين في مؤتمر الفيديو والمتصلين بالشبكة عبر طرفيات اتصال خلوي مثل نقاط الولوج LTE Access Points، وخاصة مع تزايد كثافة أعداد المستخدمين لخدمة الانترنت. ولذلك، تجد الشبكات التقليديّة صعوبة في اكتشاف تلك التغيّرات والتعامل معها بالزمن الحقيقي. أمام هذا الواقع، توفّر الشبكات المعرّفة بالبرمجيات SDN مرونة أكبر للتعامل مع هذه المشكلة وبكفاءة أفضل مقارنةً مع الشبكات التقليدية. تسمح الإدارة المركزيّة والرؤية الشاملة لظروف الشبكة SDN بإدارة التغيرات الحاصلة فيها عبر المتحكمات SDN Controller بكفاءة أكبر، بالاعتماد مثلاً على خوارزميات توجيه تهدف إلى الحصول على أفضل جودة تجربة بالنسبة للمشاركين في المؤتمر الفيديويّ. نناقش ونقترح في هذا العمل خوارزمية توجيه متكيّفة مع التغيرات السريعة في عرض النطاق الترددي والناتجة غالباً عن أحداث مناولة. تمتاز الخوارزمية المقترحة بأنها ذات تعقيد حسابي منخفض لتكييف تدفق بيانات الفيديو بين المشاركين في المؤتمر بناءً على التغيّرات اللحظية في عرض النطاق الترددي المتاح لكل مشارك. وبالتالي تحسين جودة الخدمة، من خلال تقليل زمن المعالجة وتخفيض متوسط عرض النطاق الترددي المستهلك ضمن الشبكة جنباً إلى جنب مع تقليل استهلاك موارد وحدة التحكم نتيجة اعتماد مفهوم الشبكة SDN.

الكلمات المفتاحية: الشبكات المعرّفة بالبرمجيات – جودة الخدمة – جودة التجربة – عرض النطاق الترددي – مؤتمر فيدوي – ترميز الفيديو القابل للتطوير – الارسال الأحادي – أشجار الإرسال المتعدد – قواعد التكيّف – المناولة أو التسليم – شجرة الامتداد

تاريخ الايداع: 2023/1/25
تاريخ القبول: 2023/12/11

حقوق النشر: جامعة دمشق – سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب **CC BY-NC-SA**

ISSN (online): 2789-6854
http://journal.damascusuniversity.edu.sy/index.php/index/index

Improving QoS in Software Defined Networks based on Adaptive Routing Algorithm to the Bandwidth variations

Ahmad Zidane[1*] Talal Hammod[2]

*[1]. PhD student, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Damascus University, Advanced Connections.

ah.zaidan88@damascusuniversity.edu.sy

[2].Professor, Mechanical and Electrical Engineering, Damascus University, talal64.hammoud@damascusuniversity.edu.sy

Received: 25/1/2023
Accepted: 11/12/2023

Copyright: Damascus University- Syria, The authors retain the copyright under a CC BY- NC-SA

Abstract:

Video conferencing has become a prevalent means of communication now on the Internet, but it faces problems that can directly affect the quality of service (QoS). Rapid and almost-random variations in bandwidth (BW) affect the image and sound quality of video conference participants who are connected to the network through cellular terminals such as LTE Access Points, especially with the increasing number of Internet users. Therefore, traditional networks find it difficult to detect those variations and deal with them in real time. Facing this reality, SDN provides greater flexibility to deal with this problem and with better efficiency compared to traditional networks. Centralized management and comprehensive visibility of SDN conditions allow for more efficient management of dynamic variation via SDN controllers, relying, for example, on routing algorithms aimed at obtaining the best quality experience for videoconference participants. In this work, we discuss and propose a routing algorithm that is adaptive to rapid variations in BW often caused by handover events. The proposed algorithm has low computational complexity to adapt the video data stream between conference participants based on the instantaneous changes in available bandwidth for each participant. Thus, improving QoS, by reducing the processing time and the average bandwidth consumed within the network along with reducing the consumption of the console resources as a result of adopting the SDN concept.

Keywords: software-defined networks (SDN) - Quality Of Service (QoS) - quality of experience (QoE) – Bandwidth (BW) – Video Conference – Scalable Video Coding (SVC) – Unicast – Multicast Tree – Adaptation Rules – Handover -Spanning Tree.

المقدمة:

أصبحت مؤتمرات الفيديو وسيلة اتصال سائدة، ولكنها تعاني غالباً من ضعف جودة التجربة Quality of Experience (QoE). تتأثر جودة التجربة، أثناء مؤتمر الفيديو، بشكل أساسي بخصائص أجهزة الاتصال للمشاركين والتي تكون غير متجانسة في أغلب الأحيان، وعلى وجه التحديد خاصية سعة (Capacity) قناة الاتصال. عموماً، تُعدُّ القناة اللاسلكية وسيط وصول مشتَرك، ويختلف النطاق الترددي المتاح باختلاف عدد المضيفين المتنافسين على هذه القناة، على سبيل المثال، حالة المتصلين بالإنترنت عبر جهاز بث شبكة منزلي Router. كما أنّه في الشبكات اللاسلكية، يتعرض عرض النطاق الترددي المتاح لتغيّرات سريعة سببها العوائق المادية في بيئة الاتصال والتي تسبب ظاهرة الخفوت Fading، ناهيك عمّا تسببه الحالة الحركية للمشترك بالنسبة لعقدة الاتصال اللاسلكي من مشاكل لها علاقة بمسألة المناولة أو التسليم Handover في حال كان اتصال المشترك بالإنترنت عبر نظام اتصال خَلَوي (مثل شبكة الجيل الرابع LTE-A على سبيل المثال لا الحصر). اذاً تنتج تلك التغيّرات السريعة غالباً عن التداخل والفشل في جودة الوصلة الراديوية Radio Link Failure (RLF)، وهذا طبعاً يختلف من شبكة وصول إلى أخرى، بالإضافة إلى مشاكل التشويش الحاصلة في القناة وإشارات الضجيج التي تؤثر على الاتصال بشكل عام. بالتالي، يمكن أن يسبب أيّ مما سبق منع ارتباط المشترك بالشبكة (انقطاع الاتصال)، أو على أقل تقدير يُصبح المشترك ملزماً بسعة نطاق ترددي تغدو منخفضة نتيجة تلك المشاكل، مما يؤدي إلى عدم القدرة على إرسال أو استقبال دفق عالي الجودة من البيانات المتراسَلة بين المشارك في مؤتمر الفيديو وباقي المشاركين، بغض النظر عن خصائص جهاز الاتصال له (أي مهما كان جهاز الاتصال حديثاً ومتطوراً). في هذا السياق، تجد الشبكات التقليدية صعوبة في اكتشاف تغيّرات النطاق الترددي للتعامل والتكيف معها في الزمن الحقيقي Real Time، بينما توفر الشبكات المعرّفة بالبرمجيات Software Defined Networking (SDN) طرقاً جديدة لإدارة النطاق الترددي للشبكة والتعامل مع تغيّراته اللحظية، فالشبكة المعرفة بالبرمجيات، لديها وجهة نظر مركزية تسمح بإدارة التغيرات الحاصلة في الشبكة بكفاءة أكبر.

اقترح الباحثون [1] خوارزميات توجيه تستخدم SDN لإنشاء أشجار اتصال متعددة البث Multicast Adaptive Trees بحيث تكون تكيفيّة و جنباً إلى جنب مع اعتماد ترميز الطبقات للفيديو القابل للتطوير من النمط Scalable Video Coding (SVC) [2]. الهدف الرئيسي من هذا البحث [1] كان توفير استهلاك النطاق الترددي للشبكة توفيراً متكيّفاً مع عدم تجانس أجهزة المشاركين، بمعنى التكيّف مع ظروف التغيّرات السريعة الحاصلة في وصلة ارتباط كل منهم بالشبكة العامة.

في الحقيقة، طرح المرجع [1] مسألة مهمة ألا وهي مسألة تأثير تغيرات عرض النطاق الترددي على جودة الخدمة للمشتركين بمكالمة الفيديو والمتصلين بالشبكة وهو بالتالي يطرح مسألة مهمة جداً، رغم قِدمه، كما نعتقد، وذلك من حيث أنّ اضطرابات حزمة الاتصال الترددية المتاحة لوصلات الاتصال بين المشتركين تؤثر على جودة المكالمة وذلك بحسب طريقة اتصالهم بالانترنت (وهي طريقة الاتصال عن طريق اتصال خلوي كما في سيناريو مناقشتنا في هذا البحث) وبحسب طبيعة هذا الاتصال من حيث تأثيرات المناولة Handover على عرض الحزمة المتاحة للمشترك وبالتالي على جودة الخدمة في حال ساءت طريقة الاتصال تلك عند المشترك نتيجة تحركه في الوقت الذي يشارك فيه الآخرين مكالمة فيديوية.

ولكن، الخوارزميات المقترحة في [1] لا تأخذ في الاعتبار التكيّف الديناميكي مع عرض النطاق الترددي المتغيّر لحظيّاً بمرور الزمن، فيكون الحل الوحيد لاستخدام تلك الخوارزميات ضمن سياق ديناميكي هو فقط عن طريق تشغيلها بشكل آلي مرات متتالية عند حدوث تغيّر ما عند أحد أطراف المشاركين بمؤتمر الفيديو، وبالتالي زيادة التكلفة من حيث الوقت والموارد المخصّصة لمنظومة اتصال الفيديو عموماً. نقترح في هذا

العمل خوارزمية توجيه متكيّفة ذات تعقيد حسابي أقل وتتطلب وقتاً وموارد شبكية أقل أيضاً، مع تخفيض استهلاك النطاق الترددي في الشبكة العامة للاتصال. نقوم بتقييم هذه الخوارزميات من خلال عمليات المحاكاة ومقارنتها بخوارزميات [1]. تظهر نتائج المحاكاة أن وقت معالجة الحل المقترح أقل بكثير من وقت معالجة الخوارزميات التقليدية. علاوة على ذلك، فإنه يحقق نفس توفير عرض النطاق الترددي، وهذا يشير إلى أن الحل الجديد أكثر تكيفاً في سياق ديناميكي للشبكة ككل ويوفر تفاعلاً عالياً وجودة خدمة عالية للمستخدمين، مع تقليل استهلاك موارد وحدة التحكم.

1- مقتضيات إدارة مؤتمر الفيديو متعدد البث:

1-1: عرض المشكلة:

نتعامل في هذا العمل مع منظومة مكالمات الفيديو متعددة الأطراف حيث يرسل جميع المشاركين دفق بيانات الفيديو الخاص بهم ويستقبلون مكالمات المشاركين الآخرين. في هذه المنظومة، يكون لكل دفق بيانات فيديو مُرسِل واحد والعديد من أجهزة الاستقبال. أي أنّها منظومة متعددة الأطراف (متعددة البث Multicast)، حيث أنّ طريقة الإرسال الأحادي (أحادي الطرف Unicast) تتمثّل في بناء مسار بين كل زوج من المشاركين، بينما يتكون أسلوب الإرسال المتعدد (المنظومة التي نتعامل معها) من حساب شجرة اتصال من كل مرسل إلى كل أجهزة الاستقبال. نفترض هنا، أن تقنية الترميز متعدد الطبقات (SVC) لتكييف دفق بيانات الفيديو متوفرة تكنولوجياً على كل مبدّلة افتراضية مفتوحة المصدر Open vSwitch (OVS) في شبكة SDN المعتبرة. بالتالي، في هذه الحالة يعد تكييف دفق بيانات الفيديو هو عملية إسقاط dropping (إهمال) لطبقات الفيديو عالية الجودة للسماح بوصول طبقات الفيديو الأدنى (تقابل مستوى منخفض الجودة من ترميز الفيديو) لصالح استمرار اتصال الفيديو بين المشاركين، بمعنى أننا نعطي أولوية هنا لاستمرار بث الفيديو حتى ولو كانت بجودة منخفضة على حساب متطلبات جودة خدمة كبيرة جداً وهذا حل ناجع لمواجهة مشكلة التغيّرات اللحظية في عرض النطاق الترددي المتاح لكل المشاركين مهما اختلفت ظروف اتصالهم. من هذا المنطلق، نقايض Trade-off بين جودة تجربة الفيديو QoE وبين جودة خدمة تراسل الفيديو QoS. هدَف الباحثون في [1] إلى تقليل مستوى استهلاك النطاق الترددي في الشبكة الأساسية عن طريق إجراء حساب دقيق لأشجار الإرسال المتعدد Multicast Trees ووضع قواعد تكيّف الترميز SVC Adaptation Rules بشكل مناسب داخل الشبكة. بينما المشكلة التي نعالجها في عملنا الحالي فهي مزدوجة من حيث منحيين، الأول: الإجابة عن السؤال كيف تتصرف شبكة منظومة اتصال الفيديو في سياق ديناميكي (في مواجهة اختلاف والتغيرات اللحظية لعرض النطاق)؟ الثاني: كيف يمكن تصميم خوارزميات توجيه أقل تكلفة وأكثر تفاعلية لتكييف تدفقات بيانات الفيديو عند حدوث تلك التغييرات؟

1-2: الأعمال ذات الصلة:

ما يزال مفهوم الشبكات المعرفة بالبرمجيات في طور التطوير، والأبحاث المتعلقة به ما تزال محاورها عشوائية غير ناضجة وغير محددة بشكل مباشر، لذلك تتعدد الأفكار حول تحسين جودة الخدمة في هذا النمط الجديد من هيكلية الشبكة وتعدد وجهات النظر حول الحالة الفنية للشبكة SDN التي يجب التركيز عليها وتطويرها. في هذا السياق، نجد أنّ المرجع [1] هو الوحيد الذي فكّر باحثوه على حد علمنا، رغم قدم نشره، في موضوع تكيّف شبكة معرفة بالبرمجيات مع تغيّر عرض النطاق الترددي للمشترك في مكالمة الفيديو أو نقل الفيديو. في المقابل، نجد مراجع حديثة تجادل في موضوع تحسين جودة الخدمة للتراسل الفيديوي في الشبكات المعرفة بالبرمجية من محور آخر كلياً مثل المرجع [31] الذي يناقش موضوع تحسين الجودة من حيث محور التعلم المعزز Reinforcement learning. ثم نجد إلى أفكار مرجع أخر مثل المنطق الضبابي fuzzy logic [30]، وأبحاث مثل تحسين جودة الخدمة من خلال فكرة موازنة الحمل A Load Balancing [32].

بشكل عام، يمكن اعتبار المرجع [26] ذي صلة بموضوع بحثنا هنا من حيث أنّه يحسّن جوة الخدمة على مستوى استهلاك النطاق الترددي ويتعامل مع شبكات معرفة بالبرمجيات، ولكن ليس من حيث بث مؤتمرات الفيديو عبر شبكات الاتصالات الأرضية، بل الفضائية (ساتلية). ففي [26] تم إنشاء بنية شبكة ساتلية تعتمد على الشبكات المعرفة بالبرمجيات (SDN)، ثم جرى اقتراح خوارزمية توجيه تكيفية يمكنها تلبية متطلبات جودة الخدمة المختلفة. واظهرت نتائج المحاكاة فيه أنه بالمقارنة مع خوارزمية شبكات الأقمار الصناعية المعرفة بالبرمجيات SDRA وخوارزمية توجيه المسار الشائعة في الشبكات التقليدية Dijkstra، فإن خوارزمية التحسين في [26] تتمتع بأداء أفضل فيما يخص استهلاك النطاق الترددي.

بالمقابل، وفيما يخص نقل الفيديو لأحداث شعبية مثل مباريات كرة القدم من الملاعب مباشرةً، لا تستطيع استراتيجيات التوجيه في الشبكات التقليدية تحقيق جودة خدمة مطلوبة، وبالتالي لا يمكن ضمان أداء جيد لتجربة المشاهدة للمستخدمين. ففي [27]، جرى استخدم الشبكات المعرفة بالبرمجيات (SDN) لتحسين جودة الخدمة (QoS) لتطبيقات أحداث كرة القدم الحية الخاصة، والتي يتم فيها اقتراح آلية توجيه QoS، سُميّت LSEA. وفي الوقت نفسه، جرى اعتبار استهلاك الناطق الترددي من بين مؤشرات الأداء. وعلى هذا الأساس، تم في [27] وضع خوارزمية توجيه Dijkstra المحسّنة وخوارزمية التوجيه المنفصلة القائمة على SDN وجرى تنفيذ خورازمية LSEA المقترحة فيه على برمجية Mininet، وأظهرت النتائج التجريبية جدواها وكفاءتها.

أيضاً، يجادل الباحثون في [28]، في أنّ خدمة الإنترنت الحالية لا تضمن جودة الخدمة مطلوبة في حين أنّ الشبكات المعرفة بالبرمجيات (SDN) هي نهج يهدف إلى فصل التحكم في الشبكة (مثل أوامر إعادة التوجيه) للحصول على إدارة وتحسين أفضل من خلال التركيز على مبدلات OVS، مما يعزز بوضوح تخطيط وتطوير الاتصالات في المجتمعات الحضرية الذكية Smart Cities. ففي [28]، جرى اقتراح خوارزمية جودة الخدمة الديناميكية عبر SDN لتحديد المسار الأمثل الذي يتوافق مع جودة الخدمة للفيديو من أجل تحسين جودة تجربة المشاركين في مكالمة الفيديو، بحيث جرى التركيز تكيّف جودة الخدمة مع مُعامِل حركة المرور traffic على أساس دقة مشاهدة الفيديو Standard Definition (SD) و High Definition (HD). ووضحتْ النتائج أن الطريقة المقترحة في [28] حصلت على جودة مشاهدة أفضل لبيئة المجتمع الذكية وتزيد من الإنتاجية الإجمالية Throughput للشبكة.

وأخيراً وليس آخراً، يقترح الباحثون في العمل [29] تقنية تعتمد على تصنيف تدفق بيانات الفيديو للتمييز بين التدفقات المعرضة للازدحام وتلك غير المعرضة للإزدحام وإعادة توجيهها على طول المسارات المناسبة لتجنب الازدحام والضياع. وتم دمج هذه التقنية في وحدة تحكم شبكية مبنية على مفهوم SDN لتوجيه اختيار المسارات المناسبة لكل فئة من فئات حركة المرور لبيانات الفيديو. وقد أدى النهج المقترح في [29] إلى تقليل استهلاك النطاق الترددي من خلال رفع إنتاجية الشبكة.

بشكل خاص، فيما يخص محور بحثنا هنا، يُعدُّ استخدام البث المتعدد للتعامل مع مكالمات متعددة الأطراف Multi-Party Calls نهجاً طبيعياً ويجري البحث فيه منذ تطوير اتصالات الوسائط المتعددة Multimedia Telecommunication. عند تحقيق هذا البث المتعدد إلى جانب اعتماد تقنيات ترميز الفيديو مثل SVC، فإنه يوفر آليات لإدارة مكالمات الفيديو مع توفير تدفقات جودة مختلفة للمشاركين. على سبيل المثال، تستخدم بعض الأعمال من [3] و [5] هذه الآليات لتحسين جودة تجربة المشاركين. ومع ذلك، لا يمكن إجراء تعديل على طبقات الفيديو في هذه الأعمال إلا على مستوى طبقة التطبيق Application Layer، وبالتالي لا يمكن التطرق إلى مسألة استهلاك النطاق الترددي للشبكة الأساسية. ولكن مع ظهور مفهوم SDN، استخدمت العديد من الأعمال نموذج البث

المتعدد لتحسين جودة تجربة المشاركين وتبسيط إدارة الشبكة مثل الأعمال من [6] إلى [8] حيث تقترح هذه الأعمال أن وحدة تحكم SDN تدير بشكل مباشر العملية كاملة وهي المسؤولة عن بناء شجرة الإرسال المتعدد واختيار طبقات الفيديو لكل وصلة بين عقدتين ضمن الشبكة. في حين أن بعض الأعمال وصل إلى تقليل استهلاك النطاق الترددي ولكنه في نفس الوقت خفّض من جودة دفق بيانات الفيديو للمشاركين، بينما البعض الآخر وفّر دفق بيانات فيديو عالي الجودة ولكن بالمقابل حقّق مستوى استهلاك كبير لعرض النطاق الترددي، على سبيل المثال، في [8]، يقوم الباحثون ببناء شجرة توجيه متعددة البث لكل طبقة فيديو من طبقات الترميز SVC المتاحة، وهذا ليس الحل الأمثل لتوفير عرض النطاق الترددي، لأنه من الممكن أن يحصل تدهور في وصلة أحد المشاركين وبالتالي لا تغدو قادرة على نقل طبقات أعلى من الترميز SVC. في هذا السياق اقترح الباحثون في [1] حلاً لتوفير أفضل جودة تجربة فيديو ممكنة للمشاركين وفي نفس الوقت تقليل استهلاك النطاق الترددي في الشبكة الأساسية SDN. يتمثل الحل المقترح في إنشاء شجرة لكل مُرسل (جذر الشجرة) إلى المستقبلات (أوراق نفس الشجرة بحيث يمكن اختيار مجموعة جزئية من جميع طبقات الترميز SVC) ثمّ وضع قواعد لتكييف طبقات الترميز SVC في حال تدهور جودة الفيديو، ووضعها على نظام تشغيل أجهزة مُبدلات شبكة SDN. جرى اقتراح خوارزميتين لبناء الشجرة في [1]: الأولى تحسب أقصر مسار للشجرة (Shortest Path Tree (SPT، والتي تحسب أقصر مسار بين كل مرسل والمشاركين الآخرين (المستقبلات) المرتبطين به، والثانية إجراء تصغير حجم شجرة الامتداد (Minimizing Spanning Tree (MST، ويجري تنفيذ كل من الخوارزميتين السابقتين بشكل تكراري iteratively. تحسب خوارزمية MST أولاً أقصر مسار بين المرسل والمستقبل الأول (وفقاً لقاعدة تصنيف محددة لطول المسار)، ثم أقصر مسار بين أي عقدة في المسار السابق والمستقبل الثاني في شجرة مرسل ما، وهكذا دواليك. وفي كل خطوة، يُحسَب أقصر مسار بين شجرة الإرسال المتعدد الحالية ونقطة الاستقبال التالية. تعمل الخوارزميتان على توفير نطاق ترددي جيد جداً مع توفير أقصى جودة تجربة للفيديو لكل مشارك يمكن أن يتلقاها. ومع ذلك، لم يتم تقييم هذه الطريقة في سياق ديناميكي، أي في ظل تغيّرات لحظيّة لعرض النطاق الترددي لقناة الوصول سواء أُجري هذا التغيير من طرف المرسل أو من طرف أجهزة استقبال المشاركين المرتبطين به، وهذا التغيير اللحظي هو مسألة واقعية لا بدّ من مواجهتها والتطرق إليها في الشبكات الحالية التي يُراد تراسل بيانات فيديو عبرها وخاصة الشبكات الضخمة مثل الشبكة العنكبوتية، وذلك لكون الاستهلاك العالي للنطاق الترددي مشكلة متفاقمة، فمن حيث المبدأ ليس من الضرورة اعتماد معدلات نقل بِتْ Bit-Rates عالية جداً لوصلة صاعدة من المشترك باتجاه الشبكة في حال كانت وصلته الراديوية بحالة فشل أو مشكلة ما، ولذلك وجبَ هنا، عدم اعتماد هكذا قيم لمعدل نقل البِتْ طالما أن ظروف الوصلة الصاعدة لا تسمح إلا بنطاق ترددي منخفض وبالتالي وَجَبَ توفيره بشكل تكيّفي عبر إدارة الشبكة نفسها بشكل مركزي، وهذا هو بيت القصيد للشبكات المعرفة بالبرمجيات.

هناك مؤلّفَات كثيرة حول توجيه مكالمات الفيديو مع الأخذ بعين الاعتبار التغييرات اللحظية للنطاق الترددي. على سبيل المثال، العمل [9] يوفر بنية شبكية والعديد من الآليات لتغيير دفق بيانات الفيديو بحيث يجري التكيّف مع تغيّرات الازدحام وعرض النطاق الترددي المتاح. يحقق العمل المذكور في كل من طرق الإرسال الأحادي والبث المتعدد، ولكن يتم تنفيذ التحكم في الازدحام على مستوى طبقة التطبيق، وبالتالي فقط عند نقاط نهاية الاتصال دون الخوض في حل الشبكة المعرفة بالبرمجيات. يبحث مؤلفو الورقة [10] في تأثير الازدحام واختلاف النطاق الترددي بين المشاركين في مكالمة فيديو عبر البرنامج المألوف Skype. ومع ذلك، فإن دراسة الحالة في [10] تشمل مضيفين فقط (مكالمة فيديوية من شخص لآخر

فقط)، ومرة أخرى، يتم تنفيذ آلية التكيّف على مستوى طبقة التطبيق. تركّز بعض الأعمال الأخرى على تحقيق إدارة تفاعلية مع اختلاف النطاق الترددي بين المشاركين في مكالمة فيديو، على سبيل المثال، العمل [11] يقترح نهجاً لنقل الفيديو متعدد الطبقات حيث يتم تقدير معدل البت مباشرةً على مستوى الطبقة الفيزيائية Physical Layer، مما يسمح بالتكيف السريع مع عرض النطاق الترددي الجديد في كل لحظة جديدة أثناء المكالمة. من جهة أخرى، جرى التحقيق في النهج الجديد لنقل الفيديو التناظري الزائف Pseudo Analog Video Transmission، والذي يسمح بالتكيّف المباشر لجودة دفق بيانات الفيديو وفقاً لضوضاء (ضجيج) القناة، كما في [12]، [13]. يتمثّل عيب هذه الأعمال المذكورة لمكالمة الفيديو في ظل اختلاف عرض النطاق الترددي في أنّ تكييف جودة الفيديو تعالَج فقط عند نقاط النهاية (عند طرف أجهزة المشاركين وليس عبر إدارة مركزية أي ليس عن طريق الشبكة المعرفة بالبرمجيات). بكل الأحوال، وفي حالة نهج الإرسال المتعدد، يترتب على المعالجة عند نقاط النهاية فقط نتيجتان: 1) إذا أُجرِي تكييف جودة الفيديو عند المرسل، فسوف يتكيّف هذا المرسل (عبر خوارزمية التوجيه المعتبرة)، فقط مع جودة الفيديو لنقطة الاستقبال ذات النطاق الترددي الأدنى. وهذا يعني أن أجهزة الاستقبال ذات النطاق الترددي الأعلى لا يمكنها الاستفادة من الجودة المقابلة لقناة الوصول الخاصة بها، أي كأنها فعلياً ليست مستفيدة من النطاق الترددي الأعلى المتاح لها، ومن هذا المنطلق نقول أنّ النطاق الترددي جرى استهلاكه دون استخدامه وهذا عيب أساسي في منظومة شبكة الاتصال ووجب حلّه. 2) إذا أُجرِيَ التكيف عند أجهزة الاستقبال فقط، يتعين على المرسل عندئذٍ إرسال تدفق بيانات بأعلى جودة من خلال شجرة الإرسال المتعدد المحسوبة، مما يعني الحاجة إلى مستوى أعلى من استهلاك النطاق الترددي في الشبكة الأساسية (الحاجة إلى نطاق ترددي أعلى لتوفير تدفق بيانات عالي الجودة ذاك).

2-3: الحل المُقتَرَح:

من منظور توفير أعلى جودة ممكنة لمكالمة الفيديو لكل مستقبل جنباً إلى جنب مع تخفيض استهلاك عرض النطاق الترددي إلى الحد الأدنى، نُجري أولاً تقييم الخوارزمية في العمل [1] في ظل التغيّرات العشوائية لعرض النطاق الترددي سواء بالنسبة لوصلة ربط المرسل أو وصلات ربط المستقبلين في شجرة الشبكة التي تجمعهم. يتضمن الحل المقترح تشغيل الخوارزمية التي تحسب أشجار البث المتعدد أولاً ومن ثمَّ استبدال قواعد التكيّف عند كل تغيير حاصل في عرض النطاق الترددي، والذي قد يكون مكلفاً من حيث الزمن والموارد المتاحة في الشبكة. يجري بالتالي اقتراح خوارزميات مترابطة لا تعيد بناء أشجار البث المتعدد في كل مرة يجري فيها تراسل بيانات مكالمة الفيديو، ولكنها تنظّم قواعد التكيّف مع تغيرات عرض النطاق الترددي على النحو الأمثل بحيث لا يحصل استهلاك معدلات بِتْ مرتفعة لنقل البيانات وفي نفس الوقت ضمان استمرارية جودة مقبولة لخدمة مكالمة الفيديو. لا يتطلب هذا الحل أي حساب للمسار (لأنّه لا يجري إعادة حساب أشجار الربط بين المرسلين والمستقبلين لبيانات الفيديو) ولكنه يتطلب فقط تعديل قواعد تعيين معدلات نقل البِتْ في كل وصلة ضمن بيان الشبكة Network Graph بطريقتين: التكييف للأعلى Relocate Up أو للأسفل Relocate Down، وتكون هذه الطرق سريعة بشكل خاص عندما يكون حجم أشجار البث المتعدد صغيراً، مما يؤدي إلى تحسّن كبير في التعقيد الحسابي لخوارزمية التوجيه ووقت المعالجة والتفاعل بين المشاركين، وهذا يعني جودة تجربة فيديو فعّالة. يجري تطوير الخوارزميات الخاصة بعملنا هذا بالاستناد إلى تلك الخاصة بالعمل [1] والتي لا يزال من الممكن استخدامها لبناء أشجار أوليّة متعددة البث، ولكن مع تطوير قواعد التكيّف مع تغيّرات لحظية لعرض النطاق الترددي بالزمن الحقيقي لمكالمة الفيديو.

3-نموذج النظام والخوارزميات المُطوَّرة:

3-1: افتراضات تقنية:

نفترض أن الشبكة مُمَكَّنَة بمفهوم SDN وأن وحدة التحكم SDN Controller تدير المكالمات ولديها رؤية شاملة لكل ظروف الشبكة وحالات الاتصال في كل من عقدها ووصلاتها. لدعم سياق الشبكة المعرفّة بالبرمجيات بمفهومها العام، نفترض أيضاً أنّه يمكن لجميع المُبدلات الاتصال بوحدة التحكم ويُفتَرَض أن تكون قادرة على المعالجة التكيّفيّة لتدفقات الترميز SVC عن طريق إسقاط (إهمال) طبقاته غير المستخدمة (غير الضرورية)، وبهذا المنحى لا يكون دور جهاز المُبدِّل OVS محصوراً فقط بتوجيه طرود البيانات عبر الشبكة كما كان عليه الحال في الشبكات التقليدية، بل أيضاً القدرة على معالجة تلك الطرود والتحكم بظروف الاتصال. إن عدداً من استخدامات جهاز الشبكات المُعرفة بالبرمجيات OVS تُعتبر متاحة اليوم، كمصادر تجارية ومفتوحة. وفي الأصل تُعتبر أجهزة برمجيات الشبكات المُعرفة بالبرمجيات في الغالب مصادر مفتوحة قابلة للبرمجة. وحالياً؛ يوجد اثنان من البدائل متاحة: المبدل الافتراضي المفتوح المصدر OVS [20] من شركة نيسيرا، وإينديجو [21]. إن خطوط انتاج مصنعي معدات الشبكات، مثل: سيسكو، وHP و NEC و IBM وجونيبر، وإكستريم، قد أضاف دعم تدفق البيانات عبر هكذا أجهزة وبشكل مفتوح المصدر وقابل للبرمجة لبعض من المبدلات المتاحة تجارياً [22, p133]. ويدعم الإصدار الحالي من OVS الميزات التالية مقتبسة من [23].

- Standard 802.1Q VLAN model with trunk and access ports
- NIC bonding with or without LACP on upstream switch
- NetFlow, sFlow(R), and mirroring for increased visibility
- QoS (Quality of Service) configuration, plus policing
- Geneve, GRE, VXLAN, STT, and LISP tunneling
- 802.1ag connectivity fault management
- OpenFlow 1.0 plus numerous extensions
- Transactional configuration database with C and Python bindings
- High-performance forwarding using a Linux kernel module

يُبيّن الجدول (1) أهم مُعامِلات النظام المدروس في هذا البحث، وقد تمّ اعتماد القيم الواردة فيه بناءً على: 1- اعتبار الوصلات التي يتصل وفقها المشاركون بالفيديو مع الشبكة هي وصلات اتصال راديوية خلوية وفق نظام الاتصال LTE كما يبين السطر الأول من الجدول (1)، 2- اعتبار طريقة الترميز المتاحة لحزم الفيديو هي SVC وهذه الطريقة تتيح أربع طبقات ترميز موصوفة في معيار SVC نفسه، 3- وطالما نتعامل مع شبكة SDN لها متحكم مركزي فتكون حزمة الاتصال بينه وبين المبدلات OVS المرتبطة به وفق معيار شبكة SDN هي بأقصى Gbps 1. كما هو مُبيّن في الجدول (1) هناك 4 طبقات على الاكثر لتدفق بيانات الترميز SVC على خرج المبدلة OVS بحيث يمكن أن يرتفع مُعدَّل نقل البِتْ المتاح في كل مُبدِّل بشكل تصاعدي من الطبقة الأولى إلى الطبقة الرابعة، وبحيث لا يمكن استخدام طبقة معينة إلا إذا أمكن استخدام جميع الطبقات الأدنى منها أيضاً. بالإضافة إلى ذلك، نفترض أنّ كل جهاز (الإرسال/الاستقبال) لكل مشارك في مكالمة الفيديو يمكن أن يقبل أكبر عدد من طبقات الترميز SVC المسموح به من خلال سعة الوصلة الهابطة الخاصة بهذا المشترك، فإذا لم يكن لدى المشارك نطاق ترددي كافٍ لاستقبال أي طبقة من الطبقات الأربعة المتاحة في الشبكة ككل، فسيتم رفض مكالمة الفيديو الخاصة به، وهذا مبدأ أساسي في عمل منظومة الاتصال المعتبرة في هذا العمل. نفترض أخيراً أنّه يمكن توصيل العديد من المشاركين لاسلكياً وفق اتصال النظام LTE بنفس العقدة، (اتصال أكثر من مشارك في مكالمة الفيديو بنفس محطة لنظام الجيل الرابع مثلاً في منطقة جغرافية تقابل مستوى مدينة ما)، وهذا الافتراض هو لجعل قناة الوصول لعدة مشاركين بمكالمة الفيديو عرضة لظروف اتصال يتغيّر خلالها عرض النطاق الترددي المتاح للقناة بالنسبة لكل مشارك على حِدى، هذا الافتراض هو ما يوطّد العشوائية في تغيّرات عرض النطاق الترددي، بهدف جعل المحاكاة واقعية في سياق الموضوع المطروح هنا.

الجدول (1) مُعاملات أساسية للنظام تتضمن طبقات الترميز SVC المعتبَرة (الباحث).

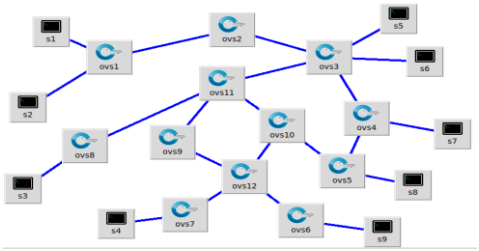
الواصفة	القيمة
نمط اتصال وصلات ولوج المشتركين إلى الشبكة	LTE
طبقات الترميز SVC المتاحة، مع سرعة تراسل الفيديو وفق كل طبقة منها	L1: Scalable Constrained Baseline, ~90 Kbps L2: Scalable Baseline, ~250 Kbps L3: Scalable Constrained High, ~0.5 Mbps L4: Scalable High, ~1 Mbps
سرعة التراسل (لأوامر التحكّم) المتاحة بين قلب الشبكة (المُتحكِم) وبين مبدلات OVS في شبكة مؤتمر الفيديو	1 Gbps

3-2: نموذج بيان الشبكة الاصطلاحي Formal Network Graph Model:

تُعتبَر هيكيلية شبكة SDN هي المعيار الاصطلاحي الرئيسي لنطاق عملنا هنا، حيث أنها هي النموذج الشبكي وأساس المحاكاة في هذا البحث، وهي تتألف من مستخدمين مضيفين Hosts ومن متحكّم Controller ومن مُبدِّلات قابلة للبرمجة OVS على مستوى برتوكول OpenFlow وهذا هو ما يمثل من الناحية المفاهيمية المخطَطَ الاصطلاحي للشبكة SDN. ولمحاكاة الشبكة SDN وفق هذا المخطط البياني الاصطلاحي، جرى في المحاكاة في هذا البحث استخدام بيانان شبكيان يحاكيان واقع شبكة ذات عدد ضخم من العقد تقارب بمفهومها شبكة انترنت، هما Erdos-R´enyi model (ER) [14] و Magoni-Pansiot model (MP) [15]، وهما نموذجان شبكيان يعبران من حيث النمذجة الرياضياتية وفق نظرية البيان Graph Theory عن مقاربة شبكة الانترنت العالمية ويجري استخدامهما عموماً في الأدبيات، ويوجد لكل منهما كيان جاهز للتعامل معه بلغة Python عبر مكتبة NetworkX [16].

نُمثِّل الشبكة ببيان Graph نرمز له $G = (V, E)$ حيث V هو مجموعة العقد فيه وعددها n، وE هي مجموعة الوصلات (حواف Edges) في هذا البيان وعددها m. نشير بالرمز P إلى مجموعة المشاركين بمكالمة الفيديو ولعددهم بالرمز p. وبالتالي يكون لدينا p شجرة بث متعدد؛ شجرة واحدة تمثِّل كل مشارك مُرسِل لصورته الفيديوية إلى مشاركين آخرين مستقبلين لهذه الصورة ويجري تمثيلهم كأوراق لتلك الشجرة. وبالتالي، ترتبط شجرة الإرسال المتعدد التي نرمز لها بالرمز T_i بمرسل وحيد نرمز له بالرمز s_iوبمجموعة من المستقبلات نرمز لها بالرمز R_i لتحوي العناصر r_{ij} بحيث يتغير العدّاد j على كل القيم $1,2, \dots, p$ما عدا القيمة i التي تخص المُرسِل المرتبط بأولئك المستقبلين. في هذا السياق، نعتبر أن كل المشاركين مستقبلين كانوا أم مرسِلين هم عقد لكل شجرة بث متعدد تمثّل فيها المستقبلات أوراق الشجرة Tree Leaves، ويُمثّل فيها المُرسِل جذر الشجرة Tree Root. لمزيد من التوضيح في هذا السياق، تستند الفكرة في عملنا إلى تحسين جودة الخدمة من خلال مواجهة التغيرات المفاجئة في حزمة الإرسال/الاستقبال للوصلة الراديوية التي تربط المشترك بالفيديو عبر نظام الاتصال الخلوي LTE مع شبكة الاتصال الكلية المشكلة وفق مفهوم SDN، فعند أي تغيّر مفاجئ في عرض الحزمة المرسلة/المستقبلة عند المستخدم يجري اعتباره كجذر في الشبكة ككل وباقي المستخدمين كأوراق ليشكلوا مع بعضهم شجرة بث متعددة، بحيث يجري تعديل قواعد طبقات ترميز SVC في المبدلات OVS الواقعة على جميع مسارات الشبكة SDN والتي تربط ذلك جذر شجرة البث المتعددة هذه مع أوراقها وبما يتناسب (بشكل تكيّفي) مع تغيرات عرض الحزمة الحاصلة، وهكذا عند وقوع حدث هو تغير في عرض الحزمة لدى المشترك، والذي قد يكون سببه في غالب الأحيان بسبب

عملية مناولة Handover ضمن شبكة اتصاله الخلوية، وهو السيناريو الذي ندرسه في ورقتنا هذه، نكون هنا أمام حدث وجَبَ التعامل معه عبر تغيير قواعد طبقات الترميز SVC بالانتقال إلى طبقة أعلى أو أدنى Relocated up/down بحسب مقتضيات الخوارزميات المعروضة في هذا البحث. في هذا السياق، يصبح كل مُرسِل قد تغيّر عنده عرض النطاق الترددي المرسَل مثلاً يصبح جذراً لشجرة بث متعددة ممكنة، ويمكن في هذا المنحى أن يكون هناك أكثر من مرسل حصل عنده هذا، ولذلك يكون من الممكن وجود عدة أشجار بث متعددة، يجري التعامل مع مبدلاتها الموافقة في متحكم SDN وإمكانية تعديل قواعد الترميز فيها بشكل تفرعي، لضمان تحسين جودة الخدمة. بالنسبة لأي وصلة محددة بواسطة زوج من العقد (x, y)، تجري الإشارة إلى قيمة عرض النطاق الترددي (أو قيمة السعة) بالرمز $B(x, y)$، ونشير إلى معدل البِتْ (أي قيمة السعة الفعلية المفترضة والمستخدمة أصلاً في شجرة ما من شجرات المرسِلين T_i) بالرمز $b_i(x, y)$ حيث تكون هذه القيمة واحدة من أجل كل مسار وصلة يربط كل مرسِل بمستقبل ما في كل شجرة T_i. في الشجرة T_i، يُشار إلى أصل العقدة الأب x في هذه الشجرة بالرمز $P_i(x)$ ومجموعة أبنائها (إن وجدت) بالرمز $C_i(x)$. في هذا السياق يكون لكل مُستقبل نفس الأصل الأب في جميع الأشجار، وذلك لأنه ببساطة يرتبط كل مستقبِل في الشبكة بوصلة اتصال راديوي سلكي أو لا سلكي بكامل الشبكة الأم. نشير أيضاً بالرمز $B(R)$ إلى عرض النطاق الترددي المتاح للوصلة الهابطة بالنسبة للمستقبل R، وبالرمز $b_i(R)$ إلى معدَّل نقل البِتْ المتاح للشجرة T_i المرتبط بها هذا المستقبل. وبالمثل، نشير بالرمز $B(s_i)$ إلى عرض النطاق الترددي المتاح للوصلة الصاعدة بالنسبة للمرسِل s_i، وبالرمز $b(s_i)$ إلى مُعدَّل نقل البِتْ المتاح لهذا المُرسِل. نفترض أيضاً، أنه في كل عقدة في الشبكة ولكل شجرة مرسِل منها، هناك مجموعة من قواعد التكيّف يتم المفاضلة فيما بينها تكيّفيّاً مع التغيرات اللحظية لعرض النطاق الترددي الحاصلة سواء عند أي مستقبل أو أي مرسِل في الشبكة. يتوافق هذا المبدأ مع تكيف طبقات الترميز SVC في الشبكة، حيث يجري اختيار الطبقة المناسبة للترميز في كل وصلة من وصلات كل شجرة من شبكة التراسل بما يتكيّف مع ظروف عقد الاتصال مرسِلات كانت أم مستقبلات. من جهة أخرى، وفي شجرة محددة T_i من الشبكة وعلى عقدة x لا على التعيين منها، نشير بالرمز (b, b') إلى قاعدة التكيف للابن c الخاص بالعقدة x وهذا يعني أن العقدة x يمكن أن تتلقى عبر وصلتها الهابطة بيانات فيديو بمعدل بِتْ يساوي b ولكنها لا يمكن أن تُرسِل، إلى العقدة الابن لها، بيانات فيديوية عبر وصلتها الصاعدة إلا بمعدّل بِتْ يساوي b' أصغر من b، حيث يجري في هذه العقدة (سواء أكانت مرسِل أم مستقبِل أم عقدة مُبدّل) منع أو إسقاط طبقات الترميز SVC تلك التي تقابل معدلات نقل بِتْ أكبر من b' قبل إرسال دفق بيانات الفيديو إلى الابن c لهذه العقدة. هذا بالضبط هو ما يدل على فحوى قاعدة التكيّف المشار إليها هنا بالرمز (b, b') والتي تحكم عموماً خيارات معدلات بِتْ لكل من عمليتي الارسال والاستقبال لكل عقدة x من كل شجرة T_i في الشبكة. يمثل الشكل (1) مثالاً توضيحياً لبيان الشبكة الاصطلاحي، حيث لدينا $p = 9$ مستخدمين (مضيفين Hosts; $s1, \dots, s9$ مشاركين بمؤتمر الفيديو، وحيث عدد العقد الكلي $n = 21$ (عدد المبدلات Open Virtual Switches (OVS في الشبكة SDN يساوي 12 بالإضافة إلى عقد المشاركين)، وعدد الوصلات في الشبكة ككل يساوي $m = 22$.



الشكل (1) مثال توضيحي لبيان الشبكة الاصطلاحي

فإذا كان s1 (مع $i = 1$) هو مرسل، يكون $B(s_i) = B(s1)$ عرض النطاق الترددي للوصلة الصاعدة (وصلة هذا المرسل

مع المبدلة ovs1 في الشبكة) و $b(s_i) = b(s1)$ هو معدل نقل البِتْ المرتبط به في الشجرة T_1 المفترضة هنا، وتكون مجموعة المستقبلين (هم مرسلين أيضاً في الشبكة): $R1 = \{r12 = s2, r13 = s3, r14 = s4, r15 = s5, r16 = s6, r17 = s7, r18 = s8, r19 = s9\}$، في هذه الحالة لدينا الشجرة T_1، وفيها إذا كانت المبدلة ovs11 هي عقدة x لا على التعيين في بيان الشبكة، عندئذٍ تكون العقدة الأصل الأب الخاص بها في الشجرة T1 هو العقدة المبدلة P1(ovs11)=ovs3 ومجموعة أبناء المبدلة ovs11 هم: $C1(ovs11) = \{ovs8, ovs9, ovs10\}$، وعندما المستقبل يكون s5 ممثلاً لأحد المستقبلين في الشجرة T_1، يكون $B(s5)$ هو عرض النطاق الترددي المتاح للوصلة الهابطة بالنسبة للمشترك s5 والتي تقابل سرعة الاتصال بالشبكة (معدل نقل البِتْ) التي توفرها المبدلة ovs3 والتي يتصل بها هذا المشترك.

3-3: خوارزميات التوجيه المُطوَّرة:

كما ذكرنا سابقاً، تحسب طريقتا SPT وMST أشجار الإرسال المتعدد وتعيّنان وتضعان قواعد التكيف في كل عقدة فتحددان لها قيم مُعدلات البِتْ المتكيّفة مع التغيّرات اللحظية لعرض النطاق الترددي الحاصل عند أطراف المرسِلين أو المستقبلين أو كلاهما في الشبكة الأم. نستخدم هاتين الطريقتين في الخوارزميات المطوَّرة هنا في مرحلة تهيئة الشبكة المعرفة برمجيّاً، أي عند البدء بإجراء المكالمة. في هذا السياق، عندما يحدث اختلاف ما (أو تغيّر لحظي ما) في عرض النطاق الترددي، ونظراً لأن إعادة حساب الأشجار مُكلِف ضمن أي خوارزمية توجيه لحزم البيانات في الشبكة التقليدية، فإننا نختار عدم تغيير الأشجار التي يتم اعتمادها في مرحلة التهيئة ويجري التركيز على تعيين ووضع قواعد التكيّف المناسبة في كل عقدة من كل شجرة في الشبكة الأم. ولكن لضمان حصول كل مشارك على أعلى جودة فيديو يسمح بها عرض النطاق الترددي الخاص به (حتى ذلك النطاق الذي انخفض عرضه نتيجة مشاكل في الوصل الراديوية أو مشاكل في التداخل أو مشاكل في التسليم)، تعيد الخوارزمية المقترحة هنا على التوازي مع القاعدة الموضوعة حساب مُعدلات البِتْ وفقًا للصيغ التالية:

$$b_i^{new}(r_{ij}) = \begin{cases} b(s_i) & , \quad b(r_{ij}) > b(s_i) \\ b_i^{previous}(r_{ij}) & , \quad \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

$$b^{new}(s_i) = \begin{cases} \max_{r_{ij}}\{b_i(r_{ij})\} & , \quad \max_{r_{ij}}\{b_i(r_{ij})\} < b^{previous}(s_i) \\ b^{previous}(s_i) & , \quad \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

في سياق التغيّر الديناميكي المعتبر في هذه الدراسة، يجب استخدام الصيغ (1) (في حال حصل التغير في النطاق الترددي عند المستقبل) و (2) (في حال حصل التغير في النطاق الترددي عند المرسل) عند كل اختلاف طارئ في عرض النطاق الترددي. الصيغة الأولى تضمن أن جهاز الاستقبال r_{ij} يحصل على الحد الأقصى بالمقارنة بين ما يسمح به عرض النطاق الترددي $B(r_{ij})$ للوصلة الهابطة إلى المستقبل r_{ij} مقسوماً على عدد التدفقات $p-1$ لحزم البيانات الفيديوية الواردة إلى كل المستقبلين الآخرين الذي عددهم أيضاً يساوي $p-1$، وبين ما يسمح به عرض النطاق الترددي للوصلة الصاعدة للمرسل أي عرض النطاق $B(s_i)$. تضمن الصيغة الثانية أن يرسل المرسِل أقصى (max) جودة فيديو مطلوبة $b(r_{ij})$ المقابلة لكل مستقبل والمقابلة أيضاً لطبقة ترميز ما من طبقات الترميز SVC الأربعة المفترضة في الشبكة) ومقارنتها مع ما يسمح بها عرض النطاق الترددي للوصلة الصاعدة للمرسل $B(s_i)$. المبدأ الأساسي لخوارزمياتنا هنا هو موائمة هذه القيود دائماً مع ظروف تغيّرات عرض النطاق الترددي في عقدة ما من المرسِلين أو المستقبلين ولكن مع الحد الأدنى من التعقيد الحسابي. وبالتالي، عند حدوث تغيير في عرض النطاق الترددي، تتم إعادة حساب معدلات البت للمسار الذي يربط كل مُرسِل بكل مستقبل منتميين إلى كل شجرة من شجرات بيان الشبكة. فإذا كان هناك تغيير في معدل البت في جهاز استقبال، فسيتم نشر هذا التغيير ويتم دفع قواعد التكيف إلى أعلى الشجرة Relocate Up حتى يتم الوصول إلى عقدة

تحسين جودة الخدمة في الشبكات المعرفة بالبرمجيات بناءً على..... المرسِل. وبالمثل، إذا حدث تغيير في معدل البت عند المرسل، فسيتم الانتشار لأسفل Relocate Down.

3-3-1: خوارزمية التعديل نحو الأعلى في حال حصل التغير في عرض النطاق الترددي عند أحد المستقبلين Relocate Up:

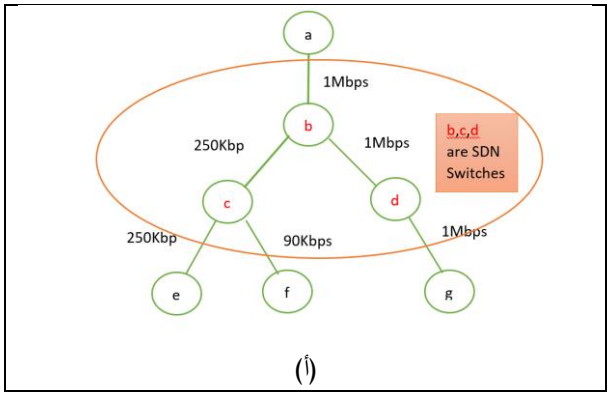
يُبيّن الشكل (2) التالي رمّاز pseudocode هذه الخوارزمية والتي تُطبَّق نتيجة وقوع حدث مناولة لأحد مستقبلي بث التراسل الفيديوي مع برج تغطية LTE جديد يتصل به هذا المستقبل.

Algorithm 1: Relocate Up

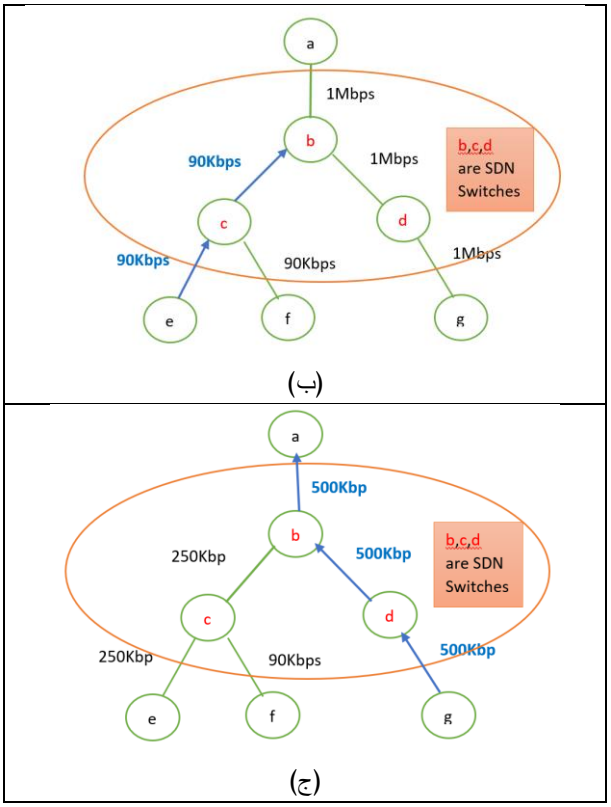
1 Foreach s_i (multicast sender) do
2 Create T_i of s_i (its receivers (leaves) & OVS nodes)
3 Foreach receiver having Handover event in T_i do
4 Foreach OVS r in path of this receiver in T_i do
5 Find $P_i(r), c_{ij} = \{C_j(P_i(r))\}$,
6 where $1 \le j \le k, k \leftrightarrow$ #children of r
7 Foreach j do
8 Calculate $b_{\max} = \max_k\{b_i(P_i(r), c_{ij})\}$
9 Calculate $b_{\min} = \min_i\{b_{\max}, b_i(s_i)\}$
10 If $b_i(P_i(P_i(r)), P_i(r)) \neq b_{\min}$ then
11 $b_i(P_i(P_i(r)), P_i(r)) \leftarrow b_{\min}$
12 Call AdaptRule for $P_i(r)$

الشكل (2) رمّاز الخوارزمية Relocate Up-1 في حالة وقوع حدث مناولة (الباحث).

نستعرض أفكار الحل المقترح عبر المثال التالي. يوضح الشكل (3) آلية انتشار التعديل في قيم معدلات البِتْ على طول مسار ما من شجرة الاتصال بين المُرسِل وعدة مستقبلين.



(أ)



الشكل (3) مثال توضيحي لانتشار التعديلات في قيم معدلات البِتْ (الباحث)

يوضح الشكل(3-أ) شجرة متعددة البث حيث تكون العقدة a هي المرسل والعقد e و f و g هي المستقبلات. العقد الأخرى البينية هي مُبدّلات الشبكة SDN، تظهر قيمة معدل البت لكل وصلة حافة في المسار بجانب هذا المسار. في الشكل(3-ب)، وبسبب تغيير النطاق الترددي للوصلة الهابطة عند المستقبل e، لم يعد معدل البِتْ للوصلة (c؛ e) يساوي 250 كيلو بت في الثانية (نفترض هنا في هذا المثال أنّ عرض النطاق الترددي عند هذا المرسل لم يعد يستطيع استقبال معدلات بِتْ عالية بسبب انخفاض عرض النطاق الترددي لسبب ما من الأسباب) ولكن 90 كيلو بت في الثانية. بينما لا تحتاج العقدتين e و f إلى تدفق بيانات بمعدل 250 كيلو بت في الثانية، يتم إسقاط الطبقة من طبقات الترميز SVC المقابلة لهذا المعدل عند العقدة b، التي هي عقدة أب للعقدة c. في الشكل (3-ج) يتغير معدل البت (d؛ g) من 1 ميجابت في الثانية إلى 0.5 ميجابت

في الثانية. يتم نشر هذا التغيير حتى العقدة b، حيث لا تتطلب العقدة c ولا العقدة b مُعدّل بِتْ يساوي ميجابت في الثانية، وبالتالي يتم أيضًا تكييف معدل بت العقدة الجذر المُرسِل a. تعمل هذه الطريقة على تكييف معدل البت لأعلى من جهاز الاستقبال، ولكن نادراً ما يصل هذا التعديل إلى المرسل. يحدث هذا التعديل عند المرسِل فقط في الحالة التي يكون فيها معدل البت لجهاز الاستقبال والمرسل متماثلين، ويؤثر تغيير النطاق الترددي في أحدهما على الآخر على مستوى مُعدّل البِت المستخدم. الهدف من هذه الخوارزمية هو تخفيض تعقيد الحساب وتخفيض قيمة النطاق الترددي المستهلك. من أجل ذلك، توضع قواعد التكيف التي تسقط طبقات تدفقات بيانات الفيديو SVC عالية الجودة عند العقد الأقرب ما يمكن من المرسل انطلاقاً من المستقبل الذي جرى عنده تغير ما في النطاق الترددي نتيجة عارض ما في وصلته الراديوية، وهكذا يقل استهلاك النطاق الترددي في كامل لشبكة. تشرح الخوارزمية 1 المبينة في الرمّاز في الشكل (2) هذه الطريقة، حيث من أجل كل مستقبل يحصل عنده التغيّر في النطاق الترددي، يجب أن يُنشَر التغيير في قواعد التكيف للترميز SVC بشكل متكرر في كل مرة يحصل فيها هذا التغيّر ومهما كان موقع المبدلة OVS (التي نعبِّر عنها في الرمّاز بالرمز r) والتي يجب عند خرجها ودخلها وعلى طول المسار الواصل بين المستقبل والمرسل تعديل طبقات الترميز SVC. في كل خطوة من خطوات الخوارزمية، يجري ما يلي: أولاً يُتحقَّق ما إذا كان جميع أبناء العقدة $P_i(r)$ (أي $c_{ij} = \{C_j(P_i(r))\}$) يتلقون مُعدَّل بِتْ أقل من العقدة الأب للمبدلة r أي قيمة معدل بت تساوي $b_{\min}$. إذا كان الأمر كذلك، فإن العقدة $P_i(r)$ لا تحتاج إلى استخدام معدل البت الحالي من العقدة الأب لها $P_i(P_i(r))$ وهنا يجري تكييف معدل البت باستخدام قيمته الأخيرة ويجري بالتالي تحديث قواعد التكيف في العقدة $P_i(P_i(r))$ بواسطة الخوارزمية 3 التي هي خوارزمية تحديث قواعد التكيّف والموضحة لاحقاً. تعمل الخوارزمية 1 بشكل متكرر لتقوم بتحديث معدلات البِتْ حتى تصل إلى المرسل أو ليست هناك حاجة للمضي قدماً في حال لا يحتاج المرسِل إلى ذلك التعديل.

3-3-2: خوارزمية التعديل نحو الأسفل في حال حصل التغير في عرض النطاق الترددي عند أحد المُرسِلين Relocate Down:

يُبيّن الشكل (4) التالي رمّاز هذه الخوارزمية والتي تُطبَّق نتيجة وقوع حدث مناولة لأحد مُرسِلي البث الفيديوي.

Relocate Down2Algorithm :

1 Foreach s_i having handover event do
2 Create T_i of s_i (its receivers (leaves) & OVS nodes)
3 Foreach receiver in T_i do
4 Foreach OVS r in path of this receiver in T_i do
5 Find $P_i(r), c_{ij} = \{C_j(P_i(r))\}$,
6 where $1 \le j \le k, k \leftrightarrow$ #children of r
7 Foreach j do
8 If $b_i(r, c_{ij}) \neq b_i(P_i(r), r)$ then
9 $b_i(r, c_{ij}) \leftarrow b_i(P_i(r), r)$
10 Call AdaptRule for $P_i(r)$

الشكل (4) رمّاز الخوارزمية Relocate down 2- في حال وقوع حدث مناولة (الباحث).

تُشغَّل هذه الخوارزمية لتعديل قيمة معدل البِتْ للمرسل أي $b(s_i$ عند حدوث تغيّر ما في عرض النطاق الترددي المقابل للوصلة الصاعدة عند هذا المرسل. الطريقة المستخدمة لنشر تعديل مُعدلات البِت من المرسل باتجاه المستقبلين هي نفسها تقريباً في الحالة السابقة، باستثناء أن الانتشار هنا يتم من المُرسل إلى المستقبلات (اتجاه معاكس للخوارزمية السابقة). الفرق الرئيسي بين هذه الخوارزمية والخوارزمية المعاكسة هو أن انتشار تعديل معدلات البِتْ لا يتم فقط على فرع واحد من الشجرة الواصلة بين المرسل والمستقبلين (حيث في الحالة السابقة عند تغير النطاق الترددي عند أحد المستقبلين فإن انتشار تعديل معدلات البيت يجري على مستوى الفرع الواصل بين هذا المستقبل وبين المرسل المرتبط به)، ولكن يمكن أن

يحدث على عدة فروع وصولاً إلى الأوراق (المستقبلات) (أي من الممكن أن يتغيّر معدل البْت لعدة مستقبلين مرتبطين مع هذا المرسل الذي تغير عنده عرض النطاق الترددي وبالتالي يحصل انتشار تعديل معدل البْتْ على عدة فروع من الشجرة التي تربط المرسل مع مستقبليه).

يُنفَّذ رمّاز الخوارزمية 2 المبيّن في الشكل (4) (الحالة المعاكسة للخوارزمية 1) عندما ينخفض عرض النطاق الترددي للوصلة الصاعدة للمرسل مما يتطلب تخفيض معدل إرسال بيانات المرسل باتجاه مستقبليه. يبدأ هذا التعديل عند كل عقدة ovs: r على طول المسار الواصل لهذا المرسل مع مستقبليه. وعند كل من هذه العقد، إذا كان من الممكن استخدام أكثر من طبقة ترميز SVC فإنّه يجب تغيير معدلات البت الفرعية $b_i(r, c_{ij})$ وتحديث قواعد التكيف. تعمل الخوارزمية 2 بشكل متكرر حتى تصل إلى كل مستقبل. وعلى عكس الخوارزمية 1 التي تبدأ من (عقدة مستقبل) ولكنها قد لا تصل إلى المرسل بشكل متكرر، فإن الخوارزمية 2 تصل دائماً إلى جهاز استقبال لمشترك واحد على الأقل، وذلك نظراً لوجود جهاز استقبال يتلقى دائماً نفس معدل البت الذي يتلقاه المرسل في وصلته الهابطة (وإلا فقد يرسل المرسل في وصلته الصاعدة معدل نقل بيانات أقل)، وعندها يجب تحديث معدل نقل بيانات جهاز الاستقبال للمشترك هذا.

3-3-3: خوارزمية قواعد التكيّف الموضوعة عند كل عقدة من الشبكة سواء أكانت هذه العقدة مرسل أم مستقبل أم مُبدّلة:

يُبيّن الشكل (5) التالي رمّاز هذه الخوارزمية.

: AdaptRule3Algorithm

1 Foreach OVS r in path of this receiver in T_i do
2 Find $P_i(r), c_{ij} = \{C_j(P_i(r))\}$,
3 where $1 \le j \le k, k \leftrightarrow$ #children of r
4 Foreach j do
5 If $b_i(r, c_{ij}) \neq b_i(P_i(r), r)$ then
6 Choose the proper SVC layer
7 Else
8 Keep the SVC layer as it is

الشكل (5) رمّاز الخوارزمية AdaptRule 3- (الباحث).

تُبيّن هذه الخوارزمية آلية تحديث قواعد التكيف المقابلة لتعديل قيم معدلات البِتْ المناسبة وذلك عند كل عقدة OVS من عقد شجرة الاتصال. عند تغيير معدلات البت الواردة والصادرة في عقدة OVS ما هي r على طول مسار توجيه الاتصال في الشبكة، يجب تحديث قواعد التكيف في مُبدِّلة شبكة SDN.

تأخذ الخوارزمية 3 المبينة في الشكل (5) على عاتقها هذه المهمة حيث يكون دخل الخوارزمية هو عقدة r، ومن أجل كل واحد من أبنائها، تحذف القاعدة القديمة للتكيّف (تعديل قيمة معدل البِتْ) إذا كانت موجودة وتستبدلها بالقاعدة الصحيحة (معدل بِتْ جديد أي طبقة ترميز SVC مناسبة)، يُعبَّر عن هذا التبديل أو الحذف من خلال التصريح عن الزوج (معدل البت الوارد إلى r من عقدته الأب، ومعدل البت الصادر من r إلى ابن r) . وهكذا في أي عقدة OVS من الشبكة، توجد قاعدة واحدة يجب تحديثها لكل عقدة ابن في أسوأ الأحوال، ويكون عدد الأبناء العقد لأي عقدة هو دوماً أقل من عدد المشاركين في مؤتمر الفيديو، وهذا يعطي تعقيداً لهذه الخوارزمية من رتبة عدد المشاركين؛ أي $O(p)$.

3-4: الخوارزمية العامة:

تعالج الخوارزمية العامة أربع أحداث رئيسية يكافئ كل منها تغيّراً ما يحصل في عرض النطاق الترددي لوصلة الاتصال التي تربط العقدة مع الشبكة الأم، وهي: 1- انخفاض عرض النطاق الترددي عند عقدة مستقبل ما r، 2- انخفاض عرض النطاق الترددي عند عقدة مرسل ما s_i، 3- ارتفاع عرض النطاق الترددي عند عقدة مستقبل ما r، 4- ارتفاع عرض النطاق الترددي عند عقدة مرسل ما s_i. يجري تنفيذ الخوارزمية 4 العامة في وحدة تحكم الشبكة SDN. يجري إنشاء الاستدعاء لتشغيل هذه الخوارزمية أولاً باستخدام خوارزميات MST أو SPT نفسها المصمّمة أصلاً في العمل [1]. ومن ثمّ عند حصول كل حدث من الأحداث الأربعة السابقة، يجري استدعاء الخوارزميات المبينة في الفقرات السابقة حيث تتفاعل وحدة التحكم مع التغيرات الحاصلة في الشبكة لتتكيف معها قيم

معدلات البِتْ لتوضع متناسبة مع أشجار الإرسال المتعددة البث حسبما يتغير عرض النطاق الترددي في أطراف شجرات الاتصال لكل مرسل من المرسلين. نُبيّن ما يجري بسبب الأحداث الأربع السابقة فيما يلي:

1- تناقص عرض النطاق الترددي للوصلة الهابطة للعقدة المستقبلة r. يمكن أن يؤدي هذا إلى تغيير معدل البت للمرسل $b(s_i)$ لكل شجرة T_i بحسب المعادلات (1,2). في هذه الحالة يُعاد، باستخدام الخوارزمية 1، حساب معدلات البت ويتم نشر معدل البت الجديد للعقدة r في جميع الأشجار.

2- انخفاض عرض النطاق الترددي للوصلة الصاعدة من العقدة s_i المرسِل. يمكن أن يؤثر هذا على معدل بت مستخدم عند s_i وكذلك على معدلات البت الخاصة بالمستقبلات المرتبطة بها، ولكن فقط في الشجرة T_i حيث يكون فيها s_i هو المرسل. يتم نشر التغيير في معدل البِت باستخدام الخوارزمية2 على عقدة الوصول للعقدة s_i، وبشكل متتابع على أبنائها في شجرة الاتصال T_i.

3- ازدياد عرض النطاق الترددي للوصلة الصاعدة للعقدة المرسل s_i. مرة أخرى، يمكن أن يؤثر هذا على معدلات البت في s_i والمستقبلات المرتبطة بها. بعد إعادة الحساب لمعدلات البِتْ على وصلات الشجرة T_i، إذا لم تتغير معدلات بت المستقبلات، فلا داعي لنشر معدل البت الجديد للعقدة s_i، لأنه لا يمكن لأي مستقبل الحصول على معدل بت أعلى منه. وبخلاف ذلك، يتم نشر معدلات البت الجديدة في T_i باستخدام الخوارزمية 1.

4- ازدياد عرض النطاق الترددي للوصلة الهابطة للعقدة المستقبلة. هذه الحالة الأكثر تعقيدًا نظرًا لأنه، وفقًا للمعادلات (1,2)، يمكن أن يؤثر هذا التغيير في النطاق الترددي على جميع معدلات البت في جميع الأشجار (باستثناء الحالة التي يكون فيها تغير النطاق الترددي عند المرسل فقط). لكل شجرة حالتان محتملتان: 1) لا يتأثر معدل نقل البيانات الخاص بالمرسل المرتبط بالعقدة المستقبلة، وفي هذه الحالة، يتم نشر معدل البت الجديد للوصلة الهابطة للعقدة المستقبل باتجاه المرسل أعلى الشجرة المرتبط به. 2) يتأثر معدل نقل البيانات الخاص بالمرسل المرتبط بالمستقبل، وفي هذه الحالة يمكن أن يؤثر بدوره على معدلات نقل البيانات الخاصة بالمستقبلات الأخرى التي تكون على مستوى شجرة الاتصال T_i.

4- نماذج تقييم الحل المقترح:

من أجل تقييم كفاءة الحل المقترح، تُجرى عمليات محاكاة للمقارنة مع ثلاث خوارزميات توجيه:

- خوارزمية أحادية الإرسال Unicast method (UNI) التي تعيد حساب للمسار عند وقوع أي حدث من الأحداث الأربعة. تفيد هذه الخوارزمية بأنّه عند كل تغيير في النطاق الترددي للوصلة عند كل مشارك، تجري إعادة حساب أقصر المسارات بين كل زوج من المشاركين.
- طريقة MST المشروحة في العمل [1].
- طريقة SPT المشروحة في العمل [1].
- الخوارزمية المقترحة في هذا البحث نسميها MST-adapt. يتم تنفيذ طريقة MST الموضحة في العمل[1]، لإنشاء مكالمة فيديو، ثم يجري تكييف أشجار البث المتعدد عند وقوع أي حدث وفقًا للخوارزمية 4 المقترحة.

تُجرى عمليات المحاكاة على نوعين من الطبولوجيا العشوائية للشبكة وبأحجام مختلفة: الأول هو Erdos-Renyi (ER) [14] والثاني هو Magoni-Pansiot (MP) [15] وهما نوعا طوبولوجيا غير متدرجة scalefree topology مستمدة من شبكات حقيقية. ونفترض مؤتمر الفيديو مؤلف من 6 مشاركين لكل مكالمة فيديو تحصل، ونفترض حصول 10 أحداث بشكل عشوائي أثناء تشغيل المحاكاة (من نمط الأحداث الأربعة المذكورة آنفاً). يتم الحصول على كل نتيجة محاكاة بإعادة 100 مرة (تشغيل الخوارزمية 100 مرة)، ومن ثم حساب المتوسط لكل مؤشر قياس (متوسط عرض النطاق الترددي المستهلك، زمن المعالجة) وذلك من أجل كل مخطط شبكة مستخدم ER وMP.

يهدف هذا البحث إلى تقدير المقايضة trade-off التي يقوم بها الحل المقترح وذلك بين توفير استهلاك عرض النطاق الترددي وبين وقت المعالجة (حيث أنهما مطلبان متناقضان في تصميم خوارزمية التوجيه المدروسة هنا). عموماً، من الواضح أن طريقتي MST وSPT يجب أن تنتجا توفيراً متساوياً في عرض النطاق الترددي نظراً لأنها تعيد حساب أشجار البث المتعدد وتحل محل قواعد تكيف SVC في كل حدث بحسب نتائج العمل [1]. ومع ذلك، سوف يُظهِر الحل المقترح في هذا العمل تعقيداً حسابيّاً أقل مما يؤدي إلى تقليل وقت المعالجة والموارد المستخدمة مثل طاقة التغذية للأجهزة المشاركة بالمؤتمر.

5- النتائج:

5-1 بيئة ونموذج المحاكاة:

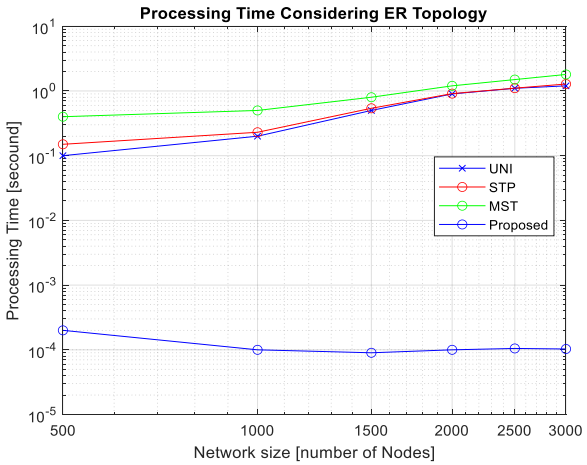
نجري المحاكاة على بيئة عمل وفق نظام تشغيل Ubuntu 20.04 [17] وباستخدام منصة Spyder [18] من خلال لغة برمجة Python 3 [19] وتحديداً باستخدام حزمة مكتبات NetworkX package [16] بهدف تعيين خصائص الشبكة المعمول بها في المحاكاة واستخدام توابع برمجية جاهزة لذلك. وفيما يخص نموذج المحاكاة فهو كما يلي. نفترض في الشبكة أن مُعامِلات معينة مثل عرض النطاق الترددي لإرسال أو لاستقبال حزم الفيديو هي في حالة تغيّر ديناميكي ناتج عن أحداث مناولة. والهدف من المحاكاة تبيان قدرة الخوارزميات المقارنة فيما بينها في الحصول على أقل قدر ممكن من استهلاك النطاق الترددي المتاح لسرعة الاتصال في كامل الشبكة. فعند التغير في عرض الحزمة الترددية للإرسال أو الاستقبال عند طرف المشترك بمكالمة الفيديو، تتجلى فكرة الخوارزمية المقترحة في إعادة تنظيم وترتيب حزم النطاق الترددي المتاح عبر مسارات الشبكة التي تصل المشتركين بين بعضهم البعض وذلك من خلال فكرتي Relocated up/Down، ويجري التحكم بذلك من خلال مركز التحكم الرئيسي في شبكة SDN هو المتحكم SDN Controller الذي يقوم بالإيعاز إلى المبدلات OVS على طول المسارات التي تصل المشتركين في الشبكة بين بعضهم البعض، وإعلامهم بتعديل آلية اعتماد طبقات الترميز SVC باستخدام إما نطاق ترددي أعلى أو أدنى وتوحيده على طول المسار بين مشتركين معينين يشكلون فيما بينهم شجرة متعددة البث يكون فيها إما المرسل للفيديو أو أحد المستقبلين للفيديو قد طرأ عنده تغيّر فجائي ديناميكي في عرض حزمة الاتصال الخاصة به. نفترض أنه يحدث الاختلاف في النطاق الترددي نتيجة حدث مناولة عند نقاط الولوج access points اللاسلكية، الخاصة ببرج التغطية، للوصلتين الصاعدة او الهابطة التي تصل المشترك بمؤتمر الفيديو مع شبكة LTE أثناء حركته السريعة في اتجاه ما أو أنه في حالة حركية محلية بطيئة بالقرب من برج التغطية؛ وقد يختلف عرض النطاق الترددي ذاك خلال مدة المكالمة نتيجة التبديل بين برجي تغطية أثناء الحركة. في محاكاتنا، يجري إعادة إنتاج تباين variance لعرض النطاق عن طريق اختيار عشوائي، في كل مرة، قيمة عشوائية من المجال الزمني [4 ميجابت في الثانية، 14 ميجابت في الثانية] للسعة الترددية للوصلة الهابطة ومن المجال [500 كيلوبت في الثانية، 1.5 ميجا بت في الثانية] للسعة الترددية للوصلة الصاعدة. لتتكيف الشبكة مع هذه الاختلافات في عرض النطاق الترددي، نعيد حساب الأشجار متعددة البث (إعادة تعيين مسارات تراسل الفيديو عبر إعادة تعيين مبدلات الشبكة وبالتالي مسارات جديدة بين كل مشتركين مثنى مثنى) ونطبق قواعد Relocated up/Down باستخدام الخوارزمية المقترحة. وأخيراً نقارن النتائج مع خوارزميات UNI, MST, STP.

5-2 استعراض النتائج:

للحصول على نتائجنا في هذا البحث، نبدأ أولاً بإنشاء 20 هيكلًا عشوائيًا من كل نوع طبولوجيا للشبكة المفترضين (ER وMP) ولكل منهم حجم شبكة متغير بين القيم: (500 و 1000 و 2000 و 4000). بعد ذلك، لكل واحدة من هذه الهياكل، نقوم بتوصيل المشتركين بشكل عشوائي بسعات ترددية للوصول (الهابط أو الصاعد) تكون مختلفة. نقوم بتكرر هذا

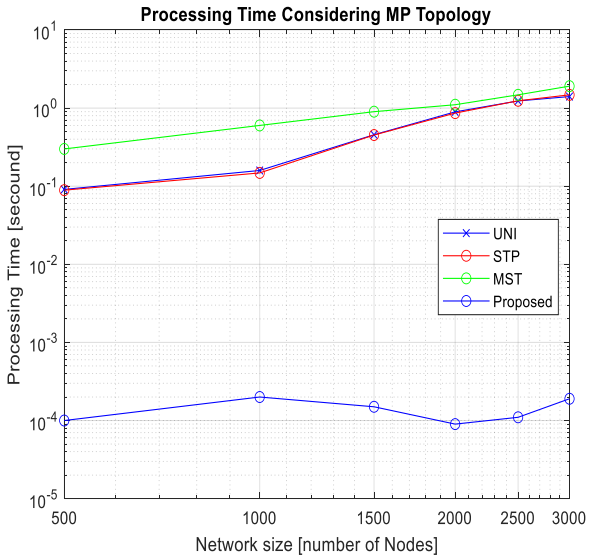
السيناريو 20 مرة للحصول على 20 حالة مختلفة. وبالتالي، فإن كل نقطة في المخططات التي استعرضناها في فقرة النتائج هي متوسط القيم التي جرى الحصول عليها من (20*20) 400 محاكاة فعلية للشبكة من أجل كل نوع، وهذا بالطبع يتطلب موارد حاسوبية عالية الأداء من حيث قوة المعالج وذاكرة الوصول العشوائي RAM ونظام تشغيل مناسب، وهو ما حققناه باستخدام جهاز حاسوب لابتوب من الجيل 11 intel core i9, with 16 GB of RAM.

كما نوهنا سابقاً في الفقرة 3-2، نقوم بإجراء المحاكاة من أجل نموذجين مقارَبين للواقع العملي الفعلي من طوبولوجيا الشبكة، الأول هو Erdos-Renyi (ER) والثاني هو Magoni-Pansiot (MP). يُبيّن الشكل (6) قيم زمن المعالجة باعتبار النموذج ER. تجد الإشارة هنا إلى أن المنحني في الشكل (6) لا يُفسّر على أساس تناقص الزمن مع زيادة عدد العقد، فليس ثمّت معادلة حتمية ممكنة تحكم تغيرات هذا الشكل البياني، وإنما هو مؤشر مقارنة مع قيم باقي الخوارزميات، حيث أنه حتى ولو جرت زيادة عدد حالات المحاكاة ليس من الضروري أن يُبدي المنحنى البياني في هذا الشكل تناقصاً مع زيادة عدة العقد.



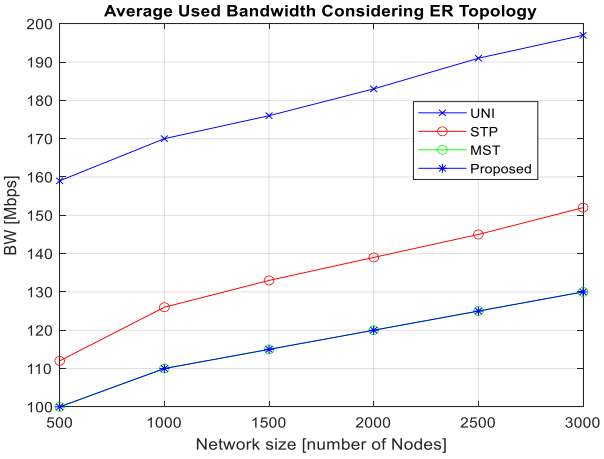
الشكل (6) قيم زمن المعالجة باعتبار النموذج ER

وأما الشكل (7) فيُظهِر قيم زمن المعالجة باعتبار النموذج MP. ننوه هنا أيضاً إلى أن المنحني البياني في الشكل (7)، كما في حالة الشكل (6) لا يمتلك خصائص رياضية محددة Deterministic، وبالتالي عموماً سوف تظهر نقط الشكل (متوسط القيم الناتجة عن المحاكاة) بشكل عشوائي، وما يهمنا في هذا الشكل هو مقارنة القيمة مع قيم باقي الخوارزميات مع زيادة عدد العقد.



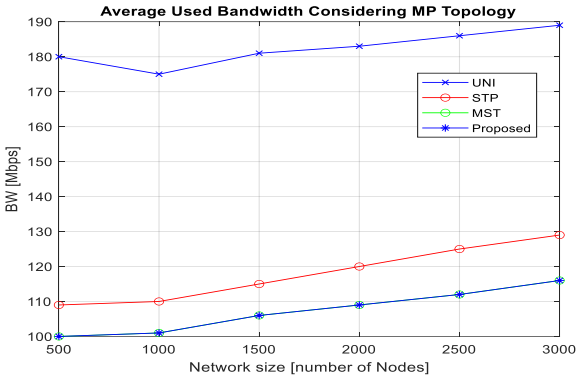
الشكل (7) قيم زمن المعالجة باعتبار النموذج MP

في حين يُبيّن الشكل (8) قيم متوسط عرض النطاق الترددي المُستهلَك في الشبكة باعتبار النموذج ER.



الشكل (8) متوسط عرض النطاق الترددي المُستهلَك في الشبكة باعتبار النموذج ER

وأمّا الشكل (9) فيوضح قيم متوسط عرض النطاق الترددي المُستهلَك في الشبكة باعتبار النموذج MP.



الشكل (9) – قيم متوسط عرض النطاق الترددي المُستهلَك في الشبكة باعتبار النموذج MP

نجري عمليات المحاكاة بتغيير عدد عقد الشبكة الكُليّة لتتراوح بين 100 عقدة إلى 3000 عقدة بخطوة زيادة تساوي 500 عقدة إضافية في كل مرة. تجري المقارنة بين الخوارزمية المقترحة وبين كل من الحالة التقليدية الموافقة للإرسال أحادي البث Uni-Cast والحالة STP وMST المبينين في المرجع [1]. يُظهر الشكل (6) أن الحل المقترح أسرع بكثير من مواد المقارنة في حالة الشبكة ER، فعلى سبيل المثال، ومن أجل شبكة مؤلفة من 3000 عقدة، تستغرق المعالجة حوالي 0.3 ميلي ثانية، في حين باقي الحالات تستغرق على الأكثر حوالي 2 ثانية وعلى الأقل حوالي 300 ميلي ثانية. نحصل على نتيجة مشابهة في حال اعتبار الشبكة من النموذج MP كما يُبين الشكل (7). فيما يخص عرض النطاق الترددي المُستهلَك، يُبيّن الشكلان (8) و(9) أن الحل المقترح يعطي أداءً مشابهاً للحل MSP في المرجع [1]، وكل منهما يستهلك عرضاً ترددياً أقل من باقي الحالات وبأداء متقارب، وذلك سواء أكان نموذج الشبكة المستخدم هو ER أو MP. إنّ خوارزمية MST تعطي قدرة على تخفيف استهلاك عرض النطاق الترددي في الشبكة ككل مقارنة مع الخوارزمية المقترحة إلا أنها تقنية لا تتعامل مع التغيرات الديناميكية المحتملة عند طرف المشتركين للنطاق الترددي للوصلتين الصاعدة والهابطة ولذا فالنتائج في هذين الشكلين متقاربة بين هذه الخوارزمية والخوارزمية المقترحة.

بكل الأحوال، يحقق الحل المقترح سرعة أكبر بكثير من حيث زمن المعالجة من باقي حالات المقارنة.

تظهر النتائج بالنسبة لكل من الطبولوجيتين ER, MP وبأحجام مختلفة أن نهجنا في استبدال قواعد التكيف مع الترميز SVC في أشجار البث المتعدد يتكيف جيداً مع التغيير الديناميكي لعرض الحزمة عند طرف أحد المشاركين بمؤتمر الفيديو. ولمّا كانت الخوارزميات المقترحة في [1] فعالة جدًا في إنشاء مكالمة فيديو، فإنّ خوارزميات التكيف لدينا أكثر ملاءمة للحصول على سرعة كبيرة لمعالجة الاختلافات المختلفة في عرض النطاق الترددي المتاح في الوصلة الراديوية للمستخدم المشارك في مؤتمر الفيديو والتي يمكن تحدث أثناء المكالمة (اعتبرنا هذه الأحداث تحصل بشكل عشوائي أثناء المحاكاة وبتكرار عشوائي أيضاً).

5-3 تفسير النتائج:

الخوارزمية UNI هي المعيار التقليدي القديم فيما يخص تحديد مسارات توجيه حزم التراسل الفيديو وهي لا تعالج مسألة تخفيف استهلاك النطاق الترددي ولا تعالج مسألة وجود تغييرات ديناميكية في عرض النطاق الترددي للوصلات الهابطة والصاعدة التي تربط المشتركين بالشبكة ككل. فهي إذن أسوء حالة مقارنة.

الخوارزمية MST تبني الشجرة متعددة البث بحيث تتضمن أقصر الطرق بين المشتركين من حيث تعيين المبدلات التي تتطلب أقل قدر من استهلاك النطاق الترددي المتاح بغض النظر عن وجود تغييرات ممكنة عند طرف المشترك، فهي بالتالي تحقق هدف تخفيف استهلاك النطاق الترددي المتاح ولكن ذلك على حساب جودة الخدمة. ولذا فأداءها هو الأقرب إلى نتائج الخوارزمية المقترحة من حيث استهلاك عرض النطاق الترددي فقط ولكنها تبدي أداء هو الأسوأ من حيث زمن الاستجابة Response Time.

بينما الخوارزمية STP تبني الشجرة متعددة البث بحيث تتضمن أقصر الطرق بين المشتركين من حيث تعيين المبدلات التي

تتطلب أقل قدر من زمن الانتقال Latency وأيضاً بغض النظر عن وجود تغييرات ممكنة عند طرف المشترك، فهي بالتالي لا تحقق هدف تخفيف استهلاك النطاق الترددي المتاح بل تخفيف قيمة زمن الانتقال، ولكن هذه الخوارزمية لا تبدي أي تصرف اتجاه زمن الاستجابة ولذا كانت نتائجها وفق هذا المعيار أقرب إلى خوارزمية UNI.

أما في حالة خوارزمية المقترحة فهي تعالج مسألة التغيرات الديناميكية في عرض النطاق الترددي للوصلات الهابطة والصاعدة للمشتركين بحيث تؤمن أقل قدر من استهلاك النطاق الترددي المتاح (السرعة المتاحة لتراسل الفيديو عبر كامل مسارات الشجرة متعددة البث) أمام تلك التغيرات وتكون هذه المعالجة بسرعة أكبر مما أدى إلى نتائج زمن معالجة أقل مقارنة بكل طرائق توجيه الفيديو وفق الخوارزميات التي نقارن معها في هذا البحث MST, STP, UNI.

وأخيراً، وليس آخراً، نلاحظ في الشكلين 8 و9 أنه لا يوجد تغير ملحوظ في عرض النطاق من 500 حتى 1000عقدة. تعليقاً على هذه الملاحظة، وفيما يخص شبكات SDN، نقول إن تحسين جودة الخدمة في مجال التراسل الرقمي الفيديوي هو الهدف الأساسي من مفهوم شبكة SDN أصلاً ولكن في حال كثافة كبيرة للعقد، لذا كان هدف الدراسة هنا هي إحداث تحسين في حالة شبكات ضخمة جداً (يكون فيها المشتركين في الفيديو متباعدين جغرافياً قد يكونوا في قارات مختلفة وبالتالي يكون عدد العقد كبير جداً) وما يهمنا في النتائج هو التغير الملحوظ في تخفيف استهلاك النطاق الترددي المتاح في الشبكة من أجل عدد من العقد كبير جداً وهو ما بينته الاشكال 8 و 9، وحيث يزداد التحسين في تخفيف استهلاك النطاق الترددي المتاح أيضاً من أجل عد من العقد اكبر من 3000 كما لاحظنا في عدة تجارب محاكاة منفصلة. ولكن في نطاق استعراض نتائج البحث اكتفينا في حالة عقد حتى 3000 حيث أن اعتبار عقد أكبر بكثير من ذلك سوف يكلف وقت محاكاة كبير جداً وهو ما لم يمكننا تحمله بسبب محدودية الموارد الحاسوبية التي بين أيدينا.

5-4 كلمة حول تعقيد الخوارزمية:

إن عدد المشاركين في مؤتمر الفيديو أصغر بكثير من حجم الشبكة (عدد العقد فيها)، وهذا يعني أن $p << n$. فإذا اعتبرنا حجم n الشبكة كمعامل قياسي، فإن الخوارزمية العامة 4 تعالج كل حدث من الأحداث الأربعة المذكورة في نهاية الفقرة 3، في زمن يعادل رتبة تعقيد كثير حدود $O(n)$ إذا كان قطر بيان الشبكة خطياً و زمن يعادل رتبة تعقيد $O(log\, n)$ في الحالة الأكثر واقعية حيث يكون القطر لوغاريتمياً. هذا التعقيد أقل بكثير من تعقيد خوارزميات MST/ SPT الذي يساوي $O(n^3)$ إذا كانت الشبكة كثيفة Dense ويساوي في حالm شبكة متقرفة sparse $O\ (n^2\ log\ n)$ كما وُجِدَ في العمل [1]. وهكذا فالتعقيد الأقل عند معالجة حدث ما من الأحداث الاربعة يعني موارد أقل استهلاكاً في وحدة التحكم SDN وكذلك تفاعل أفضل للمشاركين (تجربة خدمة أفضل) في مؤتمر الفيديو. ياختصار إنّ تعقيد الخورازمية المقترحة يرتبط خطيّاً فقط بعدد العقد n الكلي التي تشكل شبكة SDN وتعطي أداء حسابي منخفض نسبياً مقارنة بالخوارزمية المقارَنة سواء في زمن التنفيذ على منصة المتحكم Controller أو في الزمن الحقيقي أثناء تفعيل المكالمة بين المشاركين.

الخاتمة والآفاق المستقبلية والتوصيات:

تُنشئ مؤتمرات الفيديو عبئًا ثقيلًا على شبكات الولوج access network الحالية نظرًا للحجم الكبير لبيانات الفيديو. يمكن أن يؤدي تحسين أنظمة مؤتمرات الفيديو إلى توفير كبير في النطاق الترددي لمشغلي الشبكات ويمكن أن يزيد من قدرتهم على خدمة عدد أكبر من المستخدمين بالإضافة إلى تحسين جودة التجربة الخاصة بهم. يتيح ظهور SDN حلولاً جديدة لتحسين إدارة الفيديو.

لم نطرح في هذا البحث مشكلة تعاني منها SDN إنما بحثنا في تحسين جودة الخدمة للتراسل الرقمي الفيديوي باستخدام هذا

المفهوم من الشبكات كبديل عن الشبكات التقليدية، وقد اقترحنا خوارزمية موافقة لمسألة توجيه حزم الفيديو المنتقلة عبر مسارات محسوبة في شبكة معرفة برمجياً بشكل يتناسب مع هيكلية هذه الشبكة وخصوصيتها كبديل للشبكات التقليدية والخوارزميات المعمولة فيها مثل UNI, MST, STP.

الشبكات المعرفة بالبرمجيات هو حل ناجع وبديل عن الشبكات التقليدية من حيث تخفيض التكلفة وقدرة أكبر على التحكم برمجياً بظروف الشبكة وأمْثَلَتَها من خلال متحكم مركزي. وحتى نحصل على هذه الميزة يجب معالجة جانب من جوانب النظام ألا وهو توجيه الحزم، ولذا اقترحنا خوارزمية توجيه الحزم عبر فكرة relocate up/down. لتحسين جودة الخدمة، وهنا لدينا مؤشر للقياس هو تخفيض استهلاك النطاق الترددي وزمن المعالجة.

من أجل تقليل استهلاك عرض النطاق الترددي في الشبكة الأساسية مع توفير أفضل جودة فيديو ممكنة للمستخدمين، اقترحنا في هذه الورقة خوارزمية لإنشاء نظام مؤتمرات فيديو يستفيد من الشبكات التي تدعم SDN وتوجيه حزم البيانات. ينقل الحل تدفقات الفيديو باستخدام أشجار البث المتعدد أثناء تطبيق تعديلات قواعد التكيّف على مستوى طبقة SVC داخل الشبكة لتكييف تدفقات حزم البيانات مع خصائص شبكة ولوج المستخدمين، وهي LTE. تظهر نتائجنا أن حلنا يوفر مزيدًا من النطاق الترددي مقارنة بالأنظمة السابقة الموجودة في الشبكات التقليدية ويزيد من عدد المكالمات المتزامنة التي تدعمها الشبكة.

لقد صممنا الخوارزمية لتكييف تدفقات الفيديو ديناميكيًا مع اختلافات النطاق الترددي لقنوات ولوج المستخدمين عند حصول أحداث مناولة مع أبراج تغطية LTE. من اجل ذلك اقترحنا خوارزميات تكيّف، بناءً على أفكار الأشجار متعددة البث، والتي لا تتطلب إعادة حساب أشجار الإرسال المتعدد (أي إعادة تكوين مسارات الاتصالات) للمكالمة، بل إعادة تعيين طبقات الترميز SVC بشكل يتناسب مع تلك الاختلافات وموارد الشبكة من سرعة تراسل متاحة. تُظهر هذه الخوارزميات تكيفاً سريعاً نظراً لانخفاض درجة تعقيدها الحسابي مما يسمح بالتفاعل العالي مع تغييرات الشبكة وانخفاض استهلاك الموارد.

كأفاق مستقبلية، نخطط لنقل وتشغيل خوارزمياتنا إلى وحدة تحكم SDN Python مثل Ryu Controller [24]، من أجل إجراء تجارب على شبكة افتراضية يجري إنشاؤها بواسطة برمجية Mininet [25]. سيمكننا ذلك من تأكيد النتائج الحالية على نطاق أوسع. ستكون الخطوة التالية بعد ذلك نشرها على شبكة SDN فعلية يمكن تنجيزها بالتعاون مع الهيئة الناظمة لقطاع الاتصالات والبريد في سورية. وفي هذا الخصوص نوصي بتكثيف الأبحاث حول الشبكات المعرفة بالبرمجيات SDN، وتعيين مناهج دراسية وتدريبية في جامعة دمشق تكون خاصة بهذا المفهوم العصري في مجال تكنولوجيا المعلومات.

التمويل: هذا البحث ممول من جامعة دمشق وفق رقم التمويل(501100020595).

References:

[1] C. Al Hasrouty, C. Olariu, V. Autefage, D. Magoni, and J. Murphy,
"SVC Videoconferencing Call Adaptation and Bandwidth Usage in SDN Networks," in IEEE Global Communications Conference, 2017.

[2] H. Schwarz, D. Marpe, and T. Wiegand, "Overview of the scalable video coding extension of the H.264/AVC standard," IEEE Trans. on circuits and systems for video technology, vol. 17, no. 9, pp. 1103–1120, 2007.

[3] M. D. De Amorim, O. Duarte, and G. Pujolle, "Single-loop packet merging for receiver-oriented multicast multi-layered video," in IEEE International Conference on Communications, 1999.

[4] K. Katrinis, B. Plattner, B. Brynj´ulfsson, and G. Hj´almt´ysson, "Dynamic adaptation of source specific distribution trees for multiparty teleconferencing," in ACM Conference on Emerging Network Experiment and Technology, 2005.

[5] V. Chandrasekar and K. Baskaran, "Performance of video conferencing in unicast and multicast communication using protocol independent multicast routing," International Journal of Computer Science and Telecommunications, vol. 2, 2011.

[6] M. Zhao, B. Jia, M. Wu, H. Yu, and Y. Xu, "Software defined networkenabled multicast for multi-party video conferencing systems," in IEEE International Conference on Communications, 2014, pp. 1729–1735.

[7] S. Laga, T. Van Cleemput, F. Van Raemdonck, F. Vanhoutte, N. Bouten, M. Claeys, and F. De Turck, "Optimizing scalable video delivery through OpenFlow layer-based routing," in IEEE Network Operations and Management Symposium, 2014.

[8] E.-z. Yang, L.-k. Zhang, Z. Yao, and J. Yang, "A video conferencing system based on sdn-enabled svc multicast," Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, vol. 17, no. 7, pp. 672–681, 2016.

[9] D. Wu, Y. T. Hou, W. Zhu, Y.-Q. Zhang, and J. M. Peha, "Streaming video over the internet: approaches and directions," IEEE Trans. on circuits and systems for video tech., vol. 11, no. 3, pp. 282–300, 2001.

[10] L. De Cicco, S. Mascolo, and V. Palmisano, "Skype video responsiveness to bandwidth variations," in ACM Int'l Work. on Network and Operating Systems Support for Digital Audio and Video, 2008, pp. 81–86.

[11] M. Vutukuru, H. Balakrishnan, and K. Jamieson, "Cross-layer wireless bit rate adaptation," ACM SIGCOMM Computer Communication Review, vol. 39, no. 4, pp. 3–14, 2009.

[12] Z. Ding, J. Wu, W. Yu, Y. Han, and X. Chen, "Pseudo analog video transmission based on LTE physical layer," in IEEE/CIC International Conference on Communications in China, 2016.

[13] D. He, C. Lan, C. Luo, E. Chen, F. Wu, and W. Zeng, "Progressive pseudo-analog transmission for mobile video streaming," IEEE Transactions on Multimedia, 2017.

[14] B. Bollob´as and O. Riordan, "The diameter of a scale-free random graph," Combinatorica, vol. 24, no. 1, pp. 5–34, 2004.

[15] D. Magoni and J. Pansiot, "Internet topology modeler based on map sampling," in IEEE Symposium on Computers and Communications, 2002, pp. 1021–1027.

[16] https://networkx.org/
[17] https://releases.ubuntu.com/focal/
[18] https://www.spyder-ide.org/
[19] https://www.python.org/downloads/
[20] Production quality, multilayer open virtual switch. Open vSwitch; December IS, 2013. Retrieved from <openvswitch.org>.

[21] Open thin switching, open for business. Big switch networks; June 27, 2013. Retrieved from <www.bigswi tch. corn/topics/introduction-of- indigovirtual-swi tch-and -swi tch-I ight -beta>.

[22] باول جورانسون وتشاك بلاك، الشبكات المعرفة بالبرمجيات المفهوم الشامل، ترجمة أ أيمن بن أحمد العدناني، مركز البحوث والدراسات، المملكة العربية السعودية، 2019.
ISBN: 978-603-8276-13-6

[23] https://docs.openvswitch.org/en/stable/intro/what-is-ovs/.
[24] https://ryu-sdn.org/.
[25] http://mininet.org/.
[26] Xiaodong Shi et al, Multi-QoS adaptive routing algorithm based on SDN for satellite network, IOP Publishing. Series: Materials Science and Engineering 768 (2020) 052035 doi:10.1088/1757-899X/768/5/052035.

[27] Yingcheng Zhang1and Gang Zhao, LSEA: Software-Defined Networking-Based QoS-Aware Routing Mechanism for Live-Soccer Event Applications in Smart Cities, Wireless Communications and Mobile Computing, 2020, https://doi.org/10.1155/2020/8829868.

[28] Majda Omer Elbasheer, Abdulaziz Aldegheishem, Jaime Lloret, Nabil Alrajeh, A QoS-Based routing algorithm over software defined networks, Journal of Network and Computer Applications, Volume 194, (2021), ISSN 1084-8045.

[29] Yusuf, M.N.; Bakar, K.b.A.; Isyaku, B.; Osman, A.H.; Nasser, M.; Elhaj, F.A. Adaptive Path Selection Algorithm with Flow Classification for Software-Defined Networks. Mathematics (2023), 11, 1404. https://doi.org/10.3390/math11061404.

[30] Gong, J., Rezaeipanah, A. A fuzzy delay-bandwidth guaranteed routing algorithm for video conferencing services over SDN networks. Multimed Tools Appl 82, 25585–25614 (2023). https://doi.org/10.1007/s11042-023-14349-6.

[31] Bin Zhang, SDN Control Strategy and QoS Optimization Simulation Performance Based on Improved Algorithm, Computational Intelligence and Neuroscience, (2022), https://doi.org/10.1155/2022/7167957.

[32] T. S. Andjamba and G. -A. L. Zodi, "A Load Balancing Protocol for Improved Video on Demand in SDN-Based Clouds," 2023 17th International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication (IMCOM), Seoul, Korea, Republic of, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/IMCOM56909.2023.10035591.