مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (٨) العدد (٦) ٢٠٢٤
Tartous University Journal for Research and Scientific Studies - engineering Sciences Series Vol. (8) No. (6) 2024

استخدام تقنيات الحوسبة الطرفية متعددة الوصول (MEC) من أجل تقطيع شبكي على طبقة RAN (RAN Slicing) في شبكات الجيل الخامس الخليوية

علي خالد عباس *

(تاريخ الإيداع ٢٠٢٤/٥/٨ . قُبِل للنشر في ٢٠٢٤/٦/١٠)

□ ملخّص □

تعد شبكات الحوسبة الطرفية متعددة الوصول Multi-Access Edge Computing (MEC) أحد أكثر المواضيع تداولاً في مجال شبكات الاتصال، وذلك لأنها تمّثل تكنولوجيا مفتاحية لتوفير أداء أفضل للخدمات المتنوعة والتوجه نحو نظام شبكي شامل في أنظمة الجيل الخامس (5G) وما بعده (B5G)، كونها من جهة تستخدم البنية المعيارية البرمجية للشبكات المعرفة بالبرمجيات Software Defined Networks (SDN) والتمثيل الافتراضي لوظائف الشبكة Network Function Virtualization (NFV). ومن جهة أخرى فهي تتوضع على طرف الشبكة الأقرب للمستخدم، على مستوى شبكات الوصول الراديوية Radio Access Networks (RAN). بالإضافة إلى التوافق الوظيفي لـMEC مع مفهوم التقطيع الشبكي (Network Slicing) الذي سيكون أساسا لتلبية تحديات شبكات 5G/B5G، بالمبدأ القائم على إنشاء شبكات افتراضية متعددة فوق عتاد فيزيائي واحد. تم في هذا البحث استخدام تصميمين في بنية MEC مع بنية الراديو الجديد New Radio (NR) لتحقيق للتقطيع الشبكي على مستوى شبكات الـRAN في الجيل الخامس، باستغلال البنية المركزية لـ MEC لتلبية متطلبات أكثر من شريحة لشبكة RAN تقدم نوعين من الخدمات ذات محددات تأخير زمنية مختلفة، وتم اختبار فعالية التصاميم المقترحة بالمحاكاة.

كلمات مفتاحية: شبكات الحوسبة الطرفية متعددة الوصول، التقطيع الشبكي، شبكات الوصول الراديوية، الجيل الخامس، الجيل ما بعد الخامس، الشبكات المعرفة بالبرمجيات، التمثيل الافتراضي لوظائف الشبكة، الراديو الجديد

* باحث مهندس حائز على درجة الماجستير من قسم هندسة الاتصالات والالكترونيات، كلية الهندسة الميكانيكية والكيربائية ، جامعة تشرين، اللاذقية، سورية.

مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (٨) العدد (٦) ٢٠٢٤
Tartous University Journal for Research and Scientific Studies - engineering Sciences Series Vol. (8) No. (6) 2024

Using Multi-Access Edge Computing (MEC) to achieve Network Slicing at the RAN Level (RAN Slicing) in 5G networks

(Received 8/5/2024 . Accepted 10/6/2024)

□ ABSTRACT □

Multi-Access Edge Computing (MEC) networks are considered one of the most discussed topics in the field of communication networks as a key technology for providing better performance for diverse services and the single hybrid system approach in 5G and beyond (B5G) Networks. That's on one hand, due to its flexibility of the architectural structure derived from Software Defined Networks (SDN) and Network Function Virtualization (NFV) concepts. And on the other hand, due to its location at the edge of the network, closer to the Radio Access Networks (RAN). Add to that, MEC synergy with Network Slicing concept which present itself as the basis to address 5G/B5G challenges by creating multiple virtual networks over a single physical hardware. In this research, two scenarios were investigated to use MEC architecture with the New Radio (NR) for network slicing at the RAN level in 5G, by utilizing the central structure of MEC to sustain multiple slices for a RAN network providing two types of services with different latency constraints. Simulation was used to test the proposed scenarios.

Key Words: Multi-Access Edge Computing (MEC), Network Slicing, Radio Access Networks (RAN), 5G, B5G, SDN, NFV, New Radio

١ مقدمة:

تم تطوير أنظمة للجيل الخامس (5G) وما بعد الجيل الخامس (B5G) لتكون أكثر من مجرد متمم لتقنيات الاتصالات الخلوية الحالية، بل تهدف أن تشكل نظام بيئي متكامل متصل وسريع وآمن وموثوق يضم البشر والآلات، واستهداف مستخدمين من نوعية جديدة ألا وهي الكيانات الجمعية (Industry Verticals) مثل الشركات، الهيئات، البنى العامة والخاصة [1] [2]، وفي هذا الصدد نحتاج من شبكات الجيل الجديد من الاتصالات أن تكون بتصميم مرن (Flexible)، ديناميكي (Dynamic)، قابل للتهيئة والتوظيف (Reconfigurable)، بحيث يلبي محددات كل هذه التطبيقات في بنية شبكة متجانسة تحت الطلب، بما في ذلك كامل مكونات الشبكة الخليوية من شبكة مركزية (Core Network)، وشبكة وصول راديوية (RAN) Radio Access Networks، وواجهة راديوية (Radio). وهنا شكل مفهوم التقطيع الشبكي إلى شرائح (Network Slicing) اللبنة لأساسية اتفقت عليها الدراسات والهيئات المعيارية على حد سواء لتحقيق متطلبات شبكات المستقبل، والتي تقوم على الانتقال من مبدأ الشبكات الكلاسيكية الجامدة القائمة على العتاد الفيزيائي إلى شبكات افتراضية فوق بنى شبكية عامة قابلة للبرمجة والتهيئة حسب الرغبة وعند الطلب، بالاعتماد على الحوسبة السحابية بشكلها المعياري في شبكات الحوسبة الطرفية متعددة الوصول (MEC) Multi-Access Edge Computing، والشبكات المعرفة بالبرمجيات (SDN) Software Defined Networks، والتمثيل الافتراضي لوظائف الشبكة Network Function Virtualization (NFV) [3]. تتمثل أهمية البحث من منطلق أن شبكات الجيل الخامس وما بعدها تعد بالتنوع الكبير في أنواع الخدمات التي ستقدمها، حيث إن التعامل مع كل خدمة بشكل منفصل وبناء شبكة شاملة وفقًا لمتطلباتها، سوف ينتهي بنا بتصميمات وبنيات عديدة وغير متجانسة، بالمقابل يعد أي تصميم مشترك يستوعب جميع أنواع الخدمات حل مستدام اقتصادًيا وبيئًيا. كما أن شبكات الجيل القادم يُراد لها أن تكون بنية قابلة للضبط حسب التطبيق المرغوب، وهنا نحن أمام احتمالات هائلة غير قابلة للحصر من الخدمات غير المعيارية تماماً التي يجب أن تكون متاحة عند الطلب وبحسب رغبة المستخدم، وهذا يحتم التركيز على عامل التأخير، وكما هو معلوم فهناك دائما مساومة حتمية بين سعة النقل والتغطية والتأخير والوثوقية والكفاءة الطيفية في شبكة لاسلكية، و التركيز على تحسين مؤشر واحد على حساب آخر يكون على حساب البقية، مما يجعل التوجه نحو مفهوم التقطيع الشبكي على مستوى الشبكة ككل (ومن ضمنها مستوى RAN) أمراً حاسماً لمراعاة حساسية عامل التأخير الحدي المتفاوت لمجموعة خدمات مختلفة.

وتم في هذا السياق إجراء العديد من الأبحاث، فعلى صعيد التقطيع الشبكي والنطاق الراديوي NR : اعتمدت مجموعة من الدراسات [4] ,[5] على تحقيق التقطيع الشبكي باعتبار متطلبات التأخير المنخفضة من خلال التفضيل بين الطلبات بالاعتماد على تقنيات الـNR مثل الـNumerology، حيث قام الباحثون في [6] بدراسة عددية تحليلية للمقارنة بين التصاميم الأربعة المحتملة للـFrame الذي يستخدم مبدا تخصيص متعدد الـNumerology للشرائح بحسب متطلبات الشريحة. بينما في الدراسات [7] و[8] فقد اعتمد الباحثون على مستوى المجال الراديوي (و الـNumerology) مع أخذ عامل التأخير بدراسة توزيع الموارد على نظام من أكثر من خلية من خلال دراسة عددية. أما الدراسة [9] فقد اعتمدت على المحاكاة لدراسة توزيع الموارد (والـNumerology) على شبكات V2X، وفي الدراسة [10] قام الباحثون بالمقارنة بين نموذجين لتوزيع الموارد باستخدام

الـNumerology بنظام مقطع بالشرائح. في حين أن الدراسات السابقة قدمت حلول جيدة لتمكين التقطيع على مستوى الـRAN والـNR ، إلا أنها لم تتطرق لاستغلال شبكات MEC كبنية جاهزة مؤهلة لتحقيق التقطيع. وعلى صعيد للتقطيع الشبكي وشبكات MEC: فقد تطرقت العديد من الدراسات لإمكانيات MEC على عدة أصعدة، وفيما يتعلق بمجال دراسة أداء طرف لطرف كنمذجة لشبكة 5G متكاملة مدعومة بالـMEC فقد استخدم البحث في [11] المحاكاة لدراسة بيئة MEC، فما تطرق الفريق البحثي في [12] و [13] لدراسة مماثلة من خلال محاكاة شاملة لنظام MEC ملتزمين ببينة الـETSI المعيارية وعرض تقييم لقدرات النظام من خلال الدراسة، وفي البحث [14] قاموا من خلال بيئة المحاكاة بدراسة تصميم تطبيقات مشغلة لشبكة الـMEC تستخدم خدمات الشبكة (LS) و تقديم نموذج لتطوير تطبيقات مماثلة تستغل الإمكانات المتوفرة في شبكات ETSI MEC المعيارية وكل ذلك عبر المحاكاة. وفي الدراسات [15] و [16] قدم الفريق البحثي ذاته تحليل موسع ضمن بيئة المحاكاة المعيارية لـETSI MEC لتصميم تطبيقات MEC. ولكن الدراسات السابقة على توسعها في مجال شبكات الـ MECوتطبيقاتها، لم تتطرق للتقطيع الشبكي باستخدام MEC. وفيما يخص استغلال بنى الـMEC لتحقيق التقطيع الشبكي، من جهة اتجهت العديد من الدراسات كما في ([18] ,[17]) إلى دراسة التقطيع الشبكي باستخدام بنى SDN/NFV في 5G واقتراح آليات لإدارة وتحكم أمثل بشبكة متعددة الشرائح. في حين تطرقت مجموعة من الدراسات لاستخدام الـMEC بالذات لتحقيق التقطيع الشبكي من قبيل الدراسة [19]، التي اقترحت تصميم نظري لدمج التقطيع الشبكي مع الـMEC لكنها اكتفت بالبنية العامة للإدارة التي أيضا لم تشمل مستوى الـRAN والـNR. بينما دراسات أخرى تطرقت لدراسة أقرب للمستخدم باتجاه شبكات الدخول حيث قام الباحثون في ([20] [21]) باقتراح آليات لتوزيع موارد الـMEC بالعموم وإدارة الشرائح المختلفة، والدراسة [22] التي قام فيها الباحثون باقتراح بنية لتحقيق وإدارة نظام مبني على ETSI MEC متعدد الشرائح ضمن بيئة تجريبية ذات حركية عالية، ويبين الجدول (١) مقارنة وتصنيف للدراسات المرجعية المعروضة:

جدول (١) مقارنة بين الدراسات المرجعية

الدراسة المرجعية	التوجه المقترح	المجال المدروس	السلبيات
[4], [5] [6], [7] [8]	• التفضيل بين الطلبات المختلفة بالمتطلبات بالاعتماد على Numerology • التقطيع الشبكي الستاتيكي	NR	دراسات عددية الاكتفاء في هذه الدراسات باختبار عامل الـ Numerology أو استخدام Slicing على مستوى NR فقط دون التوسع واقتراح نموذج للنظام متعدد المستويات.
[9], [10]	• اعتمدت على المحاكاة لدراسة توزيع الموارد (والـ Numerology) على شبكات V2X • حلول جيدة لتمكين التقطيع وتحسينه على مستوى RAN و NR،	NR RAN	لم تتطرق لاستغلال عامل مهم في هذا المجال مثل الاستعانة بشبكات MEC تخصصت فقط بدراسة شبكات V2X
[11], [12] [13]	• دراسة أداء طرف لطرف كنمذجة لشبكة 5G متكاملة مدعومة بالـMEC باستخدام المحاكاة • الالتزام ببينة الـETSI المعيارية	MEC	لم تتطرق لاستخدام التقطيع الشبكي بالخصوص لتحسين التأخير لم تتوسع لمجال NR
[14], [15] [16]	• دراسة تصميم تطبيقات مشغلة لشبكة الـMEC تستخدم خدمات الشبكة (LS) • الالتزام ببينة الـETSI المعيارية	MEC	لم تتطرق لاستخدام التقطيع الشبكي بالخصوص لتحسين التأخير لم تتوسع لمجال NR

[17], [18]	• دراسة التقطيع الشبكي باستخدام بنى SDN/NFV في 5G واقتراح آليات لإدارة وتحكم أمثل بشبكة متعددة الشرائح، • تصميم شبكي يراعي التأخير	SDN/NFV Slicing	التركيز كان محدد على مستوى المتحكم العام بالشبكة ولم يتم تناول موضوع التقطيع الشبكي للـRAN والـNR لم تتم الدراسة على بنية ETSI MEC
[19]	• تصميم نظري لدمج التقطيع الشبكي مع الـMEC • الالتزام ببيئة الـETSI المعيارية	MEC	اكتفت بالبنية العامة للإدارة لم يتم تناول موضوع التقطيع الشبكي لـRAN و NR
[20] [21]	• اقتراح آليات لتوزيع موارد الـMEC بالعموم وإدارة الشرائح المختلفة • الالتزام ببيئة الـETSI المعيارية	MEC	الدراسات العددية للتقطيع لم تشمل محاكاة عملية لاستخدام الـMEC مع مجمل مستويات الجيل الخامس لم يتم تناول موضوع التقطيع الشبكي لـRAN و NR
[22]	• اقتراح بنية لتحقيق التقطيع الشبكي بنظام مبني على ETSI MEC متعدد الشرائح • الالتزام ببيئة الـETSI المعيارية • التركيز على مستوى RAN	MEC RAN	لم تشمل مستوى الـNR

٢ هدف البحث:

يهدف هذا البحث إلى تقديم واختبار أكثر من نموذج لتلبية متطلبات التأخير المتفاوتة لشرائح مختلفة في شبكة الجيل الخامس عن طريق دمج عوامل ثلاثة:

تقطيع شبكي RAN Slicing، باستخدام شبكة MEC، مع الـNumerology على مستوى الـNR

وذلك عبر تطبيق واختبار أكثر من نموذج شبكي معياري باستخدام نظام MEC لتقطيع شبكي على مستوى RAN، مع التعديل بإضافة التخصيص على مستوى NR بالإطار الزمني المتغير (Numerology).

٣ طرائق البحث ومواده:

يقوم البحث على مفهومي التقطيع الشبكي إلى شرائح (Network Slicing) و شبكات الحوسبة الطرفية متعددة الوصول (MEC)، حيث يقدم النموذج المعياري لشبكات MEC التوافق مع النموذج المعياري لشبكات 5G ليشكل حل مثالي للاندماج مع بنية RAN لتحقيق المتطلبات المطروحة من أجل تقطيع شبكي فعال، وهذا التوجه تمت دراسته من قبل هيئة الـETSI في التقرير التقني [23] وتقديم اقتراحات تصميمية نظرية للتقطيع الشبكي عن طريق الـ MEC، حيث تم في هذا البحث البناء على نموذجين نظريين مقترحين في التقرير التقني [23] واختبار تطبيق كلا النموذجين عن طريق المحاكاة ضمن شبكة 5G معيارية وإضافة التعديلات عل مستوى الراديو الجديد من أجل تقطيع شبكي للـRAN أكثر شمولاً.

١,٣ التعريف بالمفاهيم المستخدمة:

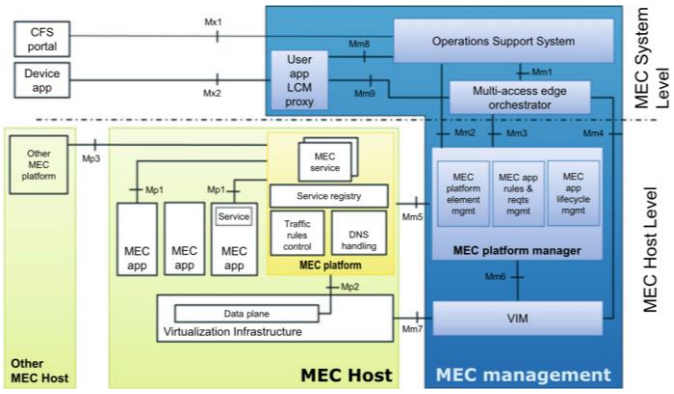
١,١,٣ مفهوم التقطيع الشبكي إلى شرائح (Network Slicing):

تم صياغة مبدأ تقطيع شبكات الاتصال إلى شرائح وتقديمها لأول مرة من قبل منظمة شبكات المحمول للجيل القادم Next Generation Mobile Network (NGMN)) [24] [25]، وكما هو محدد بالنموذج تعرف شريحة الشبكة بأنها: ""شبكة منطقية" مرنة تتكون من مجموعة وظائف شبكية افتراضية متصلة بروابط

افتراضية مبنية فوق بنية تحتية من عتاد شبكي مادي قابل للبرمجة والتحكم. أما من وجهة نظر معايير 3GPP للجيل الخامس [26]، يعد تقطيع الشبكة كأحد الميزات الرئيسية لشبكة 5G وما بعدها، حيث يتم عرض شريحة الشبكة (Network Slice) على أنها شبكة منطقية من طرف إلى طرف يمكن إنشاؤها ديناميكيًا. قد يصل جهاز مستخدم معين (UE) إلى شرائح متعددة عبر نفس شبكة الوصول (RAN)، وقد تخدم كل شريحة نوع خدمة معين وفق اتفاقية مستوى الخدمة Service Level Agreement (SLA)المتفق عليها. ويعبر المفهوم (NSI) Network Slice Instance عن مجموعة وظائف الشبكة ومواردها المطلوبة (مثل الحوسبة والتخزين وموارد الشبكات) التي تكون شريحة ما. وعلى صعيد آخر يقدم الجيل الجديد من الشبكات الراديوية (NG–RAN) البنية الجديدة التي تسمح بالمرونة المطلوبة للتقطيع الشبكي، حيث تقوم على فصل المحطة القاعدية (gNB) بنيويا بشكل وظيفي الى قسمين: مستوى التحكم/مستوى البيانات [27] [28]. كما أن المواصفات المعيارية لـ NR الراديو الجديد (New Radio) للجيل الخامس تأتي مع الكثير من التقنيات الجديدة، وأحد أهمها بنية الإطار الراديوي وخيارات الزمن المتغيرة (Numerology)، حيث تحدد NR عائلة من OFDM Numerology لنطاقات الإطار الراديوي، ويتم تعريف Numerology من خلال تباعد الحامل الفرعي Subcarrier Spacing والبادئة المتغيرة (Cyclic Prefix). حيث لا يمكن الحديث عن تطبيقات تحت الطلب من دون النزول بدراسة محددات التأخير إلى الطبقات الدنيا، إلى مستوى الـRAN .

٢,١,٣ شبكات الحوسبة الطرفية متعددة الوصول (MEC):

قام المعهد الأوروبي لمعايرة الاتصالات (ETSI) بإطلاق مجموعة المواصفات الصناعية (ISG) للحوسبة الطرفية متعددة الوصول (MEC: Multi–Access Edge Computing)[29]. حيث كان الهدف منذ البداية هو إنشاء بيئة مفتوحة عبر المنصات السحابية متعددة مقدّمي الخدمة ومتواضعة عند طرف الشبكة، متاحة للوصول من قبل مزوّدي الخدمة أو التطبيق وكذلك المستخدمين[30]. تكون البنية المعمارية لشبكات الـMEC [31] من الأجزاء التالية المبينة في الشكل (١) كوحدات أساسية في النظام: مضيف MEC Host: الذي يتضمن منصة MEC Platform (MEP) MEC التي تستضيف خدمات MEC المعيارية، وعتاد صلب فوقه عتاد برمجي يمثل بنية شبكية افتراضية والتي تقدم خدمات الحوسبة والتخزين والموارد الشبكية اللازمة لتطبيقات MEC. وتطبيقات MEC (MEC App): تعمل فوق البنية الافتراضية المقدمة من مضيف MEC، ويمكنها التفاعل مع منصة MEC لاستخدام وتوفير خدمات MEC. وإدارة MEC على مستوى النظام: وتتكون من مدير تطبيقات MEC (MEAO) Multi–access Edge Application Orchestrator وإدارة MEC على مستوى المضيف: ويتكون من مدير البنية التحتية الافتراضية Virtual Infrastructure Manager (VIM).



الشكل (١) البنية المعمارية لشبكة MEC

تتفاعل تطبيقات MEC مع منصة MEC والتي تقدم قائمة توضيحية عن خدمات MEC (MEC Services)، وهي مجموعة الإمكانيات التي تقدمها شبكة MEC للمستخدم بشكل متخصص وأهم هذه نذكر: Radio Network Information API: وتُدعى اختصاراً RNI API وقد تم تقديمها في المعيار. Location API: تم تعريفها بالمعيار [32]، ومنذ البداية يمكن أن نجد دعم حوسبة الحافة في معايير 3GPP عند وضع متطلبات نظام الجيل الخامس (TS 22.261) [33] والتي شملت نظام MEC.

٢,٣ آلية تعديل لنموذجي التقطيع الشبكي المعيارين من بنية ETSI MEC وإضافة تقطيع NR Numerology على مستوى RAN:

تم الافتراض في الشبكة وجود نوعين من المستخدمين ونوعين من الخدمة المطلوبة لكل منهما، تتميز كل خدمة بشروط حدية مختلفة بحساسية عامل التأخير (تتطلب مثلا الخدمة الأولى استجابة بالزمن الحقيقي والخدمة الثانية تتطلب استجابة طبيعية بزمن مهمل)، وبالتالي يُطلب من الشبكة أن تلبي نوعين من محددات الخدمة (SLA2 , SLA1)، هنا يأتي دور التقطيع كحل مثالي لتلبية هذه المتطلبات: حيث تولد في الشبكة شريحتين (2 Slices) افتراضية، تكون كل منها مصممة لتلبية محدد خدمة من الخدمات (NSI1: SLA1, NSI2: SLA2). وقد تم تحقيق ذلك عبر المنهجين التالين:

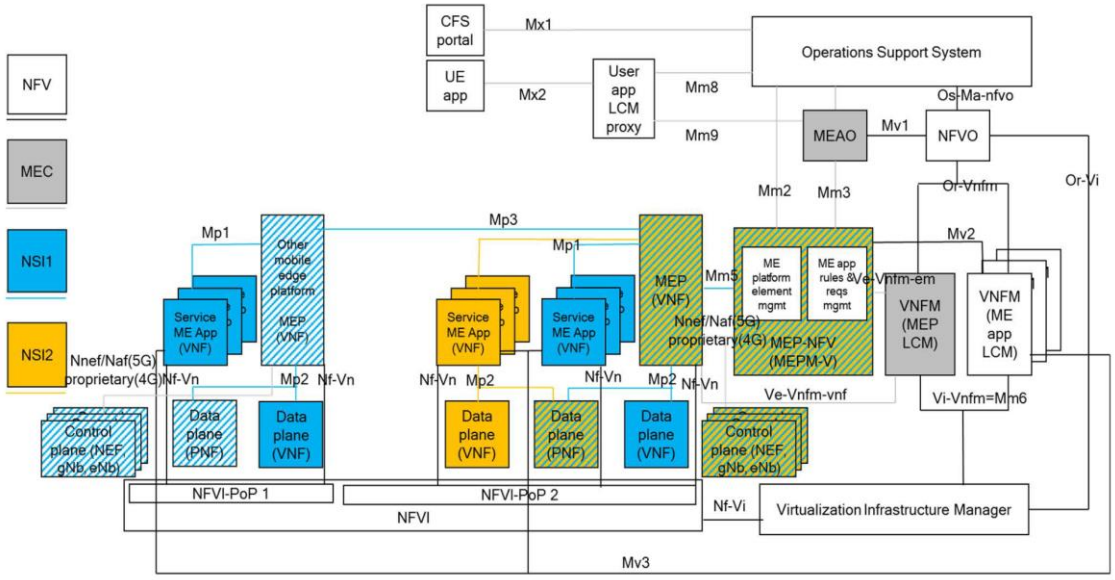
- **أولاً:** تخصيص برمجية تطبيق MEC مرتبطة بكل شريحة تمثل خدمة مختلفة
- **ثانياً:** تخصيص تجهيزة مضيف MEC مرتبطة بكل شريحة تمثل خدمة مختلفة

وبالإضافة لتعريف Slice من خلال MEC لنوعين من الخدمات المطلوبة (شريحتين من أجل خدمتين بمحددات تأخير مطلوبة مختلفة)، تم الإضافة للنموذجين السابقين الجزء المقترح من أجل زيادة تخصيص دراسة عامل التأخير ليشمل التقطيع على المستوى الراديوي، من خلال تصميم الشبكة الراديوية للجيل الخامس المستخدمة بنوعين من الـ Numerology (Num1 , Num2) على الشكل التالي:

- تكون Num1 بزمن إطار راديوي صغير ويتم تخصيصها لكل الـ UEs التي تطلب الخدمة من النوع الأول –بالتالي تنتمي لـ NSI1– ذات المحددات الحساسة لزمن التأخير SLA1 .
- تكون Num2 بزمن إطار راديوي عادي ويتم تخصيصها لكل الـ UEs التي تطلب الخدمة من النوع الثاني –بالتالي تنتمي لـ NSI2 – ذات المحددات غير الحساسة للتأخير SLA2 .

١,٢,٣ أولا: تخصيص برمجية تطبيق MEC مرتبط بكل شريحة تمثل متطلبات خدمة مختلفة

في هذا التصميم [23] الموضح في الشكل (٢) وبالمقارنة مع التصميم المعياري لـMEC الموضح بالشكل (١)، يتم مشاركة مضيف MEC واحد بين العديد من Slices، بالتالي فإن MEAO و MEP تتم مشاركتها بين جميع الشرائح. وتكون تطبيقات MEC المرتبطة بكل NSI مخصصة فقط لهذه الشريحة ويمكنها الوصول إلى بيانات وحركة مرور UEs المتصلين بهذه الشريحة فقط. وفي الحالة المفروضة من خلال تشبيك كل الـ UEs التي تطلب الخدمة من النوع الأول (بالتالي تنتمي لـ NSI1 ولها SLA1)مع تطبيق MEC الأول الخاص بها فقط، وتشبيك كل الـ UEs التي تطلب الخدمة من النوع الثاني (تنتمي لـ NSI2 الثانية ولها SLA2) مع تطبيقMEC الثاني الخاص بها فقط، بالتالي سوف يتم تحقيق التقطيع الشبكي من خلال تخصيص تطبيق لكل شريحة وتخصيص موارد من عتاد MEC (بالقدرات البرمجية أو الفيزيائية للمعالجة والتخزين وغيرها) متاحة لكل تطبيق تتناسب مع محددات الخدمة المطلوبة منه، ثم تزويد كل UE من مجموعة الـ UEs بتطبيق MEC المخصص بالشريحة ذات محددات الخدمة المرادة ، وفي هذه الحالة يجب على VNFs التي تطلب الخدمات من MEP، وMEP نفسها يجب عليها مشاركة البنية التحتية للمصادقة التي تسمح بقبول/رفض الطلبات المقدمة لاستخدام خدمات Slice. كما يجب على MEP أن يصادق لاستيراد معلومات الراديو الخاصة بالـ UEs، أي أن إدارة التسجيل والتحكم للشريحتين ستكون مشتركة فوق البنية التحتية الافتراضية.

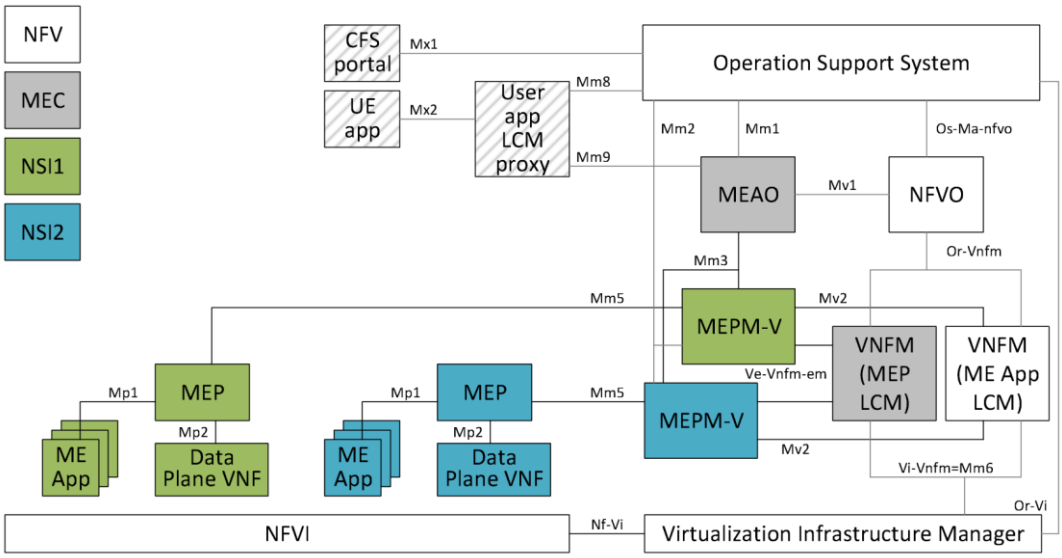


الشكل (٢) المخطط الشبكي للنموذج الأول المعياري للتقطيع باستخدام تطبيقي MEC المرجع [23]

٢,٢,٣ ثانياً: تخصيص تجهيزة مضيف MEC مرتبط بكل شريحة تمثل خدمة مختلفة:

في هذا التصميم [23] المبين في الشكل (٣) وبالمقارنة مع التصميم المعياري لل MEC في الشكل (١) يتم تخصيص مضيف MEC لكل Slices ، بالتالي تنفصل كل شريحة بـMEP الخاص بها والعتاد الفيزيائي الخاص بها بينما MEAO تتم مشاركتها بين جميع الشرائح. وتحمل تطبيقات MEC المرتبطة بكل شريحة على المضيف الخاص فقط بهذه الشريحة ويخدم UEs المتصلين بهذه الشريحة فقط. وبحكم أن VNFs كل شريحة

معزولة فإن الإدارة أسهل ويمكن تزويد MEP بخدمات الـ MEC المرغوبة (أو استخدام خدمات متوفرة على سيرفرات أخرى).



الشكل (٣) المخطط الشبكي للنموذج الثاني المعياري للتقطيع باستخدام مضيفي MEC المرجع [23]

وفي النموذج تم تحقيق التقطيع الشبكي لنوعي الخدمات المطلوبة من خلال تشبيك كل الـ UEs التي تطلب الخدمة من النوع الأول (بالتالي تنتمي لـ NSI1 ولها SLA1) عل مضيف MEC الأول الخاص بها فقط، وتشبيك كل الـ UEs التي تطلب الخدمة من النوع الثاني (تنتمي لـ NSI2 الثانية ولها SLA2) عل مضيف MEC الثاني الخاص بها فقط (وسيتم تحقيق ذلك عمليا من خلال تطوير تطبيقين MEC مختلفين واحد لكل فئة من الـ UEs، بحيث أن يتم تحميله كل تطبيق MEC على مضيف MEC مختلف، وتزويد الـ UEs مع بداية التجربة بتطبيق UE الموافق). وتم ضمان تلبية SLA المختلفة والمرغوبة من كل شريحة من خلال تجهيز وتخصيص موارد ستاتيكية من عتاد الـ MEC في كل مضيف MEC (بالقدرات الفيزيائية للمعالجة والتخزين وغيرها) تتناسب مع SLA المطلوبة من الخدمة المنصوصة بها، ولعدد المستخدمين المطلوب وغير ذلك، وهذا يتم تصميمه مع تصميم الشبكة ويكون قابل للتوسيع أو النسخ في موضع آخر ضمن الشبكة بحسب الطلب، كل ذلك ضمن الإمكانيات المتاحة بفضل بنية MEC.

٣,٣ محاكاة التأخير في شبكة RAN المدعومة بالـMEC :

تم الاعتماد على عامل التأخير عبر الشبكة من طرف إلى طرف End−2−End (L_{E2E})، من أجل تقييم أداء النظام المقترح في كل سيناريو، بافتراض أن هناك عملية إرسال واستقبال مستمرة عبر الشبكة تتم من خلال تطبيق يتم تشغيله من قبل UEs، هذا التطبيق يطلب خدمة متوفرة على خوادم شبكة MEC.

بالنظر إلى الشبكة المدروسة ضمن بيئة المحاكاة المقترحة يمكن تقسيم عامل التأخير إلى أربعة أقسام:

I. تأخير الإرسال والاستقبال في Radio−RAN (L_{Radio})

II. تأخير المعالجة ضمن شبكة الـ MEC− RAN (L_{MEC})

III. تأخير الشبكة المركزية Core (L_{CN})

III. تأخير شبكة التوصيلات Transport (L_{TN})

على الشكل التالي:

$$L_{E2E} = L_{RAN} + L_{CN} + L_{TN} \quad (1)$$

$$L_{E2E} = L_{Radio} + L_{MEC} + L_{CN} + L_{TN} \quad (2)$$

حيث وأن الغرض من الدراسة تقييم أداءات التأخير من وجهة نظر RAN وMEC، فلن نقوم بنمذجة التأخير على مستوى أي من وصلات الشبكة غير الراديوية (حيث إنه يمكن ببساطة إضافة هذا التأخير كقيمة ثابتة)؛ وكذلك بالنسبة لتأخير الشبكة المركزية حيث إنه يتعلق بالمسافات بين عقد الشبكة (والتأخير المستمر بين iUPFs، اعتمادا على مكان استضافة تطبيقات MEC) ويمكن بسهولة نمذجته بناء على نوع شبكة النقل المستخدمة (خارج إطار اهتمامنا).

وبالتالي تصبح المعادلة بالشكل التالي تحوي على تأخيرين:

$$L_{E2E} = L_{Radio} + L_{MEC} \quad (٣)$$

بتحليل الشبكة المدروسة وغرض الدراسة يمكن أن نصل إلى ما يلي:

I. تأخير الإرسال والاستقبال في Radio–RAN (L_{Radio})

وهي التأخيرات الناتجة عن رسائل request/response للمهام المطلوبة بين UE وتطبيق MEC، وتشمل تأخيرات الوصلة الصاعدة والوصلة الهابطة لشبكة RAN، وتتعلق بالعديد من العوامل منها ظروف انتشار الأمواج ضمن البيئة المختارة والترددات المستخدمة وعدد المستخدمين في الشبكة المعنية، وطبيعة التطبيقات، والعوامل الجوية.

لكن ولغرض الدراسة وكما تم التوضيح فيما سبق فقد تم افتراض أن كافة المتغيرات في الشبكة الراديوية المدروسة بين الشريحتين ثابتة، والتغيير فقط في عامل واحد وهو Numerology، وعليه:

$$L_{Radio} = L_{NUM} \quad (٤)$$

II. تأخير المعالجة ضمن شبكة الـ MEC– RAN (L_{MEC})

وهو التأخير الناتج عن الزمن الازم لتنفيذ تعليمات تطبيق MEC من قبل وحدة المعالجة المركزية على مضيف MEC، والذي يعتمد على قدرات المعالجة والتخزين المتوفرة ضمن مضيف MEC، والحمل المطبق على مضيف MEC (عدد التطبيقات وعدد الطلبات المقدمة لمضيف MEC).

ولغرض تبسيط الدراسة تم افتراض أن الحمل المطبق على مضيف MEC هو ذاته في الشريحتين المستخدمتين (حمل متغير وسطي للنظام)، والتغيير سيكون في قدرات المعالجة المتوفرة (processor's speed) ضمن مضيف MEC، والتي تقاس بواحدة Million instructions per second (MIPS)وعليه:

$$L_{MEC} = L_{MEC\ MIPS} \quad (5)$$

بحكم أن هدف الدراسة عمليا هو التقطيع الشبكي على مستوى RAN لتحقيق آلية للتفاضل بالتأخير الناتج عن الشبكة بين فئة مستخدمين وفئة مستخدمين أخرى، مع الضبط المسبق، و بحكم عدم اعتماد الحلول المقترحة

ذاتها بشكل تطبيقي عملي من قبل دراسة مرجعية سابقة، بالتالي سيكون التقييم بنجاح السيناريو المتبع معتمدا على تحقيق فرق في تأخير الشبكة الذي يتعرض له كل فئة من فئتي المستخدمين بحسب الشريحة التي سينتمي المستخدم إليها من بداية المحاكاة، وبالتالي المقارنة بالنتائج ستكون بين تأخير الشبكة ($L_{E2E} = L_{Radio} + L_{MEC}$) لمستخدم من الشريحة الأولى، مع تأخير الشبكة لمستخدم من الشريحة الثانية.

٤ النتائج والمناقشة:

١,٤ بيئة المحاكاة:

تم استخدام المحاكاة في برنامج Simu5G [34] وهو محاكي جديد على مستوى النظام (System-Level) لطبقة Data-Plane لتقنية 5G، وهو قائم على برنامج المحاكاة الشهير OMNeT ++ [35]، يسمح Simu5G بتقييم التطبيقات الشاملة، ودمج بنية بروتوكول TCP/IP بالكامل مع الشبكة المعيارية. يتميز هذا التصميم لـMEC ضمن Simu5G باختيار التنفيذ بطريقة متوافقة مع المعايير والالتزام بالنقاط المرجعية لبنية MEC المعيارية من ETSI، ويسمح هذا للمطور بالتفاعل مع إطار العمل الخاص بالمحاكي بنفس الطريقة التي يتفاعل بها مع نظام MEC حقيقي. وتقوم الوحدة MEC HOST Module بنمذجة مستوى مضيف MEC، ويكون قابل للضبط والتعيير (عبر ملفات NED/INI).

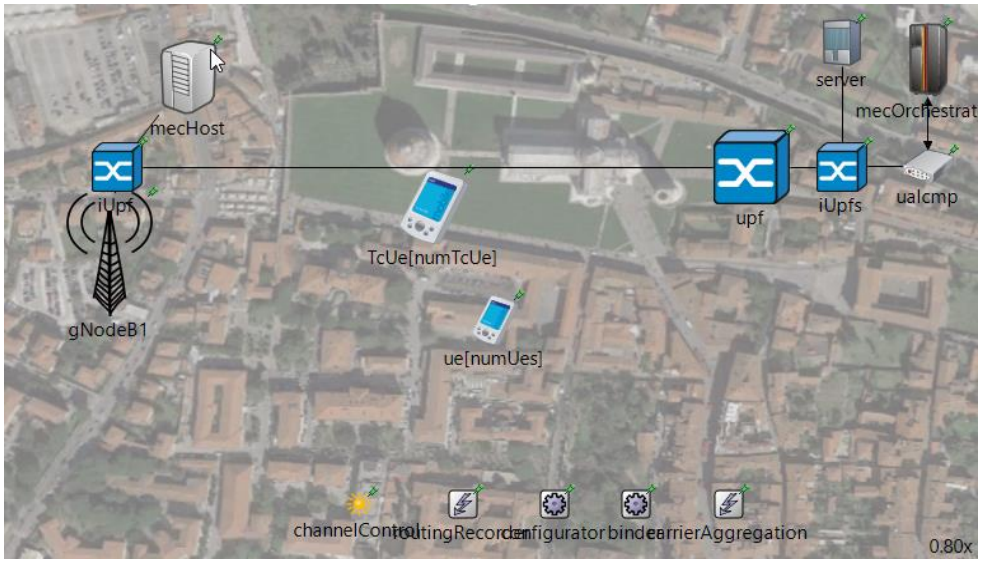
٢,٤ تنفيذ السيناريو الأول: تنفيذ نموذج الشبكة للمقترح الأول مع إضافة مستوى NR:

١,٢,٤ الوصف العام للشبكة والتطبيقات المستخدمة:

تم تنفيذ الشبكة المستخدمة للمحاكاة التالية كما هو موضح في الشكل (٤). حيث يتم استخدام شبكة جيل خامس (5G SA)، باستخدام خلية واحدة في مركزها محطة قاعدية واحدة (gNodeB1)، متصلة مع مخدم عن طريق Data-Plane شبكة 5G الممثل بعقدة upf. (بينما تمثل عقد iUpf تجهيزات ربط ببروتوكول TCP/IP بين بنى الشبكة الأخرى). يتم دعم الشبكة السابقة بنظام MEC الذي يتكون من UALCMP ومنسق MEC ومضيف MEC واحد (وهو mecHost)، المرتبط بـ gNodeB1. يتحرك ضمن الشبكة السابقة مجموعتين من UEs لتمثيل نوعين من SLA التي نريد تحقيقها:

- مجموعة من TcUE (Time Critical UEs) والتي ستمثل المستخدمين ذوي SLA الحساس للتأخير
- مجموعة من ue والتي ستمثل المستخدمين ذوي SLA غير الحساس للتأخير

تم تطوير تطبيقي UEApp مختلفين: ◄ تطبيق (RTVideoStreamingSenderUR) ◄تطبيق (RTVideoStreamingSender)، يقوم كل من التطبيقين بتفعيل تطبيق MEC المختلف المقابل على الترتيب: تطبيق (RealTimeVideoStreamingAppUR) وتطبيق (RealTimeVideoStreamingApp).



الشكل (٤) تصميم الشبكة في Simu5G للتجربة الأولى

يشترك التطبيقان بأن كلاهما يقوم بتقديم ذات الوظيفة وهي إرسال واستقبال بيانات عبر الشبكة مصدرها مضيف MEC، ولكن الفرق الجوهري بينهما أن تطبيق (RealTimeVideoStreamingApp) MEC مصمم ليحتاج إلى عمليات معالجة أكبر (Instructions per process،CPU) من نظام MEC لتحقيق وظيفته، بينما تطبيق (RealTimeVideoStreamingAppUR) MEC مصمم ليحتاج عمليات معالجة أصغري من نظام MEC لتحقيق وظيفته، وكما هو في الاستخدام الواقعي لتطبيقات MEC، فإن AppDescriptor بصيغة (.json) مطلوب لكل تطبيق MEC.

٢,٢,٤ آلية تطبيق التقطيع الشبكي: سيتم ذلك على مستويين:

أولا: تم تخصيص برمجية تطبيق MEC مرتبطة بكل شريحة تمثل خدمة مختلفة في الشبكة، حيث يتم تحميل كل من تطبيقي MEC السابقين من ملف (INI) على مضيف MEC الوحيد المستخدم (mecHost). ويتم استخدام تطبيقي UEApp عبر المستخدمين في الشبكة كما يلي:

- TcUE تم تزويده بتطبيق RTVideoStreamingSenderUR UEApp
- ue[1] و ue[2] تم تزويده بتطبيق RTVideoStreamingSender UEApp

ثانيا: على مستوى المجال الترددي تم استخدام ٣ Numerologies كما يلي:

- TcUE تم تخصيصه بـ $\mu=3$
- ue[1] تم تخصيصه بـ $\mu= 0$
- ue[2] تم تخصيصه بـ $\mu= 1$

يقوم أيضا كل المستخدمين في الشبكة بتشغيل تطبيق Device app المسؤول عن إرسال طلب إلى UALCMP نيابة عن UEApp من أجل بدء إجراءات إنشاء نسخة لتطبيق MEC المرغوب على مضيف MEC.

٣,٢,٤ إعدادات وبارامترات المحاكاة الأخرى:

تم استخدام حركية متطابقة لكلا نوعي المستخدمين في الشبكة وهي حركية خطية متزايدة مع زمن المحاكاة ومبتعدة عن المحطة القاعدية. تم الاعتماد على زيادة تحميل الشبكة من خلال مبدأ UEs في الخلفية

(background UEs). حيث يتم نشر هذا الأخير بشكل موحد في الشبكة ويتواصل كل منهم مع تطبيق MEC واحد في الخلفية يتصرف تماما مثل تطبيق MEC الموضح أعلاه. بهذه الطريقة، يتم إضافة الحمل تدريجيا إلى RAN ومضيف MEC، وبنفس الأسلوب يتم الاعتماد على مبدأ MEC apps في الخلفية (background MEC apps) لزيادة حمل المعالجة علة مضيف MEC). يتم دائما تحميل إطار NR بشكل خفيف في هذا السيناريو ولا يتم استخدام كامل الـ ٥٠ RB Resource Blocks خلال التطبيق، (يمكن دراسة حالات مختلفة لحمل المجال الراديوي وتأثيرها بزيادة عدد background UEs). يبين الجدول (٢) البارامترات المستخدمة في المحاكاة:

جدول (٢) بارامترات المحاكاة المستخدمة في السيناريو الأول

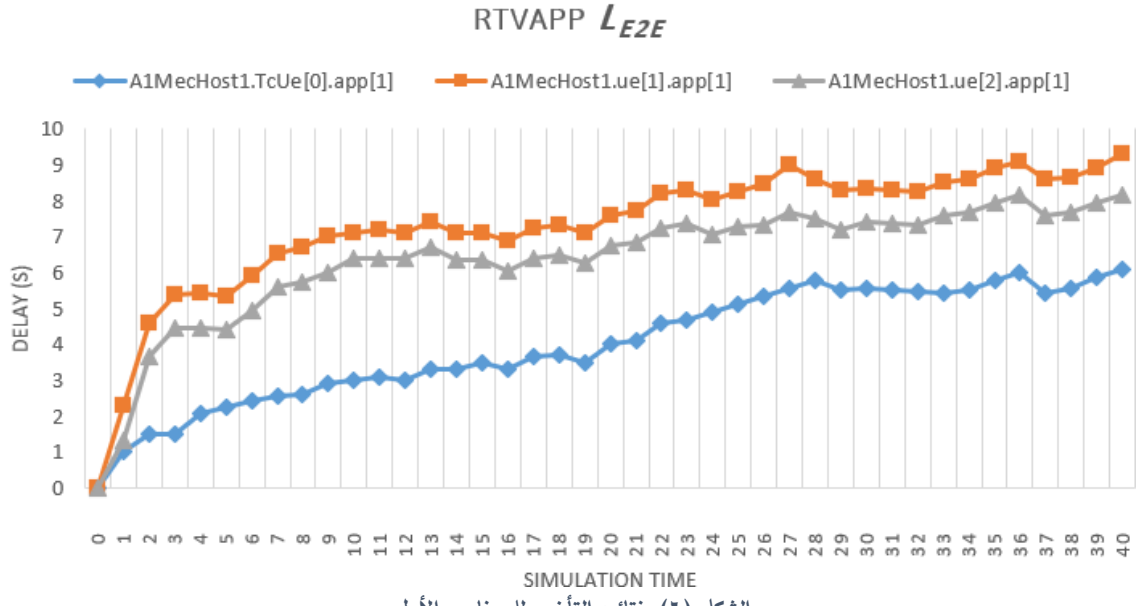
Parameter Name	Value
MEC system configuration	
MEC Host vim scheduling policies	["Fair"]
# Of background UEs/MEC apps	[50…650], step 50
Average service time for the RNIS	*~Exponential* (0.5) Ms
Maximum CPU speed	MEC Host 1: 330000 MIPS,
MEC Ue app configuration	
CPU speed requirement	7500 MIPS
Number of CPU instructions in the MEC app task	10000
UE app task period	200 ms
MEC TcUE app configuration	
CPU speed requirement	1500 MIPS
Number of CPU instructions in the MEC app task	1000
UE app task period	200 ms
RAN configuration	
Numerology	0, 1, 3
Number of Resource Blocks	50
Background UEs offered traffic	2 KB/s (downlink); 1.6 KB/s (uplink)
Simulation configuration	
Simulation duration	40s
Warm–up time	0s
# Of independent replicas	10

٤,٢,٤ الخطوات العملية لتنفيذ المحاكاة:

حيث ستكون خطوات تنفيذ التجربة كما يبين الشكل (٥):

الشكل (٥) المخطط الصندوقي لخطوات العمل للسيناريو الأول

٥,٢,٤ نتائج السيناريو الأول:



الشكل (٦): نتائج التأخير للسيناريو الأول

نلاحظ من الشكل (٦) الفرق الواضح –والمضطرد تقريبا– بالتأخير L_{E2E} بين TcUE. ، ue[1] ، ue[2] ، وتفسير ذلك:

◄ أولاً: تم الحصول على تأخير L_{E2E} مختلف بين أنواع المستخدمين الثلاثة في الشبكة، وبنسبة تحسن معتبرة (١٠% بين ue[1] و ue[2]، ٤٠% بين TcUE. و ue[1]) وهذه النسبة تتعلق بـNumerology المستخدم ومتطلبات تطبيق MEC وبارامترات الشبكة.

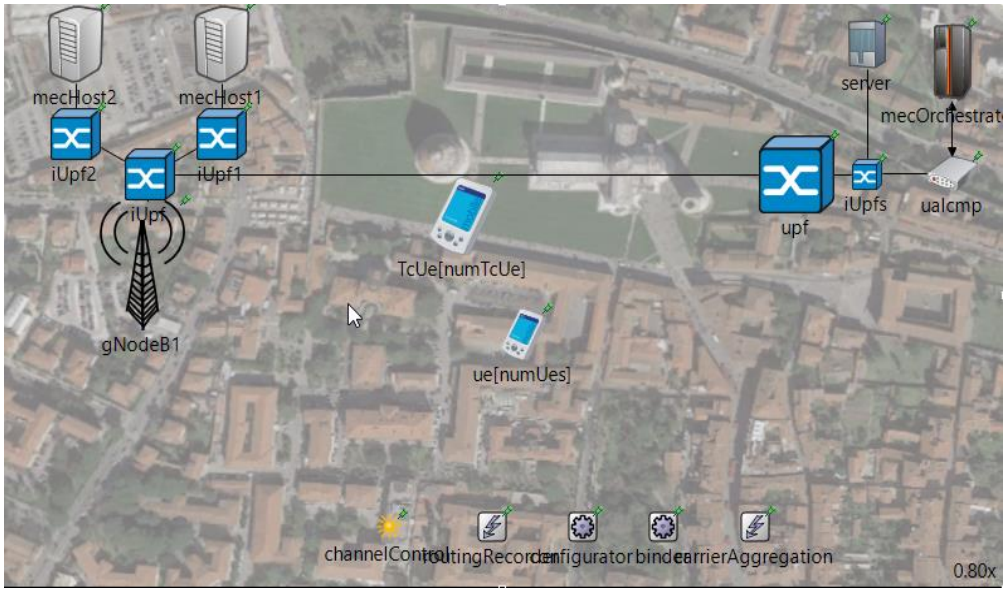
◄ ثانياً: يبدو تأثير عامل التأخير RAN وهو متزايد مع زمن المحاكاة بسبب حقيقة أن Numerology لكل تطبيق ثابتة كامل فترة المحاكاة، وبتأثير أن بيانات الموضع والحركية للاثنين متماثلة (الحركية باتجاه مبتعد عن المحطة القاعدية وهو ما يفسر الزيادة المضطردة بالتأخير الناتج عن RAN مع مرور زمن المحاكاة).

◄ ثالثاً: تأثير عامل التأخير RAN Numerology (L_{NUM}) يبدو جليا بشكل منفصل من خلال الفرق في أداء التأخير للمستخدمين ue[1] و ue[2] بحكم استخدامها نفس تطبيق UEApp.

◄ رابعاً: تأثير عامل تأخير المعالجة ضمن شبكة MEC ($L_{MEC\ MIPS}$) فهو أقل بالنسبة لـTcUE ، لأن التطبيق المستخدم والمخصص ل TcUE يتطلب (حسب4.2.1)، وهو تأثير دائم مضاف على تأخير (L_{NUM})، وهذا طبيعي حيث إن عمليات المعالجة تتم مع كل طلب للخدمة وتضاف إلى تأخير RAN، ليكون التأخير الناتج ($L_{E2E} = L_{Radio} + L_{MEC}$) الواضح في الشكل (٦) لكل شريحة.

٣,٤ السيناريو الثاني: تنفيذ نموذج الشبكة للمقترح الثاني مع إضافة مستوى NR:

١,٣,٤ الوصف العام للشبكة والتطبيقات المستخدمة:



الشكل (٧) تصميم الشبكة في Simu5G للتجربة الثانية

تم تنفيذ الشبكة المستخدمة للمحاكاة التالية كما هو موضح في الشكل (٧)، مشابهة للتجربة الأولى لكن الاختلاف هذه المرة أنه يتم دعم الشبكة السابقة بنظام MEC الذي يتكون من UALCMP ومنسق MEC ومضيفي MEC اثنين (mecHost2, mecHost1)، كلاهما يتصل بـ gNodeB1. يختلف mecHost1 عن

mecHost2 أن الأول يتم تخصيصه بقدرات معالجة أكبر (أكبر بثلاثة أضعاف من الثاني ويتضح ذلك من جدول (٣)).

٢,٣,٤ آلية تطبيق التقطيع الشبكي: يتم ذلك على مستويين:

أولا: ولكن الفرق الجوهري بين هذا السيناريو والسيناريو السابق هو أن كل تطبيق من تطبيقي MEC RealTimeVideoStreamingApp و RealTimeVideoStreamingAppUR يتم تحميله على مضيف MEC مختلف، بحيث يتم التخصيص والفصل بين نوعي الخدمات بفصل مضيف MEC المزود بكل خدمة:

- تم تحميل RealTimeVideoStreamingAppUR على مضيف MEC الأول (mecHost1)
- تم تحميل RealTimeVideoStreamingApp على مضيف MEC الثاني (mecHost2)

ثانيا: على مستوى المجال الترددي تم استخدام ٢ Numerologies ومستخدمين فقط كما يلي:

- TcUE تم تخصيصه بـ μ=3
- ue[1] تم تخصيصه بـ μ= 0

٣,٣,٤ إعدادات وبارامترات المحاكاة الأخرى:

يبين الجدول (٣) الاختلاف في البارامترات المستخدمة في المحاكاة عن الجدول (٢):

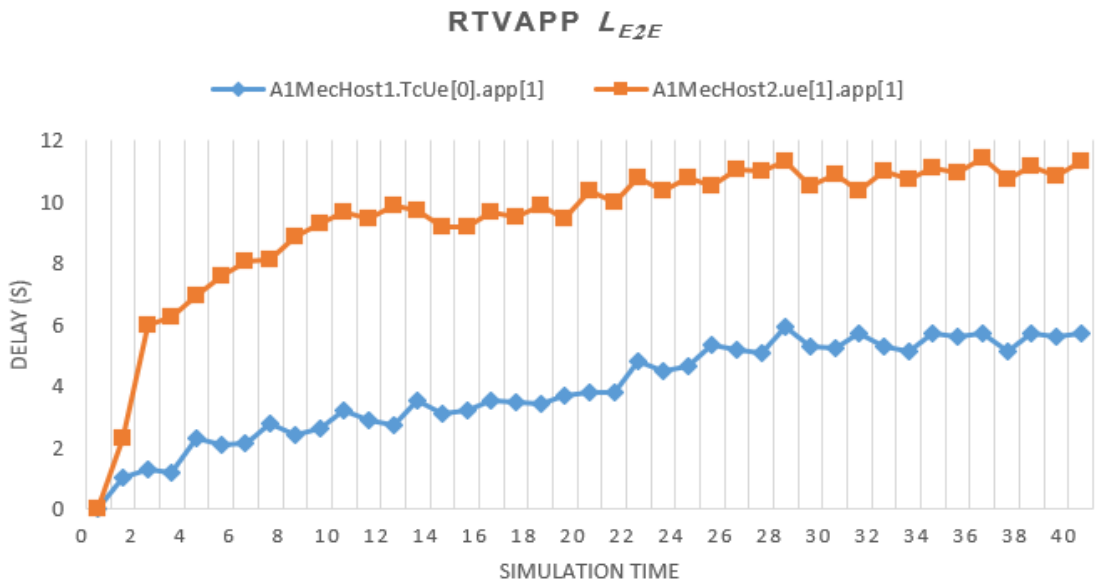
جدول (٣) بارامترات المحاكاة المعدلة في التجربة الثانية

Parameter Name	Value
MEC system configuration	
Maximum CPU speed	MEC Host 1: 330000 MIPS, MEC Host 2: 110000 MIPS
RAN configuration	
Numerology	0, 3

٤,٣,٤ الخطوات العملية لتنفيذ المحاكاة:

بشكل مشابه للتجربة الأولى والشكل (٥) مع إضافة مضيف MEC الثاني.

٥,٣,٤ نتائج السيناريو الثاني:



الشكل (٨): نتائج التأخير للسيناريو الثاني

نلاحظ أيضا من النتائج الفرق الأكبر بالتأخير L_{E2E} بين الـ TcUEوue[1] كما يوضح الشكل (٨)، وبالمقارنة مع السيناريو السابق فإن التأثير المتعلق بعامل التأخير RAN (L_{NUM}) يبدو واضح بحكم أن Numerology المستخدمة غير مختلفة عما سبق، وبيانات الموضع والحركية أيضا متماثلة (الحركية باتجاه مبتعد عن المحطة القاعدية).

لكن الفرق في التأخير L_{E2E} يبدو أكثر وضوحا بين الـ TcUEوue[1] (وسطيا حوالي3s) وذلك بفعل تأثير عامل تأخير المعالجة ضمن شبكة MEC، وذلك أن تأخير المعالجة اختلف هذه المرة ليس باختلاف تطبيق MEC، إنما باختلاف مضيف MEC الذي تم استضافة تطبيق MEC عليه.

وبالتالي ساهمت قدرات المعالجة الأقل في mecHost2 في زيادة تأخير المعالجة، لتضاف إلى تأخير المعالجة الأكبر أساسا لـ ue بحكم أن تطبيق (RealTimeVideoStreamingApp) MEC أكثر طلب للموارد. واستفادت TcUE من قدرات المعالجة الأكبر في mecHost1، مع تطبيق (RealTimeVideoStreamingAppUR) MEC ذو متطلبات الموارد الأقل.

٥ الاستنتاجات والتوصيات:

تم إثبات من خلال المحاكاة فعالية الآليات المقترحة بتحقيق متطلبات التأخير من خلال التقطيع الشبكي على مستوى RAN، NRوMEC وإجمالاً لما ورد فيما سبق من استخلصنا ما يلي:

- ✓ تخصيص تطبيقات MEC وتخصيص Numerology، للحصول على سلوك شبكة مختلف من ناحية زمن التأخير لمستخدمين ضمن نفس الظروف الراديوية في الشبكة هي استراتيجية ناجحة للتقطيع الشبكي باستخدام MEC، وقد حققت نسبة تحسن معتبرة بين الحالات المستخدمة (١٠% بين ue[1] و ue[2] ، ٤٠% بين TcUE. و ue[1]) وهذه النسبة المتغيرة تتعلق بـNumerology المستخدم ومتطلبات تطبيق MEC وبارامترات الشبكة.

- ✓ تخصيص مضيف MEC منفصل، للحصول على سلوك شبكة مختلف من ناحية زمن التأخير لمستخدمين ضمن نفس الظروف الراديوية في الشبكة، هي أيضا استراتيجية ناجحة للتقطيع الشبكي باستخدام MEC. وقد حققت نسبة تحسن معتبرة بين الحالتين (٥٠% بين .TcUE و [1]ue) وهذه النسبة أيضا تتعلق بـNumerology المستخدم وومتطلبات تطبيق MEC وبارامترات الشبكة.
- ✓ يمكن تعميم السلوك واستخدام عدة مضيفي MEC لتلبية عدة SLA ضمن نفس الشبكة الراديوية، وخاصة عند الحاجة لمتطلبات معالجة أعلى وأقرب للمستخدم (وهو حل متاح وسهل للاستثمار بحكم أن نظام MECيتيح المرونة بالتوسعة وبالإدارة تحت الطلب).
- ✓ يمكن في المستقبل دراسة استخدام خدمات MEC للراديو واستغلالها لمحاكاة وتحقيق الـ Network Slicing مع الـ (O-RAN-(OPEN-RAN.

المصادر والمراجع:

[1] 5G Americas WB, "5G Vertical Use Cases." Oct. 2021.

[2] "5G and Verticals ‹ 5G-PPP." Accessed: Jul. 27, 2023. [Online]. Available: https://5g-ppp.eu/verticals/

[3] A. A. Barakabitze, A. Ahmad, R. Mijumbi, and A. Hines, "5G network slicing using SDN and NFV: A survey of taxonomy, architectures and future challenges," Computer Networks, vol. 167, 2020, doi: 10.1016/j.comnet.2019.106984.

[4] A. Hossain and N. Ansari, "5G Multi-Band Numerology-Based TDD RAN Slicing for Throughput and Latency Sensitive Services," IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 22, no. 3, pp. 1263–1274, Aug. 2021, doi: 10.1109/TMC.2021.3106323.

[5] N. Correia, F. Al-Tam, and J. Rodriguez, "Optimization of Mixed Numerology Profiles for 5G Wireless Communication Scenarios," Sensors, vol. 21, no. 4, Art. no. 4, Jan. 2021, doi: 10.3390/s21041494.

[6] D. Segura, E. J. Khatib, J. Munilla, and R. Barco, "5G Numerologies Assessment for URLLC in Industrial Communications," Sensors, vol. 21, no. 7, Art. no. 7, Jan. 2021, doi: 10.3390/s21072489.

[7] I. Oussakel, P. Owezarski, P. Berthou, and L. Houssin, "Toward Radio Access Network Slicing Enforcement in Multi-cell 5G System," J Netw Syst Manage, vol. 31, no. 1, p. 8, Oct. 2022, doi: 10.1007/s10922-022-09694-0.

[8] L. Miuccio, D. Panno, P. Pisacane, and S. Riolo, "Channel-Aware and QoS-Aware Downlink Resource Allocation for Multi-numerology Based 5G NR Systems," in 2021 19th Mediterranean Communication and Computer Networking Conference (MedComNet), Jun. 2021, pp. 1–8. doi: 10.1109/MedComNet52149.2021.9501268.

[9] S. Khabaz, K. O. Boulila, T. M. Trang Nguyen, G. Pujolle, M. E. Aoun, and P. B.Velloso, "A New Priority and Satisfaction-based Resource Allocation Algorithm with Mixed Numerology for 5G-V2X communications," in 2022 14th IFIP Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC), Oct. 2022, pp. 85–92. doi: 10.23919/WMNC56391.2022.9954308.

[10] M. Raftopoulou and R. Litjens, “Optimisation of Numerology and Packet Scheduling in 5G Networks: To Slice or not to Slice?,” in 2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference (VTC2021-Spring), Apr. 2021, pp. 1–7. doi: 10.1109/VTC2021-Spring51267.2021.9448814.

[11] K. Gilly, C. Bernad, P. J. Roig, S. Alcaraz, and S. Filiposka, “End-to-end simulation environment for mobile edge computing,” Simulation Modelling Practice and Theory, vol. 121, p. 102657, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.simpat.2022.102657.

[12] A. Virdis, G. Nardini, G. Stea, and D. Sabella, “End-to-End Performance Evaluation of MEC Deployments in 5G Scenarios,” *Journal of Sensor and Actuator Networks*, vol. 9, no. 4, Art. no. 4, Dec. 2020, doi: 10.3390/jsan9040057.

[13] G. Nardini, G. Stea, and A. Virdis, “Scalable Real-Time Emulation of 5G Networks With Simu5G,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 148504–148520, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3123873.

[14] A. Noferi, G. Nardini, G. Stea, and A. Virdis, “Deployment and configuration of MEC apps with Simu5G.” arXiv, Sep. 24, 2021. doi: 10.48550/arXiv.2109.12048.

[15] A. Noferi, G. Nardini, G. Stea, and A. Virdis, “Rapid prototyping and performance evaluation of MEC-based applications.” arXiv, Mar. 25, 2022. doi: 10.48550/arXiv.2203.13511.

[16] A. Noferi, G. Nardini, G. Stea, and A. Virdis, “Rapid prototyping and performance evaluation of ETSI MEC-based applications,” *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 123, p. 102700, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.simpat.2022.102700.

[17] J. O. R. Batista, D. C. da Silva, M. Martucci, R. M. Silveira, and C. E. Cugnasca, “A Multi-Provider End-to-End Dynamic Orchestration Architecture Approach for 5G and Future Communication Systems,” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 24, Art. no. 24, Jan. 2021, doi: 10.3390/app112411914.

[18] L. Nkenyereye, R. P. Naik, J.-W. Jang, and W.-Y. Chung, “Software-Defined Small Cell-Linked Vehicular Networks: Architecture and Evaluation,” *Electronics*, vol. 12, no. 2, Art. no. 2, Jan. 2023, doi: 10.3390/electronics12020304.

[19] L. Tomaszewski, S. Kukliński, and R. Kołakowski, “A New Approach to 5G and MEC Integration,” in *Artificial Intelligence Applications and Innovations. AIAI 2020 IFIP WG 12.5 International Workshops*, I. Maglogiannis, L. Iliadis, and E. Pimenidis, Eds., in IFIP Advances in Information and Communication Technology. Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 15–24. doi: 10.1007/978-3-030-49190-1

[20] “DIRECT | Proceedings of the Twentieth ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing.” Accessed: Jul. 25, 2023. [Online]. Available: https://dl.acm.org/doi/10.1145/3323679.3326516

[21] S. D’Oro, L. Bonati, F. Restuccia, M. Polese, M. Zorzi, and T. Melodia, “Sl-EDGE: Network Slicing at the Edge,” in *Proceedings of the Twenty-First International Symposium on Theory, Algorithmic Foundations, and Protocol Design for Mobile Networks and Mobile Computing*, Oct. 2020, pp. 1–10. doi: 10.1145/3397166.3409133.

[22] S. D. A. Shah, M. A. Gregory, and S. Li, "Toward Network Slicing Enabled Edge Computing: A Cloud-Native Approach for Slice Mobility," *IEEE Internet of Things Journal*, pp. 1–1, 2023, doi: 10.1109/JIOT.2023.3292520.

[23] ETSI, "Multi-access edge computing (MEC) MEC support for Network Slicing," ETSI, GROUP REPORT GR MEC 024 V2.1.1, Nov. 2019.

[24] Peter Hedman, "NGMN 5G P1: Description of Network Slicing Concept," NGMN, 5G P1, 2016. Accessed: Jul. 28, 2023. [Online]. Available: https://ngmn.org/wp-content/uploads/160113_NGMN_Network_Slicing_v1_0.pdf

[25] P. Deibert, "NGMN 5G White Paper," 2015.

[26] ETSI, "5G; Management and orchestration; Concepts, use cases and requirements (3GPP TS 28.530)," TECHNICAL SPECIFICATION TS 128 530, Aug. 2020.

[27] S. Ahmadi, *5G NR architecture, technology, implementation, and operation of 3GPP new radio standards*, no. 1. 2019, pp. 6–8. doi: 9780128134023.

[28] L. Bonati, M. Polese, S. D. Oro, and N. I. May, "Open, programmable, and virtualized 5G networks: State-of-the-art and the road ahead," pp. 1–66, 2020.

[29] ETSI, "Mobile Edge Computing A key technology towards 5G," ETSI, White Paper No. 11, 2015.

[30] L. M. Contreras *et al.*, "MEC in 5G networks," ETSI, White Paper No. 28, 2018.

[31] ETSI, "Multi-access Edge Computing (MEC) Framework and Reference Architecture," ETSI, GROUP SPECIFICATION GS MEC 003, 2022.

[32] ETSI, "Multi-access Edge Computing (MEC); Location API," ETSI, GROUP SPECIFICATION GS MEC 013 V2.2.1, 2022.

[33] "3GPP Specification # 22.261." Accessed: Aug. 08, 2023. [Online]. Available: https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3107

[34] G. Nardini, D. Sabella, G. Stea, P. Thakkar, and A. Virdis, "Simu5G–An OMNeT++ Library for End-to-End Performance Evaluation of 5G Networks," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 181176–181191, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3028550.

[35] "OMNeT++ Discrete Event Simulator." Accessed: Jul. 29, 2023. [Online]. Available: https://omnetpp.org/