

## خوارزمية مُعمّمة لتنسيق التداخل بطريقة عنقدة خلايا فمتوية فائقة الكثافة في الشبكات غير المتجانسة في نظام التطور طويل الأجل المتقدم باعتماد آلية التحكم في الاستطاعة

طارق الأشهب<sup>1</sup>، د. فريز عبود<sup>2</sup>، د. عبد الكريم السالم<sup>3</sup>

<sup>1</sup>طالب دراسات عليا (دكتوراه) - قسم هندسة الإلكترونيات والاتصالات - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق

<sup>2</sup>أستاذ - قسم هندسة الإلكترونيات والاتصالات - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق

<sup>3</sup>أستاذ - قسم هندسة الإلكترونيات والاتصالات - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة البعث

### الملخص:

نقدم في بداية هذا البحث مراجعة لاستراتيجيات تنسيق التداخل في الأدبيات للشبكات غير المتجانسة HetNet في نظام التطور طويل الأجل المتقدم LTE-A. بعد ذلك، نقتراح مخططاً لتنسيق التداخل مبني على آلية التحكم باستطاعة الإرسال لمجموعة معينة من الخلايا الفمتوية femtocells في الشبكة باعتماد مبدأ إعادة استعمال التردد الكسري المرن Soft Fractional Frequency Reuse (SFFR) في تخصيص الموارد الراديوية. وعلى التوازي نعرّف مفهوم عنقود التداخل Interference Cluster الذي يكون له مواصفات معينة، وتكون الخلية الفمتوية المراد التحكم باستطاعتها متواجدة في مركز العنقود لتحقيق هدف رئيسي وهو الوصول إلى الحد الأدنى من مستوى تداخل إشارات الخلايا الفمتوية في حالة الإرسال على الوصلة الهابطة؛ وبالتالي تخفيض مستوى التداخل في الشبكة. ويقضي ذلك رفع نسبة استطاعة الإشارة المفيدة إلى استطاعة الضجيج والتداخل Signal to Noise plus Interference Ratio (SINR)، وبالتالي تحسين كل من إنتاجية الشبكة وسعتها. وأخيراً قمنا بمقارنة أداء الخوارزمية المقترحة مع المخططات التقليدية والخوارزميات المستخدمة في الأدبيات، واستخلصنا نتائج المحاكاة باستخدام منصة ماتلاب MATLAB Platform.

**الكلمات المفتاحية:** الشبكات غير المتجانسة، إعادة استعمال التردد الكسري، تخصيص الموارد، تنسيق التداخل، الخلايا الفمتوية.

تاريخ الإيداع: 2022/7/18

تاريخ القبول: 2022/10/16



حقوق النشر: جامعة دمشق - سورية،  
يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب  
الترخيص CC BY-NC-SA 04

# Generalized Clustering Interference Coordination Algorithm in Ultra-Dense Femto cells in LTE Advanced Heterogeneous Networks Based on Power Control

Tarek AL Achhab<sup>1</sup>, Dr. Fariz Abboud<sup>2</sup>,  
Dr. Abdulkarim Assalem<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Graduate student (Ph.D.) – Department of Electronics and Communication Engineering – Faculty of Mechanical and Electrical Engineering – Damascus University.

<sup>2</sup>Professor - Department of Electronics and Communication Engineering – Faculty of Mechanical and Electrical Engineering – Damascus University.

<sup>3</sup>Professor - Department of Electronics and Communication Engineering – Faculty of Mechanical and Electrical Engineering – AL Baath University.

Received: 18/7/2022

Accepted: 16/10/2022



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

## Abstract:

In this paper, we review the interference coordination strategies in the literature for the LTE-A HetNet system. Next, we propose an interference coordination scheme based on the mechanism of controlling the transmission power of a particular group of femtocells in the network by adopting the principle of Soft Fractional Frequency Reuse (SFFR) in the allocation of radio resources. In parallel, we define the concept of an Interference Cluster (IC) that has specific characteristics, where the femtocell whose power is intended to be controlled is located in the center of the Interference Cluster (IC) to achieve a main goal that is to reach the minimum level of interference of femtocells signals in the case of transmission over the downlink; thus, reducing the level of interference in the network. This implies raising the ratio of the power of the useful signal to the sum of the noise and interference ratio (SINR), and thus improving both network throughput and capacity. We compare the performance of the proposed algorithm with the traditional schemes and algorithms in the literature, and derive the simulation results using the MATLAB Platform.

**Keywords:** Heterogeneous Network, Fractional Frequency Reuse, Resource Allocation, interference Mitigation, Femtocells.

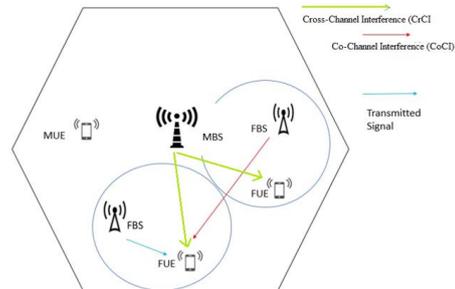
## 1. المقدمة:

أصبح التقدّم التكنولوجي في نظم الاتصالات الخلوية متسارعاً مع انتشار الهواتف الذكية وتطبيقاتها المتنوعة في مجال واسع من الخدمات التي تُعني حياة الفرد في مجتمع اليوم. وعلى التوازي، ازداد معذل الطلب على الاتصال والنفوذ إلى الشبكة العنكبوتية من خلال شبكات الاتصال الخلوي الحالية حتى باتت تعمل قرب حدود تشغيلها القصوى من حيث موارد الاتصال المتاحة وجودة الخدمة، وذلك نتيجة زيادة الطلب على معدلات نقل بيانات عالية والتي تتنوع تطبيقاتها في مجالات عدة كالخدمات السحابية وإنترنت الأشياء. ووفقاً لتوقعات شركة سيسكو Cisco [1]، وبحلول عام 2022، باتت تشكّل الحركة traffic من الأجهزة اللاسلكية والأجهزة النقالة معظم حركة العبور في شبكة الإنترنت العالمية. وبالفعل كما توقّعت الدراسات، توسعت حركة العبور في شبكات الهاتف النقال في السنوات الخمس الأخيرة، نتيجة للمشاركة والاستهلاك المكثف للبيانات، وخاصة بيانات الصور والفيديو. وتتنبأ الدراسات الحديثة كما في [2] أنه على مدى السنوات السبع المقبلة، سيبدأ 1.4 مليار شخص في استخدام الإنترنت بشكل حصري عبر الهاتف النقال، وحتى عام 2025 سيستخدم أكثر من 60% من سكان العالم الإنترنت عبر شبكات الاتصال الخلوية. بالإضافة إلى ذلك، هناك تغيير مستمر في عادات ومحتوى التصفّح، فمثلاً هناك المزيد من الأشخاص الذين يستهلكون المحتوى المرتبط بالفيديو أكثر، ولفترات طويلة ومتكررة عبر أجهزة الاتصال النقالة مثل الهواتف الذكية، وبالتالي فإنّ استخدام بيانات الجوال لكل مستخدم سيكون أكبر بخمس مرات بحلول عام 2024. كنتيجة لذلك، أصبح من الضروري واللازم بالنسبة لمشغلي شبكات الخلوي التفكير الجدي في تحسين إنتاجيتها وسعة النظام. لقد أدى هذا التوجه الجديد في السنوات الأخيرة إلى تطوير نظام التطور طويل الأجل المتقدم LTE-A وشبكات الجيل الخامس

5G والذين يعدّان من المرشحين الواعدين لتحقيق إنتاجية عالية وفعالية طيفية معززة [3]. تستند هذه النظم المتقدمة إلى تقنية النفاذ المتعدّد باقتسام التردد المتعامد Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) [4]. مع تقنية OFDMA شائعة الاستخدام في الوقت الحالي، لا يُعدّ التداخل داخل الخلية الواحدة مشكلة بسبب تعامد إشارات المستخدمين المُخدّمين من نفس الخلية، ومع ذلك، فإنّ تداخل الخلايا البيني (ICI) Inter-Cell Interference (بين الخلايا التي تعمل على نفس المجال الترددي المتاح) هو المصدر الأساسي للتداخل وأحد العوامل المحددة البارزة في تدهور الأداء في هذه النظم [5,6]، وخاصة بزيادة كثافة نشر الخلايا الصغيرة ضمن الشبكات المتجانسة لنظام التطور طويل الأجل LTE السابق لتعزيز معدل الخدمة لتلبية الطلب المتزايد على الاتصال، مما يستدعي الانتقال إلى الشبكات غير المتجانسة للتطور طويل الأجل المتقدم LTE-A Heterogeneous Networks (HetNet) حيث لا يُعدّ استخدام نفس النمط من الخلايا مجدياً لتحقيق هذه المتطلبات، حيث تصبح الشبكة غير المتجانسة مؤلفة من عدة أنماط من خلايا الخدمة المتباينة في استطاعة إرسالها، فتصبح مؤلفة من خلايا صغيرة من نمط خلية فمتوية femtocell والتي ترسل باستطاعة إرسال منخفضة نسبياً من رتبة 15-25 dBm، ومن الخلايا الكبيرة من نمط خلية ماكروية macrocell التي ترسل باستطاعة إرسال مرتفعة نسبياً من رتبة 35-45 dBm. وهذا يعني أنّ الشبكة غير المتجانسة تؤلف بنية شبكية متعددة الطبقات تكون فيها المحطات القاعدية ذات قيم استطاعة إرسال متباينة. ورغم أنّ تقنيات تنسيق التداخل (IC) Interference Coordination مثل تقنيات إعادة استخدام التردد [7] قد تقلّل من أثر تداخل القنوات التصالي (CrCI) Cross-Channel Interference والذي يحصل بين إشارات المحطة القاعدية للخلية الفمتوية

المحطات القاعدية من نوع العقدة بي المطورة المنزلية Home (HeNB) eNode ولكن استخدام الخلايا الفمتوية يقتضي مواجهة مسألة تنسيق تداخل الخلايا البيني Inter-cell LTE-A Interference Coordination (ICIC) في النظام HetNet وخاصة في حالة محطات قاعدية لخلايا فمتوية فائقة الكثافة UDF في المنطقة الجغرافية للشبكة، نظراً لأن طريقة نشر أو تخطيط هذه الخلايا تكون ملقاة على عاتق المستخدم، وبالتالي فتوزعها في منطقة الشبكة يكون في غالب الأمر عشوائياً وغير متحكم به من قبل المُشغّل، ولهذا فإن مسألة تنسيق تداخل الخلايا البيني ICIC المقابلة قد اعتبرت من أهم القضايا البحثية في هذا السياق. عموماً، يُنظر إلى تداخل الخلايا البيني ICI كمشكلة رئيسية في النظم الخلوية وخاصة عند إعادة تركيب (تخطيط) نفس النمط من الخلايا وبتوزع كثيف، وهذا يوافق إعادة الاستخدام الكثيف للموارد الراديوية ذات المجالات الترددية المتطابقة، مما يجعل المستخدم معرضاً لتداخل الإشارة المفيدة المستقبلية من إحداها (الخلية المُخدّمة) مع إشارات تُستقبل أيضاً من باقي الخلايا المماثلة لها في المورد الراديوي. تتداخل إشارة الخلية المماثلة هنا مع الإشارة المفيدة سواء أكانت منتشرة وفق خط نظر مباشر أو لا، وسواء أكانت الخلية الفمتوية المسببة للتداخل قريبة أو بعيدة عن الخلية الفمتوية المُخدّمة، ويُعزى ذلك إلى ظاهرة الخفوت Fading سواء بنمطه الناتج عن خفوت تعدد المسارات الظل Shadow Fading أو الناتج عن خفوت تعدد المسارات Multipath Fading. من الناحية الإحصائية، يمكن أن تكون الخلية المسببة للتداخل بعيدة عن الخلية المُخدّمة ومع ذلك من الممكن أن تسلك إشارتها عدّة مسارات لتصل إلى مستقبل المستخدم مضخّمة ومعاكسة بالطور وذات شدة تُقارب شدة الإشارة التي يستقبلها من خليته المُخدّمة، مما يؤدي إلى تداخل راديوي هدام Destructive Radio Interference بين الإشارتين المفيدة والمتداخلة، وبالتالي إلى تخفيض قيمة نسبة

Femto Base Station (FBS) وبين إشارات المحطة القاعدية للخلية الماكروية Macro Base Station (MBS) نظراً لكون هذه المحطات تستخدم مجالات ترددية متباينة وترسل بقيم استطاعة متفاوتة وخاصة إذا ما استُخدمت تقنية إعادة الاستخدام الترددي الكسري المرن Soft Fractional Frequency Reuse (SFFR)، إلا أنّ هذه التقنية لا تحل مشكلة تداخل القنوات البيني من النمط Co-Channel Interference (CoCI) والذي يحصل بين إشارات محطات قاعدية من نفس النمط أي فمتوية لفمتوية (Femto-to-Femto)، فهو الأشدّ تأثيراً على الأداء وخاصة في حالة تداخل إشارة طرفية مستخدم خلية فمتوية Femto User Equipment (FUE) مع إشارات محطات قاعدية لخلايا فمتوية فائقة الكثافة Ultra-Dense FBSs (UDF) مجاورة في منطقة تغطية واسعة جغرافياً لخلية ماكروية مركزية [8] كما يوضح الشكل (1).



الشكل (1) تداخل القنوات البيني وتداخل القنوات التصالبي في شبكة غير متجانسة HetNet (المصدر: الباحث)

يصب التوجّه الحالي فيما يتعلق بنظام LTE-A HetNet في تكثيف نشر الخلايا الفمتوية في منطقة الشبكة نظراً لسهولة تركيبها من قبل المستخدم نفسه، وانخفاض تكاليفها وكونها تتوافق مع كون معظم المستخدمين هذه الأيام يطلبون الاتصال بالشبكة وهم في بيوتهم أو مكاتبهم أو في صالات رياضية أو تجارية، فالخلايا الفمتوية مناسبة مع هذه الحالة وتعتبر حلاً ناجحاً لزيادة سعة الشبكة وتلبية الطلب المتزايد على الاتصال، ولهذا يُطلق على الخلايا الفمتوية مسمى

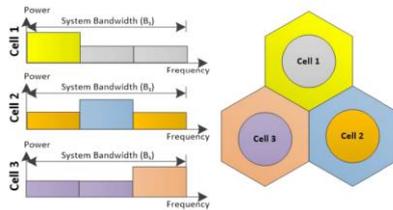
تنسيق التداخل جاذبية كبيرة من كل من الشركات المشغلة والأوساط الأكاديمية، فنشرت أبحاث عديدة تهدف إلى مواجهة قضية تداخل الخلايا البيئي ICI. لتخفيف التداخل في الشبكة غير المتجانسة، يجب أن يفرض تنسيق التداخل قيوداً على آلية تخصيص الموارد الراديوية من خلال التنسيق بين الخلايا المتجاورة عبر توصيلها بواجهات X2، وأن تتفق فيما بينها على نوعية الإرسال الكهرومغناطيسي من حيث عدة موارد أساسية مجتمعة أو منفصلة، هي المجال الترددي المتاح واستطاعة الإرسال والمدة الزمنية للإرسال والوجهة المكانية للإرسال. يمكن تحقيق تنسيق التداخل عبر وضع شروط على استطاعة الإرسال من خلال التحكم في مستوى الاستطاعة المرسل [10,11,12,13,14] وطريقة تشكيل حزمة الهوائي واتجاهيته [15]. يركز مخطط التنسيق الذي نعمل عليه في هذا البحث على تحقيق تخفيف مناسب للتداخل من خلال السيطرة على موردين رئيسيين بحيث نحصل على إدارة مناسبة للطيف الراديوي ونحقق توزيعاً مناسباً لاستطاعة الإرسال فيما بين الخلايا في الشبكة. وتتبع المنهجية ذاتها المتبعة في الأدبيات [10,11,12] مع التنويه إلى أن هذه الأعمال لم تركز على نوعية الإدارة المناسبة للطيف الراديوي وما يقابلها من حيث طريقة تخصيص الموارد الراديوية، غير أن النموذج المستخدم في هذه الأدبيات ومنهجيتها عند النظر إلى التوزيع المناسب لاستطاعة الإرسال تبدو لنا جذابة لبساطتها وواعدة لأنها تجنب المشغل تعقيدات حسابية وتجهيزات مكلفة لتحسين الأداء.

لقد بيّنا في مقالتنا السابقة [16] أن إدارة الموارد الراديوية بتطبيق تقنية إعادة استخدام التردد هي حل ناجح فيما يتعلق بتخصيص مورد المجال الترددي في النظم الخلوية، كما أنها تؤمن حلاً شبه مثالي لمشكلة تداخل القنوات التصالي CrCI بين الخلايا الماكروية والخلايا الصغيرة (الخلايا الفمتوية) في الشبكة غير المتجانسة LTE-A HetNet. وقد قدمنا في تلك

الإشارة إلى التداخل والضجيج SINR وزيادة معدل خطأ البت Bit Error Rate (BER) وصعوبة في استخلاص المعلومة من الإشارة الكليّة المستقبلية، وهو ما يجعل معدّل نقل البيانات أصغر من قيمته الإسميّة الأصليّة. لذلك، لاقت أبحاث مخططات التخفيف mitigation schemes من آثار التداخل البيئي اهتماماً كبيراً عند تطبيق تقنيّات الخلايا الفمتوية وتخطيطها ودمجها مع الخلايا الماكروية في شبكة اتصال واحدة غير متجانسة، وذلك لتحقيق إعادة استخدام الطيف الكثيف بشكل يقلل من آثار التداخل البيئي في معايير الجيل الرابع مثل نظام التطور طويل الأجل المتقدم LTE-A من النظم الخلوية. في هذا السياق، يمكن تصنيف مخططات التخفيف من التداخل البيئي في ثلاث مجموعات رئيسية، وهي تنسيق التداخل Interference Coordination، وإلغاء التداخل Interference Cancellation، وتَعْشئة التداخل Interference Randomization [9]. يتمحور بحثنا هذا حول مفهوم تنسيق التداخل، وبشكل أكثر تحديداً حول خوارزميات تنسيق التداخل لمحطات قاعدية لخلية فمتوية اعتماداً على التحكم بالاستطاعة Interference Coordination of FBS based on Power Control، وذلك لكون التداخل البيئي بين المحطات القاعدية للخلايا الماكروية يمكن حلّه بشكل مباشر بوساطة تقنية إعادة الاستخدام الترددي الكسري المرن SFFR وفيها تستخدم الخلايا الماكروية المنتمية إلى نفس العنقود مجالات ترددية متباينة، وبالتالي يكون تنسيق التداخل البيئي للشبكة الفمتوية حاجة ملحة لا تعالجها تقنيات إعادة الاستخدام الترددي الكسري FFR.

يمكن أن يُفهم تنسيق التداخل على أنه تقنية لتجنب التداخل بتخفيضه قدر الإمكان بين الإشارة المستقبلية من الخلية المخدّمة وبين مجموع إشارات مستقبلية من خلايا مماثلة في نفس المجال الترددي وتقع في نفس المنطقة الجغرافية الخلية المخدّمة. في السنوات الأخيرة، اكتسبت مخططات

المقالة تطويراً لهذه التقنية وأظهرنا أن إعادة الاستخدام الترددي الكسري المرن SFFR هو الأفضل مقارنة مع طرائق إعادة استخدام التردد الأخرى. في هذا السياق، ودمج هذه التقنية مع تقنية التحكم في الاستطاعة بهدف تطوير مخطط تنسيق التداخل ليشمل حلاً إضافياً لمشكلة تداخل القنوات البيني CoCI يقدم بحثنا هذا مساهمة واعدة. يُوضح الشكل (2) آلية SFFR، وفيه نلاحظ أنها تتطلب تقسيم منطقة تغطية الخلية إلى مناطق مركز الخلية (CC) Center Cell (CC) الماكروية ومناطق حافة الخلية (EC) Edge Cell (EC) الماكروية، بحيث تكون استطاعة إرسال الخلية الماكروية باتجاه منطقة الحافة أكبر من تلك الموجهة إلى منطقة المركز، وبحيث يخصص كامل عرض المجال الترددي لكل خلية من خلايا الشبكة، ففي منطقة المركز CC تختلف المجالات الترددية المستخدمة بين الخلايا الماكروية والفمتوية، وكذلك في منطقة الحافة EC، فإذا كان عرض المجال الترددي المتاح هو  $B$ ، فيجري عندئذٍ تقسيمه إلى ثلاثة أقسام متساوية ذات محتوى طيفي ترددي مختلف: أي يكون لدينا  $B_1 = B_2 = B_3$  و  $B = B_1 + B_2 + B_3$  بحيث لا تتداخل المجالات الترددية المستخدمة بين المحطات FBS و MBS المتواجدة في نفس منطقة التغطية، فلا تتداخل إشارات الخلايا الفمتوية المتواجدة في المنطقتين المختلفتين CC و EC، ولا تتداخل إشارات محطات MBSs موجود في نفس العنقود. وفق مخطط التخصيص SFFR، يُعطى مستخدمو الخلية الماكروية (MUEs) Macro UEs في كل منطقة حافة EC من منطقة تغطية الخلية الماكروية من أصل الخلايا الماكروية الثلاثة في عنقود الشبكة غير المتجانسة الثلاثي، والمبين في الشكل (2)، عرض مجال ترددي يساوي  $\frac{1}{3}B$  مختلف فيما بين الخلايا الماكروية الثلاث المشكّلة لعنقود الشبكة، وأما ما تبقى من عرض المجال الكلي (أي  $\frac{2}{3}B$ ) فيعطى إلى مستخدمي الخلية الماكروية MUEs المتواجدين في منطقة المركز CC، ويكون مختلفاً عمّا



الشكل (2) رسماً تخطيطياً لتقنية إعادة الاستخدام الترددي الكسري المرن SFFR

HetNet، تدرس الأدبيات مخطط تخصيص الموارد الذي يجمع بين تخصيص الحامل الفرعي Subcarrier في قناة النفاذ المتعدد المتعامد باقتسام التردد OFDMA واستراتيجيات التحكم في الاستطاعة كما في [18]. يقلل هذا التوجه من استطاعة الإرسال لكل مستخدم على كل حامل فرعي مخصص له، ويقلل بشكل فعال من تداخل مستخدمي الخلية الفمتوية FUEs مع إشارات المحطات القاعدية المجاورة للخلية الفمتوية FBS المخدمية، كما يحقق غرضاً مفيداً ألا وهو توفير فقدان الاستطاعة المستخدمة في تغذية تجهيزات المحطة القاعدية بالنظر إلى الاستطاعة المستهلكة ككل في الشبكة غير المتجانسة. مع التأثير الملحوظ والنمو السريع لشبكات LTE-A، ارتفع معدّل تركيب المحطات القاعدية للخلايا منخفضة استطاعة الإرسال مثل محطات FBS لا سيما في المناطق ذات الكثافة السكانية العالية. وكما رأينا في فقرة المقدمة تخضع هذه المحطات القاعدية لزيادة حمل overloaded من قبل المستخدمين، وهذا هو السبب الرئيسي في بناء الشبكات غير المتجانسة. وبينما أيضاً أنّ تداخل الخلايا البيني مرتفع في هذا النوع من الشبكات. هناك العديد من الحلول للتخفيف من هذا التداخل مثل تنسيق تداخل الخلايا البيني وذلك على مستوى الحامل الفرعي للإشارة المعدلة حيث تُستخدم إطارات فرعية شبه فارغة (لا تتضمن أي معلومة (لا تحمل بتات)) وهو ما يُطلق عليه تقنية الإطار الفرعي شبه الفارغ (Almost Blank Subframe (ABS)، بحيث يجري إعطاء الأولوية للمستخدمين الأكثر عرضةً للتداخل فيجري إرسال رموز الإشارة (الإطارات) بقيم استطاعة متفاوتة بحسب موضع المستخدم بالنسبة للخلية الفمتوية. وفي العمل [19]، اقترح الباحثون تقنية ABS منخفضة الاستطاعة المستهلكة بشكل تكيفي للتقليل من نسبة التداخل وفق مؤشر (SINR) من أجل الحصول على إنتاجية أفضل وتخفيف تداخل الخلايا البيني. فعندما يكون المستخدم بعيداً عن الخلية،

الجدول (1) تخصيص SFRR في الشبكة غير المتجانسة حيث يختلف المحتوى الطيفي المقابل لكل عرض مجال متاح  $B_i$  ( $1 \leq i \leq 3$ ).  
(المصدر: الباحث)

نمط المستخدم UE	عرض المجال الترددي المُخصَّص		
	Cell 1	Cell 2	Cell 3
MUE في منطقة المركز CC	$B_2 \cup B_3$	$B_1 \cup B_3$	$B_1 \cup B_2$
MUE في منطقة الحافة EC	$B_1$	$B_2$	$B_3$
FUE في منطقة المركز CC	$B_1$	$B_2$	$B_3$
FUE في منطقة المركز EC	$B_2 \cup B_3$	$B_1 \cup B_3$	$B_1 \cup B_2$

تتضمن باقي أقسام هذه المقالة ما يلي. في الفقرة 2، نستعرض الأعمال ذات الصلة والتي ركزت على منهجية التحكم بالاستطاعة لتنسيق التداخل، مع إظهار نقاط الضعف والقوة في كل منها. في الفقرة 3، نستعرض نماذج مقترحة في دراسات سابقة، ونبني استناداً إليها نموذجاً مطوراً. في الفقرة 4، نستعرض الخوارزمية المقترحة، وفي الفقرة 5، نُبيّن مؤشرات الأداء المستخدمة في تقييم أداء هذه الخوارزمية. في الفقرة 6، نوضح نموذج النظام الخلوي المدروس وبُنية الشبكة غير المتجانسة المدروسة بالإضافة إلى اعتبارات التشغيل. في الفقرة 7، نستعرض نتائج المحاكاة وناقشها ونقارن أداء الخوارزمية المقترحة مع أعمال سابقة ومع النموذج التقليدي للتشغيل. في الفقرة 8، نقدم الاستنتاجات والتوصيات المناسبة مع الآفاق المستقبلية.

## 2. الدراسات المرجعية:

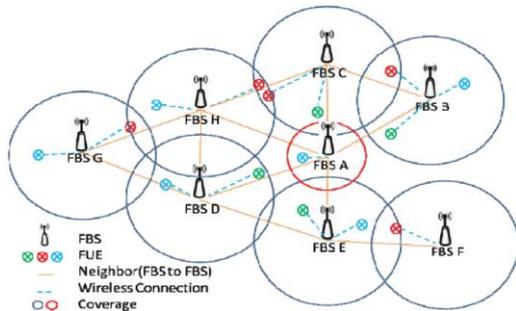
بيّن العمل المنشور مؤخراً في [17] أشهر المقاربات المدروسة في مجال إدارة التداخل في الشبكات التي تتضمن الخلايا الفمتوية، وأظهر مقارنة التحكم باستطاعة الإرسال كإحدى أهم التوجهات الرئيسية في حل مسألة تنسيق تداخل الخلايا البيني ICIC، حيث يمكن التحكم في الاستطاعة إما بطريقة مركزية بواسطة نظام إدارة الخلايا الفمتوية Femtocell Management System (FMS)، أو لا مركزية بواسطة المحطة القاعدية للخلية الفمتوية FBS نفسها. في سيناريو الشبكة غير المتجانسة متعددة الطبقات مثل LTE-A

HetNets LTE-A، التي تفترض أن المجالات الترددية مشتركة بين الخليتين الماكروية والفمتوية، وهو سيناريو تقليدي غير شائع في حالة الشبكة كثيفة الخلايا الفمتوية حيث لا بدّ من استخدام تقنيات إعادة استخدام التردد مثل SFFR التي تعدّ الحل الأمثل والبديل عن [13] وبمجرد تطبيقها فإنها تلغي التداخل من النمط CrCI، سواء تواجدت المحطة FBS في منطقة الحافة أو منطقة المركز من منطقة تغطية المحطة MBS. كاستجابة لهذا الأمر، فإننا اعتمدنا استخدام التقنية SFFR في نموذج الشبكة غير المتجانسة المدروس في عملنا هذا ليكون حلاً للتداخل من النمط CrCI بين إشارات محطات MBSs و FBSs المتواجدة في نفس منطقة خلية واحدة من الخلايا الماكروية للعنقود الثلاثي، وحلاً للتداخل من النمط CoCI بين إشارات محطات MBSs المتواجدة في خليتين ماركويتين متجاورتين في العنقود الثلاثي، وفي المقابل نركز على حل مشكلة التداخل من النمط CoCI الحاصل بين إشارات محطات FBSs المتواجدة في نفس منطقة الشبكة سواء منطقة المركز CC أو منطقة الحافة EC، وهو التداخل الذي يقتضي تدهوراً في الأداء في حال استخدام عدد كبير من الخلايا الفمتوية فائقة الكثافة UDF سواء في منطقة الحافة أو منطقة المركز لتغطية المحطة MBS في الشبكة غير المتجانسة. نهتم بمشكلة التداخل هذه نظراً إلى أنّ تلبية متطلبات معدلات نقل البيانات العالي ومعدل الطلب على الاتصال بالشبكة يتحقق بشكل مباشر من خلال استخدام عدد كبير من المحطات FBS منتشرة بشكل عشوائي في الغالب حول محطات MBSs، ولذا وجبّ تنسيق التداخل الناتج عنها. قدم الباحثون في [10] فكرة جذابة مثيرة للاهتمام في بساطتها، تتمحور هذه الفكرة بالتركيز على مسألة تنسيق التداخل من خلال النظر إلى الخلايا المسببة له بالحد الأقصى وفق معيار عدد خلايا الجوار لكل خلية فمتوية في الشبكة، فإذا كان هناك عدد من خلايا الجوار أكبر من حدّ معين وجبّ

يُعد كستخدم حافة وسيحصل على أولوية أعلى لتقديمه على غيره في الخدمة. لقد أظهرت نتائج هذا العمل تحسناً في إنتاجية جميع المستخدمين في الخلايا الماكروية والخلية الفمتوية، ولكن المشكلة الرئيسية في تقنية ABS تكمن في التعقيد الزمني وأنّ الدقة المطلوبة لها هامش خطأ كبير نسبياً يُراعى تخفيضه في الأعمال ذات الصلة، ويمكن أن تكون الكفاءة الطيفية لها منخفضة نظراً لعدم استخدام جزء كبير من عرض المجال الترددي بسبب الإطارات الفرعية التي لا تحمل أي معلومات للمستخدم. بكل الأحوال، يستند مبدأ التقنية ABS على مفهوم تخفيض الاستطاعة المرسل الذي يهتم به بحثنا هذا، ولو كان على مستوى استطاعة الإطار الفرعي المرسل فقط بشكل متسلسل باتجاه المستخدم، وليس على مستوى الاستطاعة الكلية المرسل من قبل الخلية الصغيرة (الفمتوية) كما نركز في عملنا الحالي.

اقترح الباحثون في [13] تقنية التحكم النشط في الاستطاعة (APC) Active Power Control، والتي تقلّل مستوى التداخل بين الخلايا الماكروية والفمتوية من النمط CrCI بالنسبة إلى مستخدم تخدمه الخلية الماكروية MUE، والناتج عن الإشارة غير المفيدة للوصلة الهابطة من الخلايا الفمتوية المجاورة لها، حيث تعدّ المحطات FBS و MBS عاملة على نفس المجال الترددي (لم تؤخذ تقنية إعادة الاستخدام الترددي بالحسبان في نموذج الشبكة المدروس في [13]). تمكّن الباحثون في هذا العمل من تقليل استهلاك الاستطاعة غير الضروري، وأظهرت نتائج المحاكاة لديهم أنّ تقنية APC المقترحة تقلّل بشكل فعّال التداخل من النمط CrCI وتُحسّن أداء الإنتاجية للمستخدمين MUEs، وتوفر تقنية APC مقايضة Trade-off متوازنة في تحقيق جودة الخدمة اللازمة (QoS) للمستخدمين FUEs وتقليل تداخل الحوامل البيئي ICI الناتج عن جهاز الاستقبال للمستخدم MUE المتواجد على مقربة من المحطات FBS المجاورة. يُعدّ الحل APC ناجحاً فقط في سياق شبكات

هذه للتحكم في استطاعة الإرسال. بالإضافة إلى ذلك، وبمجرد أن تتحكم العديد من المحطات FBSS في استطاعة الإرسال، فقد يتسبب ذلك في أن يصبح جزء من تجهيزات مستخدمي الخلية الفمتوية FUE المتواجدين في منطقة الحافة لمكان تغطية الخلية الفمتوية مستخدمين منعزلين ينقطع اتصالهم مع خليتهم المخدمة، مما يقلل من إنتاجية الشبكة.



الشكل (3) فكرة التحكم باستطاعة المحطة القاعدية للخلية للفمتوية FBS بناءً على معلومة عدد خلايا جوار الخلية الفمتوية المحيطة بها [10].

### 3. مواصفات عنقود التداخل Interference

#### Cluster Specification

استُخدم مفهوم الخلايا المجاورة Neighbor Cells لاختيار الخلية الفمتوية الواجب تخفيض استطاعة إرسالها لغرض التحكم في الاستطاعة لأول مرة في [20]. عندما تكون الخلية الفمتوية مجاورةً لعدد كبير نسبياً من الخلايا الفمتوية المحيطة بها وعلى مسافات متباينة عنها، فمن المحتمل أن تتداخل إشارة المستخدم المرتبط بها مع الإشارات التي ترسلها الخلايا المجاورة، ويتجلى مفهوم التحكم بالاستطاعة هنا من خلال تقليل استطاعة الإرسال للخلية الفمتوية المجاورة لذلك العدد الكبير من الخلايا الفمتوية الأخرى المتوضعة حولها، وبذلك يمكن تخفيف التداخل إلى حدٍ كبير. لقد اتبع الباحثون في كل من [11] و [12]، المنهجية نفسها في تعيين الخلية الفمتوية الواجب تخفيض استطاعتها، فسماها الباحثون في [11] بالعقدة المُشكلة (TN) Trouble Node، وأمّا الباحثون في [12] فأسموها بالعقدة مصدر التداخل Interference Source Node (ISN)، فعندما يتجاوز عدد خلايا الجوار لخلية فمتوية

عندئذٍ التحكم باستطاعة الخلية الفمتوية التي تتوسط هذه الخلايا، وإلا تبقى قيمة استطاعة الإرسال على ما هي عليه، كما يُبين الشكل (3)، ومن ثم قاموا بتطوير خوارزمية مستتدة إلى هذه الفكرة وقابلة للتطبيق في نظام LTE-A HetNets في ورقتهم البحثية [11]، وأطلقوا عليها اسم FBS-Trouble Aware Power Backoff (TAPB). تقترح هذه الخوارزمية حلاً لمشكلة التداخل من النمط CoCI الذي يؤثر على مستخدمي الخلايا الفمتوية FUEs المتواجدين في منطقة تغطية خلية ماكروية تستخدم مجالات ترددية مختلفة المحتوى الترددي عن المجالات الترددية المتاحة للخلايا الفمتوية، أي أنّ تقنية إعادة استخدام التردد مطبقة في نموذج الشبكة التي جرت محاكاتها في هذا العمل، ولكن بأبسط صورها؛ حيث افترضت تقنية إعادة الاستخدام الكسري التقليدية والتي تُعدّ النسخة الأولى من التقنية SFRR. تتمحور فكرة العمل في [11] حول تنسيق التداخل الحاصل بحيث يجري تخفيضه إلى حد مناسب وذلك بالتركيز على عدد الخلايا المحيطة بكل خلية فمتوية وعدّ هذا العدد مؤشراً على مستوى التداخل الحاصل في الشبكة غير المتجانسة، فإذا تجاوز عتبة معينة، يؤخذ عندئذٍ قرارٌ بتخفيض استطاعة الخلية الفمتوية المقابلة، وهكذا يجري مسح جميع الخلايا الفمتوية بالشبكة، وبالمحصلة يقل استهلاك الاستطاعة في كامل النظام، وفي نفس الوقت يجري تخفيض مستوى تداخل القنوات البيني CoCI ضمن الخلايا الفمتوية. ومع ذلك، فإن الأخذ بالحسبان عدد المحطات القاعدية للخلايا الفمتوية FBSS المجاورة فقط غير كافٍ لتحديد أي من تلك المحطات تحتاج فعلاً إلى اتخاذ قرار التحكم في الاستطاعة، فإذا كانت جميع المحطات الفمتوية FBSS المجاورة موجودة في منطقة الحافة EC، فإن تداخل المحطة القاعدية الفمتوية FBS المركزية مع المحطة القاعدية الصغيرة المجاورة يكون صغيراً نسبياً؛ ولا يؤثر على طرفية مستخدم خلية فمتوية FUE، فلا تحتاج المحطة FBSS المقابلة

حداً معيناً، يكون لزاماً عندئذٍ تخفيض استطاعة الخلية الفمتوية المقابلة. إذن، في كل من [11] و [12] يُستخدم عدد خلايا الجوار لكل خلية فمتوية كمؤشر على تلك الخلايا الفمتوية في الشبكة التي تحتاج لتنفيذ تقنية التحكم في الاستطاعة عندها. نستعرض فيما يلي طريقة تحديد جوار الخلية الفمتوية، وحساب عددهم في الأدبيات [11,12]، والشرط الواجب تحقيقه لتخفيض استطاعة الخلية الفمتوية المركزية.

تجري إدارة خلايا الفمتوية الكلية في الشبكة غير المتجانسة من خلال وحدة نظام إدارة الخلية الفمتوية FMS التي تقوم بجمع المعلومات من المحطات القاعدية لتلك الخلايا. وفق [11] تُرسل الوحدة FMS أمر تخفيض الاستطاعة بعد مرحلة جمع المعلومات من المحطة القاعدية لخلية فمتوية. ومن أجل بناء جدول جوار Neighbor Table لكل محطة قاعدية لخلية فمتوية FBS، تقوم كل محطة قاعدية FBS بمضاعفة استطاعة إرسالها الأصلية  $P_{OF} dBm$  وإرسال رسالة "Hello" إلى الخلايا الفمتوية المجاورة، وكل خلية فمتوية مجاورة لها تستطيع استقبال الرسالة (إن كانت ضمن التغطية الناتجة عن مضاعفة استطاعة الإرسال)، تقوم بإعادة إرسال نفس الرسالة إلى الخلية المركزية ضمن منطقة التغطية كدليل على كونها إحدى خلايا الجوار المساهمة في إحداث تداخل فعلي عليها. بالنتيجة، تقوم الخلية المركزية بجدولة الخلايا الفمتوية التي تمكنت من التراسل معها، ليمثل الجدول الناتج مجموعة خلايا الجوار. فإذا كان لدينا  $M$  خلية فمتوية في منطقة ما من الشبكة، يُشار بالرمز  $B_i$  إلى عدد خلايا الجوار المحيطة بخلية فمتوية مركزية  $FBS_i$ ، حيث  $1 \leq i \leq M$ . من ثمّ تقوم كل محطة قاعدية FBS بإرسال معلومات جدولها إلى وحدة FMS وبناءً على معلومات مواقع الخلايا الفمتوية في الشبكة والمعيان المقترح في [11] يجري إرسال أمر تخفيض الاستطاعة للخلية المركزية واعتبارها من

النمط خلية مشكلة TN. وأما وفق [12] فإنّ قرار تخفيض الاستطاعة (التحكم بالاستطاعة) يجري ضمن كل خلية فمتوية على حدة في الشبكة، من دون المساندة من وحدة الإدارة FMS، حيث بالمثل تقوم كل خلية فمتوية بمضاعفة استطاعة إرسالها في المرحلة الأولى للتحكم بالاستطاعة لاكتشاف خلايا الجوار لها، ولكن لتحديد مسافة كل منها عنها تقوم باستخدام علاقة التأخير الزمني في إرسال واستقبال إشارة الرسالة "Hello" إلى ومن كل خلية فمتوية مجاورة وصلتها الرسالة، فإذا تجاوز عدد خلايا الجوار حداً معيناً (هو نفسه قيمة العتبة المعتبرة في [10,11]) تقرر المحطة القاعدية للخلية المركزية تخفيض استطاعتها أو لا.

يتجلى المعيار الرئيس المقترح في [11] لاتخاذ قرار تخفيض الاستطاعة في حساب المقدار  $TN_{low bound}(lb)$  الذي يُعد هو العتبة التي يُقارن بها كل عدد  $B_i$  خاص بكل خلية فمتوية في الشبكة الكلية، ويعطى  $TN_{lb}$  بالعلاقة (1).

$$TN_{lb} = A + n \times SD \quad (1)$$

وفيها يمثل  $A$  متوسط عدد خلايا الجوار بالنسبة لكل الخلايا الفمتوية في منطقة معينة من الشبكة والذي يعطى بالعلاقة (2).

$$A = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M B_i \quad (2)$$

و يمثل  $SD$  الانحراف المعياري المقابل له، ويعطى بالعلاقة (3).

$$SD = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (A - B_i)^2} \quad (3)$$

وحيث  $n$  هو ثابت جداء جرت معايرته في كل من [11,12] ليساوي 1.

تمثل العلاقة (4) متراجحة اتخاذ قرار التحكم بالاستطاعة المرسله  $P_i$  للخلية  $FBS_i$  وفقاً للمرجع [11].

$$P_i(dBm) = \begin{cases} P_{0F}(dBm), & B_i < TN_{lb} \\ P_{0F}(dBm) + RSRP_0(dBm) - \min_{1 \leq j \leq U} RSRP_{ij}, & B_i \geq TN_{lb} \end{cases} \quad (4)$$

بالمستخدم. تُحسب قيمة  $RSRP_0$  وفق [11, 12] من العلاقتين (5) و (6) من خلال نصف قطر التغطية للخلية الفمتوية  $R_F$  وباستخدام  $L_{ij}$  نموذج فقد المسار المُتبع في المعيار 3GPP [21] والمحسوب بالنسبة للمستخدم ذي الدليل  $z$  عندما يستقبل إشارة من المحطة القاعدية  $FBS_i$  ذات الرقم  $i$ .

$$RSRP_0(dBm) = P_{0F}(dBm) - \underbrace{L_{ij}}_{d_{ij}=R_F} (dB)$$

$$L_{ij}(dB) = 127 + 30 \log_{10}(d_{ij}/1000) + X_g$$

و(7)، وهذا قبل اتخاذ قرار تخفيض الاستطاعة أي في حالة ما قبل التحكم بالاستطاعة حيث  $P_i = P_{0F}, \forall i$ ، وبالتالي تكون نسبة تخفيض الاستطاعة المطبق على كل خلية فمتوية عند تحقق الشرط  $B_i \geq TN_{lb}$  هي  $\alpha = \frac{P_i(mW)}{P_{0F}(mW)} \leq 1$  بحيث  $\frac{RSRP_0(mW)}{\min_{1 \leq j \leq U} RSRP_{ij}(mW)}$ . تضمّن هذه النسبة بقاء الاتصال بين المستخدم وبين الخلية الفمتوية التي جرى تخفيض استطاعتها، حيث تستطيع استطاعة الإرسال الناتجة المحافظة على الوصلة الراديوية واستمرار الاتصال مع جميع مستخدميها قبل وبعد تنفيذ قرار التحكم بالاستطاعة.

بالمثل، يتجلى المعيار الرئيس المقترح في [12] لاتخاذ قرار تخفيض الاستطاعة أيضاً في حساب المقدار  $TN_{lb}$ ، وكذلك جرى تحديد عدد خلايا الجوار باستخدام ضعفي استطاعة الإرسال  $P_{0F}(mW)$ ، ولكن آلية تحديد المسافات التي تفصل خلايا الجوار عن كل خلية فمتوية مركزية لم تجر باستخدام وحدة FMS، بل باستخدام جداء سرعة الضوء بالتأخير الزمني الذي استغرقته الرسالة "Hello" من وإلى كل خلية من خلايا الجوار. بالإضافة إلى ذلك، يُعدّل العمل [12] على العمل [11] بإدخال شرط إضافي إلى إجرائية اتخاذ قرار التحكم بالاستطاعة ويتجلى هذا الشرط من خلال حساب القيمة الوسطية median لمجموعة المسافات  $\{D_i\}$  التي

حيث  $P_{0F}$  هي استطاعة الإرسال الإسمية nominal power (قبل التحكم بالاستطاعة)، و  $RSRP_0$  هي أصغر استطاعة مستقبلية تُمكن المستخدم المرتبط راديويّاً بالخلية الفمتوية من إجراء الاتصال معها، وهي تمثل حساسية المستقبل Receiver Sensitivity في جهاز الاتصال الخاص

$$(5)$$

$$(6)$$

حيث  $d_{ij}$  هي المسافة (محسوبة بالمتراً) والتي تفصل المستخدم  $z$  عن الخلية الفمتوية  $i$ ، و  $X_g$  يمثل نموذج خفوت الظل المفترض في هذه الدراسة، وهو يتبع توزيع اللوغاريتم الطبيعي Normal Distribution  $\{\ln(\mathcal{N}(0, \sigma^2))\}$  بمتوسط يساوي الصفر وبانحراف معياري يساوي 4 dB [10,11,12,16].

يمثل المقدار  $\min_{1 \leq j \leq U} RSRP_{ij}$  في العلاقة (4) أصغر استطاعة مستقبلية من بين مجموعة طرفيات المستخدمين  $FUES$  (عددهم  $U$ ) والمُخدمين بشكل فعلي من الخلية الفمتوية رقم  $i$ ، حيث يتموضع كل منهم في منطقة تغطية الخلية الفمتوية التي نصف قطرها يساوي  $R_F$ ، وحيث أن بعد كل منهم عن المحطة القاعدية  $FBS_i$  يكون أصغر أو يساوي  $R_F$  ويُحسب المقدار  $RSRP_{ij}$  وفق العلاقة (7).

$$RSRP_{ij}(dBm) = P_i(dBm) - \underbrace{L_{ij}}_{@ d_{ij} \leq R_F} (dB) \quad (7)$$

يمكن تفسير العلاقة (4) كما يلي:

المقدار  $RSRP_0 - \min_{1 \leq j \leq U} RSRP_{ij}$  (المحسوب بوحدة dBm) هو أصغر أو يساوي الصفر دوماً، لأن المسافة التي تفصل طرفية المستخدم FUE عن المحطة القاعدية للخلية الفمتوية FBS تكون أصغر أو تساوي نصف قطر التغطية، أي  $d_{ij} \leq R_F$ ، وذلك بحسب العلاقتين (5)

المقارنة يجري تخفيض استطاعة الإرسال للخلية المركزية. أي تجري الاستعاضة عن العلاقة (4) بالعلاقة (8).

$$P_i(dBm) = \begin{cases} P_{0F}(dBm), & \text{median}(\{D_i\}) > R_F \\ P_{0F}(dBm) + RSRP_0(dBm) - \min_{1 \leq j \leq U} RSRP_{ij}(mW), & \text{median}(\{D_i\}) \leq R_F \end{cases} \quad (8)$$

استطاعة إرسال الخلية الفمتوية الواجب تطبيقها لاكتشاف خلايا الجوار، والمسافة الموافقة لها والتي سوف تحدد نصف قطر عنقود التداخل المعني في بحثنا هذا. نقترح هنا مفهوم عنقود التداخل (IC) Interference Cluster الذي تشكله مجمل خلايا الجوار لكل خلية من الخلايا الفمتوية في الشبكة، ونحدد مواصفاته مع فكرة خوارزمتنا لتنسيق التداخل كما يلي:

- فيما يخص إجرائية استكشاف الجوار Neighbor Discovery لاستكشاف خلايا الجوار، تقوم كل محطة FBS بمضاعفة استطاعة إرسالها بمقدار  $K$  عن المقدار الأصلي للاستطاعة المرسله  $P_{0F}$ ، وترسل الرسالة "Hello" إلى محيطها في الشبكة، وتنتظر الرد من أي محطة FBS أخرى متواجدة في جوارها.

- تُشكل المحطة FBS جدول خلايا الجوار الخاص بها اعتماداً على التراسل المنجز بينها وبين خلايا الجوار المحيطة.

- نعرّف، بناءً على معلومات المسافات التي تفصل بين الخلايا الجوار وبين الخلية المركزية، نصف قطر عنقود التداخل (IC Radius) ICR على أنه المسافة التي توافق مضاعفة استطاعة الإرسال بمقدار  $K$  بحيث نفترض أن كل خلية فمتوية تتراسل مع الخلية الفمتوية قيد المعالجة هي بمثابة مستخدم في الشبكة، وبالتالي فإن حساسية المستقبل لديها تتوافق مع القيمة  $RSRP_0$  المستخدمة في الأدبيات.

- بناءً على معلومات جدول الجوار السابق، وبحسب قيم المسافات  $\{D_i\}$  بالنسبة لكل خلية فمتوية في منطقة الشبكة غير المتجانسة، تُحسب القيمة  $D = \text{mean}(\{D_i\}) + \text{std}(\{D_i\})$  التي تُمثّل مجموع متوسط المسافات

تفصل خلايا الجوار عن الخلية المركزية  $FBS_i$ ، ومقارنته مع  $R_F$  نصف قطر التغطية للخلية الفمتوية وعلى أساس هذه بكل الأحوال، وسواء بالنسبة إلى آلية اكتشاف خلايا الجوار في المرجع [11] أو [12]، فمن الممكن أن يكون، وباحتمال كبير (خاصة إذا كان عدد الخلايا الفمتوية في المنطقة المعنية من الشبكة غير المتجانسة صغير نسبياً)، أن يكون جدول الجوار فارغاً ( $B_i = 0$ )، وهذا سوف يؤدي إلى عدم إجراء أي تحكم بالاستطاعة على الخلية الفمتوية المقابلة رغم أنه من الممكن أن تتواجد خلية فمتوية في جوارها على بعد منها كبير نسبياً ولكن بسبب ظاهرة خفوت الظل Shadow Fading وخفوت تعدد المسارات Multipath أن تؤثر إشارتها على إشارة الخلية الفمتوية تلك وفق تداخل غير مهم، ومن ثم لن يجري التحكم بالاستطاعة إلا على عدد صغير نسبياً من الخلايا الفمتوية مما يؤدي إلى تحسّن نسبي في مستوى التداخل الذي جرى تخفيضه.

بالإضافة إلى ذلك، ورغم أن شرط عدد خلايا الجوار يعني الأخذ بالحسبان حوالي نصف خلايا الجوار للخلية المركزية إلا أنه لا يأخذ بالحسبان المجموعة المتبقية من هذه الخلايا والتي تؤثر أيضاً على قيمة التداخل الناتجة والتي يمكن أن تكون مرتفعة، ومن جديد، نظراً للطبيعة العشوائية لظاهرة خفوت إشارة الاتصال الخلوية وخاصة في مناطق الاكتظاظ السكاني، حيث يمكن أن يحصل التداخل الهدام بين الإشارات الواصلة إلى جهاز المستقبل للمستخدم (الذي يُمكن أن ينتج عن خلايا جوار بعيدة نسبياً عن الخلية المركزية) وبالتالي مواجهة هذه القضية غير محسومة عند تطبيق نموذج الخلية TN في المرجع [11] أو نموذج الخلية ISN في المرجع [12]. في بحثنا هذا، نركز على نقاط الضعف هذه، ولإجراء التطوير على النموذج، يجب البحث عموماً عن القيمة المناسبة لرفع

ويكون عدد خلايا الجوار المشكلة لهذا العنقود ولكل خلية فمتوية يساوي  $B_i$ . نقوم فيما يلي بنمذجة حساب نصف قطر عنقود التداخل العام  $ICR$  والذي يمثل عتبة للمقارنة مع  $ICR_i$  في هذا البحث.

تكون الاستطاعة محسوبة بالميلي واط في البدء مساوية للقيمة  $P_1 = P_{0F}$  ثم تصبح  $P_2 = K \times P_{0F}$  بحيث  $K \geq 2$  لتحقيق عملية استكشاف خلايا الجوار، ولما كان نصف قطر الخلية الفمتوية هو نصف قطر التغطية  $R_F$ ، فهو متناسب مع استطاعة الإرسال بحسب علاقة فقد المسار وفق العلاقة (9).

$$RSRP_0(mW) = \frac{(P_{0F}(mW))}{(10^{(127+30\log_{10}(R_F/1000))}/10)} \quad (9)$$

مع الخلية الفمتوية (المستقبل هنا هو خلية فمتوية أخرى)، فإذا تضاعفت استطاعة الإرسال بمقدار  $K$  وبقي الحد الأدنى للاستطاعة الواجب استقبالها للتراسل بين الخلايا الفمتوية هي نفسها  $RSRP_0(mW)$  عندئذٍ يصبح نصف قطر التغطية الجديد أي نصف قطر عنقود التداخل يحقق العلاقة (10).

$$RSRP_0(mW) = (K \cdot P_{0F}(mW)) / (10^{(127+30\log_{10}(ICR/1000))}/10) \quad (10)$$

$$(P_{0F}) / (10^{(127+30\log_{10}(R_F/1000))}/10) = (K \cdot P_{0F}) / (10^{(127+30\log_{10}(ICR/1000))}/10) \quad (11)$$

وتكون العلاقة (12) محققة.

$$10^{(127+30\log_{10}(ICR/1000))}/10 = K \times 10^{(127+30\log_{10}(R_F/1000))}/10 \quad (12)$$

والتي يمكن كتابتها وفق العلاقة (13).

$$10^{(127+30\log_{10}(ICR/1000))} = K^{10} 10^{(127+30\log_{10}(R_F/1000))} \quad (13)$$

ومن ثم نحصل على العلاقة (14).

$$\left(127 + 30\log_{10}\left(\frac{ICR}{1000}\right)\right) = 10\log_{10}(K) + \left(127 + 30\log_{10}\left(\frac{R_F}{1000}\right)\right) \quad (14)$$

$$30\log_{10}\left(\frac{ICR}{R_F}\right) = 10\log_{10}(K) \quad (15) \quad (16) \quad (15)$$

$$\log_{10}\left(\frac{ICR}{R_F}\right) = \frac{1}{3}\log_{10}(K) \quad (16)$$

وأخيراً نحصل على العلاقة (17).

$$ICR = 10^{\frac{1}{3}\log_{10}(K)} R_F \quad (17)$$

بناءً عليه، نعرف المقدار  $Q$  وفق العلاقة (18).

$mean(\{D_i\})$  وانحرافها المعياري  $std(\{D_i\})$ ، وهذا يمثل منهجية بديلة للعلاقة (1) ومماثلة لها فلسفياً.

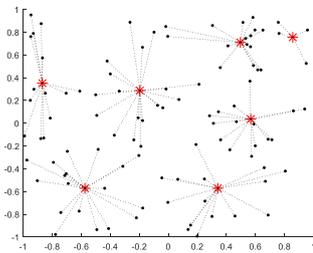
- لاتخاذ قرار تخفيض الاستطاعة للخلية  $FBS_i$  نقارن بين القيمة  $D$  المحسوبة بالنسبة لها وبين نصف قطر عنقود التداخل العام المعتمد في هذا البحث، فإذا كانت أصغر منه، عندئذٍ يجري تخفيض الاستطاعة للخلية الفمتوية المقابلة، وإلا نحافظ على  $P_{0F}$  قيمة استطاعة إرسالها الأصلية.

بالمحصلة، إذا كان لدينا  $M$  خلية فمتوية في منطقة الشبكة غير المتجانسة، سوف يكون لدينا  $M$  عنقود تداخل لكل منه نصف قطره الخاص  $ICR_i$  يساوي  $\max_i(\{D_i\})$ ،

حيث أن أي مستقبل (خلية فمتوية مجاورة) له الحساسية  $RSRP_0(mW)$  سوف يكون قادراً على التواصل مع الخلية الفمتوية مركز العنقود، وسوف تكون الاستطاعة المستقبلية عندها تساوي أيضاً  $RSRP_0(mW)$  وهي نفسها أصغر استطاعة يمكن للمستخدم استقبالها بحيث يمكنه أن يتواصل بتعويض العلاقة (9) في العلاقة (10) نحصل على العلاقة (11).

$$Q = 10^{\frac{1}{3} \log_{10}(K)} \quad (18)$$

ونشير هنا إلى أن النقاط السوداء في الشكل (5) تمثل أيضاً بدورها مراكز عناقيد تداخل أخرى، ولكنها هنا ممثلة كخلايا جوار بهدف التوضيح. يُبين الشكل (5) أن قيم أكبر المسافات الخاصة بكل محطة FBS في الشبكة؛  $\{ICR_i = \max_i\{\{D_i\}\}$  هي أنصاف أقطار عناقيد التداخل من أجل كل خلية فمتوية متواجدة في الشبكة، وأن لها قيم متباينة فيما بينها، ولكن كل منها يكون أصغر أو يساوي نصف قطر عنقود التداخل العام  $ICR$  المستخدم في إجرائية التحكم في الاستطاعة في هذا البحث، وهو يمثل هنا عتبة للمقارنة مع  $D$  بحيث  $ICR$  تساوي نصف قطر دائرة ثابتة المساحة تحيط بكامل الخلايا الفمتوية المشكلة لكل عنقود، وأما  $D$  فهي تمثل نصف قطر دائرة متغيرة المساحة محتواة في الدائرة السابقة، وأن معظم خلايا الجوار في كل عنقود تداخل سوف تساهم في شرط اتخاذ قرار تخفيض الاستطاعة للخلية الفمتوية الواقعة في مركز العنقود.

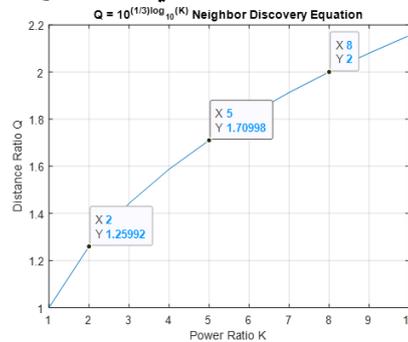


الشكل (5) رسماً توضيحياً لمفهوم عنقود التداخل من أجل مجموعة من الخلايا الفمتوية المتوزعة في منطقة الشبكة. (المصدر: الباحث)

#### 4. الخوارزمية المقترحة

تعتمد الخوارزمية المقترحة في هذا البحث على مفهوم عنقود التداخل  $IC$  المبين في الفقرة الثالثة، وبحسب المواصفات التي يحققها عنقود التداخل الخاص بكل محطة قاعدية للخلية الفمتوية والمقارنة مع نصف قطر عنقود التداخل العام، يجري التحكم باستطاعة إرسال هذه الخلية بحيث تُخفّض إلى قيمة أصغر من قيمتها الأصلية بمستوى تراجمي

يُبين الشكل (4) رسماً بيانياً للعلاقة (18) ونلاحظ فيه أنه عندما  $K = 2$  (الذي يكافئ حالة المرجعين [12,11] فيما يخص مضاعفة استطاعة الإرسال لتحقيق إجرائية استكشاف خلايا الجوار) فإن  $Q \cong 1.26 < 2$ ، وهذا يعني أن نصف قطر عنقود التداخل العام  $ICR$ ، الذي يجري وفقه استكشاف خلايا الجوار وفق هذه الأدبيات، هو أقل من ضعف نصف قطر الخلية الفمتوية  $R_F$ ، وهذه القيمة غير كافية للأخذ بالحسبان خلايا جوار أبعد عن الخلية المركزية في العنقود والتي يمكن أن تؤثر بشكل فعلي على قيمة التداخل كما ذكرنا آنفاً. وفي حال  $K > 2$  يصبح هناك احتمال أكبر ليكون عدد خلايا الجوار المشكلة لعنقود التداخل المأخوذ بالحسبان في تنسيق التداخل أكبر، وخاصة عندما يكون  $K \geq 5$ ، وهكذا يصبح نموذج التنسيق المقترح أكثر قدرة على تقليل التداخل الحاصل في الشبكة ككل كما سنبين في فقرة النتائج.



الشكل (4) تغيّرات المقدار  $Q$  مُعامل مضاعفة نصف قدر عنقود التداخل بدلالة  $K$  مُعامل مضاعفة الاستطاعة لاستكشاف الجوار.

(المصدر: الباحث)

يُظهر الشكل (5) رسماً توضيحياً لمفهوم عنقود التداخل من أجل مجموعة من الخلايا الفمتوية متوزعة في منطقة الشبكة، تُمثّل النقاط الحمراء مراكز عناقيد التداخل وكل منها هي خلية فمتوية تنتمي إلى الشبكة، وتحيط بها خلايا جوار بعدد معين (النقاط السوداء)، بحيث تُمثّل الخطوط المنقطعة المسافات التي تفصل كل خلية جوار عن مركز العنقود.

والمسافات التي تفصلها عن الخلية المركزية في عنقود التداخل المعرف بجدول الجوار السابق، ومن ثم ترسل هذه المعلومات إلى وحدة الإدارة FMS في الشبكة غير المتجانسة. ثم تعود كل خلية فمتوية إلى استطاعة إرسالها الأصلية، لتغطي نفس قطر التغطية الأصلي  $R_F$ .

**الخطوة 3:** تقوم كل طرفية مستخدم، وبشكل دوري، بإرسال تقرير القياسات الخاص بها إلى الخلايا الفمتوية المرتبط بها، ويتضمن تقرير القياسات هذه قيمة الاستطاعة المستقبلية  $RSRP$  الواصلة إلى كل مستخدم دليله  $j$  من المستخدمين (عدد  $U$ ) في كل خلية فمتوية دليلها  $i$  في الشبكة.

بناءً على تقرير القياسات وعلى جدول علاقة الجوار، يكون لكل خلية فمتوية قيم  $RSRP_{ij}(mW)$  و  $\min_{1 \leq j \leq U} D$  و  $ICR_i$  خاصة بها. من ثم يجري اتخاذ قرار التحكم باستطاعة الخلية الفمتوية (تخفيضها إلى المستوى  $P_i(dBm)$ ) أو لا بحسب العلاقة (19).

$$P_i(dBm) = \begin{cases} P_{0F}(dBm), & D > ICR \\ P_{0F}(dBm) + RSRP_0(dBm) - \min_{1 \leq j \leq U} RSRP_{ij}(mW), & D \leq ICR \end{cases} \quad (19)$$

CoCI الحاصل بين طرفية مستخدم خلية فمتوية FUE وبين باقي الخلايا الفمتوية المجاورة للخلية الفمتوية التي تخدمه، حيث يصبح مستوى التداخل أصغر من المستويات التي تقدمها الأعمال ذات الصلة، ويصبح أداء النظام أفضل من حيث إنتاجية الشبكة والكفاءة الطيفية.

Backoff معين. من هذا المنطلق نسمي خوارزمتنا المقترحة خوارزمية تخفيض استطاعة الخلية الفمتوية باعتماد مفهوم عنقود التداخل Interference Cluster Femtocell-Aware Power Backoff (ICFAPB). يُشير المصطلح Power Backoff هنا إلى تراجع قيمة استطاعة الإرسال للخلايا الفمتوية عن قيمتها الأصلية لتصبح أصغر. يُبين الشكل (6) المخطط التدفقي للخوارزمية المقترحة ICFAPB، وفيما يلي الخطوات الرئيسية لتنفيذها:

**الخطوة 1:** تقوم كل محطة قاعدية للخلية الفمتوية بمضاعفة استطاعة إرسالها بمقدار  $K$  وفق العلاقة (18)، لتغطية مسافة تصل إلى  $Q$  ضعف نصف قطر تغطيتها الأصلية، وترسل رسالة "Hello" إلى كل خلية فمتوية متواجدة في منطقة التغطية الناتجة.

**الخطوة 2:** تقوم كل خلية فمتوية بجدولة علاقة الجوار مع الخلايا المحيطة بها، بحيث تسجل معلومات كل خلية فمتوية أخرى تجاورها وقد أعادت إليها إرسال الرسالة نفسها "Hello". يتضمن جدول الجوار الناتج عدد خلايا الجوار،

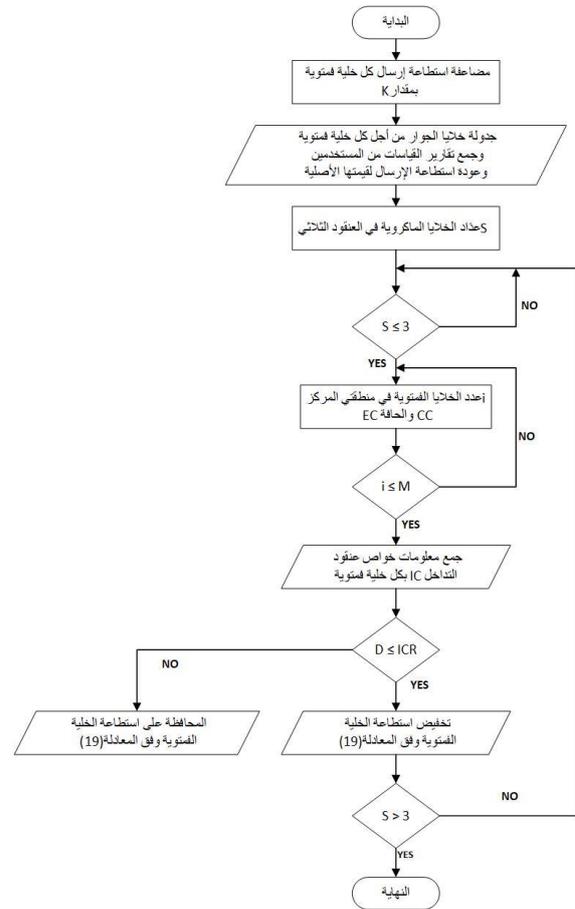
**الخطوة 4:** تقوم وحدة إدارة الخلايا الفمتوية FMS بإرسال أوامر التحكم باستطاعة هذه الخلايا لتنفيذ تخفيض الاستطاعة بنسبة تساوي  $\alpha = \frac{RSRP_0(mW)}{\min_{1 \leq j \leq U} RSRP_{ij}(mW)}$  حيث  $P_i(mW) = \alpha \cdot P_{0F}(mW)$  وذلك من أجل كل خلية فمتوية في الشبكة تحقق المتراحة  $D \leq ICR$ . بالمحصلة وبمسح جميع الخلايا الفمتوية في الشبكة يكون هناك عدداً منها قد جرى تخفيض استطاعتها بحيث لا يجري قطع الاتصال عن المستخدمين المرتبطين بها، وفي نفس الوقت يساهم هذا التخفيض في إنقاص مستوى التداخل الذي تسببه هذه الخلية إلى الخلايا المجاورة لها. وسنبين في فقرة النتائج تحسناً ملموساً في أداء الشبكة من حيث مستوى التداخل البيني

ولو كانت على مسافات أكبر بهدف الأخذ في الحسبان ظاهرة خفوت الإشارة والتي يشكل التداخل الهدام إحدى أهم آثارها السلبية، فحتى ولو كانت الخلية الفمتوية في منطقة الشبكة بعيدة نسبياً عن الخلية المركز في عنقود التداخل، فمن المرجح أن تؤدي إلى آثار تداخل كما لو كانت قريبة وكأنها على بعد من الخلية المركزية تساوي نصف قطر العنقود الناتج عن  $K = 2$ . وبالتالي، عندما  $K > 2$ ، فإن الأخذ بالحسبان خلايا جوار أكثر عند اتخاذ قرار تخفيض الاستطاعة يساهم في تخفيض مستوى التداخل بين الخلايا الفمتوية على امتداد الشبكة كلها، ويتجلى ذلك من خلال المتراحة  $D \leq ICR$  والتي تضمن بدورها تخفيض استطاعة الخلية المركزية في عنقود التداخل المقابل حتى وإن قلَّ عدد خلايا الجوار عن النصف  $TN_{lb}$  (اختلاف أول مع فلسفة [10,11])، وأيضاً حتى لو كانت القيمة  $\text{median}(\{D_i\})$  أكبر من نصف قطر التغطية الأصلي للخلية الفمتوية  $R_F$  (اختلاف آخر مع فلسفة [12]). وهكذا، يُمثّل عملنا هذا تطويراً مُعمّماً لفكرة التحكم في الاستطاعة المستند إلى مفهوم خلايا الجوار.

## 5. مؤشرات الأداء Performance Indicators

### 5.1 مستوى التداخل Interference Level

يُحسب مستوى استطاعة إشارة التداخل الخاص بكل طرفية مستخدم FUE مرتبط بخلية فمتوية في الشبكة، والناتجة عن جميع الخلايا الفمتوية الأخرى في منطقة الشبكة، من خلال حساب القيمة المتوسطة لاستطاعة إشارات التداخل الحاصل بالنسبة لكل مستخدمها  $\text{mean}_{1 \leq j \leq U} (I_{ij}(mW))$ ، حيث عدد المستخدمين الأعظمي في كل خلية فمتوية هو  $U$ ، ومن ثم نحسب القيمة المتوسطة للتداخل بالنسبة لكل الخلايا الفمتوية التي عددها  $M_{\Omega_A}$  المتواجدة في منطقة ما هي  $\Omega_A$  ( $\mathcal{A} \in \{CC, EC\}$ ) من الشبكة غير المتجانسة، أي  $\text{mean}_{1 \leq i \leq M_{\Omega_A}} (\text{mean}_{1 \leq j \leq U} (I_{ij}(mW)))$ . يُقَدَّر



الشكل (6) المخطط التدفقي للخوارزمية المقترحة ICFAPB

### 1-4 التآويل الفيزيائي لآلية عمل الخوارزمية

يُمثّل نصف قطر عنقود التداخل العام  $ICR$  عتبة مسافة حدية أعظمية تغطي منطقة تواجد خلايا الجوار، وهو مرتبط مباشرة بقيمة  $K$  عدد مضاعفة استطاعة الإرسال لاستكشاف خلايا الجوار تلك. ونظراً للطبيعة العشوائية في توزع المحطات القاعدية للخلايا الفمتوية في منطقة الشبكة غير المتجانسة، فليس من الضروري أن تتواجد خلايا جوار على نفس البعد  $ICR$ ، بل على مسافة أقل منه أو تساويه، وعموماً يتحقق لدينا  $ICR_i = \max_i(\{D_i\}) \leq ICR$ . ولما كانت الأعمال في كل من [11,12] تهتم فقط بعدد خلايا الجوار المكتشفة من أجل  $K = 2$ ، فإن عملنا هنا يهتم بعدد أكبر من خلايا الجوار (من أجل  $K > 2$ ) وذلك بالنظر إلى موضعها النسبي، حتى

### 2.5.2.5 النسبة SINR

تُحسب نسبة استطاعة الإشارة المفيدة لمستخدم الخلية الفمتوية إلى استطاعة الضجيج والتداخل، من خلال حساب القيمة المتوسطة لنسبة SINR الناتجة عند كل مستخدميها  $\text{mean}_{1 \leq j \leq U} (SINR_{ij}(dB))$ ، ومن ثم حساب القيمة المتوسطة للنسبة SINR بالنسبة لكل الخلايا الفمتوية التي عددها  $M_{\Omega_A}$  المتواجدة في منطقة ما هي  $\Omega_A$  من الشبكة غير المتجانسة، أي  $\text{mean}_{1 \leq i \leq M_{\Omega_A}} (\text{mean}_{1 \leq j \leq U} (SINR_{ij}(dB)))$ . تُقدَّر النسبة SINR الواصلة لكل مستخدم  $j$  مُخدّم من الخلية الفمتوية  $i$  وفق العلاقة (21).

$$SINR_{ij}(dB) = RSRP_{ij}(dBm) - 10 \log_{10} (P_{Noise}(mW) + I_{ij}(mW)) (dBm) \quad (21)$$

$$Throu_i(\text{Mbps}) = \sum_{j=1}^U B_{\Omega_A} \log_2(1 + SINR_{ij}) \quad (22)$$

حيث يمثل  $B_{\Omega_A}$  عرض المجال الذي يُخصّص إلى طرفية المستخدم FUE في منطقة الشبكة  $\Omega_A$  بحسب مخطط تخصيص الموارد المفترض في هذا البحث SFFR، وهي تختلف فيما إذا كانت منطقة الشبكة هي منطقة مركز تغطية الخلية الماكروية  $\Omega_{CC}$  أو منطقة حافة تغطية الخلية الماكروية  $\Omega_{EC}$ . ولحساب إنتاجية شبكة الخلايا الفمتوية لكامل منطقة الشبكة نقوم بحساب القيمة المتوسطة للقيم  $Throu_i$ ، ولحساب إنتاجية الخلايا الفمتوية لكامل الشبكة غير المتجانسة نقوم بحساب القيمة المتوسطة للقيم المتوسطة الناتجة عن كامل مناطق الشبكة الجزئية وكامل عنقود الشبكة غير المتجانسة HetNet.

مستوى استطاعة إشارة التداخل المؤثر على كل مستخدم  $j$  مُخدّم من الخلية الفمتوية  $i$  وفق العلاقة (20).

$$I_{ij}(mW) = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^M RSRP_{kj}(mW) \quad (20)$$

حيث يمثل  $M_{\Omega_A}$  عدد الخلايا الفمتوية المتواجدة في كامل منطقة الشبكة الجزئية من مستوى تغطية الخلية الماكروية سواء أكانت هذه المنطقة هي منطقة المركز  $\Omega_{CC}$  أو منطقة الحافة  $\Omega_{EC}$  التي تشكل منطقة تغطية الخلية الماكروية الرئيسية. ولتعيين متوسط مستوى التداخل لكل النظام، نقوم بحساب القيمة المتوسطة بالنسبة لكل الخلايا الفمتوية المتوزعة عشوائياً في كامل نموذج الشبكة غير المتجانسة HetNet. فكلما كان متوسط مستوى التداخل بالنسبة لكل مستخدم الشبكة أصغر كلما كان الأداء الناتج أفضل.

حيث يمثل  $P_{Noise}(mW)$  استطاعة الضجيج الحراري مقدرة بالميلي واط، ويمثل  $I_{ij}(mW)$  استطاعة التداخل مقدرة بالميلي واط، ويمثل المقدار  $\max_{1 \leq k \leq M_{\Omega_A}} RSRP_{kj}(dBm)$  أكبر استطاعة مستقبلية عند الطرفية  $j$  FUE من بين قيم استطاعة الإشارات الواصلة إليه من جميع الخلايا الفمتوية  $1 \leq k \leq M_{\Omega_A}$  في المنطقة  $\Omega_A$ ، وهو المعيار الموافق لكون الخلية الفمتوية خلية مخدمّة لطرفية المستخدم FUE طالما أنّ الاستطاعة المستقبلية منها هي الأكبر من بين جميع الخلايا الفمتوية في منطقة الشبكة، أي أن شدة الإشارة المستقبلية Receive Signal Strength (RSS) عنده بالنسبة للخلية الفمتوية هذه هي الأكبر. وكلما كان متوسط النسبة SINR بالنسبة لكل مستخدم الشبكة أكبر كلما كان الأداء الناتج أفضل.

### 3.5.3 الإنتاجية Throughput

تُحسب إنتاجية كل خلية فمتوية  $i$  في منطقة الشبكة  $\Omega_A$  وفق العلاقة (22).

المسافة بين كل مركزي تغطية لمحطتي خلية فمتوية لا تقل عن 5 متر، وأن كل منها يمكنها تخديم 10 مستخدمين على الأكثر في آن معاً. ونفترض أن توزع طرفيات مستخدمي الخلايا الفمتوية FUEs عشوائياً في منطقة تغطية كل خلية فمتوية بنصف قطر تغطية محدد، وكل محطة فمتوية FBS ترسل باستطاعة ابتدائية ثابتة وموحدة لكل الخلايا الفمتوية في العنقود الثلاثي. كما نفترض أن تقنية إعادة الاستخدام الترددي المستخدمة هي SFFR. يُبين الشكل (7) نموذج الشبكة المفترض في هذا البحث مع توضيح تقنية SFFR الموافقة بما يتوافق مع الشكل (2)، ومع إظهار المواقع العشوائية للخلايا الفمتوية وطرفيات المستخدمين FUEs لكل منها. نهتم في هذا البحث بمستخدمي الخلايا الفمتوية فقط، بهدف محاكاة نموذج تنسيق التداخل المقترح كونه خاص بشبكة محطات FBS<sub>s</sub> المنتشرة عشوائياً في كل من منطقتي الحافة والمركز لكل قطاع خلية ماركوية. جرى اختيار نموذج العنقود الثلاثي هذا لأنه النموذج العملي عند تخطيط الخلايا الماركوية في منطقة جغرافية ما، ويمكن تعميمه بحيث يمكن نشر عدة عنايد ثلاثية لتشمل الشبكة غير المتجانسة مساحة جغرافية أوسع وبحسب متطلبات التغطية المطلوبة فيها، وهو نموذج مماثل لنموذج الشبكة غير المتجانسة المفترض في مقالنا السابقة [16]، وهو أكثر واقعية من نماذج الشبكة المفترضة في كل من المرجعين [11,12].

#### 7. سيناريوهات المحاكاة ومناقشة النتائج

جرت عملية المحاكاة باستخدام برمجية MATLAB R2021a، وباستخدام حاسوب محمول بالمواصفات التالية:

- المعالج: Intel(R) Core(TM) i7-5500U CPU @ 2.40GHz 2.40 GHz
- ذاكرة RAM: 8.00 GB
- نظام التشغيل: Windows 10, 64-bit operating system, x64-based processor

#### 4.5. الكفاءة الطيفية

وفقاً لسانون وبحسب [12] تُعرّف الكفاءة الطيفية الخاصة بكل خلية فمتوية  $i$  الواقعة في منطقة الشبكة  $\Omega_{r_i}$  بأنها سعة قناة الاتصال المقابلة لعرض مجال يساوي 1Hz، وتعطى بالعلاقة (23).

$$C_i(\text{bit/sec/Hz}) = \sum_{j=1}^U \log_2(1 + \text{SINR}_{ij}) \quad (23)$$

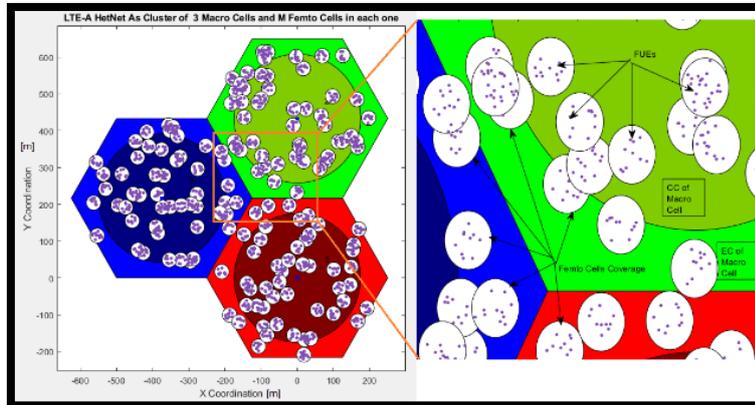
يلاحظ من العلاقة (23) أنه بزيادة SINR تزداد الكفاءة الطيفية للنظام بشكل عام، وهو ما يحققه مخطط تنسيق التداخل المقترح في هذا البحث كما سنجد في فقرة النتائج. ولحساب الكفاءة الطيفية لقناة الاتصال لكامل شبكة الخلايا الفمتوية لكامل منطقة تغطية الخلية الماركوية الجزئية من الشبكة نقوم بحساب القيمة المتوسطة للقيم  $C_i$ ، ولحساب الكفاءة الطيفية لكامل الخلايا الفمتوية المؤلفة للشبكة غير المتجانسة نقوم بحساب القيمة المتوسطة للقيم المتوسطة الناتجة عن كامل مناطق الشبكة الجزئية وكامل عنقود الشبكة غير المتجانسة HetNet.

#### 6. نموذج الشبكة للنظام LTE-A HetNets

نفترض عنقود الشبكة غير المتجانسة مؤلفاً من ثلاث خلايا ماركوية تشكل كل منها مجالاً للتغطية على هيئة مسدس منظم، وكل منها مقسمة إلى منطقتي تغطية؛ منطقة مركز CC تعمل باستطاعة محطة قاعدية ماركوية MBS أصغر من استطاعة الإرسال نحو منطقة حافة EC، حيث تتم زيادة استطاعة إرسال الخلية الماركوية باتجاه الحافة لضمان تخديم المستخدمين MUEs البعيدين عن المحطة القاعدية. ونفترض أيضاً أن المحطات القاعدية للخلايا الفمتوية FBSs تتوزع عشوائياً في كل قطاع تغطية للخلية الماركوية بحيث يكون هناك نفس العدد منها في كل قطاع، فيجتمع عدداً منها في منطقة الحافة والباقي في منطقة المركز. نفترض أيضاً أن

ما يقابل 50 كتلة موارد (RB) Resource Block في المجال الترددي يجري توزيعها على المستخدمين في كامل مجال التغطية بالأخذ بالحسبان نموذج إعادة الاستخدام SFRR. بملاحظة الجدول (2) نجد أن نصف قطر التغطية القياسي لكل محطة FBS يبلغ 20 متر، والمسافة بين محطتين FBS لا تقل عن 5 متر كما ذكرنا في الفقرة السادسة. يستخدم هذا البحث نموذج 3GPP Typical Urban Shadowing Model لحساب فقد المسار. ومن أجل كل سيناريو مفترض في الجدول (2) نفترض أن قيمة  $K$  المعتبرة هنا هي 8 بحيث نقوم بعدد من التجارب يساوي 100 موافقة لمئة موضع مختلف لأماكن توزع كل من المستخدمين والخلايا الفمتوية في الشبكة غير المتجانسة الكلية (عنقود الشبكة الثلاثي)، بمعنى أن كل طريقة من طرائق نشر محطات FBS في جغرافيا الشبكة تتكرر مختلفة عن بعضها البعض 100 مرة، وفي كل مرة يكون الوضع النسبي لتوزع الخلايا الفمتوية ومستخدميها مختلفاً عن المرة السابقة بالنسبة لمركز المحطة MBS، وفي نهاية هذه التجارب المئة يجري أخذ متوسط 100 نتيجة محاكاة كنتيجة نهائية للمحاكاة المقابلة لكل سيناريو معتمد. لقياس أداء خوارزمتنا ICFAPB المقترحة لتنسيق التداخل، نقارنها مع الحلول المقترحة الموافقة للخوارزميتين TAPB و PCICS، وكذلك مع النموذج التقليدي للنظام الذي لا يأخذ بالحسبان أي تحكم بالاستطاعة وهو النموذج Legacy No Power Control (LNPC) الذي يوافق ثبات قيم استطاعة الإرسال لكل الخلايا الفمتوية في الشبكة عند حد معين هو  $0F$ .

نفترض في محاكاة النظام، أن المحطة MBS والمحطة FBS تعملان في مجالات ترددية مختلفة موافقة لتقنية إعادة الاستخدام SFRR، لذلك لا يوجد سوى تداخل بيني من النمط CoCI من نفس الطبقة بين محطات الخلايا الفمتوية FBSs. نعتمد موسطات (مُعاملات) المحاكاة في الجدول (2) بشكل أساسي بالاستناد إلى معيار LTE-A [22,23] كما نعتبر عرض المجال الترددي الكلي  $B$  للنظام يساوي 10MHz، والتردد المركزي الحامل لإشارة المحطة MBS هو 2.3GHz، والتردد المركزي الحامل لإشارة المحطة FBS هو 3.5GHz كما في [12]. ونعتبر أيضاً أن نصف قطر منطقة التغطية لكل خلية ماكروية يساوي 250 متر، ونفترض توزيع 10 مستخدمين لكل خلية فمتوية لتعمل بطاقتها التشغيلية القصوى من حيث مواردها المتاحة Full Buffer Traffic Model. وندرس نموذج مخطط تنسيق التداخل المقترح في عملنا هذا وفق عدة سيناريوهات توافق عدة حالات لعدد محطات الخلايا الفمتوية  $M$  في كل خلية ماكروية كما يبين الجدول (2) كما نفترض أن كل طرفية مستخدم FUE لا تُخدم إلا من خلية فمتوية واحدة مقابلة لأعظم استطاعة تستقبلها منها من بين كل الخلايا الفمتوية المتواجدة في منطقة التغطية سواء منطقة المركز CC أو منطقة الحافة EC، وبحيث توزع كتل الموارد بأكملها بالتساوي على كل مستخدم، وإذا كانت هناك كتل موارد إضافية، يجري تخصيصها لطرفيات المستخدمين الذين لديهم أفضل قيمة للنسبة SINR باعتماد نتائج نموذج آلية التخصيص المقترح في بحثنا السابق. لقد افترضنا ضبطاً لعرض المجال الترددي للنظام بحيث يكون 10MHz، وهو



الشكل (7) نموذج الشبكة غير المتجانسة LTE-A HetNet. (المصدر : الباحث)

الجدول (2) موسطات (مُعَامِلَات) إعداد الشبكة غير المتجانسة LTE-A HetNet المستخدمة في المحاكاة.

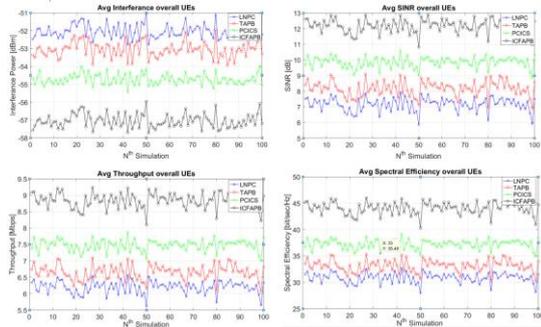
اسم المُعَامِل	إعداد المُعَامِل		
سيناريوهات المحاكاة	الأول	الثاني	الثالث
عدد الخلايا الفمتوية في كل قطاع تغطية خلية ماكروية $M$	50	100	150
عدد تجارب المحاكاة في كل سيناريو	100		
التردد الحامل للخلية الماكروية	2.3 [GHz]		
التردد الحامل للخلية الفمتوية	3.5 [GHz]		
تقنية النفاذ الراديوي	OFDMA		
عرض المجال الترددية الكلي المتاح	10 [MHz]		
تقنية تنسيق التداخل	SFRR		
عدد كتل الموارد الكلي RBs	50 RBs		
استطاعة الإرسال للخلية الماكروية MeNB	40 [dBm] for CC and 46 [dBm] for EC		
$P_{OF}$ ، استطاعة الإرسال للخلية الفمتوية HeNB-Femto	20 [dBm]		
توزع محطات الخلايا الفمتوية FBSs	عشوائي ضمن قطاع تغطية كل خلية ماكرو		
توزع طرفيات المستخدمين FUEs	عشوائي ضمن قطاع تغطية كل خلية فمتو		
توزع محطات الخلايا الماكروية MBSs	1-Cluster, contains 3-Hexagonal MBS		
استطاعة الضجيج الحراري عند المُستَقْبَل	-174 [dBm]		
نموذج الطبيعة الجغرافية لبيئة الإتصال	Small Urban Area منطقة حضرية صغيرة		
عدد العناقيد الثلاثية في الشبكة	1		
مُعَامِلَات ظاهرة خفوت الظل	Zero Mean and 4 dB Standard Deviation, $U_{mi}$ [15]		
$U$ ، عدد المستخدمين المُخْدَمِينَ في كل خلية فمتوية	10, Full Buffer Traffic Model		
سرعة المستخدمين	حركة مهملة (حركة موضعية وسيراً على الأقدام)		
$K$	8		
SINR Threshold	عتبة جودة الوصلة الراديوية -35 [dB]		
نصف قطر الخلية الماكروية $R_M$	250 [m]		
نصف قطر منطقة CC لكل خلية ماكروية $R_{CC}$	$0.7R_M$		
نصف قطر الخلية الفمتوية $R_F$	20 [m]		
عدد الخلايا الماكروية في العنقود الثلاثي	3		

### 1.7. نتائج السيناريو الأول

المتجانسة، مع العلم أن التحسن الذي تبديه خوارزمتنا ICFAPB عند رفع عدد الخلايا الفمتوية بالنسبة للنظام سوف يبدو واضحاً أكثر كما ستظهره فقرات النتائج اللاحقة.

### 2.7. نتائج السيناريو الثاني

يُبين الشكل (9) قيم مؤشرات الأداء بالنسبة إلى نتائج محاكاة السيناريو الثاني الذي يقابل نشر 100 خلية فمتوية في كل قطاع تغطية خلية ماكروية.



الشكل (9): نتائج قيم مؤشرات الأداء بالنسبة للسيناريو الثاني.

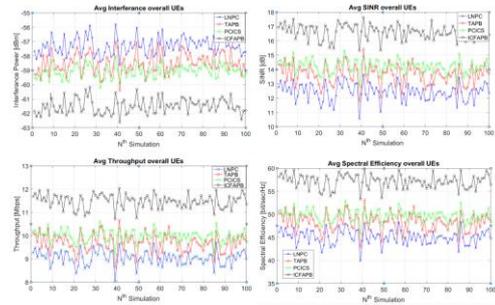
(المصدر: الباحث)

يلاحظ في هذا الشكل تفوق الخوارزمية PCICS على كل من TAPB والإعداد التقليدي LNCP، وذلك من أجل كل تجارب المحاكاة المئة المأخوذة بالحسبان. ولكن الخوارزمية المقترحة ICFAPB تقدم هنا تحسناً أفضل من PCICS وهذا يُحسب لخوارزمتنا بالأخذ بالحسبان أن عدد الخلايا الفمتوية قد ازداد إلى الضعف، حيث ينخفض مستوى التداخل عن مقابله في تلك الخوارزميتين TAPB و PCICS والحالة التقليدية بمقدار حوالي 4 dBm، ويرتفع مستوى النسبة SINR بحوالي 3 dB، وكذلك تتحسن إنتاجية الشبكة والكفاءة الطيفية بحوالي 2 Mbps و 8 bit/sec/Hz، على الترتيب.

### 3.7. نتائج السيناريو الثالث

وفق نتائج السيناريو الثالث، الذي يقابل عدد من الخلايا الفمتوية يساوي ثلاث أضعاف عددها في السيناريو الأول وضعفي عددها في السيناريو الثاني. وبالنظر إلى نتائج الشكل (10)، يصبح التحسن في الأداء أكثر وضوحاً بمقارنة الفروقات في قيم مؤشرات الأداء بين الخوارزمية المقترحة

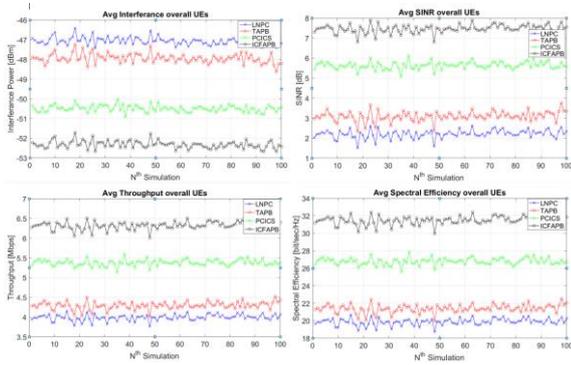
يُبين الشكل (8) قيم مؤشرات الأداء بالنسبة إلى نتائج محاكاة السيناريو الأول الذي يقابل نشر 50 خلية فمتوية في كل قطاع تغطية للخلية الماكروية.



الشكل (8) نتائج قيم مؤشرات الأداء بالنسبة للسيناريو الأول.

(المصدر: الباحث)

يلاحظ في هذا الشكل تقارب أداء كل من الخوارزميتين TAPB و PCICS وذلك من أجل كل تجارب المحاكاة المئة المأخوذة بالحسبان. يلاحظ أيضاً أن كل من الخوارزميتين PCICS و TAPB تقدمان تحسناً نسبياً بالمقارنة مع الوضع التقليدي لإعدادات الشبكة LNCP، ولكن خوارزمتنا المقترحة تقدم تحسناً أفضل من كل منهما حيث ينخفض مستوى التداخل عن مقابله في تلك الخوارزميتين بمقدار حوالي 3 dBm، ويرتفع مستوى النسبة SINR بحوالي 2.5 dB عن كل منهما، وكذلك تتحسن إنتاجية الشبكة والكفاءة الطيفية بحوالي 1.2 Mbps و 7.5 bit/sec/Hz، على التوالي. يُعد هذا التحسن جيداً نظراً لهذا العدد القليل من الخلايا الفمتوية المنشورة في الشبكة، وهذا طبيعي لأن عدد الخلايا الفمتوية صغير نسبياً وفق هذا السيناريو، وبالتالي لن يواجه النظام كثافة كبيرة لها وسوف تكون احتمالية اكتظاظ المنطقة بالخلايا الفمتوية واقتربها من بعضها احتمالية منخفضة نظراً لعددها القليل وتوزعها العشوائي، ولكن يمكن أن تُعد هذه النتيجة مؤشراً على تفوق الحل المقترح في هذا البحث حتى من أجل عدد صغير من الخلايا الفمتوية المتوزعة في الشبكة غير



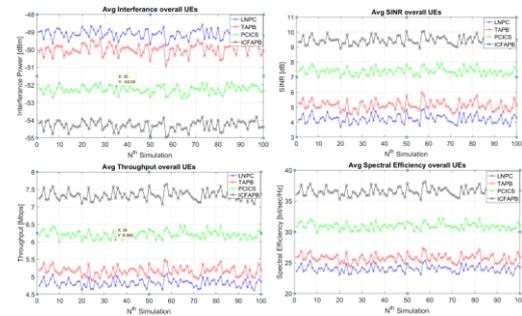
الشكل (11) نتائج قيم مؤشرات الأداء بالنسبة للسيناريو الرابع. (المصدر: الباحث)

يُظهر الشكل (11) تفوق الخوارزمية المقترحة ICFAPB على كل من الخوارزميتين TAPB و PCICS والإعداد التقليدي للنظام LNPC، حتى مع ازدياد عدد الخلايا الفمتوية المنشورة في الشبكة إلى 200 خلية فمتوية في كل قطاع تغطية خلية ماكروية أي ما يوافق عدد من محطات FBS يعادل أربعة أضعاف عددها في السيناريو الأول، وضعفي عددها في السيناريو الثاني. وهذا يُبين بشكل واضح أن تعميم أفكار الأعمال [11,12] وتطويرها وفق الطريقة المقترحة في بحثنا هذا، يؤدي إلى تحسن ملموس في مخرجات نموذج تنسيق التداخل المستند إلى التحكم باستطاعة الخلايا الفمتوية.

### 5.7. مناقشة تأثير القيمة $K$

نبين في هذه الفقرة تأثير تغيّرات معامل مضاعفة استطاعة الإرسال  $K$  مع تغيّرات عدد الخلايا الفمتوية  $M$  في قطاع الخلية الماكروية على أداء الخوارزمية المقترحة ICFAPB، حيث ندرس التغيّرات المقابلة في كل من مستوى التداخل وقيم النسبة SINR الناتجين. للحصول على النتائج نستخدم عدة قيم لعدد الخلايا الفمتوية في كل قطاع خاص بخلية ماكروية بحيث يكون لدينا  $M = [100, 200, 300, 400]$  وقيم معامل مضاعفة استطاعة الإرسال  $K = [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]$ . نُجري عملية المحاكاة من أجل مجموعة قيم متزايدة للمقدار  $K$  ومن أجلها نفترض في كل تجربة محاكاة عدداً متزايداً للخلايا الفمتوية في قطاع الخلية

مع مقابلاتها TAPB و PCICS والحالة التقليدية LNPC، وهذا يعني أنها تحافظ على تفوقها في تخفيض مستوى التداخل ورفع كل من قيم SINR وإنتاجية الشبكة وكفاءة قناة الاتصال حتى مع اكتظاظ منطقة الشبكة غير المتجانسة بمحطات FBSs ليصبح عددها أكبر بثلاث مرات من عددها في السيناريو الأول، وذلك من أجل عدد كبير من حالات التوزع العشوائي للخلايا الفمتوية الموافقة لتجارب المحاكاة المئة ضمن جغرافيا الشبكة. وهذا يعني أنه في الغالب ومهما كان شكل توزع محطات FBSs مكانياً في الشبكة غير المتجانسة، يتمكّن مخطط تنسيق التداخل المقترح في هذا البحث من التعامل معه وتخفيض مستويات التداخل بشكل أفضل من مقابلته في الأدبيات ومن الحالة التقليدية لإعداد شبكة الخلايا الفمتوية.



الشكل (10) نتائج قيم مؤشرات الأداء بالنسبة للسيناريو الثالث. (المصدر: الباحث) 4.7. نتائج السيناريو الرابع

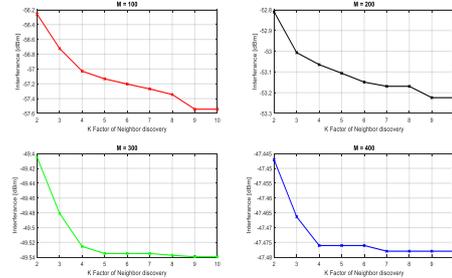
يبين الشكل (11) نتائج مؤشرات الأداء المدروسة بالنسبة للسيناريو الرابع.

ICR عتبة نصف قطر عنقود التداخل ليمثل مضاعفات لنصف قطر منطقة التغطية للخلايا الفمتوية  $R_F$  بحيث يُقارن مع قيمة ناتجة عن مجموع المتوسط الحسابي والانحراف المعياري للمسافات التي تقصل خلايا الجوار المكتشفة عن مركز عنقود التداخل، وهو ما يمكن عدّه مفهوماً بديلاً عن الخلية المركزية المسببة للتداخل ISN أو مفهوم العقدة المُشكّلة TN المطروحين في الأعمال [11,12].

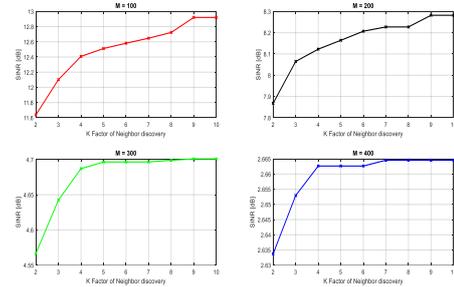
### 8. الخاتمة والتوصيات والآفاق المستقبلية

قدّمنا في هذا البحث تعميماً لمفهوم خلايا الجوار الذي يجري تطبيقه في مسألة تنسيق التداخل البيئي بين الخلايا الفمتوية في النظام HetNet LTE-A، بحيث تصبح آلية التنسيق مستندة إلى تعيين عناقيد التداخل ICs الأكثر أهمية في الشبكة غير المتجانسة HetNet وتحديد مجموعة المحطات القاعدية FBSs التي تتطلب التحكم باستطاعتها، وما يقتضي ذلك من تخفيض مستوى التداخل الناتج في الشبكة، وبالتالي رفع الأداء بزيادة النسبة SINR والحصول على إنتاجية وكفاءة طيغية أعلى مما عرضته الأدبيات ذات الصلة ومن الحالة التقليدية. يُعدّ النموذج المقترح في هذا العمل اقتراحاً واعداً ونموذجاً مناسباً لتطوير الشبكات غير المتجانسة وذاتية التنظيم في النظام LTE-A من حيث القدرة على إعادة تنظيم قيم استطاعة الإرسال المناسبة لكل خلية فمتوية تنتمي إلى الشبكة بهدف تنسيق التداخل فيما بينها ورفع جودة الخدمة للمستخدم من حيث الإنتاجية وكفاءة قناة الاتصال، وما يقتضيه ذلك من إمكانية الحصول على معدلات عالية لنقل البيانات تناسب المتطلبات الحالية للنظم الخلوية الحديثة. استناداً إلى نتائج هذا البحث، نوصي بمحاكاة وتطبيق الخوارزمية المقترحة ICFAPB على شبكة الجيل الخامس HetNet 5G، مما يضمن الحفاظ على الأداء المطلوب وتحقيق تنسيق فعّال لأي نمط من الخلايا الصغيرة منتشرة في شبكة خلوية هجينة. بالإضافة إلى ذلك، يمكن

الماكروية من بين قيم  $M$  المأخوذة بالحسبان هنا، ليعود ويتوزع جديد لها في الشبكة.



الشكل (12) تغيّرات مستوى التداخل الناتج في الخوارزمية المقترحة بدلالة كل من المعامل  $K$  وعدد الخلايا الفمتوية  $M$ . (المصدر: الباحث) يُظهر الشكل (12) أنّ مستوى التداخل يتناقص مع ازدياد قيمة  $K$  وهو ما يفسّر قدرة الخوارزمية المقترحة على التعامل مع موضوع التداخل البيئي بين إشارات محطات FBS خاصةً مع ازدياد عدد الخلايا الفمتوية في قطاع الخلية الماكروية.



الشكل (13) تغيّرات النسبة SINR وفق الخوارزمية المقترحة بدلالة كل من المعامل  $K$  وعدد الخلايا الفمتوية  $M$ . (المصدر: الباحث) بالمقابل، يُظهر الشكل (13) أنّ النسبة SINR تتزايد بمعدل تحسّن ملموس مع ازدياد  $K$  رغم ازدياد عدد الخلايا الفمتوية  $M$  أيضاً. تُظهر هذه النتائج أنّ تعميم فكرة خلايا الجوار المطروحة في الأدبيات هو أمر ممكن بحيث يجب أن تؤخذ بالحسبان الخلايا الجوار البعيدة نسبياً عن مركز عنقود التداخل، وليس فقط تلك الخلايا التي تحقق شرط عدد خلايا الجوار الممثل بتجاوز المقدار  $B_i$  الخاص بكل خلية فمتوية في الشبكة حدّاً معيّناً هو  $TN_{lb}$  كما في الأدبيات. بالإضافة إلى ذلك، يُمثّل المقدار  $Q$  المرتبط بقيمة  $K$  طريقةً لتعريف

لدعم آلية عنقدة الخلايا الفمتوية، وبالتالي الحصول على تنسيق أفضل بين الخلايا الصغيرة في الشبكة غير المتجانسة، فإذا عُرفت طريقة أو تابع توزع نشر الخلايا الفمتوية في الشبكة (طريقة تخطيطها ليست عشوائية) عندئذ يمكن لشبكة التنظيم الذاتي إجراء تطبيق مباشر لخوارزمية k-means في تعيين المواقع المناسبة أكثر لتركيب محطات FBSs مما يحقق تخفيض أمثلي لمستوى التداخل الناتج، ومن المتوقع أن نحصل على أداء أفضل، ولكن ذلك مشروطاً بالمعرفة المسبقة prior knowledge لتوزع الخلايا الفمتوية في الشبكة الكلية.

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

التخطيط لتنفيذ تجارب ميدانية على أرض الواقع بالتعاون مع شركة "فوا" مشغل الخليوي الثالث في الجمهورية العربية السورية وإجراء قياسات ميدانية للتأكد من مدى فعالية الخوارزمية ICFAPB في تنسيق تداخل الخلايا البيني ICIC، وذلك لأن شبكات LTE-A و 5G تتشابه فيما بينها من حيث استخدام تقنية نشر الخلايا الصغيرة في مناطق تغطية الخلايا الماكروية لرشد الشبكة من حيث معدل الخدمة وتلبية الطلب المتزايد للاتصال مع ضمان إنتاجية وكفاءة طيفية مناسبة لمتطلبات النظام. وأخيراً، من ناحية الآفاق المستقبلية لهذا العمل، يمكن تطوير مفهوم عناقيد التداخل المقترح بحيث نستفيد من الخصائص الرياضياتية لخوارزميات عنقدة Clustering Algorithms مثل خوارزمية k-means

## References

1. Cisco; Cisco Systems, (2019), I. Cisco Visual Networking Index: Forecast and Trends, 2017–2022. Cisco White Paper 2019.
2. GSMA Association., (2019), The Mobile Economy; GSMA Association: London, UK.
3. F. Ali, H. Yigang, G. Shi, Y. Sui, and H. Yuang., (2020). Future Generation Spectrum Standardization for 5G and Internet of Things. J. Commun. 15(3): 276-282.
4. A. Idris, S. S. Md Yusoff, N. Fadzlina Naim, S. S. Sarnin, M. Kassim, and M. D. Rozaini. (2019). Reduction of Inter-Cell Interference (ICI) by Fractional Frequency Reuse (FFR) in Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA), International Conference on Information and Communications Technology (ICOIACT). 123-128.
5. G. Nardini et al., (2018), Practical Feasibility, Scalability and Effectiveness of Coordinated Scheduling Algorithms in Cellular Networks Towards 5G. J. Netw. Comput. Appl. 106: 1-16.
6. B. J. Veancy and P. Yogesh., (2020). Fractional Frequency Reuse with Enhanced Scheduling Strategies. Wirel. Pers. Commun. 0123456789.
7. Ashfaq, K., Safdar, G., & Ur-Rehman, M., (2021). Comparative analysis of scheduling algorithms for radio resource allocation in future communication networks. Peerj Computer Science, 7, e546. doi: 10.7717/peerj-cs.546
8. Adebayo, A., Osagie, I., Tope, A., & Pauline, I. (2021). Performance evaluation of ultra-dense macro-femto cellular networks based on efficient channel resource allocation system. Computer Networks, 190, 107947. doi: 10.1016/j.comnet.2021.107947
9. Ullah, R., Ullah, F., Khalid, Z., & Safdar, H. (2021). A REVIEW OF INTER CELL INTERFERENCE MANAGEMENT IN REGULAR AND IRREGULAR GEOMETRY CELLULAR NETWORKS. Jurnal Teknologi, 83(5), 45-56. <https://doi.org/10.11113/jurnalteknologi.v83.16866>
10. K. C. Ting, H. C. Wang, C. C. Tseng, F. C. Kuo and H. T. Huang, "Downlink Co-tier Interference Mitigation for Femtocell Networks," (2014) Tenth International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing, pp. 898-901, doi: 10.1109/IIH-MSP.2014.226.

11. Wang, H. C., Woungang, I., Ting, K. C., Tseng, C. C., Kuo, F. C., & Huang, H. T., (2016), Co-tier downlink interference management in dense femtocell networks. *International Journal of Communication Systems*, 29(17), 2534–2541.
12. Zhenchao Wang, Lisha Bai, (2018), An Interference Coordination Scheme in Ultra-Dense Networks Based on Power Control. *Advances in Wireless Communications and Networks*. Vol. 4, No. 2, pp. 36-42. doi: 10.11648/j.awcn.20180402.12
13. Hassan TU, Gao F., (2019), An Active Power Control Technique for Downlink Interference Management in a Two-Tier Macro-Femto Network. *Sensors*.; 19(9):2015. <https://doi.org/10.3390/s19092015>
14. S. H. Kang and J. G. Kim, (2020). Spectrum Allocation with Power Control in LBS based D2D Cellular Mobile Networks. *J. Commun.*15(3): 283-288.
15. D. Pankong, V. Imtawil, and P. Suthisopapan, (2019). BER Performance of Cooperative MIMO Systems with Halfduplex Decode and Forward Relaying. *Int. J. Electr. Electron. Eng. Telecommun.* 8(5): 268-273.
16. Tarek Al Achhab, Fariz Abboud, Abdulkarim Assalem, (2022), Idiosyncratic Self-Organized Resources Allocation Algorithm Based on Fractional Frequency Reuse Scheme to Enhance Service Rate and Throughput in LTEA HetNets, submitted to Damascus University Engineering Journal, March 2022.
17. Alotaibi, Sultan, (2022), Femtocell Networks Interference Management Approaches, *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, Volume 22 Issue 4, Pages.329-339
18. Ming Gong, Pin-Han Ho, Chih-Hao Lin., (2016), A coordinated multi-point-based quality of service provision resource allocation scheme with inter-cell interference mitigation [J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 16(6): 656-668
19. Mohammed I., *et al.*, (2021), Inter-cell interference mitigation using adaptive reduced power subframes in heterogeneous networks, *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, Vol. 11, No. 4, pp. 3275~3284, ISSN: 2088-8708, DOI: 10.11591/ijece.v11i4.pp3275-3284.
20. Liang YS, *et al.*, (2012), Resource allocation with interference avoidance in OFDMA femtocell networks. *IEEE Trans Vehicular Tech.* 2012;61(5):2243–2255
21. 3GPP TR36.814, (March 2010), V9.0.0 evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); further advancements for E-UTRA physical layer aspects.
22. Wang Juncai, Liu Tingting, Yang Chenyang, *et al.*, (2017), Predictive Resource Allocation to Maximize the Throughput of Ultra-Dense Networks [J]. *Journal of signal processing*, 33(3):260-267.
23. Huang C, Chen Q, Tang L., (2016) Hybrid inter-cell interference management for ultra-dense heterogeneous network in 5G [J]. *Science China Information Sciences*, , 59(8):082305