الجمهورية العربية السورية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة دمشق
كلية الهندسة الميكانيكيّة والكهربائيّة
قسم هندسة الإلكترونيّات والاتصالات

تحسين أداء نظام التطوُّر طويل الأمد المتقدِّم LTE-A باستخدام تقانات الشبكات ذاتيَّة التنظيم

أطروحة مُقدَّمة لنيل درجة الدكتوراه في هندسة الاتصالات المتقدِّمة

إعداد

م. طارق الأشهب

إشراف

أ.د. فريز عبود
أستاذ في قسم هندسة الإلكترونيات
والاتصالات – جامعة دمشق

أ.د. عبد الكريم السالم
أستاذ في قسم هندسة الإلكترونيات
والاتصالات – جامعة البعث

العام الدراسي
2023-2022

أعضاء لجنة الحكم والقرار الناظم بذلك

تصريح خطي Declaration

أنا الموقع أدناه أصرح بعلمي الكامل وقبولي:

1. أنّ كل ما ينتج عن البحث والأطروحة هو ملكيّة فكريّة وماليّة بالتشارك مع جامعة دمشق، وأنّني ألتزم بأخذ موافقة الجامعة في حال رغبتي بنشر البحث أو الأطروحة أو جزء منها نصّاً أو مضموناً خارج إطار الجامعة (من دور نشر أو مكتبات أو مواقع إلكترونيّة وغيرها من وسائل النشر).
2. أنّه لا يوجد أي جزء من هذه الأطروحة مُقتَبَس من عمل علمي آخر أو أُنجِزَ للحصول على شهادة أُخرى في جامعة دمشق أو أيّة جامعة أو معهد تعليمي داخل أو خارج الجمهوريّة العربيّة السوريّة.

الاسم والتوقيع

طارق موسى الأشهب

شكر وتقدير

أتوجه بجزيل الشكر للمشرفين على البحث **الأستاذ الدكتور فريز عبود والأستاذ الدكتور عبد الكريم السالم**، لما قدّماه لي من نصائح وتوجيهات ودعم علمي. فما كنت لأستطيع استكمال البحث لولا دعمهما وتشجيعهما.

وكذلك أتوجه بالشكر الجزيل لرئيس قسم هندسة الإلكترونيات والاتصالات، **الدكتور نضال زيدان**، لما بذله من جهد ودعم لإنجاح هذا العمل.

كما أتقدَّم بالشكر للأساتذة في القسم الذين أغنو البحث بتوجيهاتهم أثناء السيمنارات الدورية.

وأخيراً أتقدم بالشكر الجزيل إلى أعضاء **لجنة الحكم الموقرين** الذين أسهمت ملاحظاتهم وتوجيهاتهم في إغناء هذا البحث.

الإهداء

إلى من خطوت معه أولى خطواتي فعلمني كيف أمشي بثقة وثبات، إلى من رأيت انعكاس نجاحي وفرحي بريقاً في عينيه...إلى الرجل الذي علمني معنى الوفاء والتضحية والتواضع. إلى الرجل الذي كان ومايزال وسيبقى مصدر فخري وعزتي في الحياة. إلى قدوتي ومثلي الأعلى... **أبي الغالي**

إلى معلمتي الأولى التي علمتني معنى الحب الصادق، إلى الشمعة التي أنارت دربي...إلى الإنسانة العظيمة التي كانت وطني الأول وزرعت بي التفاؤل والنجاح... إلى التي بدعائها جعلت صعاب أيامي تزول... **أمي الغالية**

إلى ريحانة البيت، صاحبة الابتسامة الرائعة والقلب الطيب، مشجعتي دائماً عند ضعفي... إلى من يجري دمها في عروقي، إلى من شاركتني طفولتي، وأجمل ذكرياتي... **أختي الغالية نغم**

إلى نور البيت وضحكته.. إلى من وجوده يشعر قلبي بالسكينة والأمان رغم المسافات التي تبعدنا...إلى من كان لي السند والكتف الذي لا يميل... **أخي الغالي زياد**

إلى من يغار الورد من جمالك... إلى الشمس التي أدخلت الدفء إلى عائلتنا برقتها وطيبة قلبها.. إلى التي أهداني ياها الله أختاً وصديقة فأبوح لها بمكنونات قلبي وأعرف أنها تذكرني بالدعاء سراً وتحرص عليَّ جهراً

زوجة أخي مايا

إلى عصافير البيت الذين يملؤونه فرحاً ونشاطاً بضحكاتهم وبرائتهم...إلى الأطفال الذين مازلت أتعلم منهم وأنسى كل همومي معهم... أتمنى لكم مستقبلاً مبهراً... **وسام، نصرة، سيلين، باسكال، أورشينا**

إلى الذي له من اسمه نصيب... الذي بإصراره وعنفوانه ونشاطه الدائم يجعلني أتعلم منه... إلى أخي الذي لم تلده أمي...

صهري الدكتور عماد شلفون

إلى الإنسان الذي كان ومايزال وسيبقى الأخ الأكبر والسند الحقيقي..الذي لم يبخل علي بنصح أو دعم...

رامي شدايده

إلى من شجعني وأعطاني أملاً...إلى من كانت كلماتهم وثقتهم ودعمهم يجعلني أتخطى كل لحظات اليأس..إلى من كنت محظوظاً بوجودهم بحياتي.... **أصدقائي ورفاق الدرب**

إلى رفيقة الدرب.. إلى من شاركتني هذا المشوار الصعب.. التي أتعلم منها الحكمة والمودة واللين.. إلى مستشارتي

ربا

إلى وردات العائلة الجميلات.. إلى اللواتي أقضي معهن أجمل أوقاتي ونتشارك أجمل الذكريات.. فيخففون عبء الوقت بروحهم الجميلة

دالين، نيفين

هذا العمل إهداء إلى روح الأستاذ الدكتور مطاوع الأشهب

فهرس المحتويات Table of Contents

أعضاء لجنة الحكم والقرار الناظم بذلك i

تصريح خطي Declaration i

شكر وتقدير ii

الإهداء iii

فهرس المحتويات Table of Contents iv

فهرس الأشكال Table of Figures ix

فهرس الجداول Table of Tables xii

قائمة المصطلحات والاختصارات Terminologies and Abbreviations List xiii

المُستخلَص xvii

Abstract xviii

الإطار العام للبحث 19

مقدمة 20

بعض الدراسات السابقة 21

جدول علاقة الجوار NRT 21

إدارة حركيّة المستخدمينUMM 22

إدارة الموارد الراديويّة RRM 22

تنسيق التداخل ICo 23

مشكلة البحث 23

أهداف البحث 26

أهمية البحث 26

مسوغات البحث 26

مُحدِّدات البحث 27

حدود البحث 27

منهج البحث وأدواته 28

النتائج التطبيقيّة المتوقّعة من البحث والجهات المستفيدة منها 28

الأبحاث المنشورة 29

الفصل الأول: الأساسيات النظرية المرتبطة بالبحث Theoritical Basics Related to Research 30

1.1 تطوّر نظم الاتصالات الخلويّة والنقّالة 31

2.1 بُنية شبكات التطور طويل الأمد LTE 34

3.1 بنية كتلة الموارد وهيكلية الإطار في نظام LTE 35

4.1 واجهات شبكة النفاذ الراديوي E-UTRAN 37

1.4.1 الواجهة S1 37

2.4.1 الواجهة X2 38

5.1 نظام التطور طويل الأمد المتقدم LTE-A 39

6.1 شبكات LTE-A غير المتجانسة 41

1.6.1 شبكات الخلايا الصغيرة 42

2.6.1 فوائد نشر الخلايا الصغيرة 43

3.6.1 مشكلات نشر الخلايا الصغيرة 44

4.6.1 مُستخلَص تحدّيات نشر الخلايا الصغيرة 45

7.1 هيكلية شبكة النظام LTE-A HetNet 45

8.1 خيارات نشر الخلايا الصغيرة في شبكة غير متجانسة 46

1.8.1 نشر الخلايا الصغيرة داخل التردد Intra-FD 46

2.8.1 نشر الخلايا الصغيرة بين الترددات Inter-FD 46

9.1 التحدِّيات والفُرص أمام الشبكات اللاسلكيّة الخلوية LTE-A HetNets 47

1.9.1 التحدِّيات على مستوى المُشغِّل 47

2.9.1 التحدِّيات على مستوى التغطيّة 47

3.9.1 التحدِّيات على مستوى سِعة القناة وجودة الخدمة 48

4.9.1 الفُرص 48

10.1 الشبكات ذاتيّة التنظيم SON 48

1.10.1 مبادئ الشبكة ذاتيّة التنظيم 49

2.10.1 معايير الشبكات ذاتيّة التنظيم وحالات الاستخدام 50

3.10.1 بُنى الشبكات ذاتيّة التنظيم 51

11.1 خاتمة الفصل 53

الفصل الثاني: تطوير خوارزميّة علاقة الجوار التلقائي Improving ANR Algorithm 54

1.2 مقدمة 55

2.2 وظيفة ANR في معيار 3GPP 56

3.2 الدراسات المرجعية 58

4.2 فرضيات خوارزميّة ANR التقليديّة ومخططها التدفقي 59

5.2 نموذج شبكة متجانسة لمحاكاة خوارزميّة ANR التقليديّة 60

6.2 مقترح خوارزميّة ANR باعتماد معامل حمل الخليّة Load Factor 65

7.2 سيناريو محاكاة خوارزميّة ANR-LF ومناقشة النتائج 67

8.2 خاتمة الفصل 70

الفصل الثالث: أمثلة متانة الحركيّة Mobility Robustness Optimization 71

1.3 مقدمة 72

2.3 الدراسات المرجعية 74

3.3 نموذج النظام System Model 77

1.3.3 نموذج الشبكة غير المتجانسة LTE-A HetNet 77

2.3.3 نموذج الحركيّة Mobility Model 79

3.3.3 مقاييس النظام System Metrics 81

4.3.3 مؤشّرات الأداء Performance Indicators 83

4.3 مسألة التسليم في إدارة الحركيّة 87

5.3 استعراض الحل المقترح 90

1.5.3. تمهيد 90

2.5.3 نموذج الحساب التكيّفي لهامش البطاء HM Adaptation 91

3.5.3 نموذج الحساب التكيُّفي للزمن اللازم للقدح TTT 94

4.5.3 منهجيّة اشتقاق صيغ مُوسِطات التحكُّم بالتسليم HCPs 102

5.5.3 تقييم الحل المقترح 105

6.5.3 الإطار العام للخوارزميَّة المقترحة 107

6.3 نتائج المحاكاة 109

1.6.3 السيناريو الأول (X = 1000 ، N = 41 ، ST = 150 ، Tcrit = 6) 112

2.6.3 السيناريو الثاني (X = 1000 ، N = 91 ، ST = 150 ، Tcrit = 6) 113

3.6.3 السيناريو الثالث (X = 2000 ، N = 41 ، ST = 250 ، Tcrit = 6) 115

4.6.3 السيناريو الرابع (X = 2000 ، N = 91 ، ST = 250 ، Tcrit = 6) 117

5.6.3 السيناريو الخامس (X = 3000 ، N = 91 ، ST = 150 ، Tcrit = 6) 118

6.6.3 السيناريو السادس (X = 1000 ، N = 91 ، ST = 150 ، Tcrit = 2) 120

7.3 مناقشة نتائج إضافيّة لإقرار صلاحيّة الخوارزميّة ودقّتها 124

8.3 خاتمة الفصل 134

الفصل الرابع: تطوير خوارزميّة تخصيص الموارد ذاتيّة التنظيم Improving Self-organized Resource Allocation Algorithm 136

1.4 مقدمة 137

2.4 الدراسات المرجعية 140

1.2.4 الطرائق المعتمدة على تقسيم الموارد Resource Partitioning based methods 140

2.2.4 طرائق تقسيم الموارد المعتمدة على تقسيم المنطقة الجغرافيّة Region Splitting based Resource Partitioning 141

3.4 مراجعة التقنيّات الأساسيّة للتخصيص وفق المبدأ FFR 142

1.3.4 إعادة استخدام التردد الكسري بمعامل 3 (FFR3) 142

2.3.4 إعادة استخدام التردد الكسري الصارم StFFR 143

3.3.4 إعادة استخدام التردد الكسري المرن SoFFR 144

4.4 نموذج النظام والحل المقترح 145

1.4.4 تخطيط الشبكة LTE-A HetNet Planning 145

2.4.4 نموذج انتشار الإشارة في بيئة الاتصال Propagation Model 147

3.4.4 النسبة SINR واعتبارات قرارَي تخديم المستخدم والتسليم بين الخلايا 149

4.4.4 المخطط المقترح لتخصيص الموارد ذاتيّة التنظيم Proposed SORRA Scheme 151

5.4.4 مؤشّرات الإنتاجيّة ومعدّل خدمة الشبكة 158

5.4 نتائج المحاكاة ومناقشتها 159

1.5.4 سيناريوهات المحاكاة 159

2.5.4 موسطات محاكاة النظام 159

3.5.4 نتائج السيناريو الأول 162

4.5.4 نتائج السيناريو الثاني 164

6.4 خاتمة الفصل 167

الفصل الخامس: تطوير خوارزميّة تنسيق التداخل Improving Interference Coordination Algorithm ... 169

1.5 مقدمة 170

2.5 الدراسات المرجعية 173

3.5 الحل المُقترَح: عنقود التداخل Interference Cluster 177

4.5 الخوارزميّة المقترحة 184

5.5 التأويل الفيزيائي لآليّة عمل الخوارزميّة ICFAPB 185

6.5 مؤشِّرات الأداء 188

1.6.5 مستوى التداخل 188
2.6.5 النسبة SINR 188
3.6.5 معدّل الإنتاجيّة 189
4.6.5 الكفاءة الطيفية 189
7.5 نموذج الشبكة لمحاكاة النظام 189
8.5 سيناريوهات المحاكاة ومناقشة النتائج 191
1.8.5 نتائج السيناريو الأول 192
2.8.5 نتائج السيناريو الثاني 193
3.8.5 نتائج السيناريو الثالث 194
4.8.5 نتائج السيناريو الرابع 195
5.8.5 مناقشة تأثير القيمة K 196
9.5 خاتمة الفصل 198
خاتمة البحث والآفاق المستقبليّة 199
المراجع 202
الملاحق 210

فهرس الأشكال Table of Figures

الشكل 1–1: بنية نموذجية لنظام LTE [32]..... 34

الشكل 1–2: المدة الزمنية لإطار LTE باستخدام بادئة دورية طبيعية وموسعة.[31] 37

الشكل 1–3: كدسة البروتوكولات للواجهة S1 على مستويي التحكم والمستخدم..... 38

الشكل 1–4: كدسة البروتوكولات للواجهة X2 على مستويي التحكم والمستخدم. 38

الشكل 1–5: التحسينات المضافة إلى نظام LTE-A [31]..... 40

الشكل 1–6: أنواع خلايا الشبكة بحسب مساحة التغطية [34]..... 41

الشكل 1–7: رسم توضيحي لمخطط الشبكات غير المتجانسة HetNets في نظام LTE-A..... 42

الشكل 1–8: بنية شبكة E-UTRAN المقابلة لهيكلية الشبكة LTE-A HetNet [45]. 46

الشكل 1–9: مخطّط بنيوي لشبكة SON مركزية [57]..... 51

الشكل 1–10: مخطط بنيوي لشبكة SON موزعة [57]..... 52

الشكل 1–11: مخطط بنيوي لشبكة SON هجينة [57]. 53

الشكل 2–1: مفهوم الجيران والخلايا المجاورة [9]. 56

الشكل 2–2: هيكلية شبكة LTE في معيار 3GPP [9]..... 56

الشكل 2–3: وظيفة ANR في معيار3GPP [68]. 57

الشكل 2–4: المخطط التدفقي لخوارزميّة ANR التقليديّة [65]..... 60

الشكل 2–5: رسم توضيحي لموسطات نموذج Walfish-Ikegami [79]. 62

الشكل 2–6: توزُّع 120 مشتركاً ضمن بنية الشبكة المتجانسة المفترضة (الباحث)..... 63

الشكل 2–7: توزُّع 840 مشتركاً ضمن البنية المعتبرة (الباحث). 64

الشكل 2–8: المخطط التدفقي لخوارزميّة ANR-LF المُطوَّرَة (الباحث). 66

الشكل 2–9: توزُّع 450 مستخدماً مع وجود حمل زائد على الخليّة الاولى (الباحث)..... 67

الشكل 2–10: توزُّع المستخدمين مع تطبيق الخوارزميّة المقترحة ANR-LF (الباحث)..... 69

الشكل 2–11: منحني بياني لأداء خوارزميّة ANR التقليديّة وخوارزميّة ANR-LF المطوَّرة (الباحث)..... 69

الشكل 3–1: (b) نموذج HetNet، مع 19 خليّة ماكرويّة (o)، و41 خليّة صغيرة (*)، و100 من تجهيزات المستخدمين (+)[الباحث] ، (a) نموذج HetNet في [114] (من دون تمثيل الخلايا الصغيرة)..... 77

الشكل 3–2: خريطة توزّع قيم SINR الخاصة بمستخدمي الخلايا الماكرويّة MUEs محسوبة بالديسبل dB (الباحث)..... 78

الشكل 3–3: خريطة توزّع قيم SINR الخاصة بمستخدمي الخلايا الفمتويّة FUEs محسوبة بالديسبل dB (الباحث)..... 79

الشكل 3–4: رسم توضيحي لمسار حركيّة تجهيزة المستخدم UE (الباحث). 80

الشكل 3–5: آلية اتخاذ قرار التسليم في النظام LTE-A [113]..... 89

الشكل 3–6: رسم توضيحي لحدث تسليم ناجح مع الشروط المقابلة (الباحث). 96

الشكل 3–7: رسم توضيحي للتكبير zoom in في الشكل 3–6 في منطقة حدث التسليم (الباحث). 97

الشكل 3–8: نموذج الانحدار غير الخطي المقترح لعلاقة TTT مقابل المقدار $1/(v \times HM)$، (الباحث)..... 101

الشكل 3–9: نموذج انحدار غير خطي كمقترح آخر لحساب قيمة TTT تكيّفيّاً بدلالة $(v \times HM)$ (الباحث)..... 106

الشكل 3–10: المخطط التدفقي للخوارزميّة المقترحة (الباحث). 108
الشكل 3–11: نتائج المؤشِّر $HPI_{HOPP}(t)$ للسيناريو الأول (الباحث). 112
الشكل 3–12: نتائج المؤشِّر $HPI_{HOF}(t)$ للسيناريو الأول (الباحث). 112
الشكل 3–13: نتائج المؤشِّر $HPI_{HOPP}(t)$ للسيناريو الثاني (الباحث). 114
الشكل 3–14: نتائج المؤشِّر $HPI_{HOF}(t)$ للسيناريو الثاني (الباحث). 114
الشكل 3–15: نتائج المؤشِّر $HPI_{HOPP}(t)$ للسيناريو الثالث (الباحث). 116
الشكل 3–16: نتائج المؤشِّر $HPI_{HOF}(t)$ للسيناريو الثالث (الباحث). 116
الشكل 3–17: نتائج المؤشِّر $HPI_{HOPP}(t)$ للسيناريو الرابع (الباحث). 117
الشكل 3–18: نتائج المؤشِّر $HPI_{HOF}(t)$ للسيناريو الرابع (الباحث). 118
الشكل 3–19: نتائج المؤشِّر $HPI_{HOPP}(t)$ للسيناريو الخامس (الباحث). 119
الشكل 3–20: نتائج المؤشِّر $HPI_{HOF}(t)$ للسيناريو الخامس (الباحث). 119
الشكل 3–21: نتائج المؤشِّر $HPI_{HOPP}(t)$ للسيناريو السادس (الباحث). 121
الشكل 3–22: نتائج المؤشِّر $HPI_{HOF}(t)$ للسيناريو السادس (الباحث). 121
الشكل 3–23: منحني تغيُّر القيمة التكيّفيّة للموسط HM مع الزمن والسرعة لخمسة مستخدمين بسرعات مختلفة. 124
الشكل 3–24: منحني تغيُّر قيمة الموسط TTT التكيفيّة مع الزمن والسرعة لخمسة مستخدمين بسرعات مختلفة. 124
الشكل 3–25: منحني تغيُّر RSRP مع الزمن للخليّة المُخدِّمة والهدف، من أجل تجهيزة مستخدم UE اعتباطي أول يتحرك بسرعة 30 كم/ساعة، (أ) مع خفوت الظل و (ب) متوسط RSRPs بوجود خفوت الظل. (الباحث). 125
الشكل 3–26: منحني تغيُّر RSRP مع الزمن للخليّة المخدّمة والخليّة الهدف من أجل تجهيزة مستخدم اعتباطي ثاني يتحرك بسرعة 30 كم/ساعة، (أ) مع خفوت الظل و (ب) متوسط RSRPs بوجود خفوت الظل. (الباحث). 126
الشكل 3–27: منحني تغيُّر القيم التكيفيّة للموسطين HM وTTT خلال كامل زمن المحاكاة لتجهيزة المستخدم الاعتباطي الثاني تتحرك بسرعة 30 كم/ساعة. (الباحث). 127
الشكل 3–28: توضيح تتابع التخديم لتجهيزة المستخدم الاعتباطي الثاني تتحرك بسرعة 30 كم/ساعة. (الباحث). 127
الشكل 3–29: منحني تغيُّرات RSRP مع الزمن للخليّة المخدّمة والخليّة الهدف لمستخدم اعتباطي ثالث يتحرك بسرعة 90 كم/ساعة، (أ) مع خفوت الظل و (ب) متوسط RSRPs بوجود خفوت الظل. (الباحث). 129
الشكل 3–30: توضيح HM وTTT التكيفيين للمستخدم الثالث الذي يتحرك بسرعة 90 كم/ساعة. (الباحث). 129
الشكل 3–31: توضيح تتابع التخديم للمستخدم الثالث الذي يتحرك بسرعة 90 كم/ساعة. (الباحث). 130
الشكل 3–32: توضيح تتابع التخديم للمستخدم الرابع الذي يتحرك بسرعة 240 كم/ساعة (الباحث). 131
الشكل 3–33: منحني تغيُّر RSRP مع الزمن للخليّة المخدمة والخلية الهدف لمستخدم رابع يتحرك بسرعة 240 كم/ساعة، (أ) مع خفوت الظل و (ب) متوسط RSRPs بوجود خفوت الظل. (الباحث). 131
الشكل 3–34: منحني متوسط SINR للخليّة المُخدِّمة والخليّة الهدف للمستخدم الرابع الذي يتحرك بسرعة 240 كم / ساعة. (الباحث). 132
الشكل 3–35: منحني تغيُّر القيم التكيّفيّة للموسطين HM وTTT للمستخدم الرابع الذي يتحرك بسرعة 240 كم/ساعة. (الباحث). 133
الشكل 3–36: منحني يبيّن ثبات مؤشّر الأداء HPI_{HOF} في السيناريو الخامس لمستخدم يتحرك بسرعة عالية بين اللحظتين 25.02 و25.03 ثانية. (الباحث). 133

الشكل 4–1: مخطّط إعادة استخدام التردد الكسري بمعامل 3 [125]. 143
الشكل 4–2: مخطّط إعادة استخدام التردد الكسري من النمط StFFR [125]. 144
الشكل 4–3: مخطط إعادة استخدام التردد الكسري من النمط SoFFR [125]. 145
الشكل 4–4: تخطيط الشبكة وفق مخطط StFFR (الباحث). 146
الشكل 4–5: تخطيط الشبكة وفق مخطط SoFFR (الباحث). 146
الشكل 4–6: المخطّط التدفُّقي للخوارزميّة SORRA المقترحة (الباحث). 157
الشكل 4–7: مخطط توزُّع المستخدمين في بيئة الشبكة، حالة النمط StFFR (الباحث). 160
الشكل 4–8: مخطط توزُّع المستخدمين في بيئة الشبكة، حالة النمط SoFFR (الباحث). 160
الشكل 4–9: منحنيات معدل الإنتاجيّة الناجمة عن المحاكاة وفق السيناريو الأول (الباحث). 162
الشكل 4–10: منحنيات معدّل الخدمة الناجمة عن المحاكاة وفق السيناريو الأول (الباحث). 163
الشكل 4–11: تكبير منطقة رسم منحنيات معدّل الخدمة وفق السيناريو الأول (الباحث). 164
الشكل 4–12: منحنيات الإنتاجيّة الناجمة عن المحاكاة وفق السيناريو الثاني (الباحث). 164
الشكل 4–13: منحنيات معدّل الخدمة الناجمة عن المحاكاة وفق السيناريو الثاني (الباحث). 165
الشكل 4–14: تكبير منطقة رسم منحنيات معدّل الخدمة وفق السيناريو الثاني (الباحث). 166
الشكل 5–1: التحكم باستطاعة المحطّة القاعديّة للخليّة الفمتويّة FBS بناءً على معلومة عدد خلايا الجوار الفمتويّة المحيطة بها [25]. 176
الشكل 5–2: تغيّرات المُعامِل Q بدلالة مُعامِل مضاعفة الاستطاعة لاستكشاف الجوار K (الباحث). 183
الشكل 5–3: رسم توضيحي لمفهوم عنقود التداخل من أجل مجموعة من الخلايا الفمتويّة متوزّعة في منطقة الشبكة (الباحث). 184
الشكل 5–4: المخطط التدفقي للخوارزميّة المقترحة ICFAPB (الباحث). 187
الشكل 5–5: نموذج الشبكة غير المتجانسة LTE-A HetNet لمحاكاة خوارزميّة ICFAPB (الباحث). 190
الشكل 5–6: نتائج قيم مؤشرات أداء الخوارزميّة ICFAPB بالنسبة إلى السيناريو الأول، (أ) مستوى التداخل، (ب) النسبة SINR، (ج) الكفاءة الطيفية، (د) الإنتاجيّة (الباحث). 193
الشكل 5–7: نتائج قيم مؤشرات أداء الخوارزميّة ICFAPB بالنسبة إلى السيناريو الثاني، (أ) مستوى التداخل، (ب) النسبة SINR، (ج) الكفاءة الطيفية، (د) الإنتاجيّة (الباحث). 194
الشكل 5–8: نتائج قيم مؤشرات أداء الخوارزميّة ICFAPB بالنسبة إلى السيناريو الثالث، (أ) مستوى التداخل، (ب) النسبة SINR، (ج) الكفاءة الطيفية، (د) الإنتاجيّة (الباحث). 195
الشكل 5–9: نتائج قيم مؤشرات أداء الخوارزميّة ICFAPB بالنسبة إلى السيناريو الرابع، (أ) مستوى التداخل، (ب) النسبة SINR، (ج) الكفاءة الطيفية، (د) الإنتاجيّة (الباحث). 195
الشكل 5–10: تغيّرات مستوى التداخل الناتج عن ICFAPB بدلالة كل من المُعامِل K وعدد الخلايا الفمتويّة M (الباحث). 197
الشكل 5–11: تغيّرات النسبة SINR وفق الخوارزميّة المقترحة بدلالة كل من المُعامِل K وعدد الخلايا الفمتويّة M (الباحث). 197

فهرس الجداول Table of Tables

الجدول 1—1: إصدارات مواصفات مجموعة 3GPP [31]. 35

الجدول 1—2: عدد كتل الموارد الموافقة لعرض المجال المستخدم في نظام LTE (الباحث). 37

الجدول 2—1: مُوسِطات النموذج Walfish-Ikegami [79]. 61

الجدول 2—2: تقرير قياس لتجهيزة مستخدم ضمن الخليّة الثانية (الباحث). 63

الجدول 2—3: توزُّع المستخدمين (120 UEs) ضمن منطقة الدراسة (الباحث). 64

الجدول 2—4: توزُّع المستخدمين (840 UEs) ضمن منطقة الدراسة (الباحث). 64

الجدول 2—5: لائحة NCL للخليّة الثانية (الباحث). 64

الجدول 2—6: لائحة NCL للخليّة الثالثة (الباحث). 64

الجدول 2—7: لائحة NCL للخليّة الأولى (الباحث). 64

الجدول 2—8: لائحة NCL للخليّة الرابعة (الباحث). 65

الجدول 2—9: لائحة NCL للخليّة الخامسة (الباحث). 65

الجدول 2—10: لائحة NCL للخليّة السابعة (الباحث). 65

الجدول 2—11: لائحة NCL للخليّة السادسة (الباحث). 65

الجدول 2—12: لائحة NCL للخليّة السابعة (الباحث). 67

الجدول 2—13: توزُّع المستخدمين (450 UEs) ضمن منطقة الدراسة للخوارزميّة المطوَّرة ANR-LF (الباحث). 68

الجدول 2—14: موسطات استطاعة الإرسال والحمل للخلايا بعد انتهاء محاكاة ANR-LF (الباحث). 68

الجدول 3—1: بيانات نموذجية لسرعة تجهيزة المستخدم UE والموسطات TTT و HM .[10]. 100

الجدول 3—2: موسِطات إعداد الشبكة المستخدمة في المحاكاة [82،111،120]. 110

الجدول 3—3: الحالات التقليديّة الشائعة للإعداد الثابت للموسطات HCPs (الباحث). 111

الجدول 3—4: المتوسط الزمني للمؤشرين $HPI_{HOPP}(t)$ و$HPI_{HOF}(t)$ للسيناريو الأول (الباحث). 113

الجدول 3—5: المتوسط الزمني للمؤشرين $HPI_{HOPP}(t)$ و$HPI_{HOF}(t)$ للسيناريو الثاني (الباحث). 115

الجدول 3—6: المتوسط الزمني للمؤشرين $HPI_{HOPP}(t)$ و$HPI_{HOF}(t)$ للسيناريو الثالث (الباحث). 117

الجدول 3—7: المتوسط الزمني للمؤشرين $HPI_{HOPP}(t)$ و$HPI_{HOF}(t)$ للسيناريو الرابع (الباحث). 118

الجدول 3—8: المتوسط الزمني للمؤشرين $HPI_{HOPP}(t)$ و$HPI_{HOF}(t)$ للسيناريو الخامس (الباحث). 120

الجدول 4—1: قيم التخامد في إشارة الإرسال للخليّة البيكويّة [128] 148

الجدول 4—2: قيم موسطات حساب فقد المسار الخاص بالخلايا البيكويّة [128]. 149

الجدول 4—3: نسبة العتبة $RSRP_{Threshold}$ لخليّة من العنقود IndC مقارنة بقيمة $RSRP_{max}$. 156

الجدول 4—4: مُوسطات إعداد الشبكة LTE-A HetNet لمحاكاة المخطط المقترح SORRA (الباحث). 160

الجدول 4—5 : قيم معدّل الإنتاجيّة TH ومعدّل الخدمة SR بتثبيت عدد المستخدمين عند 1000 مستخدم وزيادة عدد الخلايا الصغيرة (الباحث). 167

الجدول 5—1: آلية التخصيص SFFR في الشبكة غير المتجانسة حيث يختلف المحتوى الترددي المقابل لكل عرض مجال متاح $B1 \leq i \leq 3$ (الباحث). 172

الجدول 5—2: موسِطات إعداد الشبكة LTE-A HetNet المستخدمة في محاكاة ICFAPB (الباحث). 192

قائمة المصطلحات والاختصارات Terminologies and Abbreviations List

تنويه: تشير العلامة (*) إلى أنّ الاختصار المقابِل مُسْتَحدَثٌ في هذه الأطروحة، وما تبقى من الاختصارات فهو مألوف.

الاختصار	المعنى باللغة العربية	المصطلح باللغة الإنكليزية
APC	التحكّم النشط بالاستطاعة	Active Power Control
AFR	إعادة الاستخدام الترددي المتكيّف	Adaptive Frequency Reuse
ABS	الإطار الفرعي شبه الفارغ	Almost Blank Subframe
ANR	علاقة الجوار التلقائي	Automatic Neighbor Relation
BW	عرض المجال الترددي	Band Width
BS	المحطة القاعدية	Base Station
CLF*	مُعامِل حِمل الخليّة	Cell Load Factor
CCR*	منطقة مركز الخليّة	Center Cell Region
CSG	مجموعة المستخدمين القريبين	closed subscriber group
CoLI*	تداخل الطبقات المشترك	Co-Layer Interference
CroLI*	تداخل الطبقات التصالبي	Cross-Layer Interference
CP	البادئة الدورية	cyclic prefix
DL	الوصلة الهابطة	Down Link
DSL	خط المشترك الرقمي	Digital Subscriber Line
ECR	منطقة حافة الخليّة	Edge Cell Region
eNB	محطَّة قاعدية مُحسَّنة LP'	evolved Node Base
EPC	نواة رزم البيانات المطّورة	Evolved Packet Core
E-UTRAN	شبكة النفاذ الراديوي الأرضي المطوَّرة	Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network
FBS	محطة قاعدية فمتويّة	Femto Base Station
FUE	مستخدم خليّة فمتويّة	Femto User
FMS	نظام إدارة الخلايا الفمتويّة	Femtocell Management System
FFR	إعادة استخدام التردد الكسري	Fractional Frequency Reuse
FLC	مُتحكِّم المنطق الضبابي	fuzzy logic controller
P-GW	بوابة عبور رزم البيانات	Packet Gateway
GID	المُعرِّف العالمي	Global Identity
GPS	نظام تحديد المواقع العالمي	global positioning system

GPRS Tunneling Protocol-User Plane	البروتوكول النفقي لتخطيط استقبال المستخدمين لمعطيات النظام GPRS	GTP-UP
Handover	التسليم	HO
Handover Control Parameters	موسطات التحكم بالتسليم	HCPs
Handover Request	طلب التسليم	HRQ
Heterogeneous Network	الشبكة غير المتجانسة	HetNet
Home evolved Node Base Station	المحطّة القاعديّة المحسَّنة المنزليّة	HeNB
Home Subscriber Server	خادِم المشترك المنزلي	HSS
Hysteresis Margin	هامش البطاء	HM
Individual Cluster	العنقود الإفرادي للمستخدمين في الشبكة	IndC*
Indoor Areas	البيئات الداخليّة	IA*
Indoor UEs	تجهيزات المستخدمين في البيئات الداخليّة	IUEs*
IntC Radius	نصف قدر عنقود التداخل	ICR*
Inter-cell Interference Coordination	تنسيق تداخل الخلايا البيني	ICIC
Interference Cluster	عنقود التداخل	IntC*
Interference Cluster Femtocell-Aware Power Backoff	تعديل مستوى استطاعة إرسال الخليّة الفمتويّة بالاستناد إلى حالة عنقود التداخل	ICFAPB*
Interference Coordination	تنسيق التداخل	ICo*
Interference Source Node	العقدة مصدر التداخل	ISN
Inter-Frequency Deployment	النشر بين الترددات	Inter-FD
International Mobile Telecommunications	الاتصالات النقّالة الدولية	IMT
Intra Frequency Deployment	النشر داخل التردد	Intra-FD
key performance indicator	مؤشر الأداء الرئيسي	KPI
Legacy No Power Control	الإعداد التقليدي لاستطاعة ارسال الخلايا الفمتويّة في الشبكة غير المتجانسة	LNPC
Long Term Evolution - Advanced	نظام التطوّر طويل الأمد المتقدّم	LTE-A
Macro Base Station	المحطة قاعدية للخليّة ماكرويّة	MBS
Macro User	مستخدم خليّة ماكرويّة	MUE
Macro-to-Macro HO	تسليم من خليّة ماكرويّة إلى حليّة ماكرويّة	MTMHO*
Macro-to-Small HO	تسليم من خليّة ماكرويّة إلى خليّة صغيرة	MTSHO*
Measurements Report	تقرير القياسات	MR
Minimizing Drive Test	تقليل الاختبارات الجوّالة	MDT
Mobility Management Entity	كينونة إدارة الحركيّة	MME

Mobility Robustness Optimization	أمْثَلَة متانة الحركيّة	MRO
Neighbor Cell List	قائمة خلايا الجوار	NCL
Neighbor Relation Table	جدول علاقات الجوار	NRT
Network Control Parameters	موسطات التحكم بالشبكة	NCP
Next Generation Mobile Network	شبكات النقّال في الجيل القادم	NGMN
Operation and Maintenance Center	مركز الصيانة والتشغيل	OMC
orthogonal frequency-division multiplexing	التجميع باقتسام التردد المتعامد	OFDM
Outdoor Areas	البيئات الخارجيّة	OA*
Packet Data Network	شبكة رزم البيانات	PDN
Physical Cell Identity	مُعرِّف الخليّة الفيزيائي	PCI
Physical resource block	كتلة الموارد الفيزيائية	PRB
Pico User	مستخدم خليّة بيكويّة	PUE
Ping-Pong HO	تأرجح التسليم	PPHO*
Policy Charge and Rules Function	وحدة وظيفة سياسة الرسوم والقواعد	PCRF
Radio Access Network	شبكة النفاذ الراديوي	RAN
Radio Access Technology	تقنية النفاذ الراديوي	RAT
Radio Link Failure HO	فشل تسليم نتيجة فشل الوصلة الراديوية	RLFHO*
Radio Resource Control	نظام التحكم بالمورد الراديوي	RRC
Radio Resources Management	إدارة الموارد الراديويّة	RRM
received-signal-strength	شدة الإشارة المُستقبَلة	RSS
reference signal received power	استطاعة الإشارة المرجعية المستقبلة	RSRP
reference signal received quality	جودة الإشارة المرجعية المستقبلة	RSRQ
resource block	كتلة الموارد	RB
resource element	عنصر الموارد	RE
Self-Organized Reuse Resources Allocation	إعادة تخصيص الموارد المُنظَّمة ذاتيّاً	SORRA
Self-Organizing Network	شبكة ذاتيّة التنظيم	SON
Service Rate	معدّل الخدمة	SR
Serving Gateway	بوابة عبور الخدمة	S-GW
Signal to Noise plus Interference Ratio	نسبة استطاعة الإشارة المفيدة إلى استطاعة الضجيج والتداخل	SINR
single-carrier frequency-division multiplexing	النفاذ المتعدد باقتسام التردد وحيد الحامل	SC-FDM
Small cell networks	شبكات الخلايا الصغيرة	SCN
Small User	مستخدم الخليّة الصغيرة	SUE*

Small-to-Macro HO	تسليم من خليّة صغيرة إلى خليّة ماكرويّة	STMHO*
Small-to-Small HO	تسليم من خليّة صغيرة إلى خليّة صغيرة	STSHO*
Soft Fractional Frequency Reuse	إعادة استخدام التردد الكسري المرن	SoFFR*
SON Function	وظيفة من وظائف الشبكات ذاتيّة التنظيم	SONF
Strict Fractional Frequency Reuse	إعادة استخدام التردد الكسري الصارم	StFFR*
Third Generation Partnership Project	مشروع شراكة الجيل الثالث	3GPP
Time-To-Trigger	الزمن اللازم للقدح	TTT
Too-early HO	تسليم مبكِّر جداً	TEHO*
Too-Late HO	تسليم متأخِّر جداً	TLHO*
Transmission Time Interval	الفاصل الزمني للإرسال	TTI
Trouble FBS-Aware Power Backoff	مستوى تراجع استطاعة إرسال الخليّة الفمتويّة بالاستناد إلى حالة العقدة المشكلة	TAPB
Trouble Node	العقدة المُشكلة	TN
Universal Mobile Telecommunication System	النظام العالمي للاتصالات النقّالة	UMTS
Unnecessary HO	تسليم غير ضروري	UHO*
uplink	الوصلة الصاعدة	UL
User Equipment	تجهيزة المستخدم	UE
User Mobility Management	إدارة حركيّة المستخدمين	UMM*

المُستخلَص

جَرَى اقتِراح دمج الشبكات غير المتجانسة HetNets كأحد التحسينات الرئيسيّة للنظام LTE-A على إصدارات النظام LTE السابقة، من خلال اقتراح نشر تطبيقات الخلايا الصغيرة، مثل الخلايا الفمتويّة Femtocells، لتحسين التغطية وجودة الخدمة QoS ضمن الشبكة، مع تقليل النفقات الإنشائيّة أيضاً. يمكن الحصول على هذه المزايا الرئيسيّة على حساب تحديّات جديدة مثل التداخل بين الخلايا وإدارة الموارد الراديويّة RRM وإدارة الحركيّة.

هدف البحث: يهدف البحث إلى معالجة التحديّات الرئيسيّة في الشبكات غير المتجانسة HetNets في النظام LTE-A من خلال اقتراح حلول جديدة باستخدام تقانات الشبكات ذاتيّة التنظيم SON.

المواد والطرائق: جَرَى اتّباع الطريقة البحثيّة في الدراسة باستخدام برمجيّة ماتلاب MATLAB لمحاكاة وتقييم الحلول المقترحة باعتماد تقانات الشبكات ذاتيّة التنظيم SON.

الاستنتاجات والنتائج العملية:

جَرَى في هذا البحث نمذجة ومحاكاة خوارزميّات SON جديدة باستخدام منصّة ماتلاب MATLAB من أجل عمليّات تخصيص الموارد وإدارة الحركيّة وتنسيق التداخل، وتقييم أداء الخوارزميّات المقترحة من خلال المحاكاة وفق نموذج شبكة متعدّدة الطبقات مكوَّنة من خلايا ماكرويّة وفمتويّة وبيكويّة. أظهرت نتائج المحاكاة المكثّفة أنَّ الخوارزميّات المقترحة تتفوَّق على الخوارزميّات في الأدبيّات ذات الصلة فيما يتعلَّق بجميع مؤشِّرات KPIs المستخدمة في هذا البحث لتقييم الأداء، وهذا يبيّن فعاليّة التحسين المقترح.

الكلمات المفتاحية: *نظام التطوّر طويل الأمد المتقدّم، الشبكات غير المتجانسة، الشبكة ذاتيّة التنظيم، أمثلة متانة الحركيّة، إعادة استعمال التردد الكسري، تخصيص الموارد، تنسيق التداخل، الخلايا الصغيرة.*

Abstract

The incorporation of heterogeneous networks (HetNets) has been proposed as one of the main enhancements of LTE-A systems over the existing LTE releases, by proposing the deployment of small-cell applications, such as femtocells, to improve coverage and quality of service (QoS) within the network, whilst also reducing capital expenditure. These principal advantages can be obtained at the cost of new challenges such as inter-cell interference, Radio Resource Management (RRM) and mobility management.

The aim of the research: In this research, the main challenges of HetNets in LTE-A platform have been addressed and novel solutions are proposed by using self-organizing network (SON) management techniques.

Materials and Methods: The research method was followed in our study using MATLAB software to simulate and evaluate the proposed solution based on SON techniques.

Conclusions and practical results: The novel SON algorithms are modelled and simulated in MATLAB simulation software for the three processes of resource allocation, mobility management and interference coordination. The performance of the proposed algorithms is evaluated through simulation with a two-tier model that consists of macro-femto cells. We show through extensive simulations that our proposed algorithms outperform the algorithms in related literature, concerning all KPIs used to evaluate the performance. Thus, the effectiveness of the proposed version.

Keywords: *LTE-A, HetNets, Self-Organizing Network (SON), Mobility Robustness Optimization (MRO), Fractional Frequency Reuse (FFR), Resource Allocation, Interference Coordination, Small cells.*

الإطار العام للبحث

General Framework for Research

الإطار العام للبحث General Framework for Research

مقدمة

أصبح التقدّم التقاني في نظم الاتصال الخَلَويّة متسارعاً مع انتشار الهواتف الذكية وتطبيقاتها المتنوعة في مجال واسع من الخدمات التي تُغني حياة الفرد في مجتمع اليوم. وازداد مُعدَّل الطلب على الاتصال والنفاذ إلى الإنترنت من خلال شبكات الاتصال الخَلَوي حتى باتت تعمل قرب حدود تشغيلها القصوى من حيث موارد الاتصال المتاحة وجودة الخدمة نتيجة زيادة الطلب على معدّلات عالية لنقل المعطيات التي تتنوع تطبيقاتها في مجالات عِدّة كالخدمات السحابية وإنترنت الأشياء. لقد توسّعت وظائف الاتصال اتساعاً كبيراً ليزداد معها مستوى ازدحام معطيات الصوت والصورة والفيديو والنصوص، ومن المتوقَّع أنَّ 50% من حركة عبور معطيات الصوت، و70% من حركة عبور معطيات الفيديو ستنشأ مصادرها في المستقبل القريب حصريّاً من مستخدمي الهواتف النقّالة.

وفق توقُّعات شركة سيسكو Cisco [1]، بحلول عام 2023، تشكِّل حركة عبور المعطيات traffic من الأجهزة اللاسلكيّة والأجهزة النقّالة مُعظم حركة العبور في شبكة الإنترنت العالميّة. وتتنبأ الدراسات الحديثة بأنّه على مدى السنوات القليلة المقبلة سيبدأ 1.4 مليار شخص في استخدام الإنترنت حصريّاً عبر الهاتف النقّال، حتى عام 2025 سيستخدم أكثر من 60% من سكان العالم الإنترنت عبر شبكات الاتصال الخَلَوية؛ فضلاً عن ذلك، هناك تغيير مستمر في العادات ومحتوى التصفُّح، فمثلاً هناك المزيد من الأشخاص الذين يستهلكون المحتوى المرتبط بالفيديو أكثر لفترات طويلة ومتكررة عبر أجهزة الاتصال النقّالة مثل الهواتف الذكية، لذلك فإنّ استخدام معطيات النقّال لكل مستخدم سيكون أكبر بخمس مرات بحلول عام 2024. نتيجة لذلك، أصبح من الضروري بالنسبة إلى مُشغّلي شبكات الخَلَوي التفكير الجدّي في تحسين أداء منظوماتها لمواجهة هذا التزايد [2].

لقد أدى هذا التوجُّه الجديد في السنوات الأخيرة إلى تطوير نظام التطوُّر طويل الأمد المتقدّم Long Term Evolution - Advanced (LTE-A)، الذي يُعَد جيلاً رابعاً للاتصال الخَلَوي 4G بإصداره الأخير، وهو من المرشَّحين الواعدين لتحقيق إنتاجيّة عالية وكفاءة طيفية معزَّزة [3]، وهو ما يمكن عَدَّه أيضاً الركيزة الأساسيّة للبدء بتوطيد منظومات الجيل الخامس 5G للهاتف النقّال وتشكيله خلال الوقت الحالي، إذ يجري الانتقال إلى الجيل الخامس انطلاقاً من النظام LTE-A باستخدام عمليات تخطيط Planning ونشر Deployment للخلايا الصغيرة Small Cells مثل الخلايا الفمتويّة Femto، والبيكويّة Pico. ومن المتوقَّع أن يبدأ بذلك المُشَغِّلُ الخَلَوي الثالث "وفا" في الجمهوريّة العربيّة السوريّة بحلول العام 2023 [4].

في هذا السياق، يسهم توظيف تقانات الشبكات ذاتيّة التنظيم Self-Organizing Networks (SON) في الشبكات غير المتجانسة في تحسين أدائها تلقائيّاً من خلال زيادة درجة الأتمتة لوظائف إدارة الشبكة؛ وهذا يقلل كثيراً من نفقات التشغيل والأخطاء الناتجة عن تدخُّل العامل البشري، ويزيد سرعة عمليّات التشغيل والإصلاح [6,7]. ويُعَد حل الشبكة ذاتيّة التنظيم SON طريقة واعدة لتخفيض الكلفة والتعقيد في إدارة البنية التحتيّة والتشغيليّة للشبكة، ويعتمد على استبعاد العامل البشري خارج حلقة التحكُّم في الشبكة، يصبح التحكُّم ذاتيّاً وآليّاً ضمن بنية الشبكة؛ وهذا سيعطي المُشَغِّلين فائدة كبيرة من حيث تخفيض النفقات الإنشائيّة CAPEX والنفقات التشغيليّة OPEX [5]. ومن المتوقَّع في المستقبل القريب أن تُظهِر الشبكات الخَلَوية اللاسلكيّة درجة عالية من التنظيم الذاتي لينعكس ذلك في صياغة معايير 3GPP أكثر تطوُّراً لمشغِّلي الجيل القادم للشبكات النقّالة NGMN. وهذا يُظهِر أهمية البحث في تطوير خوارزميّات لتحسين أداء الشبكات غير المتجانسة HetNets في النظام LTE-A باستخدام تقانات الشبكات ذاتيّة التنظيمSON. يتضمن هذا البحث أربعة محاور فرعية هي NRT وUMM وRRM وICo. سيتم تناولها بالتفصيل في الفصول الأربعة الأخيرة.

بعض الدراسات السابقة

لا بد من عرض بعضِ الدراسات المرجعية لكلّ محور من المحاور الرئيسية الفرعيّة لبحثنا هذا، وسنعود إليها لاحقاً بشيءٍ من التفصيل مع أبحاث ذات صلة إضافيّة. إنّ الهدف من هذا العرض التعريف بأهم المفاهيم الأساسيّة المرتبطة بالبحث التي تُعد مفرداته ومصطلحاته الرئيسيّة.

جدول علاقة الجوار NRT

اقُتُرِحَتْ فكرةُ علاقة الجوار التلقائي Automatic Neighbor Relation (ANR) مع بداية ظهور الشبكات ذاتيّة التنظيم SON مترافقة مع منظومة LTE في الإصدار الثامن من معايير مشروع شراكة الجيل الثالث 3GPP، وتُرِكَتْ مجالاً للبحث ليقترح الباحثون ومُشغِّلي الشبكات ما هو مناسب لتحقيقها. وتركّزتْ الأبحاث ذات الصلة على بناء جدول يحتوي قائمة بالخلايا المجاورة تسمى Neighbor Cell List (NCL) يكون هذا الجدول فارغاً للعقد الحديثة في الشبكة. ويُمْلَأ تدريجياً بمعلومات القياس التي ترسلها تجهيزات المستخدمين UEs. وتقوم العقد بأمْثَلِة جدول خلايا الجوار NCL وتحديثه آنياً وبصورة مستمرّة[8]. وقد قُيِّمَتْ خوارزميّة علاقة الجوار التلقائي في [9] بالأخذ بالحسبان سيناريوهات مختلفة لعمل الشبكة مثل سيناريو البيئات المدنيّة الكثيفة Dense Urban. أظهَرَت النتائج أداءً جيّداً للتسليم حتى مع وجود كثيف للمستخدمين، واقْتُرِحَتْ قائمةٌ سوداء Blacklist ضمن خوارزميّة ANR التي تحتوي على قائمة بالخلايا (المُوصَّفة بشكل معّرفات الخليّة Physical Cell Identities (PCI) المُبْلَغ عنها والمعروفة مسبقاً من المحطة القاعدية evolved Node Base (eNB) حيث لا يجري إرسال معطيات قياسيّة ضمنها؛ وهذا يقلّل الترويسات Overheads الناتجة عن إرسال المعطيات القياسيّة ضمن الوصلة الصاعدة Uplink.

إدارة حركيّة المستخدمين UMM

يُعَد حدثُ التسليم (المناولة) (Handover (HO بين الخلايا في أثناء حركيّة تجهيزات المستخدمين UEs في منطقة الشبكة إجراءً أساسيّاً لإدارة الحركيّة UMM، ويجب أن تضمن تنقُّل المستخدمين بحريّة عبر الشبكة LTE-A HetNet مع استمرار الاتصال وبجودة الخدمة نفسها دون أن يؤثر قرار التسليم في ذلك. في الواقع، يُعَد معدّل نجاح أحداث التسليم أحد المؤشرات الرئيسيّة لرضا المستخدمين. وينبغي أن يجري تنفيذ التسليم بأسرع ما يمكن وبسلاسة قدر الإمكان [10]. ومع ذلك، قد يختلف أداء أحداث التسليم HO ومتطلباته لبعض المستخدمين اعتماداً على مُوسِطات حالة الحركيّة، مثل الموضع والسرعة. لذلك، عند توفُّر قياسات هذه الموسِطات يمكن استغلال معلوماتها لتصميم خوارزميّات ذاتيّة التنظيم تكون خاصّة بالمستخدم لتحقيق أداءٍ أكثر فاعلية.

لقد أصبحت إدارة الحركيّة UMM أكثر تعقيداً بسبب الزيادة الكبيرة في حجم الشبكات غير المتجانسة HetNets وتعقيدها. وكان هذا سبباً رئيسيّاً لتطوير مفهوم SON الذي اكتسب بدوره أهميّة متزايدة لتحقيق هدف مهم ألا وهو أتمتة عمليّة UMM وتقليل تدخُّل العامل البشري [11]. في هذا السياق، طُرِحَ مفهوم أمثلة متانة الحركيّة(Mobility Robustness Optimization (MRO كحالة استخدام خاصة في الشبكات ذاتيّة التنظيم. وتُشير خوارزميّات MRO إلى تلك الإجراءات التي تعمل على أتمتة إجرائيّة إعداد موسطات التحكم بالتسليم (Handover Control Parameters (HCPs التي تهدف إلى تقليل أحداث التسليم غير المرغوب بها وغير الضروريّة أثناء حركيّة المستخدمين ضمن الشبكة التي تؤثّر في جودة الخدمة واستمرار الاتصال [12،13].

إدارة الموارد الراديويّة RRM

تتمثّل المقايضة Trade-Off الأساسيّة، لتحقيق إدارة فعّالة للموارد وتخصيصها للمستخدمين مع حدود منخفضة للتداخل في شبكات LTE-A HetNets، في ضمان أمرين اثنين في آن: تخفيض التداخل الناجم عن وجود محطّات إرسال باستطاعة فعّالة ومجالات ترددية متماثلة، ناجم عن تشارك الخلايا الماكرويّة المنطقة الجغرافية نفسها وتكون متقاربة مكانياً مع الخلايا الفمتويّة والبيكويّة وهذا يتطلب تخفيض استطاعة إرسال الخلايا الصغيرة كي لا تؤثر في اتصال مستخدمي الخلايا الماكرويّة Macro Users (MUE)، وفي الوقت نفسه تخفيض استطاعة إرسال الخلايا الماكرويّة كي لا تؤثر في اتصال مستخدمي الخلايا الصغيرة Small Users (SUE) (سواء أكان المستخدم مرتبطاً بخليّة فمتويّة Femto User (FUE) أم بخليّة بيكويّة Pico User (PUE))، ويجب أن تكون استطاعة الإرسال للخليّة الصغيرة (الفمتويّة أو البيكويّة) كبيرة بشكل كافٍ لضمان تلبية متطلّبات معدّل نقل معطيات عالٍ لجميع أنواع المستخدمين MUE أو FUE أو PUE [14]. وفيما يلي نذكر أهم الطرائق القائمة على تخفيض التداخل لإدارة الموارد الراديويّة وتخصيصها:

- ✓ الطرائق المعتمدة على تقسيم الموارد Resource Partitioning based Methods المعتمدة على إعادة استخدام التردد Frequency Reuse، كما في [15,16,17,18,19,20,21,22].
- ✓ طرائق تقسيم الموارد المعتمدة على تقسيم المنطقة الجغرافيّة Region Splitting based Resource Partitioning كما في [23,24].

تنسيق التداخل ICo

يمكن أن يُفهَم تنسيق التداخل بأنّه آليّة لتجنُّب التداخل وذلك بتخفيض أثره قدر الإمكان بين الإشارة المستقبلة من الخليّة المخدِّمة ومجموع الإشارات المستقبلة من خلايا مماثلة في المجال الترددي وتقع في المنطقة الجغرافية نفسها للخليّة المُخدِّمة. في السنوات الأخيرة، اكتسبت مخطّطات تنسيق التداخل اهتماماً كبيراً من كل من الشركات الهندسيّة والأوساط الأكاديميّة، فنُشِرَت أبحاثاً عديدة تهدف إلى معالجة قضيّة تنسيق التداخل ICo. لتخفيف التداخل في الشبكة غير المتجانسة LTE-A HetNet، يجب أن يَفْرِض تنسيقُ التداخل قيوداً على آليّة تخصيص الموارد الراديويّة من خلال التنسيق بين الخلايا المتجاورة عبر واجهة التواصل X2، وأن تَتَّفِق فيما بينها على نوعيّة الإرسال الراديوي من حيث عِدّة موارد أساسيّة مجتمعة أو منفصلة هي المجال الترددي المتاح، استطاعة الإرسال، المُدّة الزمنيّة للإرسال، والوجهة المكانيّة للإرسال. يمكن تحقيق تنسيق التداخل عبر وضع شروط على استطاعة الإرسال من خلال التحكُّم في مستوى الاستطاعة المرسلة كما في [25,26,27,28,29] وطريقة تشكيل حزمة الهوائي واتجاهيّته كما في [30]. عموماً، يجب أن يعمل مخطّط التنسيق على تحقيق تخفيف مناسب للتداخل من خلال السيطرة على موردين رئيسيّين هما الاستطاعة والمجال الترددي المُستَخدَم بحيث نحصل على إدارة مناسبة للطيف الراديوي ونحقق توزيعاً مناسباً لاستطاعة الإرسال فيما بين الخلايا في الشبكة غير المتجانسة.

مشكلة البحث

يُعَد الحفاظ يدويّاً على علاقات الجوار بين الخلايا في الشبكة LTE-A HetNet مُهِمّةً كبيرة وصعبة حتى مع وجود أفضل الأساليب المتاحة وعدد كبير من المُشَغِّلين الخبراء، وذلك بسبب وجود الآلاف من علاقات الجوار حتى لمُشَغِّل واحد فقط. ولذا يجب أن تتيح علاقات خلايا الجوار مكاناً للتشغيل التلقائي المؤتمتْ مركزياً. في هذا السياق، تُعَد خوارزميّة علاقة الجوار التلقائي ANR واحدة من أهم تقانات SON الواعدة. ويتطرَّق هذا البحث إلى هذه المسألة لتُطَوَّر خوارزميّة ANR بطريقة يجب وفقها دعم تجهيزات الشبكات المُصنَّعة من قبل مصنّعين مختلفين. لذلك، تُعدّ وظيفة ANR واحدة من أُولى وظائف SON التي يُراد توحيدها في معيار3GPP. يتناول الفصل الثاني هذه المسألة ويقترح إضافة معامل حمل الخلايا Load-Factor إلى خوارزميّة ANR التقليديّة للوصول إلى الخليّة المناسبة أكثر في الحالة الديناميكيّة الآنيّة، لإدارة فعّالة لعمليّات التسليم بين الخلايا المتجاورة ورفع أداء الشبكة، ويُقصَد هنا بحمل الخليّة عدد المستخدمين المرتبطين فيها وهم بحالة اتصال نشط.

تُعَدْ عمليّة التسليم HO واحدة من أكثر العمليّات المعقَّدة والمنتشرة في المناطق التي يجري فيها استخدام التقانات الراديويّة الحاليّة لتأمين التعامل مع علاقات الجوار، يُلاحَظ ارتباطها الوثيق بخوارزميّة ANR، لذلك وَجَبَ البحث عن خوارزميّة إعداد مناسب لموسِطات التحكُّم بالتسليم HCPs تحقق أداءً أفضل من حيث تخفيض عدد عمليّات التسليم غير الضروريّة وغير المرغوب بها في الشبكة. وتتصف عمليّة التسليم بأنّها عمليّة دائمة الحدوث، وقد تكون أكثر كثافةً وحدوثاً أثناء توسيع الشبكة مع زيادة عدد الخلايا الصغيرة في الشبكة مراراً وتكراراً، حتى قبل توسيعها فهي لا تزال مهمة، وتستغرق وقتاً طويلاً في الشبكات الخَلَوِيّة. في هذا السياق، تُعَد أمثلة متانة الحركيّة MRO أحد أهم حالات الاستخدام في الشبكات ذاتيّة التنظيم SON. يُعَد تحسين أداء إجرائية التسليم في الشبكات غير المتجانسة في النظام LTE-A، حاجة مُلِحّة لتحسين أداء النظام عامةً. إنَّ هذا التحسُّن له صلة بالمناعة ضد أحداث التسليم غير الضروريّة Unnecessary HO (UHO) مثل تأرجح التسليم (الأخذ والرد) Ping-Pong HO (PPHO) وضد أحداث التسليم غير المرغوب بها مثل تلك الناجمة عن فشل الوصلة الراديويّة Radio Link Failure HO (RLFHO). يؤدي حدوث أحداث التسليم غير المرغوبة وغير الضروريّة إلى زيادة استهلاك موارد الشبكة وانخفاض جودة الخدمة QoS. ويقترح هذا البحث في الفصل الثالث خوارزميّة متينة لتقليل عدد أحداث التسليم غير الضروريّة وغير المرغوبة إلى الحد الأدنى من خلال آليّة مبتكرة تُحدِّد بشكل تكيُّفي ومؤتْمَتْ قيم موسطات التحكُّم بالتسليم، وهي هامش البطاء Hysteresis Margin (HM) والزمن اللازم للقدح Time-To-Trigger (TTT).

ويتجلّى الهدف الرئيس لنشر خلايا فمتويّة وبيكويّة، مع خلايا ماكرويّة في الشبكة غير المتجانسة LTE-A HetNet في تحسين التغطية، وسعة الشبكة، وجودة الخدمة للمستخدمين الذين يطلبون الاتصال وخاصّة مع ازدياد أعدادهم، في الوقت نفسه تصبح الآليّة التقليديّة في تخصيص الموارد الراديويّة للمستخدمين غير فعّالة وغير متناسبة مع تقنيّات تنسيق التداخل المألوفة مثل تقنيّات إعادة استخدام التردد الكسري Fractional Frequency Reuse (FFR) مع الأخذ بالحسبان أنَّ طرائق تخطيط الخلايا الصغيرة عشوائيّة، ولا يكون مركز التحكُّم في الشبكة على معرفة دوريّة بأماكن أو مواقع نَشرِها، فضلاً عن كون مواضع المستخدمين عشوائيّة أيضاً في مراكز مناطق التغطية للشبكة وحوافها، فلا يمكن التنبُّؤ بها لإجراء التخصيص الراديوي المناسب. وهذا يجعل إدارة التداخل وتخصيص الموارد مسألتين مترابطتين تصميميّاً في الشبكات غير المتجانسة. أيَ، تُصبح مَسألة إدارة الموارد الراديويّة أصعب مع ازدياد آثار التداخل خاصّة مع تخطيط أعداد أكبر من الخلايا الصغيرة وازدياد كثافة المستخدمين. جرى في الفصل الرابع مراجعة إستراتيجيّات تخصيص الموارد المستخدمة في الأدبيّات للشبكة غير المتجانسة HetNet في النظام LTE-A. واقتراح مخطَّط لتخصيص الموارد يكون مُنظَّماً ذاتيّاً Self-Organized Reuse Resources Allocation (SORRA) ويعتمد على البحث عن أفضل عنقود إفرادي Best Individual Cluster من الخلايا يحيط بكل مستخدم على حِدة لتنفيذ التخصيص المناسب للموارد المتاحة وفي الوقت نفسه للتقليل

من آثار تداخل الخلايا في الوصلة الهابطة. وتحسين كلٍّ من معدّل الخدمة Service Rate، ومعدّل إنتاجيّة الشبكة Network Throughput.

يتطرّق هذا البحث أيضاً إلى مشكلة تنسيق تداخل الخلايا البيني Inter-cell Interference Coordination (ICIC) في الشبكة LTE-A HetNet المكونة من خلايا ماكرويّة وخلايا صغيرة. عموماً، تهدف الشبكة غير المتجانسة ذاتيّة التنظيم SON، إلى زيادة معدّل الإنتاجيّة، وسعة الشبكة Capacity، وجودة الخدمة للمستخدمين الذين يطلبون الاتصال مع ازدياد أعدادهم في الوقت الحالي، فقد أصبح نشر الخلايا الفمتويّة منخفضة استطاعة الإرسال وربطها بالشبكة مطلباً أساسيّاً للوصول إلى أداء أفضل في الاتصال الخلوي بطريقة يمكن فيها للشبكة SON التعامل مع الظروف المتغيّرة للنظام من حيث طريقة تخطيط الخلايا أو حالة المستخدمين المرتبطين. في هذا السياق، باتتْ الآليّة التقليديّة في تنسيق التداخل والمألوفة مثل تقنيات إعادة استخدام التردد الكسري FFR غير كافية مع ازدحام منطقة الشبكة بالخلايا الفمتويّة وهو الحال الذي سيكون عليه مُستقبَل شبكات النظم الخلوية غير المتجانسة؛ فمن المتوقَّع أن يصبح تخطيط المحطات القاعديّة الفمتويّة Femto Base Station (FBS) عشوائيّاً لكون تخطيطها سوف يكون على عاتق المستخدم في الأغلب، فلا يكون مركز التحكُّم في الشبكة على معرفة دوريّة بأماكن أو مواقع نشرها، فضلاً عن كون مواقع المستخدمين عشوائيّة أيضاً. وهكذا، يجب أن تكون الشبكة قادرة على إعادة تنظيم عملها ليتكيّف مع الوضع النسبي لشبكة الخلايا الفمتويّة، وهذا يجعل تنسيق التداخل وإدارة تخصيص الموارد مترابطين تصميميّاً في النظام LTE-A HetNet. أي تصبح مسألة إدارة الموارد الراديويّة أصعب مع ازدياد مستوى التداخل المشترك الذي يحصل بين مستخدم خليّة فمتويّة ما في الشبكة و إشارات تداخل ناتجة عن خلايا فمتويّة أخرى موجودة في جوار الخليّة الفمتويّة المُخدِمة، خاصة مع تخطيط أعداد متزايدة من الخلايا الفمتويّة وازدياد كثافة المستخدمين نسبةً إلى المساحة الجغرافية التي تغطيها الشبكة غير المتجانسة. يعرض الفصل الخامس، إستراتيجيّات تنسيق التداخل المستخدمة في الأدبيات للنظام LTE-A HetNet. ويقترح مخطّطاً لتنسيق التداخل مبنياً على آليّة التحكُّم باستطاعة الإرسال لمجموعة معينة من الخلايا الفمتويّة في الشبكة باعتماد تقنية إعادة الاستخدام الترددي الكسري المرن Soft Fractional Frequency Reuse (SoFFR) في تخصيص الموارد الراديويّة، وعلى التوازي، يعرّف مفهوم عنقود التداخل Interference Cluster الذي يكون له مواصفات محددة وتكون الخليّة الفمتويّة المراد التحكم باستطاعتها موجودة في مركز العنقود لتحقيق هدف رئيسيَ وهو الوصول إلى الحد الأدنى من مستوى تداخل إشارات الخلايا الفمتويّة في حالة إرسال الوصلة الهابطة؛ لتخفيض مستوى التداخل في الشبكة. ويقتضي ذلك رفع نسبة استطاعة الإشارة المفيدة إلى استطاعة الضجيج والتداخل Signal to Noise plus Interference Ratio (SINR)، وبالتالي تحسين كل من معدّل إنتاجيّة الشبكة وسعتها.

أهداف البحث

يهدف هذا البحث إلى تطوير خوارزميّات وطرائق تعتمد على تقانات الشبكات ذاتيّة التنظيم SON من أجل إدارة وتحسين أداء الشبكات غير المتجانسة HetNets في نظام التطوّر طويل الأمد المتقدّم LTE-A، لتحسين أداء النظام من خلال زيادة سعة الشبكة وإنتاجيّتها، والحد من آثار التداخل، وضمان جودة الخدمة من حيث الحفاظ على قيم مقبولة من معدّل الخدمة Service Rate، وضمان عدم انقطاع الاتصال في أثناء إجراء عمليّات التسليم وتخصيص الموارد.

أهمية البحث

تتجلّى أهمية هذا البحث في جوانب عِدّة أكاديميّة بحثيّة وتطبيقيّة تجاريّة. تستدعي هذه الجوانب مواكبة الأبحاث ذات الصلة التي تثير اهتمام شركات الاتصالات على المستوى المحلّي أو الدولي، وذلك من حيث تطوير منظوماتها ورفع مستوى أداء شبكة الاتصال الخَلَوي لتلبية الطلب المتزايد على معدّلات عالية لنقل المعطيات وتزايد أعداد المستخدمين. فمنذ اقتراح النظام LTE ليكون متاحاً للاستخدام للأغراض التجارية عام 2009 عملَ عدد كبير من الخصائص والتقانات والتطبيقات على تحسينه باستمرار منذ إصداره الأول. وأحد هذه التحسينات كان نظام LTE-A الذي قدَّم الكثير من الميّزات مقارنة بالإصدارات السابقة للنظام LTE. وكان أهمها تقديم مفهوم الشبكات غير المتجانسة HetNets من خلال استخدام تطبيقات الخلايا الصغيرة مثل الخلايا الفمتويّة لتأمين تغطية أفضل مع جودة خدمة أعلى. وترافَقَت هذه التحسينات مع مجموعة من التحدّيات في إدارة وظائف الشبكة التي يجب معالجتها، وهذا شَجَّع شركات الاتصال باستمرار على دعم هذا النوع من الأبحاث لمواجهة تلك التحدّيات وللسير قدماً باتجاه تطبيق وتنفيذ شبكات الأجيال التالية من منظومات الاتصال الخَلَوِي (الجيل الخامس مثلاً). ويجري ذلك من خلال تمويل تلك الأبحاث وتنفيذ دراسات عدّة سواء أكانت دراسات نمذجة ومحاكاة مثل هذا البحث أم دراسات ميدانيّة تجري بالتعاون بين الباحثين وبين المُموّل لفحص الخوارزميّات والنماذج المقترحة.

على سبيل المثال لا الحصر، يصبّ التوجّه الحالي فيما يتعلق بالنظام الخَلَوي في تكثيف نشر الخلايا الفمتويّة 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 رياضيّة أو تجاريّة. فالخلايا الفمتويّة مناسبة جداً هنا وتُعَد حلاً ناجعاً لزيادة سعة الشبكة وتلبية الطلب المتزايد على الاتصال. ولكن تُعَد إدارة وتنسيق التداخل المشترك بين هذه الخلايا التحدّي الرئيس في الشبكات غير المتجانسة HetNets.

مسوغات البحث

لقد فَرَضَ طلب خدمات اتصال ذات جودة أعلى الكثيرَ من التحديات على النظم اللاسلكيّة. وانطلاقاً من أهميّة هذا البحث فقد جرى تطوير النظام LTE لتلبية الطلب المتزايد على معدّل نقل معطيات

عالٍ من خلال استخدام الموارد الراديويّة بكفاءة، وذلك عبر مجموعة من التطوُّرات المتلاحقة مثل النظام LTE-A. ولمواجهة تحدّيات تحسين النظام LTE-A، فإنَّ توظيف تقانات الشبكات ذاتيّة التنظيم SON واستخدامها مع الشبكات غير المتجانسة HetNets يساهم إسهاماً كبير في تقليل عبء إدارة وظائف الشبكة من خلال أتمتة المهام الروتينيّة في الشبكة الخَلَويّة بهدف تبسيط وأمْثَلِة إدارة الشبكة و تقليل الاعتماد على العامل البشري، وتحسين الموثوقية وجودة الخدمة وتخفيض النفقات على مُشَغِّلي الشبكة.

مُحدِّدات البحث

يتحدَّدُ هذا البحث من خلال النقاط المركزيّة التالية:

- دراسة وتحليل الطرائق المستخدمة في بناء جدول علاقة الجوار ANR، وتطوير خوارزميّة وفق تقانات SON لأمْثَلِة بناء جدول ANR. وهذه النقطة هي مُحدِّد محتوى الفصل الثاني.
- دراسة وتحليل وتطوير الطرائق المستخدمة في إدارة الحركيّة UMM في الشبكات غير المتجانسة HetNets باستخدام تقانات SON بهدف أمثلة التسليم HO بمعنى التقليل من عمليّات التسليم غير الضروريّة وغير المرغوبة للمستخدمين. وهذه النقطة هي مُحدِّد محتوى الفصل الثالث.
- دراسة وتحليل وتطوير الطرائق المستخدمة في إدارة وتخصيص الموارد المتناسقة Coordinated Resource Allocation في الشبكات غير المتجانسة باستخدام تقانات SON بهدف أمثلة القناة ودراسة إمكانيّة الدمج بين هذه الشبكات والطريقة التقليديّة في أمْثَلِة قناة الاتصال. وهذه النقطة هي مُحدِّد محتوى الفصل الرابع.
- دراسة وتحليل وتطوير الطرائق المستخدمة في إدارة التداخل بين الخلايا وتنسيقها في الشبكات غير المتجانسة باستخدام تقانات SON وذلك بالتنبؤ والتنبيه لحدوث تداخل وتخفيضه أو تجنُّبه للحصول على أداء أفضل. وهذه النقطة هي مُحدِّد محتوى الفصل الخامس.

حدود البحث

تتجلّى محدودية هذا البحث فيما يلي:

- الحصول على نتائج البحث من خلال النمذجة والمحاكاة.
- فحص أداء الخوارزميّات المقترحة وإقرار صلاحيّة النتائج Validation من خلال مقارنتها بالأعمال ذات الصلة وبالخوارزميّات التقليديّة.
- فرضيّات المحاكاة بالاستناد إلى طوبولوجيا الشبكة وموسِطات تشغيل نظام الاتصال المستخدمة في الأدبيّات ذات الصلة.
- فرضيّات مواضيع البحث والفرضيّات الموافقة بالأخذ بالحسبان أنَّ كل مُحدِّد من مُحدِّداته مسألة ليست ذات حدود واضحة مع باقي المُحدِّدات، ولهذا فإنَّ مشكلات هذا البحث تمثِّل بنوداً مترابطة وتتقاطع أهدافها مع مشكلات أبحاث أخرى.

منهج البحث وأدواته

اعتُمِدَ في هذا البحث مَنْهَجِيَّتَا التحليل والنمذجة الوضْعيّة لدراسة موضوع البحث وتحقيق أهدافه من خلال استخدام أدوات الأبحاث والكتب المنشورة في المجلات العلميّة ودور النشر ومواقع الإنترنت وتقارير الهيئات الناظمة للاتصالات وتقارير المجموعات البحثيّة والمُطوِّرِيْن. كما استند هذا البحث إلى أداة المحاكاة عبر الحاسوب للحصول على نتائج تطبيق الخوارزميّات والطرائق المقترحة ومقارنتها بالأعمال ذات الصلة من خلال رسم مُنحنيات وتشكيل جداول نتائج مؤشِّرات الأداء باستخدام منصّة ماتلاب MATLAB كونها برمجيّة محاكاة أساسيّة مستخدمة كثيراً في نطاق هذا البحث، كما تشير معظم الدراسات المرجعيّة، خاصة وأنَّها توفّر بيئة عمل مرنة وسريعة التنفيذ؛ وتتيح مرونة في توصيف نماذج الشبكة وموسطات النظام المدروس وتعيينها؛ فضلاً عن سهولة الحصول على النتائج.

النتائج التطبيقيّة المتوقّعة من البحث والجهات المستفيدة منها

تَظهرُ نتائجُ التطبيق العملي للبحث من خلال تحسين السعة وجودة الخدمة في الشبكات غير المتجانسة في النظام LTE-A، وذلك من خلال دعم هذه الشبكات بتقانات الشبكات ذاتيّة التنظيم SON، وذَلك جنباً إلى جنب مع توفير النفقات لمُشَغِّلي الشبكات وتقليل الاعتماد على العامل البشري من خلال أتمتة إجرائيات علاقات الجوار وعمليات التسليم بين الخلايا وتخصيص الموارد وتنسيق التداخل بين الخلايا للوصول إلى أفضل أداء ممكن.

تستفيد من هذا البحث شركات الاتصالات المحليّة بتجريب الخوارزميّات المقترحة والتحقّق من نتائجها وتحسينها بمرونة ويسر كافيين لأن هذا البحث يتطرَّق بكثير من التفصيل إلى إعدادات الشبكة وتعيين موسِطاتها، ويقترح كل محدِّد من محدِّداته آليّة تعديل النماذج التقليديّة لإعدادات النظام والتحكُّم بهدف تسجيل النتائج على أرض الواقع ودراسة ما يمكن الحصول عليه من بياناتها التجريبيّة. إنَّ النماذج المقترحة في هذا البحث قابلة للتطبيق على أي نظام خلوي متقدم، إضافة إلى إمكانيّة تطبيقه في منظومات الجيل الخامس أو تطبيقه في المراحل الأولى لعملية تطوير وانتقال حالة الشبكة من الجيل الرابع إلى الجيل الخامس كما يتوقَّع أن يكون مطلوباً من مُشغِّل الاتصالات الخلويّة "وفا" الحديث في الجمهوريّة العربيّة السوريّة. وعلى التوازي، توفّر مجمل الخوارزميّات المقترحة إطاراً تطبيقيّاً عامّاً للنظام LTE-A وإمكانيّة تطبيقه على أي شبكة غير متجانسة.

الأبحاث المنشورة

1- نُشِرَتْ مقالة أولى بعنوان:

" تطوير خوارزميّة علاقة الجوار التلقائي في شبكات التنظيم الذاتي SON في نظام LTE "

جرى تحكيمها وقبولها للنشر في مجلة جامعة البعث للعلوم الهندسية برقم /3180/ وتاريخ 2020/12/03 وجرى النشر في المجلد /42/ لعام 2020.

2- نُشِرَت مقالة ثانية بعنوان:

"A Robust Self-Optimization Algorithm based on idiosyncratic Adaptation of Handover Parameters for Mobility Management in LTE-A Heterogeneous Networks"

في المجلة IEEE Access ذات التصنيف الربعي Q1.

يرجى ذكر هذه المقالة عند استخدامها مرجعاً على النحو التالي:

T. A. Achhab, F. Abboud and A. Assalem, "A Robust Self-Optimization Algorithm Based on Idiosyncratic Adaptation of Handover Parameters for Mobility Management in LTE-A Heterogeneous Networks," in IEEE Access, vol. 9, pp. 154237-154264, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3127326.

3- قُبِلتْ مقالة ثالثة للنشر بعنوان:

"خوارزميّة تمييزيّة لتخصيص الموارد ذاتيّة التنظيم بناءً على مخطّط إعادة استخدام التردّد الجزئي لتحسين معدّل الخدمة والإنتاجيّة في شبكات LTE-A الهجينة"

جرى تحكيمها وقبولها للنشر في مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية برقم /4060/ وتاريخ 2022/06/05

4- قُبِلتْ مقالة رابعة للنشر بعنوان:

"خوارزميّة مُعمّمة لتنسيق التداخل بطريقة عنقدة خلايا فمتويّة فائقة الكثافة في الشبكات غير المتجانسة في نظام التطوّر طويل الأمد المتقدّم باعتماد آليّة التحكم في الاستطاعة"

جرى تحكيمها وقبولها للنشر في مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية برقم / 5454/ وتاريخ 2022/10/16

الفصل الأول

الأساسيّات النظريّة المرتبطة بالبحث

Theoretical Basics Related to Research

الفصل الأول

الأساسيّات النظريّة المرتبطة بالبحث

يستعرضُ هذا الفصل إطاراً نظريّاً للنظام LTE بنسخته المُطوَّرة LTE-A، وتُستَوفَى فيه أهم المواضيع الفرعيّة ذات الصلة بالبحث، مثل مواصفات قناة الاتصال وواجهات النفاذ الراديوي وخصائص الإرسال والاستقبال، وبُنية الشبكة الخَلَوية غير المتجانسة. يُقدّمُ هذا الفصل أيضاً مدخلاً إلى مفهوم الشبكات ذاتيّة التنظيم SON باعتبار التنظيم الذاتي سِمة واعدة للشبكات غير المتجانسة HetNets في النظام LTE-A وحلاً ممكناً لعدد من مشاكلها العالقة.

1.1 تطوّر نظم الاتصالات الخلويّة والنقَّالة

بدأت نظم الاتصالات الخلويّة والنقَّالة جيلها الأول 1G في بداية الثمانينيات، حيث كانت تستخدم تقنيات الإرسال التماثلي، وتمثّلت الخدمة الأساسية لهذا الجيل في تأمين المحادثات الصوتية. ظهر بعدها في بداية التسعينيات من القرن العشرين الجيل الثاني 2G ويتمثّل الاختلاف الأساسي لهذا الجيل عن سابقه في اعتماده الإرسال الرقمي عوضاً عن الإرسال التماثلي؛ فأصبح بإمكان المستخدمين تبادل المعطيات (الرسائل مثلاً) وإجراء المحادثات الصوتية [32].

ترافق نجاح نظم الجيل الثاني مع تطور الإنترنت؛ مما حفّز الشركات المشغّلة للشبكة Operators إلى دمج إمكانية الاتصال مع تأمين خدمة الإنترنت، فأُضيف نتيجة لذلك العديد من التحسينات على نظم الجيل الثاني كإضافة الشبكة النواة ذات الابتدال بالرزم Packet switched core network وتعديل التقنيات المستخدمة في واجهة التواصل الهوائية Air Interface. وظهر نتيجة لهذه التعديلات الجيل الثاني والنصف 2.5G الذي يعتمد على خدمة التراسل الراديوي الرُزَمي العامّة General Packet Radio Service (GPRS) التي اعتمدت إضافة للتحسينات السابقة على شبكات المنظومة العالمية للاتصالات النقّالة GSM [32].

لجأ المصممون مع ازدياد معدلات المعطيات عبر شبكات الإنترنت لإضافة بعض التحسينات على نظم الجيل الثاني باستخدام تقنية معدلات المعطيات المُحسَّنة لتطوير المنظومة العالميّة للاتصالات النقّالة Enhanced Data rates for GSM Evolution(EDGE)، وقد ظهر بعدها في بداية عام 2000 نظم الجيل الثالث 3G مستخدمة تقنيات إرسال واستقبال تختلف عن تلك المستخدمة في الجيل الثاني، إذ جرى تطوير النظام العالمي للاتصالات النقالة Universal Mobile Telecommunication System (UMTS) ويُعَد هذا النظام أحد النظم المسيطرة في الجيل الثالث الذي تطوّر عن نظام GSM بالتغيير

التام للتقنية المستخدمة في واجهة التواصل الهوائية، واعتمد على تقنية النفاذ المتعدد باقتسام الرمز عريض المجال(Wideband Code Division Multiple Access (WCDMA مع الحفاظ على نفس بنية شبكة النواة تقريباً. وجرى تحسين هذا النظام لاحقاً ليلائم معدلات نقل أعلى للمعطيات فظهرت تقنيات الجيل الثالث والنصف 3.5G المعروفة بتقنيات النفاذ الرزمي عالي السرعة High Speed Packet Access (HSPA). وظهرت أخيراً شبكات واي ماكس Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMax) التي تُعَدُّ آخر تقنيّات الجيل الثالث. وجرى تطوير معايير شبكات WiMax بواسطة معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات IEEE تحت مسمى المعيار802.16، وتتميز هذه الشبكة بمعدل نقل مرتفع للمعطيات ودعم الحركيّة وتغطية مساحة جغرافية كبيرة نسبياً. تقسم شبكات WiMax إلى صنفين رئيسين أولهما الشبكات الثابتة وفق المعيار IEEE 802.16d-2004 التي لا تدعم عملية التنقُّل والتسليم بين المحطّات القاعديّة، وصُمِّمَت لتقديم الخدمة للأماكن الثابتة. وثانيهما الشبكات النقَّالة وفق المعيار IEEE 802.16e- 2005 التي أتاحت للمستخدم عملية التنقُّل بين المحطات القاعدية [32].

بدأ استخدام الأجهزة النقَّالة في تبادل المعطيات بالتزايد على نحو ملحوظ مع بداية ظهور تقنيّة النفاذ الرُزَمي عالي السرعة HSPA في الجيل الثالث للشبكات الخلويّة، وتسمح الحركيّة للمستخدمين بالاتصال مع خدمات المشغّل بما فيها الإنترنت أينما ذهبوا بحيث يبقون على اتصال مع الشبكة أثناء حركيتهم. وصُمّمت النظم الخلوية السابقة؛ التي تتضمن نظم الجيل الثاني كنظام GSM ونظم الجيل الثالث كنظام UMTS؛ لتحسين أداء الشبكات من حيث نقل الصوت والمعطيات لكنّها كانت مكلفة تقريباً. أصبحت الحاجة ملحّة مع هذا التزايد الهائل لتطوير جيل قادم للنظم الخلوية يؤمّن معدّلات وسرعات أكبر لنقل المعطيات من تلك التي تقدمها نظم HSPA، إضافة لكونها أكثر فاعليّة في استغلال المجال الترددي المتاح وأقل كلفة من وجهة نظر المُشغِّل. نَتَج عن المتطلّبات المذكورة آنفاً دراسات وأبحاث تتعلق بإصدار جيل رابع للنظم الخلوية، وكان المطلب الأساسي لهذا الجيل القدرة على استيعاب حركة المعطيات المتزايدة، وتقديم أفضل أداء على المدى الطويل، ومن هنا ظهرت شبكات التطور طويل الأمد LTE.

بدأت ورشة تطوير شبكات النفاذ الراديوي في مشروع شراكة الجيل الثالث Access Network Evolution 3GPP Radio عملها عام 2004 من أجل إيجاد معايير لتقنية التطور طويل الأمد، وقدّمت الورشة بالنتيجة دراسة مفصّلة لتطوير إطار العمل وتحديد الأهداف المتعلقة بهذه التقنية.

يمثّل مشروع شراكة الجيل الثالث 3GPP نتاج التعاون بين مجموعات من جماعات الاتصالات السلكية واللاسلكية والمسؤولة بدورها عن وضع المعايير المتعلقة بنظم الاتصالات مثل European Telecommunications Standards Institute (ETSI) في أوروبا و(ATIS) American Standards Telecommunication Institute في جنوب أمريكا. تعد شبكات التطور طويل الأمد LTE

كمثيلاتها من تقنيات الأجيال السابقة مثل GSM وUMTS إحدى شبكات عائلة مشروع شراكة الجيل الثالث 3GPP التي تخدّم ما يقارب 90% من مشتركي الخدمة عالمياً.

تختلف شبكات الجيل الرابع بمقارنتها بشبكات الجيلين الثاني والثالث بالكثير من الأمور تتمثّل في البنية والتصميم والتخطيط وأساسيّات النفاذ. وجَرَى إكمال المعايير الخاصة بشبكات LTE في شهر آذار عام 2009 بواسطة مشروع شراكة الجيل الثالث 3GPP بإصداره الثامن Release 8 (Rel.8). وتختلف هذه الشبكات عن الإصدارات السابقة في بنية النفاذ الراديوي للشبكة وأصبحت وظائف التحكم الراديوي من مسؤولية المحطّة القاعديّة eNB عوضاً عن استخدام كينونة خاصة للتحكُّم المركزي.

تختلف أيضاً شبكات LTE عن سابقاتها بواجهة النفاذ الراديوي؛ إذ تعتمد تقنية النفاذ المتعدد باقتسام التردد المتعامد Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) في الوصلة الهابطة وتقنية النفاذ المتعدد باقتسام التردد وحيد الحامل Single Carrier–Frequency Division Multiple Acces (SC-FDMA) في الوصلة الصاعدة وذلك انطلاقاً من خصائصهما الجيدة من حيث المرونة في استخدام عرض المجال وتخصيص الترددات. وتعتمد بنية شبكات LTE اعتماداً كاملاً على بروتوكول الإنترنت Internet Protocol (IP) بحيث يستخدم أيضاً في نقل الصوت عبر شبكات تبديل الرزم Voice Over Internet Protocol (VOIP).

من الجدير ذكره هنا أن شبكات LTE لم تحقق الشروط والمتطلّبات الموصفة في المعيار، وقد جرى اعتمادها إضافةً لشبكات WiMax الجيل 3.9G كآخر الأجيال قبل الوصول للجيل الرابع الذي يتمثل عملياً بشبكات LTE-A، وهو يوافق الإصدار العاشر Rel.10 الذي قدَّم الكثير من التحسينات والميّزات مقارنة مع الإصدارات السابقة للتطور طويل الأمد LTE.

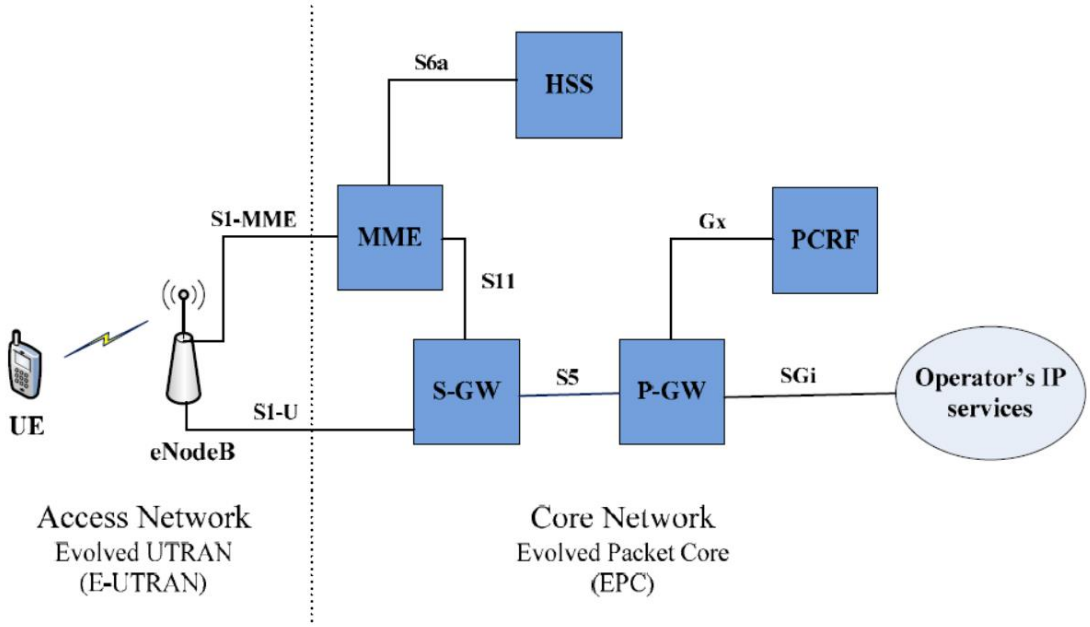
أصدر مشروع شراكة الجيل الثالث 3GPP معايير تتعلق بالتحسينات، فجرى إدخال العديد من التحسينات على بنية الشبكة، واستخدام تقنيّة تعدُّد الهوائيّات، وتقنيّة OFDMA لزيادة معدل الإرسال، أما على مستوى الشبكة فقد جرى إضافة العديد من أنواع الخلايا نذكر منها الخلايا الفمتويّة Femto Cells والبيكويّة Pico Cells وذلك ضمن حيّزات الخلايا الأكبر وهي الخلايا الماكرويّةMacro Cells لتأمين تغطية أفضل للمستخدم تترجم باستطاعة الإشارة المستقبلة عند كل مستخدم والتي تحدد بشكل رئيسي معدل الخطأ وسرعة النقل، كما جرى إضافة المحطّات القاعديّة المنزليّة التي تخدّم هذه الشبكات، وأطلق عليها اسم المحطات القاعدية المحسَّنة المنزليّة Home evolved Node Base Station (HeNB) وهي محطّات قاعديّة تعمل بالمجال الترددي المرخّص وباستطاعة أقل من المحطّات القاعديّة الماكرويّة. وتُنشَر هذه المحطات داخل الأبنية والأماكن المزدحمة لتحسين التغطية وزيادة السعة ومعدلات النقل.

إن هذه المتطلّبات لمُشغِّلي الشبكات الخلويّة لتطوير شبكاتهم وتحقيق النظام LTE-A مع وجود بنية متعدّدة الطبقات Multi-Layer ومع تكامل هذه النظم الجديدة مع النظم الموجودة Other-RAT،

سيجعل البنية التحتيّة للشبكة أكثر تعقيداً؛ ما يشكل عبئاً على المُشغِّل في إدارة هذه الشبكات من حيث جهد العمل والنفقات المطلوبة خلال المراحل التشغيلية للشبكة. وبالتالي جرى دعم هذه الشبكات غير المتجانسة في نظام LTE-A بالشبكات ذاتيّة التنظيم SON لتبسيط إدارة الشبكة وتحسين أداء الشبكة وتخفيض النفقات التشغيلية. ويمكن القول إنَّ شبكات HetNets وشبكات SON تعد التطوّرات الأساسيّة المهيمنة في النظام LTE-A [32].

2.1 بُنية شبكات التطور طويل الأمد LTE

صُمِّمَ النظام LTE بواسطة مجموعة مشروع شراكة الجيل الثالث 3GPP، وطُرِحَ لأوّل مرة في الإصدار الثامن من تقارير مواصفات مجموعة 3GPP لعام 2008. ويستندُ تطوير النظام LTE إلى نسخة سابقة لنظام خَلَوي من مجموعة 3GPP معروفٌ باسم النظام العالمي للاتصالات النقّالة UMTS [31]. يبيّن الشكل 1-1 معماريّة نموذجيّة لنظام LTE. وتتألف بنية النظام LTE من ثلاثة أجزاء رئيسية هي: تجهيزة المستخدم UE وشبكة النفاذ الراديوي المطَّورة E-UTRAN ونواة رزم البيانات المطوَّرة Evolved Packet Core (EPC). يوضّح الجدول 1-1 إصدارات مواصفات طرحتها مجموعة 3GPP لكل من النسخة UMTS والنسخة LTE [32]. في حين قُدِّمَ النظام LTE-A في الإصدار العاشر الذي يعزز قدرات نظام الاتصال الرئيس LTE. تتميز بنية الجيل الرابع بأنها تعتمد اعتماداً رئيساً وكلياً على البروتوكول IP سواء في نواة الشبكة Core Network أم في شبكة النفاذ.



الشكل 1-1: بنية نموذجية لنظام LTE [32].

الجدول 1—1: إصدارات مواصفات مجموعة 3GPP [31].

Release	Data frozen	New features
R99	March 2000	WCDMA air interface
R4	March 2001	TD-SCDMA air interface
R5	June 2002	HSDPA, IP multimedia subsystem
R6	March 2005	HSUPA
R7	December 2005	Enhancements to HSPA
R8	December 2008	LTE, SEA
R9	December 2009	Enhancements to LTE-Advanced
R10	June 2011	LTE-Advanced
R11	June2013	Enhancements to LTE-Advanced
R12	September 2014	Enhancements to LTE-Advanced

يُظهرُ الشكل 1−1 تضمَّن بنية النظام LTE جزأين أساسيّين هما شبكة النفاذ التي تحتوي على المحطّات القاعديّة eNB ونواة رزم البيانات المطوّرة EPC التي تحتوي على كينونة إدارة الحركيّة Mobility Management Entity (MME)، وبوابة الخدمة Serving Gateway (S-GW) وخادم المشترك المنزلي Home Subscriber Server (HSS)، وشبكة رزم البيانات Packet Data Network (PDN)، والبوابة Gateway (P-GW)، ووحدة وظيفة سياسة الرسوم والقواعد Policy Charge and Rules Function (PCRF) [32]. تعمل كل محطّة قاعديّة eNB كمحطّة أساسيّة تدير عمليات ووظائف تجهيزات المستخدمين UEs. وتعمل بوابة الخدمة S-GW كجهاز توجيه عالي الدرجة وتنقل المعطيات بين المحطة القاعديّة وبوابة PDN. يجري تخصيص كل تجهيزة مستخدم مع بوابة S-GW واحدة، ولكن يمكن تعديل S-GW المرتبطة به إذا تحركت تجهيزة المستخدم بعيداً بشكل كافٍ عن موقع المحطة القاعديّة [32]. تُعد كينونة إدارة الحركيّة MME مسؤولة عن قضايا اتصال من المستوى الأعلى للمستخدمين مثل سياسة الخصوصية وأمن المعطيات وإدارة تدفُّقات المعطيات عبر الشبكة [32]. ويعمل خادم المشترك المنزلي HSS كقاعدة بيانات مهيمنة تخزن معلومات عن مشتركي مُشغِّل الشبكة. وتستخدم النواة EPC بوابة شبكة رزم البيانات P-GW للاتصال بشبكات رزم المعطيات الخارجية. وتستخدم كل بوابة PDN واجهة SGi لتبادل المعلومات مع جهاز خارجي واحد أو أكثر أو مع شبكات بيانات رزم PDN أخرى [32]، مثل خوادم مُشغِّل الشبكة، خوادم الإنترنت... إلخ.

3.1 بنية كتلة الموارد وهيكلية الإطار في نظام LTE

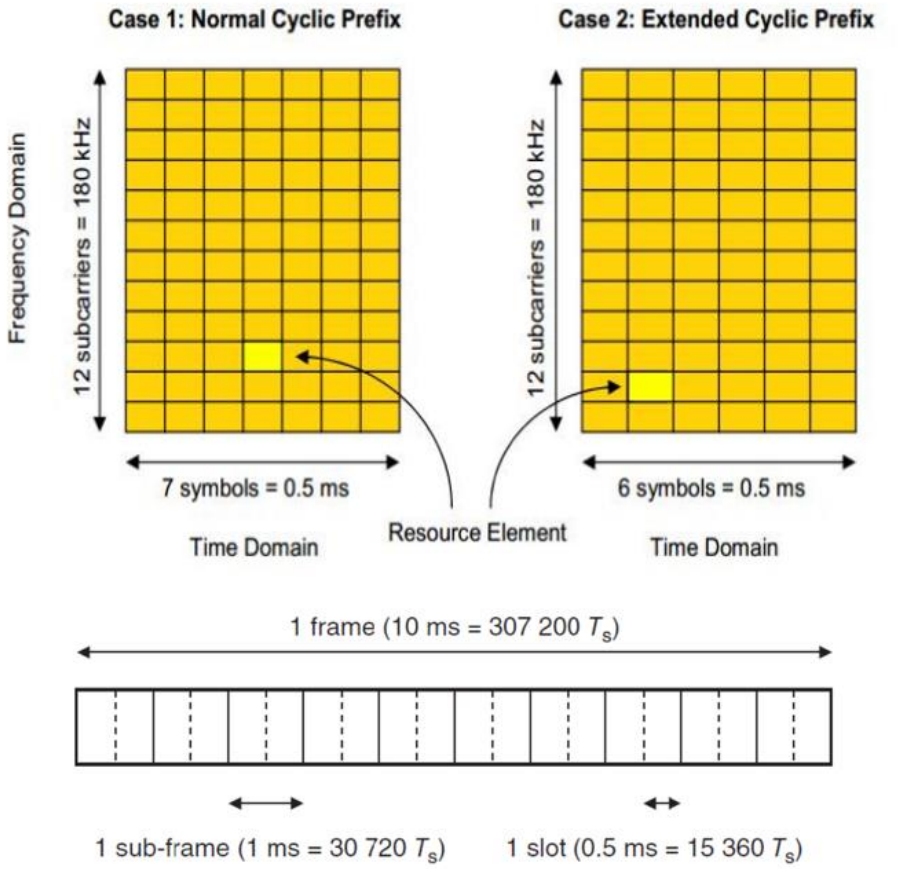
تُستخدَم في نظام LTE تقنية النفاذ المتعدد باقتسام التردد المتعامد OFDMA، تعتمد OFDMA على تقنية التجميع باقتسام التردد المتعامد OFDM المنتشر بشكل واسع في الشبكات اللاسلكية، حيث تقسم القناة عريضة المجال انتقائية التردد Frequency-selective في التجميع باقتسام التردد المتعامد إلى حوامل جزئية Subcarriers ضيقة المجال غير انتقائية التردد، تتراكب هذه الحوامل الترددية متعامدة دون

الحاجة إلى مجالات الحماية guard bands بينها؛ ما يزيد الكفاءة الطيفية. في تقنية OFDMA يجري الحصول على وحدة الموارد الراديوية بتقسيم قناة الإرسال إلى قنوات جزئية عدة، كل منها بحامل مستقل؛ ما يسمح بإرسال حجم معطيات أكبر عبر نفس القناة.

تُنظَّم الموارد الراديوية في منظومات التطور طويل الأمد LTE ضمن وحدات من عناصر الموارد Resource Elements (REs) التي تُجمَع بدورها ضمن كتل موارد راديوية RBs معرَّفة زمنيّا وترددياً. وتعد كتلة الموارد RB أصغر وحدة للموارد يمكن تخصيصها للمستخدم أثناء عملية الجدولة scheduling، وتتألف من 12 حاملاً ترددياً جزئياً (بمجموع 180 كيلو هرتز وفواصل ترددية 15 كيلو هرتز) مخصصاً لحيّز زمني واحد مدته 0.5 ميلي ثانية [31]. وتكون المدة الزمنية لرمز OFDM هي 66.67 ميكرو ثانية، ويجري منع التداخل بين رموز OFDM بإلحاق بادئة دورية cyclic prefix (CP) بعد كل رمز OFDM أو رمز SC-FDM. هناك نوعان من البادئة الدورية بحسب مدتها؛ النوع الأول البادئة الدورية الطبيعية normal CP وتساوي مدتها 4.7 ميكرو ثانية، والنوع الثاني البادئة الدورية الموسَّعة extended CP وتساوي مدتها 16 ميكرو ثانية.

تجمّع الموارد زمنيّاً ضمن أُطُر كل منها بطول 10 ميلي ثانية، وكل إطار مقسَّم بدوره إلى عشرة أُطُر جزئيّة مدتها ميلي ثانية واحدة مقسّمة إلى حيّزين زمنيّين كل منهما 0.5 ميلي ثانيةً وهي تكافئ زمن سبعة (أو ستة) رموز OFDM. كتلة الموارد RB تتألف من 84 عنصر موارد RE في حالة البادئة الدورية الطبيعية و72 عنصر موارد في حالة البادئة الدورية الموسعة. يبين الشكل 1-2 تقسيم الأطر وكتل الموارد الراديوية في منظومة التطور طويل الأمد LTE [31].

يقوم مُجدول الموارد Scheduler الموجود ضمن طبقة التحكم بالنفاذ MAC في المحطّة القاعديّة بجدولة كتل الموارد كل 1 ميلي ثانية، ولهذا السبب فإن زمن التأخير بين الطبقة MAC والطبقة الفيزيائيّة لدى كل من المحطّة القاعديّة والنقّالة هو TTI=1 ms. إنّ من أهم ميّزات نظم LTE مرونتها بالتعامل مع المجال الترددي وإدارته، حيث يمكن للوصلة الهابطة أن تتألف من مجموعة من كتل الموارد، يتراوح عددها من 6 إلى 100 كتلة موارد، وهذا يمكّن المشغّل من التعامل مع عرض مجال بخيارات متعدّدة (من 1.4 ميغا هرتز إلى 20 ميغا هرتز) كما يوضّحه الجدول 1-2.



الشكل 1–2: المدة الزمنية لإطار LTE باستخدام بادئة دورية طبيعية وموسعة.[31]

الجدول 1—2: عدد كتل الموارد الموافقة لعرض المجال المستخدم في نظام LTE (الباحث).

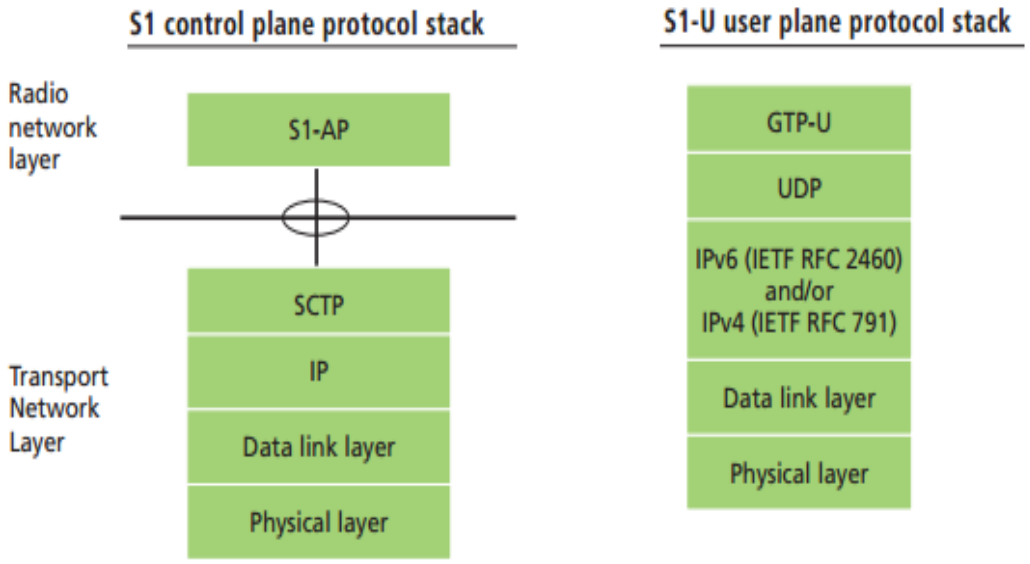
عرض المجال MHz	1.4	3	5	10	15	20
عدد كتل الموارد الموافق	6	15	25	50	75	100

4.1 واجهات شبكة النفاذ الراديوي E-UTRAN

1.4.1 الواجهة S1

تربط هذه الواجهة المحطّة القاعديّة BS مع الشبكة النواة EPC. وتُقسم هذه الواجهة إلى واجهتين إحداهما مسؤولة على مستوى التحكُّم Control Plane، والأخرى على مستوى المستخدم ومعطياته User Plane [31]. يبيّن الشكل 1–3 بروتوكولات الواجهة S1 على مستوى التحكُّم التي تعتمد على كدسة البروتوكولات IP/SCTP المعروفة، مضافاً لها البروتوكول S1-AP المسؤول عن تأمين خدمات التشوير Signaling Services بين شبكة النفاذ الراديوي والشبكة النواة التي تتضمن بدورها مجموعة من الوظائف منها إدارة الحوامل الترددية، ووظائف تتعلق بإدارة الحركيّة ونقل المعلومات المتعلقة بحالة تجهيزة المستخدم UE وموضعها ونقل الإعدادات. أمّا بنية البروتوكولات على مستوى

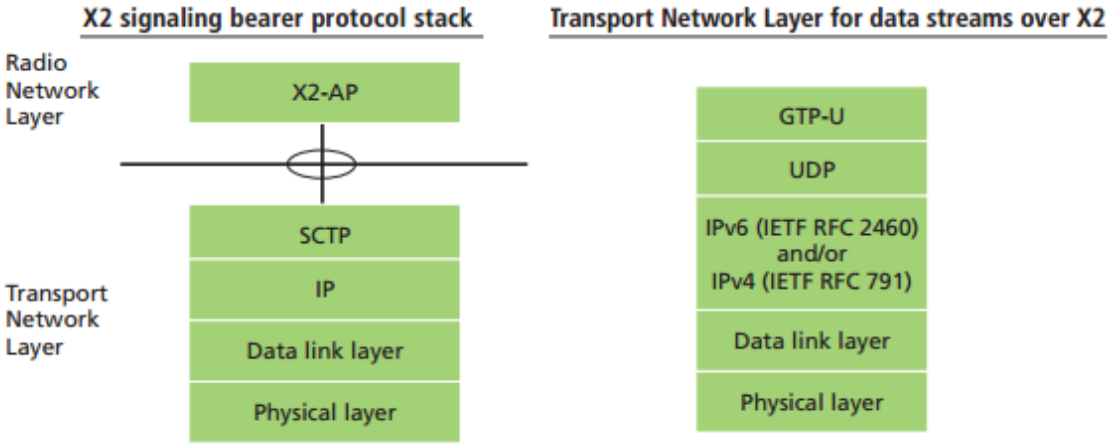
المستخدم فتعتمد على كدسة البروتوكولات GTP/UDP/IP كما هو موضّح بالشكل 1–3. تتضمّن هذه البنية البروتوكول GPRS Tunneling Protocol-User Plane (GTP-UP) الذي يؤمّن الوظائف التي تتعلق بتأسيس قنوات لنقل الرزم ودعم الحركيّة بين شبكات 3GPP.



الشكل 1–3: كدسة البروتوكولات للواجهة S1 على مستويي التحكم والمستخدم.

2.4.1 الواجهة X2

تستخدم هذه الواجهة لربط المحطات القاعدية مع بعضها. يبيّن الشكل 1–4 كدسة البروتوكولات للواجهة X2. إنّ كدسات البروتوكولات لكلا مستويي التحكم والمستخدم للواجهة X2 هي ذاتها المعتمدة في الواجهة S1 مع استخدام البروتوكول X2-AP عوضاً عن البروتوكول S1-AP. من الوظائف التي يؤمّنها البروتوكول X2-AP إدارة الحركيّة والحمل ما بين المحطات القاعدية، وتحديث إعدادات المحطات القاعدية، وتحضير وتنفيذ إجرائيات التسليم إضافة لتنسيق مشاكل التداخل [31].



الشكل 1–4: كدسة البروتوكولات للواجهة X2 على مستويي التحكم والمستخدم.

5.1 نظام التطور طويل الأمد المتقدم LTE-A

منذ إطلاق نظام التطور طويل الأمد LTE ممثلاً بالإصدار الثامن عام 2008 واصل مشروع شراكة الجيل الثالث 3GPP العمل على تحسينه باستمرار، وأحد هذه التحسينات كان نظام LTE-A وجرى نشر المواصفات الخاصة بهذا النظام عام 2011 بالإصدار العاشر Release10 الذي قدم الكثير من التحسينات مقارنة بالإصدارات السابقة كما يبين الشكل 1−5. إن نظام LTE-A هو تحسين مستمر لنظام التطور طويل الأمد LTE مع الحفاظ على التوافقية مع الإصدارات السابقة. يمكن تلخيص متطلبات نظام LTE-A بما يلي [31]:

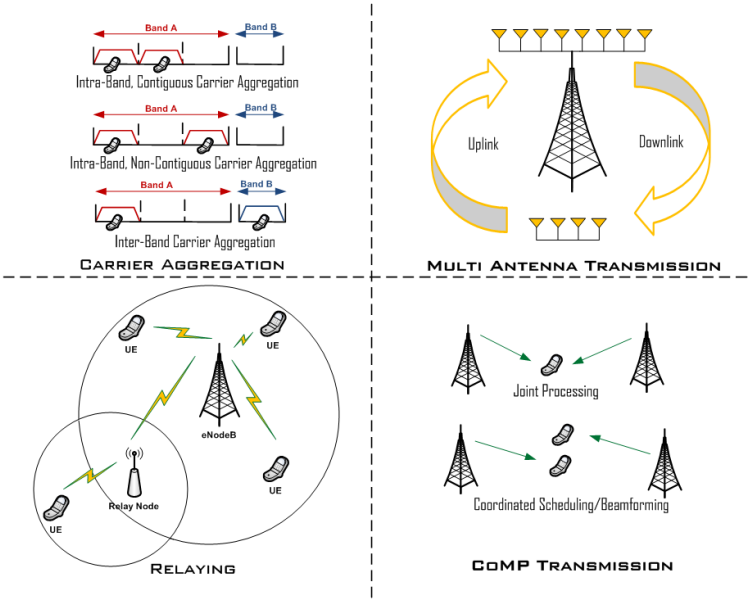
- يجب أن يدعم نظام LTE-A معدل معطيات أعظمي في الوصلة الهابطة 1Gbps وفي الوصلة الصاعدة 500Mbps.
- الكفاءة الطيفية العظمى: يجب أن يدعم النظام كفاءة طيفية أعظمية تصل إلى 30bps/Hz في الوصلة الهابطة وذلك بافتراض وجود مصفوفة هوائيات 8×8 وكفاءة طيفية أعظمية تصل إلى 15bps/Hz في الوصلة الصاعدة بافتراض مصفوفة هوائيات 4×4.
- متوسط الكفاءة الطيفية: يجب أن يدعم النظام متوسط كفاءة طيفية تصل إلى 3.7bps/Hz في الوصلة الهابطة وذلك بافتراض وجود مصفوفة هوائيات 8×8 ومتوسط كفاءة طيفية تصل إلى 2bps/Hz في الوصلة الصاعدة بافتراض مصفوفة هوائيات 4×2.
- الكفاءة الطيفية عند حافة الخلية: يجب أن يدعم النظام كفاءة طيفية أعظمية تصل إلى 0.12bps/Hz في الوصلة الهابطة بافتراض وجود مصفوفة هوائيات 4×4 وكفاءة طيفية أعظمية تصل إلى 0.07bps/Hz في الوصلة الصاعدة وذلك بافتراض مصفوفة هوائيات 4×2.

لتحقيق هذه المتطلبات جرى إضافة بعض التحسينات على الطبقة الفيزيائية في نظام LTE-A ومنها:

- تجميع الحامل Carrier Aggregation: يدعم نظام LTE-A تجميع حوامل ترددية متجاورة أو غير متجاورة لتوفير عرض مجال يصل إلى 100MHz لتجهيزة المستخدم UE في كلا الوصلتين الصاعدة والهابطة. إنّ العدد الأعظمي للحوامل الترددية التي يمكن تجميعها هو 5 بعرض مجال 20 ميغا هرتز لكل منها، ويمكن الوصول إلى عرض مجال أعظمي يصل إلى 100MHz للمستخدم. ولا يشترط أن تكون الحوامل الترددية بنفس عرض المجال أو من نفس المجال الترددي، إن هذه الميزة تمكن المشغلين من استخدام مجالات أو تراخيص متعددة لتحقيق ذروة سرعة معطيات أعلى بكثير مما يمكن تحقيقه مع القنوات المفردة، على سبيل المثال إن تجميع عدّة قنوات 20MHz يمكن أن يحقق ذروة سرعة معطيات تصل إلى 1Gbps. يوجد ثلاثة أنماط من تجميع الحوامل في نظام LTE-A نمط intra-band contiguous allocation، وفيه يجري تجميع حوامل ترددية متجاورة بالطيف تقع ضمن المجال

الترددي نفسه، ونمط intra non-contiguous allocation وفيه يجري تجميع حوامل ترددية متجاورة أو غير متجاورة تقع ضمن نفس المجال الترددي ونمط inter-band non-contiguous allocation، وفيه يجري تجميع حوامل ترددية موجودة ضمن مجالات ترددية مختلفة.

- يدعم نظام LTE-A استخدام نمط تعدّد المداخل وتعدد المخارج MIMO بمراتب أعلى مقارنة بالإصدارات السابقة؛ وهذا يؤمن زيادة في معدل نقل المعطيات في الوصلتين الهابطة والصاعدة وذلك عبر إرسال دفق معطيات مختلفة عبر هوائيّات متعدّدة بنفس الموارد الفيزيائيّة (زمن، تردد).
- الشبكات غير المتجانسة HetNets: في الشبكات الخَلَويّة التقليديّة يجري تأمين التغطية الراديويّة عبر خلايا ذات استطاعة عالية تسمى الخلايا الماكرويّة Macro-cells، من أجل زيادة سعة الشبكة وزيادة التغطية يجري إدخال خلايا صغيرة ذات استطاعة إرسال صغيرة (خلايا فمتويّة Femtocells وخلايا بيكويّة Pico cells ومُرحِّلات Relays) ضمن مناطق تغطية الخلايا الماكرويّة ذات الاستطاعة العالية، يطلق على هذا النوع من الشبكات الشبكات غير المتجانسة.
- الإرسال والاستقبال من عدة محطّات قاعديّة CoMP: يتيح الإرسال والاستقبال من عدة محطّات قاعديّة بطريقة منسَّقة، جرى تقديم CoMP بالإصدار الحادي عشر Rel.11 ونشره عام 2013 وكان الهدف الرئيس منه تحسين أداء الشبكة للمستخدمين الموجودين عند حافة الخلية. هناك نوعان من تقنيات CoMP، الإرسال المشترك Joint Transmission، وفيه ترسل أكثر من محطّة قاعديّة نفس الإطار الجزئي وعلى التردد نفسه، النوع الثاني تشكيل الحزمة/الجدولة المنسقة Coordinated scheduling/Beamforming وفيه تكون المعطيات متوفرة عبر أكثر من محطّة قاعديّة، لكن يجري إرسال هذه المعطيات عبر محطّة واحدة بنفس الوقت، في هذه النوع من التقنية ترتبط المحطّات القاعديّة مع بعضها من أجل تبادل معلومات الجدولة ومعلومات توجيه الحزمة Beamforming.

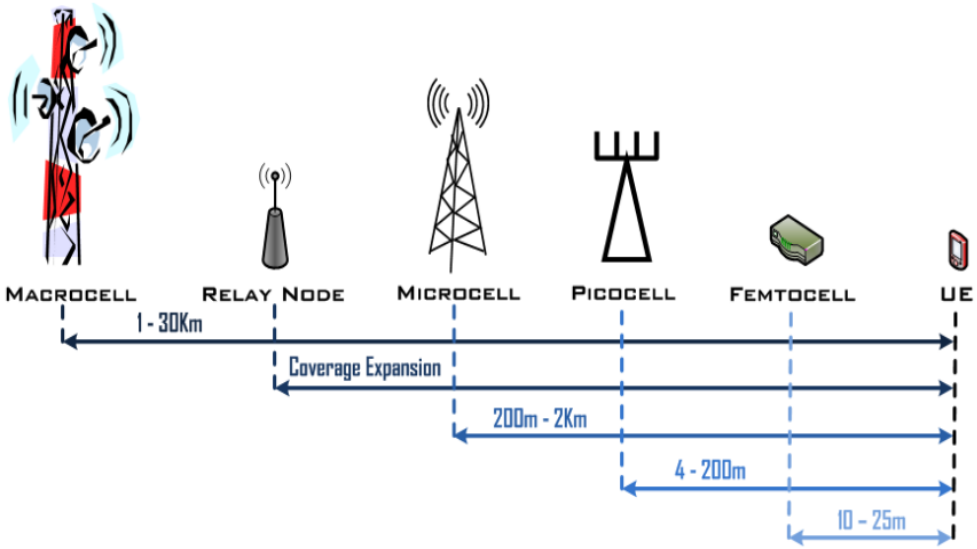


الشكل 1–5: التحسينات المضافة في نظام LTE-A [31].

6.1 شبكات LTE-A غير المتجانسة

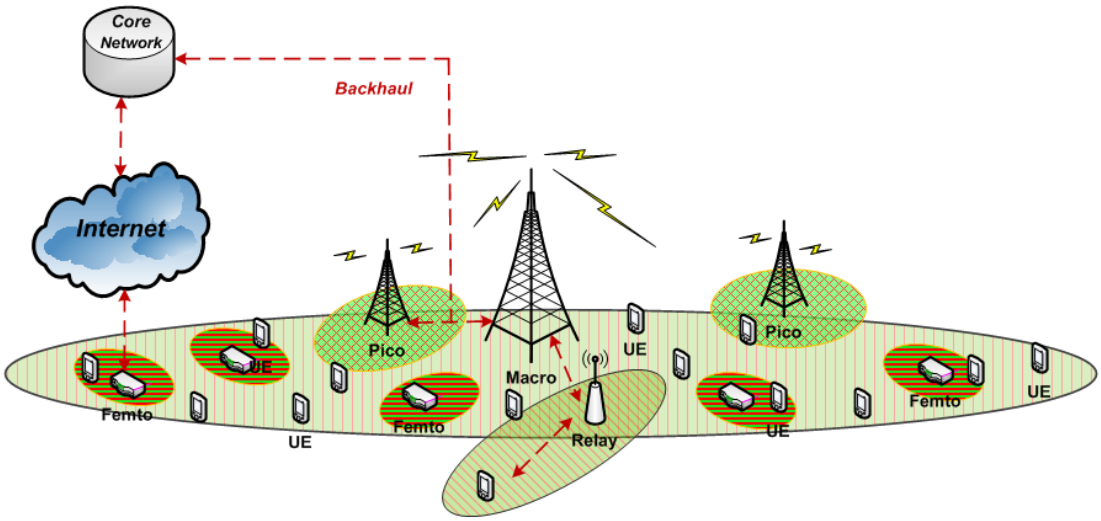
الشبكات غير المتجانسة HetNets هي الشبكات التي تتألف من طبقات متعدّدة Multi-Tiers من الخلايا ذات مساحات تغطية مختلفة أو تقنيّات نفاذ راديوية متعدّدة. في الشبكات التقليديّة تجري عملية التركيب للشبكة الخلويّة وفق نموذج متجانس Homogeneous مكوَّن من خلايا ماكرويّة تمثلها محطّات قاعديّة ماكرويّة ذات استطاعة إرسال عالية متماثلة ونموذج متماثل لمخطّطات تغطية الهوائيّات. تُحقَّق هذه المحطّات القاعديّة بناءً على تخطيط مسبق مع الأخذ بالحسبان متطلبات السعة والتغطية وتُضبَط لتأمين تغطية أعظميّة وتقليل التداخل بين الخلايا. ومع الازدياد الكبير في الطلب على خدمات ذات معدل نقل معطيات عالي في السنوات الأخيرة، ولمعالجة هذه المشكلة يجري اعتماد عملية تقسيم الخلايا Cell Splitting وإضافة حوامل ترددية جديدة، لكن هذا الحل مكلف وصعب التحقيق وخاصّة في المناطق ذات الكثافة السكانيّة العالية. لذلك ولحل هذه المشكلة وتحقيق متطلبات السعة كان لابد لمُشغِّلي الشبكة من تحقيق نموذج جديد في بنية الشبكة فتُضاف خلايا بمواصفات جديدة من حيث التغطية تتناسب والحل [34].

يُعَد سيناريو الشبكات غير المتجانسة HetNets مفهوماً مهمّاً جرى استخدامه على نطاق واسع في شبكات التطوّر طويل الأمد المتقدّم LTE-A. عادة ما تُفهم الخلايا الصغيرة على أنّها خلايا ميكرويّة microcells أو خلايا بيكويّة Picocells أو خلايا فمتويّة Femtocells. يمكن أن يصل مجال تغطية هذه الخلايا الصغيرة من عشرة إلى عشرات الأمتار؛ مما يعطيها مساحة تغطية صغيرة مقارنة بالخلايا الماكرويّة و عقد المُرحِلات Relay Nodes، كما يُبيّن الشكل 1-6. بمعالجة مشاكل التداخل جيداً، يمكن أن يؤدي نشر الخلايا الصغيرة إلى زيادة سعة الشبكة بشكل خطي. كاتجاه واعد في مسار تطوير النظام، يُعَد النشر الكثيف للخلايا الصغيرة شائعاً في تخطيط الشبكة في منظومات الجيل الخامس[35].



الشكل 1-6: أنواع خلايا الشبكة بحسب مساحة التغطية [34].

تُضافُ في الشبكات غير المتجانسة خلايا صغيرة ذات استطاعة إرسال منخفضة لتؤمّن مناطق تغطية جزئيّة ضمن منطقة التغطية الكليّة للخلايا الماكرويّة كما هو موضَّح في الشكل 1-7. ويمكن لهذه الخلايا الصغيرة تحسين التغطية في مناطق عمياء تسمى ثقوب التغطية Coverage Holes بالنسبة لمحطات الخلايا الماكرويّة، إضافة إلى تحسين سعة الشبكة في المناطق التي يكون فيها طلب كبير على حركة عبور المعطيات، فعلى سبيل المثال تؤمن الخلايا الفمتويّة خدمة أفضل للمستخدمين ضمن البيئات الداخليّة Indoor Areas (IA)، مثل المولات والصالات الرياضيّة والأبراج السكنيّة والتجاريّة.



الشكل 1-7: رسم توضيحي لمخطط الشبكات غير المتجانسة HetNets في نظام LTE-A [6].

1.6.1 شبكات الخلايا الصغيرة

عموماً، هناك ما يقرب من ثلثي المكالمات و90% من حركة عبور المعطيات تجري ضمن البيئات الداخليّة IA، وقد أدى ذلك إلى مسألة كيفيّة توفير خدمات الصوت والفيديو عالية الجودة والمعطيات عالية السرعة [36]. في هذا السياق، من المتوقَّع أن تكون الخلايا الصغيرة واحدة من أهم التقنيات في منظومات الجيل الخامس والتي تساعد على تلبية الطلب على حركة عبور المعطيات من خلال إعادة الاستخدام المكاني Spatial Reuse [37]. ومع حدوث زيادة سريعة في حركة عبور المعطيات النقّالة، من الممكن على المدى القصير إلغاء تحميل نسبة كبيرة من حركة عبور المعطيات النقّالة في البيئات الداخليّة من الشبكات الخلوية من خلال اعتماد خلايا صغيرة. إنّ تقليل مساحة تغطية الخليّة الطريقة الأكثر فاعليّة والأسهل لتحسين قدرة النظام، ومن هنا تمثِّل الشبكات الخلوية الصغيرة Small cell networks (SCN) مفهوماً جديداً لتصميم الشبكات الذي يمكن أن يوفر حلولاً مختلفة من حيث التكلفة وكفاءة الاستطاعة للتعامل مع نمو حركة عبور المعطيات المتوقع ارتفاع معدّله [38].

يُشير مصطلح الخلايا الصغيرة إلى عقد نفاذ لاسلكية منخفضة استطاعة الإرسال يمكن أن تعمل في طيف راديوي مرخَّص أو غير مرخَّص. ويمكن تقسيم أنواع الخلايا الصغيرة إلى خلايا فمتويّة وبيكويّة وماكرويّة اعتماداً على مجال تغطية الخليّة. في [39]، طرحت مجموعة 3GPP مجالاً للتغطية صغيراً جديداً عبر طرح استخدام محطة قاعديّة منخفضة الاستطاعة تُعرف باسم المحطّات القاعديّة المحسَّنة المنزليّة HeNB. تُستَخدم هذه المحطّات الصغيرة لتوفير خدمات المجال العريض في كل من البيئات الداخليّة IA والبيئات الخارجية Outdoor Areas (OA) [36]، ففي مكاتب المستخدمين ومنازلهم تعمل HeNB مثل نقطة نفاذ Wi-Fi مشتركة تتصل بشبكة المُشغِّل من خلال خط المشترك الرقمي Digital Subscriber Line (DSL).

2.6.1 فوائد نشر الخلايا الصغيرة

يحقّق نشر الخلايا الصغيرة العديد من الفوائد. أولاً، يمكن زيادة سعة الشبكة، تتمثل الطريقة الفعالة لتعزيز قدرة الارتباط اللاسلكي في تقليل المسافة بين المُرسِل والمُستقبِل، وهذا هو الأساس المنطقي لإضافة خلايا صغيرة إلى شبكة LTE-A. في هذا السياق، من الممكن أيضاً إلغاء التحميل بكفاءة من الخلايا الكبيرة لأنّه من المتوقع أن توفر الخلايا الصغيرة حصّة موارد راديوية رئيسيّة وذات صلة من حركة عبور المعطيات الأصلية. ثانياً، من منظور اقتصادي، لأنّ المُشغِّل يمكنه تحديد حركة عبور المعطيات المتولدة/المستلمة بدقة في كل خليّة صغيرة، يمكنه تقديم رسوم وخصومات مخصصة ستكون جذابة للغاية للمشتركين. ويُعَد دعم الخلايا الصغيرة جزءاً لا يتجزَّأ من المعايير المتقدّمة الحالية للاتصالات النقّالة الدوليّة International Mobile Telecommunications (IMT)، وسوف يؤدي دوراً متزايد الأهمية في استخدامها على نطاق أوسع [40].

يُلخِّص المرجع [7] فوائد نشر الخليّة الصغيرة على النحو التالي:

- بافتراض أنه يمكن تحقيق عزل جيد بين الخلايا متباينة مجال التغطية، يمكن للخلايا الصغيرة تحسين سعة الشبكة الكليّة بشكل كبير عن طريق إعادة استخدام الطيف الراديوي ضمن منطقة تغطيتها.
- تحل الخلايا الصغيرة مسألة الطلب المتزايد على معدّلات نقل معطيات عالية.
- يمكن أن تحقّق الخلايا الصغيرة توفيراً فعالاً للطاقة الكهربائية لتجهيزات المستخدمين.
- الخلايا الصغيرة أفضل من الخلايا الماكرويّة من منظور استهلاك الاستطاعة الكهربائية.
- يدفع المستخدمون مبالغ منخفضة نسبيّاً لتركيب الخلايا الصغيرة في سبيل الحصول على جودة خدمة أفضل؛ ما يشير إلى اتجاه جديد للمشغلين عند بناء أو تحديث الشبكات، وتخفيف العبء الاقتصادي عليهم.

3.6.1 مشكلات نشر الخلايا الصغيرة

مع إضافة الخلايا الصغيرة، سوف تظهر حتماً العديد من المشاكل، ومنها:

أولاً: مع نشر خلايا صغيرة فائقة الكثافة، من غير المحتمل أن يكون هذا قابلاً للتوسع في إرسال معلومات الخلايا الصغيرة في الشبكة لأنّ هذا النشر سوف يزيد من عبء تشوير الشبكة Network Signaling Overhead، وهذا سوف يزيد من صعوبة تجنّب أو تنسيق التداخل بين الخلايا الماكرويّة والخلايا الصغيرة أو تجنّب/تنسيق التداخل بين الخلايا الصغيرة بعضها مع بعض، وهذا سوف يزيد من صعوبة إدارة التداخل في الشبكة غير المتجانسة.

ثانياً: مقارنة بالخلايا الكبيرة (الماكرويّة)، تكون قائمة الخلايا المجاورة للخليّة الصغيرة ديناميكيّة حيث يجري تشغيل الخليّة الصغيرة وحجز الموارد الراديويّة لها أو إيقاف تشغيلها ديناميكياً (عدم حجز موارد راديوية للخليّة الصغيرة) في أي مكان وفق احتياجات المستخدمين، ولا يمكن للمُشغِّل التحكُّم مباشرة بتشغيل أو إيقاف ارتباط الخليّة الصغيرة بالشبكة الأصلية، وهذا سوف يزيد من صعوبة إدارة الموارد الراديويّة.

ثالثاً: تُستخدم في الخلايا الصغيرة طرائق نفاذ متفاوتة ينتج عنها إجرائيّات تخويل متباين Different Authorization. ويمكن أن تؤدي تفضيلات المستخدم/المُشغِّل User/Operator Preferences إلى أولويّات مختلفة لاستخدام الخلايا الصغيرة من عدم استخدامها [41]، فمثلاً يمكن أن يؤدي النشر الكثيف للخلايا الصغيرة في الشبكة إلى حصول عدد كبير من أحداث التسليم غير الضرورية UHOs وغير المرغوبة RLFHOs، وهذا سوف يزيد من صعوبة إدارة الحركيّة في النظام الكلي. على سبيل المثال لا الحصر، وفي سياق مسألة التسليم في الشبكة غير المتجانسة، يشير مفهوم التسليم إلى نقل اتصال تجهيزات المستخدمين UEs من قناة راديويّة إلى أخرى (يمكن أن يكون ذلك داخل الخليّة نفسها أو بين خلايا مختلفة) مع الحفاظ على جودة الخدمة [42]. في شبكة تقليديّة متجانسة، تستخدم تجهيزات المستخدمين عادةً نفس مجموعة موسِطات التسليم (مثل HM وTTT) عبر الشبكة. ومع ذلك، في الشبكة غير المتجانسة HetNet، قد يؤدي استخدام نفس قيم موسطات التسليم إلى تدهور أداء الاتصال النقّال. علاوة على ذلك، يمكن لتجهيزة مستخدم ما ضمن الخلية الكبيرة الماكرويّة تتحرك بسرعة عالية أن تدخل مناطق تغطية الخلايا الصغيرة قبل انتهاء صلاحية المؤقت TTT لحدث التسليم؛ مما يؤدي إلى حدوث فشل في التسليم (أي تسليم فاشل غير مرغوب من النوع RLFHO) بسبب تدهور نسبة الإشارة المفيدة إلى التداخل والضجيج SINR [43]. وتجدر الإشارة، إلى أنّ هذا البحث يعالج أغلب المشكلات المذكورة هنا فيما يخص الشبكات LTE-A HetNets (الفصول 3 و4 و5).

4.6.1 مُستخلَص تحدّيات نشر الخلايا الصغيرة

يُلخِّص المرجع [38] تحديات نشر الخلايا الصغيرة على النحو التالي:

- **التغطية والتنبؤ بالأداء:** سيؤدي النشر الكثيف غير المخطَّط للخلايا الصغيرة في شبكات SCN إلى أنماط تداخل لا يمكن التنبؤ بها وربما تغطية غير مكتملة.

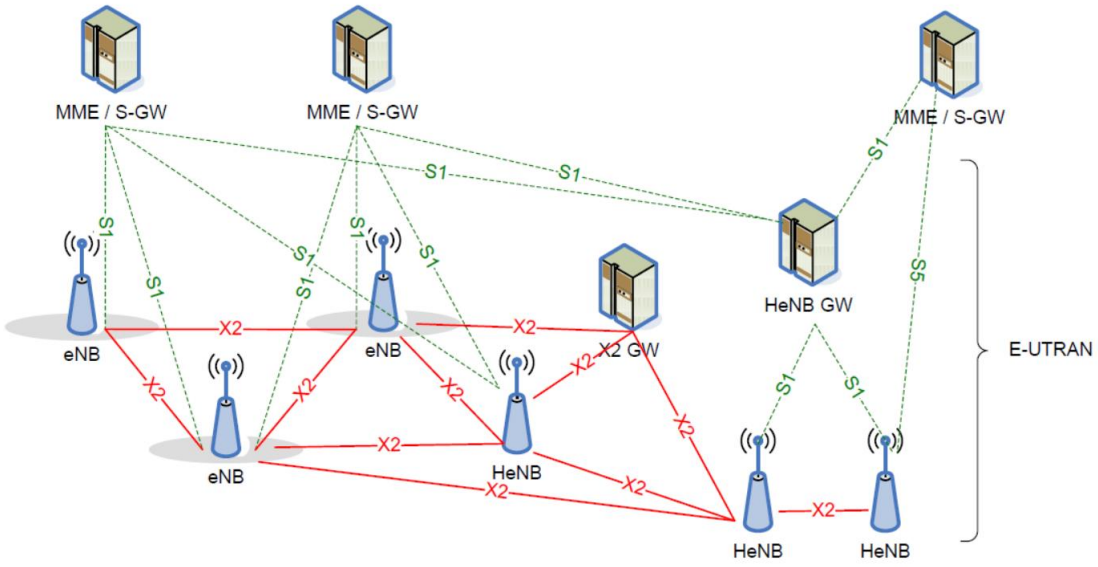
- **إدارة الموارد وتنسيق التداخل:** مع النفاذ العام، بسبب إعادة الاستخدام الكامل للترددات وزيادة كثافة نشر الخلايا الصغيرة، سوف يزداد التداخل بين الخلايا الصغيرة، والتداخل بين الخلايا الصغيرة والخلايا الكبيرة. بشكل كبير ويحتاج إلى معالجة جيدة، فضلاً عن أسلوب التخصيص في حال كانت كتل الموارد متطابقة بين الخلايا الماكرويّة والخلايا الصغيرة.

- **الحركيّة Mobility:** نظراً لمجال تغطية الخلايا الصغيرة، قد يكون من الصعب حل مشكلات الحركيّة للمستخدمين في شبكات SCN، وإحدى المشكلات الرئيسية هنا هي مشكلة أحداث التسليم غير الضرورية UHOs وأحداث فشل التسليم غير المرغوبة RLFHOs.

7.1 هيكلية شبكة النظام LTE-A HetNet

كما يُظهر الشكل 1-8، تشارك كينونتان من كينونات شبكة النواة EPC في دعم المحطات HeNBs فيما يتعلق ببوابة الخدمة SGW وكينونة إدارة الحركيّة MME. كما ذُكِرَ سابقاً، تُستخدَم MME لتنفيذ وظائف تشوير الشبكة الأساسيّة لإدارة الحركيّة بين شبكات النفاذ، أي معالجة الحركيّة في حالة الخمول، وإدارة قائمة منطقة التعقُّب (الملاحقة)، والتجوال، والتحكُّم في الحامل، والتحكُّم الأمني، والمصادقة. وفي الوقت نفسه، يمكن لبوابة الخدمة توفير الوظائف التالية: الشحن، والمحاسبة، وتوجيه رزم البيانات، وإعادة التوجيه، وحتى إرساء التنقل لإدارة التنقل بين الشبكات الأساسيّة وداخلها [44,45].

من أجل تحقيق نشر الخلايا الصغيرة في شبكة LTE-A، تُضمَّن بوابات HeNB GW داخل بنية النظام E-UTRAN. ففي شبكة LTE-A HetNet لا تزوِّد المحطّات القاعديّة eNB تجهيزات المستخدم ببروتوكولات مستوى التحكُّم فحسب، بل إنَّها تدعم أيضاً الوحدات النمطية modules لإدارة الموارد الراديويّة، والتحكُّم في قبول الاتصال admission، وجدولة رسائل البث Broadcast Messages وإرسالها، وإعداد تقارير القياس الخاص بحركيّة المستخدم وتوجيه معطيات على مستوى المستخدم نحو بوابة عبور الخدمة SGW. تدعم المحطات HeNBs الوظائف نفسها التي تدعمها eNBs، بينما يجري تطبيق نفس الإجراءات بين المحطات HeNBs والنواة EPC. وتتمثل وظيفة بوابة العبور HeNB GW في دعم عدد كبير من المحطات HeNBs على نفس المستوى. ويُعَد نشر HeNB GW اختيارياً وعائداً إلى المستخدم نفسه، ولذا يُفتَرض مواقع الخلايا الصغيرة في منطقة الشبكة عشوائيّاً دوماً، ولكن إذا جرى نشره، يعمل بمثابة كينونة إدارة حركيّة MME بالنسبة إلى النواة EPC، على غرار MME للمحطات التقليديّة eNBs [44].



الشكل 1–8: بنية شبكة E-UTRAN المقابلة لهيكلية الشبكة LTE-A HetNet [45].

8.1 خيارات نشر الخلايا الصغيرة في شبكة غير متجانسة

عند استخدام الخلايا الصغيرة لنقل حمولة Offload حركة عبور المعطيات للخلايا الماكرويّة، لاختيار الطيف الراديوي تأثير مهم في نظام الشبكة غير المتجانسة HetNet. وهناك نوعان من عمليات نشر الطيف الراديوي للخليّة الصغيرة: النشر داخل التردد Intra Frequency Deployment (Intra-FD) والنشر بين الترددات Inter-Frequency Deployment (Inter-FD) [46]. ويرتبط كل من هذين الخَيارَين ارتباطاً وثيقاً بمسألة إدارة الموارد الراديويّة وتخصيصها ويكون لكل منهما محاسنه ومساوئه. وسوف نقترح في الفصل الرابع خوارزميّة متينة تقوم بتخصيص قناة الاتصال بين الخليّة مهما كان نمطها (ماكرويّة أو صغيرة) وبين المستخدم بالتردد والمجال الترددي المناسِبَين.

1.8.1 نشر الخلايا الصغيرة داخل التردد Intra-FD

يجري وفق هذا الخَيار نشر كل من الخلايا الماكرويّة والصغيرة بنفس التردد لنقل المعلومات. في هذا السياق، يمكن للهواتف النقَّالة إجراء القياس وتنفيذ التسليم دون إجراء ضبط ترددي مختلف سواء أكانت الخليّة المُخدِمة صغيرة أم ماكرويّة، ولكن هذا سيؤدي إلى حدوث تداخل بين الخلايا لأنها تعمل على نفس التردد. وهذا سيؤدي إلى أداء ضعيف من حيث زمن تلبّث مرتفع high latency، وإنتاجيّة منخفضة [47].

2.8.1 نشر الخلايا الصغيرة بين الترددات Inter-FD

وفقَ هذا الخَيار، يمكن للخلايا الماكرويّة والخلايا الصغيرة استخدام ترددات راديوية مختلفة إذا توفر المزيد من الطيف الراديوي للمشغلين لنشرها [47]. ويمكن أن يؤدي هذا النشر إلى التخلّص من

مشكلة التداخل بين الخلايا المختلفة (بين الخلايا الماكرويّة والخلايا الصغيرة). ومع ذلك، فإن خَيار النشر بين الترددات هذا سيجعل إجراءات التسليم معقدة لأنه من الصعب تحديد إنْ كان مستخدم من خليّة ماكرويّة سيدخل (أثناء حركته) منطقة تغطية خليّة صغيرة لينتقل من محطة قاعديّة ماكرويّة إلى الخلايا الصغيرة المجاورة أم لا، وقد لا يجري استخدام الخلايا الصغيرة (رغم إمكانية لزوم ذلك) في عملية التسليم المُتوقَّعَة.

9.1 التحدِّيات والفُرص أمام الشبكات اللاسلكيّة الخلوية LTE-A HetNets

1.9.1 التحدِّيات على مستوى المُشغِّل

من الضروري تلبية مستويات عالية من الطلبات وزيادة قدرات الشبكة اللاسلكيّة الخَلَوية في مواضع إشكاليّة مختلفة. فعلى مدى السنوات العديدة الماضية، كما ذُكِرَ آنفاً في فقرة الإطار العام للبحث، ازداد الطلب على معدّلات معطيات أعلى. وأفاد مؤشِّر الشبكات المرئيّة في شركة Cisco [48] أنّ حركة عبور المعطيات الخلوية قد زادت بمقدار ثماني عشرة مرة خلال السنوات الخمس الماضية. وقد جرى احتساب 69% من معطيات الهاتف النقَّال بواسطة حركة عبور المعطيات في نظام LTE-A في عام 2016. وجرى توصيل نحو 429 مليون جهاز نقَّال جديد بالشبكة الخلوية في عام 2016. وزادت سرعة اتصال شبكة الهاتف النقَّال بأكثر من ثلاثة أضعاف في عام 2016. ونحو 60% من الإجمالي جرى إنشاء حركة المعطيات الخلويّة من خلال حركة معطيات الفيديو على الهاتف النقَّال في عام 2016. وفقًا للمرجع [49]، نما حجم المعطيات الخَلَوية نحو سبعة أضعاف بين عامي 2016 و2021 على مستوى العالم، وكانت بين عامي 2016 و2021 حركة المعطيات الخلوية 48.3 EB إكسا بايت شهرياً (أي تنمو بمعدّل نمو سنوي مركَّب يبلغ 46%)؛ ومن الشائع تقريباً الاتفاق على أنَّ مقدار المجال الترددي المخصص للشبكات الخلويّة اللاسلكيّة غير كافٍ، ولهذا ينبغي أخذ مسألة إدارة الموارد الراديويّة وتخصيصهاعلى محمل الجد بشكل مستمر [47].

2.9.1 التحدِّيات على مستوى التغطيّة

تواجه شبكات الخلايا الماكرويّة الحالية دائماً صعوبة في تغطية بعض المناطق الخاصة مثل المناطق المدنية بالكامل. وتعود هذه الصعوبات إلى عوامل عدّة مثل خفوت الظل shadow fading من المباني المحيطة وعدم القدرة على وضع الهوائيات في مواقع مثالية والافتقار إلى البنى التحتية الضرورية (الطاقة الكهربائية، مرافق التوصيل... إلخ) والأماكن المثالية لتوضّع الخلايا. من الصعب أيضاً ضمان التغطية الكافية داخل المباني بسبب تخامد الإشارات الراديويّة ضمن المباني [47]. ويصعب تغطية بعض المباني المميزة مثل المطارات والملاعب بسبب تخطيطها غير المنتظم والكثافة السكانية؛ فضلاً عن ذلك، قد تغطّى مواقع مثل المواقع الريفية بشكل سيئ ليس بسبب الصعوبات

الفنية، ولكن بسبب التكاليف المرتفعة لتركيب خليّة ماكرويّة تقليديّة، وهذا بالضبط ما يقودنا إلى حل نشر الخلايا الصغيرة منخفضة الكلفة والاستطاعة.

3.9.1 التحدِّيات على مستوى سِعة القناة وجودة الخدمة

يصعب تقديم خدمات مرضية وموثوقة بشكل كامل للمستخدمين الموجودين في المناطق المدنية أو المناطق ذات الكثافة السكانية العالية مثل الجامعات ومراكز التسوق والملاعب بسبب نقص المواقع المثالية للخلايا الماكرويّة عند إجراء عمليّات تخطيط هذه الخلايا وازدياد أعداد المستخدمين ازدياداً كبيراً حاليّاً؛ ما يتطلب سِعة قناة اتصال مرتفعة نسبيّاً لتلبية الطلب. نتيجة لذلك، تحدث مشكلات في السعة وتجربة سيئة للمستخدم [47]. ويمكن أن تقتضي الخلايا الماكرويّة المُحمَّلة بشكل زائد Overloading في المناطق المدنيّة معدّل بِتْ Bit Rate منخفضاً وزمن تلبُّث مرتفعاً High Latency للمستخدمين في مواجهة مسائل إدارة الشبكة المذكورة آنفاً. ويزداد الأمر سوءاً عندما يتعيّن على تجهيزات المستخدمين UEs زيادة استطاعة الإرسال للاتصال بموقع بعيد، وتقليل عمر البطارية وزيادة التداخل (على سبيل المثال لا الحصر) مع المستخدمين الآخرين.

4.9.1 الفُرص

تُعدُّ زيادة معدّل المعطيات والكفاءة الطيفية وتحسين تجربة المستخدم ضرورية لشبكات LTE-A. ويمكن أن تكون بُنية HetNets حلاً للتحدِّيات المذكورة أعلاه. وتُعَد الشبكاتَ غير المتجانسة وفقاً لتوصيات ومواصفات مشروع شراكة الجيل الثالث 3GPP حلّاً واعداً في عمليات نشر منظومات الجيل الخامس المستقبلية [50,51,52].

10.1 الشبكات ذاتيّة التنظيم SON

ظهر مفهوم الشبكات ذاتيّة التنظيم SON لتقليل تعقيد وتكلفة إدارة الشبكة الخَلَوية، ويهدف إلى استبدال التهيئة اليدويّة للشبكة وتحسين وظائفها بعمليّات أُخرى هي التهيئة الذاتيّة self-configuration، والأمْثَلَة الذاتيّة self-optimization، والإصلاح أو الشفاء الذاتي self-healing. تعمل الشبكة ذاتيّة التنظيم على تحسين تجربة المستخدم بشكل ملحوظ من خلال تحسين أداء الشبكة تلقائيّاً وتخفيف الانقطاعات بسرعة عند حدوثها. وتُعَد هذه السِمة مهمّة للغاية لجميع مُشغِّلي الشبكات، فالوقت اللازم لكل من التشغيل والإصلاح عامل حاسم في وجود شبكة فعّالة وإدارة فعّالة، ومن خلال تبنّي إجراءات وخوارزميّات SON، سيتمكّن المشغّلون من الاستفادة من هذه القدرات كثيراً في حل المشكلات العالقة.

خلال العقد الماضي، جذبت أتمتة إدارة الشبكة الخلوية وتحسينها انتباه المجالات الأكاديمية والصناعية. وقد تفرّع هذا الاتجاه مع ظهور منظومات الجيل الخامس، ومن المتوقَّع أن يزداد تعقيد إدارة الشبكة وتحسينها ازدياداً كبير وفقًا لمتطلّباتها [53]. إنّ التعامل مع حجم هائل من المعطيات المرسلة بما في ذلك رسائل التشوير، والتحكُّم في عدد لا يحصى من الاتصالات داخل منطقة صغيرة من الشبكة،

وتهيئة وأمثلة أعداد كبيرة من وظائف عقد الشبكة متعدّدة المستويات ومتعدّدة البائعين(المصنعين) multi-vendor multi-tier network nodes، يجب أن يعالجها مُشغِّل الشبكة جميعاً بكفاءة من أجل توفير جودة الخدمة وفقاً لمُتطلَّبات المستخدم المختلفة مع الاتساق مع سياسات المُشغِّل. وهكذا يمكن توفير مُتطلَّبات الجيل الخامس من خلال البنية التحتيّة لشبكة الجيل الرابع LTE-A [54]، ويمكن ضمان التشغيل الفعَّال للشبكة وتوفيره ليس فقط من قبل المهندسين المُؤهَّلين كما في الأجيال السابقة، بل أيضاً بشكل ذاتي تقوم به الشبكة تلقائيّاً. لقد اتُّفِقَ على هذا لأنّ منظومة الجيل الخامس تعتزم العمل مع منظومات سابقة مثل LTE/LTE-A، والشبكات اللاسلكيّة الأخرى [55]، لذا يصبح تحسين الشبكة مهمة صعبة، ومن أجل تقليل النفقات الإنشائيّة CAPEX والتشغيليّة OPEX المرتبطة بمهام الإدارة وفي نفس الوقت تعزيز كفاءة عمليّات الأمثلة حتى مع تعقيدها، قُدِّمَ مفهوم الشبكة ذاتيّة التنظيم SON. وعُرِّفَ مفهوم الشبكة ذاتيّة التنظيم وفق مشروع 3GPP بأنه مجموعة من الوظائف التي تؤدي عمليّات التهيئة الذاتيّة والأمثلة واستكشاف الأعطال ومعالجتها [56].

1.10.1 مبادئ الشبكة ذاتيّة التنظيم

يعتمد مفهوم SON على مبادئ التشبيك ذاتي التصرّف Autonomic Networking [5]، ويجري تصنيف الوظائف الذاتيّة للشبكة وفق مفهوم SON إلى ثلاث مجموعات وظائف رئيسية وموحدة وفق معيار 3GPP كما يلي:

1- التهيئة أو الإعداد الذاتي Self-Configuration: يبدأ الإعداد الذاتي بمُجرَّد تشغيل المحطّات القاعديّة BS_s بشكل فعلي مع إمكانية الاتصال بروابط النقل transport links. يوفّر الإعداد الذاتي استبداء التوصيل والتشغيل Plug-and-Play (PnP) لشبكة المحطّات القاعديّة عن طريق التعيين الأولي لموسِطات التحكُّم في الشبكة Network Control Parameters (NCP) [58].

2- الأمْثَلَة الذاتيّة Self-Optimization: مسؤوليتها المراقبة المستمرة وتحليل الأداء لشبكة المحطّات القاعديّة وهي توفِّر تحسيناً عند اللزوم لموسِطات التحكُّم في تجهيزات المحطّة القاعديّة المتأثِّرة بالظروف المحيطة من أجل الحفاظ على الجودة والأداء المطلوبين [58].

3- الشفاء أو الإصلاح الذاتي Self-Healing: ويوفِّر إدارة الأعطال وتعويض الانقطاع للمحطّات القاعديّة الخاصّة بالشبكة، وذلك من خلال المراقبة المستمرة لحالة المحطّة القاعديّة، حيث تُشغَّل خوارزميّة استعادة مناسبة بعد اكتشاف الأخطاء وتشخيصها من أجل الحفاظ على الخدمة [59].

يستند العمل في هذا البحث إلى الوظيفتين الأولى (الإعداد الذاتي) والثانية (الأمثلة الذاتيّة)، ففي الفصل الثاني تقوم الشبكة بتهيئة وتكوين جِوارَها ذاتيّاً ومع موازنة الحمل، وفي الفصل الثالث تقوم الشبكة بإجراء أمْثَلَة ذاتيّة لمُوسِطات التحكُّم بالتسليم HCPs لدعم إدارة الحركيّة وقرارات التسليم بين الخلايا، وفي الفصلين الرابع والخامس تقوم الشبكة بشكل ذاتي بإجراء تعديلات على إعدادات استطاعة

إرسال المحطّات القاعديّة وإعدادات إعادة الاستخدام الترددي لدعم إدارة الموارد وتنسيق التداخل بين الخلايا. نحذو بذلك حذو مجموعة 3GPP في تنفيذ وظائف SON في شبكتي LTE/LTE-A، إذ ركَّزَت جهود توحيد وظائف SON في نظام LTE في الإصدار الثامن [56]، وركَّزَت 3GPP أيضاً على بعض حالات استخدام تقنيّة SON، على سبيل المثال تحسين وأمْثَلة موسِطات التحكُّم بالتسليم كما في التقرير [60]، وموازنة الحمل كما في التقرير [61]، وتنسيق التداخل بين الخلايا كما في التقرير [62].

2.10.1 معايير الشبكات ذاتيّة التنظيم وحالات الاستخدام

أكد منتدى شبكات الجيل التالي للهواتف النقّالة Next Generation Mobile Network (NGMN) الحاجة إلى مفهوم التنظيم الذاتي في شبكات الجيل الرابع LTE-A [63]. وكان هذا الاقتراح أول عمل في مجال SON، متبوعاً بتحديد NGMN لحالات استخدام SON المستقلة [64]. وقد اعتمد منتدى NGMN عشر طبقات للتعبير عن مفهوم SON كما يلي:

- التّوصيل والتّشغيل للتثّبيت.
- علاقة الجوار التلقائي (ANR).
- تكامل نظام إدارة الشبكة.
- أمثلة عملية التسليم.
- التّقليل من الاختبارات الجوالة Minimizing Drive Test (MDT).
- تعويض انقطاع التغطية.
- موازنة الحمل.
- توفير الطّاقة.
- التّفاعل بين الخلايا الفمتويّة والماكرويّة.
- تحسين جودة الخدمة QoS.

لقد ساهم نشوء المتطلّبات المُحدِّدة لشبكات SON من قبل منتدى NGMN في تبنّي مفهوم التنظيم الذاتي من قبل 3GPP أيضاً، ووضِعَت معايير لحالات الاستخدام على التوازي مع الإصدارات المختلفة لمنظومة LTE. ترافق ظهورSON مع منظومات LTE في الإصدار الثّامن من 3GPP واستمرّ مع الإصدارات اللاحقة، والحصول على المزيد من الميّزات. وركَّز الإصدار الثامن Release8 على عمليّة الإعداد الذاتي للمحطّة القاعديّة eNB، المتمثّلة ببعض الإجراءات الأساسيّة مثل الجرد التلقائي inventory وتنزيل البرمجيات اللازمة وعلاقة الجوار التّلقائي وتعيين مُعرِّف الخليّة الفيزيائي التّلقائي PCI [56,65]. وركَّز الإصدار التاسع Release9 على جوانب الأمثلة مثل عمليّة التسليم في حالة الحركيّة وتنسيق التداخل بين الخلايا والأجيال والنُظُم المختلفة [58]. أمّا الإصدار العاشر

Releae10 فقد ركَّز أكثر على جانب المعالجة الذاتيّة؛ وخفّض عمليّة الاختبارات الجوالة MDT [66]. تُعَد إجرائيَّة MDT أحد المفاتيح الرئيسيّة لفهم الظروف المحيطة بالمحطّة القاعديّة حيث تُجمَع معلومات موضع المستخدم عن طريق تجهيزة المستخدم UE، التي توفّر رؤية أفضل لأداء الخليّة. وأما الإصدار الحادي عشر Release11 فقد اهتمّ أساساً بالشبكات غير المتجانسة متعددة تقنيات النفاذ Multi−RAT [67].

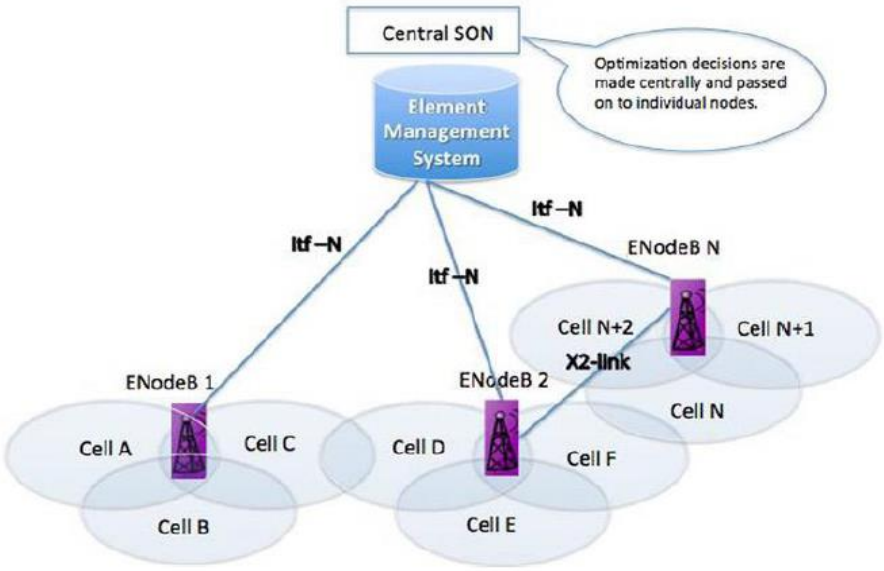
3.10.1 بُنى الشبكات ذاتيّة التنظيم

تُصنف بُنى الشبكات ذاتيّة التنظيم حسب التّنفيذ والتركيب إلى ثلاثة أصناف لكل منها بنية خاصة، هي: المركزيّة والموزّعة والهجينة.

- **الشبكة ذاتيّة التنظيم المركزيّة**

في هذا النوع تحدث الأمثلة على مستوى نظام إدارة الشبكة OMC؛ ما يعطي مجموعة من المزايا الأساسيّة مثل مركزيّة وظيفة SON المحددة. وتُعدُّ هذه البنية أعلى مستويات الإدارة الذاتيّة للشبكة، وهي الأكثر استخداماً. ولكن من جهةٍ أخرى، تعد القرارات المتخذة ذاتياً ضمن هذه البنية غير سريعة مثل القرارات المتّخذة في حال اعتماد البنية الموزّعة، نظراً لكون القرار مركزياً.

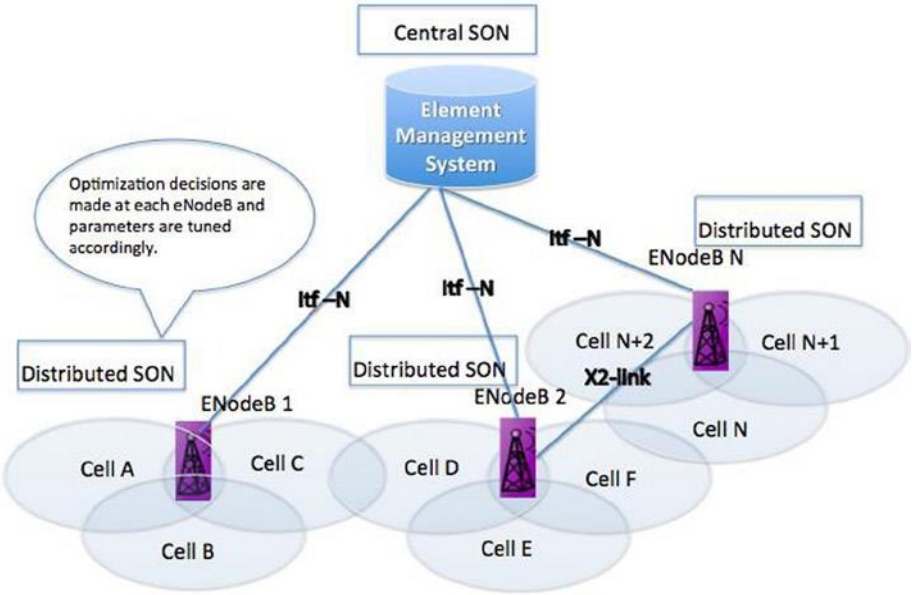
يوضّح الشكل 1−9 بنية SON المركزيّة، حيث توجد جميع عمليات SON في مستوى إدارة العناصر أو مستوى إدارة الشبكة؛ ما يسهّل عمليّة التركيب installation. ومع ذلك، يمكن أن يكون تكامل المشغّلين لتحسين الحل المقابل لوظيفة SON المطلوبة أمراً صعباً للغاية؛ فضلاً عن أنّه لا يوجد معيار مُعتمد لعمليّة الأمْثَلَة، ويكون للمُشغِّلين شبكة ذات آليّة تنظيم ذاتي مركزي مناسب لعنصر الشّبكة الخاص بهم [57].



الشكل 1−9: مخطّط بنيوي لشبكة SON مركزية [57].

- **الشبكة ذاتيّة التنظيم الموزَّعة**

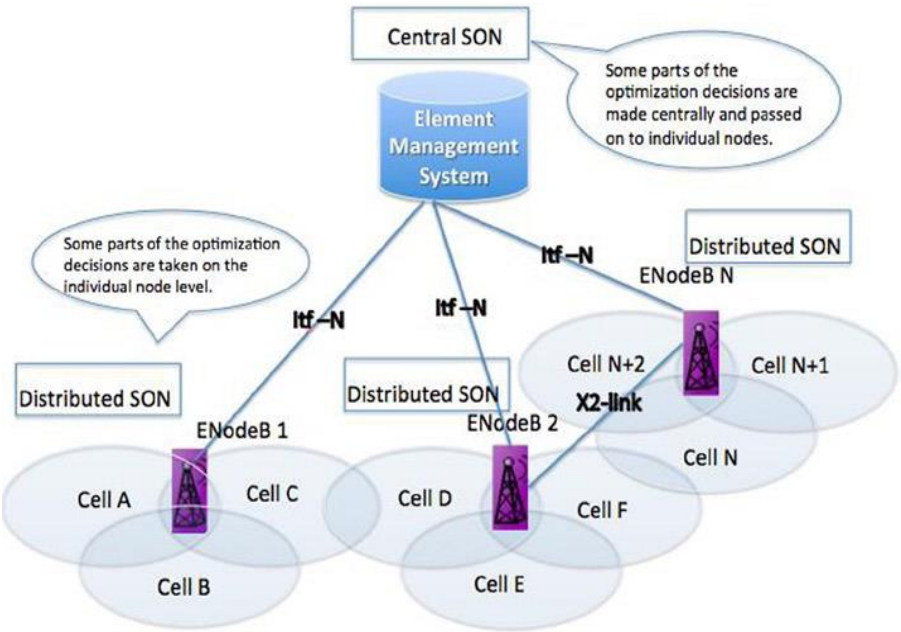
لا تتواجد خوارزميّات التحسين على مستوى نظام إدارة العنصر من الشبكة، ولكن على مستوى عنصر الشبكة مثل eNB نفسه يمكن أن تتواجد وظائف SON وخوارزميّة الأمثلة في العديد من عناصر الشبكة وليست بالضرورة على مستوى إدارة عالٍ. وهذا يجعل عمليّات التركيب والأمثلة مُعقَّدة للغاية، خاصّةً عندما تكون هناك حاجة لعناصر شبكة متعدّدة للتنسيق مع بعضها كجزء من حل البُنية الموزَّعة. ويُعَد التعامل مع SON الموزَّعة أكثر فعاليّة من النمط المركزي. وتتواجد SON الموزَّعة في مستوى إدارة منخفض نسبيّاً لذلك يمكن تنفيذ خوارزميّات الأمثلة بشكل أسرع بكثير مقارنةً بحل النوع المركزي. يبين الشكل 1-10 مخطّطاً بنيوياً للشبكة ذاتيّة التنظيم الموزَّعة [57].



الشكل 1-10: مخطط بنيوي لشبكة SON موزَّعة [57].

- **الشبكة ذاتيّة التنظيم الهجينة**

تُعدُّ هذه البُنية مزيجاً من البُنى المركزية والمُوزَّعة، حيث يتوضَّع جزء من خوارزميّات الأمثلة في موقع مركزي وجزء آخر على مستوى العنصر أو مستوى المحطّة القاعديّة eNB. تُستخدَم خوارزميّات الأمثلة الموجودة على المستوى الموزّع لتوفير حل أسرع، في حين تتواجد خوارزميّة الحلول المفصّلة والمُدرَّبة مسبقاً على حالات إصلاح مُحدَّدة للشبكة التي تُدعى الخوارزميّات المُدرَّبة بشكل جيّد well-educated على المستوى المركزي. يُوفِّر هذا النوع من الحلول الهجينة مزيداً من المرونة للشبكة؛ ما يجعلها عمليّة أكثر بالنسبة لأنواع مختلفة من التحسينات. يبين الشكل 1-11 مخطّطاً بُنيويّاً لشبكة SON الهجينة [57].



الشكل 1–11: مخطط بنيوي لشبكة SON هجينة [57].

11.1 خاتمة الفصل

عُرِضَ في هذا الفصل بُنية شبكات LTE-A، وُخلِصَ إلى أنّ نظام LTE-A هو تحسين مستمر لنظام التطوّر طويل الأمد LTE مع الحفاظ على التوافقيّة مع الإصدارات السابقة. يُمثِّل تعديل بنية الشبكة بإضافة شبكات الخلايا الصغيرة أحد هذه التحسينات الواعدة في الوقت الحالي، ولأنها تؤدّي إلى تحقيق بعض متطلّبات النظام LTE-A من حيث تحسين سعة الشبكة وجودة الخدمة في المناطق التي يكون فيها طلب كبير على حركة عبور المعطيات. يشترط هذا التحسين مواجهة مشكلات حمل الخلايا، وإدارة الموارد الراديويّة وتخصيصها وإدارة التداخل وعمليّات التسليم في ظل كثافة كبيرة للخلايا الصغيرة المُوزَّعة بين الخلايا الماكرويّة. كما يستند هذا التحسين بشكل كامل إلى مبادئ الشبكات ذاتيّة التنظيم SON بحيث تُنفَّذ خوارزميّات الأمثلة تلقائيّاً من قبل الشبكة دون تدخل العامل البشري.

يعرض الفصل التالي خوارزميّة مُطوَّرة لعلاقة الجوار التلقائي في الشبكات ذاتيّة التنظيم SON في النظام LTE-A.

الفصل الثاني

تطوير خوارزميّة علاقة الجوار التلقائي

Improving ANR Algorithm

الفصل الثاني

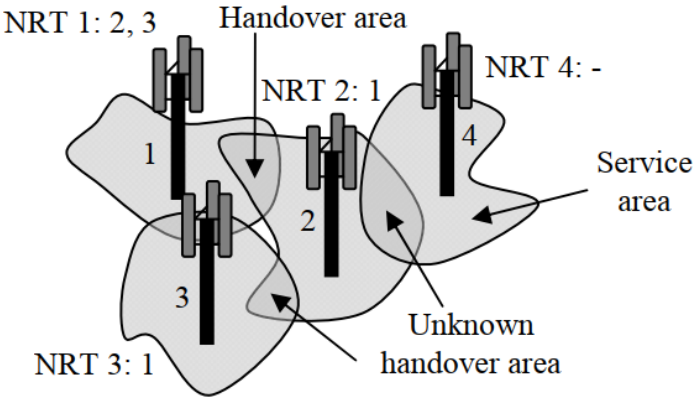
تطوير خوارزميّة علاقة الجوار التلقائي Improving ANR Algorithm

يركّز هذا الفصل على تطوير خوارزميّة علاقة الجوار التلقائي ANR لتحسين أداء شبكة LTE ذاتيّة التنظيم. تسمح الخوارزميّة المُطوَّرَة بإدارة عمليات التسليم بين الخلايا في الحالات الحرجة وتحديد الخليّة المناسبة أكثر للعمل على تأمين استمرارية الخدمة، وذلك بالاعتماد على تقارير البيانات المُقاسة والواردة من مستخدمي الخليّة الأساسيّة وجيرانها.

1.2 مقدمة

تستند إعدادات إدارة الشبكة، في نظم الجيلين الثاني والثالث 2G و3G، يدويّاً على معلومات من أدوات التخطيط والاختبارات الجوّالة، ومع تطوير النظام LTE، جرى التعبير عن متطلبات بساطة الإدارة وفعالية التكلفة من قبل المُشغِّلين، والتركيز الكبير على إيجاد حلول الشبكات ذاتيّة التنظيم SON. كان أحد حلول SON التي قُدِّمَتْ في معايير 3GPP وظيفة علاقة الجوار التلقائي ANR، التي تهدف إلى إنشاء علاقات الجوار تلقائيّاً بين كينونات الشبكة الراديويّة [68]. تُستخدَم هذه العلاقات لإنشاء الاتصالات بين الكينونات، ولدعم الحركيّة، وموازنة الحمل، وما إلى ذلك. ويُنظَر إلى ANR على أنّها تقلّل كثيراً من تكاليف التخطيط والتشغيل للمشغلين [9]. لذلك، فإنّ التشكيل الذاتي لعلاقات الجوار مهم أيضاً في النظام LTE-A وفي منظومات الجيل الخامس 5G.

طُرِحَتْ بعض المناقشات الأولية لتحديد المعايير الأولية حول ANR للجيل الخامس في [69]، ويجري العمل في هذا البحث على تطوير خوارزميّة ANR فيما يتعلق بموازنة الحمل عبر إضافة مُعامِل حمل لكل خليّة من الخلايا الماكرويّة في شبكة LTE المتجانسة. يوضّح الشكل 2-1 مفهوم الجيران والخلايا المجاورة، وفيه يُلاحظ أنّ المحطّة القاعديّة BS تُنشئ وتخزّن جدولاً لعلاقة الجوار NRT لكل خليّة تجاورها. تقريباً، ويحتوي كل إدخال يَرِد إليها من تقرير قياسات Measurements Report (MR) المستخدم على كل ما تحتاج المحطة القاعديّة لمعرفته عن أحد جيرانها. يُلاحظ في الشكل 2-1 أنّ الخليّة الأولى لديها معرفة كاملة بجيرانها، وتتعرف الخليّة الثانية فقط على الخليّة الأولى وليس الخليّة الثالثة، قد يكون هذا بسبب أخطاء التنبُّؤ نتيجة عدم الدقّة في نموذج انتشار الإشارة ومعطيات الخرائط الرقميّة المستخدمة في مرحلة التخطيط الأوّلي، في حين يُراد إضافة الخليّة الرابعة إلى الشبكة لتحديثها، فهي (أي الخليّة الرابعة) ليست على علم وقت التحديث؛ أو من قبل؛ بأي جيران، فجدولها NRT يكون فارغاً بعد التحديث.

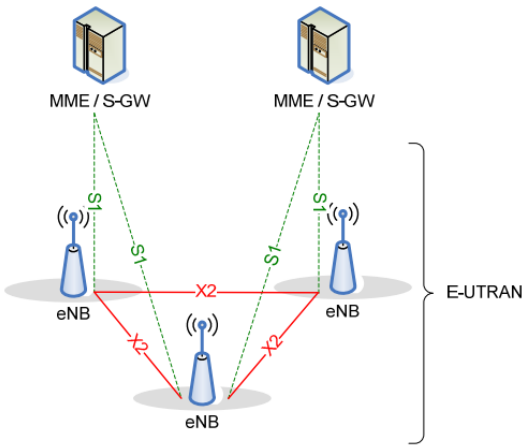


الشكل 2–1: مفهوم الجيران والخلايا المجاورة [9].

في نظم الجيلين الثاني والثالث، كان يجري تعبئة جداول NRT باستخدام أدوات التخطيط الخلوي عن طريق تنبُّؤات التغطية قبل تركيب محطّة قاعديّة جديدة. وقد أجبرتْ أخطاء التنبُّؤ، بسبب عيوب في الخريطة ومعطيات المباني المحيطة، المُشغِّلين على اللجوء إلى الاختبارات الجوَّالة لاستنفاد منطقة التغطية بالكامل وتحديد جميع مناطق التسليم الممكنة. ولأنّ الشبكة الراديويّة تتطوَّر تدريجيّاً بمرور الوقت مع إضافة الخلايا الجديدة وظروف التداخل المتغيّرة، يتطلَّب التخطيط المركزي لكل من مُعرِّفات الخليّة PCI وجدول علاقة الجوار NRT إجراء التخطيط المتكرِّر. وقد ثبت أنّ هذا الأمر مُكلِف وهناك حاجة إلى طرائق جديدة لاشتقاق قوائم NRT تلقائياً. من هنا برزتْ أهميّة خوارزميّة ANR.

2.2 وظيفة ANR في معيار 3GPP

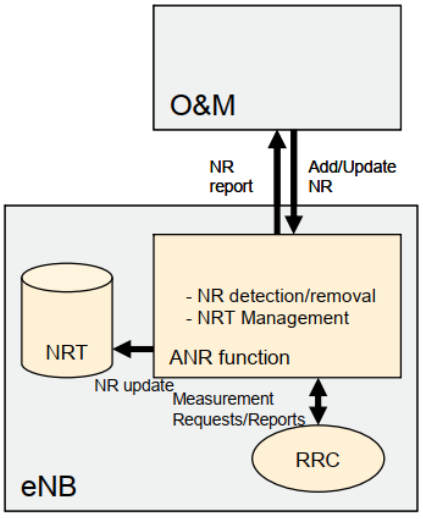
تهتم خوارزميّة ANR بعقد الشبكة التي تمتلك واجهة X2 موضَّحة في الشكل 2–2، لتستطيع من خلالها التواصل مع العقد المجاورة، ويُفترض بكل عقدة أن تبني جدولاً يحوي قائمة بالخلايا المجاورة NCL. وكما ذكرنا سابقاً، يكون هذا الجدول فارغاً للعقد الجديدة على الشبكة ثم يُملأ تدريجياً من خلال البيانات القياسية التي ترسلها تجهيزات المستخدمين إليها وفق تكرار محدد في الشبكة، ثم تقوم العقدة بأمثلة جدول خلايا الجوار وتحديثه بشكلٍ مستمر.



الشكل 2–2: هيكلية شبكة LTE في معيار 3GPP [9].

وصِفَت وظيفة ANR كإحدى وظائف الشبكات ذاتيّة التنظيم SON Function (SONF) في معيار 3GPP في [70] وهي موضَّحة في الشكل 2–3. في الشبكات التقليديّة، يعرّف الجدول NRT من خلال نظام التشغيل والصيانة Operations and Maintenance (O&M)، ولا يزال هذا الاحتمال موجوداً حتى عند تنفيذ ANR. ومع ذلك، فمن الممكن تشغيل محطّات قاعديّة دون أي مُدخَلات NRT فيها على الإطلاق. ويجري تعريف كل إدخال جديد على الجدول NRT بشكل فريد بواسطة معرِّف الخليّة الهدف PCI، فإذا كانت الخليّة الهدف في عملية التسليم خليّة LTE وتعمل على نفس التردد، فإنّ هذا المعرِّف هو closed subscriber group (CSG)، وهو يحتوي NRT أيضاً على PCI. عادة تستَخدِم المحطّة eNB المُعرِّف CSG عند إرسال إشاراتها إلى محطّة eNB أُخرى وذلك عبر كينونة إدارة الحركيّة MME، وتقوم MME بتوجيه الرسائل بناءً على هويّة eNB التي تُعَد جزءاً من CGI. يجري استخدام CGI أيضاً عند الحصول عبر MME على عنوان IP الخاص بالمحطّة eNB الأُخرى، وهذا العنوان هو الذي يجري استخدامه لإنشاء واجهة X2؛ وتحتوي مُدخَلات NRT على معلومات عن توفُّر الواجهة X2 في الشبكة، وما إذا كانت ANR قد تزيل علاقة الجوار أم لا عبر هذه الواجهة، وما إذا كان يمكن استخدام علاقة الجوار للتسليم أم لا [68].

تتمثَّل أهداف وظيفة ANR الرئيسيّة في إضافة المُدخَلات وإزالتها تلقائيّاً من جدول NRT وإليه. وتقاد الإضافات على الجدول NRT من خلال إشارات كينونة التحكُّم في الموارد الراديويّة Radio Resource Control (RRC) بين نظام المحطّة eNB والهواتف النقَّالة المرتبطة بها (كما يوضّح الشكل 2–3)؛ وهذا يوفِّر وسائل التحكُّم في القياس وإعداد التقارير من المستخدمين. ويستخدم RRC لتحديد قياسات الخلايا المرشَّحة لتُضاف إلى الجدول NRT؛ مما يعني أنّ الهواتف النقَّالة تُقدِّم معلومات القياس إلى المحطّة القاعديّة التي تخدمها، وعند الطلب يقوم الهاتف النقَّال أيضاً بفك تشفير معلومات CGI الفريدة الخاصة بخليّة من الخلايا والإبلاغ عنها.



الشكل 2–3: وظيفة ANR في معيار 3GPP [68].

إذا كانت سياسة الشبكة تهدف إلى إنشاء واجهة X2 لعلاقات الجوار لخليّة ما، وإذا لم يكن X2 متاحاً بالفعل، فسيجري استخدام المُعرِّف CGI لاستعادة عنوان IP المستهدف للمحطّة الموافقة eNB الذي يُستخدَم عادةً لإعدادات الواجهة X2. عند إنشاء واجهة X2، ويمكن للمحطّة eNBs المرتبطة بالشبكة مشاركة المعلومات حول الخلايا التي يجري تقديمها بما في ذلك PCIs وCGIs. ثم يجري تحديد سمات إدخال NRT المتبقية إما عن طريق نظام التشغيل والصيانة O&M، أو باستخدام القيم الافتراضية المُعدَّة مسبقاً. تجري إزالة إدخال NRT عبر مؤقّتات Timers، ويعاد تشغيلها في كل مرة يجري استخدام علاقة الجوار لإنجاز عملية التسليم. لذا، تجري إزالة المدخلات (إزالة خليّة ما من جدول الجوار) إذا لم تُستخدَم علاقة الجوار المخزنة في الجدول NRT خلال فترة زمنية محددة من قبل المُشغِّل.

3.2 الدراسات المرجعية

تحتاج الهواتف النقّالة، في نظم الجيلين الثاني والثالث، إلى معلومات الجوار للإبلاغ عن الخلايا المرشحة للخدمة في تقرير القياس MR، ولكن في النظام LTE/LTE-A، يمكن للهواتف النقّالة العمل دون هذه المعلومات. فبدلاً من ذلك، تستفيد شبكة النفاذ الراديويّة Radio Access Network (RAN) من الجدول NRT. من الناحية التاريخية، وفيما يتعلق بتوليد جدول NRT، جرتْ صياغة أحد الأساليب المبكرة لشبكات GSM وD-AMPS وPDC في [71]، وأُضيفَتْ مجموعة من خلايا الاختبار الجديدة إلى قائمة الجوار للخليّة. يتيح هذا للهاتف النقَّال قياس الخلايا غير الموجودة حاليّاً في قائمة علاقة الخليّة المجاورة للخليّة التي تخدم الهاتف النقَّال. وتستخدم إحصائيّات جودة الإشارة (التي تُقاس بواسطة الهاتف النقَّال)، وتسجل أحداث التسليم، ومعدّل رفض المكالمة كمُدخَلات في خوارزميّة ANR المقترحة، وقدْ جَرَتْ مناقشة التنفيذ العملي للطريقة المقترحة بإيجاز في [72].

طوّر الباحثون في [73] إجرائيّة لإنشاء جدول NRT، حيث تتقاطع كل محطّة قاعديّة مع مجموعة الهواتف النقَّالة في منطقة الخدمة الخاصة بها مع الهواتف النقَّالة في منطقة الخدمة لجميع المحطّات القاعديّة الأُخرى. ويجري تكوين علاقات الجوار إذا كان حجم المجموعة المتقاطعة أكبر من عتبة معينة. يجب تنفيذ هذه الخوارزميّة دورياً؛ ما يتسبَّب في زيادة الحمل في الشبكة.

اقترح الباحثون في [74] طريقة لتعريف جدول علاقة الجوار، بحيث يجري تحديد تقريبي لمنطقة خدمة خلايا الجوار وحساب التداخل بينها. فإذا تداخلت خليَّتان متجاورتان في مناطق الخدمة التقريبية، تُستخدم نماذج انتشار الموجات لتقدير مناطق الخدمة المتاحة للمستخدمين. وتؤثر دقّة النماذج المستخدمة في [74] تأثيراً كبيراً في صلاحيّة جدول الجوار الناتج، وعلى هذا النحو، قد تكون جداول الجوار التي جَرَى إنشاؤها خاطئة لأنَّ نماذج الانتشار قد تكون غير دقيقة بسبب، على سبيل المثال، معطيات التضاريس غير المعروفة في بيئة الشبكة.

قدم الباحثون إجرائيّة لإنشاء جدول NRT [75]، حيث تقوم كل محطة قاعديّة بإنشاء مجموعة تقاطع للهواتف النقّالة المتواجدة في منطقة خدمتها مع مجموعة الهواتف النقّالة المتواجدة في منطقة الخدمة التابعة لجميع المحطات المتجاورة، تتشكل علاقة الجوار إذا كان حجم المجموعة المتقاطعة أكبر من عتبة محددة H، ويجب تنفيذ هذه الخوارزميّة دورياً؛ ما يؤدي إلى زيادة الحمل على الشبكة كما يجب ايجاد القيمة المناسبة للمعامل H.

اعتمد الباحثون في [76] على تقييم تأثير التحديث الآلي لجدول علاقة الجوار في عملية التسليم في النظام LTE، حيث يجري الاستفادة من المعطيات الإحصائيّة من مخدّمات مركز الصيانة والتشغيل OMC لتحديث جدول NRT بهدف تقليل احتمال انقطاع الاتصال وزيادة معدّل الإنتاجيّة للنظام.

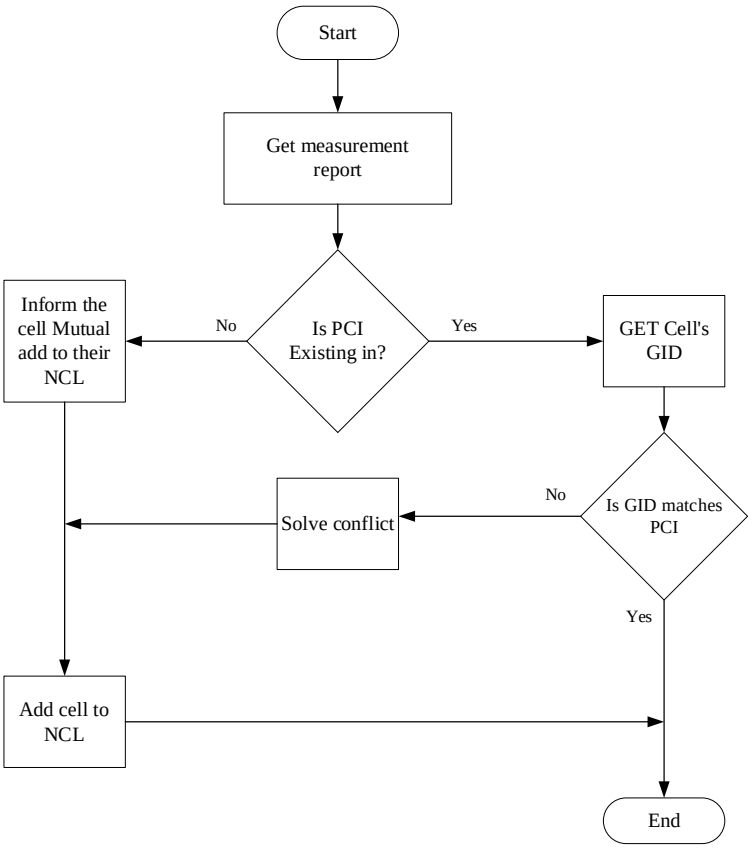
في المناقشات الأولى لمجموعة معيار 3GPP بإصداره الخامس عشر، أُقترِح أنّ تكون خوارزميّة ANR جزءاً من تجهيزات المستخدمين الخاصة بمنظومات الجيل الخامس 5G UEs لأنّ إجراء تقارير المستخدم في المرحلة المُبكِّرة لإمكانيّات هذا الجيل مفيد جداً للمُشغِّلين لأنّه يتجنّب التهيئة اليدويّة لعلاقات الجوار. لذلك، أُتّفق على أنَّ إجراء ANR سيجري توحيده في الإصدار النهائي الخامس عشر Rel-15 [77]. ومع ذلك، لم يحدّد الإجراء الذي سيستخدم للقيام بذلك. وتناول الباحثون في [68] هذه الإشكاليّة واقتُرِحَت آليّة لتطبيق مفاهيم ANR في شبكات الجيل الخامس (المعيار 3GPP NR)، وهو اقتراح لا يزال مفتوحاً للنقاش وقيد البحث، ويُعَد جزءً أساسيّاً من معيار 3GPP ممثلاً بالإصدار Rel.15.

4.2 فرضيات خوارزميّة ANR التقليديّة ومخططها التدفقي

تستند خوارزميّة ANR التقليديّة إلى الفرضيات التالية:

- لكل خليّة معرِّف فيزيائي PCI تستخدمه تجهيزات المستخدمين UEs محدداً للخليّة.
- لكل خليّة أيضاً مُعرِّف عالمي Global Identity (GID) فريد ومميز على الشبكة يمكن الحصول عليه عن طريق تجهيزات المستخدمين UEs عند الحاجة.
- تقوم تجهيزات المستخدمين باستكشاف وقياس إشارات الخلايا المجاورة وإرسال تقارير هذه القياسات إلى الخليّة المُخدِّمة.
- علاقة الجوار بين الخلايا تبادلية أي إذا كانت خليّة ما مدرجة في قائمة الجوار لخليّة أخرى فإنّ قائمة جوار الخليّة الأولى بالتأكيد تحوي الخليّة الثانية في قائمتها.

تُعدُّ استطاعة الإشارة المرجعية المُستقبَلة reference signal received power (RSRP) ونسبة استطاعة الإشارة المفيدة إلى التداخل والضجيج SINR وجودة الإشارة المرجعية المُستقبَلة reference signal received quality (RSRQ) من أهم الموسطات التي يتضمنها تقرير القياسات MR من تجهيزات المستخدمين UEs، وتعتمد الخلايا على هذه البيانات القياسية لتحديد الخليّة المُخدِّمة والخليّة الهدف المتوقع تنفيذ عملية التسليم HO لها. يوضّح الشكل 2-4 المخطط التدفقي لخوارزميّة ANR التقليديّة.



الشكل 2–4: المخطط التدفقي لخوارزميّة ANR التقليديّة [65].

5.2 نموذج شبكة متجانسة لمحاكاة خوارزميّة ANR التقليديّة

تتضمن هذه الفقرة نتائج محاكاة خوارزميّة ANR التقليديّة على مِنصّة ماتلاب لإظهارها بشكل تقني عملي أكثر وضوحاً من سياقها النظري. وتعتمد عمليّة المحاكاة على بنية شبكة تتوزُّع الخلايا الماكرويّة فيها على رؤوس شكل سُداسي منتظم في مركزه كما في [78]، حيث جَرَى إدخال عدد من المستخدمين (120 في بحثنا هذا) الموزعين عشوائياً الذين سيقومون بعملية القياسات. ويُستخدَم بداية التوزُّع العشوائي المنتظم على المساحة المفترضة بحيث يمتد محوري الإحداثيّات X وY بين القيمتين−550 و+550 متر. وطبّقت خوارزميّة ANR على هذه البنية بالاعتماد على البيانات القياسية التي ترسلها تجهيزات المستخدمين إلى الخلايا. تتمكن هذه الخلايا باستخدام خوارزميّة ANR من تحديد الخليّة المُخدمِة وخلايا الجوار من خلال قيم المُوسِط RSRP. تعتمد هذه القيم بشكل مباشر على نموذج الانتشار الراديوي. يمثل هذا النموذج الصياغة الرياضيّة لفقد المسار path Loss الذي تعاني منه الأمواج الراديويّة خلال انتشارها عبر القناة اللاسلكيّة بين المحطّة القاعديّة وتجهيزة المستخدم UE ويعطى فقد المسار بالعلاقة (2−1).

$$P_L(d) = P_{txRS} - RSRP \qquad (1-2)$$

وفيها تمثّل P_{txRS} الاستطاعة المرسلة من المحطّة القاعديّة eNB.

يوجد العديد من النماذج التجريبيّة المستخدمة في حساب فقد المسار. وفي هذا البحث اعتمد نموذج الانتشار Walfisch-Ikegami [79]. الذي يُستخدم من أجل البيئات المدنيّة الكثيفة Dense Urban، ويعطي قيمة دقيقة لفقد المسار مقارنة بالنماذج الأُخرى، وذلك نتيجة للموسِطات المضافة لهذا النموذج التي تميّز بيئات وتضاريس مختلفة مثل ارتفاعات الأبنية، التباعد بين الأبنية، عرض الشوارع والزوايا بين الشوارع. يوضّح الجدول 2−1 مجالات قيم بعض الموسِطات المستخدمة عملياً في النموذج Walfish-Ikegami.

الجدول 2—1: مُوسِطات النموذج Walfish-Ikegami [79].

الموسط	مجال القيم
f_0	800 MHz – 2000 MHz
h_b	4 m – 50 m
h_{Roof}	1 m – 3 m
d	20 m – 5 Km

يميّز هذا النموذج حالتين من فقد المسار: حالة وجود خط نظر line-of-sight (LOS) بين الخليّة وتجهيزة المستخدم ويحسب فقد المسار في هذه الحالة بالعلاقة (2−2).

$$P_L(d) = 42.6 + 26\log(d) + 20\log(f_0) \qquad (2-2)$$

أما الحالة الثانية فحالة عدم وجود خط نظر Non line-of-sight (NLOS) بين تجهيزة المستخدم والخليّة المُخدِّمة وفي هذه الحالة يعطى فقد المسار بالعلاقة (2−3).

$$P_l(d) = \begin{cases} P_{L_0}(d) + P_{L_{msd}} + P_{L_{rts}} & \text{if} \quad P_{L_{msd}} + P_{L_{rts}} > 0 \\ P_{L_0}(d) & \text{if} \quad P_{L_{msd}} + P_{L_{rts}} \le 0 \end{cases} \qquad (3-2)$$

وفيها يمثّل $P_{L_0}(d)$ فقد المسار الحر ويعطى بالعلاقة (2−4).

$$P_{L_0}(d) = 32.4 + 20\log(d) + 20\log(f_0) \qquad (4-2)$$

ويمثّل $P_{L_{rts}}(d)$ فقد التشتُّت الناجم عن الأسقف ويعطى بالعلاقة (2−5).

$$P_{L_{rts}} = -16.9 - 10\log(W) - 10\log(f_0) + 20\log(\Delta h_m) + P_{ori} \qquad (5-2)$$

وفيها يمثّل P_{ori} مُعامِل تصحيح اتجاه الطريق ويعطى بالعلاقة (2−6)، والذي يأخذ بالحسبان التشتُّت الناجم من الأسقف على الطريق غير المُتعامِد مع اتجاه الانتشار.

$$P_{ori} = \begin{cases} -10 + 0.354\varphi & \text{if} \quad 0 < \varphi \le 35^\circ \\ 2.5 + 0.075(\varphi - 35) & \text{if} \quad 35 < \varphi \le 55^\circ \\ 4 - 0.114(\varphi - 55) & \text{if} \quad 55 < \varphi \le 90^\circ \end{cases} \qquad (6-2)$$

ويعطى المُعامِل Δh_m بالعلاقة (2−7).

$$\Delta h_m = h_{Roof} - h_m \qquad (7-2)$$

يعبّر الحد $P_{L_{msd}}(d)$ عن التشتُّت المتعدّد الناجم عن صف من المباني ويعطى بالعلاقة (2−8).

$$P_{L_{msd}} = 18\log(1+\Delta h_b) + k_a + k_d \log d + k_f \log f_0 - 9\log b \qquad (8-2)$$

أمّا المُعامِلات الواردة في العلاقة (2−8) فتعطى بالعلاقات من (2−9) إلى (2−12).

$$\Delta h_b = h_b - h_{Roof} \qquad (9-2)$$

$$k_a = \begin{cases} 54 & \text{if} \quad \Delta h_b > 0 \\ 54 - 0.8\Delta h_b d & \text{if} \quad d \geq 0.5\text{km} \;\&\; \Delta h_b \leq 0 \\ 54 - 1.6\Delta h_b d & \text{if} \quad d < 0.5km \;\&\; \Delta h_b = 0 \end{cases} \qquad (10-2)$$

$$k_d = \begin{cases} 18 & \text{if } \Delta h_b > 0 \\ 18 - \frac{15\Delta h_b}{h_{Roof}} & \text{if } \Delta h_b \leq 0 \end{cases} \qquad (11-2)$$

$$K_f = \begin{cases} 0.7\left(\frac{f_0}{925} - 1\right) & \text{for} \quad \text{medium} - \text{sized cites} \\ 1.5\left(\frac{f_0}{925} - 1\right) & \text{for} \quad \text{metropolitan areas} \end{cases} \qquad (12-2)$$

حيث:

f_0 : تردد الإرسال بالميغا هرتز MHz.

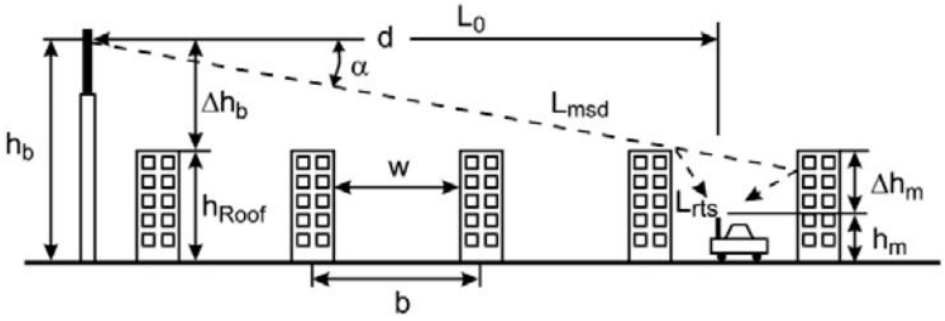
d : المسافة بين المحطّة القاعديّة والهاتف النقّال بالكيلو متر km.

h_b: ارتفاع هوائي المحطّة القاعديّة، ويقاس بالمتر m.

h_m: ارتفاع هوائي الهاتف النقّال، ويقاس بالمتر m.

h_{Roof}: ارتفاع الأبنية، ويقاس بالمتر m.

يوضّح الشكل 2−5 الموسِطات المستخدمة في نموذج Walfish-Ikegami.



الشكل 2−5: رسم توضيحي لموسطات نموذج Walfish-Ikegami [79].

نفترض في هذا البحث الحالة الأبسط، وهي حالة وجود خط نظر بين تجهيزة المستخدم والمحطّة المُخدمِة، يمكن حساب الاستطاعة المستقبلة RSRP من العلاقة (2−13).

$$RSRP = P_{txRS} - P_L(d) \qquad (13-2)$$

بتعويض العلاقة (2−2) في العلاقة (2−13) نحصل على العلاقة (2−14).

$$RSRP = P_{txRS} - \left(42.6 + 26\log(d) + 20\log(f_0)\right) \qquad (14-2)$$

وبتحديد تردد الإرسال $f_0 = 1800MHz$ نستنتج العلاقتين (2−15) و(2−16).

$$RSRP = P_{txRS} - \left(42.6 + 26\log(d) + 20\log(1800)\right) \qquad (15-2)$$

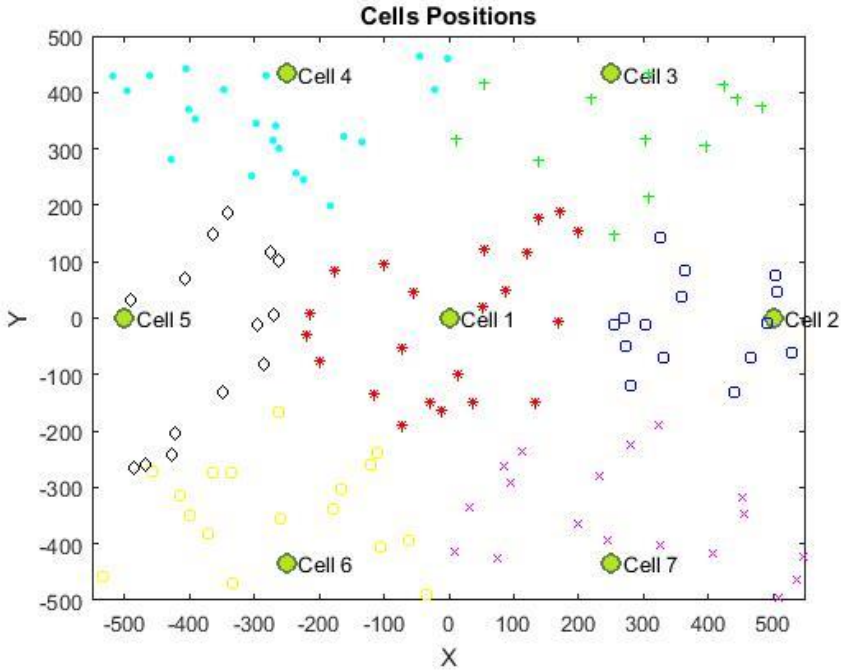
$$RSRP = P_{txRS} - \left(107.71 + 26\log(d)\right) \qquad (16-2)$$

تقوم تجهيزة المستخدم بقياس قيمة الاستطاعة المرجعية المستقبلة RSRP من كل الخلايا ويرتبط بالخليّة ذات قيمة RSRP الأعلى. يوضّح الجدول 2−2 تقرير قياسات من تجهيزة المستخدم UE الواقعة في إحداثيّات معينة من جغرافيا الشبكة ممثّلة بالنقطة (140,283−) من أجل استطاعة إرسال متساوية لكل الخلايا قيمتها $P_{txRS} = 18\ dBm$، وحساسية مستقبل تساوي Rx_sensitivity = -77 dBm.

الجدول 2—2: تقرير قياس لتجهيزة مستخدم ضمن الخليّة الثانية (الباحث).

رقم الخليّة	TCI (PCI, ECGI)	RSRP (dBm)
2	174	-74.42
7	49	-76
1	185	-76.69

يُلاحَظ من الجدول 2−2 أنّ الخليّة المُخدمِة هي الخليّة الثانية (Cell2) والخليّة المجاورة والأقرب هي الخليّة السابعة (Cell7) وتحتل الخليّة الأولى المرتبة الثالثة في علاقات الجوار. يوضّح الشكل 2−6 توزُّع المستخدمين ضمن بنية الشبكة المفترضة.



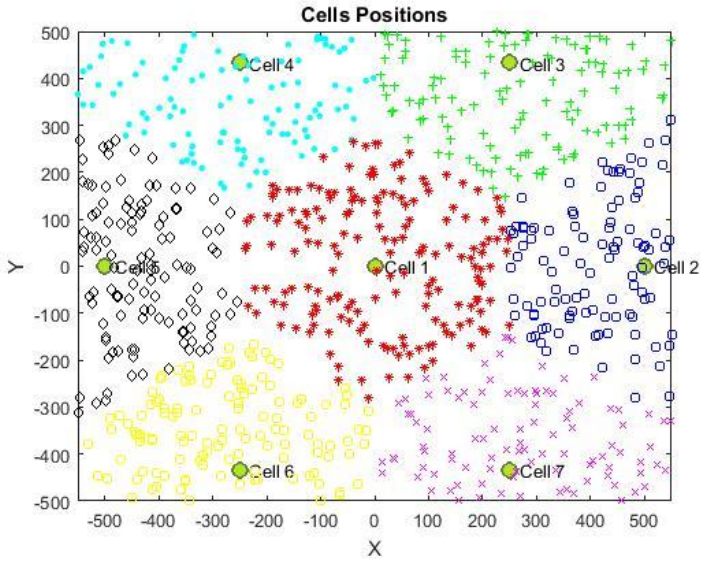
الشكل 2−6: توزُّع 120 مشتركاً ضمن بنية الشبكة المتجانسة المفترضة (الباحث).

بإحصاء عدد المستخدمين المرتبطين بكل خليّة، نحصل على الجدول 2−3 الذي يوضّح توزُّع المستخدمين على الخلايا.

الجدول 2—3: توزُّع المستخدمين (120 UEs) ضمن منطقة الدراسة (الباحث).

رقم الخليّة	Cell1	Cell2	Cell3	Cell4	Cell5	Cell6	Cell7
عدد المستخدمين UE	22	15	12	22	14	17	18

عند زيادة عدد المستخدمين في الشبكة إلى (840 UEs) باستخدام التوزيع العشوائي المنتظم وتطبيق خوارزميّة ANR التقليديّة جرى الحصول على الشكل 2–7، والذي يبيّن صورة أوضح.



الشكل 2–7: توزُّع 840 مشتركاً ضمن البنية المعتبرة (الباحث).

أُحصيَّ عدد المستخدمين المرتبطين بكل خليّة، كما في الجدول 2–4 الذي يوضّح توزُّع المستخدمين على الخلايا.

الجدول 2—4: توزُّع المستخدمين (840 UEs) ضمن منطقة الدراسة (الباحث).

رقم الخليّة	Cell1	Cell2	Cell3	Cell4	Cell5	Cell6	Cell7
عدد المستخدمين UEs	176	105	120	105	113	122	99

عند تطبيق خوارزميّة ANR على هذه البنية ووفق المعطيات السابقة نحصل على لوائح الجوار NCLs التالية لكل خليّة من الخلايا السبعة (الجداول من 2–5 إلى 2–11).

الجدول 2—5: لائحة NCL للخليّة الثالثة (الباحث).

N. Cell	TCI
2	420
1	377
4	49

الجدول 2—6: لائحة NCL للخليّة الثانية (الباحث).

N. Cell	TCI
1	377
7	473
3	199

الجدول 2—7: لائحة NCL للخليّة الأولى (الباحث).

N. Cell	TCI
7	473
5	134
2	420
6	400
3	199
4	49

الجدول 2—11: لائحة NCL للخليّة السابعة (الباحث).

N. Cell	TCI
1	377
6	400
2	420

الجدول 2—10: لائحة NCL للخليّة السادسة (الباحث).

N. Cell	TCI
1	377
5	134
7	473

الجدول 2—9: لائحة NCL للخليّة الخامسة (الباحث).

N. Cell	TCI
1	377
4	49
6	400

الجدول 2—8: لائحة NCL للخليّة الرابعة (الباحث).

N. Cell	TCI
1	377
5	134
3	199

يُلاحَظ من الجدول 2–4 أنَّ مستخدمي الشبكة وُزِّعوا عشوائيّاً بشكل منتظم وهذه النتائج منطقيّة لأنّنا استخدمنا المولِّد العشوائي المنتظم المتاح في بيئة المحاكاة على كامل المساحة المفترضة للشبكة. يبدو هذا الأمر بعيد نوعاً ما عن الواقع لأنّ المستخدمين لا يكونون موزَّعين إحصائيّاً بشكلٍ منتظم وإنّما يكون توارد المستخدمين باتجاه خليّة معينة يتبع التوزُّع الإحصائي البواسوني Poisson، وسيؤدي ذلك إلى تغيير وعدم توازن في الأحمال بين الخلايا. من أجل ذلك، نفترض فيما يلي حالة معينة أو حدث اجتماعي ما (حفلة، مؤتمر، مباراة ...) بالقرب من إحدى الخلايا بحيث يتجاوز عدد المستخدمين الذين يقعون ضمن مجال خدمة الخليّة الحد الأعلى الذي يمكنها تخديمه Cell Capacity والذي يكون مُحدَّداً بعدد كتل الموارد RBs المتاحة في كل خليّة.

6.2 مقترح خوارزميّة ANR باعتماد معامل حمل الخليّة Load Factor

يقترح هذا البحث إضافة مُعامِل حمل الخلية Cell Load Factor (CLF) لخوارزميّة ANR التقليديّة للوصول إلى الخليّة الأكثر مناسبةً في الحالة الديناميكيّة الآنيّة، وإدارة فعّالة لعمليّات التسليم بين الخلايا المتجاورة ورفع أداء الشبكة. نقصد بحمل الخليّة عدد المستخدمين المرتبطين معها بحالة فعّالة.

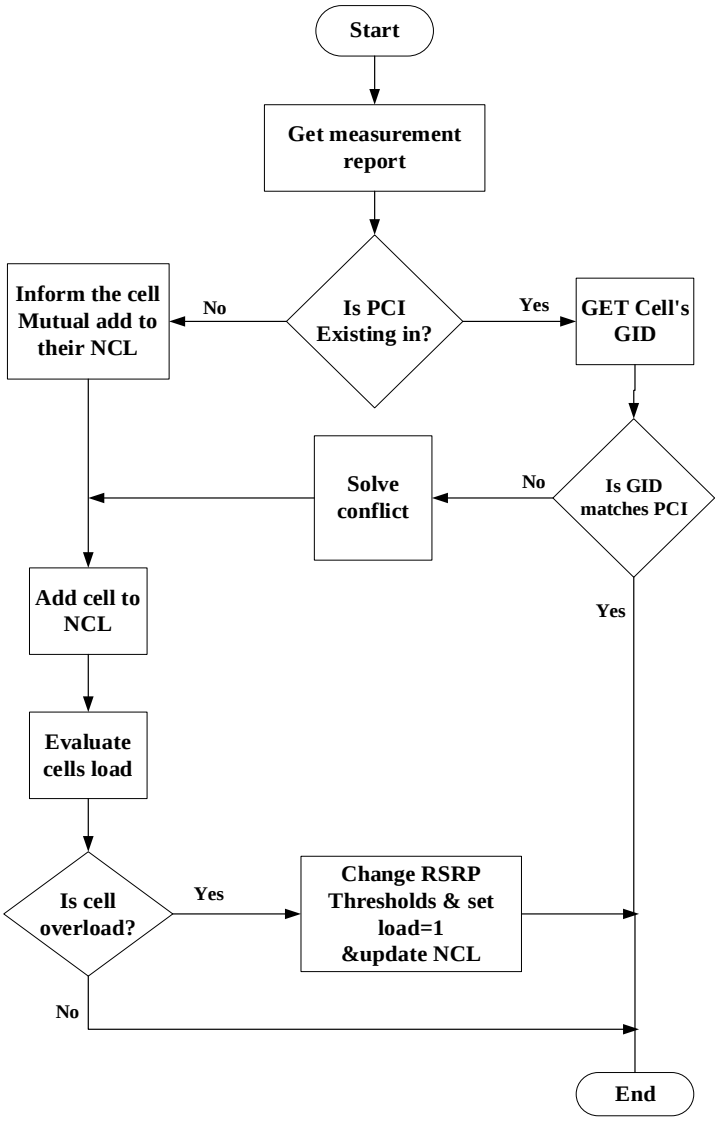
في البداية يكون لكل الخلايا نفس استطاعة الإرسال الافتراضية (أي نفس مجال التغطية)، ويجري توليد مستخدمين على التتالي وتوزيعهم عشوائياً ضمن بنية الشبكة المفترضة. تجري عملية ارتباط المستخدم بخليّة معينة بنفس الآليّة السابقة (أي من خلال إجراء القياسات على قيم RSRP واختيار الخليّة ذات القيمة الأعلى لتكون الخليّة المُخدِّمة، وإضافة بقيّة الخلايا المكتشفة إلى جدول الجوار NCL الخاص بالخليّة المُخدِّمة).

عندما يقترب حمل خليّة ما من الحد الأعلى الذي يمكنها تخديمه في آن معاً، تقوم في المرحلة الأولى بخفض استطاعة الإرسال الخاصة بها إلى عتبة جديدة محددة مسبقاً. يساعد هذا الإجراء على تقليص مساحة تغطية هذه الخليّة وتقليل احتمال دخول مستخدمين جُدُدْ إلى مجال تغطية الخليّة.

في المرحلة التالية، عندما يصل عدد المستخدمين في خليّة ما إلى الحد الأعلى الممكن تتوقف عن قبول مستخدمين جدد، وتقوم بإعلام الخلايا المجاورة لها المسجلة ضمن جدول NCL (عبر الواجهة X2).

عندما تكتشف أي خليّة أنّ إحدى خلايا الجوار المسجلة لديها تعاني من حمل زائد، ترفع استطاعة الإرسال الخاصة بها؛ مما يزيد مجال تغطيتها ويسهم في استقطاب مستخدمين جدد (مع مراعاة شروط الحمل الخاصة بها ومراعاة التداخل بين الخلايا).

تستطيع الخلايا التحكُّم بمجال التغطية بطريقتين، الأولى زيادة استطاعة الإرسال بمقدار محدّد (RSRP±α) لتحسين مجال تغطية الخليّة. والثانية من خلال تغيير زاوية التغطية أو الميلان للهوائيات. يؤدي هذا الإجراء إلى إيجاد نوع من توازن الحمل بين الخلايا المتجاورة. يوضّح الشكل 2-8 المخطط التدفُّقي للخوارزميّة المُطَّورة في هذا البحث ANR-LF التي تقوم بتحديث قائمة خلايا الجوار بالاعتماد على مفهوم مُعامِل الحمل.

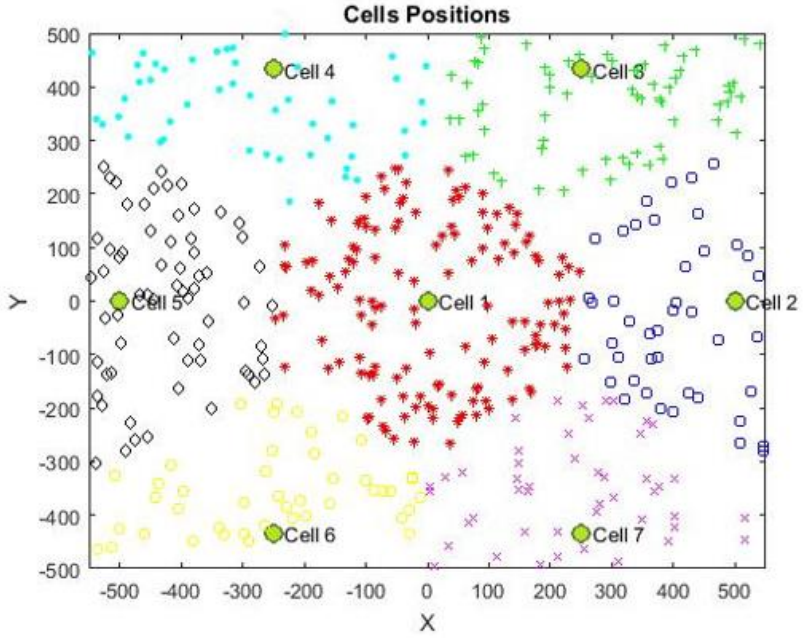


الشكل 2-8: المخطط التدفُّقي لخوارزميّة ANR-LF المُطوَّرَة (الباحث).

7.2 سيناريو محاكاة خوارزميّة ANR-LF ومناقشة النتائج

يعتمد السيناريو على إضافة مُعامِل الحمل في خوارزميّة ANR وتحليل تأثيره في أداء الشبكة في بيئة المحاكاة. نفترض الخليّة المدروسة تملك كتل موارد RB لتخديم 120 مستخدماً في آن واحد، ونفترض أنّه نتيجة حدث اجتماعي زاد الحمل على إحدى الخلايا ليتجاوز الحد الأعلى الذي يمكن للخليّة تخديمه، جَرَى تطبيق الخوارزميّة المقترحة ANR-LF التي تأخذ بالحسبان معامل الحمل ومقارنتها بالخوارزميّة التقليديّة.

سنناقش فيما يلي تأثير وجود حمل إضافي على الخليّة الأولى Cell1. يوضّح الشكل 2–9 حالة الشبكة عند توزيع 450 مستخدماً على كامل بنية الشبكة المفترضة بحيث يكون عدد المستخدمين أكبر في جوار الخليّة الأولى (حالة حمل زائد) بتطبيق خوارزميّة ANR التقليديّة دون إدخال أثر الحمل.



الشكل 2–9: توزُّع 450 مستخدماً مع وجود حمل زائد على الخليّة الاولى (الباحث).

أُحصيّ عدد المستخدمين المرتبطين بكل خليّة في هذه الحالة كما في الجدول 2–12.

الجدول 2—12: لائحة NCL للخليّة السابعة (الباحث).

رقم الخليّة	Cell1	Cell2	Cell3	Cell4	Cell5	Cell6	Cell7
عدد المستخدمين UE_S	139	43	65	48	64	44	47

يتَّضح من الجدول 2–12 أنَّ الحمل على الخليّة الأولى تجاوز الحد الأعلى (120 UEs) أي إنّ هذه الخليّة ستكون عاجزة عن تخديم 19 مستخدماً. وهذا سيؤدي إلى تدهور في مستوى جودة الخدمة.

نفذ في هذا البحث خوارزميّة ANR المقترحة على الحالة السابقة مع أخذ حمل الخلايا بالحسبان، مع مراعاة ما يلي:

- السعة العظمى للخليّة 120 مستخدماً.
- السعة التي يجري عندها خفض استطاعة الإرسال هي 90 مستخدماً.
- استطاعة الإرسال الافتراضية للخلايا: 18 dBm.
- العتبة الدنيا لاستطاعة الإرسال: 13 dBm.
- العتبة العليا لاستطاعة الإرسال: 21 dBm.

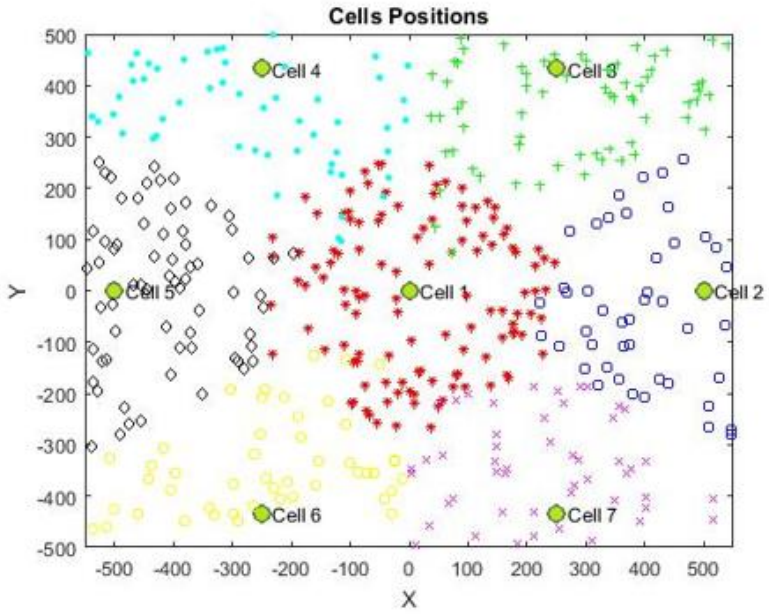
يوضّح الجدول 2–13 والشكل 2–10 حالة الشبكة وتوزُّع المستخدمين عند تنفيذ الخوارزميّة المقترحة ANR-LF مع أخذ معامل الحمل بالحسبان. ويتّضح أنّه جَرَى تخديم كامل المستخدمين. كما يُلاحَظ في الجدول 2–14 بعد انتهاء المحاكاة (تنفيذ ANR-LF مرة واحدة) تغيُّر حالة الخليّة الأولى (الحقل المضاف والذي يشير إلى الحمل) من الحالة الافتراضية (Loaded=0) إلى الحالة (Loaded=1). كما أنّ مستويات الاستطاعة المرسلة عُدّلت في الخليّة المستهدفة بالحمل الزائد وجميع الخلايا المجاورة لها.

الجدول 2—13: توزُّع المستخدمين (450 UEs) ضمن منطقة الدراسة للخوارزميّة المطوَّرة ANR-LF **(الباحث).**

رقم الخليّة	Cell1	Cell2	Cell3	Cell4	Cell5	Cell6	Cell7
عدد المستخدمين UEs	120	45	68	53	67	47	50

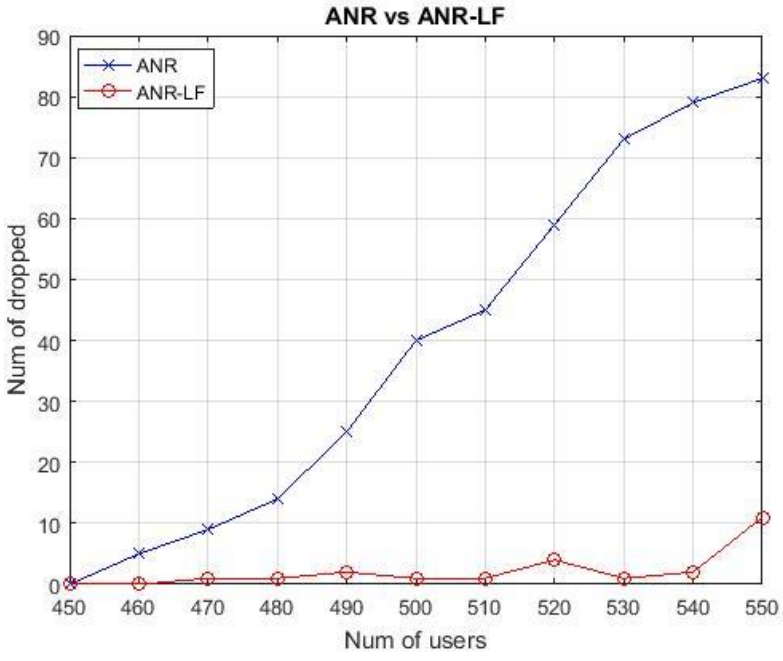
الجدول 2—14: مُوسِطات استطاعة الإرسال والحمل للخلايا بعد انتهاء محاكاة ANR-LF **(الباحث).**

Cell No.	PCI	X	Y	Transmit Power (dBm)	Loaded
1	469	0	0	13	1
2	495	500	0	21	0
3	29	250	433	21	0
4	426	-250	433	21	0
5	343	-500	0	21	0
6	255	-250	-433	21	0
7	149	250	-433	21	0



الشكل 2–10: توزُّع المستخدمين مع تطبيق الخوارزميّة المقترحة ANR-LF (الباحث).

يوضّح الشكل 2–11 منحني بياني لأداء خوارزميّتي ANR (للمقارنة بين خوارزميّة ANR التقليديّة والمقترحة ANR-LF) عند زيادة عدد المستخدمين تدريجياً ضمن الشبكة. حيث جَرَى في كل مرة توزيع 400 مستخدم على كامل الشبكة، وتوزيع بقية المستخدمين في المنطقة المحيطة بالخليّة السابعة لمحاكاة حالة وجود حمل إضافي في منطقة محددة. من الواضح أنّ عدد حالات رفض الخدمة يزداد تصاعدياً بالنسبة للخوارزميّة التقليديّة، بينما يبقى ضمن حدود صغيرة في حالة الخوارزميّة المقترحة لأنّ جميع خلايا الجوار للخليّة السابعة ستسهم في تخديم الحمل الزائد.



الشكل 2–11: منحني بياني لأداء خوارزميّة ANR التقليديّة وخوارزميّة ANR-LF المطوَّرة (الباحث).

8.2 خاتمة الفصل

تناول هذا الفصل دراسة خوارزميّة علاقة الجوار التلقائي التي تندرج تحت عملية الأمثلة الذاتيّة للمحطّات القاعديّة في شبكات التطوُّر طويل الأمد، حيث جَرَى في المرحلة الأولى من الفصل تنفيذ ومحاكاة خوارزميّة علاقة الجوار التلقائي التقليديّة. وقدَّم هذا الفصل في المرحلة الثانية آليّة للتطوير المقترح على خوارزميّة علاقة الجوار التقليديّة لتحسين أداء الشبكة في الحالات الحرجة بالأخذ بالحسبان مُعامِل هام يجري إضافته إلى جدول علاقة الجوار وهو حمل الخليّة. وجدنا أنّ مُعامِل الحمل في جدول علاقة الجوار أسهم في تحسين أداء الشبكة من خلال خلق حالة من توازن الأحمال بين الخلايا المتجاورة. وُزِّع 450 مستخدماً ضمن منطقة الدراسة، وعند تطبيق الخوارزميّة التقليديّة تبيّن أنّ عدد كتل الموارد في الخليّة الأولى غير كافٍ لتخديم كل المستخدمين وتم رفض 19 مكالمة drop call. عند تطبيق الخوارزميّة المُطوَّرة ANR-LF جَرَى تخديم كامل المستخدمين من خلال مساهمة الخلايا المتجاورة في تخديم الحمل الإضافي للخليّة الأولى. ومقارنة أداء الخوارزميتين التقليديّة والمُطوَّرة مع زيادة عدد المستخدمين تدريجيّاً ضمن البنية المدروسة والتركيز على حالة حمل إضافي ضمن الخليّة السابعة، وجدنا أنَّ عدد حالات رفض الخدمة يزداد تصاعديّاً في الخوارزميّة الأساسيّة، بينما يبقى ضمن حدود مقبولة في الخوارزميّة المُطوَّرة، فمن أجل 520 مستخدماً بلغ عدد المكالمات المرفوضة 60 مكالمة في الخوارزميّة التقليديّة بينما في الخوارزميّة المُطوَّرة انخفضت إلى 6 مكالمات، وعند زيادة عدد المستخدمين إلى 550 مستخدم بلغ عدد حالات رفض الخدمة في الخوارزميّة التقليديّة 83 حالة بينما في الخوارزميّة المُطوَّرة 11 حالة. يُعرَض في الفصل التالي خوارزميّة مُطوَّرة ضمن سياق وظيفة الأمثلة الذاتيّة Self-Optimization لشبكة SON-LTE-A-HetNet لإدارة الحركيّة وأمْثَلِةْ مُوسِطات التحكُّم بالتسليم HCPs.

الفصل الثالث

أمثلة متانة الحركيّة

Mobility Robustness Optimization

الفصل الثالث

أمثلة متانة الحركيّة Mobility Robustness Optimization

يتناول هذا الفصل خوارزميّة مُطوَّرة لتقليل عدد أحداث التسليم غير الضروريّة UHOs والفاشلة RLFHOs إلى الحد الأدنى في شبكة LTE-A HetNet، وذلك من خلال تصميم آليّة مبتكرة تحدّد بشكل مُتكيِّف مُوسِطات التحكُّم بالتسليم HCPs؛ وهما هامش البطاء HM والزمن اللازم للقدح TTT. نحصل على هذه النتيجة دون الحاجة إلى حلول أخرى تفترض عتبات معيَّنة غير مُبرَّرة كميّاً لنسبة أحداث UHO وRLFHO بالنسبة إلى إجمالي عدد أحداث التسليم، كما هو مُقتَرَح في أحدث الأدبيّات. يُناقِش هذا الفصل أيضاً أهميّة منهجيّة التفكير المُتَّبعة فيه التي تُحقِّق في وجود علاقة ارتباط مباشرة بين المُوسِطين HM وTTT، فمن خلال علاقة الارتباط هذه المُكتَشَفَة يمكن تحقيق الأمثلة الذاتيّة للمُوسِطات HCPs، الذي يُعَد إحدى حالات استخدام الشبكات ذاتيّة التنظيم SON لدعم إدارة الحركيّة. تُظهِر نتائج المحاكاة أنّ عدد الأحداث UHOs, RLFHOs يهبط إلى حدٍّ صغير نسبيّاً مقارنة بالأدبيّات والطريقة التقليديّة. يشقُّ هذا الفصل طريقاً جديداً للبحث في إدارة الحركيّة، ويُعيد توجيه محاورها البحثية نحو التفكير بجديّة في إمكانيّة وجود علاقة متبادلة بين مُوسِطات التحكُّم بالتسليم HM وTTT، ودراستها على نحو أكثر عمقاً مستقبلاً، وهو ما يُمثّل إحدى أهم مُساهَمَات هذا البحث.

1.3 مقدمة

تصبح إدارة الحركيّة UMM أكثر تعقيداً مع ازدياد حجم الشبكات غير المتجانسة HetNets وتعقيدها. شكَّلَ هذا سبَبَاً رئيسيّاً لتطوير مفهوم الشبكات ذاتيّة التنظيم SON الذي اكتسب أهميّة متزايدة لتحقيق هدف أتمتة وظائف إدارة الشبكة وتقليل تدخُّل العامل البشري. وقد طُرِحَ مفهوم أمثلة متانة الحركيّة MRO في النظام LTE/LTE-A بوصفه أحد حالات الاستخدام الأساسيّة في الشبكات ذاتيّة التنظيم SON [11,12]. في هذا السياق، وبشكل خاص، يُراد تعيين قيم مُوسِطات التحكُّم بالتسليم HCPs آليّاً في الشبكة، وكان الإعداد (الضبط) التقليدي يعتمد على تعيين يدوي لقيم هامش البطاء والزمن اللازم للقدح بحيث تكون مناسبة لظروف حركيّة المستخدمين مجتمعين، وهذا غير مناسب كون حركيّة المستخدمين تُمثِّل ظاهرة عشوائيّة غير متنبَّأ بها من قبل مركز إدارة الشبكة. قد يختلف أداء النظام من حيث متطلّبات أحداث التسليم لكل تجهيزة مستخدم UE على حِدة، وذلك اعتماداً على حالة الحركيّة، مثل الموضع والسرعة من بين متغيّرات أُخرى للحركيّة. لذلك، عند توفرها، يمكن استغلال معلومات الموضع والسرعة التي يمكن أن تقيسها الشبكة الخَلَوية لتصميم خوارزميات SON تكون خاصّة بكل مستخدم بشكل فردي وأكثر فاعليّة.

هذا هو نطاق هذا الفصل، حيث يجري اقتراح خوارزميّة تكيُّفية للأمثلة الذاتيّة لقيم المُوسِطات HCPs في الشبكة غير المتجانسة LTE-A HetNet.

على الرغم من إمكانيّة اعتماد آليّة التسليم التقليديّة من خلال التنبُّؤ بأحداثها التي يمكن أن تحصل لكل المستخدمين مجتمعين، ويمكن المجادلة بأنّه لا يوجد سوى القليل من الأمثلة الذاتيّة عند التركيز فقط على قيم المُوسِطات HCPs التي يجب تعيينها لكل مستخدم على حِدة، فإن تطوير آليّة لتعيين قيم مُوسِطات التحكُّم بالتسليم HCPs في سياق مفهوم SON يمثّل أحد أهم المجالات التي يجب البحث فيها فيما يتعلّق بأمثلة متانة الحركيّة MRO، ويُتَّفق، كما تشير معظم الأدبيّات، على أنّ قيم مُوسِطات عمليّة التسليم يجب أن تُحدَّد بالنسبة لكل مستخدم بشكل متفرِّد مبدئياً في هذا السياق، من ثمَّ البحث عن آليّة تكيّفيّة لهذا التحديد للدخول في سياق مفهوم SON، لا أن تُفرَض نفس قيم المُوسِطات بالنسبة لكل المستخدمين. علاوة على ذلك، يُعَد هذا مجالاً بحثيّاً حديثاً.

لا يبحث هذا الفصل في تعديل إجرائيّة تنفيذ التسليم بحد ذاتها، بل في آليّة اتخاذ قرار التسليم بناءً على جعل إعدادات مُوسِطات التحكُّم بالتسليم HCPs متكيِّفة بدرجة كافية وتعديلها خلال حركيّة المستخدمين وفقاً لظروف حركيّة كل مستخدم. تتمثل التحديّات الرئيسية التي تواجه مثل هذا الرأي في إيجاد توازن مثالي بين قيم مُوسِطات التحكُّم بالتسليم HM وTTT لأن اختيار قيمة مناسبة لأحدهما يعطي نتيجة معاكسة لقيمة مناسبة مختارة للآخر، وضمان أنّ الشبكة ما تزال مستقرة في الوقت نفسه ولم يحدث اختلاف في جودة الاتصال لفترة طويلة جنباً إلى جنب مع وقوع أقل عدد ممكن من الأحداث PPHOs وRLFHOs.

تُعَدُّ وظيفة التسليم ضمن سياق أمثلة متانة الحركيّة إحدى وظائف الشبكات ذاتيّة التنظيم SONFs في الشبكات غير المتجانسة للنظام LTE-A مثلها مثل وظيفة ANR، ويجب أن تُعالَج من وجهتي نظر ضمان عدم انقطاع الاتصال وتحسين أداء الشبكة بالكامل؛ فضلاً عن ذلك، ونظراً لمجال التغطية الصغير واستطاعة الإرسال المنخفضة للخلايا الصغيرة في الشبكة غير المتجانسة، فإنَّ إجرائيّة التسليم تكون أكثر تعقيداً وتحتاج إلى أن تكون أكثر ذكاءً، حيث تصبح الأحداث من النمط PPHOs كثيفة إلى درجة تصبح عندها مستويات استهلاك الاستطاعة في المحطّة القاعديّة المقابلة غير مقبولة. لذا يُركِّز هذا البحث على تطوير آليّة لتعيين قيم مُوسِطات التحكُّم بالتسليم HCPs على مستوى النظام في خوارزميّة اتّخاذ قرار التسليم، واقتراح خوارزميّة أمثلة ذاتيّة جديدة تعتمد على تغيير قيم HM وTTT بشكل تكيُّفي وفقاً لموضع المستخدم وسرعته وقيم SINR المقاسة والمتضمَّنة في تقرير القياسات MR.

تختار الخوارزميّة المقترحة بشكل تكيُّفي قيم المُوسِطين HM وTTT المناسبين لكل مستخدم وفقاً لحالته الحركيّة بالاعتماد على معلومات السرعة والموضع. ففي الشبكات الخَلوية الحديثة، يمكن دعم معظم الهواتف النقَّالة بسهولة بخدمات نظام تحديد المواقع العالمي global positioning system (GPS)

[80]. يمكن أن نفتَرض أنّه يمكن تقدير كل من موضع وسرعة المستخدم بسهولة. ويصبح من السهل تحديد حالة سرعة المستخدم ومسافته عن كل محطَّة قاعديّة eNBs. واستناداً إلى مسافة المستخدم عن كل من الخليّة المُخدِّمة والخلايا الهدف التي يُراد تسليم الاتصال إليها، يمكن حساب قيمة المؤسِط HM بشكل تكيُّفي. يمكن القيام بذلك عن طريق البحث عن الصياغة الرياضيّة المناسبة لتابع رياضي لقيم HM بدلالة قيم الاستطاعة المستقبلة RSRP المُتَضمَّنة في تقرير القياسات، وهذا مع الأخذ في الحسبان أنّ RSRP هي تابع لمسافة المستخدم عن محطَّته القاعديّة BS. يخضع حساب تابع HM هنا لمعيار مُحدد وهو أنّ المتوسِّط الزمني لقيم SINRs المُسجَّلة خلال نافذة زمنية محدّدة لحركيّة المستخدم والمقيسة بالنسبة للخليّة المُخدِّمة والخلايا الهدف أكبر من عتبة SINR محدّدة أصلاً في نظام الاتصال لضمان تجنُّب فشل الوصلة الراديويّة RLF أثناء الاتصال العادي بغض النظر عن عمليّة التسليم. هذه هي المساهمة الأولى في هذا الفصل، حيث يجري تعزيز ضمان استمرار الاتصال الراديوي للمستخدم أثناء التسليم من دون أن يحدث تسليم فاشل وذلك بالنسبة إلى كل من الخلايا المُخدِّمة والخلايا الهدف أثناء انتقال تجهيزة المستخدم UE من الخليّة المخدِّمة الخاصّة به إلى داخل تغطية الخليّة الهدف، وذلك تحقيق حدث تسليم ناجح من حيث الوصلة الراديويّة الصاعدة والهابطة. من ناحية أُخرى، المُوسِط TTT هو مُوسِط مرتبط بالزمن، لذا يصعب تعيينه من خلال الاعتماد على معلومة موضع المستخدم فقط، لأنَّ المستخدم في حالة حركيّة أي تكون مسافته عن المحطّة القاعديّة متغيّرة مع الزمن، ولذا يجب مزامنة الزمن اللازم للقدح TTT على نحو يتناسب مع كل قيمة المُوسِط HM والمحسوبة بشكل مُتكيِّف. لهذا، تُصَاغ الخوارزميّة المقترحة من خلال تشكيل تابع رياضي آخر يحسب قيمة TTT بشكل تكيُّفي بدلالة كل من سرعة المستخدم (بدلاً من موضعه) وقيمة HM المقابلة والتي تحصّلت عليها من المرحلة التكيُّفيّة السابقة. يجري ذلك بناءً على تفسير هندسي لآليّة الحدث A3 في إجرائيّة التسليم [81]. وهكذا، ترتبط قيم TTT تماماً بقيم HM المحدَّدة لكل مستخدم على حِدة وفق حالته الحركيّة. هذا يُعدّ المساهمة الثانية في هذا البحث، حيث جرى اشتقاق علاقة مباشرة بين HM وTTT واستُخدِمَت لأوّل مرة في هذا المجال البحثي. نتيجة لذلك، يمكن تقليل نسبة عدد أحداث التسليم PPHO بشكل كبير. تتعامل الخوارزميّة المقترحة ضمنيّاً مع كل حالات التسليم الإجماليّة، أي حالة التسليم من خليّة ماكرويّة إلى خليّة ماكرويّة أخرى(Macro-to-Macro HO (MTMHO ، وحالة التسليم من خليّة ماكرويّة إلى خليّة صغيرة(Macro-to-Small HO (MTSHO، وحالة التسليم من خليّة صغيرة إلى خليّة ماكرويّة (Small-to-Macro HO (STMHO وحالة التسليم من خليّة صغيرة إلى خليّة صغيرة أخرى (Small-to-Small HO (STSHO.

2.3 الدراسات المرجعية

يمكن تصنيف الخوارزميّات الخاصّة باتّخاذ قرار التسليم HO بين الخلايا في الشبكات غير المتجانسة HetNet بناءً على العديد من المُوسِطات المتعلِّقة بطوبولوجيا الشبكة ونموذج حركيّة المستخدم.

تُعَد مرحلة اتخاذ قرار التسليم عبر أي خوارزميّة تسليم HO تكيّفيّة من أهم القضايا في إدارة حركيّة المستخدمين UMM، التي تعتمد على طريقة الاختيار لكل من قيم HM وTTT، سواء أكانت قيماً ثابتة أو ديناميكيّة أو قابلة للتكيُّف. ومن هنا يبدأ نقاش مسألة تحسين أداء الشبكة في تنفيذ التسليم، ويبرز المغزى من تطبيق تقنية SON. في شبكات HetNets. يجري دائماً تنفيذ قرار التسليم من جانب الخليّة المُخدِّمة. وتستخدم الغالبيّة العظمى من الخوارزميّات في الأدبيّات مجموعة من المُوسِطات المختلفة للحصول على اختيار قيم HCPs المناسبة للأمثلة الذاتيّة. كما هو مذكور في [82]، ويمكن تقسيم موسطات اتخاذ القرار الرئيسية بين الخلايا إلى خمس فئات: اتخاذ القرار المستند إلى السرعة كما في [−83,11 86−13] والمستند إلى شدة الإشارة المستقبلة received-signal-strength (RSS) أو المستند إلى RSRP [87−93] والمستند إلى تابع الكلفة cost-function-based كما في [94−101] والمستند إلى كفاءة الاستطاعة المستهلكة [102،103] والمستند إلى مُوسِطات التداخل الحاصل بين الخلايا، (مثل المُوسِط SINR) كما في [104−109].

بالنظر إلى الفئة الأولى، يمكن للمرء أن يجد إما أنّ اتجاه الحركيّة لا يؤخذ في الحسبان، أو أنّ نموذج حركيّة المستخدم المفترض ونموذج الشبكة محدودين، أو أنّ حدث التسليم STSHO مهمل. بالنسبة لنقاط ضعف مراجع الفئة الثانية، إما أنّ بنية الشبكة ليست HetNet، أو أنّ عدد مُوسِطات التحكُّم بالتسليم HCPs غير كافٍ على مستوى النظام (أي إنّ التركيز إمّا على HM أو على TTT، ولكن ليس على كليهما). من ناحية أخرى، فإنّ العيب الرئيس للفئة الثالثة: فئة خوارزميّة تحسين HCP المستندة إلى تابع الكلفة هو أنَّ اختيار مجموعة الأوزان محدّدة مسبقاً من قبل الباحثين هو تحديد غير مبرر كميّاً؛ مما يعني أنه لم يُقدَّم دليل كافٍ على أن هذه الأوزان هي الأوزان الوحيدة المناسبة للأمثلة الذاتيّة أو لا. بالنسبة للفئة الرابعة، ففيها أنّ الباحثين نظروا في خليّة واحدة ماكرويّة فقط في نموذج محاكاتهم للشبكة أو لم يأخذوا في الحسبان استطاعة التداخل. وبالنظر إلى الفئة الخامسة، فقد استخدم معظم الباحثين نموذج تغطية محدود للغاية للخلايا الصغيرة مع الأخذ في الحسبان إهمال وجود ضجيج و/أو إهمال خفوت الظل في نموذج انتشار الإشارة، أو أنّه كان يجري فحص الخوارزميّة المقابلة من خلال النظر فقط في أحداث التسليم غير الضرورية UHOs، دون أخذ أحداث التسليم الفاشلة بالحسبان ضمن بحثهم.

وفي الأبحاث الأحدث، نجد أنّ العمل [110] اقترح خوارزميّة تعتمد على تابع الكلفة. مع أنّ هذا المخطّط يوفر نسباً منخفضة للأحداث PPHO وRLFHO بالنسبة لعدد أحداث التسليم الإجمالي، فإنّ سرعة تجهيزة المستخدم UE ليست مناسبة لسيناريوهات السرعة العالية، أي ما يصل إلى 300 كم/ساعة. علاوة على ذلك، لم تستطِع الخوارزميّة المقترحة في [110] الحفاظ على معدّل مرتفع لنجاح حدث التسليم رغم الحصول على نتائج جيّدة جدّاً من حيث تخفيض نسبة PPHO إلى مستوى منخفض؛ أي توجد مقايضة Trade-off عندما تسعى الخوارزميّة إلى تقليل أحداث RLFHOs وPPHOs في آن معاً. واقترح

المؤلّفون في [111] خوارزميّة تعتمد على السرعة وقيمة RSRP لتحسين الضبط التلقائي للمُوسِطات HCPs، ولكن لم يؤخَذ المُوسِط SINR بالحسبان؛ فضلاً عن ذلك، لم يقدِّم الباحثون في [111] دليلاً كافياً للطريقة التي يجري فيها زيادة أو إنقاص قيم المُوسِطات TTT وHM وفق خطوات ثابتة. وفي [112]، طوَّر نفس الباحثين في [111] خوارزميّة قائمة على قيم RSRP دون النظر إلى السرعة؛ أي نشروا عملهم الجديد [111] ببساطة عن طريق إضافة آليّة قرار تتعلق بموسط السرعة إلى عملهم الأقدم في [112]. نتيجة لذلك، كانت التحسينات غير كافية. ومع ذلك، في [113]، جَرَى تحليل حساسية كل من عتبات HM وTTT لمستويات تحميل الشبكة المختلفة وسرعة المستخدمين وجرى اقتراح متحكّم المنطق الضبابي(FLC) fuzzy logic controller لتعديل عتبة HM تكيُّفياً، لتحسين أداء ضبط مُوسِطات التحكُّم بالتسليم HCPs. ومع ذلك، في [113]، لم تؤخَذ نسبة PPHOs في الحسبان عند تقييم الخوارزميّات المقترحة بل نسبة الأحداث RLFHOs فقط.

من بين جميع الخوارزميّات في هذا المجال، تفرّد المؤلِّف في [82] بمناقشة مشكلة الأمثلة الذاتيّة في ضبط مُوسِطات التحكّم بالتسليم HCPs بطريقة احترافيّة ودقيقة للغاية، مع الأخذ في الحسبان الأسباب العامّة التي تؤثِّر في أداء النظام بالنسبة لوقوع حدث التسليم. إنّ الحل في [82] بسيط ويلائم التجربة. اقُتُرِحَ في [82، فقرة .3-5] خوارزميّة تستخدم عتبات أداء مناسبة لكل من النسب PPHO و SINR و RLFHOs لتحسين اتخاذ قرار التسليم من خلال أخذ سرعة تجهيزة المستخدم UE بالحسبان عند اختيار قيم المُوسِطات HCPs المناسبة والمتّسقة. ولكن، لم يناقش العمل في [82] الكيفيّة الرياضيّة لتحديد عتبات الأداء هذه؛ فضلاً عن ذلك، اعتمد مُعدَّل نجاح أحداث التسليم الناتجة معه فقط على تخفيض الأحداث من النمط RLFHO والمحدّدة مسبقاً وفق عتبة مُعرَّفة اعتباطيّاً. وسوف يعتمد هذا البحث على بعض الأفكار في [82] لتطوير خوارزميّة جديدة لأمثلة متانة الحركيّة.

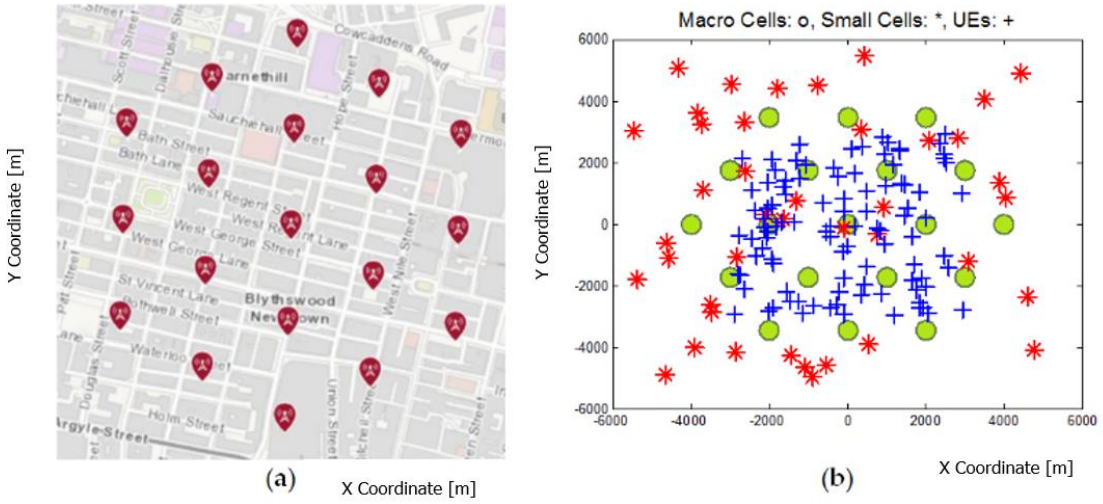
لقد استخدَمَت أغلب خوارزميّات أمثلة مُوسِطات التحكُّم بالتسليم HCPs في مراجعات الأدبيّات الحديثة، بما في ذلك [82]، نفس الأسلوب في تغيير قيم هامش البطاء HM والزمن اللازم للقدح TTT عند التبديل بين قيمها المُعرَّفة في معيار 3GPP (اختيار قيم HM وTTT يكون، وفق شروط معينة، بالانتقال من قيم صغيرة إلى قيم كبيرة بخطوات Steps غير مُبرَّرة)، والحصول على الهدف الرئيس لهذه الخوارزميّات (تقليل أحداث PPHOs وRLFHOs). كان ذلك دائماً دون أي مناقشة حول سبب اختيار هذه الخطوات بهذه الطريقة. ويقترح هذا البحث منهجيّة جديدة تماماً لتحديد القيم المناسبة لكل من TTT وHM من خلال إنشاء علاقة ارتباط رياضي بينهما بالاستفادة من معلومات قياس كل من مُوسِطات السرعة وRSRP وSINR لكل مستخدم متحرّك في الشبكة. ويتحقق ذلك من خلال اقتراح نموذج مُوحَّد لتخفيض نسب RLFHOs وPPHOs إلى حد أدنى أصغر مما هي في الأدبيّات. يجري في هذا الفصل تقييم الخوارزميّة المقترحة بناءً على محاكاة سيناريوهات مختلفة باستخدام برمجيّة ماتلاب. ثمّ تجري مقارنتها

بخوارزميّات المراجع [82،111،112،113] والطريقة التقليديّة في ضبط قيم HCPs (في الوضع التقليدي يجري اختيار قيم ثابتة للمُوسِطات HM وTTT ومتماثلة بالنسبة لجميع المستخدمين). وسوف تظهر النتائج أنّ الخوارزميّة المقترحة تُقَدِّم تحسينات ملحوظة، كما هو موضَّح في قسم النتائج.

3.3 نموذج النظام System Model

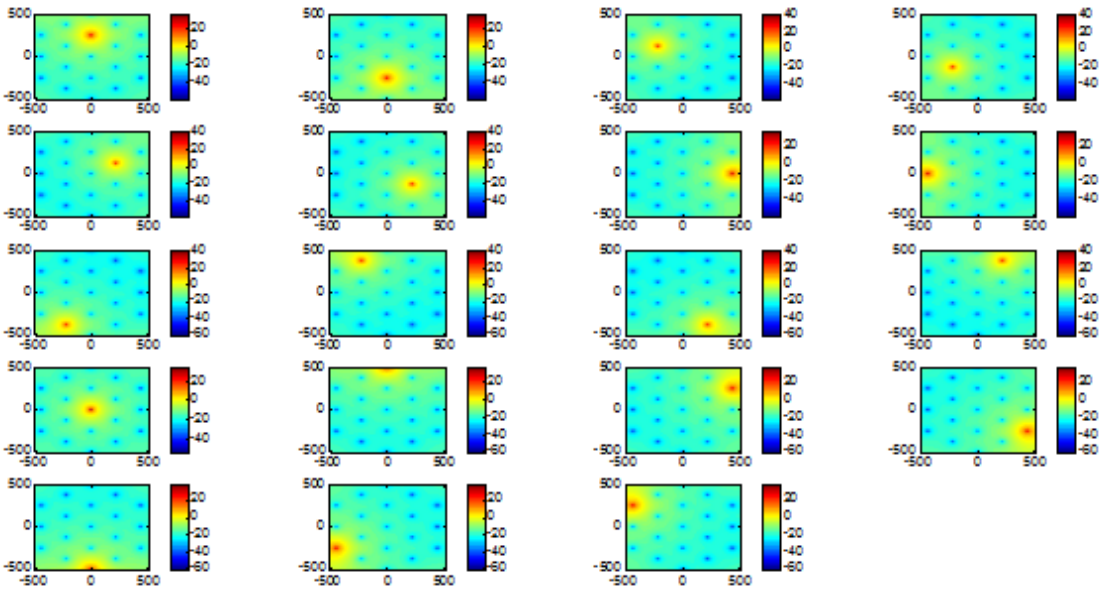
1.3.3 نموذج الشبكة غير المتجانسة LTE-A HetNet

اعتُمِدَ في هذا الفصل سيناريو شبكة غير متجانسة متعدّدة الطبقات Multi-Tier تتكون من خلايا ماكرويّة وخلايا صغيرة منتشرة بحيث توزَّع الخلايا الصغيرة بشكل غير منتظم بالنسبة إلى كل خليّة ماكرويّة. في هذه الدراسة، يُفترَض تخطيط شبكة الخلايا الماكرويّة كشبكة سُداسيّة ذات 19 خليّة ماكرويّة يحيط بها الخلايا الصغيرة فائقة الكثافة ultra-dense. ونفترض بيئة الشبكة كبيئة المدن urban environment وتوزَّع الخلايا الصغيرة فيها بشكل عشوائي. لا سيما في المحاكاة، تتألّف شبكة HetNet من طبقتين Two-Tier من المحطّات الفمتويّة FBS والماكرويّة MBS. ويمكن أن يبلغ مجال تغطية الخلايا الصغيرة من عشرة إلى عدّة عشرات من الأمتار، فيكون للخليّة الصغيرة مجال تغطية صغير واستطاعة إرسال منخفضة (من 15 إلى 30dBm) لتعمل كمحطّة قاعديّة منزليّة HeNB. يتوافق نموذج الشبكة المفترَض هنا مع النموذج المبيّن في [114]. يوضّح الشكل 3-1-(a) سيناريو شبكة مكوّنة من خلايا ماكرويّة متوزّعة في بيئة المدينة (دون خلايا صغيرة)، ويظهر الشكل 3-1-(b) توضيحاً لسيناريو المحاكاة في هذا الفصل حيث جَرى بناء شبكة مؤلّفة من 19 خليّة ماكرويّة متوزّعة على رؤوس مُسدّس من طبقتين مع خليّة ماكرويّة في مركزه، و41 خليّة صغيرة موزّعة عشوائيّاً، مع 100 من تجهيزات المستخدمين UEs موزَّعة عشوائيّاً أيضاً في مواضعها الأوليّة (بداية الحركيّة) في منطقة جغرافيّة أبعادها 12km×12km، ممثَّلة بالإحداثيّات الديكارتيّة.

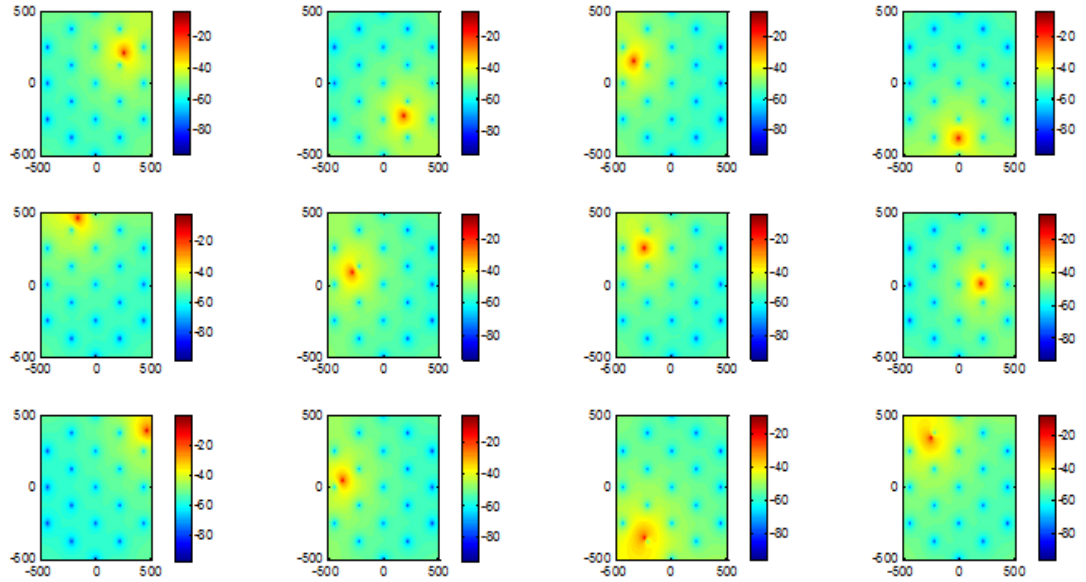


الشكل 3-1: (b) نموذج HetNet، مع 19 خليّة ماكرويّة (o)، و41 خليّة صغيرة (*)، و100 من تجهيزات المستخدمين (+)[الباحث] ، (a) نموذج HetNet في [114] (من دون تمثيل الخلايا الصغيرة).

يتحقّق تحسين السعة الإجمالية للنظام المدروس بما يتناسب مع توزُّع كثيف للمستخدمين وحركة عبور معطيات كبيرة من خلال استخدام المحطّات FBSs. معنى هذا أنّ نشر الخلايا الصغيرة هنا يؤدي مبدئيّاً إلى تحسين سعة الشبكة الحالية، ولكن تظهر مشكلة تداخل تغطية المحطات الفمتويّة FBS مع المحطات الماكرويّة MFB إذا جرى استخدام نفس المجالات الترددية للوصلة الهابطة DL. لذا من أجل فهم قضايا التداخل جيداً، يوضّح الشكل 3–2 عرضاً لخريطة قيم SINR (الخاصة بمستخدمي الخلايا الماكرويّة MUEs محسوبة بواحدة الديسبل dB لنظام شبكة المحاكاة بأكمله من نفس النوع المعروض في الشكل 3–1–(b)، ولكن مع 12 خليّة صغيرة فقط، مع افتراض مساحة شبكة 1km×1km. يوضّح الشكل 3–3 عرضاً لخريطة قيم SINR (الخاصة بمستخدمي الخلايا الفمتويّة FUEs) محسوبة بواحدة الديسبل dB لنظام شبكة المحاكاة بأكمله من نفس النوع المعروض في الشكل 3–1–(b). نعتمد حساب RSRP لتحديد الخليّة المخدّمة الحالية (إما ماكرويّة أو صغيرة) ولحساب SINR المقابل في كل بكسل (الفقرة 3.3.3، حيث تظهر إجراءات حسابات SINR وRSRP وخريطة التداخل). في كلا الشكلين 3–2 و3–3، يمكن ملاحظة أنّ قيم RSRPs المختلفة تعطي مناطق تغطية مختلفة جغرافيّاً لكل من الخلايا الصغيرة والخلايا الماكرويّة، ومن الواضح في الشكلين 3–2 و3–3 أنّه كلما زادت كثافة الخلايا الصغيرة المنتشرة، زاد مستوى التداخل في بيئة المحاكاة.



الشكل 3–2: خريطة توزّع قيم SINR الخاصة بمستخدمي الخلايا الماكرويّة MUEs محسوبة بالديسبل dB (الباحث).

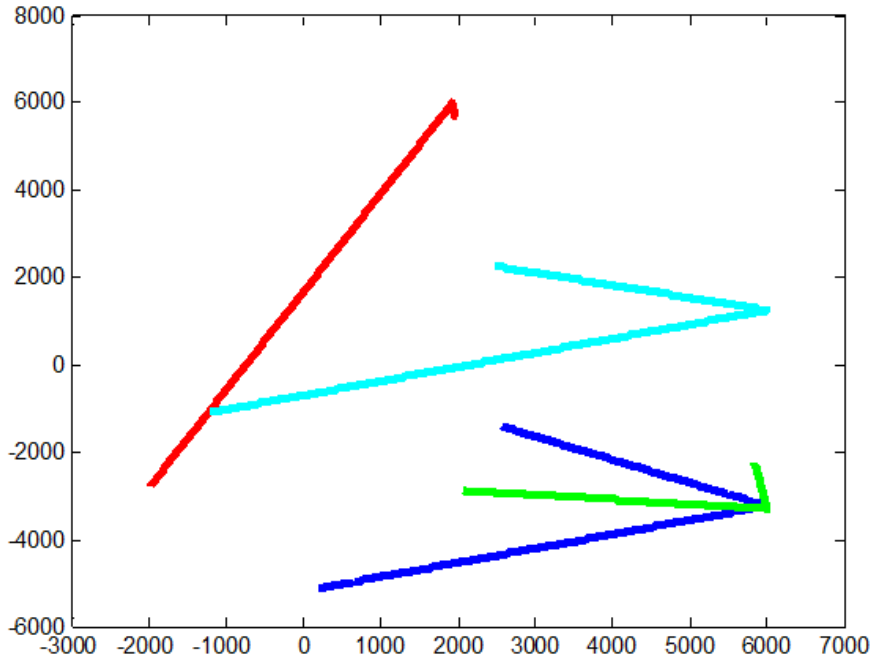


الشكل 3-3: خريطة توزّع قيم SINR الخاصة بمستخدمي الخلايا الفمتويّة FUEs محسوبة بالديسبل dB (الباحث).

2.3.3 نموذج الحركيّة Mobility Model

جَرَى إنشاء الأشكال 3-1-(b) و3-2 و3-3 مع الأخذ في الحسبان أنَّ جميع تجهيزات المستخدمين ثابتة في مواضعها. من جهة أخرى، تُعدُّ عمليّة التسليم وفقاً للحدث A3 عمليّة ديناميكيّة تحدث أثناء حركيّة المستخدم؛ فإذا تحرك المستخدم خارج منطقة الخليّة المخدّمة (خليّة صغيرة أو ماكرويّة) واستقبلت قيمة استطاعة أعظميّة RSRP من خليّة ما (سواء خليّة ماكرويّة أو خليّة صغيرة)، يبقى تخديمه ممكناً بواسطة نفس الخليّة المخدّمة الأصليّة (بمعنى ليس من الضروري تسليم المستخدم المتحرّك إلى خليّة مخدِّمة جديدة (خليّة هدف) حتى لو كانت الاستطاعة المستقبلة منها أكبر من تلك المستقبلة من الخليّة المُخدِّمة الحاليّة). لأنّه من الممكن أن تكون عمليّة التسليم غير ناجحة (على سبيل المثال، مواجهة حدث RLFHO)، أو أن تكون عمليّة التسليم غير ضروريّة (على سبيل المثال، مواجهة حدث PPHO)، وإلّا سوف يجري تنفيذ عمليّة التسليم ويُعَد تسليماً ناجحاً Success HO إذا ضُمِنَتْ ألا تكون عمليّة تسليم فاشلة راديويّاً أو غير ضروريّة. اعتمدت هذه الدراسة تعريف للخليّة المخدّمة أنّها الخليّة التي توفّر أعلى قيمة للاستطاعة المستقبلة RSRP في الموضع الحالي الحركيّة، بينما تُعَدُ جميع قيم شدّة الاستطاعة المستقبلة الأُخرى من باقي الخلايا المجاورة إشارات تداخل. يُستخدَم هذا الافتراض لتحديد حالة الخليّة المخدّمة في بداية الحركيّة. بعد ذلك، بالنسبة لكل موضع جديد للمستخدم في منطقة الشبكة، تُعيَّن الخليّة الهدف في عملية التسليم (ماكرويّة أو صغيرة) لتكون تلك الموافقة لأعظم استطاعة مستقبلة RSRP بين الخلايا الأخرى (الماكرويّة والصغيرة) المتبقيّة باستثناء الخليّة المخدّمة الحاليّة (الخليّة المُخدِّمة قبل تنفيذ عمليّة التسليم HO).

يفترض في هذه الدراسة أنّ كل مستخدم يبدأ حركته من نقطة مكانيّة ابتدائيّة (x_0, y_0) بسرعة v تُختَار عشوائيّاً من المجال (30 km/h إلى 300 km/h) وذات اتجاه حركيّة θ أيضاً يُختار عشوائيّاً من المجال الزاوي [من 0° إلى 360° درجة] في مستوي الحركة. في هذا النموذج، يستمر المستخدم في التحرُّك في هذا الاتجاه بالسرعة المختارة عبر خط مستقيم حتى يصل إلى حدود جغرافيا الشبكة (تمثّلها الجوانب الأربعة لمربع مساحته 12km×12km، حيث يمتد محور X ومحور Y بين القيمتين 6000− و6000+ متر)، وعند وصوله إلى حدود جغرافيا الشبكة يجري تحريك تجهيزة المستخدم UE مع اتجاه عشوائي جديد آخر. وهكذا، فإنّ كل مستخدم يغير اتجاه حركيّته تبعاً لهذا الاتجاه الجديد بحيث يعيد دخول بيئة الشبكة مرة أخرى، متحرّكاً عبر خط مستقيم آخر ضمنها. يعرض الشكل 3−4 مثالاً لنموذج الحركيّة المفترض هنا وذلك بالنسبة لأربع تجهيزات مستخدمين يتحرَّكون بسرعات واتجاهات مختلفة خلال 150 ثانية في بيئة الشبكة، مع خطوة زمنيّة للمحاكاة مقدارها 10 ميلي ثانية. يُلاحَظ في الشكل 3−4 كيف بدأ المستخدم بالحركيّة ضمن منطقة الشبكة، وتغيّر اتجاه الحركيّة عند حدود الشبكة، ليعود المستخدم للحركيّة ضمن المنطقة المُفترَضة.



الشكل 3−4: رسم توضيحي لمسار حركيّة تجهيزة المستخدم UE (الباحث).

إذا افترضنا dt هي الفاصل الزمني بين موضع سابق وموضع لاحق للحركيّة لتجهيزة المستخدم UE ضمن جغرافيا الشبكة، يمكننا عندئذ تعرّف معادلات الحركيّة على كل من محوري الاحداثيات x وy بالعلاقتين (3−1) و (3−2).

$$x_{next} = x_{Previous} + v.\cos(\theta_k).dt \qquad (1-3)$$

$$y_{next} = y_{Previous} + v.\sin(\theta_k).dt \qquad (2-3)$$

بافتراض $\vec{r}_k^{(i)}$ يمثل شعاع موضع الحركيّة للمستخدم k في اللحظة i، وأنّ الزمن الكلّي للحركيّة مُقسَّماً إلى عدد من اللحظات الزمنية يساوي lifespan عندئذٍ تعطى المسافة التي تقطعها تجهيزة المستخدم UE خلال الزمن الكُلّي بالعلاقة (3-3).

$$Dk = \left\| \vec{r}_k^{(i=lifespan)} - \vec{r}_k^{(i=1)} \right\| = lifespan.dt.v \qquad (3-3)$$

3.3.3 مقاييس النظام System Metrics

1- نموذج حساب الاستطاعة المُستقبَلة RSRP

تؤدي البيئة اللاسلكية دوراً مهمّاً في أداء منظومات الاتصالات النقالة، وهذه البيئة صعبة التوقُّع ومتغيرة مع الزمن بسبب العوائق على طول المسار بين المرسل والمستقبل، مثل المباني والأشجار والمسطحات المائية والظروف المناخية وغيرها؛ إذ تتسبب هذه العوائق بتبعثر الإشارة المرسلة وانعكاسها وانكسارها وتشتتها، ثم يصل إلى المستقبل عدة نسخ من الإشارة المرسلة تملك مطالات وزوايا طور ووصول مختلفة. في الشبكات غير المتجانسة تختلف بيئة الانتشار الراديوي للخلايا الفيمتويّة عنها للخلايا الماكرويّة من حيث عدة موسطات تتضمن استطاعة الإرسال، تردد الإرسال، وربح هوائيّات الإرسال [115]، ويختلف نموذج فقد المسار Path loss للخلايا الفيمتويّة عنه للخلايا الماكرويّة. نعتمد في هذا الفصل العلاقة (3-4) التي تمثل فقد الاستطاعة الناجم عن انتشار الأمواج الكهرطيسية من المحطّة إلى تجهيزة المستخدم UE [12].

$$PL_i^j = \frac{\left(4\pi d_i^j\right)^2}{G_i^j G_0\left(\lambda_{i,j}{}^2\right)} \qquad (4-3)$$

حيث يمثل الدليل j نوع الارتباط الراديوي للخليّة بالنسبة إلى تجهيزة المستخدم UE الذي يريد تنفيذ التسليم، (j = ارتباط بالخليّة الهدف، j = ارتباط بالخليّة الخدمة، أو j = interference خليّة تداخل)، ويمثل الدليل i نوع الخليّة (i = خليّة صغيرة، أو i = خليّة ماكرويّة)، وG_0 ربح (كسب) هوائي الاستقبال لتجهيزة المستخدم UE، و G_i^j هو ربح هوائي الإرسال للمحطّة من الشبكة مهما كانت قيم الدليلين j: نوع الارتباط الراديوي سواء أكانت خليّة مُخدِّمة أو خليّة هدف أم خليّة تداخل، و i: نمط الخليّة ماكرويّة كانت أم صغيرة، ويمثل $\lambda_{i,j}$ طول الموجة المقابل، وd_i^j هي المسافة بين تجهيزة المستخدم UE والمحطّة القاعديّة لخليّة من الشبكة. في الواقع، المسافة هي تابع لإحداثيات المستخدم المتحرك في مستوي الشبكة التي تُمثّلها التوابع الزمنية (x (t)، y (t)) لتمثيل إحداثيّات UE في لحظة زمنيّة t وبوضع (x_i^j، y_i^j) هي الإحداثيّات الديكارتيّة الثابتة للخليّة من الشبكة تحسب هذه المسافة وفق العلاقة (3-5).

$$d_i^j\left(x(t), y(t), x_i^j, y_i^j\right) = \sqrt{\left(x(t) - x_i^j\right)^2 + \left(y(t) - y_i^j\right)^2} \qquad (5-3)$$

إذا كانت استطاعة إرسال المحطة القاعديّة $P_i^j(\mathrm{dB})$ ، وبفرض $\zeta_i^j(dB)$ يمثّل فقد خفوت الظل الذي يتبع توزيعاً احتماليّاً لوغاريتميّاً نظاميّاً log−normal distribution بمتوسِّط صفري وانحراف معياري σ يساوي بين 4 dB و6 dB [13،82]، يمكننا التعبير عن الصيغة الرياضيّة لشدّة استطاعة الإشارة المستقبلة RSRP عند تجهيزة المستخدم محسوبة بواحدة الديسبل بالعلاقة (3−6).

$$\mathrm{RSRP}_i^j(\mathrm{dB}) = P_i^j(\mathrm{dB}) - \mathrm{PL}_i^j(\mathrm{dB}) - \zeta_i^j(\mathrm{dB}) \qquad (6-3)$$

يمكن من خلال العلاقتين (3−4) و (3−6) تمييز الإرسال اللاسلكي للخلايا الصغيرة من إرسال الخلايا الماكرويّة في الشبكة غير المتجانسة HetNet.

2−نموذج حساب نسبة استطاعة الإشارة المفيدة إلى استطاعة التداخل والضجيج SINR

بحكم التعريف، فإنّ النسبة SINR المحسوبة عند كل تجهيزة مستخدم UE في أي موضع (x(t)، y(t)) وفي أي لحظة زمنية t هي نسبة استطاعة الإشارة المُستقبَلة من خليّة (ماكرويّة أو صغيرة، مُخدِّمة أو هدف) إلى مجموع استطاعات إشارات التداخل لبقيّة الخلايا (باقي الخلايا الماكرويّة والصغيرة في الشبكة بأكملها) واستطاعة الضجيج الحراري $P_{\text{thermal noise}}$ [13]. إذا كانت الخليّة المُخدِّمة أو الهدف خليّة ماكرويّة، يمكن صياغة عبارة SINR المقابلة وفق العلاقة (3−7).

$$\mathrm{SINR}_{\text{macro}}^j = \frac{\mathrm{RSRP}_{\text{macro}}^j}{\sum_{\text{other macro cells}} \mathrm{RSRP}_{\text{macro}}^{\text{int}} + \sum_{\text{all other small cells}} \mathrm{RSRP}_{\text{small}}^{\text{int}} + P_{\text{thermal noise}}} \qquad (7-3)$$

أو وفق العلاقة (3−8) (إذا كانت محسوبة بواحدة الديسبل dB).

$$\mathrm{SINR}_{\text{macro}}^i(\mathrm{dB}) = \mathrm{RSRP}_{\text{macro}}^j(\mathrm{dB}) - \mathrm{RSRP}_{\text{macro-small}}^{\text{int+noise}}(\mathrm{dB}) \qquad (8-3)$$

وفيها يعطى المقدار $\mathrm{RSRP}_{\text{macro-small}}^{\text{int+noise}}(\mathrm{dB})$ بالعلاقة (3−9).

$$\mathrm{RSRP}_{\text{macro-small}}^{\text{int+noise}}(\mathrm{dB}) = 10.\log_{10}\left\{ \sum_{\text{other macro cells}} \mathrm{RSRP}_{\text{macro}}^{\text{int}} + \sum_{\text{other macro cells}} \mathrm{RSRP}_{\text{small}}^{\text{int}} + P_{\text{thermal noise}} \right\} \qquad (9-3)$$

تعطى النسبة SINR بافتراض أنّ الخليّة المُخدِّمة أو الخليّة الهدف عبارة عن خليّة صغيرة (فمتويّة) بالعلاقة (3−10).

$$\mathrm{SINR}_{\text{small}}^j = \frac{\mathrm{RSRP}_{\text{small}}^j}{\sum_{\text{other small cells}} \mathrm{RSRP}_{\text{small}}^{\text{int}} + \sum_{\text{all other macro cells}} \mathrm{RSRP}_{\text{macro}}^{\text{int}} + P_{\text{thermal noise}}} \qquad (10-3)$$

في هذا البحث، تُنمذَج استطاعة الضجيج الحراري بحيث $P_{\text{thermal noise}} = \mathrm{K.T.B}$ ، ويمثل K ثابت بولتزمان، وT درجة الحرارة المكافئة للضجيج لتجهيزة المستخدم UE وتقاس بالكلفن، وB عرض المجال الترددي ويقاس بالهرتز Hz. تُمثِّل علاقات SINR المعروضة أعلاه حساب SINR للوصلة الهابطة في الشبكة HetNet، حيث يجري تضمين قيمة SINR في تقرير القياس MR الذي

يجري إنشاؤه من جانب تجهيزة المستخدم UE كل فترة زمنية تساوي Δt (الخطوة الزمنيّة للمحاكاة) خلال حركيّة تجهيزات المستخدمين ضمن الشبكة HetNet.

4.3.3 مؤشّرات الأداء Performance Indicators

1- نسبة أحداث التسليم الفاشلة RLFHO Ratio

يتعلّق تنفيذ التسليم الناجح بعوامل عدّة [112]. أولاً، يجب ألّا يكون طلب التسليم HRQ، المُرسَل من الخليّة المُخدِّمة الحاليّة إلى نواة الشبكة HetNet طلباً متأخِّراً جدّاً Too-Late HO (TLHO). وهذا يعني أنّه بينما يخرج المستخدم من منطقة التغطية للخليّة المُخدِّمة الأصلية، يجب ألّا يقع حدث فشل في الوصلة الراديويّة RLF event التي تربط تجهيزة المستخدم بخليته المُخدِّمة قبل بدء إجرائيّة التسليم إلى خليّة هدف أخرى. وإلاّ يتوجّب على تجهيزة المستخدم UE تكرار محاولات لطلب تأسيس الاتصال مع الخليّة الهدف كون اتصاله مع الخليّة المُخدَّمة قد انقطع. ثانياً، يجب ألّا يكون طلب إجراء التسليم طلباً مبكِّراً جدّاً Too-early HO (TEHO). هذا يعني أنّه عندما يدخل المستخدم منطقة التغطية للخليّة الهدف في عمليّة التسليم، يجب ألّا يقع حدث فشل في الوصلة الراديويّة RLF event التي تربط تجهيزة المستخدم بالخليّة الهدف بعد بدء إجرائيّة التسليم إليها. وإلاّ فسيتضمن ذلك محاولات متعدّدة من قبل تجهيزة المستخدم UE لإعادة تأسيس الاتصال بخليّته المُخدِّمة الأصليّة لكون الاتصال بالخليّة الهدف التي يجب تسليم الاتصال لها قد انقطع. يتسبَّب وجود العديد من أحداث التسليم المبكِّر TEHOs والتسليم المتأخِّر TLHOs خلال حركيّة تجهيزات المستخدمين تدهوراً في أداء الشبكة وتفشل كينونة إدارة الحركيّة في المحافظة على جودة الاتصال ومعدّل الخدمة. لأنّ هذه الأحداث تتسبب في قطع الاتصال؛ ومن ثم، تضطر تجهيزة المستخدم UE إلى محاولات عديدة لإعادة تأسيس الاتصال.

إذن، يشير عدد أحداث التسليم المتأخِّر TLHOs والتسليم المبكِّر TEHOs إلى أداء النظام كمؤشِّر أداء رئيس key performance indicator (KPI) من حيث تنفيذ إجرائيّة التسليم. في هذا السياق، يُعَدّ مجموع عدد هذه الأحداث أوّل مؤشر أداء رئيس يستخدم في هذا البحث، ويُطلق عليه اسم مؤشِّر أداء النظام المتعلق بأحداث فشل التسليم RLF HO ويشار إليه بالرمز $\mathrm{HPI_{HOF}}$. فمن أجل جميع المستخدمين في كل لحظة زمنيّة t، يُعرَّف $\mathrm{HPI_{HOF}}$ بالعلاقة (3-11).

$$\mathrm{HPI_{HOF}(t)} = \frac{\mathrm{NHOF_t}}{\mathrm{NHO_t}} = \frac{\#\mathrm{TLHOs\ (t)} + \#\mathrm{TEHOs(t)}}{\#\mathrm{HO_{total}(t)}} \qquad (11-3)$$

وفيها يمثّل $\mathrm{NHOF_t}$ العدد الكلّي لأحداث التسليم المبكّر (#TEHOs) والتسليم المتأخّر (#TLHOs) في كل لحظة زمنيّة t خلال كامل حركيّة تجهيزات المستخدمين UEs، ويمثّل

$\mathrm{NHO_t}$ العدد الكُلّي لعمليّات التسليم المنفذة في الشبكة ($\#\mathrm{HO}_{total}$) في كل لحظة زمنيّة خلال كامل حركيّة تجهيزات المستخدمين UEs.

يُعَد أحد الأهداف الرئيسية لخوارزميّة أمثلة مُوسِطات التحكُّم بالتسليم في الشبكات ذاتيّة التنظيم (فيما يتعلق بحالة الاستخدام MRO) جعل قيمة التابع $\mathrm{HPI_{HOF}(t)}$ صغيرة قدر الإمكان أثناء حركيّة جميع تجهيزات المستخدمين المرتبطين بالشبكة. لقد عرَّف معظم الباحثين في أغلب الخوارزميّات المقترحة في الأدبيّات ذات الصلة (كما في [82،110،112،113]) عتبات لتقييد عمليّة تحديد قيم المُوسِطات HCPs وذلك وفق شروط خاصة بهذه العتبات تُحدَّد وفقها قيم HCPs بانتقالات بين قيم صُغرى وعُظمى عبر خطوات صغيرة نسبياً. تُعَد هذه المنهجيّة ضعيفة نوعاً ما وتحد من أداء النظام الكلّي، استغنى هذا البحث عن تعريف العتبات من هذا النوع ليتم تحديد مُوسِطات التحكُّم بقرار التسليم بدرجة حرية أعلى لتكون الخوارزميّة المقترحة في هذا البحث أكثر واقعيّة وعموميّة بحيث يُستطاع تحديد قيم HCPs بالاعتماد على مقاييس النظام، دون الحاجة إلى تضمين مقادير معرَّفة مسبقاً (عتبات النسبة $\mathrm{HPI_{HOF}(t)}$) في تصميم الخوارزميّة.

2- نسبة أحداث تأرجح التسليم PPHO Ratio

إذا لم تُضبَط قيم المُوسِطات HM وTTT ضبطاً صحيحاً، فقد يكون حدث التسليم ناجحاً ولكنه غير ضروري في الوقت نفسه، والعكس صحيح. وأحد الأنواع الشائعة من أحداث التسليم غير الضروريّة هو حدث تأرجح التسليم PPHO، ويقع هذا الحدث إذا جَرَى تسليم تجهيزة المستخدم UE إلى خليّة جديدة ثم أُعيدَتْ إلى الخليّة الأصليّة السابقة في غضون زمن مُحدَّد مسبقاً يُسمَّى الزمن الحرج critical time ($\mathrm{T_{crit}}$) الذي يُحدّد من قبل النظام من 1 إلى 6 ثوان [13،82،110]. على وجه الخصوص، يحدث هذا النوع من التسليم بشكل متكرِّر في الشبكات غير المتجانسة HetNets بسبب وجود الخلايا الصغيرة ذات مناطق التغطية الصغيرة ضمن حيّزات الخلايا الماكرويّة ذات مناطق التغطية الكبيرة، في هذه الحالة، خلال عمليّة التسليم من الخليّة الماكرويّة إلى الخليّة الصغيرة هناك احتماليّة كبيرة لرجوع عمليّة التسليم لتجهيزة المستخدم UE من الخليّة الصغيرة إلى الخليّة الماكرويّة خلال مدة زمنية أقل من $\mathrm{T_{crit}}$، وتزداد هذه الاحتمالية عند السرعات العالية لتجهيزة المستخدم UE، أو عندما تكون قيم مُوسِطات التحكُّم بالتسليم HM وTTT صغيرة نسبياً بشكل غير مناسب.

ضمن هذا السياق، يُعرِّف مؤشِّر الأداء الثاني في البحث والمتعلّق بأحداث تأرجح التسليم PPHO يشار إليه بالرمز $\mathrm{HPI_{HOPP}}$، ويعطى بالعلاقة (3-12).

$$\mathrm{HPI_{HOPP}(t)} = \frac{\mathrm{NHOPP_t}}{\mathrm{NHO_t}} = \frac{\#\mathrm{PPHO(t)}}{\#\mathrm{HO_{total}(t)}} \qquad (12-3)$$

وفيها يمثّل $NHOPP_t$ العدد الكُلّي لأحداث تأرجح التسليم في كل لحظة زمنية t خلال كامل حركيّة تجهيزات المستخدمين UE_S، و NHO_t العدد الكلي لأحداث التسليم في كل لحظة زمنية t خلال كامل حركيّة تجهيزات المستخدمين UE_S.

تمثّل العلاقة (3−12) نسبة عدد أحداث تأرجح التسليم إلى العدد الكُلّي لأحداث التسليم الحاصلة لكل تجهيزات المستخدمين UE_S في كل موضع جديد للحركيّة (لحظة زمنيّة جديدة) خلال حركيّتهم ضمن طوبولوجيا الشبكة. يُعَد الهدف الرئيس الآخر لأي خوارزميّة أمثلة ذاتيّة في الشبكات ذاتيّة التنظيم في جعل قيمة التابع $HPI_{HOPP}(t)$ صغيرة قدر الإمكان خلال حركيّة جميع تجهيزات المستخدمين المرتبطين بالشبكة.

3- مناقشة

السؤال الأساسي الذي يجيب عنه هذا البحث هو: كيف تختار القيم المناسبة لمُوسِطات التحكُّم بالتسليم HM وTTT بحيث يُتَّخذ قرار التسليم بنجاح دون التسبُّب في العديد من الأحداث من نوع PPHO أو RLFHO. تقترح الدراسة هنا آليّة جديدة لتحديد قيم HCPs لاتخاذ قرار التسليم بشكل تكيُّفي ووفقاً للحدث A3 (الفقرة 4.3). يُحدِّد المُوسِط HM لحظة بدء إجرائيّة اتخاذ قرار التسليم، وقيمة المُوسِط TTT هي التي تُنهي هذه الإجرائيّة فيُرسَل إيعاز بتنفيذ القرار أو لا وفقها؛ ويؤدي إمّا إلى إرسال طلب إجراء التسليم HO إلى مركز نواة الشبكة أم لا (العلاقة (3−13) في الفقرة 4.3). إنَّ مثل هذا الإجرائيات التي تتبع إجرائيّة اتخاذ قرار التسليم تستهلك من موارد الشبكة سواء جَرَت عمليّة التسليم لنقل تجهيزة المستخدم من الخليّة المخدّمة إلى الخليّة الهدف أو لا، ويجب أن يكون قرار التسليم سليماً؛ ما يعني بشكل مباشر الحصول على الحد الأدنى من الأحداث PPHO وRLFHO. في هذا السياق يمكن طرح السؤال التالي ذي الصلة: هل توجد مؤشِّرات أداء، أي مؤشِّرات أداء أُخرى، غير التي جَرَى اعتمادها في هذا البحث والمتعلِّقة بأحداث تأرجح التسليم(HPI_{HOPP}) PPHO و فشل التسليم (HPI_{HOF}) RLFHO؟. في الواقع، تستخدم بعض الأدبيّات ذات الصلة (على سبيل المثال، [112]) مؤشِّرات أداء أُخرى تُعَد مهمّة أيضاً في تقييم الخوارزميّة لاختيار قيم المُوسِطات HCPs، مثل مُعدّل الإنتاجيّة وزمن انقطاع المكالمة interruption time (IT). ومع ذلك، اعتمدت هذه الدراسة على المؤشِّرين HPI_{HOPP} و HPI_{HOF} اللذين يُعدّان من مؤشِّرات الأداء الرئيسيّة والأكثر اهميّة في هذا المجال كما هو مُعتمد في الأدبيّات، وهما كافيان للحُكم على اتّساق الخوارزميّة المُقترحة في سياق حالة الاستخدام MRO للشبكات ذاتيّة التنظيم SON. ويقدِّم التبرير الخاص لذلك، على النحو التالي.

أولاً، سيؤدي العديد من أحداث تأرجح التسليم PPHO بشكل أساسي إلى معدّل إنتاجيّة منخفض؛ ما يعكس أداء جودة الخدمة المنخفض للنظام؛ لذلك، فإن مؤشِّر معدّل الإنتاجيّة المنخفض

نتيجة منطقية للحصول على العديد من أحداث PPHO. فإذا جَرَى التحكُّم في قرار التسليم HO ليكون ناجحاً وضرورياً؛ ويؤدي إلى تقليل أحداث PPHO، فسيؤدي ذلك منطقياً إلى تحسين معدّل الإنتاجيّة مباشرة ودون الكثير من حالات انقطاع الخدمة. عموماً، يجري حساب مؤشِّر معدّل الإنتاجيّة في أثناء تنفيذ إجرائيّة التسليم، وهنا يجب أن نميّز (إجرائيّة اتخاذ قرار التسليم HO وإرسال طلب أمر التنفيذ) من (إجرائيّة تنفيذ التسليم HO والانتهاء من تنفيذه بنجاح). تعتمد إجرائيّة اتخاذ قرار التسليم HO على البيانات القياسيّة التي يجري حسابها من قبل تجهيزة المستخدم UE (مثل النسبة SINR وRSRP، ومعلومات السرعة)، بينما تعتمد إجرائيّة تنفيذ التسليم HO أساسياً على طريقة التحكُّم بتخصيص الموارد. وبشكل أكثر تحديداً، تعتمد إجرائيّة تنفيذ التسليم HO على رسائل التحكُّم في الموارد الراديويّة عبر الكينونة RRC مع ضمان الحد الأدنى من التأثير في معدّل الإنتاجيّة ضمن طبقة التطبيقات Application Layer أثناء تنفيذ التسليم HO وبعد الانتهاء منه. تتضمن خطوات تنفيذ التسليم HO بطلب المستخدم للموارد الراديويّة المخصَّصة له في الشبكة (وهنا يمكن أن تكون متاحة أو لا بغض النظر عن نجاح عمليّة التسليم)، بينما يتضمَّن نجاح حدث التسليم HO متاحيّة الموارد من الخليّة المُخدِّمة أو الهدف. في هذا الخصوص، إنَّ الكينونة RRC مسؤولة عن الحُكم على كون إجراء تنفيذ التسليم HO ناجحاً أو لا. لذلك، يؤدّي المزيد من أحداث تأرجح التسليم PPHO إلى زيادة استهلاك موارد الشبكة، وبالتالي تقليل معدّل الإنتاجيّة وزيادة متوسِّط زمن الانقطاع الكُلّي. وبالتالي، يُعَد أحد الأهداف الرئيسية لأي خوارزميّة لاتخاذ قرار التسليم HO تقليل أحداث PPHO، التي تعتمد أساساً على طريقة اختيار كل من المُوسِطات HM وTTT لكل مستخدم مُتَّصل بالشبكة. ومن وجهة نظر سببيّة، يمكن القول عند مواجهة الأداء المنخفض من حيث معدّل الإنتاجيّة وزمن الانقطاع، فإنّ عدداً كبيراً من أحداث PPHO الواقعة هو أحد الأسباب الرئيسية. فإذا قلّلنا عدد أحداث PPHO، فسنحصل بشكل منطقي (وسببي) على أداء جيد من حيث زمن الانقطاع ومعدّل الإنتاجيّة. لذلك، يجب أن يعتمد تقييم الأداء أساساً على عدد أحداث PPHO نسبة إلى العدد الكُلّي لأحداث التسليم HO ضمن الشبكة، وهو تماماً مفهوم المؤشِّر HPI_{HOPP} في العلاقة (3-12).

ثانياً، يؤدي وقوع العديد من أحداث فشل التسليم RLFHO أيضاً إلى معدّل إنتاجيّة منخفض وانقطاعات متكرّرة. وهنا يجب أن نميّز مرة أُخرى الأحداث التي تسبب أحداثاً أخرى. إنّها أحداث TLHO وTEHO التي تؤدي بشكل أساسي إلى قرار تسليم HO خاطئ أو فاشل راديوياً (انقطاع الاتصال بسبب فشل الوصلة الراديويّة RLF)، وهكذا فإنّ معدّل الإنتاجيّة متمثلة بكمية المعطيات التي يجري تبادلها داخل نظام الشبكة سيكون منخفضاً، ويجب أن يكون تقييم خوارزميّة اتخاذ قرار التسليم متعلقاً بشكل مباشر بتقييم عدد أحداث TLHO وTEHO (أحداث فشل التسليم RLF HO). لأنّ الأداء المرتبط بهذه الأحداث ينعكس على أداء مؤشر معدّل الإنتاجيّة وسقوط المكالمة dropped call

أثناء إجرائيّة تنفيذ التسليم. إنّ اتخاذ قرار التسليم (بناءً على اختيار قيم غير مناسبة للمُوسِطات HM وTTT) يؤدي إلى مثل هذه الأحداث (معدّل إنتاجيّة منخفض وانقطاع متكرّر). ولا تتعلق إجرائيّة تنفيذ التسليم HO (التي تلي مرحلة اتخاذ قرار التسليم) بشكل أساسي بقيم المُوسِطات HM وTTT، بل تتعلق بقضايا أُخرى، بتخصيص موارد الشبكة مثلاً. نتيجة لذلك، يجب تمييز بين مؤشّرات تقييم آليّة اتخاذ قرار التسليم (أي آليّة اختيار قيم HM وTTT المناسبين وهو موضوع هذا الفصل) من تلك المؤشّرات المستخدمة لتقييم إجرائيّات تنفيذ التسليم HO، وهو موضوع بحثي تخصُّصي آخر. إنّ مراعاة مؤشّرات الأداء الرئيسيّة الأُخرى مثل معدّل الإنتاجيّة أو زمن الانقطاع في تقييم النموذج المقترح هنا، في اعتقادنا، لا يضيف أي قيمة معقولة إلى الهدف الرئيس للتقييم في مجال هذه الفصل. لذلك، يجب أن يعتمد تقييم الأداء بشكل أساسي على عدد أحداث فشل التسليم RLFHO التي تقع نسبة إلى العدد الكُلّي لأحداث التسليم HO، وهو تماماً مفهوم المؤشّر HPI_{HOF} في العلاقة (3−11).

4.3 مسألة التسليم في إدارة الحركيّة

تُعدُّ إدارة الحركيّة UMM في الشبكات اللاسلكيّة الخلَوية أمراً ضرورياً لتأمين اتصال مستمر أثناء الحالة الحركيّة لتجهيزات المستخدمين ضمن الشبكة. وتتمثل إحدى مسؤوليات إدارة الموارد الراديويّة RRM في الحفاظ على الوصلة الراديويّة Radio Link بين تجهيزة المستخدم UE والمحطّة القاعديّة eNB خلال تواجد المستخدم ضمن منطقة تغطية الشبكة. فإذا اضطر المستخدم إلى تنفيذ حدث تسليم فيجب تحقيق ذلك بنجاح من خليّة إلى خليّة دون انقطاع الاتصال ودون هدر الموارد. لذلك، فإنّ نجاح إجرائيّة اتخاذ قرار التسليم يضمن تأسيس وصلة راديويّة جديدة من الخليّة المخدِّمة الحاليّة إلى الخليّة الهدف في الشبكة فلا يحدث انقطاع في الاتصال ولا تتأثّر جودة الخدمة QoS [113]؛ ما يسمح لتجهيزات المستخدمين UEs المتنقّلة بين عقد الشبكة بالحفاظ على الاتصال الراديوي خلال حركيّتها ضمن مناطق تغطية الشبكة عن طريق إجراء تسليم ناجح من الخليّة المخدِّمة إلى الخليّة الهدف، توفّر الخليّة الهدف جودة إشارة أفضل. وهكذا، فإنّ عمليّة التسليم HO لا تحافظ فقط على الاتصال المستمر لتجهيزة المستخدم خلال حركيّته ضمن الشبكة وإنّما تُحسِّن أيضاً من أداء الشبكة وجودة الخدمة QoS لتجهيزة المستخدم UE.

عموماً، يمكن تقسيم خوارزميّات أمثلة إجرائيّة اتخاذ قرار التسليم إلى ثلاث فئات أساسيّة: اعتماداً على قيم RSRP لوحدها واعتماداً على قيم RSRP مع عتبة لمؤشّر الأداء واعتماداً على قيم المُوسِطات HM وTTT [113]. في الفئة الأولى، يعتمد قرار التسليم على قيمة شدّة الإشارة المستقبلة RSS فقط. ويجري تنفيذ التسليم HO بمجرد تدهور قيمة RSS للإشارة المُستقبَلة من الخليّة المُخدِّمة الحاليّة، وتكون قيمة RSS المُستقبَلة من الخليّة الهدف أكبر. بالنسبة للفئة الثانية، يعتمد اتخاذ قرار التسليم على شرطين ضروريين يجب أن يكونا متماسكين، بحيث تكون قيمة RSS من الخليّة المخدّمة أقل من عتبة معينة محددة مسبقاً (هي قيمة المُوسِط HM)، وتكون قيمة RSS للخليّة الهدف أكبر منها للخليّة

المُخدِمة، من دون شرط زمني على مدة استمرار هذا الشرط. أخيراً، بالنسبة للفئة الثالثة، تبدأ عمليّة التسليم HO بمجرَّد أن تصبح قيمة RSS للخليّة الهدف أكبر منها للخليّة المخدِمة مضافاً لها قيمة HM المحدّدة مسبقاً، بحيث يبقى هذا الفرق محقّقاً خلال فترة زمنية محددة مسبقاً هي نفسها مقدار الزمن اللازم للقدح TTT، فاذا استمر الفرق كل هذه الفترة عندئذٍ يُرسَل إيعاز بتنفيذ عمليّة التسليم بين الخليتين. تُقاس HM وTTT بواحدتي الديسبل وميلي ثانية على التوالي، ويجري اختيار قيم HM وTTT إما بشكل ثابت بالنسبة لجميع المستخدمين أو ديناميكيّاً لكل مستخدم على حِدة وفقاً لحالته الحركيّة. يعتمد قرار التسليم المتين بشكل أساسي على قيم المُوسِطات HM وTTT، وتتحكَّم قيم هذه المُوسِطات بالأداء الكُلّي للنظام، وخاصة الأحداث RLFHOs وPPHOs. بالنظر إلى الأدبيّات ذات الصلة، نجد أنّ الخوارزميّات القائمة على تغيير قيم المُوسِطات HM وTTT معاً تقوم بها الشبكة بشكل آلي متناسب مع ظروف الشبكة الكلية (موضع المستخدم وسرعته والاستطاعة المستقبلة RSRP والنسبة SINR)، إن تطوير خوارزميّة ذاتيّة الأمثلة من أجل ضبط قيم المُوسِطات HM وTTT بدلاً من افتراضها قيم ثابتة، يُعَد الآليّة الأكثر فاعليّة من الناحية العمليّة فيما يخص أمثلة متانة الحركيّة MRO في اتخاذ قرار التسليم خلال حركيّة تجهيزات المستخدمين [116]. ويمكن القول إنّ التفكير في خوارزميّة أمثلة متينة تعتمد استخدام أكبر عدد ممكن من مقاييس النظام ومعلومات حالة الحركيّة للمستخدم (على سبيل المثال، التفكير في مزيج من اثنين أو أكثر من مُوسِطات اتخاذ قرار التسليم مثل RSRP وSINR وسرعة المستخدم ضمن خوارزمية SON لاختيار قيم المُوسِطات HCPs بشكل تكيُّفي ومنفرد لكل مستخدم)، يسهم إسهاماً كبيراً في تقليل وقوع أحداث RLFHOs و UHOs، ويُعَد مطلباً رئيساً في شبكات SON. وهو الهدف الأول من هذا الفصل.

تعتمد خوارزميّة اتخاذ قرار التسليم HO في الحالة العامة التقليديّة في النظام LTE-A على قيم RSRP للخلية المخدّمة والخليّة الهدف، ويجري اختبار تحقُّق متراجحة للمقارنة بين قيمة RSRP المقيسة من الخليّة المُخدِمة الحاليّة $RSRP_i^{serving}$ مع تلك المقيسة من الخليّة الهدف $RSRP_i^{target}(dB)$ في عمليّة التسليم، ويجري التعبير عن ذلك رياضيّاً وفق العلاقة (3−13) [117].

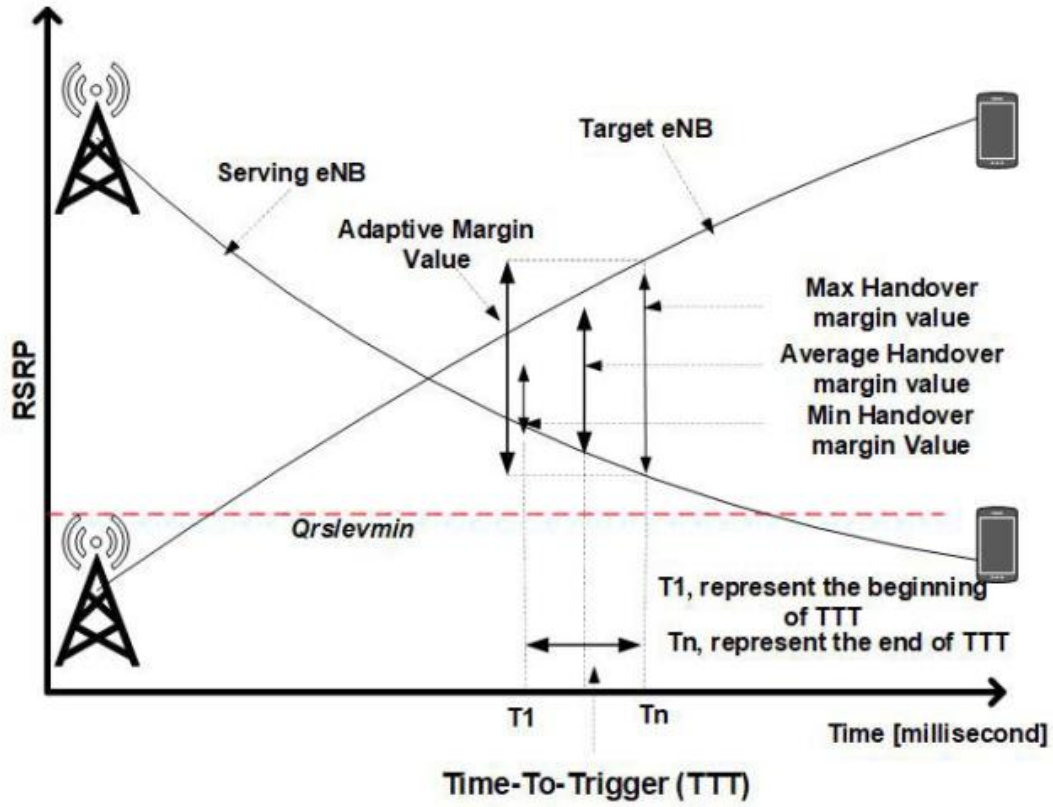
$$RSRP_i^{target}(dB) \geq RSRP_i^{serving}(dB) + HM(dB) \quad (13-3)$$
$$\text{for a time interval} = TTT$$

تُظهِر المتراجحة في (3−10) بوضوح أهميّة المُوسِطات HM وTTT في تحديد طبيعة التسليم HO الحاصل (سواء أكان ناجحاً أم فاشلاً أم غير ضروريّ) بغض النظر عن نمط الخليّة الهدف والخليّة المُخدِمة (تسليم من خليّة فمتويّة لخليّة فمتويّة FTFHO، تسليم من خليّة فمتويّة لخليّة ماكرويّة FTMHO، تسليم من خليّة ماكرويّة لخليّة فمتويّة MTFHO، تسليم من خليّة ماكرويّة إلى خليّة ماكرويّة MTMHO). ولاتخاذ قرار التسليم، يجب أن تكون قيمة RSRP للخليّة الهدف أكبر منها للخليّة المُخدِمة بمقدار قيمة هامش البطاء HM خلال الفترة الزمنيّة TTT. يوضّح الشكل 3−5 أثر تغيير قيم المُوسِطات HM وTTT

في اتخاذ قرار التسليم [113] بشكل ثابت (اختيار قيم ثابتة للمُوسِطات بالنسبة لكل المستخدمين) أو بشكل تكيّفي. جَرَى في هذا البحث تعديل قيم الموسطات HM وTTT بشكل تكيفي من خلال تابعين رياضيين:

1) جرى حساب قيمة HM المناسبة وفق تابع رياضي مُقتَرَح اعتماداً على قيم RSRPs لكل من الخليّة المُخدّمة والخليّة الهدف، مع مراعاة قيمة SINR المتوسّطة خلال نافذة زمنية موحدة لكل من الخليّة المُخدِّمة والخليّة الهدف.
2) جرى تطوير تابع رياضي لحساب قيمة TTT المناسبة والمرتبطة بكل من قيمة HM التكيُّفي (التي جَرَى حسابها في الخطوة السابقة) وقيمة سرعة تجهيزة المستخدم UE.

إنّ قيم مُوسِطات التحكُّم بالتسليم HCPs يجري ضبطها بشكل تكيُّفي اعتماداً على العديد من مُوسِطات الشبكة، وهي قيم RSRP وSINR والحالة الحركيّة للمستخدم.



الشكل 3–5: آليّة اتخاذ قرار التسليم في النظام LTE-A [113].

5.3 استعراض الحل المقترح

1.5.3. تمهيد

تشير المتراجحة (3–13) إلى أنّ قرار التسليم يعتمد أساسياً على ثلاثة مقاييس للنظام هي استطاعة الإشارة المرجعيّة المستقبلة RSRP وهامش البطاء HM والزمن اللازم للقدح TTT، فمن جهة أولى تعتمد قيمة RSRP على المسافة بين تجهيزة المستخدم UE والمحطّة القاعديّة. يجري حساب هذه المسافة وفقاً للعلاقة (3–5) اعتماداً على إحداثيّات موضع تجهيزة المستخدم UE وإحداثيّات كل من الخليّة المُخدِّمة والخليّة الهدف. لذلك لا يمكن لنواة الشبكة التحكُّم في قيمة RSRP، لأنّ RSRP هي " مُوسِط مفروض" على النظام، ويتعلق بالطبيعة العشوائيّة لانتشار الإشارة، ويجب أن يعمل النظام وفق " قيمتها المفروضة عليه ". يكون تضمين قيمة RSRP في أي خوارزميّة ممكناً ومفيداً على شكل قيد شرطي يجب استشاره في تحديد قيم المُوسِطات HCPs. ولا يجري فرض HM وTTT على النظام؛ أي يمكن للمُشغّل التحكُّم في كيفيّة اختيارهما. فيمكن اختيار قيم المُوسِطات HCPs بناءً على معايير صارمة تتعلق بالمُوسِطات RSRP أو SINR أو كليهما، وبالتالي ضمان أقل عدد من الأحداث غير المرغوب فيها مثل TLHO وTEHO وPPHO.

تتمثل الفكرة الرئيسية الأولى في وجوب اختيار قيمة تكيُّفيّة للمُوسِط HM تُناسَب مع تغطية كل من الخليّة المُخدِّمة والخليّة الهدف لتخديم تجهيزة المستخدم UE وفقاً لموضعها النسبي المتغير مع الزمن. فطالما أنّ تجهيزة المستخدم UE موجودة ضمن ظروف تغطية جيّدة بالنسبة للخليّة المخدِّمة الحاليّة (أي أنّ قيمة SINR جيدة)، يجب أن تبقى قيمة HM كما هي بحيث لا تكون صغيرة جداً ويجري استيفاء المتراجحة (3–13). ومع ذلك، عندما تصل تجهيزة المستخدم UE إلى منطقة تغطية جيدة لخليّة جديدة مجاورة (الخليّة الهدف)، عندئذٍ ينبغي اختيار HM بناءً على خصائص حدود التغطية بين الخليّة المُخدِّمة الحالية والخليّة الهدف، على سبيل المثال، وفقًا لنسبة RSRP للخليّة المُخدّمة الحالية إلى RSRP للخليّة الهدف، وفي نفس الوقت، يجب أن توفِّر كل من الخليّة المُخدِّمة والخليّة الهدف قيمة جيّدة للنسبة SINR لضمان عدم حدوث فشل في الوصلة الراديويّة RLFHO. هذه هي الفكرة الأساسيّة التي سيُعتمد عليها في تحديد قيمة المُوسِط HM وفقاً لتابع يتناسب والأهداف المذكورة أعلاه (الفقرة 1.5.3).

الفكرة الرئيسيّة الثانية هي أنّه يجب اختيار قيمة المُوسِط TTT وفقاً لقيمة المُوسِط HM التي جَرَى حسابها بشكل تكيُّفي في المرحلة السابقة وكذلك وفقاً لسرعة تجهيزة المستخدم UE في نفس الوقت. تعتمد جميع الخوارزميّات في الأدبيّات ذات الصلة على اختيار قيم المُوسِطات HM وTTT بشكل مستقل عن وجود أي علاقة بينهما. أي أنّه من المفترض ألّا يوجد ارتباط بين HM وTTT. تُجادل هذه الدراسة بأنّ وجود علاقة كهذه أمرٌ ممكن. أي لا ينبغي اختيار قيمة TTT بمعزل عن

طريقة اختيار قيمة HM، ولا بمعزل عن قيمة سرعة تجهيزة المستخدم UE، وهذه فكرة جديدة كليّاً غير مطروحة في كل الأعمال ذات الصلة. لذلك، من خلال الجمع بين هاتين الفكرتين الرئيسيتين يمكن تطوير مُخطَّط اختيار مشترك وتكيُّفي لكل من HM وTTT، ويمكن اكتشاف آليّة أمثلة ذاتيّة جديدة لشبكة HetNet تعتمد على الحالة الفردية لحركيّة كل مستخدم في مناطق تغطيتها.

2.5.3 نموذج الحساب التكيّفي لهامش البطاء HM Adaptation

كلما كانت قيمة المُوسِط HM أصغر، زاد احتمال حدوث أحداث تسليم غير مرغوبة UHOs. على سبيل المثال، تسليم من خليّة ماكرويّة إلى خليّة فمتويّة MTFHO ثمّ تسليم من الخليّة الفمتويّة إلى الخليّة الماكرويّة نفسها FTMHO. ويمكن أن تؤدي القيم الأكبر لهامش البطاء HM إلى حرمان المستخدم من حدث تسليم ضروري وناجح بين خليتين داخل الشبكة HetNet. فإذا جَرَى اختيار قيمة كبيرة وثابتة للمُوسِط HM لجميع تجهيزات المستخدمين UEs في الشبكة (في الطريقة التقليديّة التي تعتمد الضبط اليدوي للمُوسِطات HCPs)، فإنّ إمكانيّة دخول تجهيزة المستخدم UE في منطقة تغطية جديدة وأفضل لخليّة مجاورة (خليّة هدف) لن تتزامن مع ضرورة تنفيذ حدث تسليم HO ناجح؛ ويمكن أن تبقى تجهيزة المستخدم UE مرتبطة بالخليّة المخدّمة الأصليّة، وحرمانها من جودة خدمة أفضل. لذلك، يبدو أنّ اختيار HM لكل مستخدم يعتمد على مسافة تجهيزة المستخدم عن كل من الخليّة المُخدِّمة الحاليّة والخليّة الهدف في عملية التسليم. لذا، ووفق العلاقتين (3−4) و (3−6)، يجب تنفيذ اختيار قيمة HM وفقاً للعلاقة النسبية بين RSRP للخليّة الهدف وتلك المُستقبَلة من الخليّة المخدّمة الحاليّة، طالما تتحرك كل تجهيزة مستخدم UE داخل الشبكة بحيث يمكن أن تتجاوز تجهيزات المستخدمين حدود التغطية من خليّة إلى خليّة بغض النظر عن نوع الخليّة (سواء أكانت خليّة ماكرويّة أم خليّة صغيرة). بهذه الطريقة، تعتمد قيمة HM لكل مستخدم على حِدا بشكل أساسي على خصائص الخليّة الهدف والخليّة المخدّمة الحاليّة (إحداثيّات الخليّة التي تحدّد المسافات ومن ثم تحدد قيم RSRPs)، سواء أكانت الخليّة الهدف والخليّة المُخدِّمة الحالية من نفس النوع (ماكرويّة أو صغيرة) أم مختلفتين (أحدهما ماكرويّة والآخر صغيرة).

ضمن هذا السياق، يمكننا تحديد مبدأ رياضي لاختيار قيمة تكيُّفيّة للموسط HM وفقاً للمسافات النسبية التي تفصل تجهيزة المستخدم UE عن كل من الخليّة الهدف والخليّة المخدّمة الحاليّة، أو وفقاً لنسبة RSRP لهذه الخلايا. أي يمكن أن يتوافق اختيار HM مع نسبة RSRP لكل من الخليّة الهدف والخليّة المُخدّمة الحالية؛ ما يؤدي إلى ارتباط تجهيزة المستخدم UE بالخليّة المخدِّمة مادام داخل تغطية الخليّة المخدِّمة وسيدخل قريباً منطقة تغطية الخليّة الهدف. يجري تنفيذ تسليم تجهيزة المستخدم UE إلى الخليّة الهدف، مع الأخذ بالحسبان قيمة HM المقابلة، إذا وفقط إذا كانت قيم SINRs الخاصة بالمستخدم فيما يتعلق بكل من الخليّة المُخدِّمة والخليّة الهدف جيدة وكافية لتجنُّب حدث فشل في

الوصلة الراديويّة RLF (متوسّط قيمة SINR أكبر من حد معيّنΘ يعرّفه النظام وذلك خلال نافذة زمنية W يحدّدها النظام أيضاً)، وفي الوقت نفسه إذا كانت قيمة RSRP للخليّة الهدف أكبر منها للخليّة المُخدِّمة. بهذه الطريقة، عندما تنخفض قيمة RSRP المستقبلة من الخليّة المخدّمة الحاليّة (أي عندما تزداد مسافة تجهيزة المستخدم UE عن خليّته المخدِّمة)، يجب تغيير قيمة HM إلى حد مناسب حتى تصل تجهيزة المستخدم UE إلى حدود منطقة التغطية للخليّة المخدّمة ويبدأ بدخول منطقة تغطية الخليّة الهدف، وحينها سوف تزداد قيمة RSRP المستقبلة من الخليّة الهدف (طالما أنّ مسافة تجهيزة المستخدم UE عن الخليّة الهدف تتناقص بهذا الدخول). وهذا يؤدي إلى ضرورة اختيار قيمة HM مناسبة عندما تكون تجهيزة المستخدم UE على حدود منطقة تغطية الخليّة الهدف المتقاطعة مع حدود تغطية الخليّة المُخدِّمة الحالية، بحيث تتجاوز منطقة تغطية الخليّة المخدّمة الحاليّة. ولأنّه لا يُراد أن تُفقَد التغطية الجيدة التي جَرَى الحصول عليها من كل من الخليّة المُخدِّمة والخليّة الهدف، أي إنّ قيم SINRs الجيّدة مشروطة لتجنُّب حدوث أحداث TLHO أو TEHO، يجب اختيار أكبر قيمة من بين القيم المتاحة للمُوسِط HM. تُكافَئ الآليّة الموضَّحة أعلاه إلى العلاقة الوضعيّة الشرطية (3−14).

$$\mathrm{HM}_{\mathrm{adaptive}} = \max_{t\in[t_k-W,t_k]}\left\{0, \mathrm{HM}_{\max}\left(1-\left(\frac{\mathrm{RSRP}_i^{\mathrm{serving}}(t)}{\mathrm{RSRP}_i^{\mathrm{target}}(t)}\right)^2\right)\right\} \qquad (14-3)$$

$$\text{subject to}\begin{cases}\underset{t\in[t_k-W,t_k]}{\mathrm{mean}}\left(\mathrm{SINR}_i^{\mathrm{target}}(t)\right)\geq\Theta,\\ \underset{t\in[t_k-W,t_k]}{\mathrm{mean}}\left(\mathrm{SINR}_i^{\mathrm{serving}}(t)\right)\geq\Theta,\\ \mathrm{RSRP}_i^{\mathrm{serving}}(t)\leq\mathrm{RSRP}_i^{\mathrm{target}}(t): t\in[t_k-W,t_k]\end{cases}$$

وفيها تمثّل Θ قيمة العتبة للنسبة SINR التي تُحدِّد احتماليّة انقطاع قناة الاتصال في النظام، وتمثّل W (قيمتها عادةً 200 ميلي ثانية [12]) نافذة زمنيّة تستخدم لحساب المتوسّط الزمني لقيم SINR الذي نستخدمه للمقارنة مع Θ للحُكم على وقوع أحداث RLF أو لا، و يمثّل $\mathrm{HM}_{\max}$ أعلى قيمة نموذجية للمُوسِط HM (عادة تساوي 10 dB) محدّدة ضمن مواصفات مشروع شراكة الجيل الثالث (3GPP) [118,119]، وتمثل t_k اللحظة الزمنية التي تأخذ فيها تجهيزة المستخدم UE موضعاً جديداً في الشبكة، حيث k دليل يشير إلى الخطوة الزمنيّة للمحاكاة Δt. من أجل التوضيح، إذا اخترنا Δt لتكون 10 ميلي ثانية، وإذا أردنا محاكاة النموذج خلال فترة زمنيّة 150 ثانية، فسيكون لدينا 15000 خطوة زمنية للمحاكاة بأكملها، وفي الوقت نفسه سوف تتوافق W مع 20 خطوة من خطوات المحاكاة، و t_k سوف تبدأ من الرقم $k = 21$، ويكون لدينا $t_k = 210\ \mathrm{ms}$. لذلك، بالنسبة لكل موضع جديد لتجهيزة المستخدم UE، نتحقق من متوسّط قيم SINR عبر نافذة زمنية W مقدارها 200 ميلي ثانية تتوافق مع كل 20 موضعاً سابقاً لتجهيزة المستخدم للمقارنة بقيمة العتبة Θ، والتحقُّق في الوقت نفسه

عند كل موضع جديد لاحق، من أنّ قيم RSRP لكل من الخليّة الهدف والخليّة المخدّمة متفاوتة، فإذا استوفيت الشروط الثلاثة للعلاقة (3−14)، يجري تكيّف (ملاءمة) قيمة HM مع قيم RSRPs وبالتالي اختيار القيمة الأمْثَلْ. تختار العلاقة (3−14) القيمة العُظمى بين القيم المقابلة لمجموعة من اللحظات الزمنيّة في النافذة W، حيث تقوم بتنفيذ عملية رياضيّة هي البحث عن أكبر قيمة للتابع $\mathrm{HM}_{\max}\left(1-\left(\frac{\mathrm{RSRP}_i^{\mathrm{serving}}(t)}{\mathrm{RSRP}_i^{\mathrm{target}}(t)}\right)^2\right)$ خلال الفترة الزمنية المُحدَّدة بالمجال الزمني$[t_k-W,t_k]$. عندما تكون قيمة RSRP للخليّة المخدّمة أكبر منها دائماً للخليّة الهدف، فإنّ هذا التابع المعتمد على الزمن يرجع دائماً قيمة سالبة؛ والعلاقة (3−14) ترجع قيمة صفريّة لهامش البطاء HM. وعندما تكون RSRP للخليّة الهدف مساوية لقيمة RSRP للخليّة المخدّمة، عندئذٍ، في اللحظة التالية، من المحتمل أن تبدأ الخليّة الهدف بتأمين قيمة RSRP أكبر من قيمة RSRP المستقبلة من الخليّة المخدِّمة الحاليّة؛ ومن المحتمل أن يكون هناك قرار تسليم HO يمكن اتخاذه. لذا يهتم هذا البحث باختيار قيمة HM بحيث تخضع النتيجة لثلاثة قيود متينة تتناسب مع متطلبات النظام، فيجري اختيار القيمة إذا وفقط إذا استوفيت الشروط الثلاثة في العلاقة (3−14)، ويكون الحصول على قيمة تكيُّفيّة للموسط HM ومتفردة idiosyncratic بكل مستخدم يعتمد بدقة على تحقق ثلاث متراجحات:

1. $\underset{t\in[t_k-W,t_k]}{\mathrm{mean}}\left(\mathrm{SINR}_i^{\mathrm{target}}(t)\right)\geq\Theta$
2. $\underset{t\in[t_k-W,t_k]}{\mathrm{mean}}\left(\mathrm{SINR}_i^{\mathrm{serving}}(t)\right)\geq\Theta$
3. $\mathrm{RSRP}_i^{\mathrm{serving}}(t)\leq\mathrm{RSRP}_i^{\mathrm{target}}(t)$

عندما لا يتحقَّق أحد هذه الشروط، على سبيل المثال إذا كانت قيمة الاستطاعة المستقبلة من الخليّة المخدّمة $\mathrm{RSRP}_i^{\mathrm{serving}}(t)$ أكبر من الاستطاعة المستقبلة من الخليّة الهدف $\mathrm{RSRP}_i^{\mathrm{target}}(t)$ عندها بغض النظر عن البيانات القياسيّة للنسبة SINR ستعطي العلاقة (3−14) النتيجة HM=0 dB، لأنّ المقدار $\mathrm{HM}_{\max}\left(1-\left(\frac{\mathrm{RSRP}_i^{\mathrm{serving}}(t)}{\mathrm{RSRP}_i^{\mathrm{target}}(t)}\right)^2\right)$ سوف يعطي قيماً سالبة، وبالتالي تبقى تجهيزة المستخدم مُخدَّمة من قبل الخليّة المخدِّمة الأصليّة نفسها، ولا داعي هنا لتنفيذ تسليم إلى خليّة أخرى في الشبكة. بكل الاحوال، ستكون قيمة HM التكيُّفية موجبة دوماً تنحصر بين 0 و10 ديسيبل لجميع المستخدمين في الشبكة طوال فترة المحاكاة بأكملها. من الواضح أنّ قيمة HM المحدَّدة في العلاقة (3−14) خاصة بكل تجهيزة مستخدم UE وفقاً لحالته الحركيّة المتفردة الخاص بكل منهم ضمن الشبكة. من هنا يتجلى مغزى مفهوم الحساب التكيُّفي لهامش البطاء، ويمكن القول إنّ الآليّة المقترحة هنا في اختيار قيمة للمُوسِط HM تكيُّفيّة Adaptive، فهي تحدّد قيم HM وفقاً للحالة الحركيّة لتجهيزة المستخدم UE، ووفقاً لمواقع تخطيط الخلايا في الشبكة، ووفقاً لنوع الخليّة (صغيرة أو ماكرويّة).

3.5.3 نموذج الحساب التكيُّفي للزمن اللازم للقدح TTT

اقترح في الفقرة السابقة آليّة لتحديد قيمة HM المناسبة لكل مستخدم في الشبكة وفقاً للمسافة التي تفصله عن الخلايا المحيطة، فعند كل موضع جديد له في الشبكة تُعدَّل قيمة هامش البطاء تكيّفيّاً مع مرور الزمن وفق العلاقة (3-14). نقترح في هذه الفقرة آليّة لتحديد قيمة المُوسِط TTT بناءً على القيمة المقابلة لقيمة هامش البطاء HM المتناسبة معها، وبناءً على قيمة سرعة تجهيزة المستخدم UE. نفترض هنا أنّ قيمة TTT يجب أن تكون متناسبة مع الحالة الحركيّة المتغيّرة مع الزمن لكل تجهيزة مستخدم UE ضمن الشبكة، ويجب أن تكون مرتبطة بقيمة HM المختارة. فبدلاً من تغيير قيم TTT وHM بشكل مستقل عن بعضهما بناءً على زيادة أو نقصان في قيمهما بخطوات غير مبررة كما هو الحال في الأدبيّات، نحدد هنا قيم الأزواج (HM,TTT) الخاصة بتجهيزات المستخدمين بناءً على علاقة تربط بين TTT وHM مع بعضهما؛ وفي الوقت نفسه، تُشتَق هذه العلاقة من خصائص الحركيّة المتغيّرة مع الزمن لكل تجهيزة مُستخدِم وأثرها في تغيّر قيم الاستطاعة المستقبلَة RSRPs.

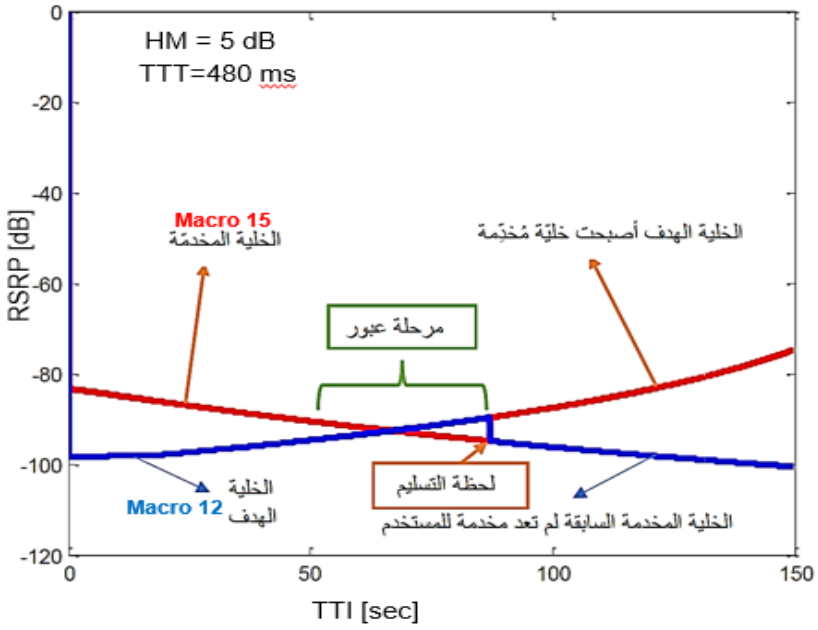
تعالج هذه القضية على النحو التالي: لنفترض أنّ تجهيزة المستخدم UE تتحرَّك ضمن منطقة تغطية الخليّة المخدّمة الحاليّة بسرعة v متر/ ثا، حيث تتحرَّك بعيداً عن هذه الخليّة لتقترب من منطقة التغطية للخليّة الهدف. عندما يستوفي شرط المتراجحة (3-14)، أي يستوفى شرط التسليم الذي يحدّد وقوع الحدث A3، يبدأ مؤقِّت TTT بالعدّ. وإذا استمرت المتراجحة مُحقّقة لفترة تساوي TTT، فسيكون المستخدم قد تحرَّك مسافة $d_{v,TTT} = v \times TTT$ [m] (بافتراض سرعته ثابتة خلال الزمن الصغير نسبيّاً TTT). يجري اختيار قيمة المُوسِط TTT من مجموعة من 16 قيمة مختلفة محددة من قبل مشروع شراكة الجيل الثالث 3GPP وفقاً للمواصفة 3GPP TS 36.331 [10]، فتُؤخّذ قيم TTT من مجموعة القيم {0 و40 و64 و80 و100 و128 و160 و256 و320 و480 و512 و640 و1024 و1280 و2560 و5120 ميلي ثانية}. هذا يعني أنّ قيم TTT تنحصر بين 0 إلى 5.12 ثانية. ويكون لدينا هنا 16 مسافة $d_{v,TTT}$ مختلفة من أجل سرعة ما للمستخدم. تقتضي هذه المسافات المختلفة لنفس المستخدم (نفس السرعة) قيم SINR مختلفة كونها تتغير مع مرور الزمن بتغير قيم الاستطاعة RSRPs.

إذا اختيرت قيمة ثابتة وكبيرة للمُوسِط TTT، فإنّ شرط المتراجحة في (3-14) يتطلب فترة طويلة من الوقت ليُستوفَى، ومن الممكن أنّ تدخل تجهيزة المستخدم منطقة تغطية الخليّة الهدف مبتعدة عن الخليّة المخدّمة الأصليّة (خاصةً إذا كانت سرعتها كبيرة). وقد يؤدي هذا إلى حدث تسليم متأخِّر جدّاً TLHO مادامت مسافة تجهيزة المستخدم UE عن الخليّة المُخدِّمة الأصليّة ستزداد بشكل كبير، فإنَّ قيمة SINR المقابلة لها سوف تتدهور. من ناحية أخرى، إذا جَرَى اختيار قيمة ثابتة وصغيرة للمُوسِط TTT، فهناك احتمال كبير لوقوع حدث تأرجح في التسليم PPHO، مادام شرط المتراجحة في

العلاقة (3-14) سيتطلب فترة زمنية صغيرة هي TTT ليبقى مُحقَّقاً. علاوة على ذلك، مع القيمة الصغيرة للزمن اللازم للقدح TTT، هناك احتمال كبير لوقوع حدث تسليم مبكِّر جدّاً TEHO فقد لا يكون المستخدم في منطقة تغطية جيّدة للخليّة الهدف للحصول منها على نسبة SINR كافية في هذه الحالة لضمان جودة خدمة مناسبة، فيُقطَع الاتصال بين المستخدم والخليّة الهدف حتى إذا اكتملت عمليّة التسليم إلى الخليّة الهدف. في كلتا الحالتين، سواء أكانت TTT كبيرة أم صغيرة، تؤثّر قيمة سرعة تجهيزة المستخدم في وقوع أحداث غير مرغوب فيها (التسليم المبكِّر TLHO والتسليم المتأخِّر TEHO وتأرجح التسليم PPHO)، لأنّ السرعات المختلفة ستعني مسافات مختلفة وفقاً للمقدار $d_{v,TTT}$ حتى لو كانت قيمة TTT ثابتة، وتؤدي قيمة السرعة إلى تدهور شديد في أداء النظام إذا جرى اختيار قيمة ثابتة للمُوسِط TTT بغض النظر عن سرعة تجهيزة المستخدم، وهنا نبرّر أهميّة اعتماد قيمة ملائمة للزمن اللازم للقدح TTT مع الأخذ بالحسبان سرعة تجهيزة المستخدم UE.

يُلاحَظ هنا أنّه بناءً على قيمة المُوسِط TTT (سواء أكانت كبيرة أم صغيرة)، وعلى كل من سرعة تجهيزة المستخدم UE وقيمة المُوسِط HM، يجب مراعاة وجود مقايضة Trade-Off من نوع خاص حيث تتعارض متطلبات الأداء الجيّد لأحداث التسليم المتأخِّر TLHOs (عند اختيار قيم صغيرة للمُوسِط TTT) مع متطلبات الأداء الجيّد لكل من أحداث التسليم المبكِّر TEHOs وتأرجح التسليم PPHOs (عند القيم الكبيرة نسبيّاً للمُوسِط TTT)، والعكس صحيح. من وجهة النظر هذه، فإنَّ أي آليّة لاختيار TTT يجب أن تأخذ في الحسبان سرعة تجهيزة المستخدم وقيمة HM المناسبة والمقابلة بحيث يمكن الحصول على أداء عام جيّد للتسليم من حيث وجود عدد قليل من أحداث TLHO وTEHO وPPHO في نفس الوقت. لذلك، في هذه الدراسة، نفترض أنّ قيمة TTT يجب أن تتكيَّف بشكل رئيس أول مع سرعة تجهيزة المستخدم، ويجب أيضاً أن تتكيّف بشكل رئيس ثان مع القيمة التكيُّفيّة للمُوسِط HM الذي جَرَى تطويره في الفقرة السابقة. وفيما يلي، شرح آليّة اختيار قيمة المُوسِط TTT بشكل متكيّف وفقاً لهذا الافتراض.

يوضّح الشكل 3-6 منحني تغيُّرات قيم الاستطاعة المستقبلة RSRPs من الخليّة المخدِّمة والخليّة الهدف التي جَرَى الحصول عليها خلال كامل حركيّة تجهيزة مستخدم UE بسرعة 30 كم/ساعة ضمن شبكة غير متجانسة HetNet تتكون من 19 خليّة ماكرويّة و41 خليّة فمتويّة، مع الأخذ بالحسبان قيمة ثابتة لمُوسِطات التحكُّم بالتسليم وهي TTT = 480 ms و HM = 5 dB.



الشكل 3–6: رسم توضيحي لحدث تسليم ناجح مع الشروط المقابلة (الباحث).

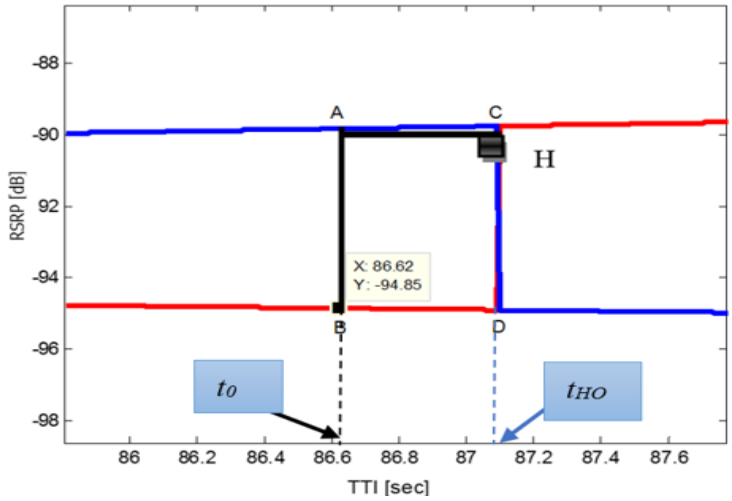
يُلاحَظ في الشكل 3–6 تنفيذ التسليم لتجهيزة المستخدم UE من الخليّة الماكرويّة رقم 15 إلى الخليّة الماكرويّة رقم 12 حيث جَرَى تنفيذ إجرائيّة التسليم في اللحظة الزمنية $t_{HO} = 87.10\ s$ وتكون بالتالي اللحظة الزمنية الأولى التي تحقق فيها شرط التسليم تساوي $t_0 = 86.62\ s$ حيث $t_{HO} - t_0 = TTT = 480\ ms$ ، لقد رُسِمَ الشكل 3–6 بحيث يمثل اللونان الأحمر والأزرق منحني RSRP للخليّة المخدّمة والخليّة الهدف، على التوالي. يُفتَرَض هذا التمثيل اللوني قبل تنفيذ التسليم HO. وعندما يجري تنفيذ التسليم، تتغير حالة الخليّة المخدّمة الخاصّة بتجهيزة المستخدم بين الخليّتين، فيتغير لون منحني RSRP في تلك اللحظة التي جَرَى فيها اتخاذ قرار التسليم HO، فتصبح الخليّة الهدف خليّة مخدِّمة، ويأخذ منحني RSRP الخاص بها اللون الأحمر الجديد، بينما لم تَعُدْ تجهيزة المستخدم UE مرتبطة بالخليّة المخدِّمة السابقة، التي يجري تمثيل منحني RSRP الخاص بها باللون الأزرق. تتوافق اللحظة t_0 مع اللحظة الأولى التي تحقّق عندها شرط متراجحة التسليم في (3–13)؛ وهذا يوافق، عند t_0، تحقُّق العلاقة (3–15).

$$RSRP_{macro12}^{target}(t_0) \geq RSRP_{macro15}^{serving}(t_0) + 5[dB] \qquad (15\text{-}3)$$

حيث تمثّل t_{HO} اللحظة الزمنية التي تتوافق فيها مع آخر مرة يجري فيها تحقيق متراجحة التسليم في العلاقة (3–13) بعد انقضاء المدّة الزمنية اللازمة لقدح إجرائيّة التسليم TTT، وهي تتوافق مع اللحظة الزمنية التي يجري فيها تنفيذ إجرائيّة التسليم، وتكون العلاقة (3–16) مُحقَّقة عند اللحظة الزمنية t_{HO}.

$$RSRP_{macro12}^{target}(t_{HO}) > RSRP_{macro15}^{serving}(t_{HO}) + 5\ [dB] \qquad (16\text{-}3)$$

بتكبير منطقة الرسم في جوار منطقة التسليم في الشكل 3–6، نحصل على الشكل 3–7 الذي يوضِّح بشكل أدق اللحظتين الزمنيّتين t_{HO} و t_0.



الشكل 3-7: رسم توضيحي للتكبير zoom in في الشكل 3-6 في منطقة حدث التسليم (الباحث).

تتوافق النقاط A وB وC وD في الشكل 3-7 مع قيم الاستطاعة المستقبلة من الخليّة المخدِّمة والخليّة الهدف عند لحظة بدء قدح إجرائيّة التسليم (اللحظة الزمنية t_0) وعند لحظة بدء تنفيذ إجرائيّة التسليم (اللحظة الزمنية t_{HO})، ضمن هذا السياق يمكننا كتابة العلاقتين (3-17) و(3-18).

$$diff_1 = RSRP_{macro12}^{target}(t_0) - RSRP_{macro15}^{serving}(t_0) \qquad (17\text{-}3)$$

$$diff_2 = RSRP_{macro12}^{target}(t_{HO}) - RSRP_{macro15}^{serving}(t_{HO}) \qquad (18\text{-}3)$$

تشير $diff_1$ إلى الفرق بين الاستطاعة المستقبلة من الخليّة المُخدِّمة والخليّة الهدف عند اللحظة الزمنية t_0، وتشير $diff_2$ إلى الفرق بين الاستطاعة المستقبلة من الخليّة المخدمة والخليّة الهدف عند اللحظة الزمنية t_{HO}. وهنا نلاحظ أنّه وفق المتراجحة في (3-13) يمكن افتراض أن الفرق $diff_1$ هو نفسه قيمة المُوسِط HM (وهو فرض ممكن) وحتى تجري عمليّة التسليم لتجهيزة المستخدم بنجاح من الخليّة رقم 15 إلى الخلية رقم 12 يجب أن يبقى هذا الفرق أكبر أو يساوي قيمة المُوسِط HM بدءاً من اللحظة الزمنية t_0 حتى انقضاء المدة الزمنية TTT (الموافق للحظة الزمنية t_{HO})، وبالتالي عموماً يمكن افتراض العلاقات من (3-19) إلى (3-21).

$$diff_2 > diff_1 \geq HM \qquad (19-3)$$

$$diff_1 = \alpha_1 \times HM;\ \alpha_1 \geq 1 \qquad (20-3)$$

$$diff_2 = \alpha_2 \times HM;\ \alpha_2 > 1 \qquad (21-3)$$

حيث α_1 و α_2 أعداد حقيقية موجبة.

تكمن الفكرة الأساسيّة للخوارزميّة المُقترحة فيما يتعلق بمسألة الأمثلة لعمليّة التسليم في التركيز على الخصائص الهندسية للشكل الرباعي ABCD الذي جرى الحصول عليه في الشكل 3-7، حيث

يمكن مُلاحظة شبه مُنحرِف غير متساوي الساقين رؤوسه هي A وB وC وD بحيث يتوافق الفرق $diff_1$ و$diff_2$ مع أطوال أضلاعه المتوازية ||CD|| و ||AB||، ويكون ارتفاع شبه المنحرف ||AH|| هو العمود المنشأ من النقطة A على القطعة المستقيمة ||CD||. يمكن التعبير عن تغيُّرات الاستطاعة المستقبلة RSRP في الشكل 3-6 بدلالة موضع تجهيزة المستخدم UE بدلاً من الزمن كون المسافة المقطوعة بين الحالتين B وD تساوي إلى سرعة تجهيزة المستخدم مضروبة بالزمن المستغرق لقطعها، وهي نفسها الفترة الزمنية TTT بافتراض السرعة ثابتة خلال المدة الزمنية الصغيرة نسبيّاً TTT، عندئذٍ يكون ارتفاع شبه المُنحرِف السابق متناسباً طرديّاً مع المقدار v×TTT. ضمن هذا السياق يمكننا كتابة العلاقات من (3-22) إلى (3-24).

$$\|AB\| \equiv diff_1 = \alpha_1 \times HM \qquad (22-3)$$

$$\|CD\| \equiv diff_2 = \alpha_2 \times HM \qquad (23-3)$$

$$\|AH\| \equiv v \times TTT \qquad (24-3)$$

وبالتالي يمكننا أن نكتب صيغة مساحة شبه المنحرف ABCD وفق العلاقة (3-25).

$$\text{Area Of ABCD} = \frac{\|AB\| + \|CD\|}{2} \times \|AH\| \qquad (25-3)$$

وبتعويض العلاقات من (3-22) إلى (3-24) في العلاقة (3-25) نحصل على العلاقة (3-26).

$$\text{Area Of ABCD} \equiv \frac{(\alpha_1 + \alpha_2)}{2} v \times HM \times TTT \qquad (26-3)$$

يُلاحَظ من العلاقة (3-26) أنّه يمكن ربط المُوسِطات v وHM وTTT ببعضها عبر الحالة الحركيّة المتغيّرة مع الزمن لتجهيزة المستخدم UE. تتغير قيم RSRPs الخاصة بكل تجهيزة مستخدم UE المتعلقة بكل من الخليّة المخدِّمة الحاليّة والخليّة الهدف مع الزمن خلال حركيّة المستخدمين ضمن الشبكة. ويمكننا من خلال العلاقة (3-26) تأكيد وجود ارتباط معقول بين سرعة تجهيزة المستخدم v وبين مُوسِطات التحكُّم بالتسليم TTT و HM. وهذا يعني أنّ أي اختيار للزوج (HM, TTT) لكل تجهيزة مستخدم يجب أن يأخذ في الحسبان وجود مثل هذه العلاقة. إنّ توضيح وجود هذه العلاقة يُعَد أهم مُساهمات هذا البحث. من أجل التبسيط، يمكننا أن نفترض أن مساحة شبه المُنحرِف ABCD ثابتة لكل حدث تسليم ناجح. هذا يعني أنّ حدث التسليم الناجح يجب أن يتوافق مع نفس مساحة المنطقة من شبه المُنحرِف فيما يتعلق بكل مستخدم يُراد تسليمه من الخليّة المخدِّمة الحاليّة إلى الخليّة الهدف. لذلك، يمكن اختيار الزوج (HM, TTT) لكل تجهيزة مستخدم بحيث تبقى مساحة المنطقة ABCD ثابتة تقريباً لكل حدث تسليم يجري تنفيذه لكل تجهيزة مستخدم بشكل متفرّد. من هذا المنظور، يمكننا النظر في إيجاد قيمة تكيُّفيّة للمُوسِط TTT بحيث يكون هناك نموذج انحدار غير خطي

nonlinear regression model بين المتغيّر TTT والمتغيّر $1/(v \times HM)$، بافتراض أنَّ مساحة المنطقة المُقيَّسة normalized من الرباعي شبه المُنحرِف ABCD تحقق العلاقة (3−27).

$$\text{Normalized area of ABCD} = \frac{\text{Area of ABCD}}{\frac{a_1 + a_2}{2}} \propto \text{Constant, such that:}$$

$$\text{Constant} \propto v \times HM \times TTT \Leftrightarrow TTT \propto \frac{1}{v \times HM} \qquad (27-3)$$

ولإيجاد نموذج عملي للاختيار التكيُّفي، نبحث عن صيغة يمكن أن تمثل العلاقة بين المُوسِطات TTT وHM عبر سرعة تجهيزة المستخدم v. لهذا، يمكننا النظر في نموذج الانحدار غير الخطي المناسب الذي يحدد القيمة التكيُّفية للمُوسِط TTT وفقاً للقيمة التكيُّفية للمُوسِط HM التي نتجت من العلاقة (3−14) وفي الوقت نفسه وفقاً للسرعة v. للقيام بذلك، نبدأ من العلاقة (3−26)، ومن الواضح أنَّ مجال قيم المُوسِط HM التكيُّفية الناتجة ستكون ضمن المجال من 0 إلى 10 ديسبل، وهو ما يتوافق مع المواصفة 3GPP TS 36.331 [10]، من ناحية أُخرى، فإنّ قيم سرعة تجهيزة المستخدم التي تم الاهتمام بها في هذه الدراسة هي في المجال من 0 إلى 300 كم/ساعة. وبالأخذ بالحسبان أنَّ قيم TTT يجري اختيارها من مجموعة القيم المعيارية المحددة وفق مواصفات معيار3GPP وهي {0 و40 و64 و80 و100 و128 و160 و256 و320 و480 و512 و640 و1024 و1280 و2560 و5120 ميلي ثانية} أو عموماً ضمن المجال من 0 إلى 5.120 ثانية [10]، عندها باعتماد برنامج الجداول الإلكترونيّة Microsoft Excel يمكننا الحصول على نموذج الانحدار غير الخطي بين TTT و $1/(v \times HM)$ (الملحق أ).

يوضّح الجدول 3−1 القيم النموذجيّة لهامش البطاء HM والزمن اللازم للقدح TTT وفق المواصفة 3GPP TS 36.331 [10]، وقيم السرعة v التي تتوافق مع مجال السرعات التي نريد دراستها في هذا البحث. في الجدول 3−1، نقدم أيضاً القيم المقابلة للمقدار $1/(v \times HM)$. إنّ السبب الرئيس لترتيب البيانات في الجدول 3−1 بهذه الطريقة (بحيث تكون قيم HM و TTT صغيرين معاً أو كبيرين معاً في العمودين 1 و5) هو أنّنا نريد أن يكون لدينا نوع خاص من العلاقة بين HM وTTT من خلال قيمة معينة للسرعة تتناسب مع مُتطلَّبات النظام. نوضّح هذا الأسلوب على النحو التالي:

أولاً، فيما يتعلق بترتيب البيانات في العمودين 1 (قيم المُوسِط HM) والعمود 5 (قيم المُوسِط TTT) من الجدول 3−1، نريد هنا أن تكون الأزواج (HM، TTT) بحيث يكون HM وTTT صغيرين معاً أو كبيرين معاً. هذا يعني أنّ عنصراً واحداً من هذا الزوج (على سبيل المثال، HM) ليس مطلوباً أن يكون كبيراً، بينما الآخر (على سبيل المثال، TTT) صغير. يُعَد هذا المعيار أكثر توافقاً مع الأدبيّات ومع مُتطلَّبات إجرائيّة التسليم في الشبكة. فإذا كانت قيمة HM كبيرة وكانت قيمة TTT

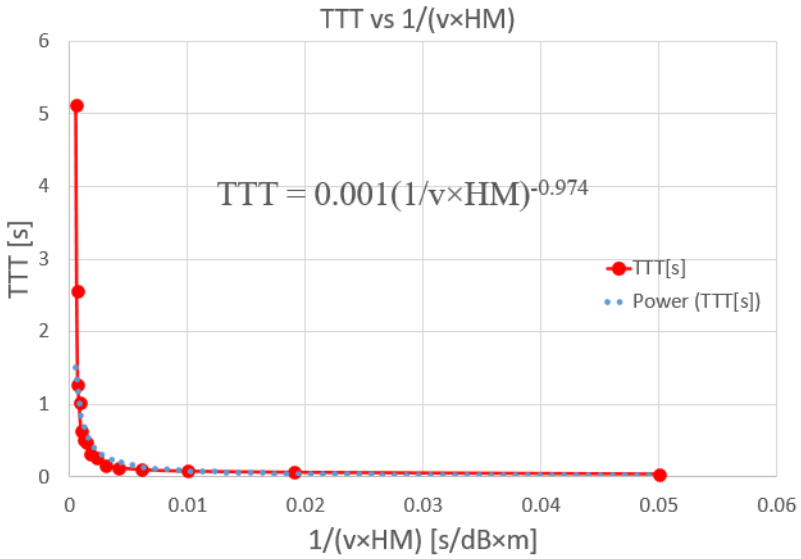
صغيرة، فمن الممكن حرمان المستخدم من تخديمه بخليّة مجاورة (خلية هدف) ذات تغطية أفضل من الخلية المُخدِّمة الحالية. هذا يعني أنّه من الممكن أن يكون لدينا خليّة هدف تحقق شرط المتراجحة في العلاقة (3−13) مع وجود قيمة صغيرة للمُوسِط TTT، ولكن لن تتحقق هذه المتراجحة لأن قيمة المُوسِط HM كبيرة. لذلك، يجب أن تكون قيمة HM صغيرة. من ناحية أخرى، إذا كانت قيمة HM صغيرة وقيمة TTT كبيرة، فإنّنا نواجه احتمال وجود عدد كبير من أحداث تأرجح التسليم PPHO؛ الذي سيؤثّر سلباً في أداء الشبكة من حيث انخفاض معدل الإنتاجيّة.

ثانياً، فيما يتعلق بترتيب البيانات في العمود 2 (قيم السرعة) والأعمدة 3 و4 (قيم المقادير $1/(v \times HM)$ و$v \times HM$). من ناحية أولى، يُراد البحث عن علاقة بين TTT و $1/(v \times HM)$، ونرغب بشكل حدسي في وجود علاقة زائديّة hyperbolic relationship بين السرعة v و المُوسِط TTT لتوافق الافتراض في العلاقة (3−27)؛ أي إنّ القيم الصغيرة للزمن اللازم للقدح TTT مرغوبة لتتوافق مع قيم السرعات الكبيرة، والعكس صحيح. إذن نستند في هذه الفكرة إلى منهجيَّة المماثلة by analogy مع العلاقة (3−27)؛ فضلاً عن ذلك، تُعدُّ هذه الفكرة مطلباً مهمّاً للنظام لأنّ سرعات تجهيزات المستخدمين UEs العالية جداً ستزيد من قيمة المسافة المقطوعة $v \times TTT$؛ لذلك، هناك احتمال كبير لوقوع أحداث تسليم مبكِّر TEHO أو تسليم متأخِّر TLHO. وسبب ترتيب قيم المقدار $v \times HM$ بهذه الطريقة مشتق بشكل حدسي من افتراض ثبات مساحة المنطقة ABCD في العلاقة (3−26)، لأنّنا نبحث عن علاقة بين TTT و$v \times TTT$ بحيث تتحقَّق العلاقة بين TTT وبين $1/(v \times HM)$ كما هو مذكور آنفاً.

الجدول 3—1: بيانات نموذجية لسرعة تجهيزة المستخدمUE والمُوسِطات TTT وHM [10].

HM [dB]	v [km/h]	v×HM	1/(v×HM)	TTT[s]
1.00	20	20.0	0.050000	0.040
1.50	35	52.5	0.019048	0.064
2.00	50	100.0	0.010000	0.080
2.50	65	162.5	0.006154	0.100
3.00	80	240.0	0.004167	0.128
3.50	95	332.5	0.003008	0.160
4.00	110	440.0	0.002273	0.256
4.50	125	562.5	0.001778	0.320
5.00	140	700.0	0.001429	0.480
5.50	155	852.5	0.001173	0.512
6.00	170	1020.0	0.000980	0.640
6.50	185	1202.5	0.000832	1.024
7.00	200	1400.0	0.000714	1.280
7.50	215	1612.5	0.000620	2.560
8.00	230	1840.0	0.000543	5.120

باستخدام برنامج الجداول الإلكترونيّة Microsoft Excel (الملحق أ) وتخطيط قيم المُوسِط TTT مقابل قيم المقدار $1/(v \times HM)$ والتحقق من معادلة خط الاتجاه المناسبة Trendline من النوع Power Type، نحصل على الشكل 3–8.



الشكل 3–8: نموذج الانحدار غير الخطي المقترح لعلاقة TTT مقابل المقدار $1/(v \times HM)$، (الباحث).

يوضّح الشكل 3–8 العلاقة القوية بين TTT و$1/(v \times HM)$. لذلك نقترح مثل هذه العلاقة، حيث تمثل العلاقة (3–28) قيمة TTT التكيفيّة المطلوبة مع كل من قيمة HM التكيفية (التي جرى الحصول عليها من العلاقة (3–14)) والسرعة v.

$$TTT_{adaptive} = 0.001\left(\frac{1}{v \times HM_{adaptive}}\right)^{-0.974} \qquad (28-3)$$

يُلاحَظ أنَّ العلاقة (3–28)، بمعنى ما، حول العلاقة بين HM وTTT عبر السرعة v، وجود تكافؤ تقريباً مع العلاقة (3–27). نصطلح على ذلك بالنموذج الزائدي للعلاقة التي تحكُم ارتباط TTT بكل من HM والسرعة v. من الناحية الرياضيّة، عندما تُرجع العلاقة (3–14) القيمة 0، (أي $HM_{adaptive} = 0$ dB)، يبدو أنّ القيمة المقابلة للزمن اللازم للقدح TTT تكون غير محددة (حالة عدم تعيين). لحل هذه المشكلة العدديّة، نُخصِّص برمجيّاً القيمة 0 للقيمة المقابلة $TTT_{adaptive}$. لن يؤثّر هذا التعيين من الناحية المنطقيّة على صلاحيّة النموذج مادامت القيمة الصفريّة لهامش البطاء HM نَتَجَت من كون قيمة RSRP للخليّة المُخدِّمة الحاليّة أكبر منها للخليّة الهدف وهذا يعني عدم تحقُّق المتراجحة (3–13). بكلمات أُخرى، عدم وقوع الحدث A3 المقابل للمتراجحة (3–13)، لذا يمكن غض النظر عن قيمة TTT فيمكن وضعها برمجيّاً اعتباطيّاً (لأنّ قيمة HM هي هنا دائماً 0 والمتراجحة (3–13) لن تتحقَّق على الإطلاق). في هذه الحالة، يمكننا أيضاً اختيار قيمة كبيرة للزمن اللازم للقدح TTT، ولتكن أكبر قيمة من بين القيم النموذجيّة (5120 ميلي

ثانية)، أو حتى أي قيمة أخرى، لأنّه في هذه الحالة مهما كانت قيمة TTT، فإنّ المتراجحة (3–13) لن تكون صحيحة مع مرور الزمن، بالنسبة لهذا المستخدم أو ذاك.

4.5.3 منهجيّة اشتقاق صيغ مُوسِطات التحكُّم بالتسليم HCPs

تُعَدُّ المنهجيّة المُتَّبعة هنا جديدة وواعدة؛ إذ تركِّز على إيجاد ارتباط تصميمي بين المُوسِطات HM وTTT لتعيين قيمهما بما يتناسب ومتطلَّبات النظام في اتخاذ قرار التسليم. جَرَى تحليل متطلَّبات النظام التي تقلل بشكل أساسي من أحداث تأرجح التسليم PPHOs وأحداث فشل التسليم RLFHOs بنوعيها (أحداث التسليم المبكِّر TEHOs وأحداث التسليم المتأخِّر TLHOs)، وعالجنا المشكلة التي ينبغي فيها اختيار مُوسِطات التحكُّم بالتسليم HCPs بطريقة تجعل المفاضلة بين تقليل عدد أحداث TLHOs وعدد كل من أحداث TEHOs وPPHOs ممكناً في الوقت نفسه دون تعارض. باستخدام العلاقتين (3–13) و (3–28)، يمكن معالجة هذا التعارض بسهولة. تعتمد طريقة التفكير المُتَّبعة هنا على المنهج الوضعي في العلم. جَرَى تحقيق تلك المتطلبات من خلال اتخاذ قرار تسليم HO ناجح وضروري بناءً على قيم صحيحة ومناسبة لكل من المُوسِطات HM وTTT اعتماداً على كل من سرعة وموضع تجهيزات المستخدمين والمواضع الثابتة للخلايا ضمن الشبكة ومقاييس النظام.

بشكل عام، من السهل تحديد حدود الخليّة في سيناريو شبكة متجانسة مكوَّنة من خلايا ماكرويّة فقط؛ إذ يمكن تحديد نصف قطر التغطية للخليّة. ومع ذلك، في سيناريو شبكة غير متجانسة مكوّنة من طبقتين من الخلايا Two-tier HetNet، يجري عادةً نشر الخلايا الصغيرة بشكل كثيف ضمن حيّزات الخلايا الماكرويّة. ومن الصعب تحديد منطقة تغطية الخليّة الفمتويّة بالأخذ بالحسبان فقط معلومات نصف القطر للمحطّة القاعديّة BS المقابلة للخليّة الماكرويّة أو الفمتويّة أو كليهما. تعتمد الاستطاعة المستقبلة RSRP على المسافة بين تجهيزة المستخدم والمحطّة القاعديّة، كما هو موضَّح في العلاقتين (3–4) و (3–6) واختيار قيمة تكيُّفيّة للمُوسِط HM يجب أن يتم الأخذ بالحسبان بُعد تجهيزة المستخدم عن كل من الخلية المخدمة والخلية الهدف (موضع تجهيزة المستخدم). إن الفكرة الأساسيّة للمُوسِط HM التكيُّفي هي تحقيق قيمة ملائمة للمُوسِط HM عندما تتحرَّك تجهيزة المستخدم UE بعيداً عن منطقة تغطية الخليّة المُخدِّمة وتقترب من حدود منطقة تغطية الخليّة الهدف. بافتراض تجهيزة المستخدم UE تتحرك من الخليّة المُخدِّمة (سواء أكانت ماكرويّة أم فيمتويّة) باتجاه الخليّة الهدف (سواء كانت ماكرويّة أو فيمتويّة)، يجب أن يصل المُوسِط HM إلى قيمة مناسبة من حيث الأداء المرغوب لكل من أحداث تأرجح التسليم PPHOs والتسليم المبكِّر TEHOs والتسليم المتأخِّر TLHOs. ويمكن تحقيق ذلك عندما تستوفي قيم RSRP وSINR للخليّة المُخدِّمة والخليّة الهدف الشروط المقابلة لذلك. إنَّ الهدف من آليّة اختيار قيم المُوسِط HM وفق العلاقة (3–14) تأمين ارتباط

تجهيزة المستخدم UE مع الخليّة التي تُخدِّمُهُ حتى لو كانت موجودة ضمن منطقة تغطية الخليّة الهدف حيث يكون هناك إمكانيّة للحصول على أقل ما يمكن من الأحداث PPHOs وTEHOs وTLHOs.

وتحدّد النسبة SINR جودة الوصلة الراديويّة بين تجهيزة المستخدم والخليّة المُخدِّمة. إذا كانت النسبة SINR، خلال عملية الاتصال، أقل من عتبة معينة، فهناك احتماليّة كبيرة لانقطاع الاتصال؛ وخلاف ذلك، سيستمر المستخدم في الاتصال مع الخليّة المُخدِّمة، وأشير سابقاً إلى هذه العتبة بالرمز Θ في العلاقة (3-14). ضمن هذا السياق، وبحُكم التعريف، توصف الوصلة الراديويّة بأنّها جيدة في النظم الحديثة إذا وفقط إذا كانت قيمة SINR أكبر من العتبة Θ في إطار زمني مدته 200 ميلي ثانية، وإلاّ سيكون هناك انقطاع في الاتصال، ونقول عندئذٍ حصل فشل في الوصلة الراديوية RLF [12]. تُعَد أحداث التسليم المُبكِّر TEHOs والتسليم المُتأخِّر TLHOs غير مرغوبة وتسبب فشلاً في الوصلة الراديوية RLF ضمن سياق اتخاذ قرار التسليم، ويقع الحدث من النوع TLHO عندما يحدث فشل في الوصلة الراديويّة بين تجهيزة المستخدم والخليّة المخدّمة قبل بدء اتخاذ قرار التسليم مع الخليّة الهدف. لذلك، يُقال إنّ هناك تسليماً مُتأخِّراً جداً حيث تكون الوصلة الراديويّة بين تجهيزة المستخدم والخلية المُخدِّمة الحالية ضعيفة فلا تكتمل عمليّة التسليم. يقع الحدث TEHO عندما يحصل فشل في الوصلة الراديويّة بين تجهيزة المستخدم والخليّة الهدف قبل اكتمال قرار التسليم مع الخليّة الهدف. لذلك، يُقال إنّ هناك تسليماً مُبكِّراً جداً حيث تكون الوصلة الراديويّة بين تجهيزة المستخدم والخليّة الهدف ضعيفة فلا تكتمل عمليّة التسليم أيضاً. من وجهة النظر هذه، قمنا بتحديد شروط العلاقة (3-14) بحيث يُؤخذ بالحسبان قيمة SINR لكل من الخليّة الهدف والخليّة المُخدِّمة الحاليّة في إجرائيّة اتخاذ قرار التسليم في حساب قيمة HM، يمنع ذلك حدوث كل من الحدثين TEHO وTLHO في وقت واحد دون تعارض.

إنَّ الهدف الرئيس من تقديم العلاقة (3-26) توضيح وجود علاقة بين المُوسِطات HM وTTT. هذا هو محور الفكرة الرئيسية التي جَرَى التركيز عليها في هذا البحث، وتركز هذه الفكرة على طريقة جديدة لتكييف قيم مُوسِطات التحكُّم بالتسليم HCPs من خلال البحث عن مثل هذه العلاقة. يمثل المحور x في الشكل 3-7 محور الزمن، وبضرب المحور الزمني للشكل 3-7 في سرعة تجهيزة المستخدم v، أي السرعة × الزمن، نحصل على المسافة التي تقطعها تجهيزة المستخدم UE بين اللحظة الزمنية t_0 واللحظة t_{HO}. وترتبط هذه المسافة المقطوعة أيضاً بموضع تجهيزة المستخدم UE بالنسبة إلى الخليّة المُخدِّمة والخليّة الهدف في قرار التسليم. ويمثل المحور y في الشكل 3-7 محور الاستطاعة المستقبلة RSRP، التي تتعلق بالمسافة بين تجهيزة المستخدم والمحطّة القاعديّة، كما هو موضح في العلاقتين (3-4) و(3-6). بهذه الطريقة، نفسِّر المقدار v×TTT على أنّه مساوٍ لطول القطعة المستقيمة ||AH|| الذي يمثل ارتفاع شبه المُنحَرِف ABCD في الشكل 3-7. هذا موضّح

على النحو التالي: تُمثِّل النقطة B في الشكل 3–7 اللحظة الزمنية t_0 التي يتحقق عندها شرط متراجحة التسليم وفق العلاقة (3–13) (الفرق بين الاستطاعة المستقبلة من الخلية المخدمة والخلية الهدف diff1 عند اللحظة الزمنية t_0 أكبر من قيمة هامش البطاء، وهذا يشير إلى أنَّ حدث التسليم A3 قد تحقّق لأوّل مرَّة من أجل تجهيزة مستخدم UE يتحرك بسرعة معينة v في بيئة الشبكة. تمثل النقطة D في الشكل 3–7 اللحظة الزمنية t_{HO} التي بقي عندها شرط متراجحة التسليم محققاً وفق العلاقة (3–13)) الفرق بين الاستطاعة المستقبلة من الخليّة المُخدِّمة والخليّة الهدف diff2 عند اللحظة الزمنية t_{HO} أكبر من قيمة هامش البطاء)، وهذا يشير إلى أنّ حدث التسليم A3 قد اكتملت شروطه (بقي مُحقَّقاً) خلال فترة زمنية تساوي الزمن اللازم للقدح TTT بدءاً من اللحظة الزمنية t_0 بالنسبة لنفس تجهيزة المستخدم في الشبكة. هذا يبين كيف توصَّلنا إلى دور كل من v و$v\times TTT$ في العلاقات (3–26) و(3–27) و(3–28). وأما المقداران $\alpha 1$ و$\alpha 2$ فذكرنا سابقاً أنّهما عددان حقيقيّان موجبان بحيث نضع $\alpha 2 > 1$ و$\alpha 1 \geq 1$، وهذا من أجل تحويل المتراجحات $diff2 > HM$ و $diff1 \geq HM$ إلى مساواة لاستنتاج علاقة الترابط المنشودة، وهنا يمكننا أن نضع $diff1 = \alpha 1 \times HM$ و$diff2 = \alpha 2 \times HM$. ففي اللحظة الزمنية t_0، سيكون الفرق diff1 أكبر أو يساوي القيمة HM، بينما في اللحظة الزمنية t_{HO}، سيكون الفرق diff2 أكبر تمامًا من القيمة HM؛ وهكذا نبرّر وضع الشرطان $\alpha 2 > 1$ و$\alpha 1 \geq 1$. في المقابل، من شبه المنحرف ABCD، يمكننا أن نرى أنّ diff1 وdiff2 هما طولا الضلعين المتوازيين، أي القطعتين المستقيمتين ||AB|| و||CD|| على التوالي. أخيراً، يُبرَّر اشتقاق العلاقة (3–26) من قانون مساحة شبه المنحرف ABCD.

تُظهِر العلاقة (3–26) إمكانيّة وجود علاقة بين المُوسِطات HM وTTT، ولكن لم يجرِ تطبيقها بشكل مباشر في هذه الدراسة. بدلاً من ذلك، قمنا باستقراء علاقة مماثلة بين HM وTTT استجابة لمتطلبات النظام للحصول على الحد الأدنى من أحداث تأرجح التسليم PPHO والتسليم المبكِّر TEHO والتسليم المتأخِّر TLHO. يوضّح الملحق أ خطوات الحصول على العلاقة (3–28) باستخدام برنامج الجداول الإلكترونيّة Microsoft Excel. على الرغم من أنّ هذه المنهجيّة تبدو بسيطة للغاية، ، في تطوير آليّة محددة لتعيين قيم TTT، إلا أنّها واعدة وتؤدي إلى نتائج مرغوبة في هذا السياق. علاوة على ذلك، لا تتطلب الطريقة أي خطوات لضبط قيم مُوسِطات التحكُّم بالتسليم HCP وفق الطرائق المقترحة في الأدبيّات. ببساطة، قمنا في البداية بتعيين آليّة تكيُّفيّة لقيمة المُوسِط HM عن طريق العلاقة (3–14)، ومن خلال متطلبات القيمة المناسبة للمُوسِط TTT التي يجب مراعاتها بالنسبة لحالة حركيّة كل تجهيزة مستخدم UE وفق سرعته وقيمة HM المختارة له، لذلك قمنا بتنظيم الجدول 3–1، واستنتجنا وجود علاقة محتملة بين المُوسِطات HM وTTT، كما هو موضح في

العلاقة (3−28). لاحقاً، في قسم النتائج، سوف نعرض منحني تغيُّر كلاً من HM وTTT مع الزمن من أجل مجموعة مستخدمين يتحرّكون بسرعات مختلفة ضمن بيئة الشبكة المفترضة.

5.5.3 تقييم الحل المقترح

تعتمد خوارزميّة اتخاذ قرار التسليم المقترحة في هذه الدراسة قيماً تكيُّفيّة للمُوسِطين HM وTTT لكل تجهيزة مستخدم UE باعتماد عدّة مقاييس لاتخاذ القرار مثل الاستطاعة المستقبلة RSRP والنسبة SINR وسرعة تجهيزة المستخدم V. يجري تضمين جميع مُوسِطات اتخاذ القرار هذه في تقرير القياسات MR الذي يرسل دورياً إلى النظام. تكون قيمة المُوسِط HM لكل تجهيزة مستخدم UE متكيّفة مع كل من RSRP وSINR وفق العلاقة الوضعية (3−14). وتتكيَّف قيمة TTT مع HM التكيُّفي وسرعة تجهيزة المستخدم UE بشكل تناظري مع العلاقة الوضعية (3−28).

تكمن متانة Robustness العلاقة (3−14) في أنّها تحدد بدقة قيم HM المناسبة لكل تجهيزة مستخدم وفق متوسّط زمني للنسبة SINR الخاصة به خلال نافذة زمنية يكون عرضها مساوياً تماماً للمدة الزمنية اللازمة لتحديد احتمال انقطاعيّة قناة الاتصال في النظام. تُحدِّد العلاقة (3−28) أيضاً قيمة الموسط HM المناسبة وفق قيم الاستطاعة المستقبلة RSRPs التي يجري استقبالها من كل من الخليّة المخدّمة الحاليّة والخليّة الهدف، وذلك بمجرد تحرّك تجهيزة المستخدم باتجاه منطقة التغطية للخليّة الهدف وابتعادها عن الخليّة المخدِّمة.

إنّ متانة العلاقة (3−28) واضحة من كونها مُشتقَّة من تحليل إجرائيّة التسليم بطريقة شاملة، ويجري اشتقاقها وفق فرضيّة وجود علاقة بين قيم TTT وHM، مع أخذ مُوسِط السرعة بالحسبان في مثل هذه العلاقة. عموماً، حتى مع افتراض نموذج أكثر واقعيّة يأخذ بالحسبان ظاهرة الخفوت السريع Fast Fading أو خفوت الظل Shadow Fading لقناة الاتصال فإنَّ فرضيّة شبه المنحرف ABCD تبقى واقعيّة ويمكن ملاحظتها في منحنيات تغيُّرات الاستطاعة المستقبلة RSRP لكل من الخليّة المُخدّمة والخليّة الهدف، وتبقى رؤوس شبه المنحرف تمثل قيماً صحيحة للاستطاعة المستقبلة RSRP من الخليّة الهدف والخليّة المخدّمة الحاليّة، ويبقى ارتفاع شبه المنحرف ABCD أيضاً متناسباً مع المسافة v×TTT؛ وتبقى أطوال قاعدتي شبه المنحرف ABCD (الصغيرة ||AB|| والكبيرة ||CD||) تعبر عن مضاعفات (α1 و α2) للقيمة HM في كلتا اللحظتين الزمنيتين t_0 وt_{HO}.

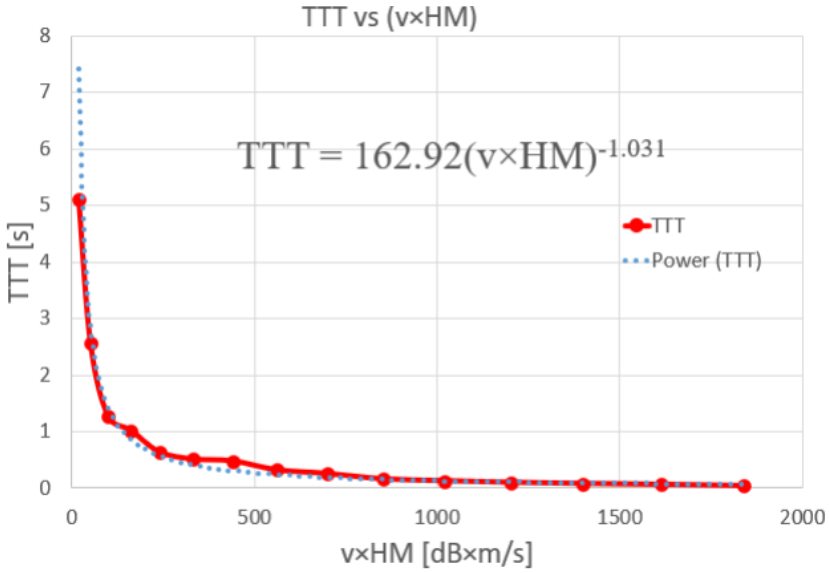
إنَّ هدفنا من الإشارة إلى شبه المنحرف ABCD إظهار إمكانيّة وجود علاقة بين HM وTTT والسرعة وبقيّة مقاييس النظام. وبالتالي بوجود مثل هذه العلاقة نسعى إلى تطوير خوارزميّة SON أكثر واقعيّة لأمثلة إجرائيّة التسليم في النظام؛ فضلاً عن ذلك، تتوافق العلاقة (3−28) تماماً مع التحليل في [82، الفقرة 5.3] فيما يتعلق بالعلاقة بين TTT وسرعة تجهيزة المستخدم UE. مع أنّ الحل المقترح في [82] يتضمن اختيار قيم TTT مع افتراض وجود عتبة محددة مسبقاً لنسبة أحداث

فشل التسليم RLFHOs ، فإنّ العلاقة (3–28)، في هذا البحث، تستغني عن أي فرضيّة لعتبة الأداء من هذا النوع. وتأخذ العلاقة (3–14) بالحسبان العلاقة بين TTT وv بما في ذلك HM، بينما في [82]، اقترحت علاقة بين TTT والسرعة فقط. وفي قسم النتائج، سنجد أنّ كلاً من نسب الأحداث PPHOs وRLFHOs ستكون قريبة جداً من الصفر باستخدام العلاقتين (3–14) و (3–28)، والأداء الناتج يتفوَّق على أداء الخوارزميّة المقترحة في [82]، بل وأفضل من خوارزميّات SON أُخرى في الأدبيّات ذات الصلة مثل [111، 112، 113].

ويمكن الحصول على علاقة أُخرى لاختيار قيمة تكيّفيّة للمُوسِط TTT بناءً على كل من قيمة المُوسِط HM والسرعة. من خلال إعادة ترتيب البيانات في العمود 3 من الجدول 1 (أي بيانات v×HM) من الأكبر إلى الأصغر، واستخدام نفس الترتيب لبيانات TTT (من الأصغر إلى الأكبر)، ثم استنتاج نموذج انحدار غير خطي آخر باستخدام برنامج الجداول الإلكترونيّة Microsoft Excel، موضَّح في الشكل 3–9 الذي يشبه بدوره إلى حد ما المنحني الموضح في الشكل 3–8 ويمكن من خلال هذه المنحني الجديد أن نستنتج العلاقة (3–29) التي تشبه العلاقة (3–28).

$$\mathrm{TTT_{adaptive}} = 162.92\left(\mathrm{v} \times \mathrm{HM_{adaptive}}\right)^{-1.031} \qquad (29-3)$$

تُعَد العلاقة (3–29) مُكافئة للعلاقة (3–28) ويمكن استخدامها أيضاً لتحديد القيمة التكيُّفيّة للمُوسِط TTT لكل تجهيزة مستخدم UE. وتجدر الملاحظة هنا أنّه إذا قمنا بتقريب الأس 1.031- إلى 1- في العلاقة (3–29)، فإنّنا نحصل على الجداء $\mathrm{v} \times \mathrm{HM_{adaptive}} \times \mathrm{TTT_{adaptive}}$ ليكون ثابتاً كما لو كان يُمثِّل مساحة ABCD ثابتة، ومتشابهة بشكل مكافئ للعلاقة (3–13).



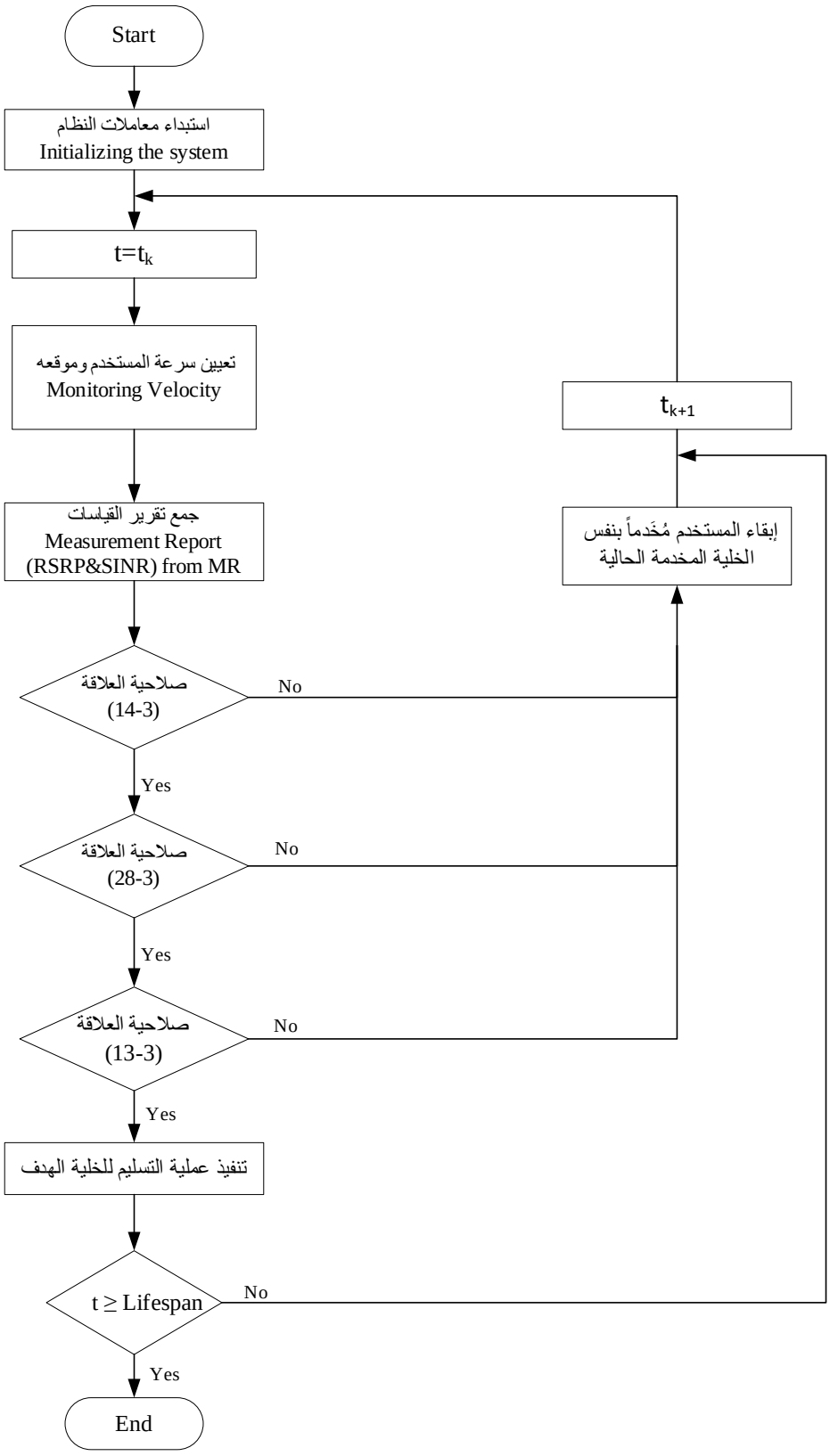
الشكل 3–9: نموذج انحدار غير خطي كمقترح آخر لحساب قيمة TTT تكيّفيّاً بدلالة (v × HM) (الباحث).

6.5.3 الإطار العام للخوارزميَّة المقترحة

يوصِّف الشكل 3-10 المخطَّط التدفُّقي لخوارزميَّة SON التكيُّفية المقترحة لأمثلة مُوسِطات التحكُّم بالتسليم HCPs. وفق هذه الخوارزميّة، يجري تسليم المستخدم باعتماد آليّة الحدث A3 في معيار 3GPP إذا وفقط إذا كانت شدة استطاعة الإشارة المستقبلة RSRP من الخليّة الهدف أكبر منها للخليّة المخدّمة الحاليّة، وإذا كان متوسط SINR، خلال نافذة زمنية W، المحسوبة بالنسبة إلى كل من هاتين الخليتين، كافياً أي أكبر من عتبة محدّدة Θ لانقطاع قناة الاتصال. ويجري تحديد قيم HM وTTT وفق هذا المعيار وتكييفها تماماً مع الحالة الحركيّة لتجهيزة المستخدم UE. بعد ذلك، بناءً على هذه القيم المعدّلة دورياً أثناء الحركيّة، يُتَّخَذ قرار تنفيذ التسليم. في حالة اكتمال إجراء التسليم، يجري تخديم المستخدم من الخليّة الهدف؛ خلاف ذلك، تستمر الخليّة المخدِّمة الحاليّة في تخديمه أثناء حركيّته ضمن الشبكة HetNet. لا تتطلب الخوارزميّة المقترحة تعريف أي عتبات أداء للتحكُّم في أحداث التسليم المبكِّر TEHO أو التسليم المتأخِّر TLHO أو تأرجح التسليم PPHO، كما هو الحال في معظم الأدبيّات ذات الصلة. علاوة على ذلك، تُقلّل الخوارزميّة المقترحة بشكل كبير من وقوع تلك الأحداث، كما سنرى في قسم النتائج.

تُعَد الخوارزميّة المُقترحة في هذا الفصل جديدة Novel وذاتيّة التنظيم SON وتتفق مع بُنية الشبكة ذاتيّة التنظيم الموزّعة، تقوم هذه الخوارزميّة باختيار قيم مُوسِطات التحكُّم بالتسليم HCPs بشكل تكيُّفي وفق سرعة تجهيزة المستخدم والمقاييس RSRP وSINR. يعتمد اختيار القيمة التكيُّفيّة للمُوسِط HM (العلاقة (3-14)) على موضع تجهيزة المستخدم بمعنى أنّ كلّاً من RSRP وSINR يُحسَبَان من خلال مراعاة المسافات بين تجهيزات المستخدمين والمحطّات القاعديّة. في حين يعتمد اختيار TTT (العلاقتين (3-28) و(3-29)) على سرعة تجهيزة المستخدم UE وقيمة HM التكيُّفيّة. يجري تجهيز كينونة خوارزميّة SON الموزَّعة في كل محطّة قاعديّة eNB في الشبكة لجمع المعطيات المطلوبة وأمثلة قيم المُوسِطات HCPs دورياً لكل تجهيزة مستخدِم وفق حالته الحركيّة الخاصّة به. وتحدّد طبيعة الحركيّة للمستخدمين عبر المحطّة القاعديّة للخليّة الفمتويّة FBS أو المحطّة القاعديّة للخليّة الماكرويّة MBS. تستخدم هذه الخلايا الواجهة X2 للاتصال فيما بينها خلال إجرائيّة اتخاذ قرار التسليم [10]. وتدعم هذا الإجرائيّة بواسطة الواجهة X2 من خلال تبادل تقارير التشغيل وإعدادات المُوسِطات وحالات فشل الوصلة الراديويّة RLF. تقوم خوارزميّة SON الموزّعة المقترحة هنا بكل محطّة قاعديّة سواء أكانت FBS أم MBS بجمع المعلومات اللازمة لاتخاذ قرار التسليم لأمثلة قيم HM وTTT باستخدام العلاقتين (3-14) و(3-28) أو العلاقة (3-29). وتنفذ إجرائيّة التسليم عندما يتحرك المستخدم من منطقة تغطية الخليّة المخدِّمة باتجاه منطقة تغطية الخليّة الهدف المجاورة، تقوم الخليّة المخدِّمة باتخاذ قرار التسليم لتجهيزة المستخدم UE إلى الخليّة الهدف المُرشَّحة اعتماداً على

تقرير القياسات MR الذي تُرسِلُهُ تجهيزة المستخدم UE دورياً إلى الخليّة المخدّمة قبل اتخاذ قرار التسليم.



الشكل 3–10: المخطط التدفُّقي للخوارزميّة المقترحة (الباحث).

6.3 نتائج المحاكاة

يوضّح الجدول 3−2 مُوسِطات إعداد الشبكة HetNet في النظام LTE-A المستخدمة في المحاكاة. جَرَت محاكاة الخوارزميّة المقترحة وتقييم الأداء الناتج لستّة سيناريوهات. من أجل كل سيناريو، استخدمنا قيماً مختلفة للمُوسِطات X عدد المستخدمين وN عدد الخلايا الفمتويّة في كامل الشبكة وزمن المحاكاة الكلي ST (زمن حركيّة تجهيزات المستخدمين ضمن الشبكة)، بحيث يُفتَرَض في السيناريوهات الخمسة الأولى أنّ الزمن الحرج $T_{criti} = 6\ s$ (أسوأ حالة فيما يتعلق بمسألة PPHO) كما في [82]، وللسيناريو السادس، نفترض أنّ $T_{criti} = 2\ s$ كما في [111،112،113]. في السيناريوهات الخمسة الأولى، قمنا بمقارنة أداء الخوارزميّة المقترحة بأداء الخوارزميّة في [82] وبالطريقة التقليديّة التي تعتمد الضبط الثابت لقيم المُوسِطات HCPs، وقمنا بتشغيل الخوارزميات في [111،112،113] من أجل السيناريو السادس. والمؤلفون في [82] فقط تناولوا قضية قيم HM وTTT التكيُّفيّة (دون خطوات من قيمة صُغرى إلى قيمة عُظمى) في النظام LTE-A HetNet، بينما درست بقية الأدبيّات مسألة التوليف الآلي Auto−tunning لقيم HM وTTT وفق خطوات محددة مسبقاً دون دليل على سبب استخدام هذه الخطوات وقيمها. ويختلف مفهوم التكيُّف Adapting اختلافاً جوهريّاً عن مفهوم التوليف الآلي. وتعني تقنية التكيُّف بطريقة ما تحديد قيم المُوسِطات HCPs بما يتناسب مع قيم مقاييس اتخاذ القرار(قيم RSRPs وSINRs والسرعة) باستخدام توابع محددة بشروط متينة. بينما يقوم التوليف الآلي ببساطة بإعادة تعيين قيم المُوسِطات HCPs وفق خطوات Steps لم يجرِ تحديدها بشكل صارم. لمقارنة الأداء بالحالات التقليديّة لإعدادات المُوسِطات HCPs (قيم ثابتة للمُوسِطات HCPs)، نفترض البيانات الواردة في الجدول 3−3 كونها البيانات المستخدمة فيما لو جَرَى استخدام قيم ثابتة لكل من هامش البطاء HM والزمن اللازم للقدح TTT وتكون مُوحَّدة لكل تجهيزات المستخدمين UEs ضمن الشبكة.

الجدول 3—2: موسِطات إعداد الشبكة المستخدمة في المحاكاة [82،111،120].

القيمة (الإعداد)	موسطات محاكاة النظام
19 خليّة على رؤوس مُسدَّسين في مساحة 6 كم×6 كم	توزُّع محطّات الخلايا الماكرويّة
41 أو 91 خليّة منتشرة بشكل عشوائي في مساحة 9 كم×9 كم	N عدد محطّات الخلايا الفمتويّة
2 [GHz]	التردد الحامل
10 [MHz]	عرض المجال الترددي المتاح
46 [dBm]	استطاعة إرسال الخليّة الماكرويّة
24 [dBm]	استطاعة إرسال الخليّة الفمتويّة
10 [dBi]	ربح (كسب) هوائي إرسال المحطّة الماكرويّة
10 [dBi]	ربح (كسب) هوائي إرسال المحطّة الفمتويّة
10 [dBi]	ربح (كسب) هوائي استقبال تجهيزة المستخدم UE
Zero Mean and 5 dB Standard Deviation,	موسطات ظاهرة خفوت الظل
تحرك 1000 أو 2000 أو 3000 مستخدم بشكل عشوائي	X عدد تجهيزات المستخدمين UE_S في الشبكة
ضمن المجال من 30 إلى 300 كم / ساعة يجري اختيارها عشوائياً لكل تجهيزة مستخدم	قيم السرع المفترَضة لتجهيزات المستخدمين UE_S
ST= 150, 250 [s] ⇔ Lifespan =15000, 25000 rounds	زمن المحاكاة Simulation Time (ST)، Lifespan
TTI= Δt =10 [ms]	Transmission Time Interval (TTI), i.e., Simulation Step Time $\Delta t=t_k-t_{k-1}$, k=1,2,3,4, …, Lifespan
200 [ms]	عرض النافذة الزمنية W
-35 [dB]	عتبة انقطاع قناة الاتصال channel outage (Θ)
2, 6 [s]	الزمن الحرج لتأرجح التسليم (T_{crit})
50 [ms]	زمن تنفيذ التسليم
12 Km×12 Km	المساحة الجغرافية المفترَضة للشبكة
مُتكيّف أو ثابت أو مضبوط وفق عتبات	هامش البطاء HM
مُتكيّف أو ثابت أو مضبوط وفق عتبات	الزمن اللازم للقدح TTT
توزّع عشوائي	المواضع الأوليّة للمستخدمين (x_0,y_0)
مختارة بشكل عشوائي ضمن المجال $[0,2\pi]$	الاتجاهات المكانية الأولية للمستخدمين θ_0
$x(t_k)= x_0+v\times\cos(\theta_0)\times t_k$ $y(t_k)= y_0+v\times\sin(\theta_0)\times t_k$	معادلات نموذج الحركيّة المفترَضة لكل تجهيزة مستخدم $(x(t_k),y(t_k))$

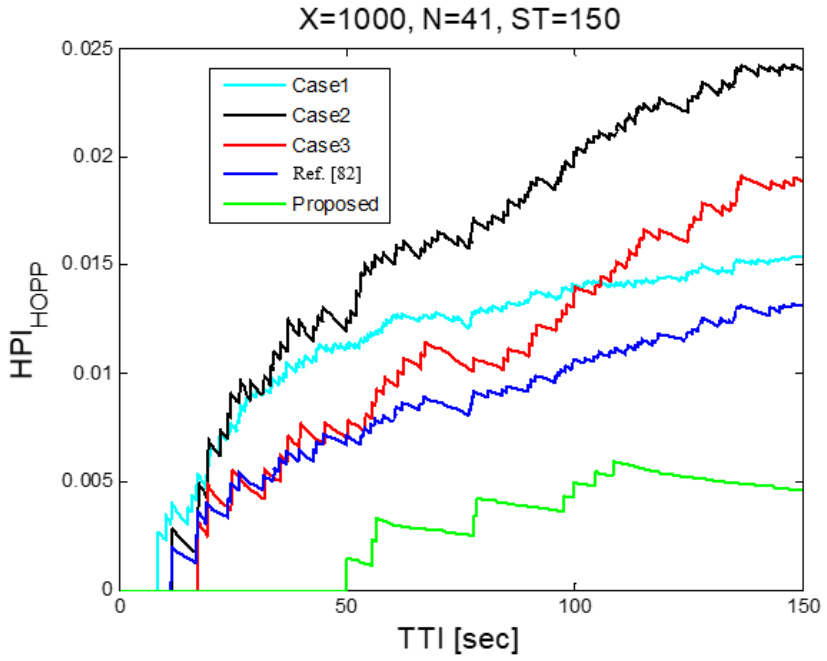
الجدول 3—3: الحالات التقليديّة الشائعة للإعداد الثابت للمُوسِطات HCPs (الباحث).

رقم الحالة	HM [dB]	TTT [ms]
1	2	100
2	4	256
3	6	480

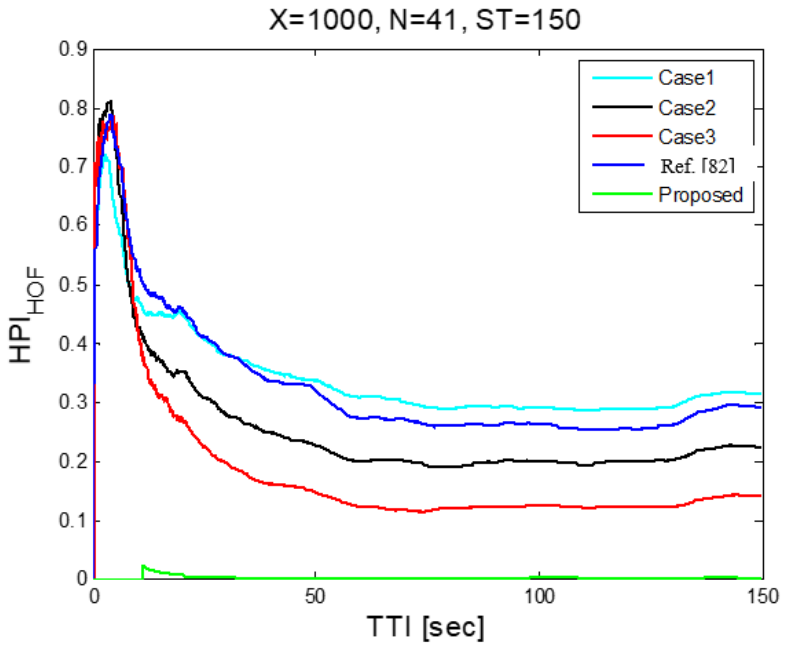
استندنا إلى [82، الجدول 3–1] في تحديد معظم موسطات محاكاة النظام، بما في ذلك عرض المجال الترددي للنظام LTE-A HetNet المفترض في بحثنا، ودرس الباحثون في [10] سيناريو نموذج النظام نفسه. تجدر الإشارة هنا إلى أنّه مع أنّ سيناريو الشبكات غير المتجانسة HetNets يجعل إدارة الموارد الراديويّة في الشبكات المكوّنة من خلايا ماكرويّة وخلاية فمتويّة أحد التحديات الرئيسية، يُعَد هذا جانباً آخر في تصميم النظام الكلي. ومع ذلك، تشترك الخلايا الماكرويّة والخلايا الصغيرة في الشبكة HetNets في الموارد الراديويّة المتاحة، كما في طريقة النشر المعروضة في الفقرة 1.6.1 (نشر الخلايا الصغيرة داخل التردد Intra-FD)؛ ما يعني أنّها تشترك في عرض المجال الترددي المتاح، من 1.25MHz إلى 20MHz، كما في الإصدار الثامن للنظام LTE [121، ص 24]. وقيمة عرض المجال الترددي 10MHz مناسبة لسيناريو النظام LTE-A HetNets. ويمكن مشاركة هذا المجال الترددي بين جميع الخلايا في طوبولوجيا الشبكة [120]. من المهم الإشارة هنا إلى أنّ هذا التشارك للموارد المتاحة بين الخلايا الماكرويّة والخلايا الصغيرة قد يسبب تداخل الطبقات التصالبي(Cross-Layer Interference (CroLI ، وتداخل الطبقات المشترك Co-Layer Interference (CoLI). يُعالَج موضوع التداخل في الفصلين الرابع والخامس. لتبسيط نموذج المحاكاة، نشير إلى أنّ نموذج المحاكاة يأخذ في الحسبان استطاعة التداخل من خلال حساب النسبة SINR لكل تجهيزة مستخدم في أي موضع وفي أي لحظة جديدين (العلاقة (3–7)). بالمقابل، في نموذج الشبكة 5G HetNets، تعمل الخلايا الماكرويّة والخلايا الصغيرة على مجالات ترددية مختلفة فقط لتجنُّب التداخل [112]، ولكن في النظام LTE-A HetNet المفترض في هذا البحث، وكما في [82، الجدول 3–1]، تتشارك الخلايا الماكرويّة والصغيرة نفس الموارد الراديوية المتاحة. ولكن، يمكن الجدل هنا بضرورة استخدام عرض مجال كبير من أجل الخلايا الصغيرة، ولكن هذا صحيح فقط إذا جرت محاكاة خوارزميّة اتخاذ قرار التسليم لمنظومة 5G، حيث ترددات الموجات الحاملة الراديويّة العالية (على سبيل المثال، من المجال Ka) وعرض المجال الترددي العالي جداً الذي قد يصل إلى 1GHz. ومع ذلك، يجري في هذا البحث تقييم خوارزميّة اتخاذ قرار التسليم المقترحة من أجل نموذج شبكة غير متجانسة HetNets في النظام LTE-A، كما فعل المؤلفون في [82]، حيث يجري تمييز الخلايا الماكرويّة من الخلايا الفمتويّة باستطاعة الإرسال وبالتالي منطقة التغطية.

1.6.3 السيناريو الأول $(X = 1000 ، N = 41 ، ST = 150 ، T_{crit} = 6)$

جَرَت المحاكاة في هذا السيناريو من أجل 1000 تجهيزة مستخدم UE تتحرك بسرعات مختلفة خلال زمن محاكاة 150 ثانية، مع الأخذ في الحسبان 41 خليّة فمتويّة، يوضّح الشكل 3–11 معدّل وقوع أحداث تأرجح التسليم PPHO بالنسبة إلى العدد الكُلّي لأحداث التسليم المنفَّذة. ويوضّح الشكل 3–12 معدّل وقوع أحداث فشل التسليم RLFHOs أيضاً بالنسبة إلى العدد الكُلّي لأحداث التسليم المنفَّذة.



الشكل 3–11: نتائج المؤشِّر $HPI_{HOPP}(t)$ للسيناريو الأول (الباحث).



الشكل 3–12: نتائج المؤشِّر $HPI_{HOF}(t)$ للسيناريو الأول (الباحث).

يوضّح الشكلان 3–11 و3–12 أنّ أداء الخوارزميّة المقترحة أفضل بكثير من أداء الطريقة التقليديّة التي تستخدم قيماً ثابتة لكل من HM وTTT، وكذلك أفضل بكثير من أداء الخوارزميّة المقترحة في [82]. من حيث المتوسط الزمني للنسب $HPI_{HOPP}(t)$ و $HPI_{HOF}(t)$، يكون للأحداث PPHOs وRLFHOs معدّلات 2 و3 لكل ألف عمليّة تسليم منفذة، على التوالي.

بتشغيل الخوارزميّة المقترحة في [82]، حصلنا على معدّل 33% للمؤشِّر $HPI_{HOF}(t)$ و1% للمؤشِّر $HPI_{HOPP}(t)$. يُلاحَظ من الشكل 3–12 أنّ هناك بعض الحالات، من أجل الخوارزميّة التقليدّية التي تعتمد الضبط الثابت لقيم المُوسِطات، يكون فيها الأداء من حيث المناعة ضد أحداث RLFHOs أفضل من أداء الخوارزميّة المقترحة في [82]. هذه النتيجة طبيعية لأنّ الخوارزميّة المقترحة في [82] محدودة بعتبة RLFHO مُحدَّدة مسبقاً من قبل الباحث، ولا يوجد معيار عام قدَّمه الباحث لتحديد هذه العتبة بطريقة عامة. وهذا يعني إمكانيّة وجود حالات أفضل عند الضبط الثابت لقيم المُوسِطات HCPs مقارنة مع الخوارزميّة المقترحة في [82]. ونجد نتيجة مماثلة لهذا مع بقيّة السيناريوهات المعروضة لاحقاً.

يوضح الجدول 3–4 ملخّصاً لنتائج السيناريو الأوّل، إذ حُسِبَ المتوسّط الزمني للمؤشِّرين $HPI_{HOPP}(t)$ و$HPI_{HOF}(t)$ خلال كامل زمن المحاكاة. ويمكن ملاحظة الأداء العالي للخوارزمية المقترحة من حيث الحصول على عدد قليل جداً من الأحداث PPHOs وRLF HOs. بالنسبة لـ 1000 عمليّة تسليم منفذة خلال 150 ثانية، لا يوجد سوى اثنين فقط من أحداث PPHOs، وهناك ثلاثة أحداث RLF فقط من خلال تشغيل الخوارزمية المقترحة، بينما هناك 10 و13 و20 و10 من الأحداث PPHOs و330 و340 و260 و160 من الأحداث RLFHOs ناتجة عند تشغيل الخوارزميّة المقترحة في [82] والحالات التقليديّة الأولى والثانية والثالثة على التوالي.

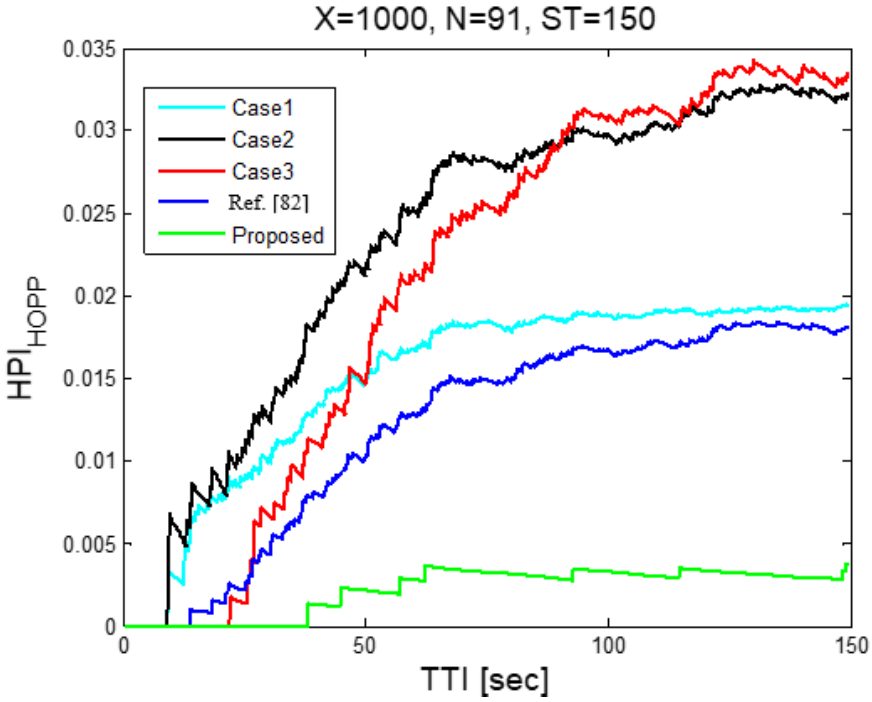
الجدول 3—4: المتوسط الزمني للمؤشرين $HPI_{HOPP}(t)$ و$HPI_{HOF}(t)$ للسيناريو الأول (الباحث).

	الخوارزميّة المقترحة	خوارزميّة المرجع [82]	الحالة 1 من الجدول 3–3	الحالة 2 من الجدول 3–3	الحالة 3 من الجدول 3–3
$\underset{t\in[0,ST]}{mean}(HPI_{HOPP}(t))$	0.002	0.01	0.013	0.02	0.01
$\underset{t\in[0,ST]}{mean}(HPI_{HOF}(t))$	0.003	0.33	0.34	0.26	0.16

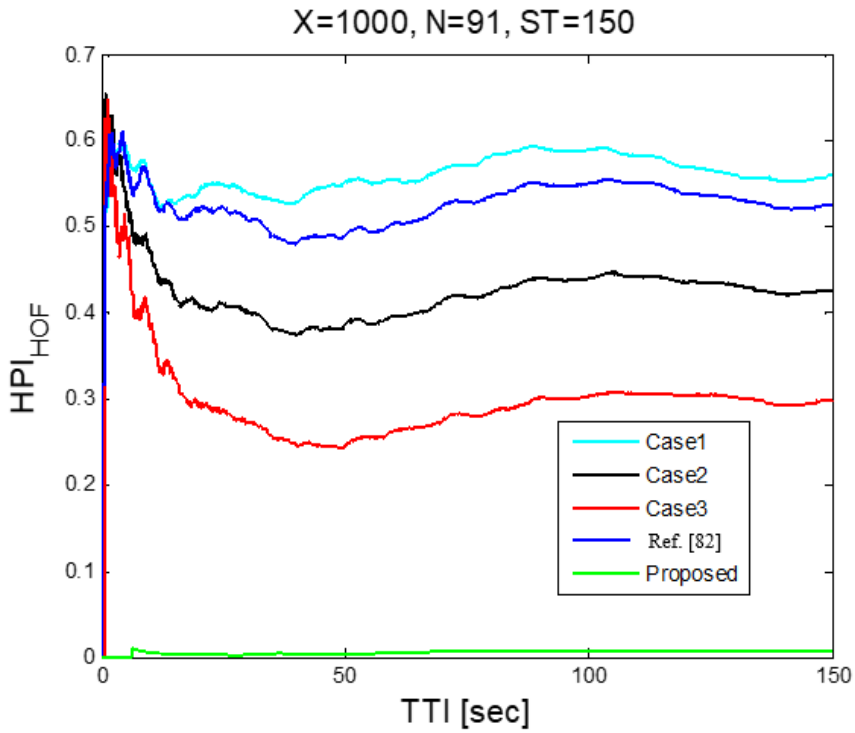
2.6.3 السيناريو الثاني $(X = 1000 ، N = 91 ، ST = 150 ، T_{crit} = 6)$

أُجريت المحاكاة في هذا السيناريو من أجل 1000 تجهيزة مستخدم UE تتحرك بسرعات مختلفة خلال 150 ثانية، مع الأخذ بالحسبان 91 خليّة صغيرة (توزُّع أكثر كثافة للخلايا الفمتويّة

مقارنة بالسيناريو الأول)، يوضّح الشكل 3–13 المنحنى المتغير مع الزمن لمعدّل وقوع الأحداث PPHOs، بينما يوضّح الشكل 3–14 منحنى معدّل وقوع الأحداث HOFR.



الشكل 3–13: نتائج المؤشِّر $\mathbf{HPI_{HOPP}(t)}$ للسيناريو الثاني (الباحث).



الشكل 3–14: نتائج المؤشِّر $\mathbf{HPI_{HOF}(t)}$ للسيناريو الثاني (الباحث).

يُظهِر الشكلان 3–13 و3–14 مرة أُخرى الأداء العالي للخوارزميّة المقترحة. يُلاحَظ حدوث حالات PPHOs وRLFHOs بمعدّلي اثنين وخمسة في الألف على التوالي. على الرغم من زيادة عدد الخلايا الفمتويّة في الشبكة HetNet من 41 إلى 91 لنفس العدد من تجهيزات المستخدمين UEs خلال نفس زمن المحاكاة مقارنة مع السيناريو الأول. لذلك، نستنتج أنّه حتى بالنسبة لعدد أكبر من الخلايا الفمتويّة؛ ما يعني بشكل طبيعي المزيد من الأحداث PPHOs، فإنّ الخوارزميّة المقترحة تكون متينة ضد كل من أحداث تأرجح التسليم PPHOs وأحداث فشل التسليم RLFHOs.

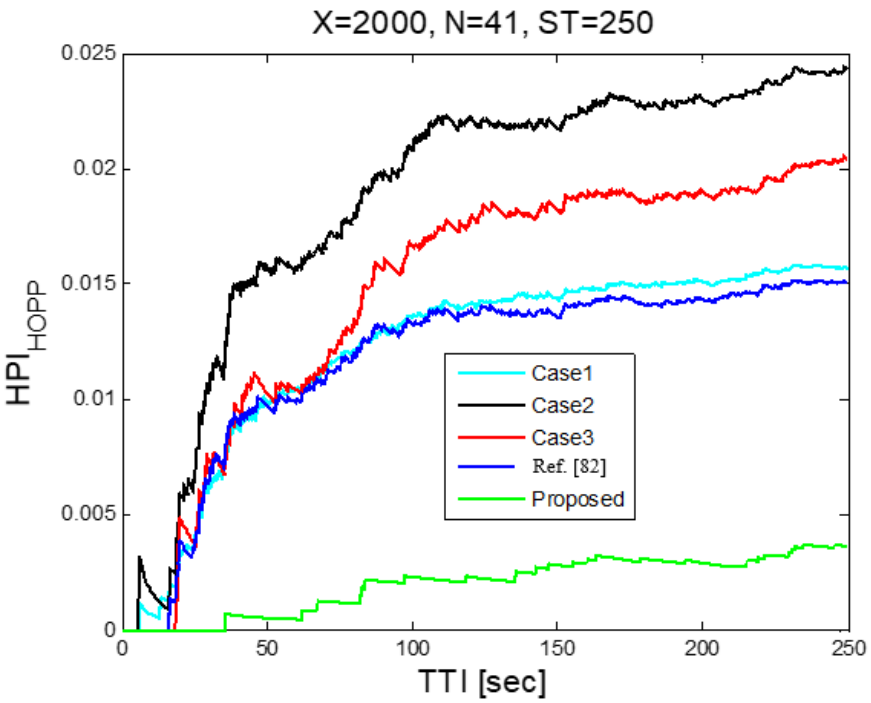
يلخِّص الجدول 3–5 نتائج السيناريو الثاني؛ إذ حُسِبَ المتوسّط الزمني للمؤشّرين $HPI_{HOPP}(t)$ و$HPI_{HOF}(t)$ خلال كامل زمن المحاكاة، ويمكن هنا ملاحظة الأداء العالي للخوارزميّة المقترحة بوضوح من حيث عدد قليل جدّاً من الأحداث PPHOs وRLFHOs. من أجل 1000 عمليّة تسليم منفذة خلال 150 ثانية حصلنا على اثنين فقط من أحداث PPHOs، وخمسة أحداث RLFHOs عند تشغيل الخوارزميّة المقترحة، بينما كانت 12 و15 و23 و21 حدثاً PPHOs و525 و561 و425 و298 حدثاً RLFHOs في الخوارزميّة المقترحة في [82] والحالات التقليديّة الأولى والثانية والثالثة على التوالي.

الجدول 3—5: المتوسط الزمني للمؤشرين $HPI_{HOPP}(t)$ و$HPI_{HOF}(t)$ للسيناريو الثاني (الباحث).

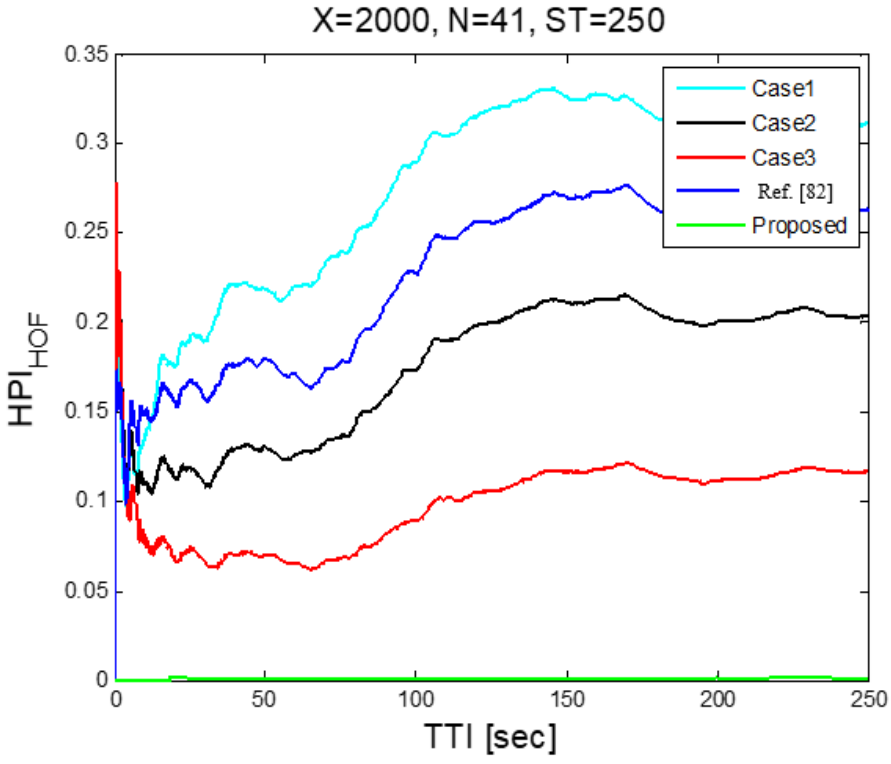
	الخوارزميّة المقترحة	خوارزميّة المرجع [82]	الحالة 1 من الجدول 3–3	الحالة 2 من الجدول 3–3	الحالة 3 من الجدول 3–3
$\underset{t\in[0,ST]}{mean}(HPI_{HOPP}(t))$	0.002	0.012	0.015	0.023	0.021
$\underset{t\in[0,ST]}{mean}(HPI_{HOF}(t))$	0.005	0.525	0.561	0.425	0.298

3.6.3 السيناريو الثالث $(X = 2000 ، N = 41 ، ST = 250 ، T_{crit} = 6)$

يوضّح الشكلان 3–15 و3–16 المنحنيات المتغيرة مع الزمن لمعدّل وقوع الأحداث PPHOs وRLFHOs، على غرار الأشكال المقابلة في السيناريوهين الأول والثاني. هنا، جرى في هذا السيناريو زيادة عدد تجهيزات المستخدمين UEs وجعلها تتحرك خلال زمن محاكاة ST أطول مقارنة مع السيناريوهات السابقة. مرة أخرى، يُلاحَظ من الشكلين 3–15 و3–16 متانة الخوارزميّة المقترحة من حيث مناعتها ضد أحداث فشل التسليم وتأرجحه. جرى الحصول على هذ النتيجة على الرغم من تضاعف عدد المستخدمين مقارنة بالسيناريوهات السابقة، وقد تضاعف زمن المحاكاة تقريباً. هذا يعني أنّ الخوارزميّة المقترحة تحافظ على نفس الأداء.



الشكل 3–15: نتائج المؤشِّر $\mathbf{HPI_{HOPP}(t)}$ للسيناريو الثالث (الباحث).



الشكل 3–16: نتائج المؤشِّر $\mathbf{HPI_{HOF}(t)}$ للسيناريو الثالث (الباحث).

يوضّح الجدول 3–6 ملخصاً لنتائج السيناريو الثالث، ويمكن ملاحظة الأداء العالي للخوارزميّة المقترحة من حيث وقوع عدد قليل جداً من الأحداث PPHOs وRLFHOs. يُلاحَظ هنا، من أجل 10000 عمليّة منفذة في الشبكة خلال 250 ثانية، وقوع 20 حدثاً من النمط PPHOs، وستة أحداث

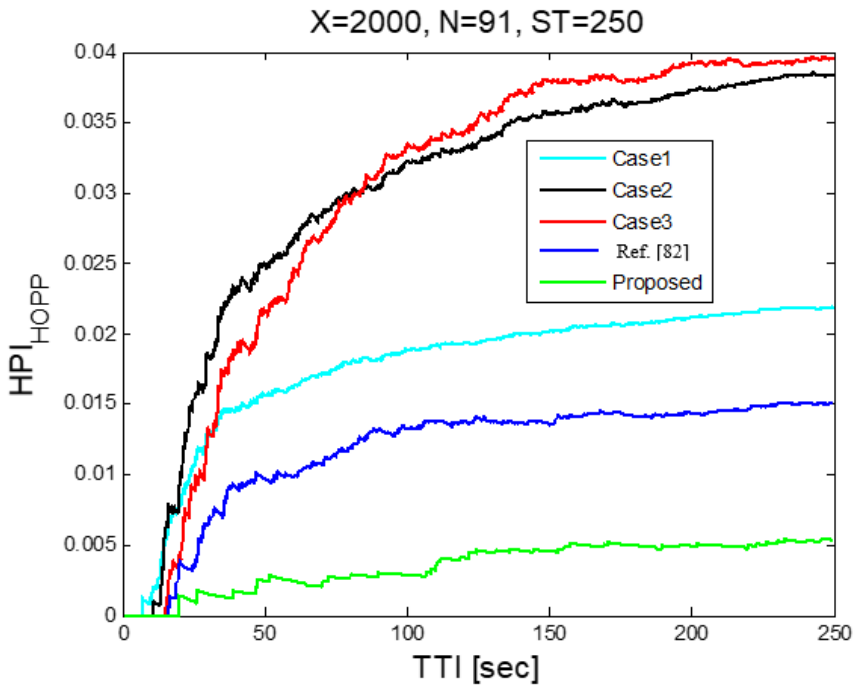
فقط من النمط RLFHO عند تشغيل الخوارزميّة المقترحة، بينما حصلنا على 120 و120 و190 و150 حدثاً من النمط PPHOs و2500، 2700، 1800، 980 حدثاً من النمط RLFHO في الخوارزميّة المقترحة في [82] والحالات التقليديّة الأولى والثانية والثالثة على التوالي.

الجدول 3—6: المتوسط الزمني للمؤشرين $HPI_{HOPP}(t)$ و$HPI_{HOF}(t)$ للسيناريو الثالث (الباحث).

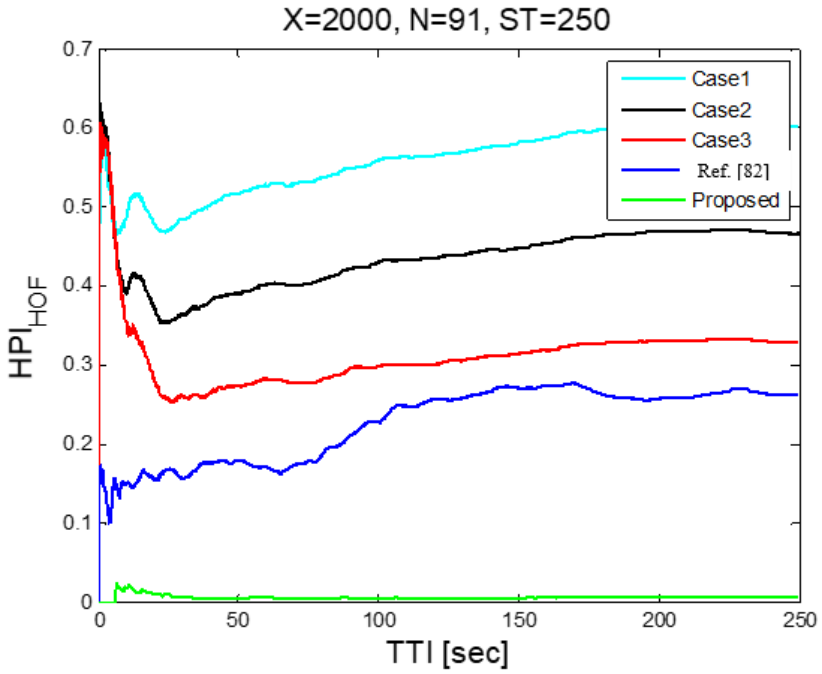
	الخوارزميّة المقترحة	خوارزميّة المرجع [82]	الحالة 1 من الجدول 3-3	الحالة 2 من الجدول 3-3	الحالة 3 من الجدول 3-3
$\underset{t\in[0,ST]}{mean}(HPI_{HOPP}(t))$	0.002	0.012	0.012	0.019	0.015
$\underset{t\in[0,ST]}{mean}(HPI_{HOF}(t))$	0.0006	0.25	0.27	0.18	0.098

4.6.3 السيناريو الرابع $(X = 2000 ، N = 91 ، ST = 250 ، T_{crit} = 6)$

نفترض في هذا السيناريو نفس الإعدادات كما في السيناريو الثالث، ولكن مع نشر عدد أكبر من الخلايا القمتويّة. نلاحظ أنّ الخوارزميّة المقترحة تحافظ على أفضل أداء بشكل ملحوظ، كما هو موضح في الشكلين 3-17 و3-18.



الشكل 3-17: نتائج المؤشِّر $HPI_{HOPP}(t)$ للسيناريو الرابع (الباحث).



الشكل 3–18: نتائج المؤشِّر $\mathbf{HPI_{HOF}(t)}$ للسيناريو الرابع (الباحث).

يؤكِّد الجدول 3–7 مرة أخرى متانة الخوارزميّة المقترحة في البحث مقارنة بإجرائيّة الضبط الثابت لقيم الموسطات HCPs والخوارزميّة المقترحة في [82]. هذا يعني أنّ أداء الخوارزميّة المقترحة في البحث لا يتأثر بزيادة عدد المستخدمين ولا بزيادة عدد الخلايا الفمتويّة، وحوفِظَ على هذا الأداء حتى مع حركيّة تجهيزات المستخدمين لفترة زمنية أطول.

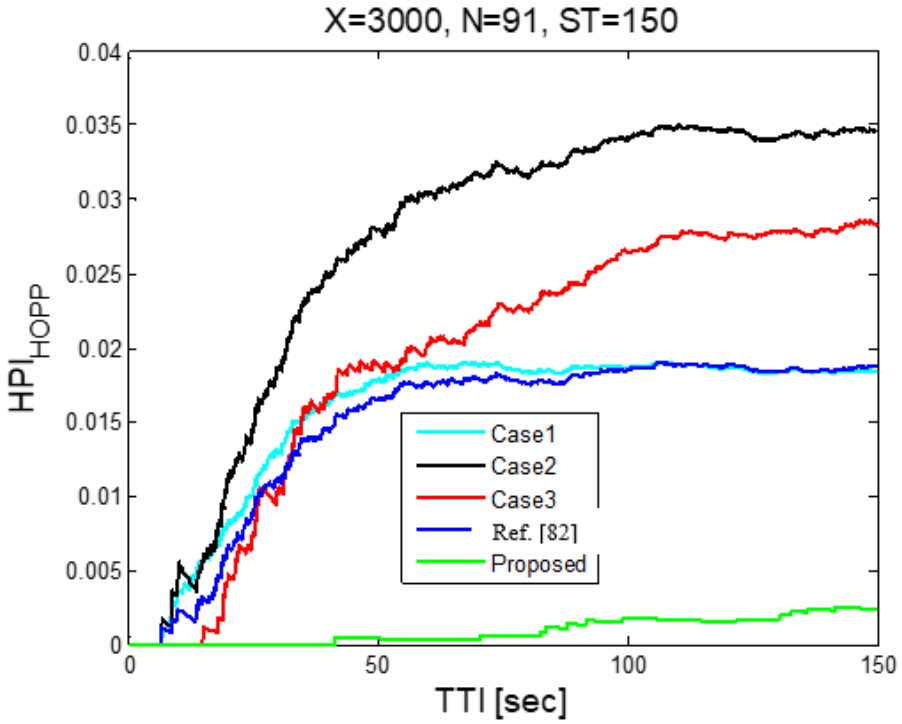
الجدول 3—7: المتوسط الزمني للمؤشرين $\mathbf{HPI_{HOPP}(t)}$ و $\mathbf{HPI_{HOF}(t)}$ للسيناريو الرابع (الباحث).

	الخوارزميّة المقترحة	خوارزميّة المرجع [82]	الحالة 1 من الجدول 3–3	الحالة 2 من الجدول 3–3	الحالة 3 من الجدول 3–3
$\underset{t\in[0,ST]}{\text{mean}}(HPI_{HOPP}(t))$	0.003	0.012	0.017	0.03	0.03
$\underset{t\in[0,ST]}{\text{mean}}(HPI_{HOF}(t))$	0.0006	0.23	0.56	0.44	0.31

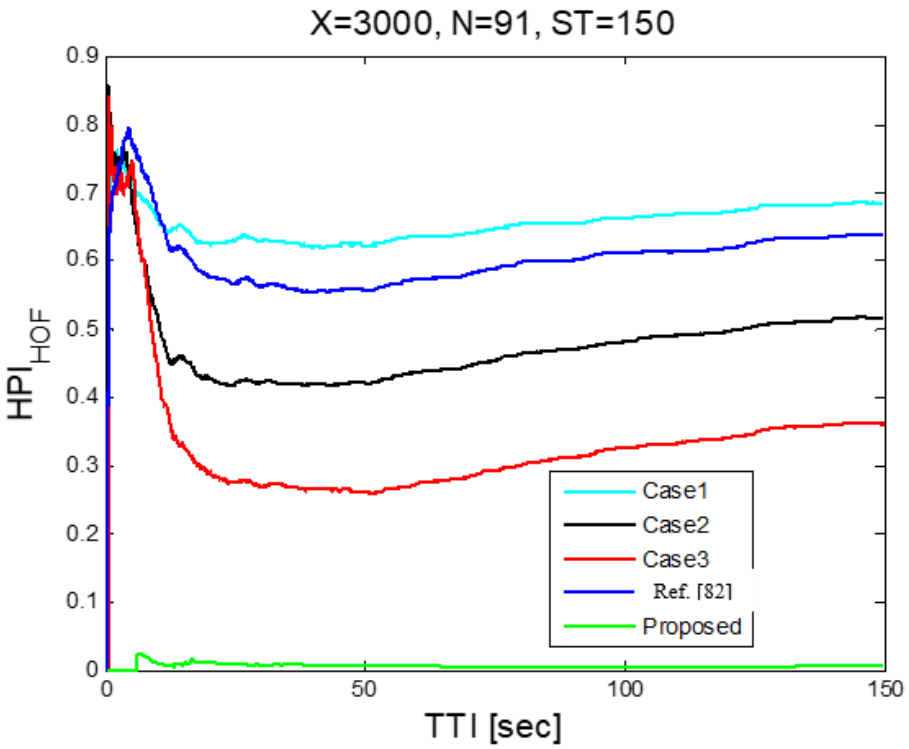
5.6.3 السيناريو الخامس $(X = 3000 ، N = 91 ، ST = 150 ، T_{crit} = 6)$

يمثّل هذا السيناريو الحالة الأسوأ مقارنة بالسيناريوهات السابقة؛ إذ جرى توزيع 3000 تجهيزة مستخدم يتحركون بسرعات مختلفة ضمن سيناريو شبكة غير متجانسة مكونة من 91 خليّة فمتويّة وخلال زمن محاكاة 150 ثانية. كما هو موضح في الشكلين 3–19 و3–20، يُلاحَظ الأداء العالي للخوارزميّة المقترحة حتى مع زيادة عدد المستخدمين وعدد الخلايا الفمتويّة. كما هو موضح في الجدول 3–8، فإنَّ عدد الأحداث PPHOs هو تسعة فقط لكل عشرة آلاف عمليّة تسليم، وعدد الأحداث

RLFHO هو 61 فقط لكل عشرة آلاف عمليّة تسليم، وهو أداء شبه مثالي مقارنة بالضبط التقليدي الثابت للموسطات HCPs وبأداء الخوارزميّة المقترحة في [82].



الشكل 3–19: نتائج المؤشِّر $\mathbf{HPI_{HOPP}(t)}$ للسيناريو الخامس (الباحث).



الشكل 3–20: نتائج المؤشِّر $\mathbf{HPI_{HOF}(t)}$ للسيناريو الخامس (الباحث).

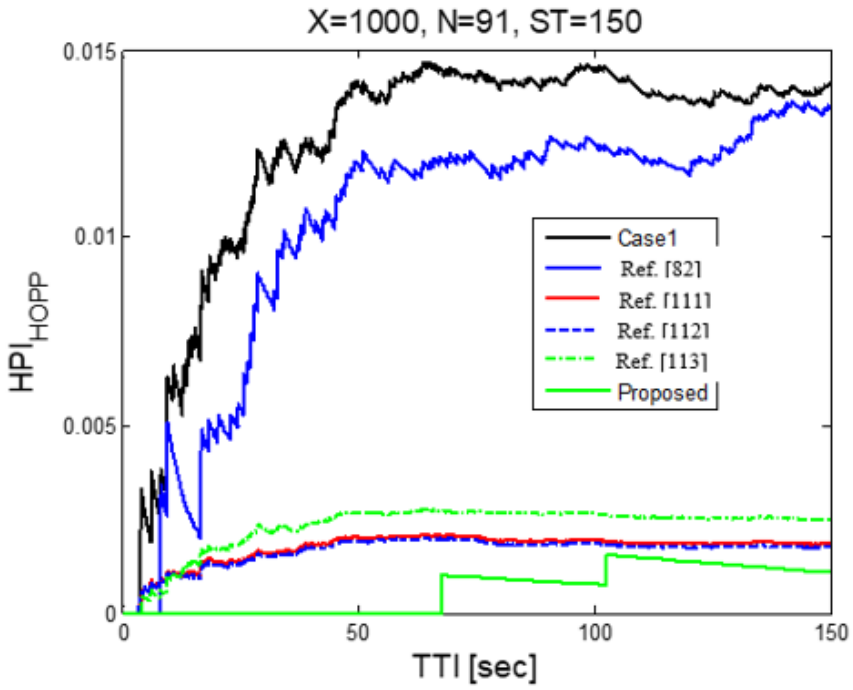
الجدول 3—8: المتوسط الزمني للمؤشرين $HPI_{HOPP}(t)$ و$HPI_{HOF}(t)$ للسيناريو الخامس (الباحث).

	الخوارزميّة المقترحة	خوارزميّة المرجع [82]	الحالة 1 من الجدول 3-3	الحالة 2 من الجدول 3-3	الحالة 3 من الجدول 3-3
$\underset{t\in[0,ST]}{mean}(HPI_{HOPP}(t))$	0.0009	0.015	0.016	0.027	0.019
$\underset{t\in[0,ST]}{mean}(HPI_{HOF}(t))$	0.0061	0.60	0.65	0.47	0.33

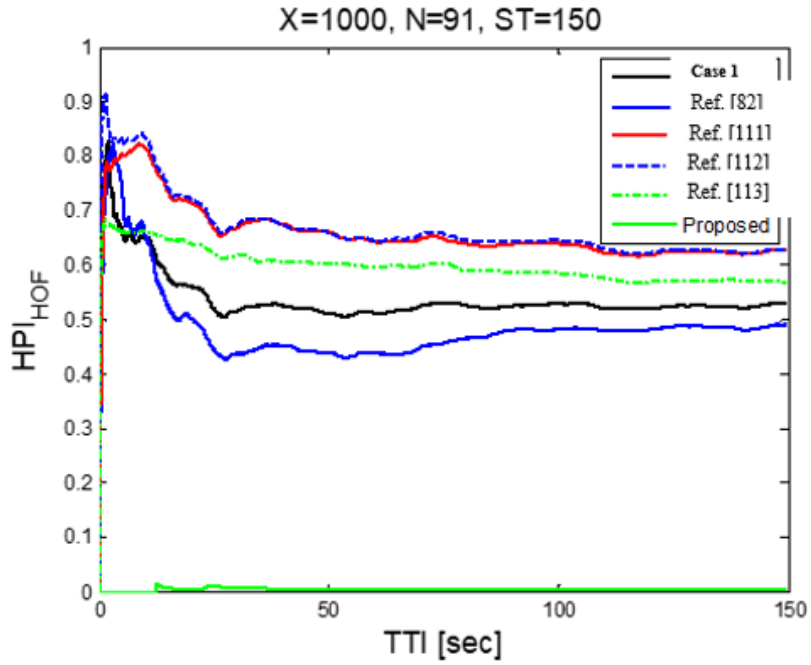
6.6.3 السيناريو السادس $(X = 1000 ، N = 91 ، ST = 150 ، T_{crit} = 2)$

في السيناريوهات السابقة أُخِذَ بالحسبان الحالة الأسوأ في حساب معدّل أحداث تأرجح التسليم، أي $T_{crit} = 6\ s$. من الواضح أنّه كلما زاد T_{crit}، زاد احتمال وقوع الأحداث PPHOs، لأنّ زيادة الزمن T_{crit} يزيد من احتمال عودة تسليم تجهيزة المستخدم إلى الخليّة الأصلية خلال زمن كافٍ. في هذا السيناريو، نعتمد وقتاً حرجاً أصغر، أي نختار $T_{crit} = 2\ s$، مع الأخذ في الحسبان 1000 تجهيزة مستخدم يتحركون خلال 150 ثانية، ضمن سيناريو شبكة غير متجانسة مكوّنة من 91 خليّة فمتويّة. من الواضح هنا أن عدد الأحداث PPHOs سوف ينخفض مقارنة بالسيناريوهات السابقة، لأنّ احتمال حدوثها سوف ينخفض بانخفاض قيمة الزمن الحرج، ومع ذلك تبقى الخوارزميّة المقترحة فعّالة بشكل ملموس حتى بالمقارنة مع الأدبيّات الأخرى ذات الصلة. فقد جرى تشغيل الخوارزميّات المقترحة في الأدبيّات [111،112،113] ضمن بيئة المحاكاة في هذا البحث والحصول على النتائج المُمَثَّلة بمنحنيات مؤشّرات الأداء $HPI_{HOPP}(t)$ و $HPI_{HO}(t)$ المتغيّرة مع الزمن.

يوضّح الشكل 3-21 معدّل وقوع الأحداث PPHOs فيما يتعلق بالعدد الكلّي لأحداث التسليم المنفَّذة. ويوضّح الشكل 3-22 معدّل وقوع الأحداث RLFHO فيما يتعلق بالعدد الكُلّي لأحداث التسليم المنفَّذة. ويُظهِر الشكلان (3-12) و(3-22) مقارنة أداء الخوارزميّة المقترحة في هذا البحث بأداء الخوارزميّات المقترحة في [82،111،112،113]، ويُلاحَظ أنّ الخوارزميّة المقترحة تعدُّ نموذجاً أكثر عموميّة لحركيّة المستخدم، لأنّنا، في هذا السيناريو، مع افتراض سرعة متوسّطة 90 كم/ساعة، كما في [111،113]، وعتبة لمؤشِّر فشل التسليم RLFHO تساوي 1% كما في [113] و27% كما في [82] مع وضع خطوات لهامش البطاء والزمن اللازم للقدح بمقدار 1 ديسبل و50 ميلي ثانية، على التوالي، كما افترضت كل من هذه الخوارزميّات، فالخوارزميّة المقترحة لا تحتاج لمثل هذه العتبات التي لا أساس تعريفي لها في تعيين قيم المُوسِطات HCPs، وحتى أنها تعطي أداءً أفضل بكثير.



الشكل 3–21: نتائج المؤشِّر $\mathbf{HPI_{HOPP}(t)}$ للسيناريو السادس (الباحث).



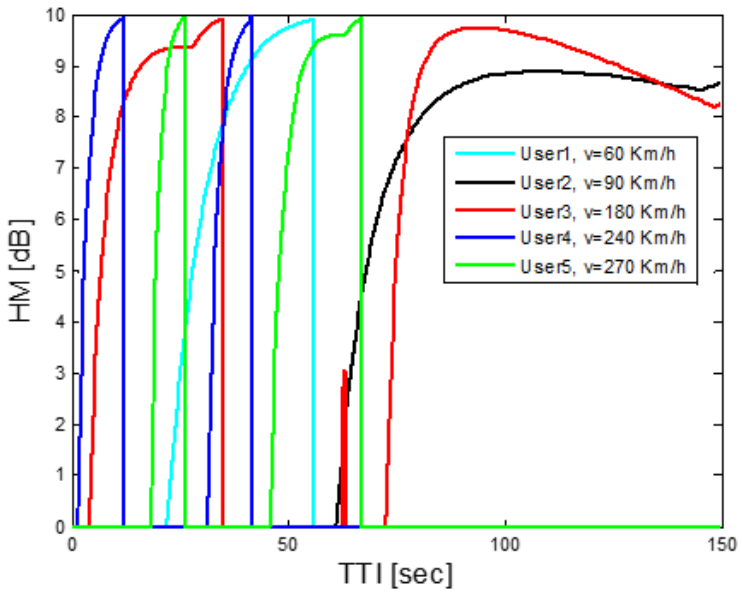
الشكل 3–22: نتائج المؤشِّر $\mathbf{HPI_{HOF}(t)}$ للسيناريو السادس (الباحث).

يوضِّح الشكلان 3–21 و3–22 أنّ الخوارزميّات المقترحة في [82] و [111] و [112] و [113] لا تحل مشكلة المقايضة بين معدّلي تأرجح التسليم PPHOs وفشل التسليم RLFHO بحيث يجري تخفيضها في وقت واحد. كما يتَّضح من الشكل 3–22، أنَّ الخوارزميّة المقترحة في [82] أفضل من جميع الخوارزميّات المقارن بها (باستثناء خوارزميتنا المقترحة) من حيث معدّل فشل التسليم

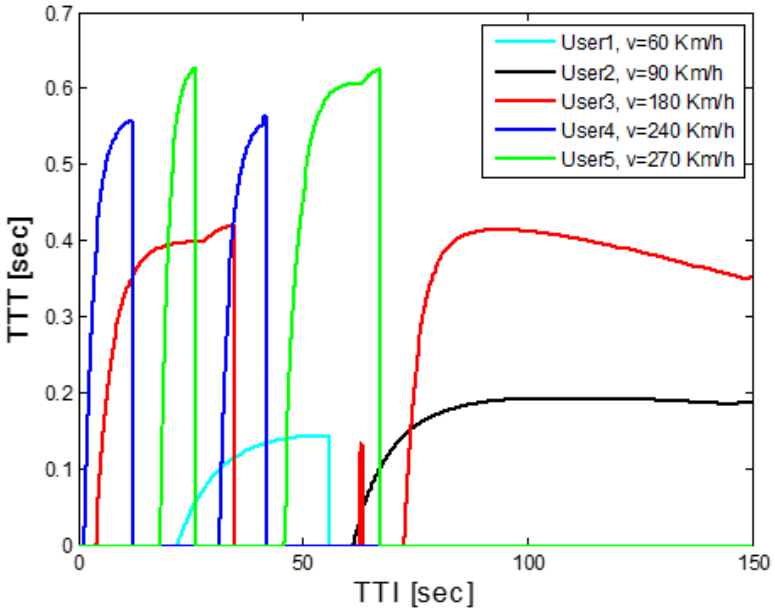
RLFHOs، ولكنها في نفس الوقت تعطي أداء أسوأ مقارنة بأداء الخوارزميّات الأخرى من حيث معدّل تأرجح التسليم PPHOs. كما هو موضَّح في الشكل 3−21، وبالمثل، فإنّ الخوارزميّات المقترحة في [111،112،113] تعطي أداءً جيداً من حيث معدّل تأرجح التسليم PPHOs، ولكنها في نفس الوقت تفشل في الحصول على أداء جيّد من حيث معدّل فشل التسليم RLFHOs. وبالمقارنة بين هذه الخوارزميّات، نجد أنّ أداء الخوارزميّة المقترحة في [113] أفضل من أداء الخوارزميتين في [111،112] من حيث RLFHOs. هذا لأنّ الخوارزميّة في [113] تفرض عتبة أداء لمعدّل فشل التسليم RLFHO في تحديد قيم الموسطات HCPs المناسبة، لكنها تعطي أداء أسوأ من الخوارزميّات في [111،112] من حيث معدّل تأرجح التسليم PPHOs؛ ويوضّح الشكل 3−22 أنّه قد تكون هناك حالة تقليديّة باستخدام قيم ثابتة للموسطات HCPs ينتج عنها أداء أفضل من حيث معدّل فشل التسليم RLFHOs مقارنة بأداء الخوارزميّات المقترحة في [111،112،113]، على الرغم من استخدام عتبة RLF في البحث [113]، ومع أنّ خلاصة الأبحاث [111،112] تشير إلى أنّ الخوارزميّات المقترحة تتفوق في الأداء على جميع الحالات التقليديّة. وتُعد هذه النتيجة مؤشِّراً واضحاً على أنّ الحلول التي توفرها هذه الخوارزميّات لن تكون دائماً جيّدة، مع العلم أنّ [111] و [113] يفترضان مجموعة صارمة من السرعات لتقييم الأداء. بينما في هذا البحث، نفترض سيناريو حركيّة للمستخدمين أكثر عموميّة فكل تجهيزة مستخدم UE تتحرك بسرعات عشوائية في المجال من 30 كم/ساعة إلى 300 كم/ساعة دون الحاجة إلى افتراض سرعة متوسطة لكل المستخدمين، كما هو مقترح في [111، 113]؛ فضلاً عن ذلك، يُلاحَظ أنّ الخوارزميات المقترحة في [111] و [112] تعطي نفس الأداء تقريباً لكل منحني من منحنيات مؤشرات الأداء $\mathrm{HPI_{HOPP}(t)}$ و $\mathrm{HPI_{HOF}(t)}$ في الشكلين 3−21 و3−22، وهذا أمر طبيعي لأنّ الخوارزميّة المقترحة في [111] هي مجرد تطوير بسيط للعمل في [112]. اقترح الباحثون في [111] آليّة لتعيين قيم الموسطات HCPs مع الأخذ بالحسبان السرعة والاستطاعة المستقبلة RSRP فقط (دون النسبة SINR)؛ فضلاً عن ذلك، بقيت الشروط العامة وخطوات تعيين الموسطات HCPs للخوارزميّة الأصلية في [112] كما هي في نسختها المحدّثة في [111]. من ناحية أخرى، توفر الخوارزميّة المقترحة في هذا البحث أداءً جيداً للغاية لكلا المؤشرين المفترضين في الدراسة، فهي أكثر قدرة على حل مشكلة المقايضة، كما يتّضح من الشكلين 3−21 و3−22. وينتج عن هذا تقليل كلٍّ من الأحداث RLFHO و PPHO بنفس الوقت. تُفسَّر متانة الخوارزميّة المقترحة في هذا البحث من خلال متانة العلاقات التي جرى أخذها في الحسبان عند اختيار قيم الموسطات HM و TTT. من المهم جداً أن نوضح أنّ المقارنة هنا تستند إلى اختيار $\mathrm{T_{crit}} = 2\ \mathrm{s}$ مع الخوارزميّات المقترحة في [82،111،112،113]. في الواقع، إنّ تقييم أي خوارزميّة SON من خلال افتراض $\mathrm{T_{crit}} = 2\ \mathrm{s}$ غير كافٍ. حيث تعد القيمة $\mathrm{T_{crit}} = 2\ \mathrm{s}$ زمناً قصيراً بالتأكيد لدراسة مشكلة تأرجح التسليم PPHO ما

دامت طبيعة هذا الحدث نفسه مرتبطة ارتباطاً مباشراً بالزمن اللازم لإعادة تسليم المستخدم إلى الخليّة المُخدِّمة الأصلية. فإذا كانت T_{crit} صغيرة جداً، على سبيل المثال، 2 ثانية، فمن المؤكد أنّه سيكون هناك عدد قليل جداً من الأحداث PPHOs، حتى مع الضبط التقليدي الثابت لقيم الموسطات HCPs. لذلك من الأفضل تقييم الخوارزميّات بزمن حَرِج أكبر من ذلك. من خلال تشغيل هذا السيناريو بشكل متكرّر من أجل $T_{crit} = 6\ s$، يُلاحَظ أنّ أداء الخوارزميّات في [111،112،113] يتدهور بشكل كبير فيما يتعلق بالأحداث PPHOs. بينما، تحافظ الخوارزميّة المقترحة في البحث على الأداء الجيد من أجل السيناريو الأسوأ هذا كما هو موضح في نتائج السيناريوهات السابقة. من ناحية أخرى، تعالج هذه الخوارزميّات في الأدبيّات فقط حالة حركيّة المستخدم لمجموعة محددة جداً من السرعات، وتفترض طريقة غير عموميّة لتعيين قيم HM وTTT دون تبرير كيفية اختيار الخطوات المقابلة لحسابها، ودون تبرير كيفية اختيار العتبة لقيمة HOFR. لذلك، يمكن وصف الخوارزميّة المقترحة في هذا البحث بأنها أكثر شموليّة في هذا المجال البحثي، فهي تأخذ في الحسبان أي سرعة ممكنة لتجهيزة المستخدم ضمن المجال من 30 إلى 300 كم/ساعة دون الحاجة إلى تحديد أي عتبة أداء للنظام، ودون الحاجة إلى تعديل قيم الموسطات HCPs باستخدام خطوات ثابتة بالزيادة أو بالنقصان.

أخيراً، يوضّح الشكلان 3-23 و3-24 كيف تتغيّر القيم التكيفيّة للموسطين HM وTTT مع الزمن ومن أجل سرعات مختلفة لتجهيزات المستخدمين على التوالي. جرى الحصول على هذين الشكلين من محاكاة السيناريو الحالي، فلدينا 1000 تجهيزة مستخدم يتحرّكون في بيئة الشبكة. نظراً لصعوبة استعراض جميع منحنيات HM وTTT لجميع المستخدمين البالغ عددهم 1000 مستخدم على نفس الشكل، فقد اخترنا عشوائيّاً خمسة مستخدمين للحصول على الشكلين 3-23 و3-24. يُلاحَظ من الشكلين 3-23 و3-24 أنّه يجري إعطاء قيم محدّدة للموسطات HCPs لكل مستخدم ووفق سرعته بمرور الزمن. أي يجعل النموذجُ المقترح الشبكةَ تتعامل بشكل فردي مع كل مستخدم على حِدة بحيث تحدد خوارزميّة SON قيم الموسطين HM وTTT المناسبة له بمعزل عن غيره.



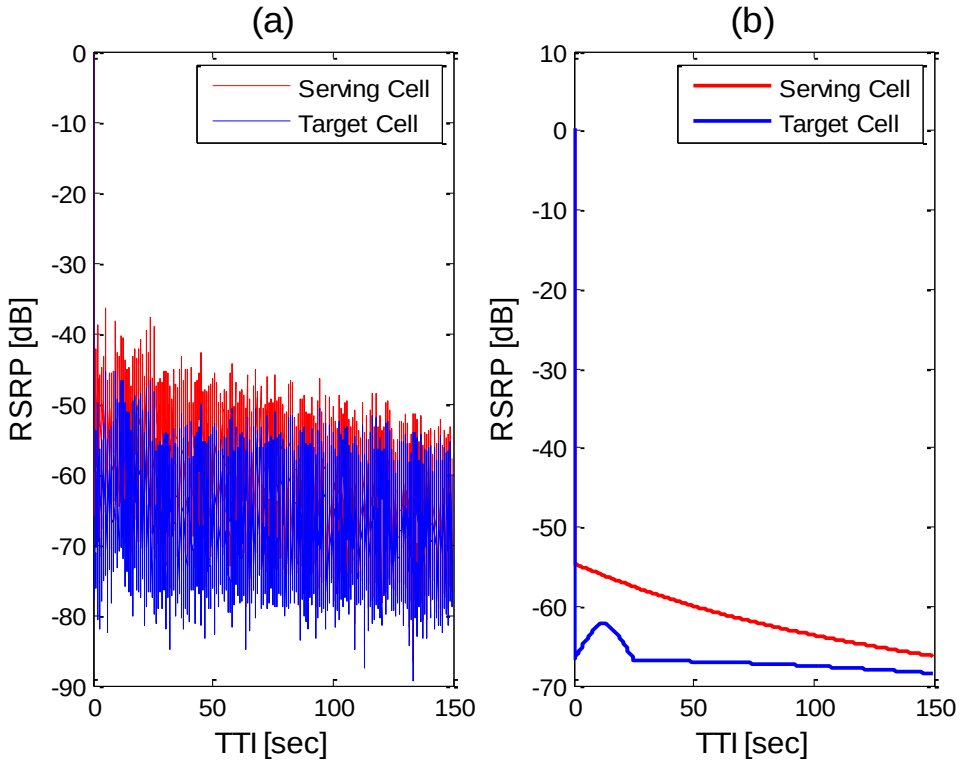
الشكل 3–23: منحني تغيُّر القيمة التكيُّفية للمُوسِط HM مع الزمن والسرعة لخمسة مستخدمين بسرعات مختلفة.



الشكل 3–24: منحني تغيُّر قيمة المُوسِط TTT التكيفيّة مع الزمن والسرعة لخمسة مستخدمين بسرعات مختلفة.

7.3 مناقشة نتائج إضافيّة لإقرار صلاحيّة الخوارزميّة ودقّتها

نُوقش في هذه الفقرة بعض القضايا المهمة المتعلقة بدقّة النموذج المقترح وصلاحيّته باستخدام نفس مُوسِطات المحاكاة للسيناريو الخامس، وكامل بيانات نتائج هذا السيناريو. لنناقش أولاً حالة مستخدم اعتباطي أول موجود ضمن منطقة خدمة خليّة ماكرويّة يتحرك بسرعة 30 كم/ساعة، مع الأخذ في الحسبان موضعه الابتدائي في الشبكة. يوضّح الشكل 3–25 تغيّرات شدّة الاستطاعة المستقبلة RSRPs لهذا المستخدم بالنسبة لكل من الخليّة الهدف والخليّة المخدّمة.

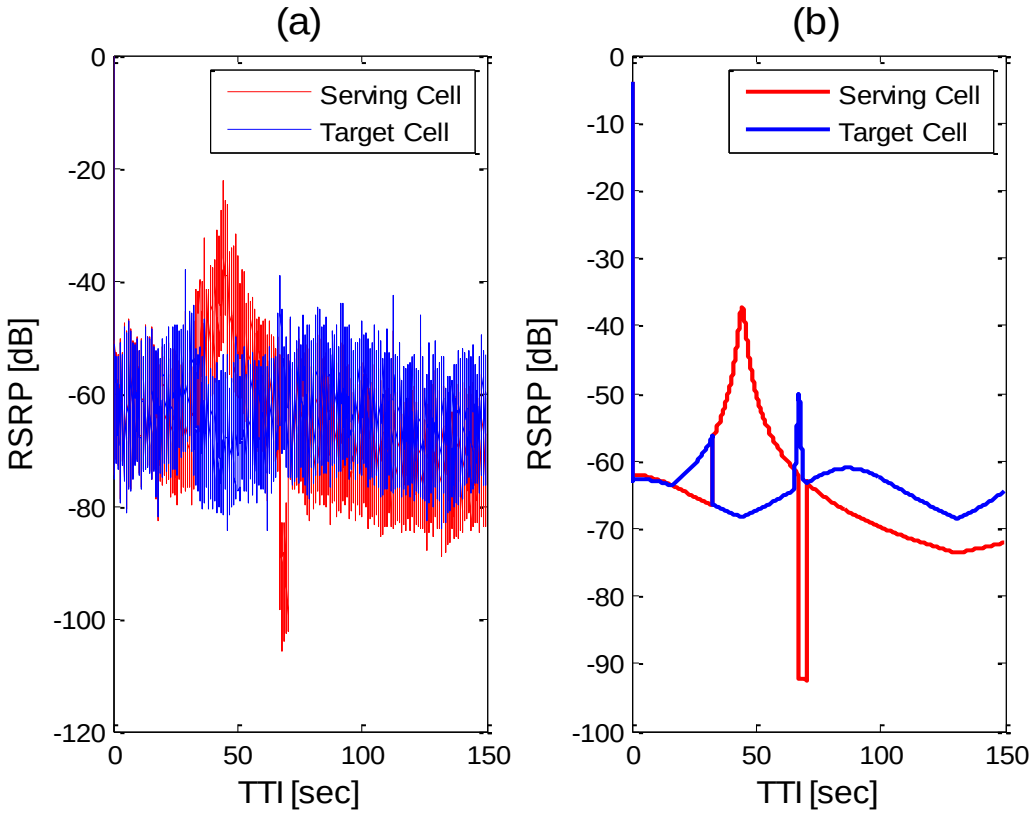


الشكل 3–25: منحني تغيُّر RSRP مع الزمن للخليّة المُخدِّمة والهدف، من أجل تجهيزة مستخدم UE اعتباطي أول يتحرك بسرعة 30 كم/ساعة، (أ) مع خفوت الظل و (ب) متوسط RSRPs بوجود خفوت الظل. (الباحث).

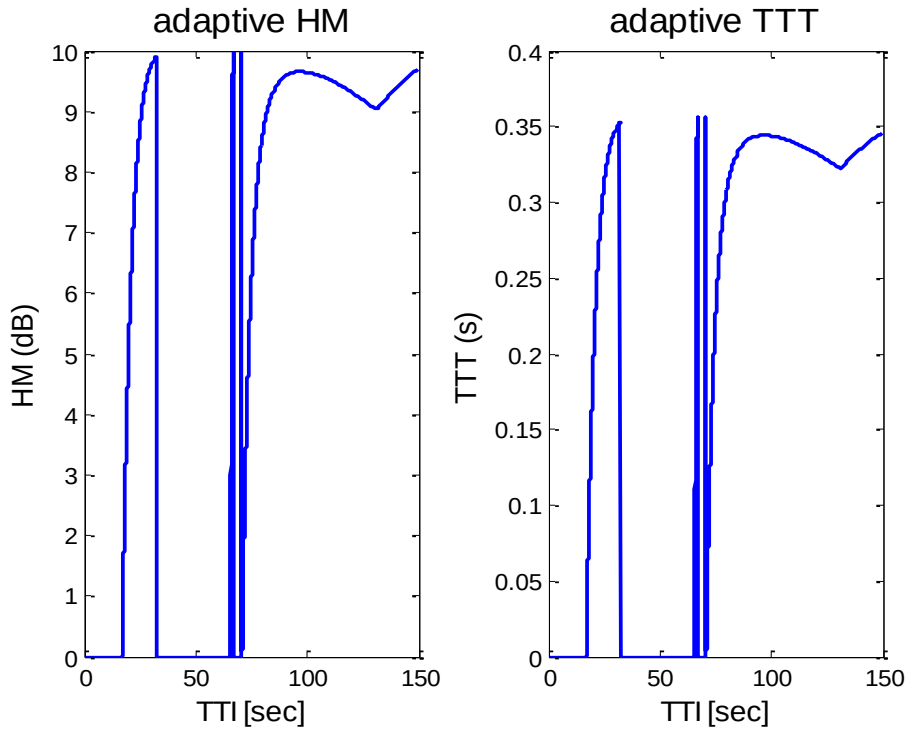
يُلاحَظ في الشكل 3–25 أنّ الشرط $RSRP_i^{serving}(t) > RSRP_i^{target}(t)$ مستوفَى دائماً، حيث يتوافق الشكل 3–25– (a) مع افتراض وجود خفوت الظل المضاف وفق العلاقة (3–6)، بينما يمثل الشكل 3–25–(b) متوسط RSRPs بالنسبة لأثر هذا الخفوت. كما وجدنا من المحاكاة، يبقى كل من $HM_{adaptive}$ و$TTT_{adaptive}$ صفراً خلال حركيّة تجهيزة المستخدم UE الكاملة، وهو ما يتوافق مع الشرح الوارد في نهاية الفقرتين 2.5.3 و3.5.3. ولمدة 150 ثانية، تبقى تجهيزة المستخدم UE هذه مخدَّمة من نفس الخليّة الفمتويّة، على الرغم من أنّ تجهيزة UE هذه تتحرّك في جميع منطقة الخلايا الفمتويّة الكثيفة، فإنَّ قيمة الزوج (HM = 0، TTT = 0) هي الأنسب لهذه التجهيزة UE مادامت شدة الاستطاعة المستقبلة RSRP من الخليّة المخدِّمة أكبر منها للخليّة الهدف، أي لا حاجة لاتخاذ أي قرار تسليم.

نتعامل الآن مع مستخدم اعتباطي ثانٍ يتحرك بسرعة 30 كم/ساعة مع موضع ابتدائي مختلف. يوضّح الشكل 3–26 منحني تغيّرات RSRPs لهذا المستخدم من الخليّة الهدف والخليّة المخدّمة، على غرار الشكل 3–26، ولكن مع حالات مختلفة. بالنسبة إلى هذا المستخدم، وجدنا أنّ كلاً من $HM_{adaptive}$ (ينحصر بين 0 إلى 10 ديسيبل) و$TTT_{adaptive}$ (ينحصر بين 0 إلى 350 مللي ثانية) يأخذان قيماً موجبة مختلفة أثناء حركيّة تجهيزة المستخدم، كما هو موضح في الشكل 3–27. في المحاكاة التي أُجريَت، افترض ترقيم الخلايا الماكرويّة من 901 إلى 919 (19 خليّة ماكرويّة)، بينما رقّمِت الخلايا الفمتويّة من

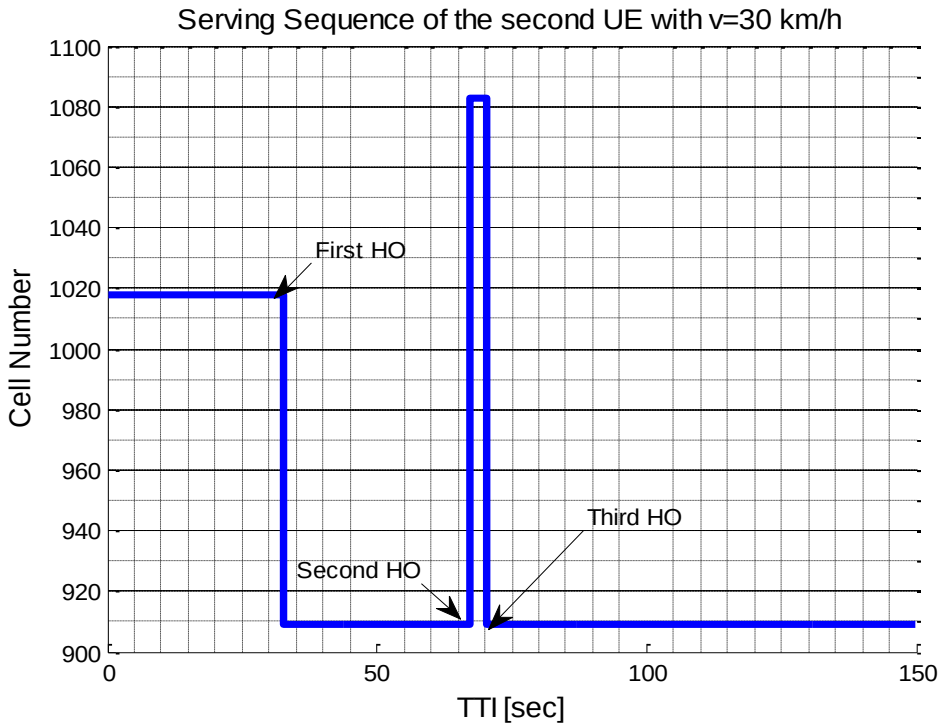
1001 إلى 1091 (91 خليّة فمتويّة). يوضّح الشكل 3–28 تتابع التخديم بالنسبة لتجهيزة المستخدم المدروسة. نلاحظ من الشكل 3–28 أنّ هناك ثلاثة قرارات تسليم متخذة؛ إذ جرَت عمليّة التسليم الأولى من الخليّة الفمتويّة رقم 1018 إلى الخليّة الماكرويّة رقم 909 في اللحظة الزمنية $t = 32.64\ s$، ثم جرى تسليمه من الخليّة الماكرويّة رقم 909 إلى الخليّة الفمتويّة رقم 1083 في اللحظة الزمنية $t = 67.24\ s$ وبعد ذلك، في فترة زمنية تساوي 3.16 ثانية، أي أقل من الزمن الحرج $T_{crit} = 6\ s$، جرى تسليم تجهيزة المستخدم UE مرة أخرى إلى الخليّة الماكرويّة رقم 909 في اللحظة $t = 70.4\ s$؛ ما يعني وقوع حدث تأرجح في التسليم ping–pong بين اللحظتين الزمنيتين 67.24 ثانية و 70.4 ثانية. وجد أنّ أول قرار تسليم HO كان ناجحاً دون وقوع حدث RLFHO، لكن كلا قراري التسليم HO الثاني والثالث قدم حدث تسليم غير ضروري UHO (حدث تأرجح في التسليم ping–pong). يُعَد هذا السيناريو مثالاً واضحاً على أنّ نموذجنا لا يقضي تماماً على أحداث التسليم غير المرغوبة أو غير الضرورية، ولكن يمكنه بسهولة تقليل عددها قدر الإمكان باستخدام النموذج التكيُّفي الخاص للموسطين HM وTTT؛ ما يوفر أداء أفضل بكثير من الأدبيات ذات الصلة التي جرت المقارنة معها في القسم السابق.



الشكل 3–26: منحني تغيُّر RSRP مع الزمن للخليّة المخدّمة والخليّة الهدف من أجل تجهيزة مستخدم اعتباطي ثاني يتحرك بسرعة 30 كم/ساعة، (أ) مع خفوت الظل و (ب) متوسط RSRPs بوجود خفوت الظل. (الباحث).



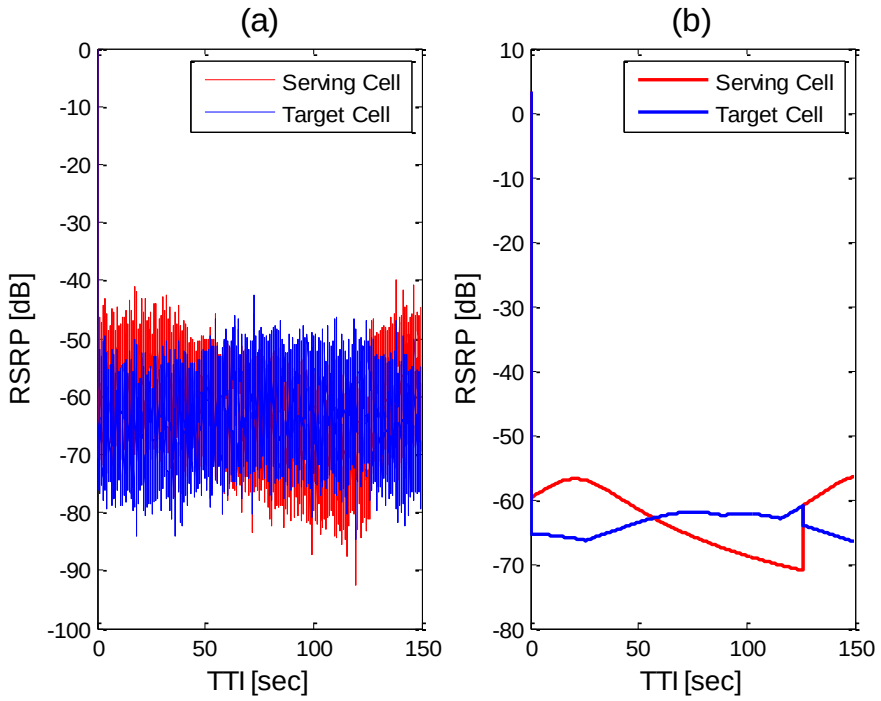
الشكل 3–27: منحني تغيُّر القيم التكيفيّة للموسطين HM وTTT خلال كامل زمن المحاكاة، بالنسبة لتجهيزة المستخدم الاعتباطي الثاني تتحرك بسرعة 30 كم/ساعة. (الباحث).



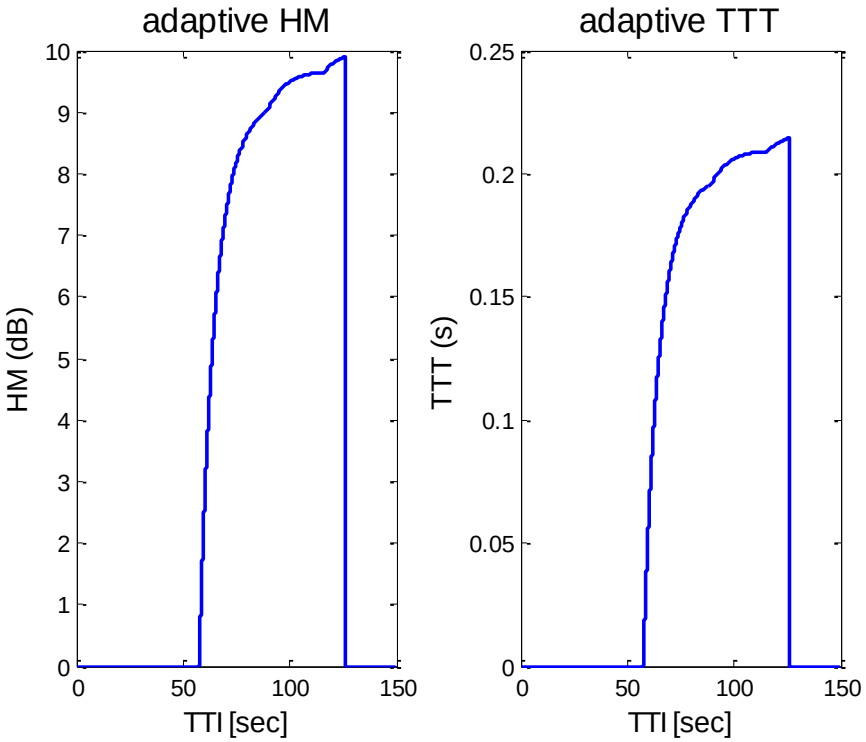
الشكل 3–28: توضيح تتابع التخديم لتجهيزة المستخدم الاعتباطي الثاني تتحرك بسرعة 30 كم/ساعة. (الباحث).

جرى أخذ حالة مستخدم اعتباطي ثالث يتحرك بسرعة 90 كم/ساعة مرة أخرى مع موضع ابتدائي مختلف عن موضع المستخدمين السابقين. يوضّح الشكل 3-29 منحني شدّة الاستطاعة المستقبلة RSRPs من الخليّة الهدف والخليّة المُخدِّمة لهذا المستخدم. بالنسبة لهذا المستخدم، وجدنا أنّ كلاً من $HM_{adaptive}$ (ينحصر بين 0 إلى 10 ديسيبل) و$TTT_{adaptive}$ (ينحصر بين من 0 إلى 214 مللي ثانية) يأخذ قيماً موجبة مختلفة أثناء الحركيّة، كما هو موضح في الشكل 3-30.

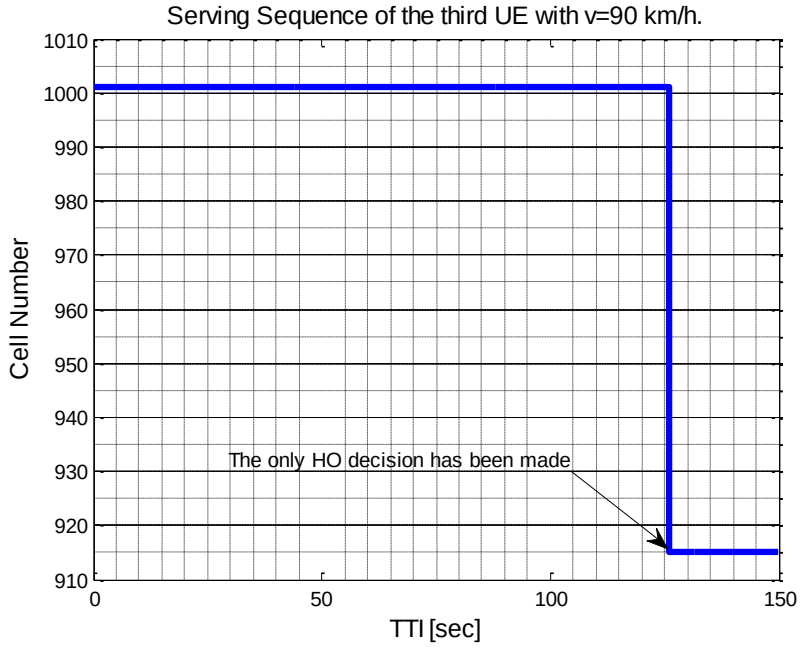
يمكن تبيان دقّة النموذج المقترح من خلال هذا المثال الثالث. إذ يُلاحَظ في الشكل 3-29 أنّ هناك حالة واضحة تكون فيها شدّة الاستطاعة المستقبلة RSRP من الخليّة الهدف أكبر منها للخليّة المخدِّمة في المجال الزمني من 50 إلى 100 ثانية خلال حركيّة تجهيزة المستخدم المدروس في هذه الحالة، وجرى حساب قيم الموسط HM المقابلة كما هو مبين في الشكل 3-30. ومع ذلك، لم يجرِ اتخاذ قرار بإرسال طلب تنفيذ عمليّة تسليم HRQ في الخوارزميّة المقترحة خلال الفترة الزمنيّة بين 50 و100 ثانية إلا بعد اللحظة الزمنية t=100 ثانية. تشير المحاكاة هنا إلى أنّه، بالنسبة لهذا المستخدم الثالث، لو جرى إرسال طلب التسليم HRQ، فإنّه من الممكن وقوع حدث تسليم متأخِّر TLHO أو تسليم مبكِّر TEHO. وجرى وفق العلاقة (3-14) اختيار قيم لهامش البطاء HM مناسبة لقرار التسليم حيث تكون النسبة SINR كبيرة نسبياً لكل من الخليّة المخدِّمة الحالية والخليّة الهدف (أكبر من قيمة العتبة المحدِّدة لانقطاع قناة الاتصال Θ)؛ فضلاً عن ذلك، وفقاً لقيمة سرعة تجهيزة المستخدم UE، تُرجع العلاقة (3-28) قيمة مناسبة للزمن اللازم للقدح TTT التي يجب أن تفرض صحة المتراجحة في العلاقة (3-14) ليجري الاحتفاظ بصحتها طوال الزمن TTT. خلاف ذلك يحدث فشل في الوصلة الراديوية بسبب حالة تسليم مبكِّر TEHO أو تسليم متأخِّر TLHO. هنا، يظهر معنى القيم " التكيّفيّة المناسبة " لكل من الموسطين HM وTTT التي تمنع إرسال طلب التسليم في اللحظة الخاطئة. لذلك، نقول هنا إن زوج القيم ($HM_{adaptive}$، $TTT_{adaptive}$) يجري تخصيصه بخاصية متفرّدة بحيث يجري منع قرار التسليم الخاطئ بطريقة غير مباشرة. في حين يجري اتخاذ قرار التسليم الناجح بعد اللحظة الزمنية 100 ثانية من بداية المحاكاة لهذا المستخدم الثالث (بالتحديد في اللحظة $t = 126\ s$)، حيث تصبح الخليّة الهدف الخليّة المخدّمة الجديدة، فيتغير لون منحني RSRP الخاص بها من الأزرق إلى الأحمر وفقاً للون التمثيل المعتمد في عمليات المحاكاة لدينا. يوضّح الشكل 3-31 تتابع التخديم للمستخدم الثالث التي تضمن عدم وجود طلب تسليم HRQ بين اللحظتين الزمنيتين 50 و100 ثانية، بينما يجري تسليم ناجح لهذا المستخدم من الخليّة الصغيرة رقم 1001 إلى الخليّة الماكرويّة رقم 915 في اللحظة الزمنية $t = 126\ s$.



الشكل 3–29: منحني تغيُّرات RSRP مع الزمن للخليّة المخدّمة والخليّة الهدف لمستخدم اعتباطي ثالث يتحرك بسرعة 90 كم/ساعة، (أ) مع خفوت الظل و (ب) متوسط RSRPs بوجود خفوت الظل. (الباحث).



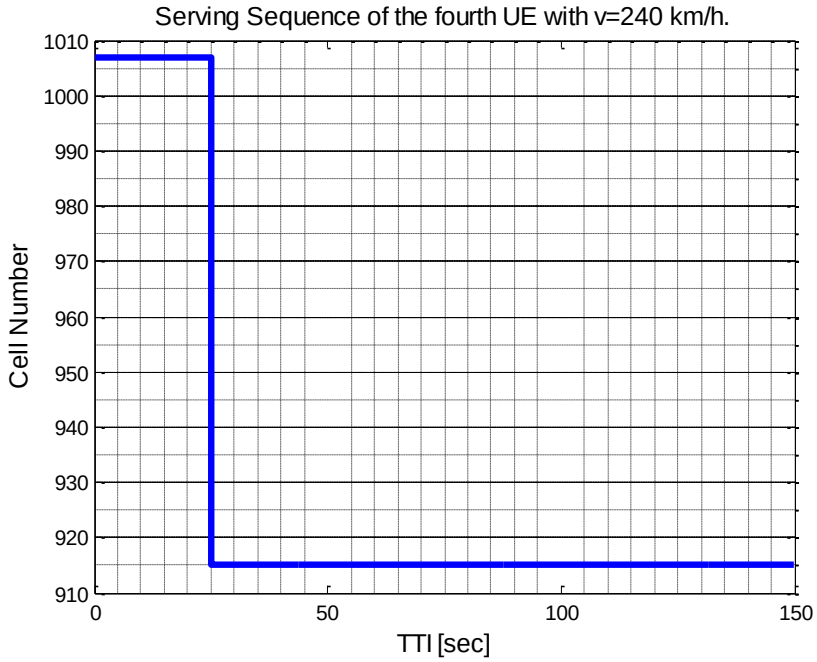
الشكل 3–30: توضيح HM وTTT التكيفيين للمستخدم الثالث الذي يتحرك بسرعة 90 كم/ساعة. (الباحث).



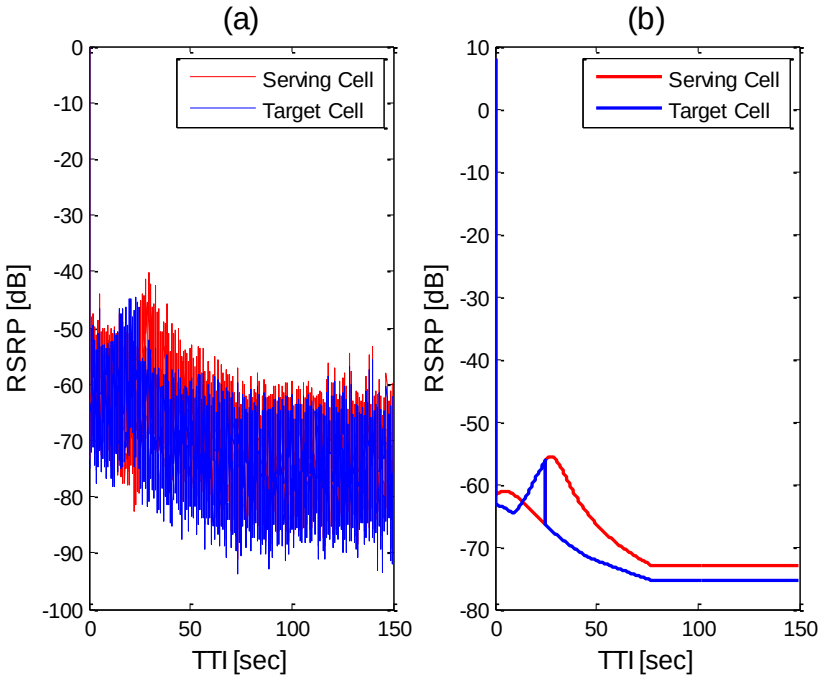
الشكل 3–31: توضيح تتابع التخديم للمستخدم الثالث الذي يتحرك بسرعة 90 كم/ساعة. (الباحث).

أشارتْ الأدبيّات إلى أنّ اختيار قيم مرتفعة لكل من HM وTTT سيؤدي إلى ارتفاع معدّل فشل التسليم RLFHOs عندما تتحرك تجهيزة المستخدم بسرعات عالية. ومع ذلك، لا يوجد حتى الآن تعريف موحَّد لمعنى " الارتفاع السيئ " أو " الارتفاع الجيد " أو " الصغير السيئ " أو " الصغير الجيد " لقيم HM وTTT فيما يتعلق بأحداث تأرجح التسليم PPHOs وفشل التسليم RLFHOs؛ فضلاً عن ذلك، لا يوجد تعريف موحَّد لحدود السرعة يتوافق معها أيضاً. في الواقع، تمثّل شدة الاستطاعة المستقبلة RSRP في نظم الاتصالات النقّالة مقداراً عشوائيّاً بسبب عشوائيّة ظاهرة الخفوت لقناة الاتصال؛ لذا تُعَد أحداث فشل التسليم RLFHOs (التسليم المبكّر TLHO أو التسليم المتأخِّر TEHO) وأحداث تأرجح التسليم PPHOs أحداثاً عشوائيّة في المقام الأول. في هذا السياق، تتمثل إحدى الأفكار الرئيسية التي أوصلتنا إلى النموذج المقترح في هذا البحث في أنّنا نفترض أنّ الحديث عن "القيم العالية" أو "القيم الصغيرة" للموسطات HM وTTT وUE يجب أن يستند إلى التعامل نسبياً مع حالة الحركيّة لتجهيزة المستخدم ومع حالة الخليّة في الشبكة (المواقع الجغرافية، أي مواضع الخليّة ومسافاتها إلى المستخدم والقيم النسبية للمقاييس RSRP وSINR) لإيجاد قيم مُتكيّفة لموسطات التحكُّم في التسليم HCPs. يؤكد المثال الرابع الإضافي هنا هذه الفكرة. في هذا المثال نبيّن أنّ الفكرة العامة الشائعة في الأدبيّات التي تقول أنّ "القيم العالية لقيم HM وTTT ستؤدي إلى ارتفاع معدّل فشل التسليم RLFHO عندما يتحرك المستخدم بسرعات عالية"، هي فكرة ليست صحيحة دائماً. يوضّح الشكل 3–32 تتابع التخديم لتجهيزة المستخدم الرابع (وفق السيناريو الخامس) يتحرك بسرعة 240 كم/ساعة، حيث جرى تسليمه من الخليّة الفمتويّة رقم 1007 إلى الخليّة الماكرويّة رقم 915. ويوضّح الشكل 3–33 منحنيات شدّة الاستطاعة المستقبلة RSRP من الخليّة المُخدِمة والخليّة

الهدف للمستخدم الرابع، ويُعبِّر أيضاً عن حالة مواضع المستخدم فيما يتعلق بكل من الخليّة المخدّمة والخليّة الهدف. يُلاحَظ من الشكل 3-33 أنّ قيم RSRP للخليّة الهدف أكبر منها للخليّة المخدّمة الحاليّة قبل اتخاذ قرار التسليم مباشرة، وهذا يعني أنّ الشرط الثالث $RSRP_i^{serving}(t) \leq RSRP_i^{target}(t)$ في العلاقة (3-14) قد تحقّق قبل اتخاذ قرار التسليم HO.

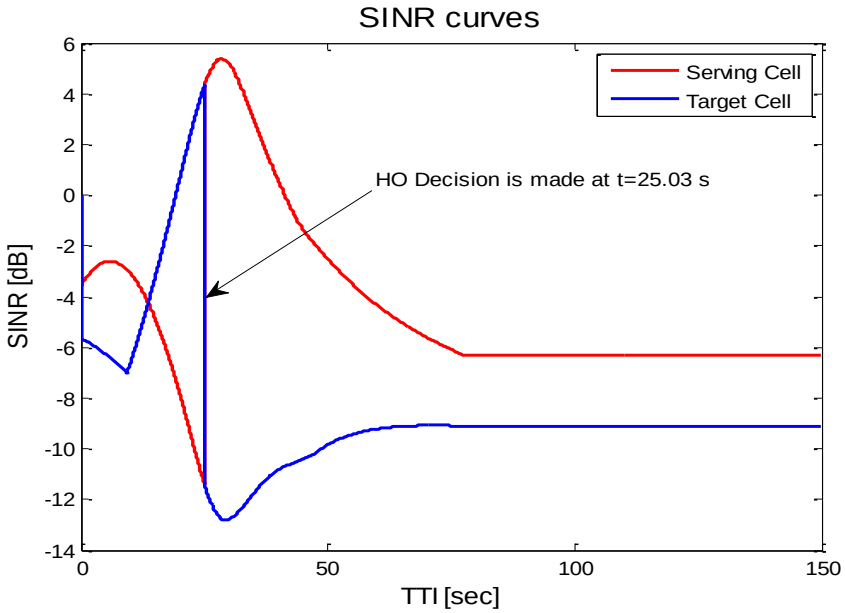


الشكل 3-32: توضيح تتابع التخديم للمستخدم الرابع الذي يتحرك بسرعة 240 كم/ساعة (الباحث).



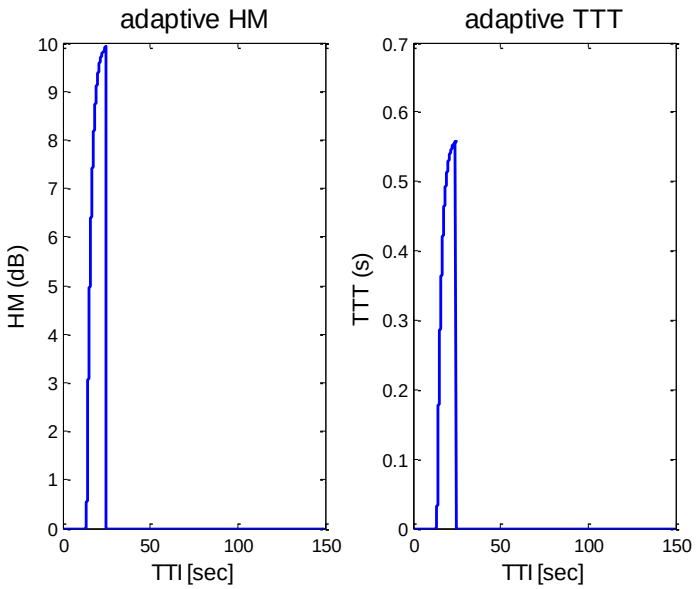
الشكل 3-33: منحني تغيُّر RSRP مع الزمن للخليّة المخدمة والخلية الهدف لمستخدم رابع يتحرك بسرعة 240 كم/ساعة، (أ) مع خفوت الظل و (ب) متوسط RSRPs بوجود خفوت الظل. (الباحث).

يوضّح الشكل 3-34 متوسط قيم SINR لكل من الخليّة المُخدِّمة والخليّة الهدف في حالة المستخدم الرابع. يُلاحَظ من الشكل 3-34 أنّ قيم SINR لكل من الخليّة الهدف والخليّة المخدّمة تحقق أيضاً المتراجحات الشرطية الأولى والثانية للعلاقة (3-14)، حيث يكون كلاهما، في المتوسط، أكبر من عتبة النظام المفترضة ($\Theta = -35$) وذلك من أجل نافذة زمنية بطول $W = 200$ ms مع استمرار الحركيّة وقبل الوصول إلى لحظة قرار التسليم. نلاحظ هنا في الشكل 3-34 أنّ قرار التسليم قد جَرَى اتخاذه في اللحظة التي جَرَى فيها تبديل اللونين الأحمر والأزرق للمنحنيات؛ ما يعني حالة عبور، أي انتقال الخدمة من الخليّة المخدّمة الحالية إلى الخليّة الهدف، مع العلم أنّ كل منحنٍ للخليّة المُخدّمة أو الهدف له لونان، أحمر وأزرق لتمييزه قبل اتخاذ قرار التسليم وبعده، كما جَرَى في الشكل 3-6.



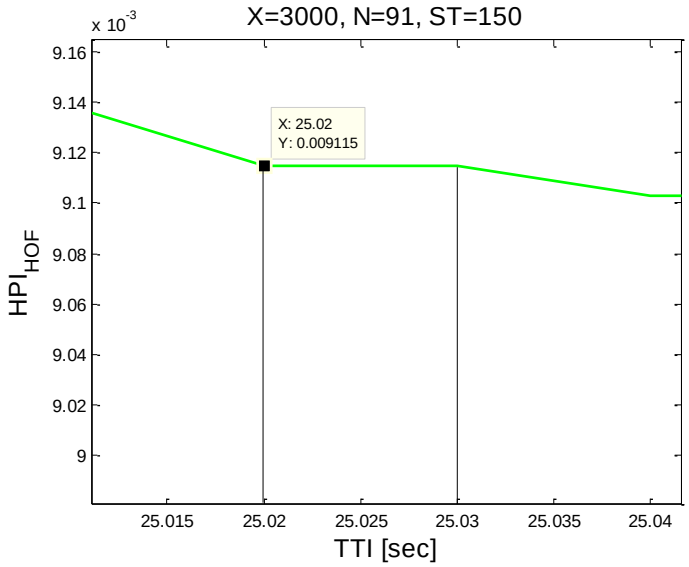
الشكل 3-34: منحني متوسط SINR للخليّة المُخدِّمة والخليّة الهدف للمستخدم الرابع الذي يتحرك بسرعة 240 كم/ساعة. (الباحث).

يوضّح الشكل 3-35 القيم التكيُّفيّة للمُوسِط HM وفقاً للعلاقة (3-14) وقيم TTT التي جَرَى تكييفها مع قيم HM والسرعة "العالية جداً" للمستخدم الرابع وفقاً للعلاقة (3-28)، حيث أعلى قيمة للموسط TTT هي 558 ميلي ثانية تقابل اللحظة الزمنية التي جرى فيها اتخاذ قرار التسليم لهذا المستخدم الذي تبلغ سرعته 240 كم/ساعة. يُلاحَظ هنا أنّ قيمة TTT في الجدول 3-1 المقابلة للسرعة العالية البالغة 230 كم/ساعة هي 5120 ميلي ثانية، لكن العلاقة (3-28) تُرجِع القيمة 558 ميلي ثانية. في الواقع، ليس الجدول 3-1 هو ما نستخدمه لاختيار القيمة التكيّفيّة للمُوسِط TTT، ولكن الهدف الرئيس من إنشاء الجدول 3-1 تطوير تابع رياضي تكيُّفي مناسب للزمن اللازم للقدح TTT بدلالة كل من القيمة التكيّفيّة لهامش البطاء HM وسرعة تجهيزة المستخدم للحصول على العلاقة (3-28) والشكل 3-8.



الشكل 3–35: منحني تغيُّر القيم التكيّفيّة للموسطين HM وTTT للمستخدم الرابع الذي يتحرك بسرعة 240 كم/ساعة. (الباحث).

كنتيجة رئيسية، ومن خلال تكبير منطقة الرسم في الشكل 3–20، يؤكد الشكل 3–36 أنّ مؤشِّر أداء التسليم الخاص بأحداث فشل التسليم RLFHOs للخوارزميّة المقترحة في هذا البحث يبقى ثابتاً بين اللحظتين الزمنيتين 25.02 ثانية و25.03 ثانية؛ مما يعني عدم وجود أحداث RLFHOs ضمن هذه الفترة الزمنية، وهذا يؤكد أنّ وجود القيم التكيُّفيّة العالية نسبياً للمُوسِط TTT مع قيم عالية لهامش البطاء HM التكيفي مع السرعة العالية لا يؤدي بالضرورة، وفقاً للنموذج المقترح في هذا البحث، إلى حدث فشل في التسليم RLFHO.



الشكل 3–36: منحني يبيّن ثبات مؤشّر الأداء HPI_{HOF} في السيناريو الخامس لمستخدم يتحرك بسرعة عالية بين اللحظتين 25.02 و25.03 ثانية. (الباحث).

يوضّح مثال المستخدم الرابع أنّ "السرعة العالية نسبياً" جنباً إلى جنب مع "القيم العالية نسبيّاً لهامش البطاء HM والزمن اللازم للقدح TTT" لا تؤدي بالضرورة إلى فشل في الوصلة الراديويّة RLF، حيث لدينا حدث تسليم قد وقع هنا ولكن بدون حدث RLFHO. هذا يعني أنّ القيم عالية نسبيّاً لكل من HM وTTT والسرعة لا تؤدي بالضرورة إلى حدث RLF. وبالتالي، يمكن القول أنَّ قيمة TTT المقابلة ليست "عالية جدًا" في هذه الحالة، وحتى أنّها ليست "عالية جدًا" وفقًا لوجهة النظر التقليديّة بشأن الصفة "عالية" لقيمة TTT نظراً لأنّ القيم العالية للزمن اللازم للقدح TTT وفقًا لمواصفة 3GPP هي تلك التي تزيد عن 1024 ميلي ثانية، لكننا حصلنا على قيمة أقل من 560 ميلي ثانية في حالة المستخدم الرابع من أجل سرعة مقدارها 240 كم/ساعة. هذا يعني أنّ نموذجنا قادر على مطابقة حالة المستخدم هذه مع الشبكة وإيجاد قيم مناسبة لكل من HM وTTT بحيث يكون لدينا قرار تسليم ناجح وسليم.

8.3 خاتمة الفصل

قدَّم هذا الفصل آليّة تكيُّفية لضبط قيم المُوسِطات HCPs فيما يتعلق باتخاذ قرارات التسليم داخل الشبكة HetNet لنظام الاتصال LTE-A، مع الأخذ في الحسبان الحالة الحركيّة للمستخدم. جرتْ صياغة هذه الآليّة الجديدة في سياق تقنيات SON لأمثلة متانة الحركيّة MRO في النظام LTE-A استجابةً لمتطلبات النظام. هَدَفَتْ الخوارزميّة المقترحة إلى تقليل عدد أحداث PPHOs وRLFHOs إلى الصفر تقريباً. تحدد هذه الخوارزميّة الجديدة قيم المُوسِطات HCPs بشكل تكيُّفي مع كل من موضع المستخدم وسرعته. يجري تحقيق ذلك من خلال تطوير توابع رياضيّة مبتكرة تعتمد على موسطات تصميميّة أساسيّة في قرار التسليم، مثل RSRP وSINR. ومن ثمّ، جرى اكتشاف علاقة قوية بين سرعة تجهيزة المستخدم وبين الموسطات HM وTTT. جرى ذلك دون الحاجة إلى تعريف أي عتبات أداء محددة مسبقاً للمؤشِّرات HOFR وPPHOR ودون الحاجة إلى خطوات غير مبررة لضبط قيم الموسطات HCPs المعمول بها في أغلب الأدبيّات. أظهَرَت دراستنا أنّ موسطات التحكُّم بالتسليم مرتبطة ببعضها البعض. بالنتيجة، وجدنا أنّ هذا الارتباط هو حاجة مُلحّة لتحديد قيم الموسطات HCPs المناسبة لاتخاذ قرار التسليم الناجح بما يتناسب والظروف الحركيّة للمستخدم بالنسبة لخلايا الشبكة. وبالتالي، يمكن أن يمثِّل هذا الارتباط ضرورةً منطقية وشرطاً أساسياً لأي خوارزميّة SON مستقبلية تتضمن علاقة تابعية بين HM وTTT يمكن تطويرها انطلاقاً من النموذج المقترح في هذا الفصل، وبحيث لا ينبغي تعيينهما في النظام بمعزل عن قيم بعضهما البعض، كما هو الحال في الأدبيّات. إذن، إنّ تعيين قيم المُوسِطات HCPs لتلبية متطلبات إدارة حركيّة المستخدمين يجب، بطريقة ما، أن تفترض علاقة مباشرة بين هذه المُوسِطات وألا تُعَدُّ هذه المُوسِطات مُستقلّة عن مقاييس النظام. من الواضح أنّ هذه الفكرة ترفع أداء النظام بشكل عام، كما رأينا في قسم النتائج، ولا شك بأنّ هناك حاجة إلى تطوير وجهة النظر هذه مستقبلاً حول العلاقة بين المُوسِطين HM وTTT فيما يتعلق بقضيّة أمثلة متانة الحركيّة MRO.

يُعرَض في الفصل التالي خوارزميّة مُطوَّرة ضمن سياق وظيفة الأمثلة الذاتيّة للشبكة SON-LTE-A-HetNet لإدارة تخصيص الموارد الراديويّة من خلال أمْثَلِةْ تخصيص هذه الموارد إلى مستخدمي الشبكة لتحسين معدّل الإنتاجيّة ومعدّل الخدمة.

الفصل الرابع

تطوير خوارزميّة تخصيص الموارد ذاتيّة التنظيم

Improving Self-organized Resource Allocation Algorithm

الفصل الرابع

تطوير خوارزميّة تخصيص الموارد ذاتيّة التنظيم Improving Self-organized Resource Allocation Algorithm

يعالج هذا الفصل مسألة إدارة الموارد الراديويّة RRM في الشبكات غير المتجانسة HetNets والمكوَّنة من خلايا ماكرويّة وخلايا صغيرة (فمتويّة وبيكويّة) للنظام LTE-A. تُراجَع إستراتيجيّات تخصيص الموارد المتاحة للنظام LTE-A HetNet، ويُقترَح مخطَّط scheme لتخصيص الموارد مُنظَّم ذاتيّاً نصطلح عليه Self-Organized Reuse Resources Allocation (SORRA). يتجلّى هذا المخطّط بالبحث عن أفضل عنقود إفرادي Best Individual Cluster من الخلايا (مهما كان نمطها صغيرة أو كبيرة) يكون محيطاً بكل مستخدم على حِدة لتنفيذ التخصيص المناسب للموارد المتاحة وفي نفس الوقت للتقليل من تداخل الخلايا في الوصلة الهابطة. يُقارَن أداء الخوارزميّة المُقترحة بمثيلاتها التقليديّة مثل إعادة الاستخدام التردّدي الكسري الثابت Strict FFR (StFFR)، والمرن SoFFR. بالنتيجة نحصل على تحسين في كل من معدّل الخدمة، ومعدَّل إنتاجيّة الشبكة.

1.4 مقدمة

يتجلّى الغرض الأساسي من نشر الخلايا الصغيرة فائقة الكثافة Ultra-Dense Small Cells، في النظام LTE-A، أولاً، في تحسين سعة الشبكة من خلال تحقيق معدّلات نقل معطيات أعلى نتيجة قرب المستخدمين الداخليّين Indoor UEs (IUEs) من منطقة التغطية للخليّة الصغيرة، وتوسيع آليّة إعادة استخدام الموارد الراديويّة. وثانياً، في تحسين تغطية الشبكة (من خلال تغطية المناطق "الميّتة" التي تشكَّلت بسبب الاختراق penetration غير الكافي لإشارة الخلايا الماكرويّة للوصول إلى المستخدم) في البيئة الداخليّة IA [4]. كما ذكرنا سابقاً، تعمل شبكة الخلايا الصغيرة في النظام LTE-A HetNets على تحسين عمر البطاريّة والمساهمة في اتصالات أكثر ملاءمة للبيئة. إضافة إلى ذلك، تقوم المحطّات القاعديّة HeNBs بزيادة حركة عبور المعطيات الداخليّة مقارنة بالخلايا الماكرويّة؛ مما يزيد من قدرة المحطّات القاعديّة الكليّة على التخديم في الشبكة. فالشبكات غير المتجانسة Macro-Femto/Pico هي شبكات مفيدة لكل من المُشغِّل والمستخدم العميل على حدٍّ سواء[122].

يُعَد اقتراح محطّات الخلايا الصغيرة HeNBs ضمن بنية شبكة غير متجانسة حلّاً مناسباً لزيادة سعة الشبكة لمستخدمي الهواتف النقّالة [123]، ويمكن الحديث عن التطبيق الرئيس للخلايا الفمتويّة والبيكويّة على أنّها جزء رئيس من الشبكة لحل مشكلة ازدحام المستخدمين في جوار المحطّات القاعديّة

للخليّة الماكرويّة العامة MBS والانتقال إلى حالة تخديم بديلة من المحطّات القاعديّة المنزليّة HeNB، وذلك من خلال إنشاء نقاط شبكة قصيرة مجال التغطية داخل الشبكة الأم بأكملها لتُمثّلها مجالات تغطية الخلايا الصغيرة. إنّ الحصول على أداء أمْثَلي لهذه الشبكة في كل مكان من المنطقة الجغرافيّة التي يجري فيها تخطيط ونشر تجهيزات الشبكة يحتاج إلى خطّة فعّالة لتخصيص الموارد وتنسيق التداخل وتحقيق التعاون الوثيق المتّفق عليه المتّسق بين طبقة الخلايا الماكرويّة المُعرَّفة على أنّها طبقة الشبكة الأولى First Network Tier، وطبقة الخلايا الصغيرة الإضافيّة المُعرَّفة على أنها طبقة الشبكة الثانية Second Network Tier، ويتحقَّق ذلك من خلال استخدام تقانات SON بحيث يُنظَّم تخصيص الموارد ذاتيّاً.

من الواضح بالنسبة للشبكة غير المتجانسة أنّه يجب تقسيم الطيف الترددي المتاح بشكل مناسب بين طبقتي الشبكة الأولى والثانية؛ وذلك لتخديم أكبر عدد ممكن من المستخدمين، ولتحسين أداء اتصال القنوات الترديّة المتاحة من جهة (تحقيق أكبر قدر ممكن من معدّل الإنتاجيّة) مع مراعاة قضايا سعة الشبكة لتخديم المستخدمين من جهة أخرى (رفع معدّل الخدمة). يؤكِّد هذا ضرورة تحقيق إدارة موارد ذكيّة قادرة على تخصيص الموارد في الوقت المناسب للمستخدمين المناسبين، واختيار الخلايا المناسبة لهؤلاء المستخدمين في الشبكة الكلية. لذلك، فإنّ التحدّي المتوقّع للنظام LTE-A HetNets هو توفير إدارة تعاونيّة، يُراد لها أن تكون ذاتيّة التنظيم، للموارد وتخصيص القنوات والتحكّم في النفاذ لكل من مجموعتي مستخدمين هما مجموعة المستخدمين المرتبطين بالمحطّات القاعديّة للخلايا الماكرويّة MUEs، ومجموعة المستخدمين المرتبطين بالمحطّات القاعديّة للخلايا الصغيرة سواء أكانت خليّة فمتويّة Femto Cells Users (FUEs) أم بيكويّة Pico Cells Users (PUEs).

يمكن تخصيص الموارد في شبكة الخلايا Femto/Pico Cells على نحو مشابه لطريقة التخصيص المتّبعة في شبكة الخلايا الماكرويّة التقليديّة حيث يُستَخدَم نفس عرض المجال الترددي كون مجال التغطية لهذه الخلايا محدوداً، ولكن يجب القيام بذلك بطريقة تُجنّب التداخل فيما بين هذه الخلايا وبين الخلايا الماكرويّة عند مناطق الحواف وخاصّة مع اقتراب هذه الخلايا من بعضها جغرافيّاً، وذلك باعتماد آليّات إعادة الاستخدام التقليديّة StFFR وSoFFR. ولكن هذا يجعل إدارة الموارد الراديويّة RRM في الشبكة ككل أمراً صعباً خاصة مع محدوديّة الموارد الراديويّة المتاحة للمستخدمين MUEs. ولأنّ الخلايا الماكرويّة والخلايا الصغيرة تشترك في الموارد الراديويّة المتاحة (عرض المجال الترددي)، فقد يتسبّب ذلك في حدوث تداخل الطبقات التصالبي CroLI (بين إشارات المحطّات القاعديّة الفمتويّة والمحطّات القاعديّة الماكرويّة) وتداخل الطبقات المشترك CoLI (بين إشارات المحطّات الماكرويّة بعضها مع بعض أو بين إشارات المحطّات الفمتويّة بعضها مع بعض). في هذا السياق، يخفّف التخصيص المرن للموارد SoFFR من نوعي التداخل CoLI وCroLI، ولكنّه يؤدّي إلى ضعف كفاءة استخدام الطيف الترددي لاستخدامه عرض مجال صغير عند حواف الخلايا الماكرويّة.

جَرت معالجة تقليل التداخل بنوعيه جيّداً على نحو كافٍ في الأدبيّات، وقد بيّن البحث [124] صلاحيّة تقنيّة إعادة استخدام التردد الكسري FFR بنوعيها الصارم Strict والمرن Soft في تحقيق تداخل CroLI أصغري في الشبكة غير المتجانسة. لذلك، نفترض في هذا الفصل أنّ تداخل الطبقات التصالبي CroLI يجري تقليله، كمرحلة أولى، باستخدام أحد المخطّطات StFFR وSoFFR ونركِّز على آليّة تخصيص الموارد لكل مستخدم على حِدة في الشبكة من خلال البحث عن الخليّة المناسبة سواء أكانت خليّة ماكرويّة أم فمتويّة أم بيكويّة، وسنجد أنّ المخطّط المقترح هنا لتخصيص الموارد ذاتيّة التنظيم SORRA يُقلّل من تداخل الطبقات التصالبي CroLI ضمنياً، وفي نفس الوقت يُحَسِّن من معدّل إنتاجيّة الشبكة ومعدّل الخدمة بوضوح. سيتضمن في الفصل الخامس، تطويراً إضافياً لزيادة أداء النظام في مناعته ضد نوعي التداخل في الشبكة، وذلك من خلال تطوير خوارزميّة لتنسيق التداخل المشترك CoLI سيأتي على تفاصيلها لاحقاً.

بمراجعة المخطّطات المختلفة المُتاحة في الأدبيّات (الفقرة 2.4)، تبيّنَ أنّ هناك مستخدمين معيّنين في الشبكة عندما يطلبون الاتصال في وقت ما عشوائيّاً، فإنّ الطريقة التقليديّة في التخصيص سوف تَحرِم هؤلاء المستخدمين من موارد الطيف الترددي على الرغم من كون شدّة الاستطاعة المستقبلة من خليّة ما (فمتويّة أو بيكويّة أو ماكرويّة) مناسبة، ويرفض الاتصال إذا لو جَرَى اعتماد آليّة ربط راديوي مبنيّة فقط على قيود مستوى شدّة الاستطاعة المستقبلة RSRP. لمعالجة هذه المشكلة، نقترح مخطّط SORRA للشبكة LTE-A HetNet الذي يوفّر أقصى حدّ نسبيّاً من معدّل الإنتاجيّة ومعدّل الخدمة مقارنة بآليّة التخصيص التقليديّة. إنّ السِمَة المُميّزة للمخطّط SORRA هي أنّه فضلاً عن المناعة العالية ضد التداخل والذي توفّره أصلاً تقنيّة التخصيص FFR، يضمن "العدالة" في تخصيص الموارد خاصّة مع وجود الخلايا الصغيرة بكثافة في محيط المستخدم الجديد الذي يطلب الاتصال. وتجدر الإشارة إلى أنّه على الرغم من توضيح المخطّط المقترح في إطار تقنيّة النفاذ المتعدّد باقتسام التردد المتعامد OFDMA والمُعتَمَدة في النظام LTE-A، إلاّ أنّ النموذج المقترح هذا قابل للتطبيق على أي نظام خَلَوي متقدّم عموماً، هذا يعني إمكانيّة تطبيقه في منظومات الجيل الخامس أو تطبيقه في المراحل الأولى لعمليّة تطوير الشبكة من الجيل الرابع إلى الجيل الخامس كما هو مطلوب عند مُشغِّل الاتصالات الخَلَويَّة "وفا" [4]؛ كما يوفّر المخطّط المقترح SORRA هنا إطاراً عامّاً لتخصيص الموارد ذاتيّة التنظيم في سياق تقانات SON التي يمكن تطبيقها على أي شبكة غير متجانسة.

2.4 الدراسات المرجعية

1.2.4 الطرائق المعتمدة على تقسيم الموارد Resource Partitioning based methods

أبسط آليّة لتقسيم الموارد بين الخلايا الماكرويّة والخلايا الصغيرة إعادة تخصيص جميع الموارد الترددّيّة لجميع الخلايا الصغيرة في الشبكة. ويُعرَف هذا بإعادة استخدام التردد بمعامِل واحد، Frequency Reuse 1، ويُعَد تخصيص الموارد هذا فعّالاً في استثمار الموارد الراديويّة. ولكنّه قد يزيد التداخل من النمط CoLI بين الخلايا الصغيرة بشكل كبير عندما تزداد أعدادها في الشبكة. اقترح المؤلّفون في [15,16,17] إعادة استخدام التردد الكسري FFR من أجل شبكة خلايا فمتويّة في النظام LTE-A HetNet القائمة على تقنيّة OFDMA، وقاموا باعتماد تخصيص متعامد خاص بالخلايا الفمتويّة هو نفسه الموارد الراديويّة المستخدمة لمنطقة الخليّة الماكرويّة المركزيّة والمجاورة لها (أي الخلايا الصغيرة التي تقع بالقرب من المحطّات MBS) وفي نفس الوقت اعتماد تخصيص مشترك للخلايا الفمتويّة البعيدة (الواقعة بعيداً عن المحطّة MBS المركزيّة أي تلك المتواجدة عند حواف هذه المحطة أو أبعد من هذه الحواف). تَضْمَن هذه الطريقة المقترحة التقليل من التداخل المؤثِّر في المستخدمين FUEs والقريبين من المحطّات MBS. من جهة أخرى، اقتُرِحَ في البحث [18] التقسيم الديناميكي للموارد Dynamic resource partitioning لتجنّب التداخل من النمط CroLI، حيث تُمنَع الخلايا الصغيرة من النفاذ إلى الموارد الراديويّة المخصّصة لمستخدمي MUEs. وأمّا في البحث [19]، فقد اقتَرَح المؤلّفون طريقة منخفضة التعقيد الحسابي مقارنة بالأعمال السابقة لتجنّب التداخل العشوائي الحاصل بين الخلايا الصغيرة أي التداخل من النمط CoLI. في [19] جَرى تخصيص مجموعة جزئيّة عشوائيّة من الموارد لكل خليّة صغيرة مع الأخذ بالحسبان فرضيّة أنّه من غير المحتمل أن تستخدم الخلايا الصغيرة موارد (من نفس عرض المجال) مطابقة لتلك المستخدمة في مجاوراتها من الخلايا الصغيرة. في البحث [20]، اقتُرِحَت خوارزميّة لإدارة الموارد مستندة إلى موضع المستخدم FUE التي تسمح للخليّة الفمتويّة بإعادة استخدام موارد الخليّة الماكرويّة لزيادة إعادة الاستخدام المكاني. قدَّم المؤلّفون في [20] مخطّط تقسيم يعتمد على تخصيص الموارد للخلايا الفمتويّة فقط التي لا تتطلّب تنسيقاً للتداخل. وأمّا في [21]، فاقتُرِحَت خوارزميّات لتجنّب التداخل من النمط CoLI، وهذه الخوارزميّات قائمة على تنسيق التداخل وإعادة الاستخدام الترددي المتكيّف Adaptive Frequency Reuse (AFR). اعتمد المؤلّفون في [21] التخصيص المتعامد للموارد للخلايا الصغيرة في البداية ثم جرى توزيع ترددات إعادة الاستخدام القائمة على تنسيق التداخل لتحسين كفاءة الطيف الراديوي. يضمن هذا التنسيق بين الخلايا الفمتويّة أنّ التداخل CoLI يبقى أقل من المستوى المسموح به، وذلك بسبب

التخصيص المتعامد الأوّلي المعمول به، ولكن تعاني هذه الطريقة من سوء استخدام الموارد عند استبداء Initialization الخوارزميّة المقترحة في [21].

2.2.4 طرائق تقسيم الموارد المعتمدة على تقسيم المنطقة الجغرافيّة Region Splitting based Resource Partitioning

يُعَد تنسيق التداخل بين الخلايا تحدياً كبيراً في ظل وجود آليّة معيّنة لتخصيص الموارد الراديويّة في الشبكات غير المتجانسة لأنّ المستخدمين الموجودين في منطقة حواف الخليّة سواء أكانت خليّة صغيرة أم ماكرويّة أكثر عِرضة للتداخل الأقوى الناجم عن الإشارات من محطّات القاعدة الماكرويّة MBS. لتحسين السعة وتحقيق تجربة مستخدم جيّدة يجري تحسين تقنيّات إدارة التداخل لتحسين الكفاءة الطيفيّة مثل إعادة استخدام التردد الكسري FFR جنباً إلى جنب مع إستراتيجيّات جدولة محسّنة باستخدام خوارزميّة أمْثَلة مناسبة للتنبّؤ بوضع المستخدم في الشبكة، اقتُرِحَ في البحث [22] نموذج للتقليل من آثار التداخل باعتماد آليّة التخصيص FFR بحيث يكون للخلايا الصغيرة منطقتا تغطية، منطقة مركز الخليّة Center Cell Region (CCR) ومنطقة حافة الخليّة(Edge Cell Region (ECR باعتماد مبدأ التقسيم الترددي نفسه في نمط التقسيم SoFFR.

تُخَصَّص الموارد في [22] وفق آليّة التخصيص FFR للمستخدمين في مناطق مركز الخليّة (إعادة الاستخدام بمُعامِل Nc بحيث توزُّع Nc من كتل الموارد الفيزيائيّة على منطقة مركز الخليّة الصغيرة) وفي حواف الخليّة الصغيرة (إعادة الاستخدام الجزئي بمعامِل Ne بحيث يوزُّع عدد Ne من كتل الموارد على المستخدمين في حواف الخليّة الصغيرة) وذلك بناءً على إشارة التداخل التي يُتَنَبَّأ بها، فضلاً عن استخدام عتبة للنسبة SINR في المنطقتين المركز CCR والحافّة ECR.

يتَّضح في هذا البحث أنّ مجموعة معيّنة من المستخدمين تُظهِر أداء أفضل من حيث معدّل الإنتاجيّة باستخدام آليّة FFR المُحسّنة المقترحة في [22]، ولكن العيب الرئيس فيه أنّ التركيز ينصب على مستخدمي الخلايا الصغيرة فقط دون الاهتمام بمستخدمي الخلايا الماكرويّة خاصّة عندما ينوي مستخدم ما أقرب إلى خليّة ماكرويّة الانتقال إلى مكان قريب من خليّة صغيرة في بيئة الاتصال ومع احتمالية كون الخليةالماكروية التي ابتعد عنها لا تتيح موارد كافية له، عندئذٍ ورغم كون الاستطاعة المستقبلة الأعظميّة التي يستقبلها هذا المستخدم متاحة من الخليّة الماكرويّة لا تتمكن من تخديمه ما يحتّم تنفيذ عمليّة تسليم محلي offload لهذا المستخدم من قبل الخليّة الصغيرة، وهو ما لم يُناقَش في [22]. من جهة أخرى، جرى في البحث [23] تقسيم منطقة تغطية الخليّة الماكرويّة إلى ثلاث أقسام داخليّة ومركزيّة وخارجيّة مكانيّة بدلاً من اثنين مركزيّة وحافة، وقُسِّمَ الطيف الترددي المتاح إلى أربعة أجزاء غير متداخلة، منها ثلاثة أجزاء من الطيف تتشارك فيها المنطقة الخارجيّة والداخليّة. جرى مشاركة الجزء المتبقّي من قبل المنطقة المركزيّة للخليّة الماكرويّة؛ إضافة إلى ذلك، تشترك الخلايا الصغيرة المتراكبة في هذا المخطّط جزئيّاً مع طيف الخليّة الماكرويّة. وقد جرى تحليل أداء مخطّط

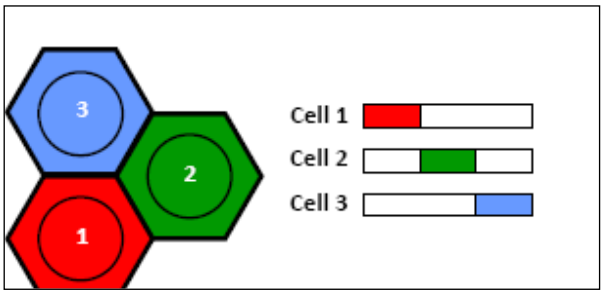
التخصيص المقترح في [23] من حيث معدل الإنتاجيّة، وتحليل أنصاف أقطار كل منطقة جغرافيّة جزئيّة ينتج عنها معدل الإنتاجيّة الأعظمي والأمثل. واستخدم المؤلّفون في هذا البحث برمجيّة ماتلاب لاستخلاص النتائج، وتوصَّلوا إلى تنوّعٌ في أنصاف الأقطار لكل من المنطقة الخارجية والمنطقة المركزيّة، وجرى خلط أنصاف أقطار المنطقة التي ينتج عنها معدل إنتاجيّة مثالي ووصفها على أنّها نصف القطر الأمثل، أي إنّ المخطط المقترح في [23] هدف إلى تحديد أنصاف أقطار أمْثَليّة للمناطق الثلاث التي يجري وفقها تقسيم الخليّة الماكرويّة. وقورن المخطّط المُقترح في [23] مع مخطّط إعادة استخدام التردد المرن التقليدي SoFFR من حيث معدل الإنتاجيّة. وسيعتمد في هذا البحث الآلية نفسها تقريباً مع تقليل عدد مناطق التقسيم الجغرافي إلى اثنتين فقط في الخليّة الماكرويّة الواحدة حتى لا يقلّل ذلك من الكفاءة الطيفيّة لقناة الاتصال في ضوء متطلّبات معدّلات نقل معطيات عالية.

3.4 مراجعة التقنيّات الأساسيّة للتخصيص وفق المبدأ FFR

1.3.4 إعادة استخدام التردد الكسري بمعامل 3 (FFR3)

يُعَد مخطط إعادة استخدام التردد بمعامل أكبر من الواحد المخطّط الأبسط لتقليل التداخل. يعتمد هذا المخطّط على تقسيم منطقة جغرافيّة إلى خلايا عددها N وتوزيع عرض المجال الترددي BW عليها وذلك بتخصيص مجال ترددي جزئيّ من عرض المجال الكلّي لكل خليّة من الخلايا. تَستخدم الخلايا المتجاورة مجالات ترددية جزئيّة مختلفة من عرض المجال الكلي لتجنُّب التداخل عند الإرسال في الوصلة الهابطة. ويُعاد استخدام المجالات الترددية الجزئيّة نفسها في الخلايا البعيدة، فعلى سبيل المثال عندما N=3، أي تقسيم عرض المجال الكلي إلى ثلاث مجالات ترددية جزئيّة يُستَخدم كل منها في خليّة واحدة من أصل ثلاث خلايا تُشكّل بمجملها عُنقوداً Cluster، كما هو موضَّح في الشكل 4-1، حيث تستخدم ثلاثة خلايا متجاورة مجالات جزئيّة متعامدة كل منها يساوي ثلث عرض المجال الترددي الكلّي، تشكّل مجموعة الخلايا الثلاث الكتلة الأساسيّة (العنقود الرئيسي في الشبكة) وهذا من أجل أي حجم منطقة جغرافيّة (مهما كان نصف قطر الخليّة الواحدة في العنقود). ويمكن تعميم هذا المبدأ بسهولة لمعامل تقسيم أكبر أو عدد خلايا أكثر من 3، ولكن يكون هذا على حساب الكفاءة الطيفيّة، أي على حساب عرض المجال الترددي المتاح لكل خليّة وعلى حساب معدّل نقل المعطيات الأعظمي الذي يمكن تحقيقه للمستخدمين. بكلمات أُخرى، في عمليّة إعادة استخدام التردّد بمُعامِل N=3 تُحاط كل خليّة بستّة خلايا مجاورة، كل منها يستَخدم مجالاً ترددياً مختلفاً عن الخليّة المركزيّة السابعة؛ ما يؤدي إلى تقليل التداخل بشكل جيّد لكن على حساب انخفاض الكفاءة الطيفيّة، بسبب استخدام ثُلث عرض المجال الترددي فقط في كل خليّة؛ ما يؤدي إلى ضياع ثُلثي عرض المجال الترددي المستخدم، وانخفاض معدّل نقل المعطيات [34,125]. يُلاحَظ أنّه حتى في حال نشر خلايا صغيرة في كل خليّة بحيث تأخذ كل منها جزء المجال الترددي من الجزأين المتبقيين من عرض المجال

الترّددي الكلّي فإنّ التداخل التصالبي من النمط CroLI سيكون كبيراً بين الخلايا الصغيرة والخليّة الماكرويّة التي تضُمّها في منطقتها الجغرافيّة (ضمن نفس اللون في الشكل 4–1)؛ وسوف يزداد التداخل المشترك من النوع CoLI بين الخلايا الصغيرة نفسها كونها تستخدم نفس المجال الجزئي الترّددي المستخدم في الخليّة الماكرويّة.

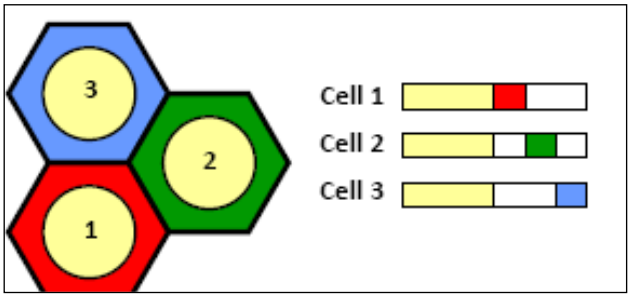


الشكل 4–1: مخطّط إعادة استخدام التردد الكسري بمعامل 3 [125].

2.3.4 إعادة استخدام التردد الكسري الصارم StFFR

تُعدُّ طريقة إعادة استخدم التردد الكسري الصارم StFFR أحد الحلول المستخدمة لمشكلة ضياع المجال الترددي في سياق إعادة الاستخدام الترددي، وتساهم في تقليل التداخل مع إمكانيّة استخدام أفضل للمجال الترددي كما يبيّن الشكل 4–2. يجري التقسيم وفق هذه الآليّة مثل الآليّة السابقة FFR3 ولكن مع فرق وحيد هو أنّ كل جزء ناتجاً عن نسبة التقسيم 1/3 وخاص بخليّة واحدة من الخلايا الثلاث في العنقود، ويُقسَّم المجال الترددي أيضاً إلى مجالين جزئيين، يكون الأول خاصّاً بمنطقة مركز الخليّة CCR، والثاني خاص بمنطقة حافتها ECR، بشرط أن يكون لكل منطقة تغطية مركز للخليّة الماكرويّة حصّة تعادل نصف المجال الترددي الكلي، ولحافتها حصّة تُعادل سُدس المجال الترددي الكلي، ويُخصّص كل سُدس منها لكل حافة من الحواف الثلاث، وأمّا النصف فيخصّص لكل مركز من مراكز الخلايا الماكرويّة الثلاث في العنقود الواحد. أي تُقسَّم المنطقة الجغرافيّة إلى ثلاث خلايا والمجال الترددي إلى مجالين جزئيين، يُستَخدم المجال الجزئي الأول في مراكز الخلايا الثلاث أمّا المجال الجزئي الثاني فيُقسَّم إلى ثلاثة مجالات يُستخدم كل منها على حواف خليّة واحدة فقط. في هذه الحالة تُحاط كل خليّة بستّة خلايا متجاورة تستخدم على حوافها مجالات مختلفة عن المجال المستخدم على حواف الخليّة المركزيّة. بهذه الطريقة نُحافظ على معدّل تقليل جيّد للتداخل بين الخلايا مع استخدام ثلثي المجال الترددي؛ ما يُحسّن الكفاءة الطيفيّة، ولكن يبقى ثُلث المجال الترددي غير مستخدم مع احتماليّة تداخل المجال المستخدم في مركز الخليّة بحسب نصف قطر مركز الخليّة ومساحة حوافها مع الخلايا المتجاورة [34,125]، ولكن عند نشر خلايا صغيرة في كل عنقود بحيث يُخصّص لكل منها نفس عرض المجال الترددي الكلي، نواجه مشكلة في طريقة التوزيع؛ إذ يمكن للكثير من المستخدمين الذين يتوقّعون أن يرتبطوا بالخلايا الماكرويّة ألّا تستطيع تخديمهم بسبب عدم إتاحة الموارد

من خليّة ماكرويّة قريبة مثلاً، وفكرة هذا البحث الاستفادة من خليّة صغيرة فمتويّة أو ميكرويّة قريبة يجري البحث عنها لأنّها توفّر نفس كتل الموارد الراديويّة المتاحة من الخليّة الماكرويّة، ولأنّ الشبكة تكون مُجهَّزة أصلاً للاتصال مع الخلايا الماكرويّة ضمن شرط استطاعة مُستقبلة عُظمى ويكون هذا الشرط غير كافٍ لإجراء التسليم المحلّي offload بين المستخدم والشبكة، ويجب البحث عن خليّة تتيح كتلة موارد فيزيائيّة PRB مناسبة في محيط هذا المستخدم فلا يقتصر شرط التسليم على استطاعة مستقبلة عُظمى، وهي الفكرة الرئيسيّة لمساهمتنا في هذا البحث.

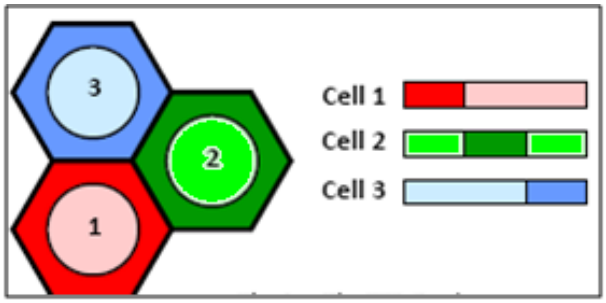


الشكل 4–2: مخطّط إعادة استخدام التردد الكسري من النمط StFFR [125].

3.3.4 إعادة استخدام التردد الكسري المرن SoFFR

يُوصَف النموذج الثالث من تقنيّات إعادة استخدام التردد الكسري بأنّه مرن SoFFR، ففي هذه الطريقة تُقسَّم المنطقة الجغرافيّة إلى ثلاث خلايا كما يبيّن الشكل 4–3 يُستخدَمُ المجال الترددي كاملاً في كل خليّة من الخلايا بحيث يُخصَّص ثلثا المجال الترددي في مركز الخليّة وثلث المجال الترددي على حواف الخليّة، بشكل مختلف عن التقنية StFFR فمراكز الخلايا تستخدم مجالات ترديّة جزئيّة مختلفة لتحسين تقليل التداخل مقارنة بالنمط السابق، كما هو موضّح يمين الشكل 4–3 حيث يجري اختيار المجال الجزئي المستخدم على حواف الخليّة فلا يتداخل مع المجالات المستخدمة على حواف الخلايا المجاورة. وبشكل مشابه للتقنيتين السابقتين، تكون كل خليّة محاطة بستّة خلايا ولكنّها تستخدم على حوافها مجالات ترددية مختلفة عن المجال الترددي المستخدم على حواف الخليّة المركزيّة، وبهذه الطريقة يستخدم المجال الترددي كاملاً لكن مع احتماليّة تداخل المجالات الترددية الجزئية المستخدمة في مركز الخليّة تبعاً لقيمة نصف قطر مركز الخليّة [34,125]، وهذه هي أفضل تقنيّة من بين تقنيات FFR ولكن، مثل حالة النمط StFFR، يسوء الحال بالنسبة إلى تخصيص كتل الموارد إذا جرى نشر خلايا صغيرة بشكل عشوائي وكثيف في كل خليّة ماكرويّة من الخلايا الثلاث من كل عنقود، حيث يعاني عندها مستخدمو الخليّة الماكرويّة MUEs من نقص كتل الموارد في الخلايا الماكرويّة ذات الاستطاعة العظمى، ورغم كون استطاعة الإرسال الخاصة بالخليّة الماكرويّة استطاعة جيّدة وتؤمن اتصالاً فعّالاً ومستمراً ولكنّها يمكن وباحتمال كبير ألّا توفّر كتلة الموارد المناسبة PRB في وقت حَرِج. تُقدِّم الخوارزميّة المقترحة في هذا البحث حلاً لهذه المسألة من خلال البحث عن خليّة ما صغيرة كانت أو ماكرويّة بحيث تؤمّن كتلة الموارد هذه، وفي الوقت نفسه يمكن أن توفّر استطاعة إرسال مناسبة

للمستخدم المعني بطريقة يمكن تنفيذ تسليم محلّي offload، مع الأخذ بالحسبان أنّ حركيّة المستخدم مهملة وأنّ تغيّرات موضعه بالنسبة للزمن عبارة عن تحرُّكات بطيئة في المكان، مثل جماهير ملعب كرة قدم كبير الحجم والمستخدمون فيه يتحرّكون ويتجاوز بعضهم بعضاً بسرعات صغيرة (مستقرّين مكانيّاً).



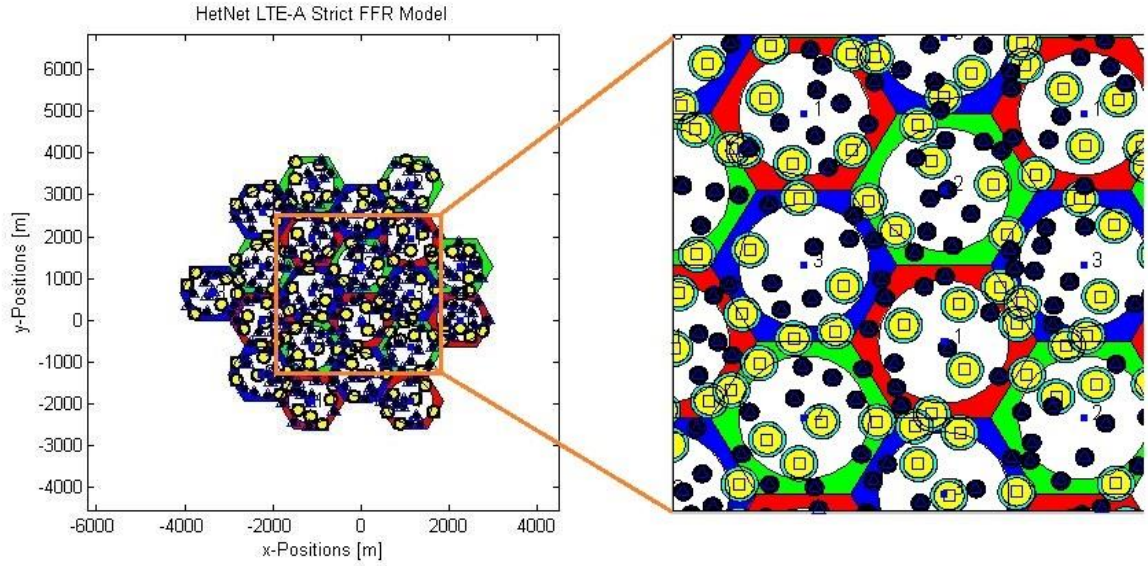
الشكل 4–3: مخطط إعادة استخدام التردد الكسري من النمط SoFFR [125].

4.4 نموذج النظام والحل المقترح

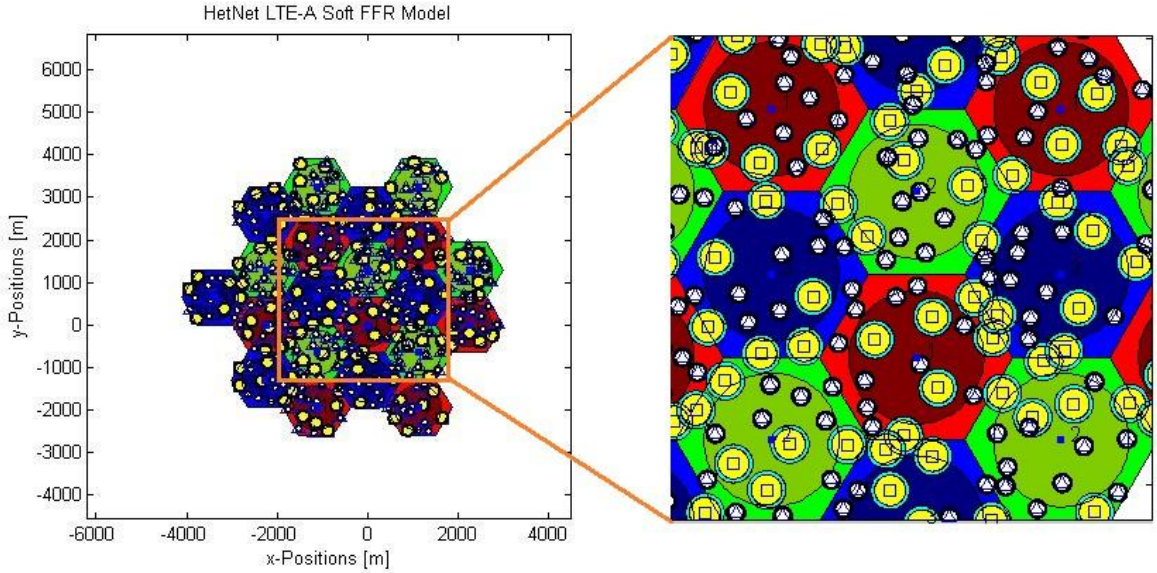
1.4.4 تخطيط الشبكة LTE-A HetNet Planning

نفترض سيناريو إرسال الوصلة الهابطة في الشبكة LTE-A HetNet والقائمة على تقنيّة النفاذ المتعدّد باقتسام التردد المتعامد OFDMA بحيث يكون لكل مستخدم مخصّصات ترددية متعامدة وفق تقنيّة OFDM تتضمّن كتلة الموارد الفيزيائيّة المراد إرسالها، وله أيضاً حيّزات زمنيّة Time Slots بحيث يتَّصل أكثر من مستخدم في الوقت نفسه بكل خليّة من خلايا الشبكة، ولكل منهم حصّة ترديديّة وزمنيّة موافقة [125]. يتألف نموذج الشبكة المُفتَرَض هنا من سبعة عناقيد من الخلايا الماكرويّة، ويتكوّن كل عنقود من ثلاث خلايا ماكرويّة تقع في مركز مجال تغطية على شكل مسدّس Hexagonal كما هو مألوف، ويكون نصف قطر الخليّة الواحدة هو $R_{MacroCell}$. وتتضمن شبكتنا التي نحاكي نموذجنا فيها من 21 خليّة ماكرويّة. ونفترض أيضاً وجود عدد من الخلايا الصغيرة في كل منطقة تغطية للخليّة الماكرويّة بحيث يساوي عدد الخلايا الفمتويّة $N_{FemtoCell}$ وعدد الخلايا البيكويّة يساوي $N_{PicoCell}$ وتكون متباعدة كفاية عن بعضها وعن كل محطّة قاعديّة للخليّة الماكرويّة، وتكون موزَّعة عشوائياً نظراً لافتراض حالة عدم وجود اتفاق بين مركز الشبكة الكليّة ومناطق نشر الخلايا الصغيرة في بيئة الاتصال. وتتضمن الشبكة الكليّة المدروسة $21 \times (N_{FemtoCell} + N_{PicoCell})$ خليّة صغيرة. وفي الشبكة LTE-A HetNet القائمة على OFDMA، كما ذكرنا آنفاً تُقسَّم موارد النظام على طول فترات التردد (الحوامل الجزئيّة Subcarriers) والفترات الزمنيّة، وتُجَدوَل هذه الموارد في وحدات كتل الموارد الفيزيائيّة PRBs فيكون لكل مستخدم كتلة موارد واحدة مقابلة لكل فترة زمنيّة واحدة يجري تخديمه بها أثناء الاتصال الراديوي، نفترض أنّ كل كتلة موارد PRB (لها عرض المجال 180 KHz) تتكوّن من 12 حامل جزئي متعامد وفق تقنية OFDMA [5]. نفترض في هذا البحث أنّ عدداً يساوي

N من كتل الموارد PRBs يكون متاحاً لكل من الخلايا الماكرويّة والصغيرة بنفس المقدار، ونتّبع في نموذجين متباينين للمحاكاة طريقتين لتوزيع هذه الموارد على الخلايا الماكرويّة والصغيرة استناداً إلى الطريقتين الأصليتين في التخصيص وهما الطريقة الصارمة Strict FFR والطريقة المرنة SoFFR. يبيّن الشكل 4-4 نموذج الشبكة في حالة StFFR، ويبيّن الشكل 4-5 نموذج الشبكة في حالة SoFFR.



الشكل 4-4: تخطيط الشبكة وفق مخطط StFFR (الباحث).



الشكل 4-5: تخطيط الشبكة وفق مخطط SoFFR (الباحث).

2.4.4 نموذج انتشار الإشارة في بيئة الاتصال Propagation Model

يتطلّب تخطيط الخليّة تقدير استطاعة الإشارة المستقبلة RSRP في كل أجزاء المساحة المغطّاة. وعموماً، تتخامد الإشارة المرسلة من المحطة القاعديّة سواء أكانت ماكرويّة MeNB أم منزليّة HeNB، وذلك بسبب عوامل عدّة؛ هي خسارات ناجمة عن فقد المسار، وخسارات ناجمة عن الخفوت السريع الناتج نتيجة ظاهرة تعدُّد المسارات Multipath Fading، وخسارات ناجمة عن الخفوت البطيء الناتج عن ظاهرة خفوت الظل. نعتمد العلاقة (4−1) في النمذجة [126].

$$P_{RX} = P_{TX} - L_{pathloss} - L_{fastfading} - L_{shadwoing} \qquad (1-4)$$

تمثِّل P_{RX} الاستطاعة المستقبلة RSRP من قبل مستخدم يبعد مسافة معيّنة عن المحطّة القاعديّة، وتمثِّل P_{TX} استطاعة إرسال المحطّة القاعديّة، ويمثِّل $L_{fastfading}$ الفقد الناجم عن الخفوت السريع الذي ننمذِجُهُ هنا بخفوت رايليه الذي يتعلّق بالتردد الحامل وبحركيّة المستخدم وبالفترة الزمنيّة للاستقبال وبتردد أخذ العينات من الإشارة المستقبلة. و$L_{shadwoing}$ هو الفقد الناجم عن ظاهرة الخفوت البطيء (خفوت الظل) الذي ننمذِجُهُ بحيث يتبع التوزيع اللوغاريتمي الطبيعي Log-Normal بمتوسط يساوي 0 dB وانحراف معياري 5 dB [126]، ونفترض بشكل مقبول عموماً، أنّ كلاً من فقد الخفوت السريع والبطيء واحد سواء أكانت الخليّة التي تُرسل الإشارة ماكرويّة أم صغيرة. وبالنسبة للمقدار $L_{pathloss}$ فهو يمثِّل الفقد الناجم عن مسار الإشارة من هوائي الإرسال إلى هوائي الاستقبال، وتختلف نمذجته بحسب نوع الخليّة التي تُرسل الإشارة (ماكرويّة أو صغيرة). اعتمد في هذا البحث نموذج أوكمورا هاتا Okumura-Hata للتنبؤ بفقد المسار الناجم عن حالة إرسال من الخليّة الماكرويّة، ويُعطَى بالعلاقة (4−2) من أجل المناطق المدنية، والضواحي بالعلاقة (4−3)، ومن أجل المناطق المفتوحة بالعلاقة (4−4) [127].

$$L_{pathloss}{}^{Macro}\,(urban) = A + B \times \log_{10}(d) \qquad (2-4)$$
$$L_{pathloss}{}^{Macro}\,(suburban) = A + B \times \log_{10}(d) - C \qquad (3-4)$$
$$L_{pathloss}{}^{Macro}\,(open/Rural) = A + B \times \log_{10}(d) - D \qquad (4-4)$$

وتعطى المعاملات A وB وC وD بالعلاقات من (4−5) إلى (4−8) [127].

$$A = 69.55 + 26.16 \times \log_{10} f - 13.82 \times \log_{10}(H_b) - a(H_m) \qquad (5-4)$$
$$B = 44.9 - 6.55 \times \log_{10}(H_b) \qquad (6-4)$$
$$C = 5.4 + 2 \times (\log_{10}(f/28))^2 \qquad (7-4)$$
$$D = 40.94 + 4.87 \times [\log_{10}(f)]^2 - 18.33 \times \log_{10}(f) \qquad (8-4)$$

ويعطى معامل تصحيح طول الهوائي $a(H_m)$ من أجل المناطق الصغيرة والمتوسّطة والمفتوحة بالعلاقة (4−9)، ومن أجل المناطق الكبيرة بالعلاقة (4−10) [127].

$$a(H_m) = 0.8 + (1.1 \times \log_{10} f - 0.7) \times H_m - 1.56 \times \log_{10} f \qquad (9-4)$$
$$a(H_m) = 3.2 \times \left(\log_{10} \times (11.75 H_m)\right)^2 - 4.97 : 200 \le f \le 1500 \qquad (10-4)$$

حيث:

L: فقد المسار، ويقاس بالديسيبل dB.

H_b: ارتفاع هوائي المحطة القاعدية، ويقاس بالمتر m.

H_m: ارتفاع هوائي الهاتف النقّال، ويقاس بالمتر m

f: تردد الإرسال بالميغا هرتز MHz.

d: المسافة بين المحطة القاعديّة والهاتف النقّال بالكيلومتر km.

ويكون مجال قيم الموسطات في العلاقات السابقة كما يلي:

التردد f بين 200 ميغا هرتز و1500 ميغا هرتز.

ارتفاع هوائي الهاتف النقّال H_m بين 1 − 10 متر.

ارتفاع هوائي المحطة القاعديّة H_b بين 30 متر و200 متر.

المسافة بين المرسل والمستقبل بين 1 كيلومتر و20 كيلومتر

من جهة أُخرى، وللتبسيط، يُستخدم نموذج فقد المسار الخاص بالخلايا الفمتويّة في الشبكة وفق العلاقة (4−11) [126].

$$L_{pathloss}{}^{Femto} = 147 + 36.7 \times \log_{10}\left(\frac{d}{1000}\right) \qquad (11-4)$$

حيث يُقاس بعد تجهيزة المستخدم d عن هوائي الإرسال هنا بالمتر، وتُقاس قيمة الفقد بالديسبل dB. ونستخدم نموذج فقد المسار الخاص بالخلايا البيكويّة محسوباً بالديسبل وفق العلاقة (4−12) [21].

$$L_{pathloss}{}^{Pico} = \bar{L}_p(R_0) + 10 \times \gamma \times \log_{10}(R) + L_f(n) \qquad (12-4)$$

وفيها يمثِّل $\bar{L}_p(R_0)$ فقد المسار المرجعي عند مسافة تساوي متراً واحداً، ويمثِّل γ مُعامِل متعلّق بفقد المسار الخاص بالخلايا البيكويّة، ويمثِّل $L_f(n)$ مقدار التخامد في الإشارة عند مرورها بأكثر من حاجز أو جدار بعدد يساوي n. تتضمَّن العلاقة (4−11) فقد الخفوت البطيء، ولكنّنا هنا أزلناه من العلاقة (4−12) لأنه ضُمّن أصلاً في معادلة الاستطاعة المستقبلة في العلاقة (4−1). بشكل خاص، يأخذ المقدار $L_f(n)$ القيمتين 10 dB عند التردد 900 MHz و16 dB عند حدود التردد 1.7 GHz، وعموماً، يبيّن الجدول (4−1) قيمَه من أجل حالة البيئة الداخليّة التي ترسل فيها المحطّة البيكويّة. ويبيّن الجدول (4−2) القيم الممكنة لكل من $\bar{L}_p(R_0)$ وγ و$L_f(n)$.

الجدول 4—1: قيم التخامد في إشارة الإرسال للخليّة البيكويّة [128]

Signal attenuation through	Loss (dB)
Window in brick wall	2
Metal frame, glass wall in building	6
Office wall	6
Metal door in office wall	6
Cinder wall	4
Metal door in brick wall	12.4

الجدول 4—2: قيم مُوسِطات حساب فقد المسار الخاص بالخلايا البيكويّة [128]

Environment	Residential	Office	Commercial
$\bar{L}_p(\mathrm{R}_0)$ (dB)	38	38	38
γ	2.8	3.0	2.2
$L_f(\mathrm{n})$	4n	$15 + 4(\mathrm{n}-1)$	$6 + 3(\mathrm{n}-1)$

3.4.4 النسبة SINR واعتبارات قرارَي تخديم المستخدم والتسليم بين الخلايا

تختلف معادلة النسبة SINR بحسب نوع الخليّة المخدِّمة للمستخدم، لأنّ هذه النسبة هي بالتعريف نسبة استطاعة الإشارة المرجعية المُستقبَلة من الخليّة المخدِّمة RSRP إلى مجموع استطاعات إشارات التداخل الناتجة عن باقي خلايا الشبكة مضافاً إليها استطاعة الضجيج الحراري للمستقبل التي ترتبط بكل من k ثابت بولتزمان، وT درجة حرارة المستقبل، وB عرض المجال الترددي المتاح للمستخدم (عرض المجال الترددي المقابل لكتلة الموارد الفيزيائية PRB المتاحة من الخليّة الماكرويّة أو الفمتويّة أو البيكويّة المُخدِّمة) [126]، وتجدر الإشارة هنا إلى أنّ الخليّة المُخدمة يمكن أن تكون ماكرويّة أو فمتويّة أو بيكويّة، أي يوجد ثلاثة أشكال لمعادلة SINR نكتبها كما يلي.

- معادلة SINR حين تكون الخليّة المُخدِّمَة هي خليّة ماكرويّة: لتكن $\mathrm{RSRP}_{\mathrm{macro}}^{\mathrm{j,i}}$ هي الاستطاعة المستقبلة بالنسبة لمستخدم ما في الشبكة تخدِّمه خليّة ماكرويّة رقمها $1 \le \mathrm{j} \le 3$ وتنتمي إلى العنقود ذي الرقم $1 \le \mathrm{i} \le 7$، ولتكن $\mathrm{RSRP}_{\mathrm{OtherMacros}}$ مجموع الأستطاعات المستقبلة من باقي الخلايا الماكرويّة في الشبكة، ولتكن $\mathrm{RSRP}_{\mathrm{AllFemtos}}$ هي مجموع استطاعات إشارات التداخل الناجمة عن كل الخلايا الفمتويّة في الشبكة غير المتجانسة، ولتكن $\mathrm{RSRP}_{\mathrm{AllPicos}}$ مجموع استطاعات إشارات التداخل الناجمة عن كل الخلايا البيكويّة في هذه الشبكة، ولتكن استطاعة الضجيج الحراري للمستقبل $\mathrm{P}_{\mathrm{ThermalNoise}} = \mathrm{kTB}$، عندئذٍ تُكتَب SINR المقيسة بالنسبة لهذا المستخدم وفق العلاقة (4–13).

$$\mathrm{SINR}_{\mathrm{macro}}^{\mathrm{j,i}} = \frac{\mathrm{RSRP}_{\mathrm{macro}}^{\mathrm{j,i}}}{\mathrm{RSRP}_{\mathrm{AllFemtos}} + \mathrm{RSRP}_{\mathrm{AllPicos}} + \mathrm{RSRP}_{\mathrm{OtherMacros}} + \mathrm{P}_{\mathrm{ThermalNoise}}} \qquad (13-4)$$

- معادلة SINR حين تكون الخليّة المُخدِّمَة هي خليّة فمتويّة: لتكن $\mathrm{RSRP}_{\mathrm{Femto}}^{\mathrm{h,j,i}}$ هي الاستطاعة المستقبلة بالنسبة لمستخدم ما في الشبكة تخدِّمه خليّة فمتويّة رقمها $1 \le \mathrm{h} \le \mathrm{N}_{\mathrm{FemtoCell}}$ الموجودة في منطقة الخليّة الماكرويّة رقم $1 \le \mathrm{j} \le 3$ وتنتمي إلى العنقود رقم $1 \le \mathrm{i} \le 7$، ولتكن $\mathrm{RSRP}_{\mathrm{OtherFemtos}}$ مجموع الإستطاعات المستقبلة من باقي الخلايا الفمتويّة في الشبكة، ولتكن $\mathrm{RSRP}_{\mathrm{AllMacros}}$ مجموع استطاعات إشارات التداخل الناجمة عن كل الخلايا الماكرويّة في الشبكة غير المتجانسة، ولتكن $\mathrm{RSRP}_{\mathrm{AllPicos}}$ مجموع استطاعات إشارات التداخل الناجمة عن كل الخلايا البيكويّة في هذه الشبكة، عندئذٍ تُكتَب SINR المقيسة بالنسبة لهذا المستخدم وفق العلاقة (4–14).

$$SINR_{Femto}^{h,j,i} = \frac{RSRP_{Femto}^{h,j,i}}{RSRP_{AllMacros} + RSRP_{AllPicos} + RSRP_{OtherFemtos} + P_{ThermalNoise}} \quad (14-4)$$

- معادلة SINR حين تكون الخليّة المُخدِّمَة خليّة بيكويّة: لتكن $RSRP_{Pico}^{p,j,i}$ الاستطاعة المستقبلة بالنسبة لمستخدم ما في الشبكة تخدمه خليّة البيكويّة رقمها $1 \le p \le N_{PicoCell}$ الموجودة في منطقة الخليّة الماكرويّة الرقم $1 \le j \le 3$ والتي تنتمي إلى العنقود رقم $1 \le i \le 7$، ولتكن $RSRP_{OtherPicos}$ مجموع الاستطاعات المستقبلة من باقي الخلايا البيكويّة في الشبكة، ولتكن $RSRP_{AllMacros}$ مجموع استطاعات إشارات التداخل الناجمة عن كل الخلايا الماكرويّة في الشبكة غير المتجانسة، ولتكن $RSRP_{AllFemos}$ مجموع استطاعات إشارات التداخل الناجمة عن كل خلايا الفمتويّة في هذه الشبكة، عندئذٍ تُكتَب SINR المقيسة بالنسبة لهذا المستخدم وفق العلاقة (4-15).

$$SINR_{Pico}^{p,j,i} = \frac{RSRP_{Pico}^{p,j,i}}{RSRP_{AllMacros} + RSRP_{AllFemtos} + RSRP_{OtherPicos} + P_{ThermalNoise}} \quad (15-4)$$

تحدّد قيمة النسبة SINR جودة الوصلة الراديويّة، فإذا كانت أكبر من عتبة معينة، تكون عندئذٍ الوصلة الهابطة صالحة للإرسال ويمكن تخديم المستخدم بكتلة موارد خلال فترة زمنية مخصصة له [126]، وإلا لا يمكن تخديمه، وهنا تسقط المكالمة Dropped Call نتيجة انخفاض قيمة SINR. ولكن، لا يكفي شرط عتبة SINR وحده، فحتى يجري التخديم يجب توفر كتلة موارد PRB مناسبة لهذا المستخدم تكون متاحة من قبل الخليّة المعنيّة. وهكذا إذا كانت الموارد متاحة يكون المستخدم عندئذٍ قادراً على الاتصال مع الشبكة وتبادل المعطيات، وإلا لا يمكن تخديمه. إذن يجب تحقيق شرطين متلازمين لتخديم المستخدم هما جودة النسبة SINR وتوفُّر كتلة الموارد PRB في الوقت نفسه، فتحقق الشرط الأول يوافق أدنى حد ممكن من التداخل بنمطيه المشترك CoLI والتصالبي CroLI، وأمّا الشرط الثاني فيوافق إتاحة الموارد الراديويّة متمثلة بعرض مجال جزئي معين يمكن تخصيصه للمستخدم. يهدف هذا البحث إلى تحقيق مقايضة trade-off بين هذين الشرطين كونهما يتعارضان في أكثر الحالات الواقعية. يتعارض الشرطان السابقان حتى مع استخدام أفضل خوارزميات تنسيق التداخل والتخصيص ألا وهي خوارزميّة FFR بنوعيها الصارم Strict والمرن Soft؛ إذ يمكن أن يحصل تداخل يؤثر في جودة الخدمة عند ازدحام الشبكة بالمستخدمين، ومن أهم ميّزات هذه الفكرة استغلال كثافة أنواع الخلايا التي يمكن نشرها في الشبكة بحيث يمكن غالباً تخديم أكبر عدد من المستخدمين مهما ازداد عددهم بوجود عدد كافٍ من الخلايا الصغيرة في الشبكة وإن كانت منتشرة بشكل عشوائي في جغرافية الشبكة مثلها مثل التوزُّع العشوائي للمستخدمين بالنسبة للشبكة نفسها. يستند المخطط المقترح في هذا البحث إلى فكرتين رئيسيتين سنفصلهما في الفقرة (4.4.4). تتجلى الفكرة الأولى باعتماد معيار للتسليم نسميه التسليم المحلي offload (مع افتراض حركيّة مهملة للمستخدم) بين خليّة وأُخرى تحقق كل منهما عتبة محددة من الاستطاعة المستقبلة RSRP بحيث يمكن تحقيق

شرط جودة الوصلة الهابطة المتعلق بقيمة SINR المطلوب أن تكون أكبر من عتبة معينة. وتتجلي الفكرة الثانية بالبحث عن مجموعة خلايا مُرشّحة لتخديمه تشكل بمجملها عنقوداً إفراديّاً Individualistic Cluster (IndC) للمستخدم بعينه يكون محيطاً به في لحظة ما بحسب موضعه النسبي عن كل خليّة من خلايا الشبكة، ويجري اختيار أفضل الخلايا في هذا العنقود وهي تلك الخليّة التي يمكن أن تكون الاستطاعة المستقبلة منها كافية لتحقيق جودة وصلة راديوية مناسبة، وفي الوقت نفسه تتيح تخصيص المستخدم بكتلة موارد PRB التي لا يمكن أن يُخصَّص بها من قبل الخليّة المُخدِّمة الحالية كونها قد وصلت بحال من الأحوال إلى العدد الأعظمي المتاح لها من كتل الموارد PRB علماً أنّ أحسن تقنيات تنسيق الخلايا ألا وهي FFR تقتضي أنّ لكل خليّة من الخلايا الماكرويّة المرتبطة بالشبكة عدداً أعظمياً من كتل الموارد يساوي 50 أو 100 بحسب عرض المجال الترددي الكُلّي المُتاح (سواء أكان 10MHz أم 20MHz).

4.4.4 المخطط المقترح لتخصيص الموارد ذاتيّة التنظيم Proposed SORRA Scheme

نفترض أنّ كل خليّة ماكرويّة من الخلايا الثلاث المشكلة لكل عنقود (من أصل العناقيد السبعة) في الشبكة HetNet المفترضة في الشكلين 4-4 و4-5 مُقسَّمة إلى منطقتي تغطية تحددهما قيمتان لاستطاعة الإرسال الخاصة بهذه الخليّة. تُسمى المنطقة الداخليّة للخليّة منطقة مركز الخليّة CCR وتُسمى المنطقة الخارجية منها منطقة حافة الخليّة ECR بحيث يكون نصف قطر المنطقة الداخليّة R_{CCR} يساوي 70% من نصف قطر الخليّة الماكرويّة كاملةَ $R_{MacroCell}$ (المحددة بمسدّس متساوي الأضلاع). يُمثِّل نصف قطر المنطقة الداخليّة مُوسِطاً هاماً في الأداء النهائي للخوارزميّة المقترحة في هذا البحث، وقد اخترنا النسبة 70% بناءً على عدة تجارب محاكاة موافقة، ويمكن مستقبلاً عدّه مُوسِطاً يمكن استخدامه في عملية الأمثَلة Optimization للأداء الناتج عن هذا الموسط كآفاق مستقبلية لهذا البحث. إذن، نفترض استطاعتي إرسال للخليّة الماكرويّة الواحدة الأولى خاصة بالمنطقة المركزية ونرمز لها P_{TXCCR}^{Macro} والثانية خاصة بمنطقة الحافة ونرمز لها P_{TXECR}^{Macro}. ونفترض استطاعة الإرسال الخاصة بالخليّة الفمتويّة هي $P_{TXFemto}$، واستطاعة الإرسال في الخليّة البيكويّة هي P_{TXPico}، وسوف يشار في فقرة النتائج إلى إمكانية تعميم فكرة تقسيم مجال تغطية الخليّة الصغيرة (فمتويّة أو بيكويّة) إلى منطقتي تغطية أيضاً تغطية مركزية وتغطية حافة، وتطبيق المخطط المقترح نفسه، أفقاً مستقبلياً لهذا البحث. بكل الأحوال، يمكن ملاحظة هذه الفكرة في الشكلين 4-4 و4-5 حيث قسمت مناطق تغطية كل خليّة صغيرة إلى منطقتين للدلالة على هذه الفكرة الجيّدة. يفترض أيضاً تقنيتين لتنسيق التداخل بين خلايا الشبكة وهما StFFR وSoFFR. ونفترض في بداية تشغيل الخوارزمية المقترحة تخصيص كتل الموارد PRBs التي عددها الكلي N كما يلي:

- بالنسبة للتقنية StrFFR: تشير المنطقة البيضاء في الشكل 4-4 إلى المنطقة المركزية للخليّة الماكرويّة، وتتشارك كل المناطق البيضاء في الشبكة الكليّة بنفس عرض المجال الترددي BW_{CCR}^{Macro} الناتج عن هذه التقنية، وهو يساوي نصف عرض المجال الترددي الكلي المتاح BW_{Total}^{Macro} (20MHz أو10MHz)، وأما منطقة تغطية الحافة (التي يُشار إليها بثلاثة ألوان هي الأزرق والأخضر والأحمر في الشكل 4-4) فكل منها يأخذ عرض المجال الترددي BW_{ECR}^{Macro} الناتج عن هذه التقنية، وهو يساوي سدس عرض المجال الترددي الكُلّي، مع الأخذ بالحسبان أنّ كل سُدس من عرض المجال الكلي هو سُدس مختلف عن غيره. وبالتالي، تكون كل خليّة مركزية CCR من الخليّة الأساسيّة الماكرويّة قادرة على تخصيص نصف عدد كتل الموارد الكلي لمستخدميها أي $N_{CCR}^{PRBMacro} = \frac{1}{2}N$، وأما كل خليّة حافة ECR من الخليّة الأساسيّة الماكرويّة فتكون قادرة على تخصيص سدس عدد كتل الموارد لمستخدميها أي $N_{ECR}^{PRBMacro} = \frac{1}{6}N$. بالنسبة للتخصيص المتعلق بالخلايا الصغيرة فإنّنا نكون أمام حالتين بالنسبة لكل خليّة ماكرويّة بحسب موضع الخليّة الصغيرة بالنسبة لمحطّة القاعدة الخاصة بالخليّة الماكرويّة، فإذا كانت الخليّة الصغيرة واقعة في المنطقة CCR للخليّة الماكرويّة عندئذٍ يمكن أن تُخصَّص هذه الخليّة الصغيرة بعرض مجال ترددي يساوي عرض المجال الترددي المتاح للمنطقة ECR للخليّة الماكرويّة نفسها أي بالمجال BW_{ECR}^{Macro}، وهكذا يمكن ضمان عدم التداخل بينها وبين إشارات الإرسال في مركز الخليّة الماكرويّة طالما أنّ المجالين الترددين الجزئيين المستخدمين في كل منهما متعامدين ومتباعدين بشكل يمكن محاكاته. وإذا كانت الخليّة الصغيرة واقعة في المنطقة ECR للخليّة الماكرويّة عندئذٍ يمكن أن تُخصَّص هذه الخليّة الصغيرة بعرض مجال ترددي يساوي عرض المجال الترددي المتاح للمنطقة CCR للخليّة الماكرويّة نفسها أي بالمجال BW_{CCR}^{Macro}، وهكذا يمكن ضمان عدم التداخل بينها وبين إشارات الإرسال في مركز الخليّة الماكرويّة طالما أنّ المجالين الترددين المستخدمين في كل منهما متعامدين ومتباعدين أيضاً. بالنسبة للمخطط المقترح هنا الخاص بالتقنية StFFR، يقوم المشغل بإعطاء توصيات للمُشغلّين الثانويين الذي ينشرون خلايا صغيرة في منشآتهم بحيث يوصي (في حال أراد المستخدم عرض مجال كبير لتحقيق معدّل نقل معطيات مرتفع بأن يجري تخطيط الخليّة الصغيرة في منطقة الحافة للخليّة الماكرويّة والابتعاد قدر الإمكان عن مركزها كون $BW_{CCR}^{Macro} = 3 \times BW_{ECR}^{Macro}$، وأما المستخدمون الذين لا يهتمون كثيراً بمعدّل النقل المرتفع فيمكنهم تخطيط خلاياهم الصغيرة في مناطق قريبة من مركز الخليّة الماكرويّة. في هذا السياق على مُشغِّل الشبكة أخذ هذه التوصية بالحسبان عند تخطيطه للخلايا الماكرويّة في المحيط الجغرافي لشبكته فيقوم بنشر المحطّات القاعديّة الماكرويّة في مناطق تناسب البنية المعمارية للمنطقة المُخدِّمة بحسب طبيعة المنشآت والمباني التي تحتاج إلى نشر الخلايا الصغيرة. بهذه الطريقة، يكون عدد من كتل الموارد يساوي $N_{ECR}^{PRBMacro}$ متاح لكل خليّة صغيرة موجودة في المنطقة CCR للخليّة الماكرويّة، ويكون متاح

عدد من كتل الموارد يساوي $N_{CCR}^{PRBMacro}$ لكل خليّة صغيرة موجودة في منطقة ECR للخليّة الماكرويّة، وبالتالي إذا كان عدد الخلايا الصغيرة في المنطقة CRC لكل خليّة ماكرويّة يساوي $N_{FemtoCell}^{InCCRMacro} + N_{PicoCell}^{InCCRMacro}$ فإنّ العدد الأعظمي للمستخدمين FUEs وPUEs الممكن تخديمهم من هذه الخلايا (بشرط تحقق شرط جودة الوصلة الراديويّة) يعطى بالعلاقة (4−16).

$$N_{ERC}^{PRBMacro}\left(N_{FemtoCell}^{InCCRMacro} + N_{PicoCell}^{InCCRMacro}\right) = \frac{1}{6}N\left(N_{FemtoCell}^{InCCRMacro} + N_{PicoCell}^{InCCRMacro}\right) \quad (16-4)$$

وإذا كان عدد الخلايا الصغيرة في المنطقة ECR لكل خليّة ماكرويّة يساوي إلى $N_{FemtoCell}^{InECRMacro} + N_{PicoCell}^{InECRMacro}$ فإنّ العدد الأعظمي للمستخدمين FUEs وPUEs الممكن تخديمهم من هذه الخلايا (بشرط تحقق شرط جودة الوصلة الراديويّة) يعطى بالعلاقة (4−17).

$$N_{CCR}^{PRBMacro}\left(N_{FemtoCell}^{InECRMacro} + N_{PicoCell}^{InECRMacro}\right) = \frac{1}{2}N\left(N_{FemtoCell}^{InECRMacro} + N_{PicoCell}^{InECRMacro}\right) \quad (17-4)$$

حيث يعطى عدد الخلايا الفمتويّة والبيكويّة المتواجدة في كامل منطقة التغطية لكل خليّة ماكرويّة من كل عنقود ثلاثي الخلايا في الشبكة بالعلاقتين (4−18) و(4−19).

$$N_{FemtoCell} = N_{FemtoCell}^{InCCRMacro} + N_{FemtoCell}^{InECRMacro} \quad (18-4)$$

$$N_{PicoCell} = N_{PicoCell}^{InCCRMacro} + N_{PicoCell}^{InECRMacro} \quad (19-4)$$

حيث يمثّل $N_{FemtoCell}^{InCCRMacro}$ عدد الخلايا الفمتويّة في المنطقة CCR ويمثّل $N_{FemtoCell}^{InECRMacro}$ عدد الخلايا الفمتويّة في المنطقة ECR، ويمثّل $N_{PicoCell}^{InCCRMacro}$ عدد الخلايا البيكويّة في المنطقة CCR و $N_{PicoCell}^{InECRMacro}$ هو عدد الخلايا البيكويّة في المنطقة ECR. وهكذا كلما كان عدد الخلايا الصغيرة كبيراً كان بالإمكان تخديم عدد أكبر من المستخدمين، وهي السِمة الأهم والميزة المفيدة لنشر الخلايا الصغيرة بشكل عام. إنّ الفكرة الرئيسية لمخطّطنا تكمن في إجراء تسليم محلي بين الخليّة الماكرويّة والخليّة الصغيرة بالنسبة إلى مستخدم من النمط MUE لا يجد موارد متاحة بالنسبة للخليّة الماكرويّة المرتبط بها، ونلاحظ أنّ العدد الأعظمي من المستخدمين الذين تستطيع الخلايا الصغيرة تخديمهم ضمن مجال تغطية الخليّة الماكرويّة (سواء أكانت هذه الخلايا الصغيرة متواجدة في المنطقة CRC أم في المنطقة ECR) أكبر بكثير من عدد المستخدمين MUEs الأعظمي الممكن تخديمهم من الخليّة الماكرويّة (حيث يمكنها في منطقتها CRC تخديم عدد أعظمي من المستخدمين MUEs يساوي N_{ECR}^{Macro} فقط، وفي منطقتها ECR يمكن تخديم عدد أعظمي من المستخدمين MUEs يساوي N_{CCR}^{Macro} فقط). لحل هذه المشكلة، نقترح في هذا البحث مفهوماً جديداً هو العنقود الإفرادي للمستخدم عموماً (سواء أكان مستخدماً من النمط MUE أو FUE أم PUE). نُعمّم هذا التسليم ليكون متاحاً حتى فيما بين الخلايا الصغيرة والخلايا الماكرويّة.

- بالنسبة للتقنية SoFFR: ينطبق العرض السابق الخاص بتقنية StFFR على تقنية SoFFR في المخطط المقترح لتخصيص كتل الموارد، مع فوارق أساسيّة حيث نفترض أنّ عدد كتل الموارد المتاحة في منطقة CCR للخليّة الماكرويّة هو $N_{CCR}^{PRBMacro} = \frac{2}{3}N$ وأنّ عدد كتل الموارد المتاحة ضمن منطقة حافتها ECR هو $N_{ECR}^{PRBMacro} = \frac{1}{3}N$، مع التذكير بأنّ المجال الترددي المُخصَّص للمنطقة CCR لكل خليّة ماكرويّة من بين الخلايا الثلاث في العنقود الثلاثي الواحد يكون مختلفاً عن المحتوى الترددي لهذه المنطقة من أجل الخليتين الباقيتين في كل عنقود ثلاثي، كما يشير الشكل 4-5 حيث اللون الأخضر الغامق يدل على $BW_{ECR}^{MacroCell1}$ الجزء الأول من المحتوى الترددي الكامل BW_{Total}^{Macro} المتاح للخليّة الماكرويّة الأولى في العنقود ثلاثي الخلايا، ويدل اللون الأزرق الغامق على الجزء الثاني (المختلف) من المحتوى الترددي الكامل $BW_{CCR}^{MacroCell2}$ المتاح للخليّة الماكرويّة الثانية، ويدل اللون الأحمر الغامق على الجزء الثالث (المختلف أيضاً) من المجال الترددي الكامل $BW_{CCR}^{MacroCell3}$ المتاح للخليّة الماكرويّة الثالثة، ضمن هذا السياق، يمكن كتابة العلاقة (4-20).

$$BW_{CCR}^{MacroCell1} = BW_{CCR}^{MacroCell2} = BW_{CCR}^{MacroCell3} = \frac{2}{3}BW_{Total}^{Macro} \qquad (20-4)$$

أما المنطقة ECR الخاصة بكل خليّة من الخلايا الثلاث في العنقود فيخصص لها الجزء المتمم من المحتوى الترددي الكامل المخصص لهذه الخليّة، وبالمثل يكون محتوىً مختلفاً فيما بين الحواف الثلاث للعنقود الثلاثي الواحد، ولكن عرض هذا المحتوى الترددي الجزئي هو الذي يكون متساوياً فيما بينها، نعبّر عن ذلك بالعلاقة (4-21).

$$BW_{ECR}^{MacroCell1} = BW_{ECR}^{MacroCell2} = BW_{ECR}^{MacroCell3} = \frac{1}{3}BW_{Total}^{Macro} \qquad (21-4)$$

فإذا كانت الخليّة الصغيرة متواجدة في المنطقة CCR فهي تتيح عدداً من كتل الموارد يساوي $N_{ECR}^{PRBMacro} = \frac{1}{3}N$، وإذا كانت متواجدة في المنطقة ECR فهي تتيح عدداً من كتل الموارد يساوي $N_{CCR}^{PRBMacro} = \frac{2}{3}N$، فيكون نفس مبدأ التخصيص الخاص بالتقنية StFFR ولكن بعدد مختلف من كتل الموارد PRBs وعرض مجال ترددي مختلف. تتشابه أيضاً توصية المُشغِّل، مثلما ذكرنا سابقاً فيما يخص التقنية StFFR بجعل الخلايا الصغيرة منتشرة في حواف الخليّة الماكرويّة في حال تطلّبت معدّل نقل معطيات مرتفعاً. في هذا السياق، يُعطى العدد الأعظمي للمستخدمين FUEs وPUEs الممكن تخديمهم من الخلايا الصغيرة المتواجدة في المنطقة CCR للخليّة الماكرويّة (بشرط تحقق شرط جودة الوصلة الراديويّة) بالعلاقة (4-22).

$$N_{ECR}^{PRBMacro}\left(N_{FemtoCell}^{InCCRMacro} + N_{PicoCell}^{InCCRMacro}\right) = \frac{1}{3}N\left(N_{FemtoCell}^{InCCRMacro} + N_{PicoCell}^{InCRCMacro}\right) \qquad (22-4)$$

ويُعطى العدد الأعظمي للمستخدمين FUEs وPUEs الممكن تخديمهم من الخلايا الصغيرة المتواجدة في المنطقة ECR للخليّة الماكرويّة (بشرط تحقق شرط جودة الوصلة الراديويّة) بالعلاقة (4−23).

$$N_{CCR}^{PRBMacro}\left(N_{FemtoCell}^{InECRMacro}+N_{PicoCell}^{InECRMacro}\right)=\frac{2}{3}N\left(N_{FemtoCell}^{InECRMacro}+N_{PicoCell}^{InECRMacro}\right) \quad (23-4)$$

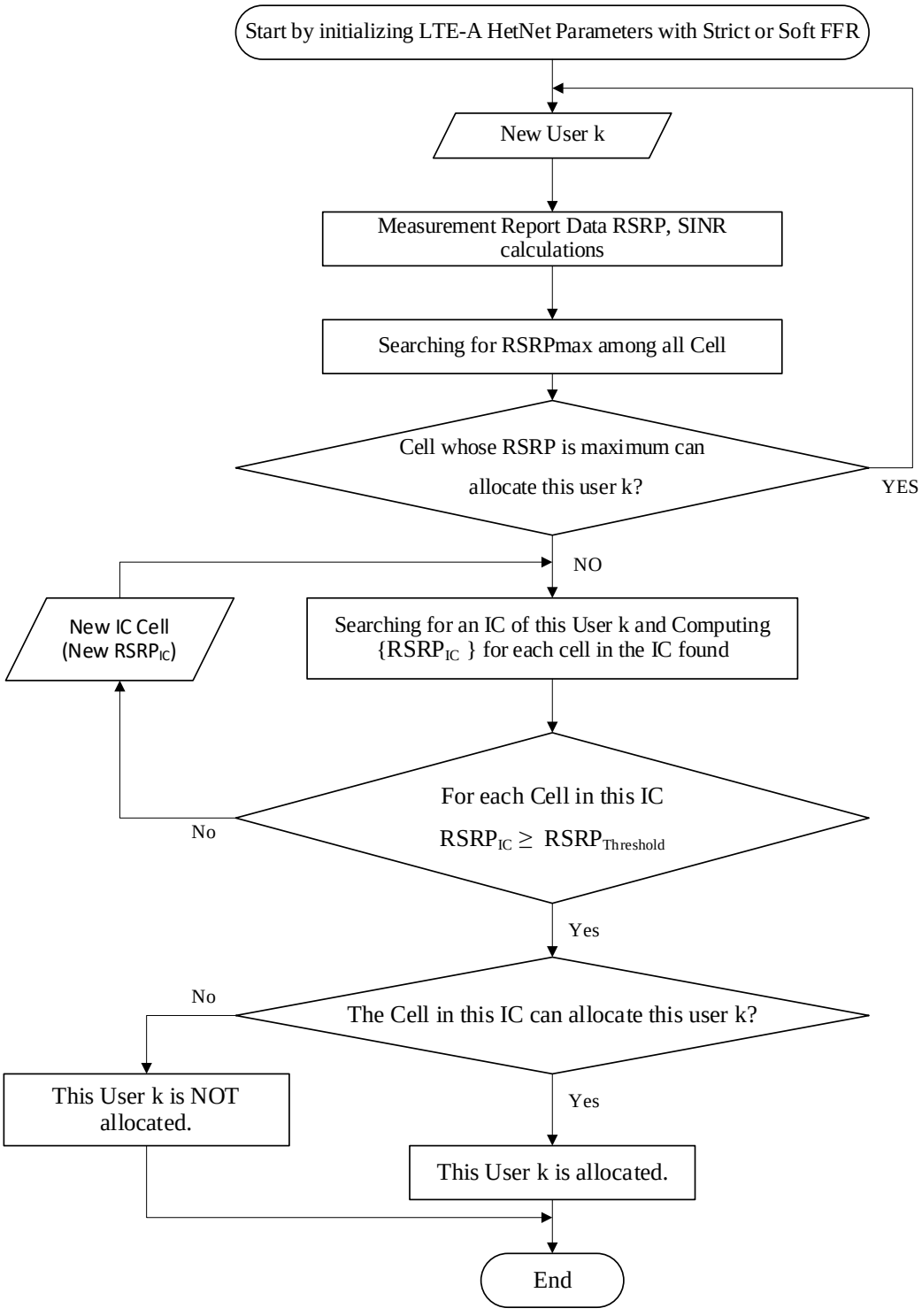
نوضح الآن فكرة العنقود الإفرادي IndC لكل مستخدم حيث تقوم الشبكة بالبحث ذاتيّاً عن هذا العنقود من أجل كل مستخدم يريد الاتصال بالشبكة وذلك كما يلي، سواء أكانت التقنية المستخدمة هي StFFR أم SoFFR. نفترض وجود مستخدم موضعه معروف بالنسبة لخلايا الشبكة وحركيّته مهملة بالنسبة للمحطّات القاعديّة الموافقة لها، وهي حالة واقعية، وكمثال عنها لنتأمل حالة استاد دولي لكرة القدم كبير الحجم تتوافد عليه الجماهير في بداية المباراة، وفيه تتوزُّع بشكل عشوائي الخلايا الصغيرة لدعم سعة الشبكة HetNets، ويجري حوله تخطيط الخلايا الماكرويّة الخاصة بالمنطقة الجغرافية المقامة عليها منشأة الملعب. ليكن R_{IC} هو نصف قطر العنقود الإفرادي، الذي تبحث عنه الشبكة بالنسبة لكل مستخدم، ونفترض نصف القطر هذا موحَّداً بالنسبة لكل المستخدمين الراغبين بالاتصال بالشبكة، ويمكن مستقبلاً جعله مُوسِطاً قابلاً للأمْثَلة. فيما يخص شرط التسليم المحلي بين الخلايا من أجل كل مستخدم، نفترض في بداية تشغيل الخوارزميّة أنّ معيار الخدمة لكل مستخدم هو نفسه معيار التسليم الأساسي بين الخلايا [126]، وهو أن تكون الاستطاعة المستقبلة عند تجهيزة المستخدم أعظمية، أي يجري اختيار الخليّة المخدِّمة الحاليّة سواء أكانت خليّة ماكرويّة أم فمتويّة أم بيكويّة بناءً على المقياس RSRP، فإذا كانت الخليّة المخدِّمة الحاليّة (ذات الاستطاعة المستقبلة العظمى $RSRP_{max}$) لا تتيح كتل موارد لهذا المستخدم، تبدأ عملية البحث عن العنقود IndC بحيث يضم هذا العنقود عدداً من الخلايا المجاورة لهذا المستخدم وتبعد عنه مسافة أعظمية هي R_{IC}، ثمّ يجري ترتيب هذه الخلايا في جدول علاقة الجوار بطريقة تنازلية من المسافة الأقصر إلى المسافة الأبعد، وبحساب الاستطاعة المستقبلة RSRP من كل خليّة من خلايا العنقود IndC (الذي يمكن أن يضم جميع أنماط الخلايا الصغيرة أو الماكرويّة). نضع هنا معيار مقارنة لتحقيق شرط جودة الوصلة الراديويّة، بحيث يجري اختيار الخليّة الهدف المحققة لهذا الشرط وتُقارن الاستطاعة المستقبلة منها $RSRP_{IC}$ مع الاستطاعة العُظمى $RSRP_{max}$ للخليّة المخدمة الحالية، ويُبيّن الجدول 4−3 النسبة العتبة $RSRP_{Threshold}$ للمقارنة بين الاستطاعة المستقبلة من كل من الخليّة الحالية والهدف بحسب نمط الخليّة في الشبكة التي يُستنَد إليها لتنفيذ قرار التسليم المحلي بشرط توفر الموارد في الخليّة الهدف المنتمية إلى العنقود الإفرادي IndC. فإذا تحقق الشرط $RSRP_{IndC} \geq RSRP_{Threshold}$ وكانت الخليّة الهدف توفر كتلة الموارد المطلوبة عندئذٍ يحصل التسليم المحلي، ويصبح المستخدم مُخدَّماً من الشبكة، وإلاّ ننتقل إلى الاستطاعة المستقبلة الأكبر في العنقود ونعيد المقارنة. وهكذا، إلى أن يجري إيجاد الخليّة المناسبة للتخديم من العنقود IndC نفسه، وإذا لم يجرِ إيجادها يكون المستخدم خارج الخدمة. وبكل الأحوال، إنّ احتمال

إيجاد الخليّة الهدف المطلوبة المحققة لهذه الشروط كبير بسبب النشر الكثيف للخلايا الصغيرة في كل منطقة تغطية للخليّة الماكرويّة، وكلما جرى نشر خلايا صغيرة أكثر كان احتمال التخديم أكبر، علماً أنّ عدد كتل الموارد المتاحة من الخلايا الصغيرة كبير مقارنةُ بالعدد المتاح منها في الخليّة الماكرويّة سواء من منطقتها CCR أم من منطقتها ECR، وهذا تماماً عمل المخطط المقترح.

الجدول 4—3: نسبة العتبة $RSRP_{Threshold}$ لخليّة من العنقود IndC مقارنة بقيمة $RSRP_{max}$ [الباحث]

$RSRP_{Threshold}$	$RSRP_{max}$ ماكرويّة	$RSRP_{max}$ فمتويّة	$RSRP_{max}$ بيكويّة
$RSRP_{IndC}$ ماكرويّة	2/3	3/4	1/2
$RSRP_{IndC}$ فمتويّة	3/4	2/3	2/3
$RSRP_{IndC}$ بيكويّة	1/2	2/3	2/3

أثناء تشغيل الخوارزميّة، تصبح كتلة الموارد للخليّة الهدف المقبولة في العنقود مُحررة released لصالح هذا المستخدم، فينقص عدد كتل الموارد PRBs المتاحة من هذه الخليّة بالتحديد بمقدار 1. وهكذا، من أجل كل مستخدم جديد يرغب بالاتصال بالشبكة (مثلاً مجموعة من المستخدمين المتواجدين في أماكن متباينة من مدرجات ملعب الكرة في الاستاد الكبير يرغبون جميعهم في لحظة معينة الاتصال بالشبكة ونقل مجريات ضربات الترجيح التي سوف تجري حينها وإرسالها بالزمن الحقيقي)، حينها سوف تُنظِّم الشبكة عمليات التسليم وتخصيص كتل الموارد بشكل ذاتي لكل مستخدم على حدة بناءً على العنقود IndC المكتشف لكل مستخدم، وهكذا يجري استغلال كامل الموارد المتاحة من جميع الخلايا في الشبكة، مقارنة بالطريقة التقليديّة التي سوف تؤدي إلى حرمان مستخدمين كثر من الخدمة رغم إمكانية إتاحتها بوجود الخلايا الصغيرة في الجوار وبالقرب الكافي منهم للتخديم (أي إنّ الاستطاعة المستقبلة منهم جيدة بحسب العتبة الموضوعة هنا)، وأنّ إمكانية التداخل بين المجالات الترددية المتاحة من العنقود متباعدة عن بعضها ومتعامدة هي إمكانية باحتمال صغير نظراً لمتانة تقنية FFR، وسوف نجد في فقرة النتائج أنّ التقنية SoFFR أفضل من StFFR حتى مع تطبيق مخططنا الحالي. يُبين الشكل 4–6 المخطط التدفُّقي للخوارزميّة المقترحة في هذا البحث، ونستعرض في الفقرة التالية مقاييس الأداء التي تُظهِر مدى التحسين الناتج عن النموذج المُقتَرَح SORRA.



الشكل 4–6: المخطّط التدفُّقي للخوارزميّة SORRA المقترحة (الباحث).

5.4.4 مؤشّرات الإنتاجيّة ومعدّل خدمة الشبكة

تُحسَب قيمة معدل الإنتاجيّة TH_{user} من أجل كل مستخدم يستقبل استطاعة بنسبة SINR معينة من خليّة مُخدّمة ما ووفق موارد راديوية مخصصة له وفق عرض مجال ترددي B ووفق عدد كتل موارد يساوي N_{PRB} وفق العلاقة (4−24)[125] .

$$TH_{user} = \left(\frac{B}{N_{PRB}}\right)\log(1 + SINR) \qquad (24-4)$$

يُلاحظ من العلاقة السابقة أنّ معدل الإنتاجيّة يتعلق مباشرة بنمط الخليّة المُخدمة والتي تتيح مواردها للمستخدم، فحالة التخديم إذن تختلف باختلاف نمط الخليّة وبقيمة SINR المحسوبة بالنسبة لها، وتختلف أيضاً باختلاف عدد كتل الموارد وعرض المجال الترددي المتاح لكل مستخدم.

لحساب متوسط معدل الإنتاجيّة لكل خليّة، نقوم بجمع قيم معدلات الإنتاجيّة الخاصة بالمستخدمين MUEs وFUEs وPUEs المرتبطين بالخلايا الماكرويّة والفمتويّة والبيكويّة المتعلقة بكل من منطقتي المركز CCR والحافة ECR التابعين لمنطقة كل محطة قاعدية MBS من أصل ثلاث محطات قاعدية ماكرويّة تؤلّف بمُجملها العنقود الثلاثي الأساسي في الشبكة HetNet المدروسة، ثم نقسّم الناتج على عدد هؤلاء المستخدمين الذين خُصِّصوا بموارد الاتصال (كتل PRBs وفترات زمنية موافقة). وسنجد بفقرة النتائج أنّ متوسط معدل الإنتاجيّة لكل خليّة من خلايا الشبكة سوف يزداد بشكل واضح مقارنة بالطريقة التقليديّة (لكل من النمط الصارم Strict FFR والنمط المرنSoft FFR) وبالمخطط المقترح SORRA في هذا البحث. ويُحسَب معدّل خدمة الشبكة Service Rate (SR) بالنسبة لكل منطقة خلية ماكرويّة Ω يُمثِّلها مُسدَّس متساوي الأضلاع (الشكلان 4−4 و4−5) وفق العلاقة (4−25) [125].

$$SR_{EveryHexagonalCell} = \frac{S^{(\Omega)}}{M^{(\Omega)}} \qquad (25-4)$$

حيث يمثّل $S^{(\Omega)}$ عدد المستخدمين الذين جَرَى تخديمهم من الخليّة الماكرويّة الموافقة لهذه المحطّة القاعديّة وأيضاً أولئك المُخدَّمين من الخلايا الصغيرة المتواجدة في منطقتيه (المركزيّة CCR والحافة ECR) ويمثّل $M^{(\Omega)}$ عدد المستخدمين الكلي المتواجدين في منطقة المحطّة القاعديّة الماكرويّة، حيث يتضمَّن العدد الكُلّي هنا عدد المستخدمين الذين لم يجرِ تخديمهم (الذين لم تحقق الخلايا الهدف المنتمية إلى العنقود الإفرادي IndC بكل منهم معايير التسليم المحلّي).

سوف نجد في فقرة النتائج أنّ معدّل الخدمة يزداد بوضوح بالمقارنة بين الطريقة التقليديّة لكل من النمط الصارم Strict FFR والنمط المرن Soft FFR وبين المخطط SORRA المقترح.

5.4 نتائج المحاكاة ومناقشتها

1.5.4 سيناريوهات المحاكاة

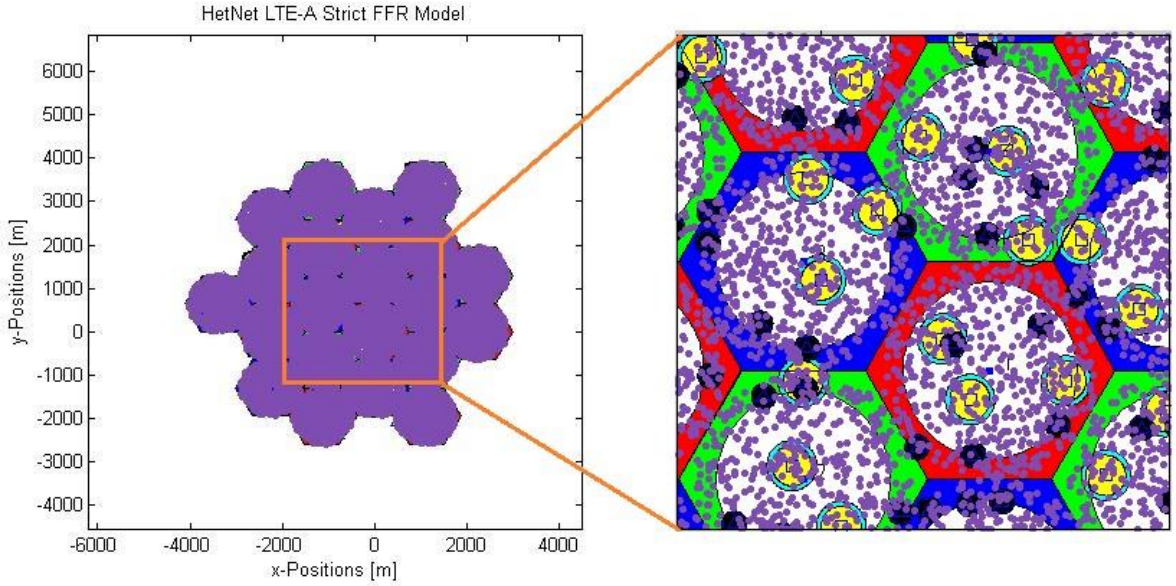
يستند كل سيناريو محاكاة مُنجَز في هذا البحث إلى طريقة تخطيط الشبكة الموضحة في الشكلين 4-4 و4-5، بحيث يختلف كل سيناريو عن الآخر بعدد الخلايا الصغيرة المفترضة في الشبكة، وذلك لقياس أداء المخطّط المُقترَح SORRA فيما يخص استغلال انتشار هذه الخلايا بين الخلايا الماكرويّة وقياس مدى التحسّن الحاصل في كل من معدل الإنتاجيّة ومعدّل الخدمة بنتيجة البحث عن العناقيد الإفراديّة IndCs للمستخدمين الذين يتزايد عددهم من أجل كل سيناريو من حد أدنى إلى حد أعلى في محيط كل خليّة ماكرويّة. تُبيّن السطور الأربعة الأولى من الجدول 4-4 السيناريوهات المفترضة في هذا البحث فيما يخص الخوارزميّة المقترحة SORRA.

2.5.4 موسطات محاكاة النظام

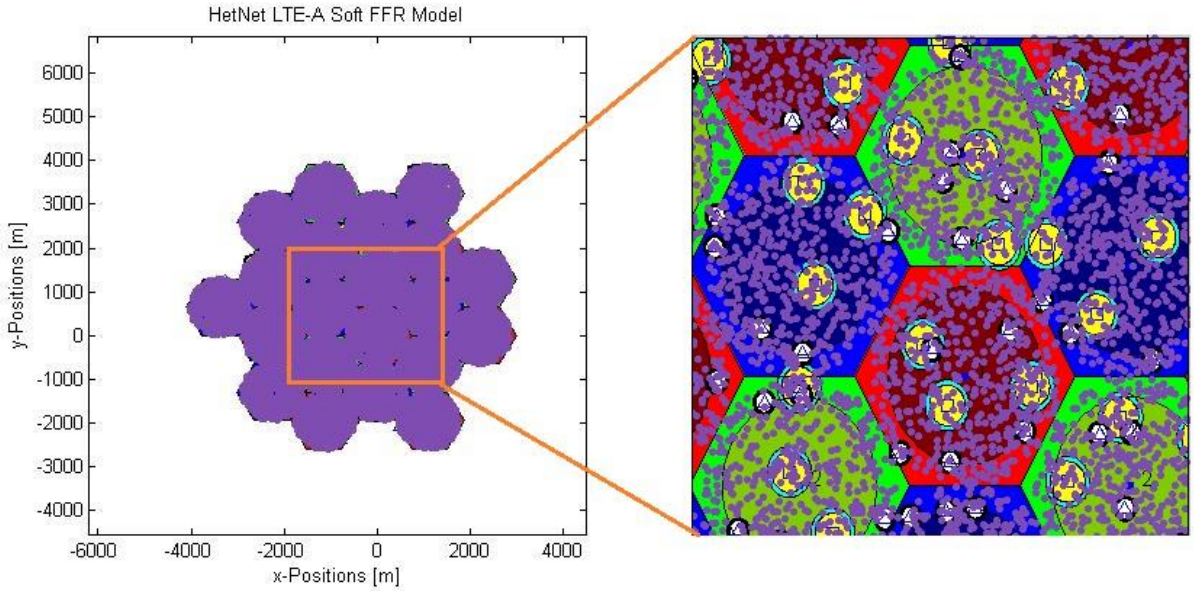
أُجريَت المحاكاة للخوارزميّة المقترحة الموافقة للمخطط SORRA مع الأخذ في الحسبان اثنين من السيناريوهات، ثمّ قُيّم الأداء. من أجل كل سيناريو، استُخدِمت قيماً مختلفة للموسطات $N_{FemtoCell}$ و$N_{PicoCell}$ (مع تثبيت باقي قيم المُوسطات) التي تمثل عدد الخلايا الفمتويّة والبيكويّة في كل مجال تغطية خليّة ماكروية واحدة تنتمي إلى العنقود الثلاثي الأساسي من أصل سبعة عناقيد تشكل بمجملها شبكة LTE-A HetNet المفترضة في هذا البحث والموضَّحة بالشكلين 4-4 و4-5.

يُفترَض من أجل كل سيناريو أنّ توزُّع المستخدمين في جغرافيا الشبكة عشوائي يتبع التوزيع الطبيعي بحيث لا يكون لمستخدمين اثنين نفس الموضع ولا يكون موضع المستخدم الواحد منطبقاً على موضع خليّة من خلايا الشبكة.يُفترَض أيضاً توزُّع الخلايا الصغيرة في مجال تغطية كل خليّة ماكروية توزُّعاً عشوائياً طبيعياً أيضاً بحيث لا يكون لخليتين نفس الموضع المكاني، ولا أن ينطبق موضعهما على موضع الخليّة الماكروية. يتفق هذا الافتراض مع الحالة الواقعية لتخطيط الخلايا الصغيرة وتوزُّع المستخدمين في الشبكات غير المتجانسة LTE-A HetNets كثيفة عدد المستخدمين وعدد الخلايا الصغيرة [126,82]. يوضّح الشكل 4-7 طريقة توزُّع عدد معين من المستخدمين على امتداد الشبكة التي تعتمد النمط Strict FFR، وأمّا الشكل 4-8 فهو مشابه لهدف الشكل 4-7 ولكن من أجل النمط Soft FFR، وقد اخترنا (على سبيل المثال لا الحصر) من أجل كلا الشكلين 4-7 و4-8 عدداً من

المستخدمين يساوي 500 متوزِّعين عشوائيّاً في منطقة تغطية كل خليّة ماكرويّة، مع ثلاث خلايا بيكويّة وخمس خلايا فمتويّة في كل منها.



الشكل 4–7: مخطط توزُّع المستخدمين في بيئة الشبكة، حالة النمط StFFR (الباحث).



الشكل 4–8: مخطط توزُّع المستخدمين في بيئة الشبكة، حالة النمط SoFFR (الباحث).

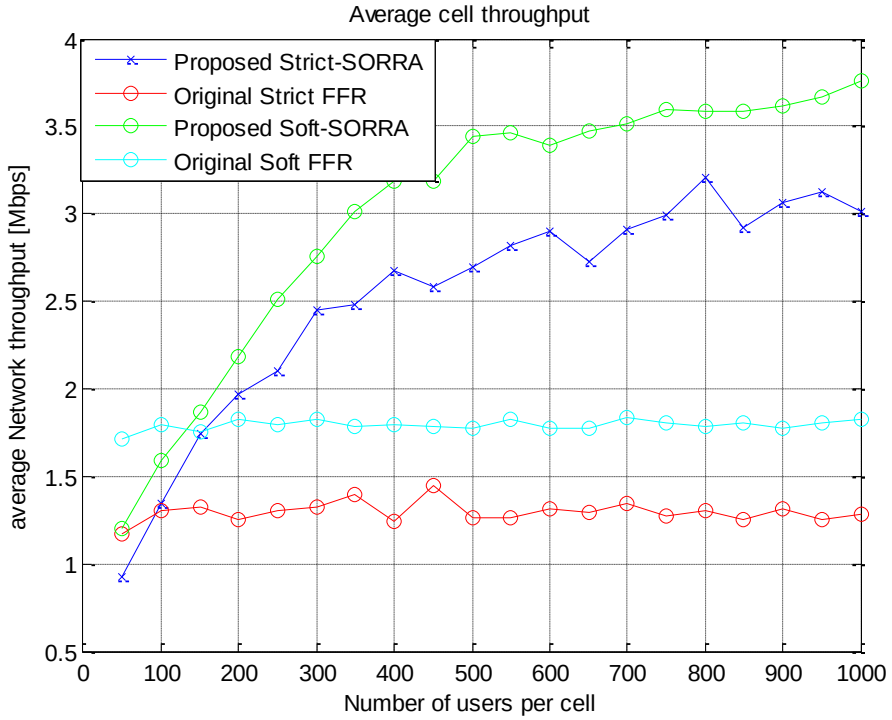
يبين الجدول 4–4 قيم أهم الموسطات المستخدمة في عملية المحاكاة

الجدول 4—4: مُوسطات إعداد الشبكة LTE-A HetNet لمحاكاة المخطط المقترح SORRA (الباحث).

اسم الموسط	إعداد الموسط	
عدد السيناريوهات	السيناريو الأول	السيناريو الثاني
عدد الخلايا الفمتويّة $N_{FemtoCell}$ حول كل محطة قاعدية ماكروية	5	10
عدد الخلايا البيكويّة $N_{PicoCell}$ حول كل محطة قاعدية ماكروية	3	6
التردد الحامل	2655 [MHz]	
تقنية النفاذ الراديوي	OFDMA	
عرض المجال الترددي المتاح	10 [MHz]	
تقنية تخصيص الموارد	Strict and Soft FFR	
عدد كتل الموارد الفيزيائية الكُلّي PRBs	50 PRBs	
استطاعة الإرسال للخليّة الماكرويّة MeNB	40 [dBm] for CRC and 46 [dBm] for ERC	
استطاعة الإرسال للخليّة الفمتويّة HeNB−Femto	15 [dBm]	
استطاعة الإرسال للخليّة البيكويّة HeNB−Pico	24 [dBm]	
تخطيط (توزُّع) الخلايا الصغيرة	عشوائي	
توزُّع المستخدمين	عشوائي	
توزُّع الخلايا الماكرويّة	7-Clusters, each one of 3-Hexagonal MeNB	
استطاعة إشارة الضجيج الحراري عند المستقبل	-174 [dBm]	
نموذج الطبيعة الجغرافية لبيئة الاتصال	منطقة المدن الصغيرة Small urban area	
متوسط ارتفاع المحطة MeNB	50 [m]	
متوسط ارتفاع تجهيزة المستخدم UE	1 [m]	
عدد العناقيد الثلاثية في الشبكة	7	
موسطات ظاهرة خفوت الظل	zero mean and 5 dB standard deviation	
موسطات ظاهرة الخفوت السريع	خفوت رايلي Rayleigh Fading	
عدد المستخدمين المتزايد حول كل محطة قاعدية ماكروية	من 50 إلى 1000 بخطوة زيادة 25 أو 50 مستخدم	
حركية المستخدمين	حركية مهملة (حركية موضعية)	
عتبة جودة الوصلة الراديويّة SINR threshold	-35 [dB]	
مساحة المنطقة الجغرافية المقابلة للشبكة	7 Km×7 Km	
نصف قطر العنقود الإفرادي للمستخدم R_{IC}	270 [m]	
نصف قطر الخليّة الماكروية $R_{MacroCell}$	750 [m]	
نصف قطر منطقة CRC لكل خليّة ماكروية R_{CRC}	$70\% \; of \; R_{MacroCell}$	
نصف قطر الخليّة الفمتويّة $R_{FemtoCell}$	50 [m]	
نصف قطر الخليّة البيكويّة $R_{PicoCell}$	150 [m]	
عدد الخلايا الماكرويّة في عنقود إعادة الاستخدام	3	

3.5.4 نتائج السيناريو الأول

نفترض في هذا السيناريو أنّ عدد المستخدمين يزداد تدريجيّاً حتى 1000 مستخدم في منطقة تغطية كل خليّة ماكرويّة وذلك انطلاقاً من 50 مستخدماً فيها، مع خطوة زيادة تساوي 50 مستخدماً. يُبيّن الشكل 4–9 نتائج قيم معدل الإنتاجيّة آخذين بالحسبان أربع خيارات لتخصيص الموارد وتنسيق التداخل هي التقنيات التقليديّة (Strict FFR وSoft FFR) والتقنيات المُعدّلة عليها والمُمثِّلة لمخطّطنا المُقترح SORRA.

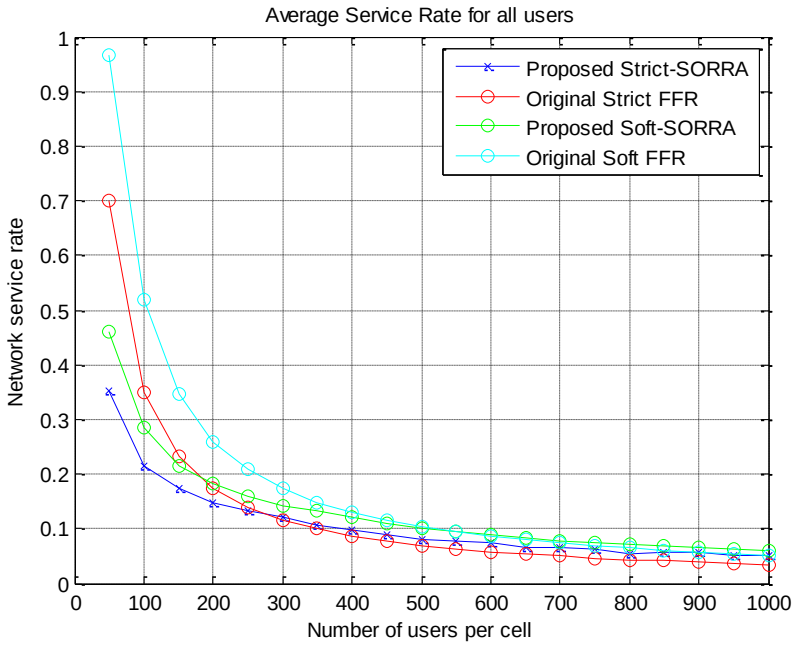


الشكل 4–9: منحنيات معدل الإنتاجيّة الناجمة عن المحاكاة وفق السيناريو الأول (الباحث).

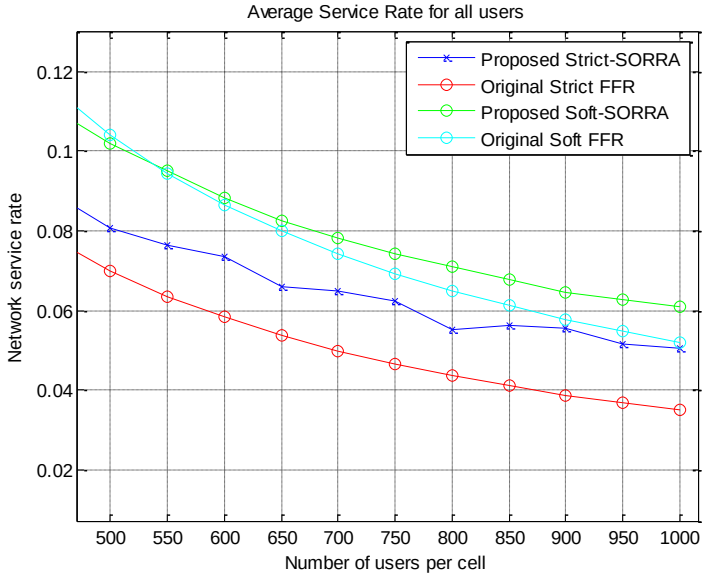
يُظهر الشكل 4–9 حالة إشباع في الشبكة فيما يخص كلاً من مخططي التخصيص التقليديين المرن Soft FFR والصارم Strict FFR حيث تتراوح قيم معدل الإنتاجيّة حول قيمة ثابتة مع ازدياد عدد المستخدمين في الشبكة. إنّ هذه النتيجة طبيعية لأن عدد الموارد PRBs المُتاح من قبل كل خليّة في الشبكة سواء أكانت ماكروية أم صغيرة محدود مع محدودية مقابلة لعرض المجال الترددي الناتج عن إعادة الاستخدام الترددي الكسري FFR. مع ملاحظة أنّ أداء الشبكة من حيث معدل الإنتاجيّة باستخدام التقنية Soft أفضل منه عند استخدام التقنية Strict، وهذه أيضاً نتيجة طبيعية، لأنّ التقنية Soft FFR تمثّل التحسين المباشر للتقنية Strict FFR. ولكن عند تنفيذ مخططنا SORRA المعتمد إمّا على Strict FFR أو على Soft FFR فإنّنا نحصل على ربح أفضل من حيث معدل الإنتاجيّة يصل إلى أكثر 2 Mbps بالاعتماد على التقنية Soft FFR وإلى ربح إنتاجيّة يصل إلى أكثر من 1.5 Mbps مقارنة بالمخططات التقليديّة لتخصيص الموارد، وذلك عند عدد كبير من المستخدمين

يطلبون الاتصال في كل خليّة ماكروية (1000 مستخدم)، ناهيك عن ظهور المنحني الأسّي الواضح في قيم معدل الإنتاجيّة في كل من مخططي SORRA المرن Soft والصارم Strict، والاقتراب من المنحني النظري لمعدل الإنتاجيّة.

يوضّح الشكل 4–10 نتائج معدّل الخدمة، حيث يُلاحَظ فيه تناقص معدّل الخدمة مع ازدياد عدد المستخدمين المتواجدين في بيئة الاتصال، وهذه نتيجة واقعية بالنظر إلى الحمل العام للشبكة، ونلاحظ في هذا الشكل أيضاً تقارب معدّلات الخدمة من أجل التقنيات الأربع المفترضة فيه مع أداء أفضل بالنسبة لمخطّطنا SORRA مقارنةً بالمخطّطات التقليديّة كما هو مُبيَّن في الشكل 4–11 الناتج عن تكبير Zoom in لمنطقة الشكل 4–10 المقابلة لازدياد عدد المستخدمين من 500 إلى 1000 مستخدم، مع ملاحظة أنّ أداء المخطّط المُقترح SORRA المبني على أساس النمط Strict FFR هو أفضل من مخطّط تقنية Strict FFR التقليديّة، والأمر نفسه محقق أيضاً بمقارنة المخطّط SORRA المبني على أساس النمط Soft FFR بمخطّطها التقليدي. يُلاحَظ بالتدقيق في الشكل 4–11 أنّ معدّل الخدمة ازداد بحدود 2.5% بمقارنة أفضل المخطّطات وهو مخطّطنا Soft SORRA مع أسوئها وهو المخطط Strict FFR. يمكن بناءً على هذه النتائج ترتيب أداء مخططات تخصيص الموارد المبنية على Soft FFR وStrict FFR، بحيث يكون Soft SORRA أفضلها يليه المخطط المقترح Strict SORRA، ويليه بالتتالي المخطّطان التقليديّان Soft FFR ثمّ Strict FFR، مع مُلاحظة أنّه من أجل 1000 مستخدم في منطقة تغطية كل خليّة ماكرويّة، يعطي الأداء الأفضل معدّل خدمة أعظمي بحدود 6% من أجل المخطّط Soft SORRA، ومعدّل خدمة أصغري بحدود 3.5% من أجل المخطّط التقليدي Strict FFR.



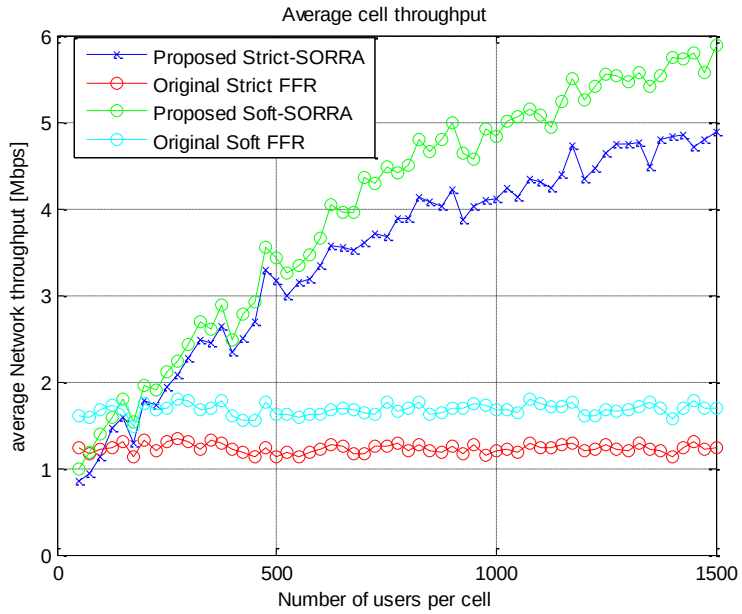
الشكل 4–10: منحنيات معدّل الخدمة الناجمة عن المحاكاة وفق السيناريو الأول (الباحث).



الشكل 4–11: تكبير منطقة رسم منحنيات معدّل الخدمة وفق السيناريو الأول (الباحث).

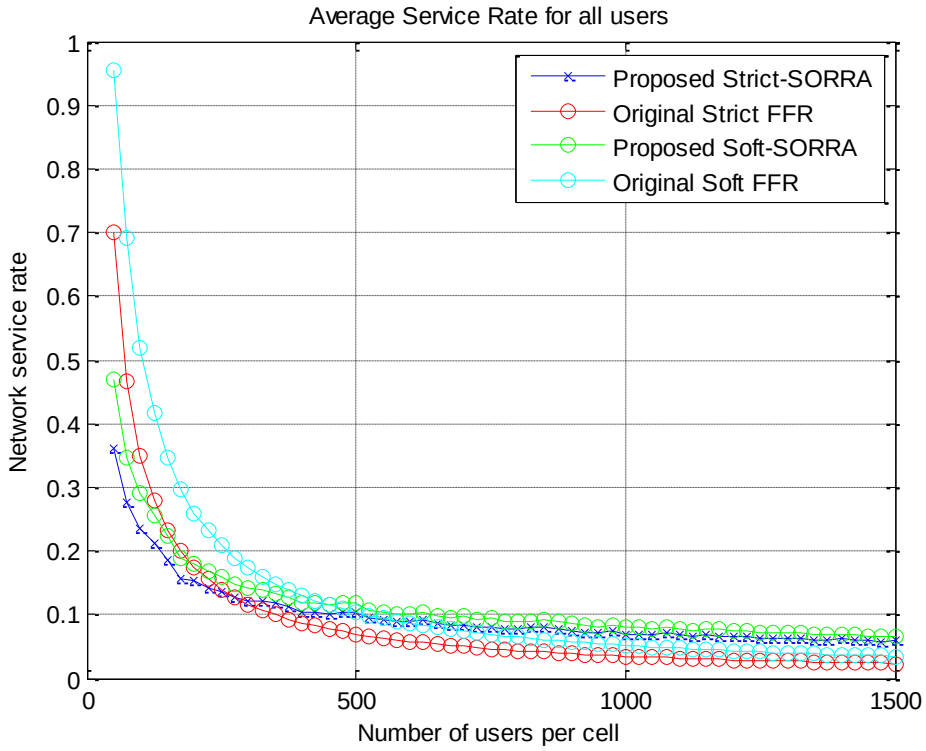
4.5.4 نتائج السيناريو الثاني

نفترض في هذا السيناريو أنّ عدد المستخدمين يزداد حتى 1500 مستخدم في منطقة تغطية كل خليّة ماكرويّة، وذلك انطلاقاً من 50 مستخدماً فيها، مع خطوة زيادة تساوي 25 مستخدماً في كل خطوة. وبالمثل، يُبيّن الشكل 4–12 نتائج قيم معدّل الإنتاجيّة بالأخذ بالحسبان أربعة خيارات لتخصيص الموارد وتنسيق التداخل هي التقنيات التقليديّة Soft FFR وStrict FFR والتقنيات المعدّلة عليها الممثلة لمخططنا المقترح SORRA.

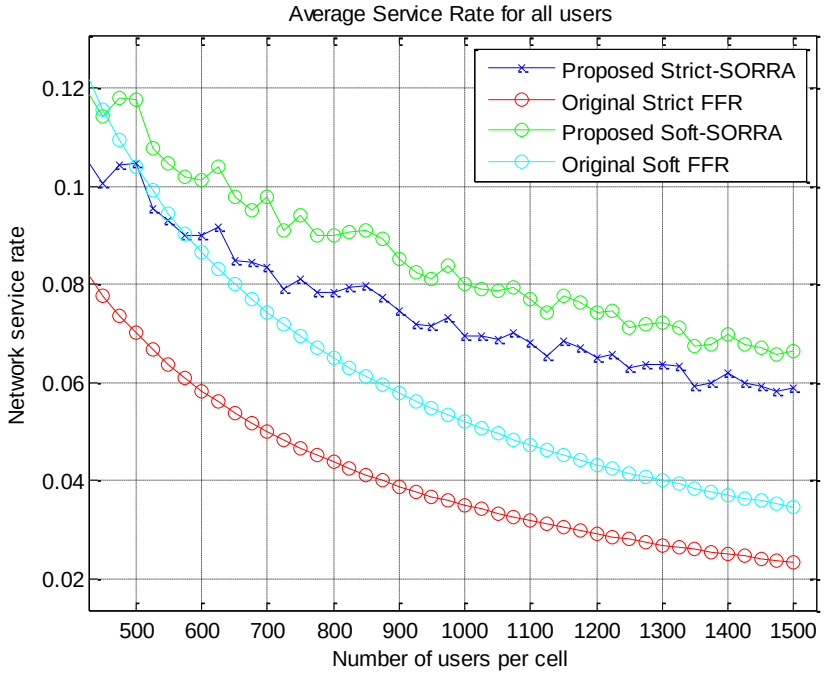


الشكل 4–12: منحنيات الإنتاجيّة الناجمة عن المحاكاة وفق السيناريو الثاني (الباحث).

يُظهِر الشكل 4-12 نتائج مماثلة لنتائج السيناريو الأول، مع قيمة مضافة واضحة تتمثّل بازدياد القيم العظمى لمعدل الإنتاجيّة، ونفسر ذلك بازدياد عدد الخلايا الصغيرة من أجل هذا السيناريو. فعند مضاعفة عدد الخلايا الصغيرة نلاحظ أنّ أعظم قيمة لمعدّل لإنتاجيّة تصل إلى نحو الضعف أيضاً؛ وبدقة أكبر إلى 6 Mbps، من أجل المخطط المقترح Soft SORRA وإلى 5 Mbps من أجل المخطط المقترح Strict SORRA، وذلك من أجل عدد مستخدمين يساوي 1500 مستخدم متوزُّعين عشوائياً في محيط كل محطّة قاعديّة ماكرويّة MeNB. وبالمقابل يُبيّن الشكل 4-13 والشكل 4-14 (تكبير Zoom in لمنطقة الشكل 4-13 المقابلة لازدياد عدد المستخدمين من 500 إلى 1000 مستخدم) نتائج معدّل الخدمة، حيث يُلاحَظ ازدياد معدّل الخدمة مقارنة بالسيناريو الأول نتيجة ازدياد عدد الخلايا الصغيرة.



الشكل 4-13: منحنيات معدّل الخدمة الناجمة عن المحاكاة وفق السيناريو الثاني (الباحث).



الشكل 4–14: تكبير منطقة رسم منحنيات معدّل الخدمة وفق السيناريو الثاني (الباحث).

يُلاحَظ في نتائج السيناريو الثاني أيضاً تباعداً نحو الأفضل في قيم معدّل الإنتاجيّة ومعدّل الخدمة الناتجين عن كل من Soft SORRA وStrict SORRA مقارنةً بقيمها الناتجة عن كل من Soft FFR وStrict FFR التقليديين، وذلك من أجل أعداد مستخدمين يتراوح بين 1000 و1500 مستخدم مع أعداد مضاعفة للخلايا الصغيرة الموزّعة في الشبكة. يدل هذا مباشرة على استغلال أمْثَل لتوزُّع الخلايا الصغيرة في بيئة الاتصال، وأهميّة مفهوم العنقود الإفرادي IndC المُقترح. بكلمات أخرى، ينجح المخطط SORRA المقترح في استغلال شبه كامل لموارد الشبكة لتخديم أقصى عدد من المستخدمين وبجودة خدمة أفضل تتمثل في قيم كل من معدّل الخدمة والإنتاجيّة الناتجين.

يُبيّن الجدول 4–5 نتائج المحاكاة لكل من معدّل الإنتاجيّة ومعدّل الخدمة من أجل حالة تثبيت عدد المستخدمين المتواجدين في منطقة تغطية كل خليّة ماكرويّة في الشبكة الكُليّة عند العدد 1000 مستخدم، وزيادة عدد الخلايا الصغيرة انطلاقاً من القيم $N_{FemtoCell} = 10$ و$N_{PicoCell} = 6$ إلى القيم $N_{FemtoCell} = 40$ و$N_{PicoCell} = 24$ مع خطوة زيادة بمقدار 10 خلايا فمتويّة و6 خلايا بيكويّة في كل مرة، وذلك مع اعتماد نفس عدد الخلايا الماكرويّة وعدد العناقيد ثلاثية الخلايا الماكرويّة بشكل مشابه لسيناريوهات المحاكاة السابقة، مع تثبيت باقي مُوسِطات الشبكة، واعتماد كل من المخطّطين Strict SORRA وSoft SORRA.

الجدول 4—5 : قيم معدّل الإنتاجيّة TH ومعدّل الخدمة SR بتثبيت عدد المستخدمين عند 1000 مستخدم وزيادة عدد الخلايا الصغيرة (الباحث).

NO. Small Cell	16		32		48		64	
Allocation Scheme	Soft SORRA	Strict SORRA	Soft SORRA	Strict SORRA	Soft SORRA	Strict SORRA	Soft SORRA	Strict SORRA
TH [Mbps]	4.9	4.1	9.8	8.3	19.2	15.6	38.6	30.4
SR	%8	%7	%10.5	%8.5	%14.3	%13.7	%17.2	%15.4

يهدف الجدول 4–5 إلى إظهار مدى استغلال المخطط المقترح لموارد الخلايا الصغيرة مع ازدياد عددها تأكيد أنّ أداء المخطط المقترح مقارنة بالمخططات التقليديّة قد أظهر أفضليته النسبيّة استناداً إلى نتائج السيناريوهين الأول والثاني السابقين. فمن الواضح ازدياد كل من معدّل الإنتاجيّة ومعدّل الخدمة بطريقة تتقارب من الضعف مع كل خطوة ومرحلة محاكاة جديدة تتضاعف عندها أعداد الخلايا الفمتويّة والبيكويّة.

6.4 خاتمة الفصل

أُقترحت في هذا الفصل آلية جديدة لتخصيص الموارد ذاتيّة التنظيم في النظام LTE-A ضمن سيناريو الشبكات غير المتجانسة أطلقنا عليها اسم SORRA، وذلك بالاستناد إلى تقنيتي Soft FFR وStrict FFR لكونهما الحل الأفضل لتنسيق التداخل كما تشير الأدبيات. أظهر المخطط المقترح SORRA تحسّناً ملموساً في قيم معدّل الإنتاجيّة ومعدّل الخدمة مقارنةً بالمخططات التقليديّة لتخصيص الموارد Soft FFR وStrict FFR، ويعود ذلك إلى استثمار أفضل وشامل لموارد كل الخلايا الموزعة في بيئة الشبكة سواء أكانت الخلايا صغيرة أم ماكرويّة. وكما وجدنا، يتحسَّن أداء الخوارزميّة المقترحة مع ازدياد عدد الخلايا الصغيرة، وذلك مهما كان توزُّع المستخدمين في جميع مناطق التغطية في الشبكة LTE-A HetNet. ويحقّق مفهوم العنقود الإفرادي IndC لكل مستخدم يطلب الاتصال في الشبكة هذا الاستثمار كما أظهرت نتائج المحاكاة، ويمكن في الحقيقة تطويره بحيث يصبح نصف قطر العنقود مُوسِطاً قابلاً للأمْثَلة جنباً إلى جنب مع موسطات عتبة الاستطاعة المستقبلة $RSRP_{Threshold}$ الموضحة في الجدول 4–3. يمكن أيضاً إدخال مُوسِط نصف قطر المنطقة CRC التابعة للخليّة الماكرويّة كمُعامِل أمْثَلة أيضاً للحصول على أداء أمْثَلي لآلية تنفيذ مفهوم العنقود الإفرادي للمستخدم؛ فضلاً عن ذلك، يمكن كآفاق مستقبلية، دراسة أثر تغيير قيم العتبة $RSRP_{Threshold}$ من أجل كل أنماط الخلايا الصغيرة والماكرويّة المستخدمة في الشبكة، بحيث يمكن الانتقال إلى خوارزميّة أمْثَلة لتخصيص الموارد لتُعَد مستقبلاً نسخة مُطوَّرة عن المُخطَّط المُقترح SORRA. في الحقيقة، تُعَد نتائج هذا الفصل واعدة بالنسبة لأي مُشغِّل شبكة خلوية في سياق انتقاله المرحلي نحو منظومة الجيل الخامس انطلاقاً

من الجيل الرابع خاصة في حال استخدام منظومات تعمل بالأمواج الميليمتريّة mmWaves بحيث يمكن تأمين معدّل نقل معطيات من رتبة عدّة غيغابت Gbps، وهذا مجال بحثي واسع يمكن التطرّق إليه انطلاقاً من هذا العمل والتأكد من صحته عبر تطبيق نفس منهجيّة المحاكاة ولكن مع مُوسِطات جديدة للجدول 4-4. وأما التوصيات التي تنجم عن هذا البحث، فيمكن الانطلاق من النتائج مباشرةً وافتراض تقسيم مناطق تغطية كل من الخلايا الفمتويّة والبيكويّة إلى منطقتين CCR وECR بشكل مشابه لآليّة التقسيم بالنسبة للخلايا الماكرويّة، وخاصةً إذا استُخدِمت تقنية الأمواج الميليمتريّة في نظام إرسال موافق للخلايا الصغيرة.

الفصل الخامس

تطوير خوارزميّة تنسيق التداخل

Improving Interference Coordination Algorithm

الفصل الخامس

تطوير خوارزميّة تنسيق التداخل Improving Interference Coordination Algorithm

يراجع هذا الفصل الأعمال ذات الصلة التي ركّزت على منهجية التحكم بالاستطاعة لتنسيق التداخل في النظام LTE-A HetNet، ويجري التحقيق في أهم النماذج المقترحة، ويُبنى استناداً إليها نموذج مطوّر. يُقترح في هذا الفصل مخططٌ لتنسيق التداخل مبنيٌّ على آلية التحكم باستطاعة مجموعة خاصة من الخلايا الفمتويّة تحيط بكل خليّة فمتويّة في الشبكة باعتماد تقنية SoFFR في تخصيص الموارد الراديويّة. توافق مجموعة الخلايا الفمتويّة الخاصة تلك مفهومَ عنقود التداخل ويجري تحديد خواصه المرافقة للخليّة الفمتويّة المتواجدة في مركز العنقود لاتخاذ قرار في التحكم باستطاعتها، وذلك لتحقيق هدف رئيس هو الوصول إلى الحد الأدنى من مستوى التداخل المشترك CoLI. يقتضي النموذج المقترح لتنسيق التداخل تحسين كل من معدل إنتاجيّة الشبكة والكفاءة الطيفية. ويعرض هذا الفصل بشيء من التفصيل الخوارزميّة المقترحة ومحاكاة عملها لفحص الأداء عبر قياس مؤشرات أداء هامة ومقارنتها بالأدبيات ذات الصلة من الناحيتين النظريّة والعملية.

1.5 مقدمة

يصبُّ التوجُّه الحالي المُتّصل بالنظام LTE-A HetNet في تكثيف نشر الخلايا الصغيرة في منطقة الشبكة لسهولة تركيبها وانخفاض تكاليفها، وتُعدُّ شبكة الخلايا الصغيرة حلّاً ناجعاً لزيادة سعة الشبكة وتلبية الطلب المتزايد على الاتصال. ولكن يقتضي استخدام الخلايا الصغيرة معالجة مسألة تنسيق تداخل الخلايا البيني ICIC في النظام LTE-A HetNet وخاصة عند زيادة كثافة نشر الخلايا الصغيرة، لأنّ تخطيط هذه الخلايا يكون على عاتق المستخدم، وتوزُّعها في منطقة الشبكة يكون في الأغلب عشوائيّاً وغير مُتحكَّم به من قبل المُشغِّل. ولهذا فإنّ مسألة تداخل الخلايا البيني ICIC تُعَد من أهم القضايا البحثيّة في هذا السياق. وعموماً، يُنظَر إلى تداخل الخلايا البيني كمشكلة رئيسيّة في النظم الخلويّة وخاصة عند إضافة نفس النمط من الخلايا بتوزُّع كثيف، وهذا يوافق مواجهة تحدّيات تتعلق بإعادة الاستخدام الكثيف للموارد الراديويّة ذات المجالات الترددية المتطابقة؛ ما يجعل المستخدم معرَّضاً لتداخل الإشارة المفيدة المستقبلة من إحداها (الخليّة المُخدِّمة) مع إشارات يجري استقبالها أيضاً من باقي الخلايا المماثلة لها في المورد الراديوي. تتداخل إشارة الخليّة المماثلة هنا مع الإشارة المفيدة سواء أكانت منتشرة وفق خط نظر مباشر أم لا، وسواء أكانت الخليّة الفمتويّة المسببة للتداخل قريبة أم بعيدة عن الخليّة الفمتويّة المُخدِّمة،

ويُعزى ذلك إلى ظاهرة الخفوت بنمطه الناتج عن خفوت الظل أو الناتج عن خفوت تعدد المسارات. من الناحية الإحصائيّة، يمكن أن تكون الخليّة المسبِّبة للتداخل بعيدة عن الخليّة المخدِّمة ومع ذلك من الممكن أن تسلك إشارتها عدة مسارات لتصل إلى تجهيزة المستخدم مضخمَّة ومعاكسة بالطور وذات شدة تُقارب شدة الإشارة التي يستقبلها من خليته المخدِّمة؛ مما يؤدي إلى تداخل راديوي هدّام Destructive Radio Interference بين الإشارتين المفيدة والمتداخلة، وبالتالي إلى تخفيض قيمة نسبة الإشارة إلى التداخل والضجيج SINR وزيادة معدّل خطأ البت Bit Error Rate (BER) وصعوبة في استخلاص المعلومة من الإشارة الكُليّة المستقبلة، وهو ما يجعل معدّل نقل المعطيات أصغر من قيمته الاسميّة الأصلية. لذلك، حظيت أبحاث مخطَّطات التخفيف mitigation schemes من آثار التداخل المشترك CoLI باهتمام كبير عند تطبيق تقنيات الخلايا الفمتويّة وتخطيطها ودمجها مع الخلايا الماكرويّة في الشبكة HetNet، وذلك لتحقيق إعادة استخدام الطيف الكثيف على نحو يقلّل من آثار التداخل CoLI في معايير الجيل الرابع مثل النظام LTE-A من النظم الخلويّة. في هذا السياق، يمكن تصنيف مخطَّطات التخفيف من التداخل البيني في ثلاث مجموعات رئيسية، هي تنسيق التداخل Interference Coordination، وإلغاء التداخل Interference Cancellation، وتعشِئة التداخل Interference Randomization [129]. يتمحور هذا الفصل حول مفهوم تنسيق التداخل، وبتحديد أكثر حول خوارزميّات تنسيق التداخل المستند إلى التحكُّم باستطاعة إرسال المحطّة القاعديّة للخليّة الفمتويّة، وذلك لكون التداخل المشترك CoLI بين المحطّات القاعديّة للخلايا الماكرويّة يجري حلّه مباشرة من خلال تقنية إعادة الاستخدام الترددي الكسري المرن SFFR حيث تستخدم الخلايا الماكرويّة المنتمية إلى نفس العنقود مجالات ترددية متباينة وفق هذه التقنية، ويكون تنسيق التداخل البيني للشبكة الفمتويّة حاجة ملّحة لا تعالجها تقنيات FFR التقليديّة.

لقد بينّ الفصل السابق أنّ إدارة الموارد الراديويّة بتطبيق تقنية إعادة استخدام التردد الكسري FFR حل ناجع لتخصيص مورد المجال الترددي في النظم الخلوية، كما أنّها تؤمن حلاً شبه مثالي لمشكلة التداخل CroLI بين الخلايا الماكرويّة والخلايا الصغيرة في النظام LTE-A HetNet. وأظهرَ الفصل السابق أنّ التقنية SoFFR المُطوَّرة في المخطط SORRA هي الأفضل مقارنة بالطرائق الأخرى في إعادة استخدام التردد. تتطلب تقنية SoFFR تقسيم منطقة تغطية الخليّة إلى منطقة مركز الخليّة الماكرويّة CCR ومنطقة حافة الخليّة الماكرويّة ECR، بحيث تكون استطاعة إرسال الخليّة الماكروية باتجاه منطقة الحافة أكبر من تلك الموجهة إلى منطقة المركز، وتخصيص عرض المجال الترددي الكلي لكل خليّة من خلايا الشبكة، ففي منطقة المركز CCR تختلف المجالات الترددية المستخدمة بين الخلايا الماكرويّة والفمتويّة، وكذلك في منطقة الحافة ECR، فإذا كان العرض الكلي للمجال الترددي المتاح B، يقسم عندئذٍ إلى ثلاثة أقسام متساوية بالعرض الطيفي وذات محتوى 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 المحطّات FBS_S وMBS_S

المتواجدة في نفس منطقة التغطية، فلا تتداخل إشارات الخلايا الفمتويّة المتواجدة في منطقتين مختلفتين CCR وECR، ولا تتداخل إشارات محطّات MBSs موجودة في نفس العنقود. بحسب مخطّط التخصيص SoFFR، يُخَصَّص عرض مجال ترددي يساوي $\frac{1}{3}$B لمستخدمي الخليّة الماكرويّة MUEs في كل منطقة حافة ECR من منطقة تغطية الخليّة الماكرويّة من أصل الخلايا الماكرويّة الثلاث في عنقود الشبكة غير المتجانسة الثلاثي المبيَّن في الشكل 4–3، ويكون عرض المجال هذا مختلفاً فيما بين الخلايا الماكرويّة الثلاث المشكِّلين لعنقود الشبكة، وأما ما تبقى من عرض المجال الكُلّي (أي $\frac{2}{3}$B) فيُخصَّص لمستخدمي الخليّة الماكرويّة MUEs المتواجدين في منطقة المركز CCR ويكون بالمثل مختلفاً عمّا خُصِّص لمنطقتي المركز المتبقيّة في عنقود الشبكة الثلاثي. فإذا تواجدتْ الخلايا الفمتويّة في منطقة المركز وطلب مستخدموها FUEs الاتصال عندئذٍ يُخصَّص لهم الثلث المتبقي من عرض المجال المخصّص، وهكذا لا تتداخل إشارة المحطّة FBS مع إشارة المحطّة MBS، وإذا تواجد مستخدمو الخلايا الفمتويّة في منطقة الحافة ECR، عندئذٍ يُخصَّص لهم كامل الثُلثين المتبقيين من الثُلث المُعطى لمنطقة الحافة ECR للخليّة الماكرويّة الواحدة. يُلخِّص الجدول 5–1 آليّة التخصيص SoFFR.

لقد ركَّز الفصل السابق على معالجة مشكلة آليّة التخصيص هذه في حال وجود عدد كبير جداً من المستخدمين في الشبكة غير المتجانسة لدرجة عدم كفاية الموارد الترددية لكل الخلايا الفمتويّة والماكرويّة المنتشرة في كامل الشبكة مع ازدياد الطلب على الاتصال، وبقيت مشكلة التداخل المشترك CoLI بين الخلايا الفمتويّة دون حل، وهو ما يعالجه هذا الفصل، حيث ندمج مخطّط التنسيق SoFFR مع مخطّط التنسيق المبني على مفهوم التحكُّم باستطاعة الإرسال في المحطّات FBSs للوصول إلى تطوير واعد لتوزيع مناسب لاستطاعة الإرسال لجميع الخلايا الفمتويّة المتواجدة في منطقة الشبكة، سواء تلك المتوضِّعة في منطقة المركز CCR أو تلك المتوضِّعة في منطقة الحافة ECR من الخليّة الماكروية في عنقود الشبكة الثلاثي.

الجدول 5—1: آليّة التخصيص SFFR في الشبكة غير المتجانسة حيث يختلف المحتوى الترددي المقابل لكل عرض مجال متاح $B_{1\leq i\leq 3}$ (الباحث).

نمط تجهيزة 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 الحافة EC	$B_2 \cup B_3$	$B_1 \cup B_3$	$B_1 \cup B_2$

2.5 الدراسات المرجعية

بيّن العمل المنشور مؤخَّراً في [130] أشهر المقاربات المدروسة في مجال إدارة التداخل في الشبكات التي تتضمن الخلايا الفمتويّة، وأظهر مقاربة التحكُّم باستطاعة الإرسال إحدى أهم التوجهات الرئيسيّة في حل مسألة تنسيق تداخل الخلايا البيني ICIC، حيث يمكن التحكُّم في الاستطاعة إمّا بطريقة مركزيّة عبر نظام إدارة الخلايا الفمتويّة Femtocell Management System (FMS)، أو لا مركزيّة عبر المحطة القاعدية للخليّة الفمتويّة FBSs نفسها.

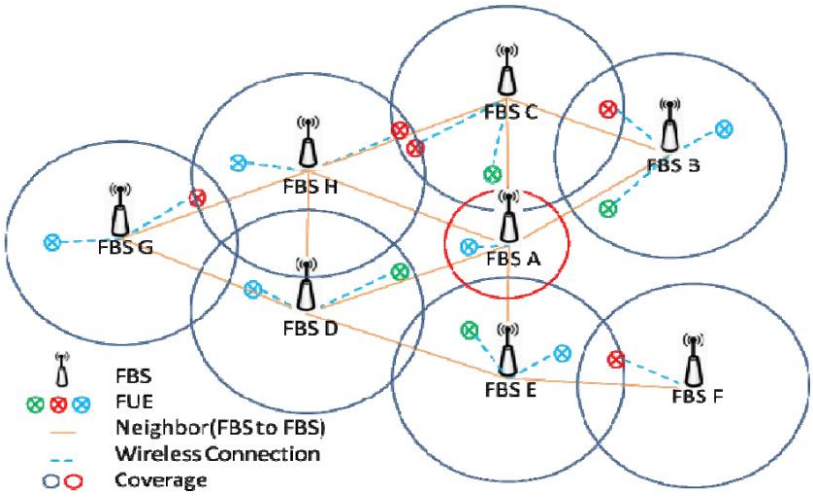
في سيناريو الشبكة غير المتجانسة متعددة الطبقات مثل LTE-A HetNet، تدرس الأدبيّات مخطط تخصيص الموارد الذي يجمع بين تخصيص الحامل الجزئي Subcarrier في قناة OFDMA واستراتيجيات التحكُّم في الاستطاعة كما في [131]. يقلّل هذا التوجُّه من استطاعة الإرسال لكل مستخدم على كل حامل جزئي مُخصَّص له، ويقلّل بفعاليّة كبيرة من تداخل مستخدمي الخليّة الفمتويّة FUEs مع إشارات المحطّات القاعديّة المجاورة للخليّة الفمتويّة FBS المخدِّمة، كما يحقق غَرَضاً مفيداً هو توفير فقدان الاستطاعة المستخدمة في تغذية تجهيزات المحطّة القاعديّة بالنظر إلى الاستطاعة الكليّة المستهلكة في الشبكة غير المتجانسة.

مع التأثير الملحوظ والنمو السريع لشبكات LTE-A، ارتفع معدّل تركيب المحطّات القاعديّة للخلايا منخفضة استطاعة الإرسال مثل المحطّات FBSs لا سيما في المناطق ذات الكثافة السكانية العالية؛ إذ تخضع هذه المحطّات القاعديّة لزيادة حمل overloaded من قبل المستخدمين، وهذا هو السبب الرئيس لبناء الشبكات HetNets. ويُعَد تداخل الخلايا المشترك CoLI مرتفعاً في هذا النوع من الشبكات غير المتجانسة، وهناك العديد من الحلول للتخفيف من هذا التداخل مثل تنسيق تداخل الخلايا البيني وذلك على مستوى الحامل الفرعي للإشارة المعدّلة حيث تُستخدم إطارات فرعية شبه فارغة (لا تتضمن أي معلومة (لا تحمل بُتّات)) 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 للخليّة الفمتويّة. ففي العمل [132]، اقترح الباحثون تقنية ABS منخفض الاستطاعة المستهلكة بشكل تكيّفي للتقليل من نسبة التداخل وفق مؤشر SINR من أجل الحصول على معدَّل إنتاجيّة أفضل وتخفيف تداخل الخلايا البيني. فعندما يكون المستخدم بعيدًا عن الخليّة، يُعَد كمستخدم حافة ويحصل على أولوية أعلى لتقديمه على غيره في الخدمة. لقد أظهرت نتائج هذا العمل تحسيناً في معدَّل الإنتاجيّة لجميع المستخدمين في الخلايا الماكرويّة والخليّة الفمتويّة، ولكن المشكلة الرئيسية في تقنية ABS تكمن في التعقيد الزمني وفي أنّ الدقة المطلوبة لها هامش خطأ كبير نسبيّاً يُراعى تخفيضه في الأعمال ذات الصلة، ويمكن أن تكون الكفاءة الطيفية لها منخفضة لعدم استخدام جزء كبير من عرض المجال الترددي بسبب الإطارات الفرعية التي لا تحمل أي معلومات للمستخدم. بكل

الأحوال، يستند مبدأ التقنية ABS إلى مفهوم تخفيض الاستطاعة المرسلة الذي يُعنى به هذا البحث، ولو كان على مستوى استطاعة الإطار الفرعي المرسل فقط بشكل متسلسل باتجاه المستخدم، وليس على مستوى الاستطاعة الكلية المرسلة من قبل الخليّة الصغيرة (الفمتويّة) كما نركِّز في هذا البحث.

اقترح الباحثون في [28] تقنية التحكُّم النشط في الاستطاعة Active Power Control (APC)، التي تقلّل مستوى التداخل بين الخلايا الماكرويّة والفمتويّة من النمط CroLI بالنسبة إلى مستخدم تُخدِّمُهُ الخليّة الماكرويّة MUE الناتج عن الإشارة غير المفيدة للوصلة الهابطة من الخلايا الفمتويّة المجاورة لها، مع الأخذ بالحسبان أنَّ المحطّات FBS_S وMBS_S تعمل على نفس المجال الترددي (لم تُؤخَذ تقنية إعادة الاستخدام الترددي بالحسبان في نموذج الشبكة المدروس في [28]). تمكَّن الباحثون في هذا العمل من تقليل استهلاك الاستطاعة غير الضروري، وأظهرت نتائج المحاكاة لديهم أنّ تقنية APC المقترحة تقلّل بفعّالية التداخل من النمط CroLI وتحسن الإنتاجيّة للمستخدمين MUEs، وتوفر تقنية APC مقايضة Trade-off متوازنة في تحقيق جودة الخدمة اللازمة QoS للمستخدمين FUEs وتقليل تداخل الحوامل البيني ICI الناتجة عن تجهيزة المستخدم MUE المتواجدة على مقربة من المحطّات FBS_S المجاورة. يُعَد الحل APC ناجعاً فقط في سياق شبكات LTE-A HetNets التي تفترض أنّ المجالات الترددية مشتركة بين الخليّتين الماكرويّة والفمتويّة، وهو سيناريو تقليدي غير شائع في حالة الشبكة كثيفة الخلايا الفمتويّة حيث لا بدّ من استخدام تقنيات إعادة استخدام التردد مثل SoFFR التي تُعَد الحل الأمثل والبديل عن [28] وبمجرد تطبيقها فإنّها تُلغي التداخل من النمط CroLI، سواء أتواجدت المحطّة FBS في منطقة الحافة أم منطقة المركز من منطقة تغطية المحطّة MBS. واستجابة لهذا الأمر، اعتُمِدَ استخدام التقنية SoFFR في نموذج الشبكة غير المتجانسة المدروس في هذا البحث ليكون حلّاً للتداخل من النمط CroLI بين إشارات المحطّات MBSs وFBS_S المتواجدة في نفس منطقة خليّة واحدة من الخلايا الماكرويّة للعنقود الثلاثي، وحلاً للتداخل من النمط CoLI بين إشارات المحطّات MBSs المتواجدة في خليتين ماكروبتين متجاورتين في العنقود الثلاثي، وفي المقابل نركِّز على حل مشكلة التداخل من النمط CoLI الحاصل بين إشارات المحطّات FBSs المتواجدة في نفس منطقة الشبكة للخليّة الماكرويّة الواحدة من العنقود الواحد، سواء أكانت منطقة المركز CCR أم منطقة الحافة ECR، وهو التداخل الذي يقتضي تدهوراً في الأداء في حال استخدام عدد كبير نسبياً من الخلايا الفمتويّة في كل من منطقة الحافة و منطقة المركز لتغطية المحطة الماكرويّة في الشبكة غير المتجانسة. يُعنى هذا الفصل بمشكلة التداخل هذه لأنّ تلبية متطلبات معدّلات نقل المعطيات العالي ومعدّل الطلب على الاتصال بالشبكة يتحقق مباشرة من خلال استخدام عدد كبير من المحطات FBS_S المنتشرة عشوائياً في الأغلب حول محطات MBSs، لذا وجبَ تنسيق التداخل الناتج عنها.

قدَّم الباحثون في [25] فكرة مثيرة للاهتمام في بساطتها، ركَّزت هذه الفكرة على تنسيق التداخل من خلال النظر إلى الخلايا المسببة له بالحد الأقصى وفق معيار عدد خلايا الجوار لكل خليّة فمتويّة في الشبكة، فإذا كان هناك عدد من خلايا الجوار أكبر من حدّ معيّن وجبّ عندئذٍ التحكُّم باستطاعة الخليّة الفمتويّة التي تتوسط هذه الخلايا، وإلا تبقى قيمة استطاعة الإرسال على ما هي عليه، كما يُبيّن الشكل 5-1. ثمّ قاموا بتطوير خوارزميّة مستندة إلى هذه الفكرة وقابلة للتطبيق في النظام LTE-A HetNets في ورقتهم البحثية [26]، وأطلقوا عليها اسم Trouble FBS-Aware Power Backoff (TAPB). تقترح هذه الخوارزميّة حلاً لمشكلة التداخل من النمط CoLI الذي يؤثر في مستخدمي الخلايا الفمتويّة FUEs المتواجدين في منطقة تغطية خليّة ماكرويّة تستخدم مجالات ترددية مختلفة المحتوى الترددي عن المجالات الترددية المتاحة للخلايا الفمتويّة، أي إنّ تقنية إعادة استخدام التردد مطبقة في نموذج الشبكة التي جرَت محاكاتها في هذا البحث ولكن بأبسط صورها؛ إذ افترضت تقنية إعادة الاستخدام الكسري التقليدي والتي تُعَد النسخة الأولى من التقنية SoFFR. تتمحور فكرة الخوارزميّة المقترحة في [26] حول تنسيق التداخل الحاصل بحيث جرى تخفيضه إلى حد مناسب، وذلك بالتركيز على عدد الخلايا المحيطة بكل خليّة فمتويّة واعتماد هذا العدد مؤشِّراً على مستوى التداخل الحاصل في الشبكة غير المتجانسة، فإذا تجاوز عتبة معينة، يؤخذ عندئذٍ قرارٌ بتخفيض استطاعة الخليّة الفمتويّة المقابلة، وهكذا يجري مسح جميع الخلايا الفمتويّة بالشبكة، وبالمحصلة يقل استهلاك الاستطاعة في كامل النظام وفي الوقت نفسه يخفض مستوى تداخل الطبقات المشترك CoLI بين الخلايا الفمتويّة. ومع ذلك، فإنّ أخذ عدد المحطّات القاعديّة FBSs المجاورة فقط بالحسبان غير كافٍ لتحديد أي من تلك المحطات التي تحتاج فعلاً لاتخاذ قرار التحكُّم في الاستطاعة، فإذا كانت جميع المحطّات الفمتويّة FBSs المجاورة موجودة في منطقة الحافة ECR، فإنّ تداخل المحطّة القاعديّة FBS المركزيّة مع المحطّة القاعديّة الفمتويّة المجاورة يكون صغيراً نسبيّاً؛ ولا يؤثر في الاتصال العادي لتجهيزة مستخدم خليّة فمتويّة FUE، فلا تحتاج المحطّة FBS المقابلة هذه للتحكُّم في استطاعة الإرسال؛ وبمجرد أن تتحكّم العديد من المحطّات FBSs باستطاعة الإرسال، قد يصبح جزء من تجهيزات مستخدمي الخليّة الفمتويّة FUE المتواجدين في منطقة الحافة لمكان تغطية الخليّة الفمتويّة مستخدمين منعزلين ينقطع اتصالهم مع خليتهم المخدِّمة؛ ما يقلل من معدّل إنتاجيّة الشبكة.



الشكل 5–1: التحكم باستطاعة المحطّة القاعديّة للخليّة الفمتويّة FBS بناءً على معلومة عدد خلايا الجوار الفمتويّة المحيطة بها [25].

وقدَّم الباحثون في [27]، تطويراً ثانوياً على عملهم السابق في [26] بحيث يُعَدل شرط اتخاذ قرار التحكم بالخليّة الفمتويّة، فبالإضافة إلى الأخذ بالحسبان مؤشِّر عدد خلايا الجوار لكل خليّة فمتويّة، وأخذت القيمة الوسطيّة median لمجموعة قيم المسافات التي تفصل كل خليّة FBS عن خلايا المحطّات الفمتويّة FBSs التي تجاورها. استخدم المخطط المقترح في [27] عدد العقد المجاورة الموجودة حول مركز كل خليّة فمتويّة، وعرَّف مفهوم درجة التداخل الذي تولّده الخليّة المركز هذه مع الخلايا الفمتويّة المجاورة شرطاً لتحديد محطة FBS التي تتطلب التحكم في استطاعتها، وذلك من خلال مفهوم المسافة الوسطية المحددة من الوضع النسبي لخلايا الجوار بالنسبة للخليّة المركزية. وفق هذا التطوير تُعدَ المسافة بين العقد العامل الرئيس الذي يؤثر في درجة التداخل، وفي قرار التحكم بالاستطاعة.

يتبنى المخطط المقترح في [27] فكرة التحويل المكافئ equivalent transformation، ويحوّل مؤشِّر درجة تداخل الخليّة المجاورة من عدد خلايا الجوار حول الخليّة المركزية إلى مؤشر المسافة التي تفصلها عن كل خليّة مجاورة لها. عندما يفي عدد العقد المجاورة ومسافتها من العقدة المركزية بالحد المعياري وفق عتبة معرَّفة لهذا الغرض، تقوم الخليّة الفمتويّة المركزية بضبط استطاعة الإرسال الخاصة بها ديناميكيّاً وفق تقرير قياسات مأخوذ من تجهيزة المستخدم FUE المُخدَّمة من الخليّة المركزيّة.

أظهرت نتائج المحاكاة في [27] أنَّ المخطَّط المقترح يحقق الغرض من تقليل التداخل دون التأثير في الاتصال العادي للمستخدم، ويحسِّن معدّل إنتاجيّة النظام في الوقت نفسه؛ ما يحل بفعَّالية أوجه القصور في المخطط التقليدي الذي لا يعتمد تقنية التحكم بالاستطاعة حلاً لتنسيق التداخل. بكل الأحوال، يمكن إجراء تحسين إضافي إلى النموذج المطوَّر في [27] والأخذ بالحسبان حالات التداخل الممكن حصولها بسبب ظاهرة الخفوت حتى من خلايا الجوار الأبعد مما اعتمده العمل [27]. لذلك، يقترح هذا البحث مفهوم عنقود التداخل ويقوم بتطوير النموذجين المقترحين في كل من [26,27]، وتعميم الأفكار المقترحة فيهما

ويضيف تحسُّناً ملحوظاً في الأداء مقارنة بكل منهما، ويفصّل لاحقاً نقاط الضعف التي تتطلب هذا التعميم لحل المشاكل المقابلة. تُظهِر نتائج المحاكاة في هذا الفصل تحسّناً ملموساً في أداء النظام من حيث مستوى التداخل والنسبة SINR، ومن حيث معدَّل إنتاجيّة الشبكة وكفاءة قناة الاتصال في الشبكة غير المتجانسة كاملةً.

3.5 الحل المُقترَح: عنقود التداخل Interference Cluster

استُخدِم مفهوم الخلايا المجاورة Neighbor Cells لاختيار الخليّة الفمتويّة الواجب تخفيض استطاعة إرسالها للتحكُّم في الاستطاعة لأول مرة في [133]. عندما تكون الخليّة الفمتويّة مجاورةً لعددٍ كبير نسبياً من الخلايا الفمتويّة المحيطة بها وعلى مسافات متباينة عنها، فمن المحتمل أن تتداخل إشارة المستخدم المرتبط بها مع الإشارات التي تُرسِلها الخلايا المجاورة، ويتجلى مفهوم التحكُّم بالاستطاعة هنا من خلال تقليل استطاعة الإرسال للخليّة الفمتويّة المجاورة لذلك العدد الكبير من الخلايا الفمتويّة الأُخرى المتوضِّعة حولها، وبذلك يمكن تخفيف التداخل إلى حدٍّ كبير. لقد اتبّع الباحثون في كل من [27,26]، المنهجيّة نفسها في تعيين الخليّة الفمتويّة الواجب تخفيض استطاعتها، فسمَّاها الباحثون في [26] بالعُقدة المُشكلة Trouble Node (TN)، وأمّا الباحثون في [27] فسموها العُقدة مصدر التداخل Interference Source Node (ISN)، فعندما يتجاوز عدد خلايا الجوار لخليّة فمتويّة حدّاً معيناً، يكون لازماً عندئذٍ أن يجري تخفيض استطاعة الخليّة الفمتويّة المقابلة. إذن، في كل من [27,26] يجري استخدام عدد خلايا الجوار لكل خليّة فمتويّة مؤشِّراً على تلك الخلايا الفمتويّة في الشبكة التي تحتاج لتنفيذ تقنية التحكُّم في الاستطاعة عندها. ونستعرض فيما يلي طريقة تحديد جوار الخليّة الفمتويّة، وحساب عددهم في الأدبيّات [27,26]، والشرط الواجب تحقيقه لتخفيض استطاعة الخليّة الفمتويّة المركزية.

تجري إدارة الخلايا الفمتويّة الكلية في الشبكة غير المتجانسة من خلال وحدة نظام إدارة الخليّة الفمتويّة FMS التي تقوم بجمع المعلومات من المحطّات القاعديّة لتلك الخلايا. وفق [26] تُرسِل الوحدة FMS أمر تخفيض الاستطاعة بعد مرحلة جمع المعلومات من المحطّة القاعديّة للخليّة الفمتويّة. ومن أجل بناء جدول جوار Neighbor Table لكل محطّة قاعديّة للخليّة الفمتويّة FBS، تقوم كل محطة قاعديّة FBS بمضاعفة استطاعة إرسالها الأصلية P_{0F} dBm وإرسال رسالة "Hello" إلى الخلايا الفمتويّة المجاورة، وكل خليّة فمتويّة مجاورة لها تستطيع استقبال الرسالة (إن كانت ضمن منطقة التغطية الناتجة عن مضاعفة استطاعة الإرسال)، تقوم بإعادة إرسال نفس الرسالة إلى الخليّة المركزية ضمن منطقة التغطية دليلاً على كونها إحدى خلايا الجوار المساهمة في إحداث تداخل فعلي عليها. بالنتيجة، تقوم الخليّة المركزية بجدولة الخلايا الفمتويّة التي تمّكنت من التراسل معها، ليمثل الجدول الناتج مجموعة خلايا الجوار. فإذا كان لدينا M خليّة فمتويّة في منطقة ما من الشبكة، يُشار بالرمز B_i إلى عدد خلايا الجوار المحيطة بخليّة فمتويّة مركزية FBS_i، حيث $1 \leq i \leq M$. ثمّ تقوم كل محطة قاعدية FBS بإرسال

معلومات جدولها إلى وحدة FMS، وبناءً على معلومات مواقع الخلايا الفمتويّة في الشبكة والمعيار المقترح في [26] يُرسل أمر تخفيض الاستطاعة للخليّة المركزية واعتبارها من النمط TN. وأما وفق [27] فإنّ قرار تخفيض الاستطاعة (التحكُّم بالاستطاعة) يجري ضمن كل خليّة فمتويّة على حِدة في الشبكة، دون المساندة من وحدة الإدارة FMS، حيث تقوم كل خليّة فمتويّة 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 كل خليّة فمتويّة مجاورة وصلتها الرسالة ومنها، فإذا تجاوز عدد خلايا الجوار حداً معيناً (هو نفسه قيمة العتبة المفترضة في [25,26] تقرر المحطة القاعدية للخليّة المركزية تخفيض استطاعتها أو عدم تخفيضه.

يتجلى المعيار الرئيس المقترح في [26] لاتخاذ قرار تخفيض الاستطاعة في حساب المقدار $TN_{low\ bound(lb)}$ الذي يُعَد العتبة التي يُقارن بها كل عدد B_i خاص بكل خليّة فمتويّة في الشبكة الكلية، ويعطى TN_{lb} بالعلاقة (5−1).

$$TN_{lb} = A + n \times SD \qquad (1-5)$$

وفيها يمثِّل A متوسط عدد خلايا الجوار بالنسبة لكل الخلايا الفمتويّة في منطقة معينة من الشبكة، الذي يعطى بالعلاقة (5−2).

$$A = \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M} B_i \qquad (2-5)$$

ويمثّل SD الانحراف المعياري المقابل له، ويعطى بالعلاقة (5−3).

$$SD = \sqrt{\frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M}(A - B_i)^2} \qquad (3-5)$$

وحيث n هو ثابت جداء جَرَتْ معايرته في كل من [26,27] ليساوي 1.

تُمثل العلاقة (5−4) متراجحة اتخاذ قرار التحكُّم بالاستطاعة المرسلة P_i للمحطة القاعديّة FBS_i وفقاً للمرجع [26]:

$$P_i(dBm) = \begin{cases} P_{0F}(dBm), & B_i < TN_{lb} \\ P_{0F}(dBm) + RSRP_0(dBm) - \min\limits_{1\le j\le U} RSRP_{ij}, & B_i \ge TN_{lb} \end{cases} \qquad (4-5)$$

حيث P_{0F} هي استطاعة الإرسال الاسميّة nominal power (قبل التحكم بالاستطاعة)، و$RSRP_0$ هي أصغر استطاعة مستقبلة تُمكِّن المستخدم المرتبط راديوياً بالخلية الفمتوية من إجراء الاتصال معها، وتمثل حساسية المستقبل Receiver Sensitivity في جهاز الاتصال الخاص بالمستخدم. تُحسَب قيمة $RSRP_0$ وفق [27, 26] من العلاقتين (5−5) و (5−6) من خلال نصف قطر التغطية للخلية الفمتوية R_F واستخدام L_{ij} نموذج فقد المسار المُتبّع في المعيار 3GPP [134] والمحسوب بالنسبة للمستخدم ذي الدليل j عندما يستقبل إشارة من المحطّة القاعديّة FBS_i ذات الرقم i.

$$RSRP_0(dBm) = P_{0F}(dBm) - \underbrace{L_{ij}}_{d_{ij}=R_F}(dB) \qquad (5-5)$$

$$L_{ij}(dB) = 127 + 30\log_{10}(d_{ij}/1000) + X_g(dB) \qquad (6-5)$$

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

يمثل المقدار $\min_{1\le j\le U} RSRP_{ij}$ في العلاقة (5−4) أصغر استطاعة مستقبلة من بين مجموعة تجهيزات المستخدمين FUEs (عددهم U) والمُخدَّمين 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 المحطّة القاعديّة FBS_i يكون أصغر أو يساوي R_F ويُحسَب المقدار $RSRP_{ij}$ وفق العلاقة (5−7).

$$RSRP_{ij}(dBm) = P_i(dBm) - \underbrace{L_{ij}}_{@\ d_{ij}\le R_F}(dB) \qquad (7-5)$$

يمكن تفسير العلاقة (5−4) كما يلي: المقدار $RSRP_0 - \min_{1\le j\le U} RSRP_{ij}$ (المحسوب بواحدة dBm) هو أصغر أو يساوي الصفر دوماً، لأنّ المسافة التي تفصل تجهيزة المستخدم FUE عن المحطّة القاعديّة للخلية الفمتوية FBS تكون أصغر أو تساوي نصف قطر التغطية، أي $d_{ij} \le R_F$ ، وذلك بحسب العلاقتين (5−5) و(5−7)، وهذا قبل اتخاذ قرار تخفيض الاستطاعة أي في حالة ما قبل التحكُّم بالاستطاعة حيث $P_i = P_{0F}, \forall i$، وبالتالي تكون نسبة تخفيض الاستطاعة المُطبَّق على كل خليّة فمتويّة عند تحقق الشرط $B_i \ge TN_{lb}$ هي $\alpha = \frac{RSRP_0(mW)}{\min_{1\le j\le U} RSRP_{ij}(mW)} \le 1$ بحيث $\alpha = \frac{P_i(mW)}{P_{0F}(mW)}$. تضمن هذه النسبة بقاء الاتصال بين تجهيزة المستخدم وبين الخليّة الفمتويّة التي جَرَى تخفيض استطاعتها، حيث تستطيع استطاعة الإرسال الناتجة المحافظة على الوصلة الراديوية واستمرار الاتصال مع جميع مستخدميها قبل وبعد تنفيذ قرار التحكُّم بالاستطاعة.

بالمثل، يتجلى المعيار الرئيس المقترح في [27] لاتخاذ قرار تخفيض الاستطاعة أيضاً في حساب المقدار TN_{lb}، وكذلك يجري تحديد عدد خلايا الجوار باستخدام ضعفي استطاعة الإرسال $P_{0F}(mW)$، ولكن آليّة تحديد المسافات التي تفصل خلايا الجوار عن كل خليّة فمتويّة مركزيّة لم تجرِ باستخدام وحدة FMS، بل باستخدام جداء سرعة الضوء بالتأخير الزمني الذي استهلكته الرسالة "Hello" من وإلى كل خليّة من خلايا الجوار؛ فضلاً عن ذلك، يُعَدِّل البحث [27] على البحث [26] بإدخال شرط إضافي إلى إجرائية اتخاذ قرار التحكُّم بالاستطاعة ويتجلى هذا الشرط من خلال حساب القيمة الوسطيّة لمجموعة المسافات $\{D_i\}$ التي تفصل خلايا الجوار عن الخليّة المركزيّة FBS_i، ومقارنته مع R_F نصف قطر التغطية

للخليّة الفمتويّة وعلى أساس هذه المقارنة تخفّض استطاعة الإرسال للخليّة المركزيّة. أي الاستعاضة عن العلاقة (5−4) بالعلاقة (5−8).

$$P_i(dBm) = \begin{cases} P_{0F}(dBm), & median(\{D_i\}) > R_F \\ P_{0F}(dBm) + RSRP_0(dBm) - \min\limits_{1\le j\le U} RSRP_{ij}(mW), & median(\{D_i\}) \le R_F \end{cases} \quad (8-5)$$

بكل الأحوال، بالنسبة إلى آليّة اكتشاف خلايا الجوار في البحث [26] أو [27]، من الممكن وباحتمال كبير (خاصة إذا كان عدد الخلايا الفمتويّة في المنطقة المعنية من الشبكة غير المتجانسة صغير نسبيّاً)، أن يكون جدول الجوار فارغاً ($B_i = 0$)، وهذا سوف يؤدي إلى عدم إجراء أي تحكُّم بالاستطاعة على الخلية الفمتويّة المقابلة مع أنّه من الممكن أن تتواجد خلية فمتويّة في جوارها على بعد كبير منها نسبيّاً ولكن بسبب ظاهرة خفوت الظل وخفوت تعدد المسارات، تؤثر إشارتها في إشارة الخلية الفمتويّة تلك وفق تداخل غير مهمل، ولن يجري التحكُّم بالاستطاعة إلا على عدد صغير نسبياً من الخلايا الفمتويّة؛ ممّا يؤدي إلى تحسُّن نسبي في مستوى التداخل الذي جَرَى تخفيضه؛ ومع أن شرط عدد خلايا الجوار يعني الأخذ بالحسبان نحو نصف خلايا الجوار للخلية المركزية إلاّ أنّه لا يؤخذ بالحسبان المجموعة المتبقيّة من هذه الخلايا التي تؤثِّر أيضاً في قيمة التداخل الناتجة التي يمكن أن تكون مرتفعة، نظراً للطبيعة العشوائيّة لظاهرة خفوت إشارة الاتصال الخَلَويّة وخاصّة في مناطق الازدحام السكاني، حيث يمكن أن يحصل التداخل الهدّام بين الإشارات الواصلة إلى تجهيزة المستخدم (الذي يُمكن أن ينتج عن خلايا جوار بعيدة نسبيّاً عن الخلية المركزية) وبالتالي مواجهة هذه المسألة غير محسومة عند تطبيق نموذج الخلية TN في المرجع [26] أو نموذج الخلية ISN في المرجع [27]. يُرَكَّز في هذا البحث على نقاط الضعف هذه. ولإجراء التطوير على النموذج، يجب البحث عموماً عن القيمة المناسبة لرفع استطاعة إرسال الخلية الفمتويّة الواجب تطبيقها لاكتشاف خلايا الجوار، والمسافة الموافقة لها التي سوف تحدد نصف قطر عنقود التداخل المعني في هذا البحث. ونقترح هنا مفهوم عنقود التداخل Interference Cluster (IntC) الذي تشكله مجمل خلايا الجوار لكل خلية من الخلايا الفمتويّة في الشبكة، ونحدد مواصفاته مع فكرة الخوارزميّة المقترحة لتنسيق التداخل كما يلي:

- فيما يخص إجرائيّة استكشاف الجوار Neighbor Discovery لاستكشاف خلايا الجوار، تقوم كل محطّة FBS بمضاعفة استطاعة إرسالها بمقدار K عن المقدار الأصلي للاستطاعة المرسَلة P_{0F}، وترسل الرسالة "Hello" إلى محيطها في الشبكة، وتنتظر الرد من أي محطّة FBS أُخرى متواجدة في جوارها.
- تُشكِّل المحطّة FBS جدول خلايا الجوار الخاص بها اعتماداً على التراسل المنجز بينها وبين خلايا الجوار المحيطة.
- نعرّف، بناءً على معلومات المسافات التي تفصل بين خلايا الجوار والخلية المركزية، نصف قطر عنقود التداخل IntC Radius (ICR) بأنّه المسافة التي توافق مضاعفة استطاعة الإرسال بمقدار K بفرض

أن كل خلية فمتويّة تتراسل مع الخليّة الفمتويّة قيد المعالجة هي مستخدم في الشبكة، وحساسية المستقبل لديها تتوافق مع القيمة $RSRP_0$ المستخدمة في الأدبيّات.

- بناءً على معلومات جدول الجوار السابق، وبحسب قيم المسافات $\{D_i\}$ بالنسبة لكل خلية فمتوية في منطقة الشبكة غير المتجانسة، تُحسب القيمة $D = mean(\{D_i\}) + std(\{D_i\})$ التي تُمثِّل مجموع متوسّط المسافات $mean(\{D_i\})$ وانحرافها المعياري $std(\{D_i\})$، وهذا يمثل منهجيّة بديلة للعلاقة (5−1) ومماثلة لها عموماً.

- لاتخاذ قرار تخفيض الاستطاعة للخلية FBS_i نقارن القيمة D المحسوبة لها وبنصف قطر عنقود التداخل العام المعتمد في هذا البحث، فإذا كانت أصغر منه، يجري تخفيض الاستطاعة للخلية الفمتويّة المقابلة، وإلاّ نحافظ على قيمة استطاعة إرسالها الأصليّة P_{0F}.

بالمحصلة، إذا كان لدينا M خليّة فمتوية في منطقة الشبكة غير المتجانسة، سوف يكون لدينا M عنقود تداخل لكل منه نصف قطره الخاص ICR_i يساوي $\max_i(\{D_i\})$، ويكون عدد خلايا الجوار المشكلة لهذا العنقود ولكل خلية فمتوية يساوي B_i. نقوم فيما يلي بنمذجة حساب نصف قطر عنقود التداخل العام ICR الذي يمثل عتبة للمقارنة مع ICR_i في هذا البحث.

تكون الاستطاعة محسوبةً 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 (5−9).

$$RSRP_0(mW) = \frac{(P_{0F}(mW))}{10^{(127+30\log10(R_F/1000))/10}} \qquad (9-5)$$

إنّ أي مستقبل (خلية فمتويّة مجاورة) له الحساسية $RSRP_0(mW)$ سوف يكون قادراً على التواصل مع الخلية الفمتويّة مركز العنقود، وسوف تكون الاستطاعة المستقبلة عندها تساوي أيضاً $RSRP_0(mW)$ وهي نفسها أصغر استطاعة يمكن للمستخدم استقبالها بحيث يمكنه أن يتواصل مع الخلية الفمتويّة (المستقبل هنا هو خلية فمتويّة أخرى)، فإذا تضاعفت استطاعة الإرسال بمقدار K وبقي الحد الأدنى للاستطاعة الواجب استقبالها للتراسل بين الخلايا الفمتويّة هي نفسها $RSRP_0(mW)$ عندئذٍ يصبح نصف قطر التغطية الجديد أي نصف قطر عنقود التداخل يحقق العلاقة (5−10).

$$RSRP_0(mW) = \frac{(KP_{0F}(mW))}{10^{(127+30\log10(ICR/1000))/10}} \qquad (10-5)$$

بتعويض العلاقة (5−9) في العلاقة (5−10) نحصل على العلاقة (5−11).

$$(P_{0F})/(10^{(127+30\log10(R_F/1000))/10}) = (KP_{0F})/(10^{(127+30\log10(ICR/1000))/10}) \qquad (11-5)$$

وتكون العلاقة (5−12) محققة.

$$10^{(127+30\log10(ICR/1000))/10} = K \times 10^{(127+30\log10(R_F/1000))/10} \quad (12-5)$$

ويمكن كتابتها وفق العلاقة (5−13).

$$10^{(127+30\log10(ICR/1000))} = K^{10}10^{\left(127+30\log10\left(\frac{R_F}{1000}\right)\right)} \quad (13-5)$$

ثمّ نحصل على العلاقة (5−14).

$$\left(127+30\log_{10}\left(\frac{ICR}{1000}\right)\right) = 10\log_{10}(K) + \left(127+30\log_{10}\left(\frac{R_F}{1000}\right)\right) \quad (14-5)$$

ومنه نستنتج العلاقتين (5−15) و(5−16).

$$30\log_{10}\left(\frac{ICR}{R_F}\right) = 10\log_{10}(K) \quad (15-5)$$

$$\log_{10}\left(\frac{ICR}{R_F}\right) = \frac{1}{3}\log_{10}(K) \quad (16-5)$$

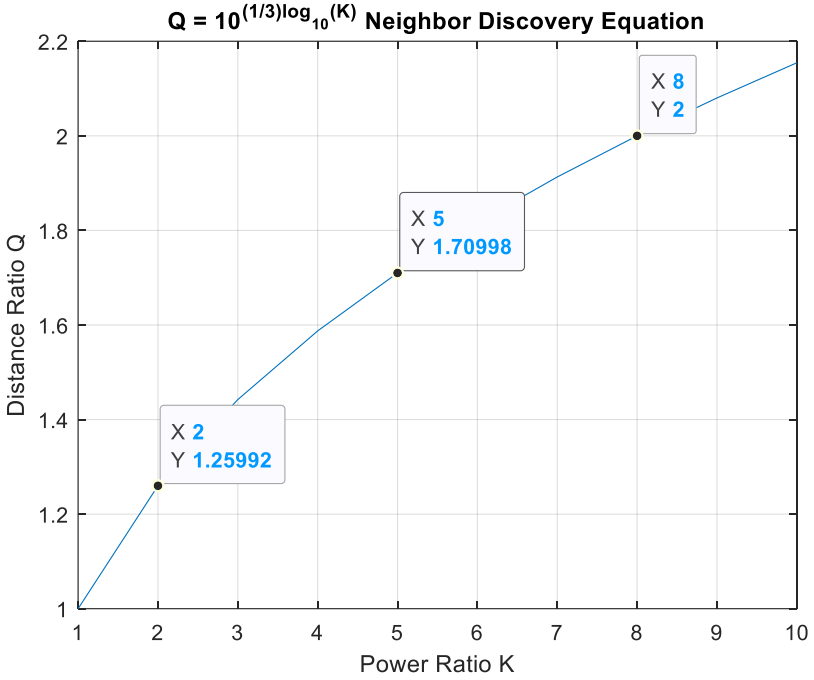
وأخيراً نحصل على العلاقة (5−17).

$$ICR = 10^{\frac{1}{3}\log_{10}(K)}R_F \quad (17-5)$$

بناءً عليه، نعرّف المقدار Q وفق العلاقة (5−18).

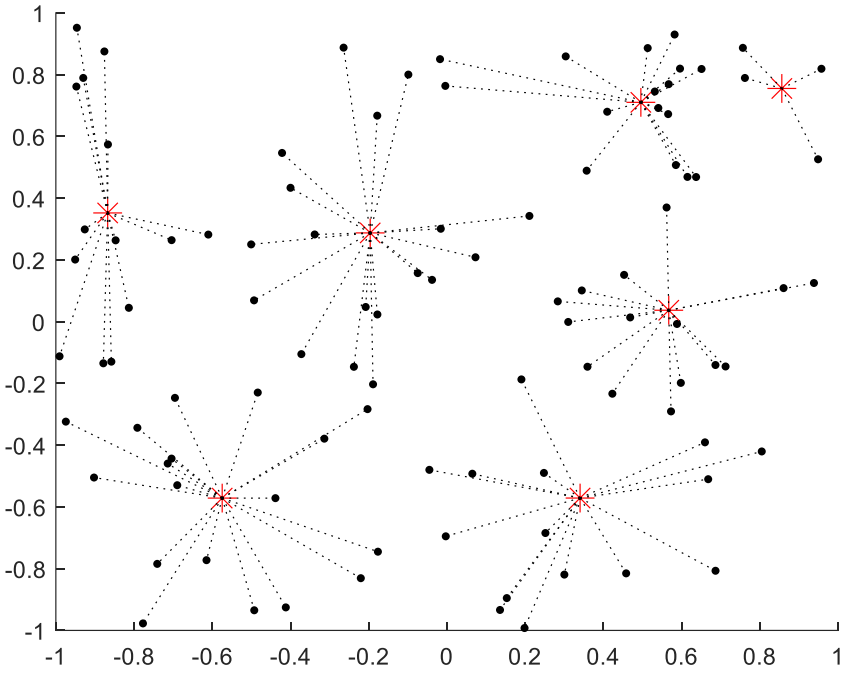
$$Q = 10^{\frac{1}{3}\log_{10}(K)} \quad (18-5)$$

يُبين الشكل 5−2 رسماً بيانيّاً للعلاقة (5−18) ونلاحظ فيه أنه عندما $K = 2$ (الذي يكافئ حالة المرجعين [27,26] فيما يخص مضاعفة استطاعة الإرسال لتحقيق إجرائية استكشاف خلايا الجوار) فإنّ $Q \cong 1.26 < 2$، وهذا يعني أنّ نصف قطر عنقود التداخل العام ICR، الذي يتم وفقه استكشاف خلايا الجوار وفق هذه الأدبيات، أقل من ضعف نصف قطر الخليّة الفمتويّة R_F، وهذه القيمة غير كافية للأخذ بالحسبان خلايا جوار أبعد عن الخليّة المركزية في العنقود والتي يمكن أن تؤثر فعلياً في 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 تنسيق التداخل المقترح أكثر قدرة على تخفيف التداخل الحاصل في الشبكة الكلية كما سنبين في فقرة النتائج.



الشكل 5–2: تغيّرات المُعامِل Q بدلالة مُعامِل مضاعفة الاستطاعة لاستكشاف الجوار K (الباحث).

يُظهر الشكل 5–3 رسماً توضيحيّاً لمفهوم عنقود التداخل من أجل مجموعة من الخلايا الفمتويّة متوزِّعة في منطقة الشبكة، تُمثِّل النقاط الحمراء مراكز عناقيد التداخل وكل منها خليّة فمتويّة تنتمي إلى الشبكة، وتحيط بها خلايا جوار بعدد معين (تمثّلها النقاط السوداء في الشكل 5–3)، بحيث تُمثِّل الخطوط المنقطة المسافات التي تفصل كل خليّة جوار عن مركز العنقود. ونشير هنا إلى أنّ النقاط السوداء في الشكل 5–3 تمثّل أيضاً بدورها مراكز عناقيد تداخل أخرى، ولكنها هنا مُمَثَّلة كخلايا جوار بهدف التوضيح. يُبيّن الشكل 5–3 أنّ قيم أكبر المسافات الخاصة بكل محطة قاعديّة فمتويّة FBS في الشبكة؛ $\{ICR_i = \max_i(\{D_i\})\}$ هي أنصاف أقطار عناقيد التداخل من أجل كل خليّة فمتويّة متواجدة في الشبكة، وأنّ لها قيماً متباينة فيما بينها، ولكن كل منها يكون أصغر أو يساوي نصف قطر عنقود التداخل العام ICR المستخدم في إجرائيّة التحكُّم في الاستطاعة في هذا البحث، ويمثل هنا عتبة للمقارنة مع D بحيث تساوي ICR نصف قطر دائرة ثابتة المساحة تحيط بكامل الخلايا الفمتويّة المشكلة لكل عنقود، وأما D فتمثل نصف قطر دائرة متغيرة المساحة محتواة في الدائرة السابقة، ومعظم خلايا الجوار في كل عنقود تداخل سوف تسهم في شرط اتخاذ قرار تخفيض الاستطاعة للخليّة الفمتويّة الموجودة في مركز العنقود.



الشكل 5–3: رسم توضيحي لمفهوم عنقود التداخل من أجل مجموعة من الخلايا الفمتويّة متوزّعة في منطقة الشبكة (الباحث).

4.5 الخوارزميّة المقترحة

تعتمد الخوارزميّة المقترحة في هذا البحث على مفهوم عنقود التداخل IntC المبيّن في الفقرة الثالثة، وبحسب المواصفات التي يحققها عنقود التداخل الخاص بكل محطة قاعديّة للخليّة الفمتويّة والمقارنة مع نصف قطر عنقود التداخل العام، يجري التحكم باستطاعة إرسال هذه الخليّة بحيث تُخَفَّض إلى قيمة أصغر من قيمتها الأصلية بمستوى تراجعي Backoff معيّن. من هذا المنطلق نسمّي خوارزميتنا المقترحة خوارزميّة تخفيض استطاعة الخليّة الفمتويّة باعتماد مفهوم عنقود التداخل Interference Cluster Femtocell-Aware Power Backoff (ICFAPB). يُشير المصطلح Power Backoff إلى تراجع قيمة استطاعة الإرسال للخلايا الفمتويّة عن قيمتها الأصلية لتصبح أصغر. يُبيّن الشكل (5–4) المخطط التدفُّقي للخوارزميّة المقترحة ICFAPB، تُقسَّم الخوارزميّة المقترحة إلى أربعة مراحل أساسيّة هي:

- المرحلة الأولى: تقوم كل محطّة قاعديّة للخليّة الفمتويّة بمضاعفة استطاعة إرسالها بمقدار K وفق العلاقة (5–18)، لتغطية مسافة تصل إلى Q ضعف نصف قطر تغطيتها الأصلية، وترسل رسالة "Hello" إلى كل خليّة فمتويّة متواجدة في منطقة التغطية الناتجة.
- المرحلة الثانية: تقوم كل خليّة فمتويّة بجدولة علاقة الجوار مع الخلايا المحيطة بها، بحيث تسجّل معلومات كل خليّة فمتويّة أخرى تجاورها وقد أعادت إليها إرسال الرسالة نفسها "Hello". يتضمن جدول الجوار الناتج عدد خلايا الجوار، والمسافات التي تفصلها عن الخليّة المركزية في عنقود

التداخل المعرّف بجدول الجوار السابق، ومن ثمّ ترسل هذه المعلومات إلى وحدة الإدارة FMS في الشبكة غير المتجانسة. ثمّ تعود كل خليّة فمتويّة إلى استطاعة إرسالها الأصلية، لتغطي نفس قطر التغطية الأصلي R_F.

- المرحلة الثالثة: تقوم كل تجهيزة مستخدم، ودوريّاً، بإرسال تقرير القياسات الخاص بها إلى الخلايا الفمتويّة المرتبط بها، ويتضمن تقرير القياسات هذه قيمة الاستطاعة المستقبلة RSRP الواصلة إلى كل مستخدم دليله j من المستخدمين (عددهم U) في كل خليّة فمتويّة دليلها i في الشبكة. بناءً على تقرير القياسات وعلى جدول علاقة الجوار، يكون لكل خليّة فمتويّة قيم $\min_{1\le j\le U} \mathrm{RSRP_{ij}(mW)}$ و D و$\mathrm{ICR_i}$ خاصة بها. من ثمّ يجري اتخاذ قرار التحكم باستطاعة الخليّة الفمتويّة (تخفيضها إلى المستوى $\mathrm{P_i(dBm)}$) أو لا بحسب العلاقة (5−19).

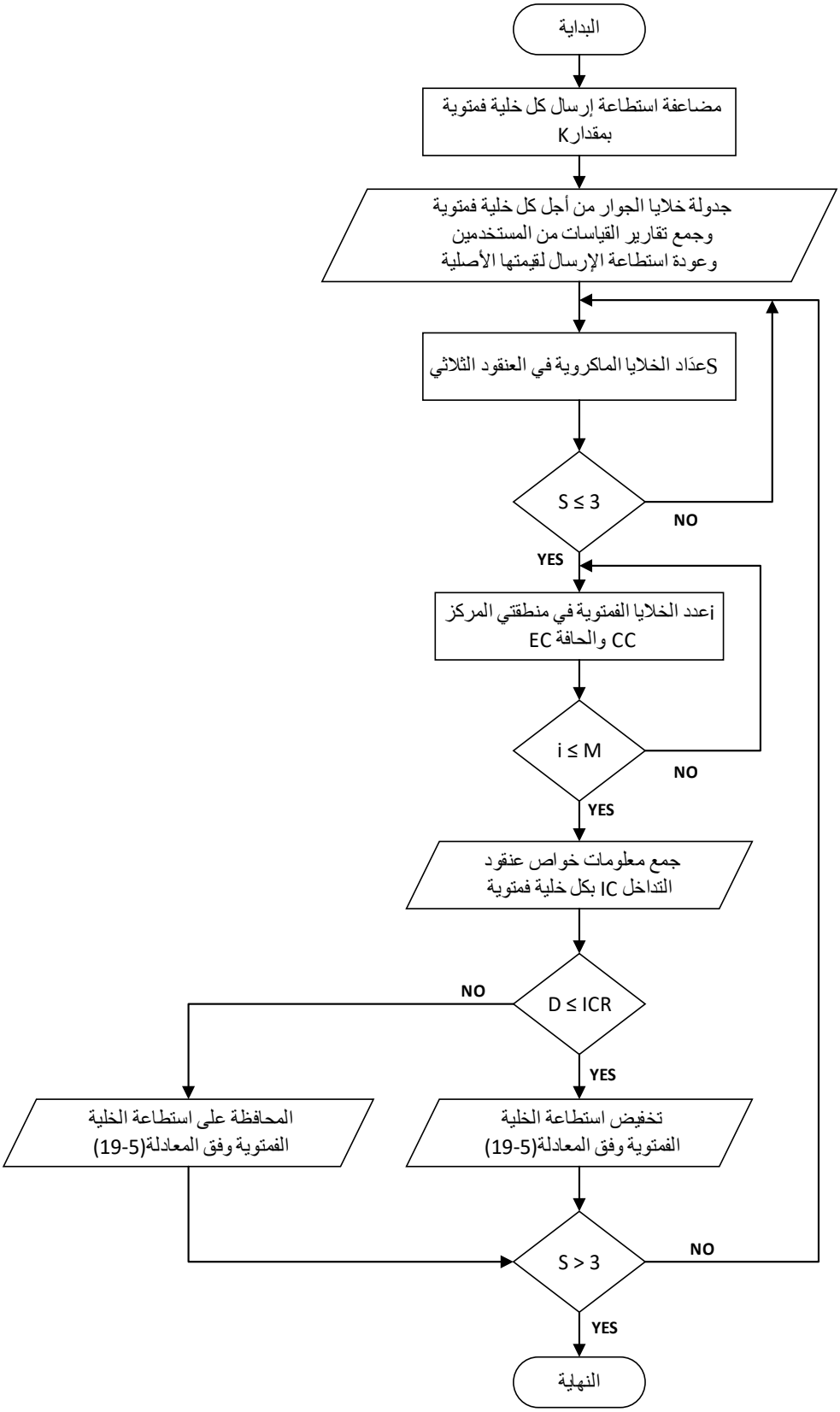
$$\mathrm{P_i(dBm)} = \begin{cases} \mathrm{P_{0F}(dBm)}, & \mathrm{D > ICR} \\ \mathrm{P_{0F}(dBm) + RSRP_0(dBm) - \min_{1\le j\le U} RSRP_{ij}(mW)}, & \mathrm{D \le ICR} \end{cases} \quad (19-5)$$

- المرحلة الرابعة: تقوم وحدة إدارة الخلايا الفمتويّة FMS بإرسال أوامر التحكم باستطاعة هذه الخلايا لتخفيض الاستطاعة بنسبة تساوي $\alpha = \frac{\mathrm{RSRP_0(mW)}}{\min_{1\le j\le U} \mathrm{RSRP_{ij}(mW)}}$ حيث $\mathrm{P_i(mW)} = \alpha.\mathrm{P_{0F}(mW)}$، وذلك من أجل كل خليّة فمتويّة في الشبكة تحقق المتراجحة $\mathrm{D \le ICR}$. بالمحصلة وبمسح جميع الخلايا الفمتويّة في الشبكة يكون هناك عدد منها قد جرى تخفيض استطاعتها بحيث لا يجري قطع الاتصال عن المستخدمين المرتبطين بها، وفي الوقت نفسه يسهم هذا التخفيض في إنقاص مستوى التداخل الذي تسببه هذه الخليّة إلى الخلايا المجاورة لها. وسنبيّن في فقرة النتائج تحسّناً ملموساً في أداء الشبكة من حيث مستوى تداخل الطبقات المشترك CoLI الحاصل بين تجهيزة مستخدم خليّة فمتويّة FUE وباقي الخلايا الفمتويّة المجاورة للخليّة الفمتويّة التي تخدِمه، حيث يصبح مستوى التداخل أصغر من المستويات التي تقدمها الأعمال ذات الصلة، ويصبح أداء النظام أفضل من حيث إنتاجيّة الشبكة والكفاءة الطيفية.

5.5 التأويل الفيزيائي لآليّة عمل الخوارزميّة ICFAPB

يُمثِّل نصف قطر عنقود التداخل العام ICR عتبة مسافة حديّة أعظمية تغطي منطقة تواجد خلايا الجوار، وهو مرتبط مباشرةً بقيمة K عدد مضاعفة استطاعة الإرسال لاستكشاف خلايا الجوار تلك. ونظراً للطبيعة العشوائيّة في توزُّع المحطات القاعديّة للخلايا الفمتويّة في منطقة الشبكة غير المتجانسة، ليس من الضروري أن تتواجد خلايا جوار على نفس البعد ICR، بل على مسافة أقل منه أو تساويه، وعموماً يتحقق لدينا $\mathrm{ICR_i = \max_i(\{D_i\}) \le ICR}$. ولما كانت الخوارزميّات المقترحة في كل من [26,27] تهتم فقط بعدد خلايا الجوار المكتشفة من أجل $K = 2$، فإنّ الخوارزميّة المقترحة هنا تعنى بعددٍ أكبر من خلايا

الجوار (من أجل $K > 2$) وذلك بالنظر إلى موضعها النسبي، حتى ولو كانت على مسافات أكبر بهدف الأخذ في الحسبان ظاهرة خفوت الإشارة، فحتى لو كانت الخليّة الفمتويّة في منطقة الشبكة بعيدة نسبيّاً عن الخليّة المركز في عنقود التداخل، فمن المرجح أن تؤدي إلى آثار تداخل كما لو كانت قريبة وكأنّها على بعد من الخليّة المركزية تساوي نصف قطر العنقود الناتج عن $K = 2$. فإذا كان $K > 2$، فإنّ أخذ خلايا جوار أكثر بالحسبان عند اتخاذ قرار تخفيض الاستطاعة يساهم في تخفيض مستوى التداخل بين الخلايا الفمتويّة على امتداد الشبكة كلّها، ويتجلى ذلك من خلال المتراجحة $D \leq ICR$ التي تضمن بدورها تخفيض استطاعة الخليّة المركزية في عنقود التداخل المقابل وإن قلَّ عدد خلايا الجوار عن النصف TN_{lb} (اختلاف أول مع منهجيّة الأعمال [25,26])، ولو كانت القيمة $median(\{D_i\})$ أكبر من نصف قطر التغطية الأصلي للخليّة الفمتويّة R_F (اختلاف آخر مع منهجيّة [27]). وهكذا، يُمثِّل هذا العمل تطويراً مُعمَّماً لفكرة التحكُّم بالاستطاعة المستند إلى مفهوم خلايا الجوار.



الشكل 5–4: المخطّط التدفُّقي للخوارزميّة المقترحة ICFAPB (الباحث).

6.5 مؤشّرات الأداء

1.6.5 مستوى التداخل

يُحسَب مستوى استطاعة إشارة التداخل الخاص بكل تجهيزة مستخدم FUE مرتبط بخليّة فمتويّة في الشبكة، الناتجة عن جميع الخلايا الفمتويّة الأخرى في منطقة الشبكة، من خلال حساب القيمة المتوسطة لاستطاعة إشارات التداخل الحاصل لكل مستخدميها $\underset{1\le j\le U}{\text{mean}}\left(I_{ij}(mW)\right)$، حيث عدد المستخدمين الأعظمي في كل خليّة فمتويّة هو U، ثم تحسب القيمة المتوسطة للتداخل لكل الخلايا الفمتويّة التي عددها $M_{\Omega_{\mathcal{A}}}$ المتواجدة في منطقة ما هي $\Omega_{\mathcal{A}}$ حيث $(\mathcal{A}\in\{CC,EC\})$ من الشبكة غير المتجانسة، أي $\underset{1\le i\le M_{\Omega_{\mathcal{A}}}}{\text{mean}}\left(\underset{1\le j\le U}{\text{mean}}\left(I_{ij}(mW)\right)\right)$. يُقدَّر مستوى استطاعة إشارة التداخل المؤثر في كل مستخدم j مُخدَّم من الخليّة الفمتويّة i وفق العلاقة (5−20).

$$I_{ij}(mW)=\sum_{\substack{k=1\\k\neq i}}^{M}RSRP_{kj}(mW) \qquad (20-5)$$

حيث يمثل $M_{\Omega_{\mathcal{A}}}$ عدد الخلايا الفمتويّة المتواجدة في كامل منطقة الشبكة الجزئية من مستوى تغطية الخليّة الماكرويّة سواء أكانت هذه المنطقة منطقة المركز Ω_{CC} أم منطقة الحافة Ω_{EC} التي تشكل منطقة تغطية الخليّة الماكرويّة الرئيسية. ولتعيين متوسط مستوى التداخل لكل النظام، نقوم بحساب القيمة المتوسطة لكل الخلايا الفمتويّة المتوزُّعة عشوائيّاً في كامل نموذج الشبكة غير المتجانسة HetNet. فكلما كان متوسط مستوى التداخل لكل مستخدمي الشبكة أصغر كان الأداء الناتج أفضل.

2.6.5 النسبة SINR

تُحسَب نسبة استطاعة الإشارة المفيدة لمستخدم الخليّة الفمتويّة إلى استطاعة الضجيج والتداخل، من خلال حساب القيمة المتوسطة لنسبة SINR الناتجة عند كل مستخدميها $\underset{1\le j\le U}{\text{mean}}\left(SINR_{ij}(dB)\right)$، ثم حساب القيمة المتوسطة للمقدار SINR بالنسبة لكل الخلايا الفمتويّة التي عددها M_{Ω_A} المتواجدة في منطقة ما هي $\Omega_{\mathcal{A}}$ من الشبكة غير المتجانسة، أي $\underset{1\le i\le M_{\Omega_{\mathcal{A}}}}{\text{mean}}\left(\underset{1\le j\le U}{\text{mean}}\left(SINR_{ij}(dB)\right)\right)$. تُقدَّر النسبة SINR الواصلة لكل مستخدم j مُخدَّم من الخليّة الفمتويّة i وفق العلاقة (5−21).

$$SINR_{ij}(dB)=RSRP_{ij}(dBm)-10\log_{10}\left(P_{Noise}(mW)+I_{ij}(mW)\right)(dBm) \quad (21-5)$$

تُمثِّل $P_{Noise}(mW)$ استطاعة الضجيج الحراري مقدرة بالميلي واط، وتُمثّل $I_{ij}(mW)$ استطاعة التداخل مقدرة بالميلي واط، ويمثل المقدار $RSRP_{ij}(dBm)=\underset{1\le k\le M_{\Omega_{\mathcal{A}}}}{\max}RSRP_{kj}(dBm)$ أكبر استطاعة مستقبلة عند تجهيزة المستخدم FUE_j من بين قيم استطاعة الإشارات الواصلة إليه من جميع الخلايا

الفمتويّة $1 \le k \le M_{\Omega_A}$ في المنطقة $\Omega_{\mathcal{A}}$، وهو المعيار الموافق لكون الخليّة الفمتويّة خليّة مخدِّمة لطرفية المستخدم FUE طالما كانت الاستطاعة المستقبلة منها الأكبر بين جميع الخلايا الفمتويّة في منطقة الشبكة، أي إنّ شدة الإشارة المستقبلة RSS عنده بالنسبة للخليّة الفمتويّة هذه هي الأكبر. وكلما كان متوسِّط النسبة SINR لكل مستخدمي الشبكة أكبر كان الأداء الناتج أفضل.

3.6.5 معدّل الإنتاجيّة

تُحسَب إنتاجيّة كل خليّة فمتويّة i في منطقة الشبكة $\Omega_{\mathcal{A}}$ وفق العلاقة (5−22).

$$\mathrm{Throu_i(Mbps)} = \sum_{j=1}^{U} B_{\Omega_{\mathcal{A}}} \log_2(1 + \mathrm{SINR_{ij}}) \qquad (22-5)$$

يمثل $B_{\Omega_{\mathcal{A}}}$ عرض المجال الذي يُخصَّص إلى تجهيزة المستخدم FUE في منطقة الشبكة $\Omega_{\mathcal{A}}$ بحسب مخطط تخصيص الموارد المفترض في هذا البحث SFFR، وتختلف إذا كانت منطقة الشبكة منطقة مركز تغطية الخليّة الماكرويّة Ω_{CC} أو منطقة حافة تغطية الخليّة الماكرويّة Ω_{EC}. ولحساب معدّل إنتاجيّة شبكة الخلايا الفمتويّة لكل منطقة الشبكة نقوم بحساب القيمة المتوسطة للقيم $\mathrm{Throu_i}$، ولحساب إنتاجيّة الخلايا الفمتويّة لكل الشبكة غير المتجانسة نقوم بحساب القيمة المتوسطة للقيم المتوسطة الناتجة عن كل مناطق الشبكة الجزئية وكل عنقود الشبكة غير المتجانسة.

4.6.5 الكفاءة الطيفية

وفقاً لشانون وبحسب [27] تُعرَّف الكفاءة الطيفية الخاصة بكل خليّة فمتويّة i الواقعة في منطقة الشبكة $\Omega_{\mathcal{A}}$ بأنّها سعة قناة الاتصال المقابلة لعرض مجال يساوي 1Hz، وتعطى بالعلاقة (5−23).

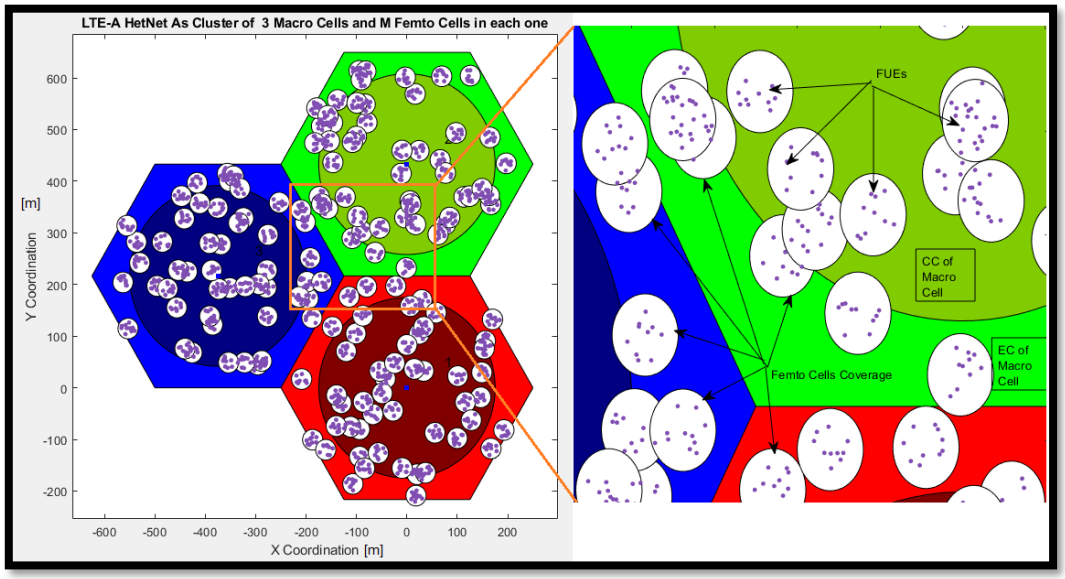
$$\mathrm{SpectEff_i(bit/sec/Hz)} = \sum_{j=1}^{U} \log_2(1 + \mathrm{SINR_{ij}}) \qquad (23-5)$$

يُلاحَظ من العلاقة (5−23) أنّه 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 الفمتويّة لكل منطقة تغطية الخليّة الماكرويّة الجزئية من الشبكة نقوم بحساب القيمة المتوسطة للقيم $\mathrm{SpectEff_i}$، ولحساب الكفاءة الطيفية لكامل الخلايا الفمتويّة المؤلفة للشبكة غير المتجانسة نقوم بحساب القيمة المتوسطة للقيم المتوسطة الناتجة عن كل مناطق الشبكة الجزئية لكل عنقود الشبكة غير المتجانسة.

7.5 نموذج الشبكة لمحاكاة النظام

نفترض عنقود الشبكة غير المتجانسة مؤلَّفاً من ثلاث خلايا ماكرويّة تُشكِّل كل منها مجالاً للتغطية على هيئة مسدس منتظم، وكل منها مقسَّمة إلى منطقتي تغطية؛ منطقة مركز الخليّة CCR تعمل باستطاعة محطّة قاعديّة ماكرويّة MBS أصغر من استطاعة الإرسال نحو منطقة حافة الخليّة ECR، حيث تزداد استطاعة إرسال الخليّة الماكرويّة باتجاه الحافة لضمان تخديم تجهيزات المستخدمين MUEs البعيدين عن

المحطّة القاعديّة. ونفترض أيضاً أنّ المحطّات FBSs تتوزّع عشوائيّاً في كل قطاع تغطية للخليّة الماكرويّة بحيث يكون هناك نفس العدد منها في كل قطاع، فيجتمع عدد منها في منطقة الحافة والباقي في منطقة المركز. نفترض أيضاً أنّ المسافة بين كل مركزي تغطية لمحطّتي خليّة فمتويّة لا تقل عن 5 متر، وأنّ كلاً منها يمكنه تخديم 10 مستخدمين على الأكثر في آن معاً. ونفترض أنّ توزُّع تجهيزات مستخدمي الخلايا الفمتويّة FUEs عشوائي في منطقة تغطية كل خليّة فمتويّة بنصف قطر تغطية محدد، وكل محطة فمتويّة FBS ترسل باستطاعة ابتدائيّة ثابتة وموحدة لكل الخلايا الفمتويّة في العنقود الثلاثي. كما نفترض أنّ تقنية إعادة الاستخدام الترددي المستخدمة هي SoFFR. يُبيّن الشكل (5–5) نموذج الشبكة المفترض في هذا البحث مع توضيح تقنية SoFFR الموافقة بما يتوافق مع الشكل (4–3)، ومع إظهار المواضع العشوائيّة للخلايا الفمتويّة وتجهيزات المستخدمين FUEs لكل منها. نهتم في هذا البحث بمستخدمي الخلايا الفمتويّة فقط، لمحاكاة نموذج تنسيق التداخل المقترح كونه خاص بشبكة محطّات FBS_s المنتشرة عشوائيّاً في كل من منطقتي الحافة والمركز لكل قطاع خليّة ماكرويّة. اختير نموذج العنقود الثلاثي هذا لأنّه النموذج العملي عند تخطيط الخلايا الماكرويّة في منطقة جغرافيّة ما، ويمكن تعميمه بحيث يمكن نشر عِدّة عناقيد ثلاثيّة لتشمل الشبكة غير المتجانسة مساحة جغرافية أوسع بحسب متطلّبات التغطية المطلوبة فيها، وهو نموذج مشابه لنموذج الشبكة غير المتجانسة المفترض في الفصل السابق وهو أكثر واقعيّة من نماذج الشبكة المفترضة في كل من المرجعين [26,27].



الشكل 5–5: نموذج الشبكة غير المتجانسة LTE-A HetNet لمحاكاة خوارزميّة ICFAPB (الباحث).

8.5 سيناريوهات المحاكاة ومناقشة النتائج

نفترض في محاكاة النظام، أنّ المحطّة MBS والمحطّة FBS تعملان في مجالات ترددية مختلفة موافقة لتقنية إعادة الاستخدام SoFFR، لذلك لا يوجد سوى تداخل مشترك من النمط CoLI من نفس الطبقة بين محطّات الخلايا الفمتويّة FBSs. نعتمد مُوسِطات المحاكاة في الجدول 5–2 بشكل أساسي بالاستناد إلى معيار LTE-A [134,135] كما نفترض عرض المجال الترددي الكلّي B للنظام مساوياً 10MHz، والتردد المركزي الحامل لإشارة المحطّة MBS هو2.3GHz، والتردد المركزي الحامل لإشارة المحطّة FBS هو3.5GHz كما في [27]. ونفترض أيضاً أنّ نصف قطر منطقة التغطية لكل خليّة ماكرويّة يساوي 250m، ونفترض توزيع 10 مستخدمين لكل خليّة فمتويّة لتعمل بطاقتها التشغيلية القصوى من حيث مواردها المتاحة Full Buffer Traffic Model. وندرس نموذج مخطط تنسيق التداخل المقترح في هذا البحث وفق عدة سيناريوهات توافق عدة حالات لعدد محطات الخلايا الفمتويّة M في كل خليّة ماكرويّة كما يبيّن الجدول 5–2، كما نفترض أنّ كل تجهيزة مستخدم FUE لا تُخدَّم إلا من خليّة فمتويّة واحدة مقابلة لأعظم استطاعة تستقبلها منها من بين كل الخلايا الفمتويّة المتواجدة في منطقة التغطية سواء منطقة المركز CCR أم منطقة الحافة ECR، وبحيث توزُّع 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 ما يقابل 50 كتلة موارد في المجال الترددي يجري توزيعها على المستخدمين في كامل مجال التغطية بالأخذ بالحسبان نموذج إعادة الاستخدام SoFFR.

بملاحظة الجدول 5–2 نجد أنّ نصف قطر التغطية القياسي لكل محطة FBS يبلغ 20 متراً، والمسافة بين محطتين FBS لا تقل عن 5m كما ذكرنا في الفقرة السادسة. اعتُمِدَ في هذا البحث نموذج 3GPP Typical Urban Shadowing Model لحساب فقد المسار. ومن أجل كل سيناريو مفترض في الجدول 5–2 نفترض أنّ قيمة K المفترضة هنا هي 8 بحيث نقوم بعدد من التجارب يساوي 100 موافقة لمئة موضع مختلف لأماكن توزُّع كل من المستخدمين والخلايا الفمتويّة في الشبكة غير المتجانسة الكلية (عنقود الشبكة الثلاثي)، أي إنّ كل طريقة من طرائق نشر محطات FBS في جغرافية الشبكة تتكرر مختلفةً عن بعضها 100 مرة، وفي كل مرة يكون الوضع النسبي لتوزُّع الخلايا الفمتويّة ومستخدميها مختلفاً عن المرة السابقة بالنسبة لمركز المحطة MBS، وفي نهاية هذه التجارب المئة يجري أخذ متوسط 100 نتيجة محاكاة نتيجة نهائية للمحاكاة المقابلة لكل سيناريو معتمد. لقياس أداء خوارزميتنا ICFAPB المقترحة لتنسيق التداخل، نقارنها بالحلول المقترحة الموافقة للخوارزميتين TAPB وPCICS، وبالنموذج التقليدي للنظام الذي لا يأخذ بالحسبان أي تحكُّم بالاستطاعة، وهو النموذج Legacy No Power Control (LNPC) الذي يوافق ثبات قيم استطاعة الإرسال لكل الخلايا الفمتويّة في الشبكة عند حد معين هو P_{0F}.

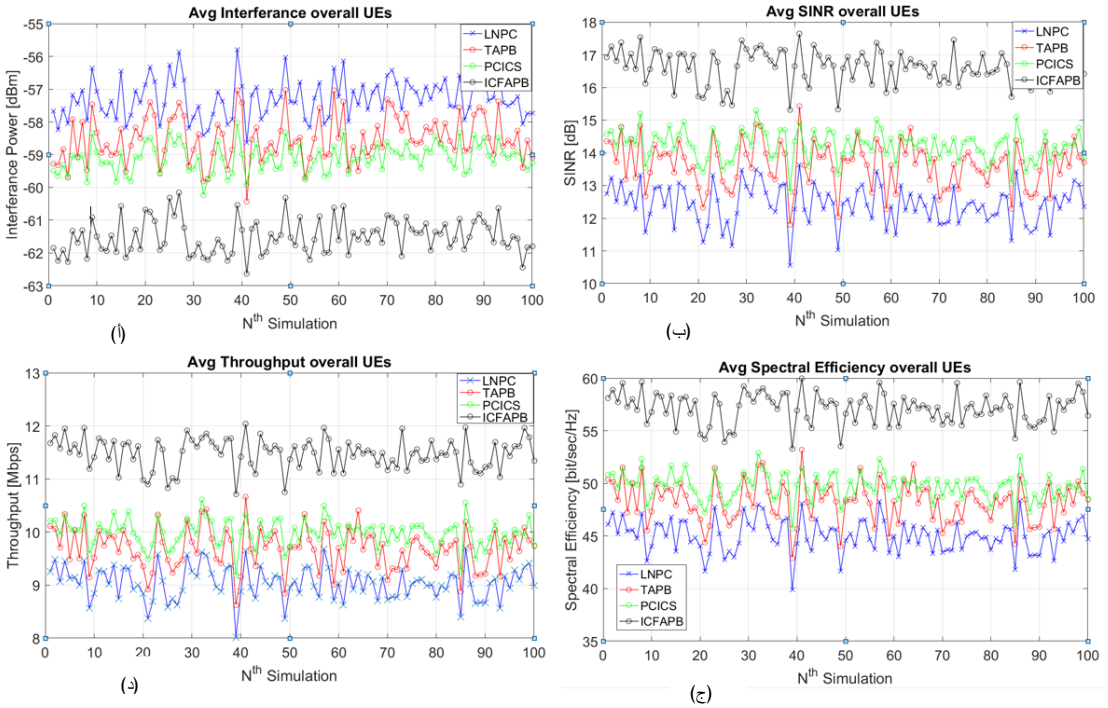
الجدول 5—2: مُوسِطات إعداد الشبكة LTE-A HetNet المستخدمة في محاكاة ICFAPB (الباحث).

اسم مُوسِط محاكاة النظام	إعداد المُوسِط			
سيناريوهات المحاكاة	الأول	الثاني	الثالث	الرابع
Mعدد الخلايا الفمتويّة في كل قطاع تغطية خليّة ماكرويّة	50	100	150	200
عدد تجارب المحاكاة في كل سيناريو	100			
التردد الحامل للخليّة الماكرويّة	2.3 [GHz]			
التردد الحامل للخليّة الفمتويّة	3.5 [GHz]			
تقنيّة النفاذ الراديوي	OFDMA			
عرض المجال الترددية الكلي المتاح	10 [MHz]			
تقنية تنسيق التداخل	SFFR			
عدد كتل الموارد الكلي RBs	50 RBs			
استطاعة الإرسال للخليّة الماكرويّة MeNB	40 [dBm] for CC and 46 [dBm] for EC			
P_{0F}، استطاعة الإرسال للخليّة الفمتويّة HeNB-Femto	20 [dBm]			
توزُّع محطّات الخلايا الفمتويّة FBSs	عشوائي ضمن منطقة تغطية كل خليّة ماكرويّة			
توزُّع طرفيات المستخدمين FUEs	عشوائي ضمن منطقة تغطية كل خليّة فمتويّة			
توزُّع محطّات الخلايا الماكرويّة MBSs	1-Cluster, contains 3-Hexagonal MBS			
استطاعة الضجيج الحراري عند المُستقبِل	−174 [dBm]			
نموذج الطبيعة الجغرافية لبيئة الاتصال	Small Urban Area منطقة المدن الصغيرة			
عدد العناقيد الثلاثية في الشبكة	1			
مُوسِطات ظاهرة خفوت الظل	Zero Mean and 4 dB Standard Deviation, Umi[15]			
U ، عدد المستخدمين المُخدَّمين في كل خليّة فمتويّة	10, Full Buffer Traffic Model			
سرعة المستخدمين	مهملة (حركيّة موضعية في المكان أو سيراً على الأقدام)			
K	8			
عتبة جودة الوصلة الراديويّة SINR Threshold	−35 [dB]			
نصف قطر الخليّة الماكرويّة R_M	250 [m]			
نصف قطر منطقة CCR لكل خليّة ماكرويّة R_{CC}	$0.7R_M$			
نصف قطر الخليّة الفمتويّة R_F	20 [m]			
عدد الخلايا الماكرويّة في العنقود الثلاثي	3			

1.8.5 نتائج السيناريو الأول

يُبيّن الشكل 5−6 قيم مؤشّرات الأداء بالنسبة إلى نتائج محاكاة السيناريو الأول الذي يقابل نشر 50 خليّة فمتويّة في كل قطاع تغطية للخليّة الماكرويّة. يُلاحَظ في هذا الشكل تقارب أداء كل من الخوارزميتين TAPB وPCICS وذلك من أجل كل تجارب المحاكاة المئة المأخوذة بالحسبان. يُلاحَظ أيضاً أنّ كلاً من الخوارزميتين TAPB وPCICS تقدّم تحسُّناً نسبيّاً بالمقارنة مع الوضع التقليدي لإعدادات الشبكة LNCP، ولكن الخوارزميّة المقترحة تقدّم تحسّناً أفضل من كل منهما؛ إذ

ينخفض مستوى التداخل عن مقابله في الخوارزميتين بمقدار حوالي 3dBm، ويرتفع مستوى النسبة SINR بحوالي 2.5dB عن كل منهما، وكذلك تتحسن إنتاجيّة الشبكة والكفاءة الطيفية بنحو 1.2Mbps و7.5bit/sec/Hz، على التوالي. يُعَد هذا التحسُّن جيداً نظراً لهذا العدد القليل من الخلايا الفمتويّة المنشورة في الشبكة، وهذا طبيعي لأنّ عدد الخلايا الفمتويّة صغير نسبيّاً وفق هذا السيناريو، وهكذا لن يواجه النظام كثافة كبيرة لها وسوف تكون احتماليّة ازدحام المنطقة بالخلايا الفمتويّة واقترابها من بعضها منخفضة لعددها القليل وتوزُّعها العشوائي، ولكن يمكن أن تُعَد هذه النتيجة مؤشِّراً على تفوّق الحل المقترح في هذا البحث حتى من أجل عدد صغير من الخلايا الفمتويّة المتوزُّعة في الشبكة غير المتجانسة، مع العلم أنّ التحسّن الذي تبديه الخوارزميّة المقترحة ICFAPB عند رفع عدد الخلايا الفمتويّة بالنسبة للنظام سوف يبدو واضحاً أكثر كما ستُظهره فقرات النتائج اللاحقة.

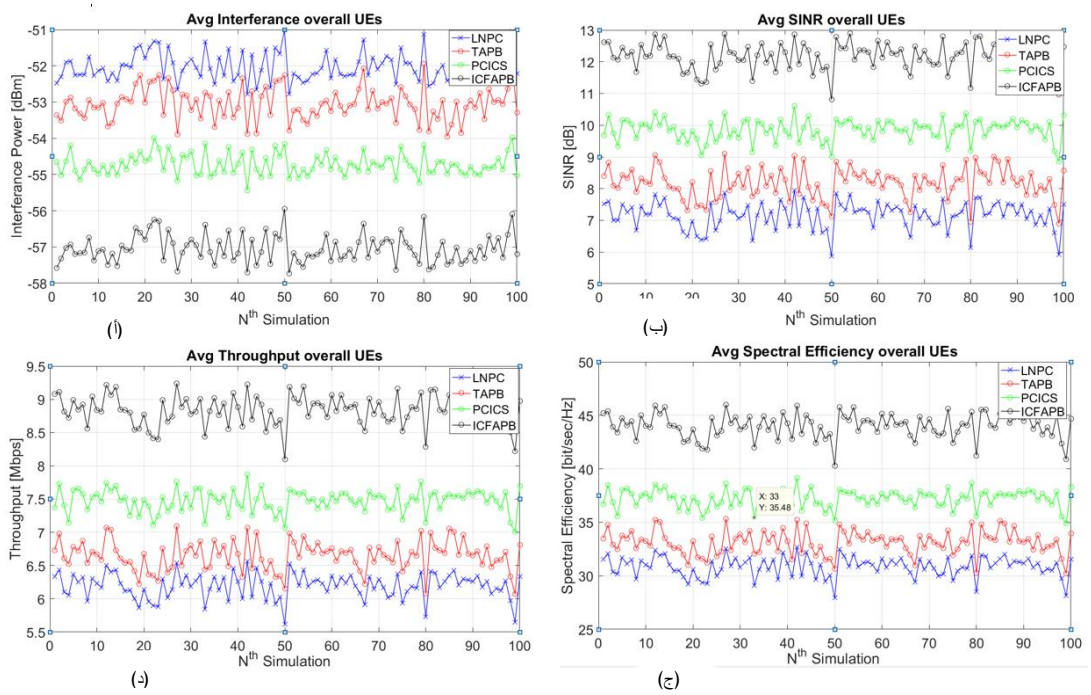


الشكل 5–6: نتائج قيم مؤشرات أداء الخوارزميّة ICFAPB بالنسبة إلى السيناريو الأول، (أ) مستوى التداخل، (ب) النسبة SINR، (ج) الكفاءة الطيفية، (د) الإنتاجيّة (الباحث).

2.8.5 نتائج السيناريو الثاني

يُبيِّن الشكل 5–7 قيم مؤشّرات الأداء بالنسبة إلى نتائج محاكاة السيناريو الثاني الذي يقابل نشر 100 خليّة فمتويّة في كل قطاع تغطية خليّة ماكرويّة. يُلاحَظ في هذا الشكل تفوّق الخوارزميّة PCICS على كل من TAPB والإعداد التقليدي LNCP، وذلك من أجل كل تجارب المحاكاة المئة المأخوذة بالحسبان. ولكن الخوارزميّة المقترحة ICFAPB تقدّم هنا تحسناً أفضل من PCICS، وهذا يُحسَب لخوارزميتنا لا سيما أنّ عدد الخلايا الفمتويّة قد ازداد إلى الضعف، حيث ينخفض مستوى التداخل عن مقابله في تلك الخوارزميتين TAPB وPCICS والحالة التقليديّة بمقدار حوالي 4dBm،

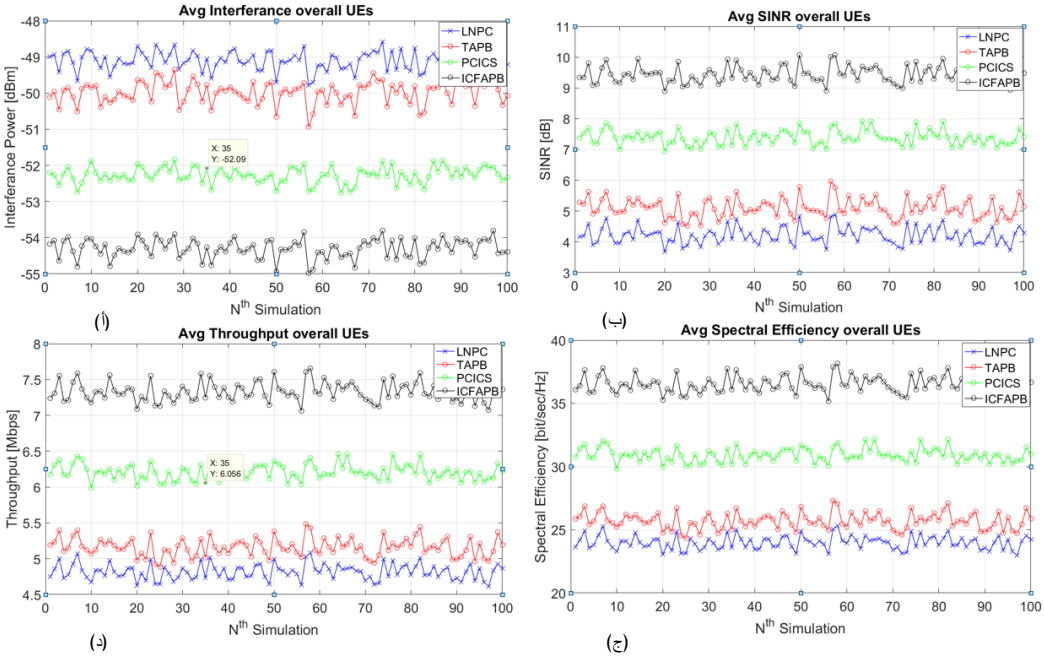
ويرتفع مستوى النسبة SINR بنحو 3dB، وكذلك تتحسن إنتاجيّة الشبكة والكفاءة الطيفية بحوالي 2Mbps و8bit/sec/Hz، على الترتيب.



الشكل 5–7: نتائج قيم مؤشرات أداء الخوارزميّة ICFAPB بالنسبة إلى السيناريو الثاني، (أ) مستوى التداخل، (ب) النسبة SINR، (ج) الكفاءة الطيفية، (د) الإنتاجيّة (الباحث).

3.8.5 نتائج السيناريو الثالث

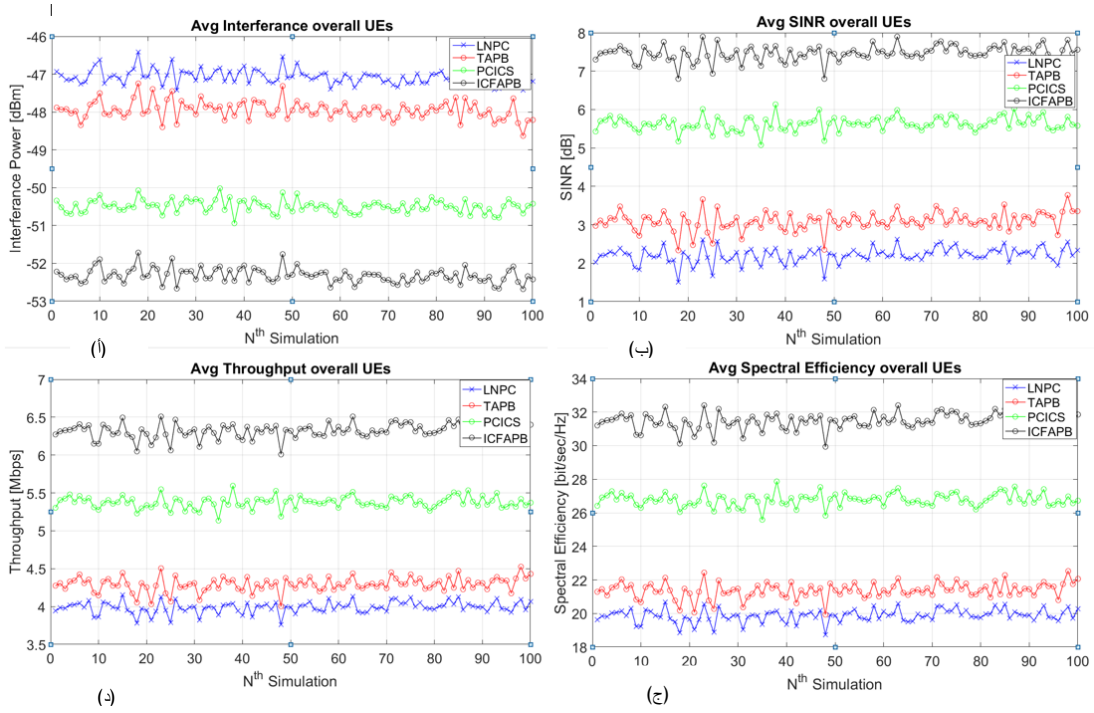
يقابل السيناريو الثالث (نتائجه في الشكل 5–8) عدد من الخلايا الفمتويّة يساوي ثلاث أضعاف عددها في السيناريو الأول وضعفي عددها في السيناريو الثاني. بالنظر إلى النتائج في الشكل 5–8، يصبح التحسّن في الأداء أكثر وضوحاً بمقارنة الفروقات في قيم مؤشرات الأداء بين الخوارزميّة المقترحة ICFAPB بمقابلاتها TAPB وPCICS والحالة التقليديّة LNPC، وهذا يعني أنّها تحافظ على تفوّقها في تخفيض مستوى التداخل ورفع كل من قيم SINR وإنتاجيّة الشبكة وكفاءة قناة الاتصال حتى مع ازدحام منطقة الشبكة غير المتجانسة بمحطات FBSs ليصبح عددها أكبر بثلاث مرات من عددها في السيناريو الأول، وذلك من أجل عدد كبير من حالات التوزُّع العشوائي للخلايا الفمتويّة الموافقة لتجارب المحاكاة المئة ضمن جغرافيا الشبكة. وهذا يعني أنّه في الغالب ومهما كان شكل توزُّع محطات FBSs مكانيّاً في الشبكة غير المتجانسة، يتمكّن مخطّط تنسيق التداخل المقترح في هذا البحث من التعامل معه وتخفيض مستويات التداخل بشكل أفضل من مقابلاته في الأدبيّات ومن الحالة التقليديّة لإعداد شبكة الخلايا الفمتويّة.



الشكل 5–8: نتائج قيم مؤشرات أداء الخوارزميّة ICFAPB بالنسبة إلى السيناريو الثالث، (أ) مستوى التداخل، (ب) النسبة SINR، (ج) الكفاءة الطيفية، (د) الإنتاجيّة (الباحث).

4.8.5 نتائج السيناريو الرابع

يبيّن الشكل 5–9 النتائج الخاصّة بمؤشّرات الأداء المدروسة بالنسبة للسيناريو الرابع.



الشكل 5–9: نتائج قيم مؤشرات أداء الخوارزميّة ICFAPB بالنسبة إلى السيناريو الرابع، (أ) مستوى التداخل، (ب) النسبة SINR، (ج) الكفاءة الطيفية، (د) الإنتاجيّة (الباحث).

يُظهِر الشكل 5−9 تفوّق الخوارزميّة المقترحة ICFAPB على كل من الخوارزميتين TAPB وPCICS والإعداد التقليدي للنظام LNPC، حتى مع ازدياد عدد الخلايا الفمتويّة المنشورة في الشبكة إلى 200 خليّة فمتويّة في كل قطاع تغطية خليّة ماكرويّة، أي ما يوافق عدداً من محطّات FBS يعادل أربعة أضعاف عددها في السيناريو الأول، وضعفي عددها في السيناريو الثاني. وهذا يُبيّن بشكل واضح أنّ تعميم أفكار الأعمال [11,12] وتطويرها وفق الطريقة المقترحة في هذا البحث، يؤدي إلى تحسن ملموس في مخرجات نموذج تنسيق التداخل المستند إلى التحكُّم باستطاعة الخلايا الفمتويّة.

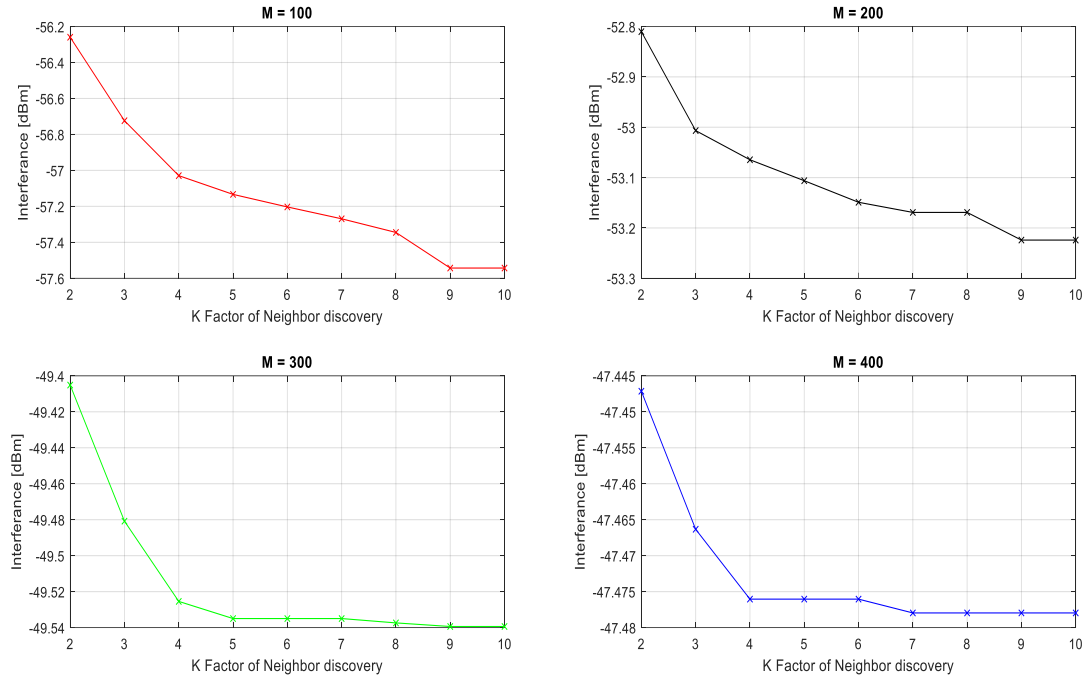
5.8.5 مناقشة تأثير القيمة K

تُبيّن هذه الفقرة تأثير تغيُّرات معامل مضاعفة استطاعة الإرسال K مع تغيّرات عدد الخلايا الفمتويّة M في قطاع الخليّة الماكرويّة في أداء الخوارزميّة المقترحة ICFAPB، حيث تُدرَس التغيّرات المقابلة في كل من مستوى التداخل وقيم النسبة SINR الناتجين. للحصول على النتائج استُخدِمَت عدّة قيم لعدد الخلايا الفمتويّة في كل قطاع خاص بخليّة ماكرويّة بحيث يكون لدينا $M = [100,200,300,400]$ وقيم مُعامِل مضاعفة استطاعة الإرسال بحيث $K = [2,3,4,5,6,7,8,9,10]$. أُجريَت عمليّة المحاكاة من أجل مجموعة قيم متزايدة للمقدار K ومن أجلها افتُرِضَ في كل تجربة محاكاة عدداً متزايداً للخلايا الفمتويّة في قطاع الخليّة الماكرويّة من بين قيم M المأخوذة بالحسبان هنا، ليعود وبتوزُّع جديد لها في الشبكة.

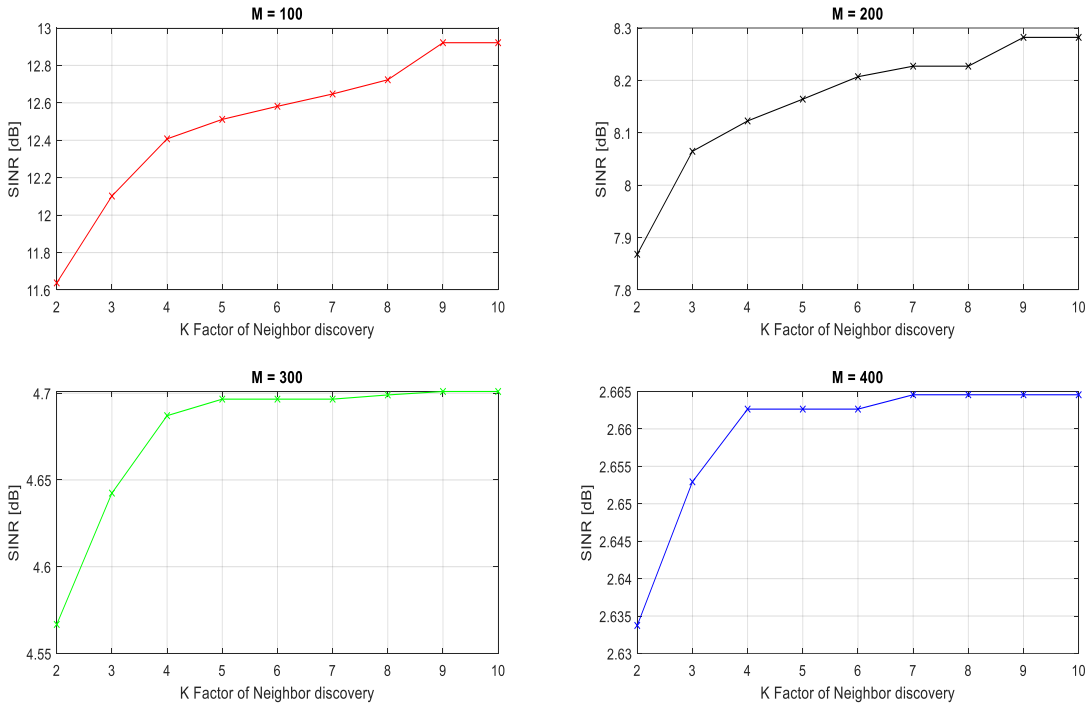
يُظهر الشكل 5−10 أنّ مستوى التداخل يتناقص مع ازدياد قيمة K وهو ما يفسّر قدرة الخوارزميّة المقترحة على التعامل مع موضوع التداخل البيني بين إشارات محطات FBS خاصةً مع ازدياد عدد الخلايا الفمتويّة في قطاع الخليّة الماكرويّة.

بالمقابل، يُظهِر الشكل 5−11 أنّ النسبة SINR تتزايد بمعدّل تحسّن ملموس مع ازدياد K رغم ازدياد عدد الخلايا الفمتويّة M أيضاً.

تُظهر هذه النتائج أن تعميم فكرة خلايا الجوار المطروحة في الأدبيّات أمر ممكن، ويجب أن تؤخذ بالحسبان خلايا الجوار البعيدة نسبيّاً عن مركز عنقود التداخل، وليس فقط تلك الخلايا التي تحقق شرط عدد خلايا الجوار الممثل بتجاوز المقدار B_i الخاص بكل خليّة فمتويّة في الشبكة حداً معيّناً هو TN_{lb} كما في الأدبيات؛ ويُمثِّل المقدار Q المرتبط بقيمة K طريقةً لتعريف ICR عتبة نصف قطر عنقود التداخل ليمثِّل مضاعفات لنصف قطر منطقة التغطية للخليّة الفمتويّة R_F بحيث يُقارن مع قيمة ناتجة عن مجموع المتوسط الحسابي والانحراف المعياري للمسافات التي تفصل خلايا الجوار المكتشفة عن مركز عنقود التداخل، وهو ما يمكن عدّه مفهوماً بديلاً عن الخليّة المركزية المسببة للتداخل ISN أو مفهوم العقدة المُشكِلَة TN المطروحين في الأعمال [26,27].



الشكل 5–10: تغيّرات مستوى التداخل الناتج عن ICFAPB بدلالة كل من المُعامِل K وعدد الخلايا الفمتويّة M (الباحث).



الشكل 5–11: تغيّرات النسبة SINR وفق الخوارزميّة المقترحة بدلالة كل من المُعامِل K وعدد الخلايا الفمتويّة M (الباحث).

9.5 خاتمة الفصل

قدّم هذا الفصل تعميماً لمفهوم خلايا الجوار الذي يُطبَّق في مسألة تنسيق تداخل الخلايا البيني بين الخلايا الفمتويّة في النظام LTE-A HetNet، بحيث تصبح آليّة التنسيق مستندة إلى تعيين عناقيد التداخل IntCs الأكثر أهميّة في الشبكة غير المتجانسة HetNet وتحديد مجموعة المحطّات القاعديّة FBSs التي تتطلب التحكُّم باستطاعتها، وما يقتضي ذلك من تخفيض مستوى التداخل الناتج في الشبكة، ورفع الأداء بزيادة النسبة SINR والحصول على إنتاجيّة وكفاءة طيفيّة أعلى مما عرضته الأدبيّات ذات الصلة ومن الحالة التقليديّة. يُعَد النموذج المقترح في هذا العمل اقتراحاً واعداً ونموذجاً مناسباً لتطوير الشبكات غير المتجانسة ذاتيّة التنظيم في النظام LTE-A من حيث القدرة على إعادة تنظيم قيم استطاعة الإرسال المناسبة لكل خليّة فمتويّة تنتمي إلى الشبكة لتنسيق التداخل فيما بينها ورفع جودة الخدمة للمستخدم من حيث الإنتاجيّة وكفاءة قناة الاتصال، وما يقتضيه ذلك من إمكانية الحصول على معدّلات عالية لنقل المعطيات تناسب المتطلّبات الحالية للنُظُم الخَلَويَّة الحديثة. استناداً إلى نتائج هذا البحث، نوصي بمحاكاة وتطبيق الخوارزميّة المقترحة ICFAPB على شبكة الجيل الخامس 5G HetNet؛ لضمان الحفاظ على الأداء المطلوب وتحقيق تنسيق فعّال لأي نمط من الخلايا الصغيرة المنتشرة في شبكة خلوية غير متجانسة؛ فضلاً عن ذلك، يمكن التخطيط لتنفيذ تجارب ميدانية على أرض الواقع بالتعاون مع شركة "وفا" مشغل الخلوي الثالث في الجمهوريّة العربيّة السوريّة وإجراء قياسات ميدانيّة للتأكد من مدى فعالية الخوارزميّة ICFAPB في تنسيق تداخل الخلايا البيني ICIC، وذلك لأنّ الشبكات HetNet للنظام LTE-A وللجيل الخامس 5G تتشابه فيما بينها من حيث استخدام تقنية نشر الخلايا الصغيرة في مناطق تغطية الخلايا الماكرويّة لرفد الشبكة من حيث معدّل الخدمة وتلبية الطلب المتزايد للاتصال مع ضمان معدّل إنتاجيّة وكفاءة طيفية مناسبة لمتطلبات النظام.

وأخيراً، من ناحية الآفاق المستقبلية لهذا العمل، يمكن تطوير مفهوم عناقيد التداخل المقترح بحيث نستفيد من الخصائص الرياضيّة لخوارزميات العنقدة Clustering Algorithms مثل خوارزميّة k-means لدعم آلية عنقدة الخلايا الفمتويّة، والحصول على تنسيق أفضل بين الخلايا الصغيرة في الشبكة غير المتجانسة، فإذا عُرِفتْ طريقة أو تابع توزُّع نشر الخلايا الفمتويّة في الشبكة (طريقة تخطيطها ليست عشوائية) عندئذٍ يمكن للشبكة ذاتيّة التنظيم إجراء تطبيق مباشر لخوارزميّة k-means في تعيين المواقع المناسبة أكثر لتركيب محطّات FBSs؛ ما يحقق تخفيضاً أمثلي لمستوى التداخل الناتج، ومن المتوقَّع أن نحصل على أداء أفضل، ولكن ذلك مشروطٌ بالمعرفة المسبقة prior knowledge لتوزُّع الخلايا الفمتويّة في الشبكة الكليّة.

خاتمة البحث والآفاق المستقبليّة

اقتُرِحَ في هذا البحث أربعُ خوارزميات مُطوَّرة لأهم أربع مشكلات في نظام الاتصال الخَلَوي LTE-A HetNet هي مشكلة موازنة حمل الخلايا، ومشكلة أمْثَلة اتخاذ قرار التسليم لتحقيق أمثلة متانة الحركيّة MRO لحركيّة المستخدمين، ومشكلة تخصيص الموارد الراديويّة لضمان معدّل خدمة أعظمي ومشكلة تنسيق التداخل لتحقيق أعلى مستوى ممكن من جودة الخدمة من حيث إنتاجيّة الشبكة والكفاءة الطيفية. استندتْ تلك التطويرات إلى مفهوم الشبكات ذاتيّة التنظيم SON لتحقيق إدارة ذاتيّة للشبكة بناءً على هيكليّة الشبكة، وعلى ظروف حركيّة المستخدمين، وعلى عمليات التشغيل ومتطلبات الاتصال من حيث الحفاظ على أفضل مستوى من جودة الخدمة.

دُرِستْ في الفصل الثاني خوارزميّة علاقة الجوار التلقائي ANR التي تفيد في تحقيق التوازن في حمل الخلايا لكامل الشبكة المتجانسة. وجرى في هذا الفصل تنفيذ خوارزميّة علاقة الجوار التلقائي التقليديّة ومحاكاتها، ومن ثمّ اقتُرِحتْ آليّة لتطويرها عليها بهدف تحسين أداء الشبكة في الحالات الحرجة التي تقابل عدم قدرة إحدى الخلايا الماكرويّة على تخديم مستخدمين إضافيين. استندتْ الآلية الجديدة إلى إضافة ما سُميّ بمعامل حمل الخليّة CLF إلى جدول علاقة الجوار NRT. اقتضى الفصل الثاني أنّ المُعامِل CLF في جدول علاقة الجوار يسهم في تحسين أداء الشبكة من خلال خلق حالة من توازن الأحمال بين الخلايا المتجاورة. ويمكن تعميم التطوير المقترح في الفصل الثاني ليعالج حالة الشبكة غير المتجانسة ليصبح لكل خليّة صغيرة جدول للجوار خاص بها، مع مُعامِل حمل CLF تختلف قيمته المفترضة بين الخلايا الماكرويّة والخلايا الصغيرة في الشبكة. يمثل ذلك حلاً واعداً في موازنة الأحمال ذاتيّاً في الشبكةLTE-A HetNet.

استعرض الفصل الثالث مسألة تعيين الموسطات الرئيسية في التحكُّم ذاتيّاً بقرار التسليم بين خلايا الشبكة LTE-A HetNet، وهما هامش البطاء HM والزمن اللازم للقدح TTT في سياق الحدث A3 المُعرَّف في معيار 3GPP. وجرى تحليل وجود علاقة ارتباط تابعي رياضي بين المُوسِطات HM وTTT وأظهر عدم استقلالهما عن مقاييس النظام مثل الاستطاعة المُستقبَلة RSRP والنسبة SINR والحالة الحركيّة للمستخدم متمثلةً بموقعه وسرعته بالنسبة لخلايا الشبكة. تفيد الخوارزميّة المقترحة في الفصل الثالث في تعيين قيم HM وTTT بطريقة متكيّفة لحظية بالتزامن مع حركيّة المستخدمين المرتبطين بالشبكة، دون الحاجة لتعريف عتبات أداء، ودون الحاجة إلى إعدادات ضبط آلي خطوي لقيم موسطات التحكُّم بالتسليم، حيث يجري الحصول على أصغر عدد ممكن من أحداث التسليم غير الضرورية PPHOs وفشل التسليم RLFHOs بما يضمن تخفيض استهلاك الاستطاعة واستمرار الاتصال. خَلُصَ الفصل الثالث إلى أنّ الارتباط بين هامش البطاء والزمن اللازم للقدح وبين سرعة المستخدم وموضعه، مُلحّة لأي خوارزميّة تكيّفية لتعيين قيم الموسطات HCPs المناسبة لاتخاذ قرار التسليم الناجح بما يتناسب والظروف الحركيّة للمستخدم بالنسبة لكل عقد الشبكة غير المتجانسة في النظام LTE-A.

هدفَ الفصل الرابع إلى استثمار أمْثَلي لموارد كل الخلايا الموزعة في بيئة الاتصال سواء أكانت الخلايا صغيرة أم ماكرويّة، فيكون تخصيص كتل الموارد الفيزيائية PRBs ذاتيّاً في الشبكة عبر تعريف مفهوم عنقود التنظيم الذاتي الإفرادي IndC لكل مستخدم يريد الاتصال بالشبكة. وأظهرتْ نتائج الفصل الرابع أنّ أداء الخوارزميّة المقترحة SORRA يمكن تعزيزه مع ازدياد عدد الخلايا الصغيرة، وذلك مهما كان توزُّع المستخدمين في جميع مناطق التغطية للنظام LTE-A HetNet. وفي أثناء تشغيل الخوارزميّة SORRA، تصبح كتلة الموارد المتاحة في الخليّة الهدف المقبولة في العنقود IndC مُحرَّرة لصالح المستخدم الذي يطلب الاتصال. ذلك من أجل كل مستخدم جديد يرغب بالاتصال بالشبكة (مثلاً مجموعة من المستخدمين المتواجدين في أماكن متباينة من مول تجاري ضخم وإن رغبوا جميعهم، خلال فترات متقاربة زمنياً، الاتصال بالشبكة)، حينها سوف تنظم الشبكة عمليّات التسليم وتخصيص كتل الموارد ذاتياً لكل مستخدم على حِدة بناءً على مواصفات العنقود IndC المكتشف لكل مستخدم يطلب الاتصال، وهكذا يجري استغلال كامل الموارد المتاحة من جميع الخلايا. وأظهر هذا الفصل تحسّناً ملموساً في إنتاجيّة الشبكة ومعدّل خدمة الشبكة مقارنةً بالمخططات التقليديّة StFFR وSoFFR لتخصيص الموارد.

استخدم في الفصل الخامس مفهوم خلايا الجوار لحل مسألة تنسيق التداخل البيني بين الخلايا الفمتويّة في النظام LTE-A HetNet بحيث تُعاير قيم استطاعة الإرسال لكل منها للحصول على أدنى مستوى ممكن من التداخل الذي تسببه خلايا عنقود التداخل IntC المُعرَّف في هذا السياق. وهكذا، تصبح آلية التنسيق وفق الخوارزميّة ICFAPB المقترحة مستندةً إلى التعيين الذاتي لعناقيد التداخل IntCs الأكثر أهميّة في النظام HetNet وتحديد مجموعة المحطّات القاعديّة FBSs التي يُطلَب التحكُّم باستطاعتها لتخفيض مستوى التداخل الناتج عنها في الشبكة، وتحسين الأداء بزيادة النسبة SINR والحصول على إنتاجيّة وكفاءة طيفيّة أعلى.

التوصيات الرئيسية للبحث:

- اعتماد المشغلّين الحاليين في الجمهوريّة العربيّة السوريّة مثل سيرياتيل وMTN على حلول الخلايا الصغيرة لتعزيز سعة منظومة الجيل الرابع ورفع معدّل المعطيات.
- إجراء تجارب ميدانيّة، بالتعاون مع المشغلّين الحاليين في سوريا لفحص نتائج الفصول الأربعة الأخيرة من هذا البحث واختبارها عمليّاً واستخلاص قيم مؤشرات الأداء KPIs الخاصة بهؤلاء المشغليّن، للعمل على تطوير إضافي على الخوارزميّات الأربع المقترحة واعتمادها في حال ثبوت أدائها وقبوله عمليّاً، لتحسين عمل منظومة الجيل الرابع الحالية ذاتيّاً.
- تطوير محاور البحث المُبيّنة في هذه الأطروحة بناءً على بعض المفاهيم المستحدثة فيها، مثل مفهوم حمل الخليّة CLF، ومفهوم العنقود الإفرادي IndC ومفهوم عنقود التداخل IntC، وإجراء دراسة

تحليليّة أكثر عمقاً من الناحية الرياضيَّة لعلاقة الارتباط التابعي بين مُوسِطات التحكُّم بالتسليم HCPs من جهة وبين مقاييس النظام من جهة أخرى.

المراجع

[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] Syria awards third license to Wafa Telecom. (2022). Retrieved 6 March 2022, from https://www.commsupdate.com/articles/2022/02/22/syria-awards-third-licence-to-wafa-telecom/
[5] Seppo Ha¨ma¨la¨inen, Henning Sanneck, Cinzia Sartori, " LTE self-organizing Networks (SON) Network Management Automation For Operational Efficiency". 2012 John Wiley & Sons, Ltd.
[6] Mohammadreza Behjati. (2015), " Self-Organising Network Management for Heterogeneous LTE-Advanced Networks",PHD thesis, Brunel University London.
[7] Salvador Navarro Suria (2012), "SON/RRM Functionality for mobility load balancing in LTE Networks,", Master Thesis, Universidad Polit´ecnica de Valencia.
[8] Gaurav kochar, Mr. Rakesh Joon (HOD, ECE Deptt.), Devansh Vats," Progression of LTE Automatic Neighbour Relations, IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering (IOSR-JECE), (Jul - Aug. 2014).
[9] Christian M. Mueller, Hajo Bakker, Lutz Ewe, "Evaluation of the Automatic Neighbor Relation Function in a Dense Urban Scenario," 978-1-4244-8+331-0/11©2011 IEEE.
[10] Radio Resource Control (RRC); Protocol Specification, document TS 36.331, 3GPP, Version 15.3.0, Release 15, France, 2018. [Online] Available: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136300_136399/136331/15.03.00_60/ts_136331v150300p.pdf
[11] P. Muñoz, R. Barco and I. de la Bandera, "On the Potential of Handover Parameter Optimization for Self-Organizing Networks," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 62, no. 5, pp. 1895-1905, Jun 2013.
[12]. Q. Liao, F. Penna, S. Stańczak, Z. Ren and P. Fertl, "Context-aware handover optimization for relay-aided vehicular terminals," in IEEE 14th Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), 2013, pp. 555-559.
[13] T. Jansen, I. Balan, J. Turk, I. Moerman and T. Kürner, "Handover Parameter Optimization in LTE Self-Organizing Networks," in IEEE 72nd Vehicular Technology Conference - Fall, 2010, pp. 1-5.
[14] 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
[15] Bai Y, Zhou J, Liu L, Chen L, Otsuka H. Resource Coordination and interference mitigation between macrocell and femtocell. In IEEE Personal Indoor and Mobile Radio Communications Conference, Tokyo Japan, 2009; 1401–1405.
[16] Guvenc I, Jeong MR, Watanabe F, Inamura H. A hybrid frequency assignment for femtocells and coverage area analysis for co channel operation. In IEEE Communication Letters, vol. 12, 2008; 880–882.
[17] Juang RT, Ting P, Lin HP, Lin DB. Interference management of femtocell in macro-cellular networks. In Wireless Telecommunications Symposium, Tampa, US, 2010; 1–4

[18] Bharucha Z, Saul A, Auer G, Haas H. Dynamic resource partitioning for downlink femto-to-macrocell interference avoidance. In EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2010; 77–88
[19] Chandrasekhar V, Andrews J. Spectrum allocation in tiered cellular networks. IEEE Transactions on Communications 2009; 57(10): 3059–3068
[20] Sundaresan K, Rangarajan S. Efficient resource management in OFDMA femtocells. In Mobile Ad hoc Networking and Computing (MobiHoc), New Orleans, LA, USA, 2009; 33–42
[21] Cao G, Yang D, Ruihong A, Xuan Y, Zheng R, Zhang X. An adaptive sub-band allocation scheme for dense femtocell environment. In IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Cancun, Quintana Roo, 2011; 102–107
[22] Veancy, B., & Yogesh, P. (2020). Fractional Frequency Reuse with Enhanced Scheduling Strategies. Wireless Personal Communications, 117(3), 2541-2553. doi: 10.1007/s11277-020-07993-w
[23] Ezhilarasi, S., & Bhuvaneswari, P. (2021). Maximization of Sum Throughput in LTE Heterogeneous Network using Region Splitting-Based Resource Partitioning Scheme. Wireless Personal Communications, 121(1), 905-938. doi: 10.1007/s11277-021-08665-z
[24] Chang, Ronald Y., Zhifeng Tao, Jinyun Zhang and C.-C. Jay Kuo. “Dynamic fractional frequency reuse (D-FFR) for multicell OFDMA networks using a graph framework.” Wirel. Commun. Mob. Comput. 13 (2013): 12-27.
[25] 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.
[26] 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.
[27] 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
[28] 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
[29] 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.
[30] 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.
[31] C. Cox, "An introduction to LTE: LTE, LTE-advanced, SAE and 4G mobile communications," John Wiley & Sons, 2012, p. 325
[32] A. A. Jasim and S. A. Mawjoud, "LTE heterogeneous network: a case study," International Journal of Computer Applications, vol. 61, no. 8, 2013.
[33] A. Damnjanovic et al., "A survey on 3GPP heterogeneous networks," IEEE Wireless communications, vol. 18, no. 3, 2011.
[34] Behjati, M. (2016). Self-Organising Network Management for Heterogeneous LTE-Advanced Networks (Ph.D). Brunel University London.
[35] Baoling Zhang, (2018) “Handover Control Parameters Optimization in LTE-A Networks,” Ph.D. thesis, Dept. Elect. Eng, University of Sheffield, Sheffield.
[36] J. Zhang and G. De la Roche, Femtocells: technologies and deployment. John Wiley & Sons, 2011.

[37] J. G. Andrews, H. Claussen, M. Dohler, S. Rangan, and M. C. Reed, “Femtocells: Past, present, and future,” IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 30, no. 3, pp. 497–508, 2012.
[38] J. Hoydis, M. Kobayashi, and M. Debbah, “Green small-cell networks,” IEEE Veh. Technol. Mag., vol. 6, no. 1, pp. 37–43, 2011.
[39] 3GPP, “Group Radio Access Network: "Service requirements for Home Node B (HNB) and Home eNode B (HeNB),” 2011.
[40] V. Chandrasekhar, J. G. Andrews, and A. Gatherer, “Femtocell networks: a survey,” IEEE Commun. Mag., vol. 46, no. 9, 2008.
[41] D. Lopez-Perez, I. Guvenc, and X. Chu, “Mobility management challenges in 3GPP heterogeneous networks,” IEEE Commun. Mag., vol. 50, no. 12, 2012.
[42] 3GPP, “3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Vocabulary for 3GPP Specifications (Release 10),” 2011.
[43] A. Merwaday and I. Güvenç, “Handover count based velocity estimation and mobility state detection in dense HetNets,” IEEE Trans. Wirel. Commun., vol. 15, no. 7, pp. 4673–4688, 2016.
[44] D. Xenakis, N. Passas, L. Merakos, and C. Verikoukis, “Mobility management for femtocells in LTE-advanced: key aspects and survey of handover decision algorithms,” IEEE Commun. Surv. Tutorials, vol. 16, no. 1, pp. 64–91, 2014.
[45] 3Gpp, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA)and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN), Overall description, Stage 2 (Release 9),” 2010.
[46] A. Karandikar, N. Akhtar, and M. Mehta, Mobility Management in LTE Heterogeneous Networks. Springer, 2017.
[47] A. Solutions, Small Cell RF Planning and Deployment. 2016.
[48] V. N. I. Cisco, "Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2015–2020 White Paper," Document ID, vol. 958959758, 2016.
[49] C. V. N. I. Cisco, "Global mobile data traffic forecast update, 2013–2018," white paper, 2014.
[50] H. ElSawy, E. Hossain, and M. Haenggi, "Stochastic geometry for modeling, analysis, and design of multi-tier and cognitive cellular wireless networks: A survey," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 15, no. 3, pp. 996-1019, 2013.
[51] D. Castro-Hernandez and R. Paranjape, "Dynamic Analysis of Load Balancing Algorithms in LTE/LTE-A HetNets," Wireless Personal Communications, vol. 96, no. 3, pp. 3297-3315, 2017.
[52] A. Khandekar, N. Bhushan, J. Tingfang, and V. Vanghi, "LTE-advanced: Heterogeneous networks," in Wireless Conference (EW), 2010 European, 2010, pp. 978-982: IEEE.
[53] 3GPP TS 23.501, "System architecture for the 5G system," 2020. [Online]
[54] Akhil Gupta, Rakesh Kumar Jha, A survey of 5G network: architecture and emerging technologies, IEEE Access 3 (2015) 1206–1232.
[55] A. Osseiran, J.F. Monserrat, P. Marsch, 5G Mobile and Wireless Communications Technology, Cambridge University Press, 2016
[56] 3GPP TS 32.500, "Self-Organising Networks (SON): Concepts and Requirements," (Release 8) V0.3.1 (2008-07).
[57] Seppo Hamalainen, Sanneck Henning, Sartori Cinzia, LTE self-organising networks (SON) : network management automation for operational efficiency, 2012, ISBN: 978-1-119-97067-5
[58] 3GPP TR 36.902, "Self-Confguring and Self-Optimizing Network Use Cases and Solutions (Release 9)," v1.2.0. May 2009
[59] 3GPP TS 32.541, "Telecommunication Management; Self-Organizing Networks (SON); Self healing concepts and requirements," 2011.

[60] 3GPP R3-071600, "SON use case: HO parameter optimisation".
[61] 3GPP R3-071438, "Load balancing SON use case".
[62] 3GPP R1-074851, "Uplink inter-cell interference coordination".
[63] NGMN Alliance, "Next generation mobile networks beyond HSPA & EVDO," December, 2006.
[64] NGMN Alliance, "NGMN Use Cases related to Self Organising Network, Overall Description, white paper," May 2007.
[65] 3GPP TS 32.511, " Telecommunication Management, Automatic Neighbor Relation (ANR), concepts and requirements. (3GPP TS 32.511 version 12.0.0 Release 12, 2014)
[66] 3GPP, TS 32.101, "Technical specifcation group services and system aspects, telecommunication management," Principles and High-Level Requirements, ver.10.0.0., Release 10.
[67] Anna Zakrzewska, et al., Cell ID management in multi-vendor and multi-RAT heterogeneous networks, IEEE Trans. Netw. Serv. Manage. 16 (2) (2019) 417–429, 2019.
[68] P. Ramachandra, K. Zetterberg, F. Gunnarsson, R. Moosavi, S. B. Redhwan and S. Engström, "Automatic neighbor relations (ANR) in 3GPP NR," 2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW), 2018, pp. 125-130, doi: 10.1109/WCNCW.2018.8369039.
[69] P. Ramachandra, F. Gunnarsson, K. Zetterberg, R. Moosavi, M. Amirijoo, S. Engström, C. Tidestav, E. Ramos, ”On Automatic Establishment of Relations in 5G Radio Networks”, in Proc. IWSON at IEEE PIMRC, Valencia, Spain, 2016.
[70] 3GPP TS 36.300, v8.12.0, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRAN); Overall description”
[71] H. Olofsson, S. Magnusson, M. Almgren, “A Concept for Dynamic Neighbor Cell List Planning in a Cellular System,” IEEE Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Taipei, Taiwan, 1996.
[72] P. Gustås, P. Magnusson, J. Oom and N. Storm, “Real Time Performance Monitoring and Optimization of Cellular Systems,” Ericsson Review, No. 1, 2002
[73] J. Baliosian and R. Stadler, “Decentralized Configuration of Neighboring Cells for Radio Access Networks,” 1st IEEE Workshop on Autonomic Wireless Access (in conjuction with IEEE WoWMoM), Helsinki, Finland, 2007.
[74] F. Parodi, M. Kylväjä, G. Alford, J. Li, and J. Pradas, ”An Automatic Procedure for Neighbor Cell List Definition in Cellular Networks,” 1st IEEE Workshop on Autonomic Wireless Access (in conjuction with IEEE WoWMoM), Helsinki, Finland, 2007.
[75] LTE L11 “Radio Network Functionality” LND 108 7402 R11B.
[76] Konrad Po lys1, Krzysztof Grochla1, “Mobility Robustness in LTE based on Automatic Neighbor Relation Table, Institute of Theoretical and Applied Informatics, Polish Academy of Science,2016.
[77] 3GPP meeting report, “Report of 3GPP TSG RAN WG2 NR AdHoc#2 meeting”, Qingdao, China, June 2017. [Online]. Available: http://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/WG2_RL2/TSGR2_AHs/2017_06_NR/Report/.
[78] [78] Zhengyi Lin, Ye Ouyang, Le Su, Wenyuan Lu, Zhongyuan LiA,” Machine Learning Assisted Method of Coverage and Capacity Optimization (CCO) in 4G LTE Self Organizing Networks (SON)”. IEEE 2019
[79] Raj Jain, "Channel Models: A Tutorial," WiMAX Forum AATG, February 2007
[80] C.-H. Chen, C.-A. Lee, and C.-C. Lo, ``Vehicle localization and velocity estimation based on mobile phone sensing," IEEE Access, vol. 4, pp. 803-817, 2016.
[81] A. Alhammadi, M. Roslee, M. Y. Alias, I. Shayea, S. Alraih, and K. S. Mohamed, ``Auto tuning self-optimization algorithm for mobility management in LTEA and 5G HetNets," IEEE Access, vol. 8, pp. 294-304, 2020.

[82] B. Zhang, ``Handover control parameters optimization in LTE networks," Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Eng., Univ. Sheffield, Sheffield, U.K., Apr. 2018.
[83] R. D. Hegazy and O. A. Nasr, ``A user behavior based handover optimization algorithm for LTE networks," in Proc. IEEE Wireless Commun. Netw. Conf. (WCNC), Mar. 2015, pp. 1255-1260.
[84] M. Alhabo and L. Zhang, ``Unnecessary handover minimization in twotier heterogeneous networks," in Proc. 13rd Annu. Conf. Wireless Demand Netw. Syst. Services (WONS), Feb. 2017, pp. 160-164.
[85] A. Kishida, Y. Morihiro, T. Asai, and Y. Okumura, ``Cell selection scheme for handover reduction based on moving direction and velocity of UEs for 5G multi-layered radio access networks," in Proc. Int. Conf. Inf. Netw. (ICOIN), Jan. 2018, pp. 362-367.
[86] S. Kapoor, D. Grace, and T. Clarke, ``A base station selection scheme for handover in a mobility-aware ultra-dense small cell urban vehicular environment," in Proc. IEEE 28th Annu. Int. Symp. Pers., Indoor, Mobile Radio Commun. (PIMRC), Oct. 2017, pp. 1-5.
[87] J.-M. Moon and D.-H. Cho, ``Efcient handoff algorithm for inbound mobility in hierarchical macro/femto cell networks," IEEE Commun. Lett., vol. 13, no. 10, pp. 755-757, Oct. 2009.
[88] J. Moon and D. Cho, ``Novel handoff decision algorithm in hierarchical macro/femto-cell networks," in Proc. IEEE Wireless Commun. Netw. Conf., Apr. 2010, pp. 1-6.
[89] K. Alexandris, N. Sapountzis, N. Nikaein, and T. Spyropoulos, ``Loadaware handover decision algorithm in next-generation HetNets," in Proc. IEEE Wireless Commun. Netw. Conf., Apr. 2016, pp. 1-6.
[90] P. Xu, X. Fang, R. He, and Z. Xiang, ``An efcient handoff algorithm based on received signal strength and wireless transmission loss in hierarchical cell networks," Telecommun. Syst., vol. 52, no. 1, pp. 317 325, Jan. 2013.
[91] D. Lopez-Perez, A. Ladanyi, A. Juttner, and J. Zhang, ``OFDMA femtocells: Intracell handover for interference and handover mitigation in twotier networks," in Proc. IEEE Wireless Commun. Netw. Conf., Apr. 2010, pp. 1-6.
[92] D. López-Pérez, A. Valcarce, Á. Ladányi, G. de la Roche, and J. Zhang, ``Intracell handover for interference and handover mitigation in OFDMA two-tier macrocell-femtocell networks," EURASIP J. Wireless Commun. Netw., vol. 2010, no. 1, Feb. 2010, Art. no. 142629.
[93] H. Kalbkhani, S. Yousefi, and M. G. Shayesteh, ``Adaptive handover algorithm in heterogeneous femtocellular networks based on received signal strength and signal-to-interference-plus-noise ratio prediction," IET Commun., vol. 8, no. 17, pp. 3061-3071, Nov. 2014.
[94] T. Jansen, I. Balan, S. Stefanski, I. Moerman, and T. Kurner, ``Weighted performance based handover parameter optimization in LTE," in Proc. IEEE 73rd Veh. Technol. Conf. (VTC Spring), May 2011, pp. 1-5.
[95] M. S. I. Khan, M. M. Rahman, K. Raahemifar, J. Mi²i¢, and V. B. Mi²i¢, ``Self-optimizing control parameters for minimizing ping-pong handover in long term evolution (LTE)," in Proc. 27th Biennial Symp. Commun. (QBSC), Jun. 2014, pp. 118-122.
[96] N. Hassan, K. Elkhazeen, K. Raahemiafar, and X. Fernando, ``Optimization of control parameters using averaging of handover indicator and received power for minimizing ping-pong handover in LTE," in Proc. IEEE 28th Can. Conf. Electr. Comput. Eng. (CCECE), May 2015, pp. 92-97.
[97] D.-W. Lee, G.-T. Gil, and D.-H. Kim, ``A cost-based adaptive handover hysteresis scheme to minimize the handover failure rate in 3GPP LTE system," EURASIP J. Wireless Commun. Netw., vol. 2010, no. 1, Dec. 2010, Art. no. 750173.

[98] P. Xu, X. Fang, J.Yang, andY. Cui, ``Auser's state and SINR-based handoff algorithm in hierarchical cell networks," in Proc. Int. Conf. Comput. Intell. Softw. Eng., Sep. 2010, pp. 1-4.
[99] M. Vondra and Z. Becvar, ``Connection cost based handover decision for offloading macrocells by femtocells," in Proc. Int. Conf. Wired/Wireless Internet Commun., 2012, pp. 208-219.
[100] Z. Becvar and P. Mach, ``Adaptive hysteresis margin for handover in femtocell networks," in Proc. 6th Int. Conf. Wireless Mobile Commun., Sep. 2010, pp. 256-261.
[101] S. Lal and D. K. Panwar, ``Coverage analysis of handoff algorithm with adaptive hysteresis margin," in Proc. 10th Int. Conf. Inf. Technol. (ICIT), Dec. 2007, pp. 133-138.
[102] M. Boujelben, S. Ben Rejeb, and S. Tabbane, ``Anovel green handover selfoptimization algorithm for LTE-A/5G HetNets," in Proc. Int. Wireless Commun. Mobile Comput. Conf. (IWCMC), Aug. 2015, pp. 413-418.
[103] G. Araniti, J. Cosmas, A. Iera, A. Molinaro, A. Orsino, and P. Scopelliti, ``Energy efficient handover algorithm for green radio networks," in Proc. IEEE.
[104] G. Yang, X. Wang, and X. Chen, ``Handover control for LTE femtocell networks," in Proc. Int. Conf. Electron., Commun. Control (ICECC), Sep. 2011, pp. 2670-2673.
[105] M. Z. Chowdhury, W. Ryu, E. Rhee, and Y. M. Jang, ``Handover between macrocell and femtocell for UMTS based networks," in Proc. 11st Int. Conf. Adv. Commun. Technol., Feb. 2009, pp. 237-241.
[106] M. Alhabo, L. Zhang, and O. Oguejiofor, ``Inbound handover interferencebased margin for load balancing in heterogeneous networks," in Proc. Int. Symp. Wireless Commun. Syst. (ISWCS), Aug. 2017, pp. 146-151.
[107] D. Xenakis, N. Passas, L. Merakos, and C. Verikoukis, ``Energy-efficient and interference-aware handover decision for the LTE advanced femtocell network," in Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC), Jun. 2013, pp. 2464-2468.
[108] H. Zhang, C. Jiang, and J. Cheng, ``Cooperative interference mitigation and handover management for heterogeneous cloud small cell networks," IEEE Wireless Commun., vol. 22, no. 3, pp. 92-99, Jun. 2015.
[109] A. D. Antoro, I. W. Mustika, and S. B. Wibowo, ``Downlink cross-tier interference mitigation for macrocell user in open access femtocell using handover scenario," in Proc. Int. Conf. Electr. Eng. Informat. (ICEEI), Aug. 2015, pp. 656-660.
[110] I. Shayea, M. Ergen, A. Azizan, M. Ismail, and Y. I. Daradkeh, ``Individualistic dynamic handover parameter self-optimization algorithm for 5G networks based on automatic weight function," IEEE Access, vol. 8, pp. 214392-214412, 2020.
[111] A. Alhammadi, M. Roslee, M. Y. Alias, I. Shayea, and A. Alquhali, ``Velocity-aware handover self-optimization management for next generation networks," Appl. Sci., vol. 10, no. 4, p. 1354, Feb. 2020.
[112] A. Abdulraqeb, R. Mardeni, A. M. Yusoff, S. Ibraheem, and A. Saddam, ``Self-optimization of handover control parameters for mobility management in 4G/5G heterogeneous networks," Autom. Control Comput. Sci., vol. 53, no. 5, pp. 441-451, Nov. 2019.
[113] A. Alhammadi, M. Roslee, M. Y. Alias, I. Shayea, S. Alraih, and K. S. Mohamed, ‘‘Auto tuning self-optimization algorithm for mobility management in LTE—A and 5G HetNets,’’ IEEE Access, vol. 8, pp. 294–304, 2020
[114]. SINR Map for a 5G Urban Macro-Cell Test Environment- MATLAB & Simulink. (2021). [online] Available: https://www.mathworks.com/help/phased/ug/sinr-map-for-a-5g-urban-micro-cell-test-environment.html.
[115] L. F. Ibrahim, H. A. Salman, Z. F. Taha, N. Akkari, G. Aldabbagh, and O. Bamasak, ‘‘A survey on heterogeneous mobile networks planning in indoor dense areas,’’ Pers. Ubiquitous Comput., vol. 24, no. 4, pp. 487–498, Aug. 2020

[116] P.-C. Lin, L. F. G. Casanova, and B. K. S. Fatty, ‘‘Data-driven handover optimization in next generation mobile communication networks,’’ Mobile Inf. Syst., vol. 2016, p. 11, Aug. 2016
[117] LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Requirements for Support of Radio Resource Management, document TS 36.133, 3GPP, Version 15.8.0, Release 15, 2019.
[118] A. Ulvan, R. Bestak, and M. Ulvan, ‘‘The study of handover procedure in LTE-based femtocell network,’’ in Proc. WMNC, Oct. 2010, pp. 1–6
[119] [11]. A. Ulvan, R. Bestak, and M. Ulvan, “Handover procedure and decision strategy in LTE-based femtocell network,” Telecommun. Syst., vol. 52, no. 4, pp. 2733– 2748, April 2013.
[120] M. Behjati and J. Cosmas, ‘‘Multi-layer cell deployment strategy for selforganizing LTE-advanced networks,’’ in Proc. 9th Int. Wireless Commun. Mobile Comput. Conf. (IWCMC), Jul. 2013, pp. 820–825
[121] LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) Conformance Specification Radio Transmission and Reception; Part1: Conformance Testing, document TS 36.521-1, 3GPP, Version 8.3.1 Release 8, 2009
[122] Mehta, M., Rane, N., Karandikar, A., Imran, M., & Evans, B. (2014). A self-organized resource allocation scheme for heterogeneous macro-femto networks. Wireless Communications &Mobile Computing, 16(3), 330-342. doi: 10.1002/wcm.2518
[123] Ruiz Avilés, J., Toril, M., & Luna-Ramírez, S. (2015). A femtocell location strategy for improving adaptive traffic sharing in heterogeneous LTE networks. EURASIP Journal On Wireless Communications &Networking, 2015(1).doi: 10.1186/s13638-015-0246-0
[124] 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
[125] Y. Chang, Z. Tao, J. Zhang and C-C. Jay Kuo, “A Graph Approach to Dynamic Fractional Frequency Reuse (FFR) in Multi-Cell OFDMA Networks”, IEEE ICC, December 2009.
[126] [18] T. A. Achhab, F. Abboud and A. Assalem, (2021). "A Robust Self-Optimization Algorithm Based on Idiosyncratic Adaptation of Handover Parameters for Mobility Management in LTE-A Heterogeneous Networks," in IEEE Access, vol. 9, pp. 154237-154264, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3127326.
[127] [20] 20- Okumura-Hata Model for LTE, (2013): http://www.teletopix.org/4g-lte/okumura-hata-model-for-lte/
[128] Vijay K. Garg, (2007). in Wireless Communications & Networking, ISBN 978-0-12-373580-5, DOI https://doi.org/10.1016/B978-0-12-373580-5.X5033-9
[129] 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
[130] Alotaibi, Sultan, (2022), Femtocell Networks Interference Management Approaches, IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, Volume 22 Issue 4, Pages.329-339
[131] 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
[132] 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.

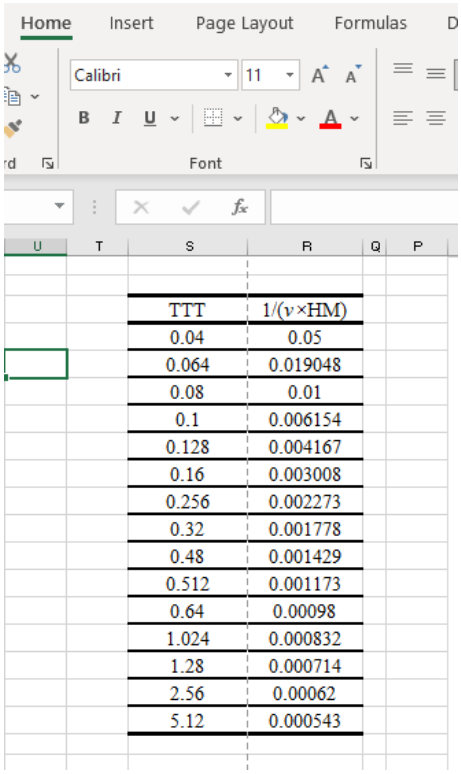
[133] Liang YS, et al., (2012), Resource allocation with interference avoidance in OFDMA femtocell networks. IEEE Trans Vehicular Tech. 2012;61(5):2243–2255
[134] 3GPP TR36.814, (March 2010), V9.0.0 evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); further advancements for E-UTRA physical layer aspects
[135] 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.
[136]. 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

الملاحق

الملحق –أ–: استخدام برنامج الجدول الإلكترونيّة إكسل EXCEL في تعيين علاقة ارتباط هامش البطاء والزمن اللازم للقدح مع سرعة المستخدم

باستخدام برنامج الجداول الإلكترونية Excel، نقدم هنا خطوات الاشتقاق للعلاقة (3–14) (مع العلم أنّه يجري استخدام نفس الخطوات للعلاقة (3–15)):

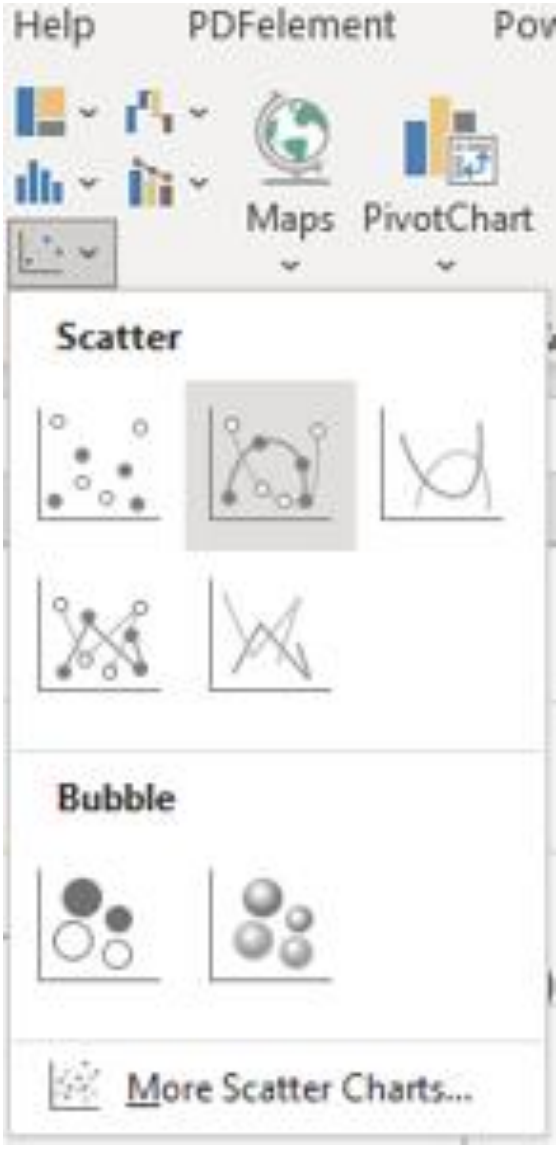
- الخطوة الأولى: استيراد بيانات TTT و$\frac{1}{v \times HM_{adaptive}}$ من الجدول 3–1 إلى ورقة عمل Excel، كما هو موضح في الشكل 1.



TTT	1/(v×HM)
0.04	0.05
0.064	0.019048
0.08	0.01
0.1	0.006154
0.128	0.004167
0.16	0.003008
0.256	0.002273
0.32	0.001778
0.48	0.001429
0.512	0.001173
0.64	0.00098
1.024	0.000832
1.28	0.000714
2.56	0.00062
5.12	0.000543

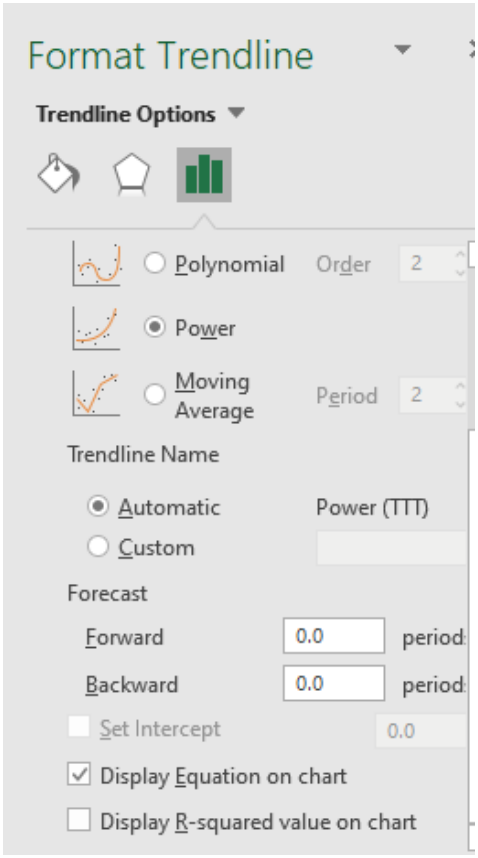
الشكل 1: استيراد بيانات إلى برنامج الجداول الإلكترونية إكسيل EXCEL (الباحث).

- الخطوة الثانية: إدخال مخطط مبعثر Scatter إلى ورقة عمل بيانات Excel المذكورة أعلاه، كما هو موضح في الشكل 2. وهكذا، نحصل على الشكلين 3–8 و3–9 في الفصل الثالث.



الشكل 1: اختيار نوع مخطط الرسم البياني في برنامج الجدول الالكترونية إكسيل EXCEL (الباحث).

- الخطوة الثالثة: إضافة مخطط لخط الاتجاه من النوع "Power" وتحدد المربع المقابل لإظهار المعادلة الناتجة، كما هو موضح في الشكل 3 التالي، ومنه نقرأ صيغ العلاقتين (3−14) و(3−15).



الشكل 2: اختيار نمط معادلة المنحني البياني في برنامج الجداول الالكترونية إكسيل EXCEL (الباحث).

Syrian Arab Republic

Ministry of Higher Education and Scientific Research

Damascus University

Faculty of Mechanical and Electrical Engineering

Department of Electronics and Communications Engineering

Enhancement of LTE Advanced System Performance by Using Self-Organizing Network (SON) Techniques

A Dissertation submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of PhD in Advanced Communications Engineering

By

Eng. Tarek AL ACHHAB

Supervisors

Prof. Fariz Abboud

Professor in the Department of Electronics and communication Engineering - Damascus University

Prof. Abdulkarim Assalem

Professor in the Department of Electronics and communication Engineering – AL Baath University

Academic Year

2022-2023