

## Power Efficient Allocation In C-RAN With Multi Access Technology Selection Approach

Ali Asghar Ansar\* ، Mohsen Islami\*\* ، Mohammad Javad Dehghani\*\*\*  
Saeeda Parsai Fard\*\*\*\*

\* Ph.D. student, Shiraz University of Technology

\*\* Associate Professor, Shiraz University of Technology

\*\*\* Professor, Shiraz University of Technology

\*\*\*\* Invited Professor, University of Toronto

### Abstract:

In this paper, we consider an uplink economy-efficient resource allocation in a multicellular virtual wireless network with a C-RAN architecture where a MNO interacts with a number of MVNOs with a predetermined business model. In each cell of this system, two types of multiple access technologies, namely OFDMA and Massive MIMO, are available for MVNO at two different prices. In this setup, we propose a multi access technology selection approach (MATSA) with the objective to reduce operating costs and maximize the profit of the MVNOs subject to a set of constraints, and formulate this resource allocation problem with the new utility function. Due to the existence of continuous and binary variables in the formulated optimization problem and also the interference between cells in data rate functions, this optimization problem will be non-convex with very high computational complexity. To tackle this problem, by applying the complementary geometric programming (CGP) and the successive convex approximation (SCA), an effective two-step iterative algorithm is developed to convert the optimization problem into two sub problems with the aim to find optimum technology selection and power consumption parameters for each user in two steps, respectively. The simulation results demonstrate that our proposed approach (MATSA) with novel utility function is more efficient than the traditional approach, in terms of increasing total EE and reducing total power consumption. The simulation results illustrate that the profit of the MVNOs is enhanced more than 13% compared to that of the traditional approach.

**Keywords:** multi access technology selection approach, C-RAN, OFDMA, and Massive MIMO

## تخصیص کارای توان الکتریکی در شبکه های دسترسی رادیویی ابری با رویه انتخاب فناوری

علی اصغر انصاری\* محسن اسلامی\*\* محمد جواد دهقانی\*\* سعیده پارسایی فرد\*\*\*

\*دانشجوی دکترای رشته مخابرات سیستم، دانشگاه صنعتی شیراز

\*\*دانشیار، عضو هیات علمی دانشگاه صنعتی شیراز

\*\*استاد، عضو هیات علمی دانشگاه صنعتی شیراز

\*\*\*استاد مدعو، دانشگاه تورنتوی کانادا

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۰۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۲۷

### چکیده

در این مقاله، ما یک روش تخصیص بهره ور منابع با رویکرد اقتصادی را که در آن یک **MNO** با تعدادی از **MVNO** ها با یک مدل تجاری از پیش تعیین شده در تعامل هستند را بر مسیر **Uplink** یک شبکه بی سیم مجازی چند سلولی با معماری **C-RAN** در نظر می گیریم. در هر سلول از این شبکه، دو نوع فناوری، شامل **OFDMA** و **Massive MIMO** با قیمت های متفاوت برای عرضه به **MVNO** ها توسط **MNO** موجود می باشد. روش پیشنهادی در واقع رویه انتخاب مناسب فناوری دسترسی چندگانه (**MATSA**) از میان دو نوع فناوری فوق با هدف کاهش هزینه های عملیاتی و به حداکثر رساندن سود **MVNOs** تحت یک مجموعه از قیود کمی و کیفی است. فرمول بندی این روش از تخصیص منابع، با یک تابع مطلوب جدید ارائه شده است. با توجه به وجود متغیرهای پیوسته و دودیی در مساله و همچنین تداخل بین سلولی در توابع نرخ داده، این مساله بهینه سازی از نوع غیر محدب با پیچیدگی محاسباتی بسیار بالا خواهد بود. برای حل این مساله، با استفاده از برنامه نویسی هندسی مکمل (**CGP**) و تقریب محدب متوالی (**SCA**)، یک الگوریتم تکرار شونده دو مرحله ای موثر برای تبدیل مساله بهینه سازی به دو زیر مساله برای یافتن فناوری و هزینه بهینه هر کاربر را توسعه داده ایم. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که روش پیشنهادی ما (**MATSA**) از نظر افزایش کل بهره وری انرژی، کارآمدتر از سیستم های مجهز با یک نوع فناوری است بطوری که سود **MVNO** ها بیش از ۱۳ درصد در مقایسه با قبل افزایش یافته است.

واژگان کلیدی: Multi access technology selection approach(MATSA), C-RAN, OFDMA, and Massive MIM

دهنده خدمات و اپراتورهای شبکه مجازی تلفن همراه<sup>۱۰</sup> (MVNO) را دارند [۱۲] تا [۱۴].

همچنین فناوری Massive MIMO، با استفاده از چند صد آنتن در BS، آزادی فضایی بی سابقه ای را برای برقراری ارتباط همزمان با چندین کاربر تک آنتن از طریق یک کانال فرکانس زمانی یکسان فراهم کرده است و در نتیجه سه سیستم های دارای این فناوری توانسته اند SE را سه بار بهبود دهند. علاوه بر آن، این فناوری می تواند توان انتقالی را در محدوده های با افزایش تعداد آنتن ها در BS کاهش دهد و هنگامی که از آنتن های بیشتری استفاده می شود، سیستم بدلیل اینکه به سخت افزار اضافی نیاز داشته و کل مصرف توان الکتریکی در مدار بیشتر شده و در نتیجه EE کاهش می یابد [۱۵] و [۱۶].

بکارگیری فناوری های مختلف دسترسی چندگانه غیرمتعامد NOMA<sup>۱۶</sup> برای افزایش EE و SE و تلاقی این تلاش ها با دستاوردهای مهم در معرفی معماری های جدید تا حد زیادی همزمان ضمن تامین نیازمندیهای سه گانه خدمات در شبکه های تلفن همراه نسل جدید، امکان مدیریت بهتر منابع را نیز فراهم نموده است [۱۷] و [۱۸].

با این وجود برای ارتقای شبکه اپراتورهای تلفن همراه به نسل های بالاتر، تجهیز و مهاجرت به این نوع فناوری ها توسط آنها نیازمند صرف هزینه های سنگین سرمایه گذاری است که قطعا برای تمام اپراتورها مقدور و به صرفه نخواهد بود. بنابراین در این شرایط فضای توسعه اپراتورهای مجازی موبایل<sup>۱۷</sup> (MVNO) و سیستم های چندمستاجر بسیار افزایش یافته است [۱۹] و [۲۰].

با وجود فناوری های نو ظهور اشاره شده در بالا، پژوهشگران تحقیقات گسترده و فراوانی را برای معرفی تکنیک های بهینه تخصیص منابع نظیر منابع رادیویی، زیرساخت های ابری و توان الکتریکی در شبکه های بی سیم مجازی<sup>۱۸</sup> (VWN) به عمل آورده اند. در این راستا عمده مشارکت ما در این کار را می توان بطور خلاصه به صورت زیر بیان نمود:

- برای اولین بار تخصیص کارای منابع در C-RAN و حفظ QoS مورد انتظار کاربران با روشی مبتنی بر انتخاب فناوری دسترسی مناسب پیشنهاد داده ایم.

## ۱. مقدمه

امروزه، توسعه شتابان برنامه های کاربردی از جمله کاربردهای مبتنی بر پهن باند وسیع، ارتباطات ماشین با ماشین و اینترنت اشیا در کاربری های مختلف، اپراتورهای تلفن همراه را برای پشتیبانی از نیازمندیهای نرخ داده بسیار بالا، تاخیر فوق العاده پایین

و امکان اتصال پرتراکم کاربران، از سه گروه خدمات اصلی یعنی eMBB<sup>۱</sup>، URLLC<sup>۲</sup> و mMTC<sup>۳</sup> وادار به سرمایه گذاری هنگفتی در تامین و تجهیز زیرساخت های مورد نیاز نموده است [۱] تا [۳]. به دلیل افزایش تقاضا برای نرخ داده های بالاتر از یک طرف و از طرف دیگر کمبود طیف فرکانسی و پیچیدگی محاسباتی، اپراتورهای شبکه های بی سیم نسل جدید همواره برای بهبود بهره وری طیف<sup>۴</sup> (SE) و بازده انرژی<sup>۵</sup> (EE) با چالش های اساسی روبرو هستند. به موازات این چالش ها، بکارگیری معماری ها و فناوری های نوظهور در شبکه های ۵G توانسته اند SE و EE را بطور قابل قبولی در آنها بهبود دهند [۴]. بطور مثال در معماری پیشنهادی C-RAN، با هدف کاهش میزان سرمایه گذاری<sup>۶</sup> (CAPEX) و هزینه عملیاتی<sup>۷</sup> (OPEX)، در شبکه های بی سیم مجازی ایستگاه پایه<sup>۸</sup> (BS) را به دو قسمت بخش رادیویی از راه دور<sup>۹</sup> (RRH) و واحدهای باند پایه<sup>۱۰</sup> (BBU) تفکیک می کنند [۵] و [۶]. البته در این راهکار محدودیت ظرفیت لینک front-haul و ایجاد تاخیر در ترافیک کنترلی و داده ای وجود دارد که برای غلبه بر این محدودیت در C-RAN تاکنون راهکارهای پیشنهاد شده است [۷] تا [۹].

در این میان، بکارگیری فناوری های جدید مجازی سازی<sup>۱۱</sup> SDN و NFV<sup>۱۲</sup> و با معرفی معماری های جدید موجب ایجاد ساختاری منعطف با قابلیت کاهش بیشتر مصرف انرژی شده است و در نتیجه اپراتورها را قادر به اجرای موثر ایده برش شبکه<sup>۱۳</sup> و اجرای سناریوهای تخصیص منابع چند مستاجر<sup>۱۴</sup> انتها به انتها می کند [۱۰] و [۱۱]. از این رو، با افزایش بهره وری منابع، اپراتورهای ۵G با امکان جداسازی برش های منابع از یکدیگر، انگیزه کافی برای به اشتراک گذاشتن زیرساخت خود به طور همزمان با چندین ارائه

<sup>10</sup> Base Band Unit

<sup>11</sup> Software Defined Network

<sup>12</sup> Network Function Virtualization

<sup>13</sup> Network Slicing

<sup>14</sup> Multi-tenant

<sup>15</sup> Mobile Virtual Network Operator

<sup>16</sup> Non-Orthogonal Multiple Access

<sup>17</sup> Mobile Virtual Network Operator

<sup>18</sup> Virtual Wireless Network

<sup>1</sup> Enhanced Mobile Broadband

<sup>2</sup> Ultrareliable Low Latency Communications

<sup>3</sup> Massive Machine Type Communications

<sup>4</sup> Spectral Efficiency

<sup>5</sup> Energy Efficiency

<sup>6</sup> Capital Expenditure

<sup>7</sup> Operating Expenses

<sup>8</sup> Base Station

<sup>9</sup> Remote Radio Head

در کارهای اشاره شده بالا استفاده از راهبرد خاموش برای کاهش انرژی در محیط های پر چگالی از نظر تعداد کاربر فعال کاربردی ندارد. در صورتی که در این کار با استفاده از راهبرد انتخاب فناوری دسترسی<sup>۴</sup> (RAT) متناسب با نیازمندی QoS و البته با حداقل توان الکتریکی مصرفی این مشکل را نخواهیم داشت.

علاوه بر این در برخی کارها تخصیص منابع با نگاه اقتصادی صورت پذیرفته است. بطور مثال در [۲۶] و [۲۷] بر اساس یک مدل پیشنهادی قیمت گذاری در یک محیط C-RAN انجام شده است. همچنین در [۲۸] و [۲۹] تخصیص منابع با مدل حراج در محیط های با چندین اپراتور مجازی بررسی شده است.

در مقاله حاضر تخصیص کارای منابع در یک محیط چند سلولی در C-RAN برای سناریوی چند مستأجره همزمان با نگاه اقتصادی بررسی شده است که در کارهای قبلی مشابه تخصیص منابع با نگاه اقتصادی، کارایی کمتر مد نظر بوده است.

بنابراین بر اساس روش پیشنهادی ما که در این تحقیق رویه انتخاب فناوری دسترسی چندگانه یا به اختصار (MATSA)<sup>۵</sup> نامیده می شود هدف ارائه یک راه حل موثر برای به حداقل رساندن کل توان مصرفی BBU و در نتیجه کاهش هزینه مصرف توان الکتریکی میزان بهبود و به حداکثر رساندن درآمد MVNO ها و ارائه دهندگان خدمات است. در این روش MVNO ها منابع خود را با متناسب با QoS مورد نیاز کاربران و رعایت حداقل قیمت از بین یکی از فناوری های دسترسی OFDMA و Massive MIMO انتخاب و به کاربران اختصاص می دهند. ما این مساله بهینه سازی را با یک تابع مطلوب<sup>۶</sup> جدید و با در نظر گرفتن مجموعه ای از محدودیت ها<sup>۷</sup> برای مسیر فراسو در یک سیستم چند سلولی C-RAN فرموله می کنیم. با توجه به وجود متغیرهای پیوسته و باینری در مساله بهینه سازی فرموله شده و همچنین با در نظر گرفتن پدیده تداخل بین سلولها در توابع نرخ داده، این مساله بهینه سازی غیر محدب با پیچیدگی محاسباتی بسیار بالا خواهد بود. برای حل این مساله، با استفاده از برنامه نویسی هندسی مکمل<sup>۸</sup> (CGP) و تقریب محدب متوالی<sup>۹</sup> (SCA)، یک الگوریتم تکرار شونده دو مرحله ای موثر برای تبدیل مساله بهینه سازی به دو زیر مساله با پیچیدگی کمتر توسعه داده خواهد شد [۳۸] تا [۴۱]. با این حال، زیرمسائل هنوز محدب نیستند و در هر مرحله با تکنیک های مختلف انتقال از جمله تقریب<sup>۱۰</sup> DC و تقریب میانگین هندسی - هندسی<sup>۱۱</sup> (AGMA)، به مساله برنامه ریزی

علاوه بر این در این کار مدل سیستم بصورت چند مستأجره فرض شده است و تخصیص کارای منابع با نگاه اقتصادی و افزایش سود برای اپراتور مجازی موبایل یا MVNO با برش شبکه انجام شده است.

همچنین پیشنهاد ما در یک سیستم چند سلولی با در نظر گرفتن تداخلات بین سلولی و بین سلولی ارایه شده است که افزایش پیچیدگی را نسبت به کارهای قبلی به همراه داشته است.

نتایج شبیه سازی نشان می دهد که روش پیشنهادی ما (MATSA) از نظر افزایش کل بهره‌وری انرژی، کارآمدتر از سیستم های مجهز با یک نوع فناوری است بطوری که سود MVNO ها بیش از ۱۳ درصد در مقایسه با قبل افزایش یافته است.

## ۲. پیشینه تحقیق

با توجه به مطالبی اشاره شده در بخش مقدمه، برای انجام تخصیص کارای منابع و کاهش بهینه کل توان مصرفی در شبکه های بی سیم با معماری C-RAN کارهای تحقیقاتی فراوانی انجام پذیرفته است. در برخی از این کارها، استفاده از راهبرد حالت خاموش<sup>۱</sup> در بخش AP<sup>۲</sup> ها و BBU ها مورد بررسی قرار گرفته است. بطور مثال نویسندگان در [۲۱] یک مدل برای کاهش توان مصرفی با بهره گیری راهبرد حالت خاموش و کنترل توان BS ها حساس به تاخیر در یک شبکه C-RAN و با لحاظ QoS مورد نیاز و محدودیت ظرفیت لینک فراسو را پیشنهاد داده است. همچنین در [۲۲] تخصیص کارای منابع روی یک شبکه H-CRAN شامل تعدادی RRH و Femto-Cell و یک استخر BBU بررسی شده است. در این مقاله با هدف مصرف بهینه توان، RRH های کم ترافیک خاموش و ترافیک آنها از طریق لینک متصل به Femto-Cell ها تخلیه می شوند و BBU های متصل به این RRH های بدون استفاده نیز به حالت خاموش می روند. در [۲۳] تا [۲۵] به RRH های کم ترافیک در یک شبکه C-RAN فرمان خاموش داده می شود و منابع پردازشی که به صورت ماشین مجازی در BBU(CU) می باشند به صورت پویا<sup>۳</sup> به RRH(RAU) های فعال تخصیص می یابند و در نتیجه ماشین های فیزیکی که منابع آنها بدون استفاده قرار گرفته اند موقتاً می توانند از مدار خارج شوند.

<sup>7</sup> Constraints

<sup>8</sup> Complementary Geometric Programming

<sup>9</sup> Successive Convex Approximation

<sup>10</sup> Differentiable Convex Optimization

<sup>11</sup> Arithmetic-Geometric Mean Approximation

<sup>1</sup> Sleep Mode Strategy

<sup>2</sup> Access Point

<sup>3</sup> Dynamic Resource Allocation

<sup>4</sup> Radio Access Technology

<sup>5</sup> Multi Access Technology Selection Approach

<sup>6</sup> Utility Function

متغیر انتخاب فناوری دسترسی OFDMA	$x_{\ell,k,n_g} \in \{0,1\}$
ماتریس انتخاب فناوری دسترسی OFDMA	$X = \{x_{\ell,k,n_g}\}$
متغیر انتخاب فناوری دسترسی M-MIMO	$y_{\ell,k,n_g} \in \{0,1\}$
ماتریس انتخاب فناوری دسترسی M-MIMO	$Y = \{y_{\ell,k,n_g}\}$
حداکثر توان اختصاصی به سلول $\ell$	$P_{\ell}^{\max}$
توان اختصاصی به کاربر $n_g$ در سلول $\ell$	$P_{\ell,k,n_g}$
نرخ داده رزرو به کاربر $n_g$ در سلول $\ell$	$R_{\ell,k,n_g}$
حداقل نرخ داده اختصاصی به برش	$R_g^{\min}$
حداکثر ظرفیت پهنای باند لینک FH	$R_{FH}^{\max}$
تداخل کاربران سلولها با کاربر $n_g$ سلول $\ell$	$I_{\ell,k,n_g}$
بهره کانال کاربر $n_g$ سلول $\ell$	$h_{\ell,k,n_g}$
توان نویز	$\sigma^2$
هزینه فناوری دسترسی OFDMA	$C^{\text{OFDMA}}$
هزینه فناوری دسترسی M-MIMO	$C^{\text{M-Mass}}$
تابع مطلوب سود MNO	$U(X,Y,P)$

همانطور که پیش از این بیان کردیم هدف از این تحقیق ارائه روشی برای بهینه‌سازی توان مصرفی کل در سلولها و کاهش هزینه اپراتورها با رویکرد اقتصادی است. در این حال بهینه‌سازی توان با تضمین سطح کیفیت خدمت به کاربران انجام می‌شود. بنابراین روش ارائه شده می‌تواند با رعایت نکات بالا تشخیص دهد تخصیص چه فناوری به کاربر در هر سلول مناسب است. متغیرهای باینری  $x_{\ell,k,n_g}$  و  $y_{\ell,k,n_g}$  برای اختصاص فناوری OFDMA و Massive MIMO به کاربر به شرح زیر تعریف شده است:

$$x_{\ell,k,n_g} = \begin{cases} 1, & \text{if OFDMA - based RRH allocate } k^{\text{th}} \text{ SC to } n^{\text{th}} \text{ user of } g^{\text{th}} \text{ Slice} \\ 0, & \text{Otherwise} \end{cases}$$

$$y_{\ell,k,n_g} = \begin{cases} 1, & \text{if Massive - based RRH allocate } k^{\text{th}} \text{ SC to } n^{\text{th}} \text{ user of } g^{\text{th}} \text{ Slice} \\ 0, & \text{Otherwise} \end{cases}$$

پهنای باند کل سیستم  $B$  هر تاز و به مجموعه ای از زیر حامل های فرعی  $K = \{1, 2, 3, \dots, K\}$  در هر سلول تقسیم می‌شود. قیود تخصیص انحصاری زیر حامل به هر کاربر می‌تواند به صورت  $C_1$  و  $C_2$  ارائه شود:

$$C_1: \sum_{g \in G} \sum_{n_g \in N_g} x_{\ell,k,n_g} \leq 1, \quad \forall \ell \in L, k \in K. \quad (1)$$

$$C_2: \sum_{g \in G} \sum_{n_g \in N_g} y_{\ell,k,n_g} \leq 1, \quad \forall \ell \in L, k \in K \quad (2)$$

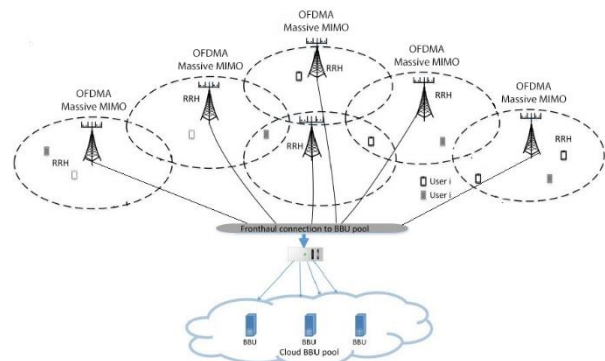
فرض می‌کنیم که هر کاربر حداکثر در هر لحظه بتواند فقط با یک RRH در هر سلول ارتباط برقرار کند بنابراین  $C_3$  نشان می‌دهد که هر کاربر فقط به یک فناوری در هر سلول متصل می‌شود.

$$C_3: \sum_{\ell \in L} \sum_{k \in K} (x_{\ell,k,n_g} + y_{\ell,k,n_g}) \leq 1 \quad \forall n_g \in N_g, g \in G \quad (3)$$

هندسی باند پایین<sup>۱</sup> (GP) آن تبدیل می‌شوند [۴۲]، که می‌تواند با بسته های نرم افزاری بهینه سازی CVX مانند حل شود [۴۳]. در بخش ۳ مدل سیستم و مساله بهینه سازی فرموله شده را برای به حداقل رساندن کل مصرف توان الکتریکی ارائه می‌شود. بخش ۴ الگوریتم تکراری دو مرحله ای را معرفی می‌کند. بخش ۵ نتایج شبیه سازی را نشان می‌دهد و به دنبال آن سخنان پایانی و نتیجه گیری در بخش ۶ ارائه می‌شود.

### ۳. مدل سیستم

در این تحقیق یک مسیر انتقال فراسو در یک شبکه با  $\ell$  سلول و معماری C-RAN با  $G = \{1,2,3,000, G\}$ ، MVNO یا برش مفروض است. هر برش  $g$  شامل  $N_g = \{1,2,3,000, N_g\}$  کاربر تک آنتن می‌باشد، بنابراین  $N = \sum_{g \in G} N_g$  تعداد کل کاربران خواهد بود. در هر سلول دو نوع RRH با فناوری های دسترسی رادیویی OFDMA و Massive MIMO با قیمت های متفاوت متناسب با توان مصرفیشان در نظر گرفته شده است. در این تحقیق فرض بر آن است که توان مصرفی اختصاصی به هر کاربر از طریق Massive MIMO نسبت به OFDMA و در نتیجه هزینه اش بیشتر است. همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود تمام RRHها از طریق یک مسدیر Front-haul با ظرفیت محدود به یک مرکز BBU متصل می‌باشند و برای پشتیبانی از QoS مورد نیاز کاربران خود، حداقل نرخ داده اختصاص داده می‌شود.



شکل ۱. شبکه چند سلولی C-RAN با فناوری دسترسی چندگانه

جدول ۲- جدول نشانه گذاری

نشانه	شرح
$G = \{1,2,3,000, G\}$	مجموعه MVNOها یا برش منابع
$N_g = \{1,2,3,000, N_g\}$	مجموعه تعداد کاربران متعلق به هر MVNO
$K = \{1, 2, 3, \dots, K\}$	مجموعه تعداد زیرحامل ها در هر سلول
$L = \{1,2,3,\dots, \ell\}$	مجموعه تعداد سلول ها

<sup>1</sup> Geometric Programming

هزینه بیشتر یعنی Massive MIMO به کاربر توسط MVNO اختصاص خواهد یافت.

با این راهبرد، تابع مطلوب جدید معادل سود اخذ شده از هر کاربر را به صورت (۱۲) تعریف می کنیم:

$$U_{n_g} = x_{\ell,k,n_g} (R_{\ell,k,n_g}^{OFDMA} - P_{\ell,k,n_g}^{OFDMA} C_{OFDMA}) + y_{\ell,k,n_g} (R_{\ell,k,n_g}^{mMIMO} - P_{\ell,k,n_g}^{mMIMO} C_{mMIMO}) \quad (12)$$

تابع مطلوب فوق مجموع دو عبارت مربوط به دو نوع فناوری است که از طریق متغیرهای باینری  $x_{\ell,k,n_g}$  و  $y_{\ell,k,n_g}$  یکی از آنها به کاربر تخصیص می یابد. هر عبارت در تابع بالا به عنوان سودی است که حاصل درآمد اخذ شده MVNO گام از کاربر  $n_g$  از زیرحامل  $k$  در سلول  $\ell$  است و متناسب با نرخ داده تخصیصی منهای هزینه عملیاتی تخصیصی به کاربر است. فرض کنید  $h_{\ell,k,n_g}$  بهره کانال<sup>۱</sup> و  $h_{\ell,k,n_g} = \phi_{\ell,k,n_g} \sqrt{d_{\ell,n_g}}$  که در آن  $\phi_{\ell,k,n_g}$  ضریب محوشدگی مسیرچندگانه در مقیاس کوچک<sup>۲</sup> کاربر  $n_g$  از MVNO گام از روی زیرحامل  $k$  در یکی از RRHها درون سلول  $\ell$  است و  $d_{\ell,n_g}$  افت توان مقیاس بزرگ<sup>۳</sup> ناشی از افت مسیر<sup>۴</sup> و پدیده سایه<sup>۵</sup> می باشد. نرخ داده با این مفروضات طبق [۲۲] و [۲۴] برای هر کاربر RRH (OFDMA) را می توان به صورت (۱۳) بیان کرد:

$$R_{\ell,k,n_g}^{OFDMA}(\mathbf{P}) = \log_2 \left( 1 + \frac{P_{\ell,k,n_g}^{OFDMA} h_{\ell,k,n_g}}{\sigma^2 + I_{\ell,k,n_g}} \right) \quad (13)$$

$$I_{\ell,k,n_g} = \sum_{g \in G} \sum_{\substack{\ell' \neq \ell \\ n \in N_g \\ n \neq n_g}} P_{\ell',k,n_g} \quad (14)$$

که در آن  $I_{\ell,k,n_g}$  تداخل کاربران سلولهای دیگر با کاربر سلول  $\ell$  می باشد.

با فرض اینکه کانال در گیرنده با خطا تخمین زده شود و یک فیلتر تطابق<sup>۶</sup> در گیرنده داشته باشیم و  $d_{\ell,n_g}$  افت توان مقیاس بزرگ<sup>۷</sup> ناشی از افت مسیر<sup>۸</sup> و پدیده سایه<sup>۹</sup> باشد و همچنین  $M_{\ell,k,n_g}$  تعداد آنتن هایی باشد که از کل آنتن های Massive MIMO به هر به کاربر اختصاص می یابد. براساس این مفروضات و طبق [۳۳] و [۳۴]، نرخ داده هر کاربر (Massive MIMO) RRH را می توان به صورت (۱۵) بیان کرد:

$$R_{\ell,k,n_g}^{mMIMO} = \log_2 (1 + \text{SINR}_{\ell,k,n_g}^{IP}) \quad (15)$$

$$R_{\ell,k,n_g}^{mMIMO} = \log_2 \left( 1 + \frac{\tau P_{\ell,k,n_g}^2 d_{\ell,k,n_g}^2 M_{\ell,k,n_g}}{1 + \tau \sum_{g=1}^G \sum_{\ell'=1}^L \sum_{n_g=1}^{N_g} P_{\ell',k,n_g}^2 d_{\ell',k,n_g}^2 M_{\ell',k,n_g}} \right)$$

$C_5$  و  $C_4$  نشان می دهند هنگامی که زیرحامل  $k$ th با استفاده از یک از RRH از هر کدام از فناوری های OFDMA و Massive MIMO به کاربر  $n_g$  اختصاص می یابد، هیچ زیرحامل دیگری توسط سایر RRH ها به آن کاربر اختصاص داده نمی شود. لذا،

$$C_4: \left[ \sum_{k \in K} x_{\ell,k,n_g} \right] \left[ \sum_{\forall \ell' \neq \ell} \sum_{k \in K} x_{\ell',k,n_g} \right] = 0, \forall n_g \in N_g, g \in G, \ell \in L. \quad (4)$$

$$C_5: \left[ \sum_{k \in K} y_{\ell,k,n_g} \right] \left[ \sum_{\forall \ell' \neq \ell} \sum_{k \in K} y_{\ell',k,n_g} \right] = 0, \forall n_g \in N_g, g \in G, \ell \in L. \quad (5)$$

به دلیل محدودیت توان انتقال هر سلول،  $C_6$  را به صورت زیر داریم که در آن  $P_{\ell,k,n_g}^{\max}$  توان بیشینه انتقال در هر سلول و  $P_{\ell,k,n_g}$  توان اختصاص داده شده به کاربر  $n_g$  از MVNO گام از روی زیرحامل  $k$  توسط یکی از RRHها درون سلول  $\ell$  می باشد:

$$C_6: \sum_{\ell \in L} \sum_{n \in N_g} \sum_{k \in K} P_{\ell,k,n_g} \leq P_{\ell}^{\max}, \forall \ell \in L. \quad (6)$$

با توجه به QoS مورد نیاز هر کاربر، باید حداقل نرخ داده برای هر MVNO در هر سلول رزرو شود، که می تواند با قیود زیر عنوان شوند:

$$C_7: \sum_{\ell \in L} \sum_{k \in K} \sum_{n_g \in N_g} x_{\ell,k,n_g} R_{\ell,k,n_g} \geq R_g^{\min}. \quad (7)$$

$$C_8: \sum_{\ell \in L} \sum_{k \in K} \sum_{n_g \in N_g} y_{\ell,k,n_g} R_{\ell,k,n_g} \geq R_g^{\min}. \quad (8)$$

همچنین، به دلیل محدودیت پهنای باند لینک front-haul، حداقل نرخ داده هر MVNO درون سلول باید کمتر از بیش نه ظرفیت این لینک باشد بنابراین قیود زیر را داریم:

$$C_9: \sum_{\ell \in L} \sum_{k \in K} \sum_{n_g \in N_g} x_{\ell,k,n_g} R_{\ell,k,n_g} \leq R_{FH}^{\max}. \quad (9)$$

$$C_{10}: \sum_{\ell \in L} \sum_{k \in K} \sum_{n_g \in N_g} y_{\ell,k,n_g} R_{\ell,k,n_g} \leq R_{FH}^{\max}. \quad (10)$$

$C_{11}$  قید مربوط به تضمین QoS از نظر تضمین حداقل نرخ داده کاربران است.

$$C_{11}: x_{n_g} R_{n_g}^{OFDMA} + y_{n_g} R_{n_g}^{mMIMO} \geq R_{n_g}^{\min}. \quad (11)$$

برای بیشینه نمودن سود اخذ شده یک MVNO از کاربران خود، ارائه فناوری با هزینه کمتر (OFDMA) به شرط برآورده کردن QoS مورد نیاز کاربر در الویت است در غیر اینصورت فناوری با

<sup>5</sup> Shadowing

<sup>6</sup> Match filter

<sup>7</sup> Large-scale power loss

<sup>8</sup> Path loss

<sup>9</sup> Shadowing

<sup>1</sup> Channel gain

<sup>2</sup> Small-scale multipath fading coefficient

<sup>3</sup> Large-scale power loss

<sup>4</sup> Path loss

**Step 1.B Power Allocation:**

**Initialization for Step 1.B:**

set  $\tau_2 = 0$ ,  $X(\tau_2) = X(\tau)$ ,  $Y(\tau_2) = Y(\tau)$ ,

**Repeat:** set  $\tau_2 = \tau_2 + 1$ .

**Step 1.B.1:**

Update CGP variables according to (۱۷-ب)-(۲۹-ب)،

**Step 1.B.2:**

Solve  $O_2(P(\tau_2))$  for  $P(\tau_2)$  using CVX [۴۳]،

**Until**  $\|P^*(\tau_1) - P^*(\tau_1 - 1)\| \leq \epsilon_3$ ,

set  $P(\tau) = P^*(\tau_2)$ .

**Until**  $\|X^*(\tau) - X^*(\tau - 1)\| \leq \epsilon_1$

$\|Y^*(\tau) - Y^*(\tau - 1)\| \leq \epsilon_2$

and  $\|P^*(\tau) - P^*(\tau - 1)\| \leq \epsilon_3$ .

**۴. الگوریتم حل مساله بهینه‌سازی**

برای غلبه بر پیچیدگی محاسباتی حل مساله بهینه‌سازی (۲۰)، ما با استفاده از برنامه نویسی هندسی مکمل (CGP) و تقریب محدب متوالی (SCA)، یک الگوریتم تکرارشونده را با هدف یافتن پارامترهای انتخاب فناوری و توان مصرفی برای هر کاربر به ترتیب در دو مرحله اعمال می‌کنیم. در هر تکرار  $t$ ، در مرحله ۱ با یک بردار تخصیص توان اختصاص داده شده (ثابت)، بردارهای  $X$  و  $Y$  بهینه را به عنوان متغیر زیر مساله انتخاب فناوری از الگوریتم بدست می‌آوریم. سپس، بر اساس مقادیر بدست آمده از مرحله ۱، زیر مساله تخصیص توان بر اساس مقدار بردارهای  $X$  و  $Y$  به دست آمده از مرحله 1، حل می‌شود. توالی جواب‌های بردار تخصیص  $X$  و  $Y$  و  $P$  را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$X(0), Y(0) \rightarrow P(0)$   
Initialization ...  $X^*(t), Y^*(t) \rightarrow P^*(t)$

Iteration  $\tau$   $X^*, Y^* \rightarrow P^*$

که  $t \geq 0$  شاخص تکرار است و  $X^*(t), Y^*(t)$  و  $P^*(t)$  مقادیر بهینه به دست آمده در تکرار  $t$  و از تبدیل محدب و تقریب مسائل بهینه سازی مربوطه هر مرحله بدست می‌آیند. بدین منظور پس از هر مرحله موارد زیر محاسبه می‌شوند:

$$\|X^*(t) - X^*(t-1)\| \leq \epsilon_1, \|Y^*(t) - Y^*(t-1)\| \leq \epsilon_2,$$

$$\|P^*(t) - P^*(t-1)\| \leq \epsilon_3$$

که اگر ملاک‌های همگرایی بالا برای مقادیر کوچک زیر برآورده شوند اجرای تکرار الگوریتم متوقف خواهد شد.

$$0 < \epsilon_1 \ll 1, 0 < \epsilon_2 \ll 1, 0 < \epsilon_3 \ll 1$$

هر دو زیر مساله بدست آمده یعنی زیرمساله‌های انتخاب فناوری و تخصیص توان هنوز با توجه به وجود متغیرهای باینری و روابط غیر هنوز غیر محدب بوده و از پیچیدگی محاسباتی نسبی برخوردار هستند. برای حل کارآمد زیرمساله‌ها، برای زیرمساله تخصیص فناوری متغیرهای باینری را در آنها بی‌اثر کرده و برای زیرمساله

$$(16)$$

هزینه عملیاتی برای اختصاص توان به هر یک از فناوری‌ها  $C^{OFDMA}$  و  $C^{mMIMO}$  تعریف می‌شود که هر MVNO به MNO پرداخت می‌کند.

$$U_g = \sum_{\ell \in L} \sum_{k \in K} \sum_{n_g \in N_g} U_{n_g} \quad (17)$$

تابع مطلوب یعنی مجموع سود MVNO گام  $U$  تابع مطلوب مجموع سود MNO به شرح زیر تعریف می‌شود:

$$U = \sum_{g \in G} U_g \quad (18)$$

بیشینه کردن تابع مطلوب MNO به شرح زیر بیان می‌شود:

$$\max_{x,y,p} \sum_{g \in G} \sum_{\ell \in L} \sum_{k \in K} \sum_{n_g \in N_g} U_{n_g} \quad (19)$$

با جایگذاری (۱۲) در (۱۹) و در نظر گرفتن قیود (۱) تا (۱۱)، مسئله بهینه سازی در این مدل سیستم را می‌توان به صورت (۲۰) نوشت:

$$\max_{x,y,p} \sum_{g \in G} \sum_{\ell \in L} \sum_{k \in K} \sum_{n_g \in N_g} \left[ X_{\ell,k,n_g} \left( R_{\ell,k,n_g}^{OFDMA} - P_{\ell,k,n_g}^{OFDMA} C^{OFDMA} \right) + Y_{\ell,k,n_g} \left( R_{\ell,k,n_g}^{Mass} - P_{\ell,k,n_g}^{Mass} C^{Mass} \right) \right] \quad (20)$$

s.t.  $C_1 - C_{12}$

رابطه (۲۰) به دلیل تداخل بین سلولی در روابط نرخ داده (۱۳) و (۱۶) و وجود متغیرهای باینری  $X_{\ell,k,n_g}$  و  $Y_{\ell,k,n_g}$  و روابط لگاریتمی (غیر خطی) یک مساله بهینه سازی غیر محدب و  $NP^1$  سخت با پیچیدگی محاسباتی بالا است [۳۸].

پس از فرمول‌بندی مساله و رسیدن به (۲۰) که با ارائه روابط ریاضیاتی فوق انجام شد، در بخش بعدی مقاله سراغ روش پیشنهادی برای حل این مساله می‌رویم.

جدول - ۲

الگوریتم شماره I- الگوریتم تکرارشونده برای اختصاص فناوری دسترسی و توان الکتریکی

**Initialization:** Set  $\tau = 0$ ,  $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_3 = 10^{-3}$ ,

$P(\tau = 0) = P^{\max}/K$ .

**Repeat:** set  $\tau = \tau + 1$

**Step 1.A Technology selection parameters :**

**Initialization for Step 1.A:**

set  $\tau_1 = 0$ ,  $V(\tau_1) = V(\tau)$ ,

$P(\tau_1) = P(\tau)$  and set arbitrary initial for  $q_k, n(\tau_1)$ .

**Repeat:** set  $\tau_1 = \tau_1 + 1$ .

**Step 1.A.1:**

Update CGP variables according to (الف-۲۸)-(الف-۱۷)،

**Step 1.A.2:**

Solve  $O_1(V(\tau_1))$  in (22) for

$X(\tau_1)$  and  $Y(\tau_1)$  using CVX [43]،

**Until**  $\|X^*(\tau_1) - X^*(\tau_1 - 1)\| \leq \epsilon_1$

and  $\|Y^*(\tau_1) - Y^*(\tau_1 - 1)\| \leq \epsilon_2$  . set

$X(\tau) = X^*(\tau_1)$ ,  $Y(\tau) = Y^*(\tau_1)$ ,

<sup>1</sup> Non-deterministic polynomial-time(NP)- Hard Problem

## ۲.۴. مرحله ۲: زیر مساله تخصیص توان

برای مقادیر ثابت  $X$  و  $Y$  به دست آمده از مرحله ۱، مساله بهینه سازی به مساله تخصیص توان (۲۳) تبدیل می شود.

$$\max_P \bar{U}(X, Y, P) \quad (23)$$

$$s.t. C_6, \bar{C}_{7,1}, \bar{C}_{8,1}, \bar{C}_{9,1}, \bar{C}_{10,1}, \bar{C}_{11,1}, \bar{C}_{12}$$

از نظر محاسباتی (۲۳) نسبت به (۲۰) دارای پیچیدگی کمتری دارد زیرا فقط شامل متغیر  $P$  می باشد لیکن به دلیل وجود پدیده تداخل و عبارات لگاریتمی در فرمول نرخ داده و وابستگی آن به متغیر  $P$  در (۱۳) و (۱۶)، این بخش از مساله هم مساله بهینه سازی غیر محدب و غیرخطی است. بنابراین در مرحله ۲، ابتدا ما با استفاده از تقریب DC روابط غیرخطی نرخ داده در (الف-۱) یعنی  $(R_{\ell,k,n_g}^{Mass}(P_{\ell,k,n_g}^{Mass}(t_2)))$  و  $(R_{\ell,k,n_g}^{OFDMA}(P_{\ell,k,n_g}^{OFDMA}(t_2)))$  به روابط خطی تقریب می زنیم و به (ب-۲) میرسیم. سپس دوباره تقریب AGMA مشابه مرحله ۱ را بر (ب-۲) برای تبدیل تابع هدف و قیود  $C_7, C_8, C_9, C_{10}, C_{11}, C_{12}$  به شکل استاندارد GP اعمال می کنیم. با در نظر گرفتن متغیر کمکی مثبت  $\omega_1(t_2) > 0$  و یک ثابت به اندازه کافی بزرگ  $1 \gg \Psi_2$  تابع هدف (۲۳) در هر تکرار  $t_2$  را می توان به شکل استاندارد GP به صورت (۲۴) زیر تبدیل کرد:

$$O_2(P(t_2)) : \min_{P(t_2)} \omega_1(t_2) \quad (24)$$

$$s.t. \bar{C}_0, C_6, \bar{C}_{7,1}, \bar{C}_{8,1}, \bar{C}_{9,1}, \bar{C}_{10,1}, \bar{C}_{11,1}, \bar{C}_{12}$$

مساله (۲۴) تحت قیود اشاره شده در پیوست بایستی بهینه گردد. (برای مشاهده تابع اصلی هدف و قیود آن در زیر مساله تخصیص توان همچنین اثبات آنها به روابط پیوست ب مراجعه شود (ب-۱) تا (ب-۲۹)).

در بخش بعد نتایج الگوریتم پیشنهادی ارائه و ارزیابی خواهند شد.

## ۵. نتایج شبیه سازی الگوریتم پیشنهادی

در این بخش نتایج عملی استخراج شده از شبیه سازی مدل سیستم و انجام روش حل مساله بهینه سازی پیشنهادی در بخش قبل و در محیط نرم افزار Matlab و با استفاده از ماژول CVX ارائه شده است. برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی از طریق نتایج شبیه سازی، مطابق مدل سیستم مفروض ما یک شبکه با معماری C-RAN چند سلولی با تعداد سلول  $\ell = 4$  را در داخل منطقه ای با ابعاد  $1 \times 1 \text{ km}^2$  در نظر می گیریم. هریک از سلولها دارای دو نوع فناوری RRH شامل OFDMA و Massive MIMO متصل به یک BBU واحد می باشند. هریک از فناوریهای Massive MIMO شامل  $M = 200$  آنتن می باشند. تعداد کاربران  $N_G = 20$  در بین برشها به تعداد  $G = 2$  فرض شده اند که به

تخصیص توان از طریق روش DC [۴۲] روابط لگاریتمی به روابط خطی تقریب زده می شوند و با استفاده از روش CGP [۴۱]، برای هر مرحله، ما زیرمساله های غیر محدب را به شکل استاندارد GP با کران پایین تبدیل می کنیم. مراحل حل زیر مساله ها از قرار زیر می باشند:

## ۱.۴. مرحله ۱: زیر مساله انتخاب فناوری

در هر تکرار  $t$ ، با مقدار پیش فرض ثابت  $P(t-1)$  در این مرحله، متغیرهای بهینه سازی  $X$  و  $Y$  خواهند بود و  $t_1$  به عنوان شاخص تکرار در مرحله ۱ می باشد، از این رو (۲۰) به (۲۱) تبدیل خواهد شد:

$$\max_{X,Y} \bar{U}(X, Y, P(t-1)) \quad (21)$$

$$s.t. C_1, C_2, C_3, \bar{C}_4, \bar{C}_5, C_7-C_{12}$$

این مساله پیچیدگی محاسباتی کمتری نسبت به مساله اصلی دارد. با این حال، به دلیل متغیرهای باینری، مساله بهینه سازی هنوز غیر محدب است. بنابراین برای حل کارآمد این مساله بهینه سازی، مساله (۲۱) را به شکل استاندارد GP تبدیل می کنیم. برای این منظور، ابتدا متغیرهای باینری  $X_{\ell,k,n_g}$  و  $Y_{\ell,k,n_g}$  را بی اثر می کنیم تا در بازه  $[0, 1]$  پیوسته باشند. سپس روش AGMA را برای تبدیل رابطه فوق به شکل استاندارد GP اعمال می کنیم. برای فرمول بندی به شکل استاندارد GP، تابع هدف و قیود نامعادله به صورت توابع چندجمله ای و قیود معادله به صورت توابع تک جمله ای می باشند. برای رسیدن به فرمول بندی به شکل استاندارد GP، ما با تعریف متغیرهای کمکی مثبت  $\bar{\omega}_0(t_1)$  و در نظر گرفتن  $1 \gg \Psi_1$  به عنوان یک ثابت به اندازه کافی بزرگ به توابع تک جمله ای تبدیل می کنیم. سپس قیود  $C_4$  و  $C_5$  را به معادله تک جمله ای و نامعادله چندجمله ای تقریب خواهیم زد.

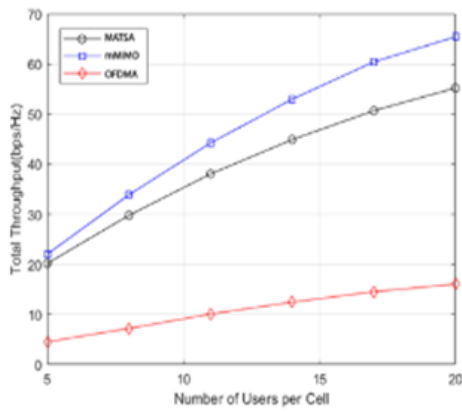
با در نظر گرفتن  $C, B, w, A, z, D$  به عنوان بردارهای متغیرهای  $C_{\ell,n_g}, w_{\ell,n_g}, B_{n_g}, A_{\ell,n_g}, z_{\ell,n_g}, D_{n_g}$  برای تمام  $\ell \in L$  و  $n_g \in N_g$  و  $v(t_1) = \{X(t_1), \bar{\omega}_0(t_1), z(t_1), A(t_1), B(t_1), w(t_1), C(t_1), D(t_1), Y(t_1)\}$  در هر تکرار  $t_1$  با تقریب GP تابع هدف و قیود مساله از (۲۱) به (۲۲) تبدیل خواهد شد [۳۸]:

$$O_1(v(t_1)) : \min_{v(t_1)} \bar{\omega}_0(t_1) \quad (22)$$

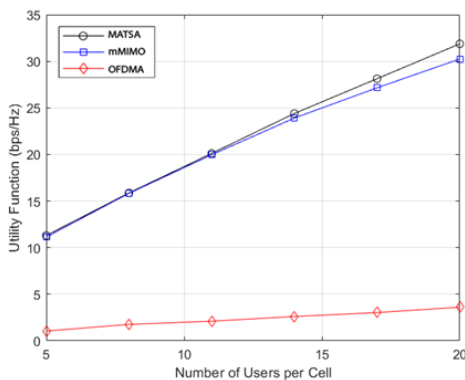
$s.t. C_0, C_1, C_2, C_3, \bar{C}_4: C_{4-1} - C_{4-4}, \bar{C}_5: C_{5-1} - C_{5-4}, C_7 - C_{12}$  (برای مشاهده عبارت کامل تابع هدف و قیود آن در زیر مساله انتخاب فناوری همچنین اثبات آنها به روابط پیوست الف مراجعه شود (الف-۱) تا (الف-۲۸)).

حال که مساله بهینه سازی مرحله اول را حل کردیم، سراغ مرحله دوم برای بحث تخصیص توان الکتریکی می رویم.





شکل (۳) مقدار پهنای باند عملیاتی کل به ازای تعداد کاربران در سلول



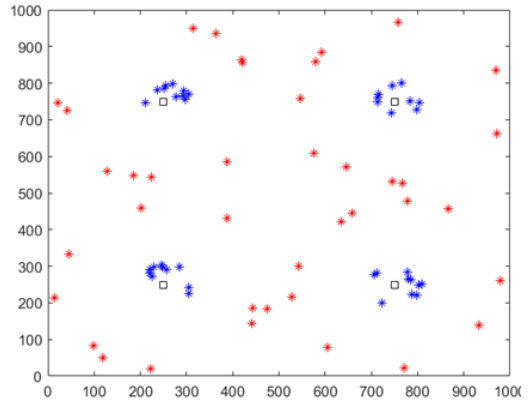
شکل (۴) مقدار تابع مطلوب پیشنهادی به ازای تعداد کاربران در هر سلول

در این مرحله از شبیه سازی مقادیر ضریب هزینه پردازش OFDMA و mMIMO به ترتیب  $C^{\text{OFDMA}} = 1$  و  $C^{\text{mMIMO}} = 4$  در نظر گرفته شده است.

همانطور که در شکل ۳، مشاهده می شود اگرچه mMIMO می تواند نرخ داده بیشتری را در مقایسه با روش پیشنهادی و OFDMA ارائه نماید، لیکن با توجه به نمودار تابع مطلوب در شکل ۴، این مقدار برای MATSA برای تعداد کاربران بیشتر نسبت به فناوری mMIMO عملکرد بهتری دارد.

با حل مدل بهینه سازی و برای به حداکثر رساندن تابع هدف (مطلوب)، براساس جواب های بدست آمده بهینه سازی، فناوری mMIMO را به کاربران داخل سلول یا Kint و فناوری OFDMA را به کاربران لبه یا Kege اختصاص می دهد. علت این امر را می توان اینگونه توجیه نمود که با افزایش تداخل بین کاربران Kege به دلیل افزایش تعداد آنها در لبه سلول و همچنین افت مسدیر آنها، تخصیص mMIMO به دلیل هزینه بالای این فناوری، مزیت نرخ داده خود را تا حدودی از بین می برد، بنابراین، راه حل بهینه سازی برای کاهش هزینه، OFDMA را به کاربران لبه یعنی Kege اختصاص می دهد.

طور تصادفی در این منطقه قرار دارند. ما همچنین فرض می کنیم که پهنای باند کل به ۳ زیر حامل تقسیم شده است (برای جلوگیری از تداخل بین کاربران Massive MIMO و OFDMA، اولین زیرحامل برای OFDMA رزرو خواهد شد) و حداکثر توان الکتریکی ( $P_{\text{max}} = 23 \text{ dBm}$ ) می باشد.



شکل (۲). موقعیت مکانی کاربران Kint (علامت آبی) و Kege (علامت قرمز) در منطقه  $1 \times 1$  کیلومتر مربع در کنار RRHها با علامت سیاه نمایش داده شده اند.

بهره کانال بین کاربر  $n_g \in N_G$  از MVNO،  $g$  و بروی زیرحامل  $k$  و RRH درون سلول  $l$  بصورت  $h_{l,k,n_g}$  مدل شده است بطوری که ضریب محوشدگی چند مسیره در مقیاس کوچک کاربر  $n_g$  از MVNO،  $g$  در زیرحامل،  $k$  و یک RRH داخل سلول  $l$  است و  $d_{l,n_g}$  نشان دهنده اتلاف توان در مقیاس بزرگ به دلیل افت مسیره و پدیده سایه از کاربر  $n_g$  از MVNO،  $g$  به یک RRH درون سلول  $l$  می باشد. برای همه شبیه سازی ها،  $\Psi_1 = 10^7$ ،  $\Psi_2 = 10^7$  و  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3 = 10^{-2}$  تنظیم می کنیم.

برای نشان دادن تأثیر رویکرد پیشنهادی خود، ما بدترین حالت را در نظر می گیریم همان طوری که در شکل ۲ نشان داده شده است کاربران  $k$  را در هر سلول به دو دسته در نظر می گیریم، دسته اول کاربران Kint (علامت آبی) نام گذاری شده اند که در نزدیکی RRHها (علامت سیاه) و با تداخل داخل سلولی کمتر قرار دارند و دسته دوم کاربران واقع شده در لبه های سلول به نام Kege (علامت قرمز) می باشند که با تداخل داخل سلولی بیشتر می باشند.

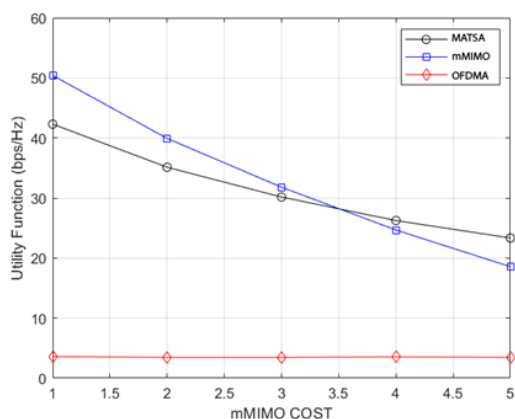
در شکل ۳ و ۴، به ترتیب مقدار پهنای باند عملیاتی کل و تابع مطلوب پیشنهادی به ازای مقادیر مختلف تعداد کاربران در هر سلول برای روش پیشنهادی (MATSA) و هریک از فناوری های مفروض در مساله یعنی نشان داده شده است.

شکل ۵ (ب) نشان داده شده است با افزایش هزینه mMIMO، قطع این کاربران (خط آبی) به تدریج و با تاخیر بیشتری نسبت به سناریوی اول اتفاق می افتد.

همانطور که انتظار می رفت، با مقایسه نتایج دو سناریو، می توان نتیجه گرفت که روش پیشنهادی ما (MATSA) به دلیل انعطاف پذیری در انتخاب فناوری دسترسی، احتمال قطع کمتری را دارد.

در شکل ۶، ما با ارائه مقدار تابع مطلوب برای مقادیر مختلف mMIMO، اثرات مقادیر هزینه پردازش را بر عملکرد سیستم ارزیابی می کنیم.

همانطور که در شکل ۶ مشاهده می شود، برای مقادیر کم mMIMO، mMIMO در مقایسه با MATSA حداکثر ۱۶٪ در تابع مطلوب بهبود می یابد، در همین حال با افزایش مقدار این پارامتر تا ۵، MATSA عملکردی تا ۱۳٪ بهتر در مقایسه با mMIMO داشته است. این بدان معناست که وقتی کاربران در لبه سلول به صورت تراکم و انبوه قرار گیرند (سناریوی اول)، وقتی C<sup>mMIMO</sup> افزایش می یابد، با در نظر گرفتن نرخ داده و هزینه پردازش، OFDMA و Massive MIMO به تنهایی برای تمام شرایط مناسب نخواهند بود.



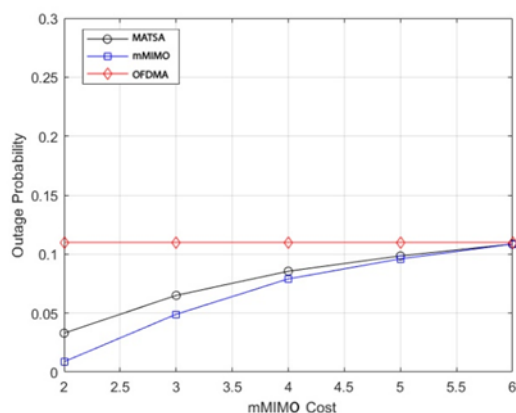
شکل (۶): مقدار تابع سودمندی برای مقادیر مختلف هزینه mMIMO

## ۶. جمع بندی و نتیجه گیری

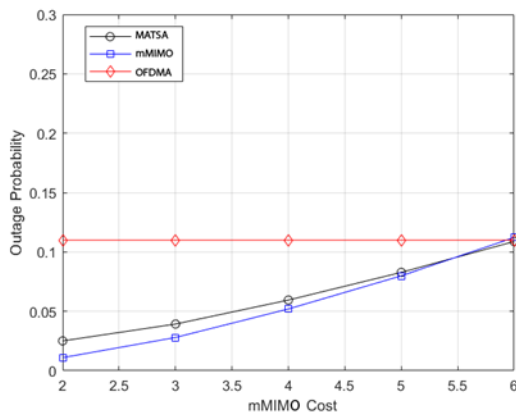
در این مقاله، ما مساله بهینه سازی تخصیص توان را در یک RAN چند سلولی فراسو چند مستاجر از منظر اقتصادی بررسی کردیم. در پیشنهاد ما، روش جدیدی را معرفی می کنیم که می تواند برای هر کاربر از MVNOها، فناوری مناسب (mMIMO) یا OFDMA را بر اساس محل قرارگیری آنها در هر سلول انتخاب کند تا هزینه مصرف BBUها را به حداقل برساند و بنابراین سود MVNO را با توجه به تابع مطلوب به حداکثر برساند. در این تحقیق ما یک تابع مطلوب جدید تعریف می کنیم و این مساله را به صورت یک مساله انتخاب فناوری و بهینه سازی تخصیص توان الکتریکی فرموله می کنیم به طوری که همواره تأمین حداقل نرخ مورد نیاز هر کاربر باید تضمین شود.

این واقعیت را می توان در شکل ۴ مشاهده کرد به طوری که وقتی تعداد کاربران برابر با ۲۰ عدد باشد، عملکرد پیشنهادی ما تقریباً ۶٪ بیشتر از mMIMO خواهد بود.

ما تابع احتمال قطع را به صورت نسبت تعداد کاربرانی که میزان آنها کمتر از حداقل نرخ مورد نیاز است به کل کاربران تعریف می کنیم. این معیار عملکرد در دو سناریو جداگانه مورد مطالعه قرار گرفته است و در شکل ۵ (الف) و (ب) نتایج آن نمایش داده شده است. در سناریوی اول، ما در نظر می گیریم کاربران لبه حداکثر و حداقل فاصله شان به هم نزدیک است و بنابراین به طور متراکم در لبه سلول قرار دارند. با افزایش میزان هزینه mMIMO، این کاربران هزینه اضافی به سیستم تحمیل می کنند.



شکل (۵) (الف): احتمال قطع شدن کاربران در لبه سلول با تراکم حضور بالا



شکل (۵) (ب): احتمال قطع شدن کاربران لبه با تراکم حضور کم

و بنابراین مسئله بهینه سازی برای کاهش هزینه و توان الکتریکی مصرفی سیستم شروع به ریزش کاربران می کند. به دلیل شرایط نامناسب کلنال و تداخل داخل سلولی، این کاربران نرخ پایینی خواهند داشت، بنابراین از آنجا که میزان کاربران با توان الکتریکی ارتباط مستقیم دارد، نرخ داده تعداد زیادی از کاربران به سرعت از حداقل نرخ پایین می آید و همانطور که در شکل ۵ (الف) نشان داده شده است این کاربران (خط آبی) زود خارج می شوند. اما در سناریوی دوم، حداقل و حداکثر فواصل برای کاربران با توزیع یکنواخت تفاوت قابل توجهی با یکدیگر دارند و همانطور که در

- C. (2014). Heterogeneous cloud radio access networks: A new perspective for enhancing spectral and energy efficiencies. *IEEE wireless communications*, 21(6), 126-135.
- [9] Peng, M., Zhang, K., Jiang, J., Wang, J., & Wang, W. (2014). Energy-efficient resource assignment and power allocation in heterogeneous cloud radio access networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 64(11), 5275-5287.
- [10] Kitindi, E. J., Fu, S., Jia, Y., Kabir, A., & Wang, Y. (2017). Wireless network virtualization with SDN and C-RAN for 5G networks: Requirements, opportunities, and challenges. *IEEE Access*, 5, 19099-19115.
- [11] Topoloi, S. G., & Borcoci, E. (2018, June). Software Defined Networking and Network Function Virtualisation Cooperation-Experiments. In 2018 International Conference on Communications (COMM) (pp. 281-286). IEEE.
- [12] Chartsias, P. K., Amiras, A., Plevrakis, I., Samaras, I., Katsaros, K., Kritharidis, D., & Escalona, E. (2017, June). SDN/NFV-based end to end network slicing for 5G multi-tenant networks. In 2017 European Conference on Networks and Communications (EuCNC) (pp. 1-5). IEEE .
- [13] Marzouk, F., Barraca, J. P., & Radwan, A. (2020). On Energy Efficient Resource Allocation in Shared RANs: Survey and Qualitative Analysis. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 22(3), 1515-1538.
- [14] Oladejo, S. O., & Falowo, O. E. (2017, October). 5G network slicing: A multi-tenancy scenario. In 2017 Global Wireless Summit (GWS) (pp. 88-92). IEEE.
- [15] Björnson, E., Hoydis, J., & Sanguinetti, L. (2017). Massive MIMO networks: Spectral, energy, and hardware efficiency. *Foundations and Trends in Signal*

مساله بهینه سازی فرموله شده اشاره شده بالا یک مساله غیر محدب و NP سخت با پیچیدگی محاسباتی بالا است، بنابراین برای حل این مساله، با استفاده از الگوریتم های برنامه نویسی DC، CGP و SCA، یک الگوریتم تکراری دو مرحله ای پیشنهاد می نمایم. نتایج شبیه سازی نشان می دهد از طریق روش انتخاب فناوری با توجه به محل قرارگیری کاربران و با فرض تضمین تامین حداقل نرخ داده و حداکثر تاخیر مجاز، با افزایش تعداد کاربران، اپراتورهای MVNO می توانند از سودمندی و احتمال قطعی کمتری برخوردار باشند.

## مراجع

- [1] Cisco public (2020). Cisco Annual Internet Report (2018–2023). Available: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.pdf>
- [2] ITU-R M.2370-0 (2015). IMT traffic estimates for the years 2020 to 2030, [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2370-2015-PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2370-2015-PDF-E.pdf).
- [3] impacts-5g-productivity-economic-growth, <https://www.communications.gov.au/publications/impacts-5g-productivity-and-economic-growth>.
- [4] Wu, Q., Li, G. Y., Chen, W., Ng, D. W. K., & Schober, R. (2017). An overview of sustainable green 5G networks. *IEEE Wireless Communications*, 24(4), 72-80.
- [5] Peng, M., Sun, Y., Li, X., Mao, Z., & Wang, C. (2016). Recent advances in cloud radio access networks: System architectures, key techniques, and open issues. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(3), 2282-2308.
- [6] Wu, J., Zhang, Z., Hong, Y., & Wen, Y. (2015). Cloud radio access network (C-RAN): a primer. *IEEE network*, 29(1), 35-41.
- [7] Peng, M., Li, Y., Zhao, Z., & Wang, C. (2015). System architecture and key technologies for 5G heterogeneous cloud radio access networks. *IEEE network*, 29(2), 6-14.
- [8] Peng, M., Li, Y., Jiang, J., Li, J., & Wang,

- Conference on Networks and Communications (EuCNC) (pp. 169-174). IEEE.
- [24] Yu, N., Song, Z., Du, H., Huang, H., & Jia, X. (2017). Dynamic resource provisioning for energy efficient cloud radio access networks. *IEEE Transactions on Cloud Computing*, 7(4), 964-974.
- [25] Tang, J., Tay, W. P., Quek, T. Q., & Liang, B. (2017). System cost minimization in cloud RAN with limited fronthaul capacity. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 16(5), 3371-3384.
- [26] Zhao, W., & Wang, S. (2016, May). Remote radio head selection for power saving in cloud radio access networks. In *2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)* (pp. 1-5). IEEE.
- [27] Ye, J., & Zhang, Y. J. (2019). Pricing-based resource allocation in virtualized cloud radio access networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(7), 7096-7107.
- [28] Wang, G., Feng, G., Tan, W., Qin, S., Wen, R., & Sun, S. (2017, December). Resource allocation for network slices in 5G with network resource pricing. In *GLOBECOM 2017-2017 IEEE Global Communications Conference* (pp. 1-6). IEEE.
- [29] Jiang, M., Condoluci, M., & Mahmoodi, T. (2017, May). Network slicing in 5G: An auction-based model. In *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)* (pp. 1-6). IEEE.
- [30] Morcos, M., Chahed, T., Chen, L., Elias, J., & Martignon, F. (2018). A two-level auction for resource allocation in multi-tenant C-RAN. *Computer Networks*, 135, 240-252.
- [31] Parsaeefard, S., Dawadi, R., Derakhshani, M., & Le-Ngoc, T. (2016). Joint user-association and resource-allocation in virtualized wireless networks. *IEEE Access*, Processing, 11(3-4), 154-655.
- [16] Wang, L., Wong, K. K., ElKashlan, M., Nallanathan, A., & Lambbotharan, S. (2016). Secrecy and energy efficiency in massive MIMO aided heterogeneous C-RAN: A new look at interference. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 10(8), 1375-1389.
- [17] Zhou, F., Wu, Y., Hu, R. Q., Wang, Y., & Wong, K. K. (2018). Energy-efficient NOMA enabled heterogeneous cloud radio access networks. *IEEE Network*, 32(2), 152-160.
- [18] Al-Abbasi, Z. Q., Rabie, K., & So, D. K. C. (2021). EE Optimization for Downlink NOMA-based Multi-Tier CRANs. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*.
- [19] Schneir, J. R., Konstantinou, K., Bradford, J., Zimmermann, G., Droste, H., Palancar, R. C., & Ajibulu, A. (2020). Cost assessment of multi-tenancy for a 5G broadband network in a dense urban area. *Digital Policy, Regulation and Governance* .
- [20] Schneir, J. R., Konstantinou, K., Bradford, J., Zimmermann, G., Droste, H., Canto, R., & Ajibulu, A. (2017). Cost analysis of a 5G network with Multi-Tenancy options.
- [21] Luo, J., Chen, Q., & Tang, L. (2018). Reducing power consumption by joint sleeping strategy and power control in delay-aware C-RAN. *IEEE Access*, 6, 14655-14667.
- [22] Amani, N., Pedram, H., Taheri, H., & Parsaeefard, S. (2018). Energy-efficient resource allocation in heterogeneous cloud radio access networks via BBU offloading. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(2), 1365-1377.
- [23] Khan, M., Alhumaima, R. S., & Al-Raweshidy, H. S. (2015, June). Reducing energy consumption by dynamic resource allocation in C-RAN. In *2015 European*

- [35] Tuy, H. (1995). DC optimization: theory, methods and algorithms. In Handbook of global optimization (pp. 149-216). Springer, Boston, MA.
- [36] Grant, M. and Boyd, S. (2017). CVX: MATLAB software for disciplined convex programming, in Version 2.1. <http://cvxr.com/cvx>.
- 4, 2738-2750.
- [32] Chiang, M. (2005). Geometric programming for communication systems. Now Publishers Inc.
- [33] Chiang, M., Tan, C. W., Palomar, D. P., O'Neill, D., & Julian, D. (2007). Power control by geometric programming. IEEE transactions on wireless communications, 6(7), 2640-2651.
- [34] Xu, G. (2014). Global optimization of signomial geometric programming problems. European journal of operational research, 233(3), 500-510.

### پیوست الف

برای تبدیل زیرمساله (۲۱) به شکل استاندارد GP، ما ابتدا تابع بیشینه هدف (الف-۱) را به صورت تابع کمینه هدف (الف-۲) به صورت زیر بازنویسی می کنیم:

$$\max_{\mathbf{X}, \mathbf{Y}} \sum_{g \in G} \sum_{\ell \in L} \sum_{k \in K} \sum_{n_g \in N_g} \left[ x_{\ell, k, n_g}(t_1) R_{\ell, k, n_g}^{\text{OFDMA}} - x_{\ell, k, n_g}(t_1) P_{\ell, k, n_g}^{\text{OFDMA}}(t-1) C^{\text{OFDMA}} + y_{\ell, k, n_g}(t_1) R_{\ell, k, n_g}^{\text{mMIMO}} - y_{\ell, k, n_g}(t_1) P_{\ell, k, n_g}^{\text{mMIMO}}(t-1) C^{\text{mMIMO}} \right] \quad (\text{الف-۱})$$

$$\text{s.t. } C_1, C_2, C_3, \tilde{C}_4, \tilde{C}_5, C_7 - C_{12}$$

$$\min_{\mathbf{x}, \mathbf{y}} \sum_{g \in G} \sum_{\ell \in L} \sum_{k \in K} \sum_{n_g \in N_g} \left[ x_{\ell, k, n_g}(t_1) P_{\ell, k, n_g}^{\text{OFDMA}}(t-1) C^{\text{OFDMA}} + y_{\ell, k, n_g}(t_1) P_{\ell, k, n_g}^{\text{mMIMO}}(t-1) C^{\text{mMIMO}} - x_{\ell, k, n_g}(t_1) R_{\ell, k, n_g}^{\text{OFDMA}}(t_1) - y_{\ell, k, n_g}(t_1) R_{\ell, k, n_g}^{\text{mMIMO}}(t_1) \right] \quad (\text{الف-۲})$$

با توجه به عبارات منفی در (الف-۲)، برای تأمین شرایط مثبت تابع هدف در GP، ما متغیر کمکی مثبت  $\bar{\omega}_0(t_1)$  و  $\Psi_1 \gg 1$  را به عنوان یک ثابت به اندازه کافی بزرگ در نظر می گیریم و قید زیر که همیشه مثبت است تعریف می کنیم:

$$\tilde{C}_0: \frac{\Psi_2 + \sum_{g \in G} \sum_{\ell \in L} \sum_{k \in K} \sum_{n_g \in N_g} \left[ x_{\ell, k, n_g}(t_1) P_{\ell, k, n_g}^{\text{OFDMA}}(t-1) C^{\text{OFDMA}} + y_{\ell, k, n_g}(t_1) P_{\ell, k, n_g}^{\text{mMIMO}}(t-1) C^{\text{mMIMO}} \right]}{\bar{\omega}_0(t_1) + \sum_{g \in G} \sum_{\ell \in L} \sum_{k \in K} \sum_{n_g \in N_g} \left[ x_{\ell, k, n_g}(t_1) R_{\ell, k, n_g}^{\text{OFDMA}}(t_1) + y_{\ell, k, n_g}(t_1) R_{\ell, k, n_g}^{\text{mMIMO}}(t_1) \right]} \leq 1 \quad (\text{الف-۳})$$

اکنون، با استفاده از تقریب AGMA، (الف-۳) به (الف-۴) تبدیل می شود:

$$C_0: \left[ \Psi_1 + \sum_{g \in G} \sum_{\ell \in L} \sum_{k \in K} \sum_{n_g \in N_g} \left[ x_{\ell, k, n_g}(t_1) P_{\ell, k, n_g}^{\text{OFDMA}}(t-1) C^{\text{OFDMA}} + y_{\ell, k, n_g}(t_1) P_{\ell, k, n_g}^{\text{mMIMO}}(t-1) C^{\text{mMIMO}} \right] \right] \times \left( \frac{\bar{\omega}_0(t_1)}{\chi(t_1)} \right)^{-\chi(t_1)} \\ \times \prod_{g \in G, \ell \in L, k \in K, n_g \in N_g} \left( \frac{x_{\ell, k, n_g}(t_1) R_{\ell, k, n_g}^{\text{OFDMA}}(P_{\ell, k, n_g}^{\text{OFDMA}}(t-1))}{\epsilon_{\ell, k, n_g}(t_1)} \right)^{-\epsilon_{\ell, k, n_g}(t_1)} \\ \times \prod_{g \in G, \ell \in L, k \in K, n_g \in N_g} \left( \frac{y_{\ell, k, n_g}(t_1) R_{\ell, k, n_g}^{\text{mMIMO}}(P_{\ell, k, n_g}^{\text{mMIMO}}(t-1))}{\theta_{\ell, k, n_g}(t_1)} \right)^{-\theta_{\ell, k, n_g}(t_1)} \leq 1 \quad (\text{الف-۴})$$

متغیرهای زیر را در نظر می گیریم:  $\tilde{C}_5$  و  $\tilde{C}_4$  برای رسیدن به

$$A_{\ell, n_g}(t_1) = \sum_{v \in K} x_{v, \ell, n_g}(t_1) \quad (\text{الف-۵})$$

$$B_{n_g}(t_1) = \sum_{v \in L} \sum_{k \in K} x_{v, k, n_g}(t_1) \quad (\text{الف-۶})$$

$$C_{\ell, n_g}(t_1) = \sum_{v \in K} y_{v, \ell, n_g}(t_1) \quad (\text{الف-۷})$$

$$D_{n_g}(t_1) = \sum_{v \in L} \sum_{k \in K} y_{v, k, n_g}(t_1) \quad (\text{الف-۸})$$

$$\tilde{C}_4:$$

$$C_{4-1}: z_{\ell,n_g}^{-1}(t_1) + A_{\ell,n_g}(t_1)B_{n_g}(t_1)z_{\ell,n_g}^{-1}(t_1) \leq 1 \quad (\text{الف-۹})$$

$$C_{4-2}: z_{\ell,n_g}(t_1) \left[ 1/\gamma_{\ell,k,n_g} \right]^{-\gamma_{\ell,k,n_g}} \left[ \frac{A_{\ell,n_g}^2(t_1)}{\delta_{\ell,k,n_g}(t_1)} \right]^{-\delta_{\ell,k,n_g}(t_1)} \leq 1 \quad (\text{الف-۱۰})$$

$C_{4-3}$ :

$$A_{\ell,n_g}(t_1) \prod_{\forall k \in K} \left[ \frac{x_{\ell,k,n_g}(t_1)}{\vartheta_{\ell,k,n_g}(t_1)} \right]^{-\vartheta_{\ell,k,n_g}(t_1)} = 1 \quad (\text{الف-۱۱})$$

$$C_{4-4}: B_{n_g}(t_1) \prod_{\forall \ell \in L} \prod_{k \in K} \left[ \frac{x_{\ell,k,n_g}(t_1)}{\mu_{\ell,k,n_g}(t_1)} \right]^{-\mu_{\ell,k,n_g}(t_1)} = 1 \quad (\text{الف-۱۲})$$

$\tilde{C}_5$ :

$$C_{5-1}: w_{\ell,n_g}^{-1}(t_1) + C_{\ell,n_g}(t_1)D_{n_g}(t_1)w_{\ell,n_g}^{-1}(t_1) \leq 1 \quad (\text{الف-۱۳})$$

$$C_{5-2}: w_{\ell,n_g}(t_1) \left[ 1/\varphi_{\ell,k,n_g}(t_1) \right]^{-\varphi_{\ell,k,n_g}(t_1)} \left[ \frac{C_{\ell,n_g}^2(t_1)}{\delta_{\ell,n_g}(t_1)} \right]^{-\delta_{\ell,k,n_g}(t_1)} \leq 1 \quad (\text{الف-۱۴})$$

$$C_{5-3}: C_{\ell,n_g}(t_1) \prod_{\forall k \in K} \left[ \frac{y_{\ell,k,n_g}(t_1)}{\theta_{\ell,k,n_g}(t_1)} \right]^{-\theta_{\ell,k,n_g}(t_1)} = 1 \quad (\text{الف-۱۵})$$

$$C_{5-4}: D_{n_g}(t_1) \prod_{\forall \ell \in L} \prod_{k \in K} \left[ \frac{y_{\ell,k,n_g}(t_1)}{\omega_{\ell,k,n_g}(t_1)} \right]^{-\omega_{\ell,k,n_g}(t_1)} = 1 \quad (\text{الف-۱۶})$$

در جایی که:

$$\gamma_{\ell,n_g}(t_1) = \frac{1}{A_{\ell,n_g}^2(t_1-1) + 1} \quad (\text{الف-۱۷})$$

$$\delta_{\ell,n_g}(t_1) = \frac{A_{\ell,n_g}^2(t_1-1)}{A_{\ell,n_g}^2(t_1-1) + 1} \quad (\text{الف-۱۸})$$

$$\vartheta_{\ell,k,n_g}(t_1) = \frac{x_{\ell,k,n_g}(t_1-1)}{\sum_{\forall k \in K} x_{\ell,k,n_g}(t_1-1)} \quad (\text{الف-۱۹})$$

$$\mu_{\ell,k,n_g}(t_1) = \frac{x_{\ell,k,n_g}(t_1-1)}{\sum_{\forall \ell \in L} \sum_{k \in K} x_{\ell,k,n_g}(t_1-1)} \quad (\text{الف-۲۰})$$

$$\varphi_{\ell,n_g}(t_1) = \frac{1}{C_{\ell,n_g}^2(t_1-1) + 1} \quad (\text{الف-۲۱})$$

$$\delta_{\ell,n_g}(t_1) = \frac{C_{\ell,n_g}^2(t_1-1)}{C_{\ell,n_g}^2(t_1-1) + 1} \quad (\text{الف-۲۲})$$

$$\theta_{\ell,k,n_g}(t_1) = \frac{y_{\ell,k,n_g}(t_1-1)}{\sum_{\forall k \in K} y_{\ell,k,n_g}(t_1-1)} \quad (\text{الف-۲۳})$$

$$\omega_{\ell,k,n_g}(t_1) = \frac{y_{\ell,k,n_g}(t_1-1)}{\sum_{\forall \ell \in L} \sum_{k \in K} y_{\ell,k,n_g}(t_1-1)} \quad (\text{الف-۲۴})$$

$$Y = \bar{\omega}_o(t_1 - 1) + \sum_{g \in G} \sum_{\ell \in L} \sum_{k \in K} \sum_{n_g \in N_g} x_{\ell,k,n_g}(t_1-1) R_{\ell,k,n_g}^{OFDMA} (P_{\ell,k,n_g}^{OFDMA}(t_1)) + \sum_{g \in G} \sum_{\ell \in L} \sum_{k \in K} \sum_{n_g \in N_g} y_{\ell,k,n_g}(t_1-1) R_{\ell,k,n_g}^{Mass} (P_{\ell,k,n_g}^{Mass}(t_1)) \quad (\text{الف-۲۵})$$

$$\chi_{\ell,k,n_g}(t_1) = \frac{\bar{\omega}_o(t_1-1)}{Y} \quad (\text{الف-۲۶})$$

$$\epsilon_{\ell,k,n_g}(t_1) = \frac{x_{\ell,k,n_g}(t_1-1) R_{\ell,k,n_g}^{OFDMA} (P_{\ell,k,n_g}^{OFDMA}(t_1))}{Y} \quad (\text{الف-۲۷})$$

$$o_{\ell,k,n_g}(t_1) = \frac{y_{\ell,k,n_g}(t_1-1) R_{\ell,k,n_g}^{Mass} (P_{\ell,k,n_g}^{Mass}(t_1))}{Y} \quad (\text{الف-۲۸})$$

### پیوست ب

مانند مرحله ۱، ما برای تبدیل زیرمساله (۲۲) به شکل استاندارد GP، ابتدا تابع بیشینه هدف (ب-۱) را به صورت تابع کمینه هدف (ب-۲) به صورت زیر بازنویسی کرده و فرمول های نرخ داده را جایگزین می کنیم:

$$\max_p \sum_{g \in G} \sum_{\ell \in L} \sum_{k \in K} \sum_{n_g \in N_g} \left[ X_{\ell, k, n_g}(t) \left( R_{\ell, k, n_g}^{\text{OFDMA}} \left( P_{\ell, k, n_g}^{\text{OFDMA}}(t_2) \right) - P_{\ell, k, n_g}^{\text{OFDMA}}(t_2) C^{\text{OFDMA}} \right) + Y_{\ell, k, n_g}(t) \left( R_{\ell, k, n_g}^{\text{mMIMO}} \left( P_{\ell, k, n_g}^{\text{mMIMO}}(t_2) \right) - P_{\ell, k, n_g}^{\text{mMIMO}}(t_2) C^{\text{mMIMO}} \right) \right] \quad (\text{ب-۱})$$

$$\min_p \sum_{g \in G} \sum_{\ell \in L} \sum_{k \in K} \sum_{n_g \in N_g} \left[ X_{\ell, k, n_g}(t) \left( P_{\ell, k, n_g}^{\text{OFDMA}}(t_2) C^{\text{OFDMA}} - \log_2 \left( 1 + \frac{P_{\ell, k, n_g}^{\text{OFDMA}}(t_2) h_{\ell, k, n_g}}{\sigma^2 + \sum_{g \in G} \sum_{\ell' \neq \ell} \sum_{n \in N_g} P_{\ell', k, n'_g}^{\text{OFDMA}}(t_2) h_{\ell', k, n'_g}} \right) \right) + Y_{\ell, k, n_g}(t) \left( P_{\ell, k, n_g}^{\text{mMIMO}}(t_2) C^{\text{mMIMO}} - \log_2 \left( 1 + \frac{\tau P_{\ell, k, n_g}^{\text{mMIMO}}(t_2)^2 d_{\ell, k, n_g}^2 M_{\ell, k, n_g}}{1 + \tau \sum_{g=1}^G \sum_{\ell'=1}^L \sum_{n_g=1}^{N_g} P_{\ell', k, n'_g}^{\text{mMIMO}}(t_2) d_{\ell', k, n'_g}^2 M_{\ell', k, n'_g}} \right) \right) \right] \quad (\text{ب-۲})$$

سپس تقریب DC را بر روی روابط لگاریتمی نرخ داده به صورت (ب-۲) اعمال می کنیم تا روابط غیر خطی به روابط خطی تقریب زده شوند:

$$\min_p \sum_{g \in G} \sum_{\ell \in L} \sum_{k \in K} \sum_{n_g \in N_g} \left[ X_{\ell, k, n_g}(t) \left( P_{\ell, k, n_g}^{\text{OFDMA}}(t_2) C^{\text{OFDMA}} - \log_2 \left( 1 + \frac{P_{\ell, k, n_g}^{\text{OFDMA}}(t_2-1) h_{\ell, k, n_g}}{\sigma^2 + \sum_{g \in G} \sum_{\ell' \neq \ell} \sum_{n \in N_g} P_{\ell', k, n'_g}^{\text{OFDMA}}(t_2-1) h_{\ell', k, n'_g}} \right) \right) - \frac{h_{\ell, k, n_g}}{\sigma^2 + \sum_{g \in G} \sum_{\ell \in L} \sum_{n \in N_g} P_{\ell, k, n_g}^{\text{OFDMA}}(t_2-1) h_{\ell, k, n_g}} \left( \frac{P_{\ell, k, n_g}^{\text{OFDMA}}(t_2) h_{\ell, k, n_g}}{\sigma^2 + \sum_{g \in G} \sum_{\ell' \neq \ell} \sum_{n \in N_g} P_{\ell', k, n'_g}^{\text{OFDMA}}(t_2) h_{\ell', k, n'_g}} - \frac{P_{\ell, k, n_g}^{\text{OFDMA}}(t_2-1) h_{\ell, k, n_g}}{\sigma^2 + \sum_{g \in G} \sum_{\ell' \neq \ell} \sum_{n \in N_g} P_{\ell', k, n'_g}^{\text{OFDMA}}(t_2-1) h_{\ell', k, n'_g}} \right) + Y_{\ell, k, n_g}(t) \left( P_{\ell, k, n_g}^{\text{mMIMO}}(t_2) C^{\text{mMIMO}} - \log_2 \left( 1 + \frac{\tau P_{\ell, k, n_g}^{\text{mMIMO}}(t_2-1)^2 d_{\ell, k, n_g}^2 M_{\ell, k, n_g}}{1 + \tau \sum_{g=1}^G \sum_{\ell'=1}^L \sum_{n_g=1}^{N_g} P_{\ell', k, n'_g}^{\text{mMIMO}}(t_2-1) d_{\ell', k, n'_g}^2 M_{\ell', k, n'_g}} \right) - \frac{2\tau P_{\ell, k, n_g}^{\text{mMIMO}}(t_2-1) d_{\ell, k, n_g}^2 M_{\ell, k, n_g}}{1 + \tau \sum_{g=1}^G \sum_{\ell'=1}^L \sum_{n_g=1}^{N_g} P_{\ell', k, n'_g}^{\text{mMIMO}}(t_2-1) d_{\ell', k, n'_g}^2 M_{\ell', k, n'_g}} \left( \frac{\tau P_{\ell, k, n_g}^{\text{mMIMO}}(t_2)^2 d_{\ell, k, n_g}^2 M_{\ell, k, n_g}}{1 + \tau \sum_{g=1}^G \sum_{\ell'=1}^L \sum_{n_g=1}^{N_g} P_{\ell', k, n'_g}^{\text{mMIMO}}(t_2) d_{\ell', k, n'_g}^2 M_{\ell', k, n'_g}} - \frac{\tau P_{\ell, k, n_g}^{\text{mMIMO}}(t_2-1)^2 d_{\ell, k, n_g}^2 M_{\ell, k, n_g}}{1 + \tau \sum_{g=1}^G \sum_{\ell'=1}^L \sum_{n_g=1}^{N_g} P_{\ell', k, n'_g}^{\text{mMIMO}}(t_2-1) d_{\ell', k, n'_g}^2 M_{\ell', k, n'_g}} \right) \right) \right] \quad (\text{ب-۳})$$

با توجه به عبارات منفی در (ب-۳)، برای تأمین شرایط مثبت تابع هدف در GP، ما متغیر کمکی مثبت  $\bar{C}_0$  و  $\bar{\Psi}_2 \gg 1$  را به عنوان یک ثابت به اندازه کافی بزرگ در نظر می گیریم و قید (ب-۴) که همیشه مثبت است تعریف می کنیم:

$$\bar{C}_0 : \left( \bar{\Psi}_2 + \sum_{g \in G} \sum_{\ell \in L} \sum_{k \in K} \sum_{n_g \in N_g} X_{\ell, k, n_g}(t) P_{\ell, k, n_g}^{\text{OFDMA}}(t_2) C^{\text{OFDMA}} + \sum_{g \in G} \sum_{\ell \in L} \sum_{k \in K} \sum_{n_g \in N_g} \frac{h_{\ell, k, n_g}}{\sigma^2 + \sum_{g \in G} \sum_{\ell \in L} \sum_{n \in N_g} P_{\ell, k, n_g}^{\text{OFDMA}}(t_2-1) h_{\ell, k, n_g}} \times \frac{P_{\ell, k, n_g}^{\text{OFDMA}}(t_2-1) h_{\ell, k, n_g}}{\sigma^2 + \sum_{g \in G} \sum_{\ell' \neq \ell} \sum_{n \in N_g} P_{\ell', k, n'_g}^{\text{OFDMA}}(t_2-1) h_{\ell', k, n'_g}} + \sum_{g \in G} \sum_{\ell \in L} \sum_{k \in K} \sum_{n_g \in N_g} Y_{\ell, k, n_g}(t) P_{\ell, k, n_g}^{\text{mMIMO}}(t_2) C^{\text{mMIMO}} + \sum_{g \in G} \sum_{\ell \in L} \sum_{k \in K} \sum_{n_g \in N_g} \frac{2\tau P_{\ell, k, n_g}^{\text{mMIMO}}(t_2-1) d_{\ell, k, n_g}^2 M_{\ell, k, n_g}}{1 + \tau \sum_{g=1}^G \sum_{\ell'=1}^L \sum_{n_g=1}^{N_g} P_{\ell', k, n'_g}^{\text{mMIMO}}(t_2-1) d_{\ell', k, n'_g}^2 M_{\ell', k, n'_g}} \times \left( \frac{\tau P_{\ell, k, n_g}^{\text{mMIMO}}(t_2-1)^2 d_{\ell, k, n_g}^2 M_{\ell, k, n_g}}{1 + \tau \sum_{g=1}^G \sum_{\ell'=1}^L \sum_{n_g=1}^{N_g} P_{\ell', k, n'_g}^{\text{mMIMO}}(t_2-1) d_{\ell', k, n'_g}^2 M_{\ell', k, n'_g}} \right) \right) \times \left( \frac{\bar{\Psi}_1(t_2)}{\mu(t_2)} \right)^{-\mu(t_2)} \times$$



$$\begin{aligned}
 & \prod_{g \in G, \ell \in L, k \in K, n_g \in N_g} \left( \frac{h_{\ell, k, n_g} P_{\ell, k, n_g}^{\text{OFDMA}}(t_2) \times \frac{P_{\ell, k, n_g}^{\text{OFDMA}}(t_2) h_{\ell, k, n_g}}{\sigma^2 + \sum_{g \in G} \sum_{\ell' \neq \ell} \sum_{n \in N_g} \frac{P_{\ell', k, n'_g}^{\text{OFDMA}}(t_2) h_{\ell', k, n'_g}}{n \neq n_g}}}{\xi_{\ell, k, n_g}(t_2)} \right)^{-\xi_{\ell, k, n_g}(t_2)} \times \\
 & \prod_{\ell \in L, k \in K, g \in G, n_g \in N_g} \left( \frac{\log_2 \left( 1 + \frac{P_{\ell, k, n_g}^{\text{OFDMA}}(t_2-1) h_{\ell, k, n_g}}{\sigma^2 + \sum_{g \in G} \sum_{\ell' \neq \ell} \sum_{n \in N_g} \frac{P_{\ell', k, n'_g}^{\text{OFDMA}}(t_2-1) h_{\ell', k, n'_g}}{n \neq n_g}} \right)}{\pi_{\ell, k, n_g}(t_2)} \right)^{-\pi_{\ell, k, n_g}(t_2)} \times \\
 & \prod_{g \in G, \ell \in L, k \in K, n_g \in N_g} \left( \frac{\log_2 \left( 1 + \frac{\tau P_{\ell, k, n_g}^{\text{mMIMO}}(t_2-1)^2 d_{\ell, k, n_g}^2 M_{\ell, k, n_g}}{\sigma^2 + \tau \sum_{g=1}^G \sum_{\ell'=1}^L \sum_{n_g=1}^{N_g} \frac{P_{\ell', k, n'_g}^{\text{mMIMO}^2}(t_2-1) d_{\ell', k, n'_g}^2 M_{\ell', k, n'_g}}{\ell' \neq \ell}} \right)}{\rho_{\ell, k, n_g}(t_2)} \right)^{-\rho_{\ell, k, n_g}(t_2)} \times \\
 & \prod_{g \in G, \ell \in L, k \in K, n_g \in N_g} \left( \frac{\frac{2\tau P_{\ell, k, n_g}^{\text{mMIMO}}(t_2-1) d_{\ell, k, n_g}^2 M_{\ell, k, n_g}}{1 + \tau \sum_{g=1}^G \sum_{\ell'=1}^L \sum_{n_g=1}^{N_g} \frac{P_{\ell', k, n'_g}^{\text{mMIMO}^2}(t_2-1) d_{\ell', k, n'_g}^2 M_{\ell', k, n'_g}}{\ell' \neq \ell}} \times \frac{\tau P_{\ell, k, n_g}^{\text{mMIMO}}(t_2)^2 d_{\ell, k, n_g}^2 M_{\ell, k, n_g}}{1 + \tau \sum_{g=1}^G \sum_{\ell'=1}^L \sum_{n_g=1}^{N_g} \frac{P_{\ell', k, n'_g}^{\text{mMIMO}^2}(t_2) d_{\ell', k, n'_g}^2 M_{\ell', k, n'_g}}{\ell' \neq \ell}}}{\xi_{1, \ell, k, n_g}(t_2)} \right)^{-\xi_{1, \ell, k, n_g}(t_2)} \leq 1
 \end{aligned}$$

(۴-ب)

ما C7 را باز نویسی می کنیم:

$$\sum_{\ell \in M} \sum_{k \in K} \sum_{n_g \in N_g} X_{\ell, k, n_g} \log_2 \left( 1 + \frac{P_{\ell, k, n_g}^{\text{OFDMA}}(t_2) h_{\ell, k, n_g}}{\sigma^2 + \sum_{g \in G} \sum_{\ell' \neq \ell} \sum_{n \in N_g} \frac{P_{\ell', k, n'_g}^{\text{OFDMA}}(t_2) h_{\ell', k, n'_g}}{n \neq n_g}} \right) \geq R_g^{\min} \quad (۵-ب)$$

$$\log_2 \prod_{\ell \in L, k \in K, n_g \in N_g} X_{\ell, k, n_g} \left( \frac{\sigma^2 + \sum_{g \in G} \sum_{\ell' \neq \ell} \sum_{n \in N_g} \frac{P_{\ell', k, n'_g}^{\text{OFDMA}}(t_2) h_{\ell', k, n'_g}}{n \neq n_g}}{\sigma^2 + \sum_{g \in G} \sum_{\ell' \neq \ell} \sum_{n \in N_g} \frac{P_{\ell', k, n'_g}^{\text{OFDMA}}(t_2) h_{\ell', k, n'_g}}{n \neq n_g} + P_{\ell, k, n_g}^{\text{OFDMA}}(t_2) h_{\ell, k, n_g}} \right) \leq -R_g^{\min} \quad (۶-ب)$$

که از نظر ریاضی می تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$\prod_{\ell \in L, k \in K, n_g \in N_g} X_{\ell, k, n_g} \left( \sigma^2 + \sum_{g \in G} \sum_{\ell' \neq \ell} \sum_{n \in N_g} \frac{P_{\ell', k, n'_g}^{\text{OFDMA}}(t_2) h_{\ell', k, n'_g}}{n \neq n_g} \right) \times \left( \sigma^2 + \sum_{g \in G} \sum_{\ell' \neq \ell} \sum_{n \in N_g} \frac{P_{\ell', k, n'_g}^{\text{OFDMA}}(t_2) h_{\ell', k, n'_g}}{n \neq n_g} + P_{\ell, k, n_g}^{\text{OFDMA}}(t_2) h_{\ell, k, n_g} \right)^{-1} \leq 2^{-R_g^{\min}} \quad (۷-ب)$$

و سرانجام با استفاده از تقریب AGMA از (۵-ب) به (۸-ب) می رسیم:

$$\tilde{C}_{7.1}: \prod_{\ell \in L, k \in K, n_g \in N_g} \left[ \left( \sigma^2 + \sum_{g \in G} \sum_{\ell' \neq \ell} \sum_{n \in N_g} \frac{P_{\ell', k, n'_g}^{\text{OFDMA}}(t_2) h_{\ell', k, n'_g}}{n \neq n_g} \right) \times \left( \frac{\sigma^2}{Q(t_2)} \right)^{-Q(t_2)} \right] \times$$

تخصیص کارای توان الکتریکی در شبکه های دسترسی رادیویی ابری با رویه انتخاب فناوری

$$\left( \frac{\prod_{\ell \in L, k \in K, n_g \in N_g} P_{\ell, k, n_g}^{\text{OFDMA}}(t_2) h_{\ell, k, n_g} + P_{\ell, k, n_g}^{\text{OFDMA}}(t_2) h_{\ell, k, n_g}}{S_{\ell, k, n_g}(t_2)} \right)^{-\zeta_{\ell, k, n_g}(t_2)} \leq$$

(۸-ب)

برای بدست آوردن  $\tilde{C}_{8.1}$  ابتدا مشابه  $\tilde{C}_{7.1}$  عمل می کنیم:

$$\sum_{\ell \in L} \sum_{k \in K} \sum_{n_g \in N_g} x_{\ell, k, n_g} \log_2 \left( 1 + \frac{P_{\ell, k, n_g}^{\text{OFDMA}}(t_2) h_{\ell, k, n_g}}{\sigma^2 + \sum_{g \in G} \sum_{\ell' \neq \ell} \sum_{n \in N_g} \substack{P_{\ell', k, n'}^{\text{OFDMA}}(t_2) h_{\ell', k, n'} \\ n \neq n_g}} \right) \leq R_g^{\max}$$

$$\tilde{C}_{8.1} : \prod_{\ell \in L, k \in K, n_g \in N_g} \left[ \left( \sigma^2 + \tau \sum_{g=1}^L \sum_{\ell'=1}^G \sum_{n_g=1}^{N_g} \substack{P_{\ell', k, n'_g}^{\text{mMIMO}^2}(t_2-1) \\ \ell' \neq \ell} \right) \right.$$

$$\left. d_{\ell, k, n_g}^2 M_{\ell, k, n_g} \right) \times \left( \frac{\sigma^2}{\varphi(t_2)} \right)^{-\varphi(t_2)} \times \left( \frac{1 + \tau \sum_{g=1}^G \sum_{\ell'=1}^L \sum_{n_g=1}^{N_g} \substack{P_{\ell', k, n'_g}^{\text{mMIMO}^2}(t_2) d_{\ell', k, n'_g}^2 M_{\ell', k, n'_g} \\ \ell' \neq \ell}}{\phi_{\ell, k, n_g}(t_2)} \right)^{-\phi_{\ell, k, n_g}(t_2)} \leq 2^{-R_g^{\min}}$$

(۹-ب)

ما  $C_9$  را به صورت زیر باز نویسی می کنیم:

$$\sum_{\ell \in L} \sum_{k \in K} \sum_{n_g \in N_g} x_{\ell, k, n_g} \log_2 \left( 1 + \frac{P_{\ell, k, n_g}^{\text{OFDMA}}(t_2) h_{\ell, k, n_g}}{\sigma^2 + \sum_{g \in G} \sum_{\ell' \neq \ell} \sum_{n \in N_g} \substack{P_{\ell', k, n'}^{\text{OFDMA}}(t_2) h_{\ell', k, n'} \\ n \neq n_g}} \right) \leq R_g^{\max} \quad (10-ب)$$

که از نظر ریاضی می تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$x_{\ell, k, n_g} \log_2 \prod_{\ell \in L, k \in K, n_g \in N_g} \left( \frac{\sigma^2 + \sum_{g \in G} \sum_{\ell' \in L} \sum_{n \in N_g} \substack{P_{\ell', k, n'}^{\text{OFDMA}}(t_2) h_{\ell', k, n'} \\ \ell' \neq \ell}}{\sigma^2 + \sum_{g \in G} \sum_{\ell' \neq \ell} \sum_{n \in N_g} \substack{P_{\ell', k, n'}^{\text{OFDMA}}(t_2) h_{\ell', k, n'} \\ n \neq n_g}} \right) \leq R_g^{\max} \quad (11-ب)$$

و سرانجام با استفاده از تقریب AGMA ، در (۱۱-ب) به (۱۲-ب) می رسیم:

$$\tilde{C}_{9.1} : \prod_{\ell \in L, k \in K, n_g \in N_g} x_{\ell, k, n_g} \left( \frac{\sigma^2 + \sum_{g \in G} \sum_{\ell' \in L} \sum_{n \in N_g} \substack{P_{\ell', k, n'}^{\text{OFDMA}}(t_2) h_{\ell', k, n'} \\ \ell' \neq \ell}}{\sigma^2 + \sum_{g \in G} \sum_{\ell' \neq \ell} \sum_{n \in N_g} \substack{P_{\ell', k, n'}^{\text{OFDMA}}(t_2) h_{\ell', k, n'} \\ n \neq n_g}} \right) \leq 2^{R_g^{\max}} \quad (12-ب)$$

ما  $C_{10}$  را به صورت زیر باز نویسی می کنیم:

$$\sum_{\ell \in L} \sum_{k \in K} \sum_{n_g \in N_g} y_{\ell, k, n_g} \log_2 \left( 1 + \frac{\tau P_{\ell, k, n_g}^{\text{mMIMO}^2} d_{\ell, k, n_g}^2 M_{\ell, k, n_g}}{1 + \tau \sum_{g=1}^G \sum_{\ell'=1}^L \sum_{n_g=1}^{N_g} \substack{P_{\ell', k, n'_g}^{\text{mMIMO}^2}(t_2) d_{\ell', k, n'_g}^2 M_{\ell', k, n'_g} \\ \ell' \neq \ell}} \right) \leq R_g^{\max} \quad (13-ب)$$

برای بدست آوردن  $\tilde{C}_{10.1}$  مشابه  $\tilde{C}_{9.1}$  عمل می کنیم:

$$\tilde{C}_{10.1} : \prod_{\ell \in L, k \in K, n_g \in N_g} y_{\ell, k, n_g} \left( \frac{1 + \tau \sum_{g=1}^G \sum_{\ell'=1}^L \sum_{n_g=1}^{N_g} P_{\ell, k, n_g}^{\text{mMIMO}^2}(t_2) d_{\ell, k, n_g}^2 M_{\ell, k, n_g}}{1 + \tau \sum_{g=1}^G \sum_{\ell'=1}^L \sum_{n_g=1}^{N_g} P_{\ell', k, n_g'}^{\text{mMIMO}^2}(t_2) d_{\ell', k, n_g'}^2 M_{\ell', k, n_g'}} \right) \leq 2 R_g^{\text{max}} \quad (14\text{-ب})$$

ما  $C_{11}$  را به صورت زیر باز نویسی می کنیم:

$$x_{\ell, k, n_g} \times \log_2 \left( 1 + \frac{P_{\ell, k, n_g}^{\text{OFDMA}}(t_2) h_{\ell, k, n_g}}{\sigma^2 + \sum_{g \in G} \sum_{\ell' \neq \ell} \sum_{n \in N_g} P_{\ell', k, n_g'}^{\text{OFDMA}}(t_2) h_{\ell', k, n_g'}} \right) + y_{\ell, k, n_g} \times \log_2 \left( 1 + \frac{\tau P_{\ell, k, n_g}^{\text{mMIMO}^2}(t_2) d_{\ell, k, n_g}^2 M_{\ell, k, n_g}}{1 + \tau \sum_{g=1}^G \sum_{\ell'=1}^L \sum_{n_g=1}^{N_g} P_{\ell', k, n_g'}^{\text{mMIMO}^2}(t_2) d_{\ell', k, n_g'}^2 M_{\ell', k, n_g'}} \right) \geq R_{n_g}^{\text{min}} \quad (15\text{-ب})$$

و سرانجام با استفاده از تقریب AGMA، در (ب-۱۵) به (ب-۱۶) می رسیم.

$$\tilde{C}_{11.1} : R_{n_g}^{\text{min}} \times \left( \frac{x_{\ell, k, n_g} \times \log_2 \left( 1 + \frac{P_{\ell, k, n_g}^{\text{OFDMA}}(t_2) h_{\ell, k, n_g}}{\sigma^2 + \sum_{g \in G} \sum_{\ell' \neq \ell} \sum_{n \in N_g} P_{\ell', k, n_g'}^{\text{OFDMA}}(t_2) h_{\ell', k, n_g'}} \right)}{\chi_{\ell, k, n_g}(t_2)} \right)^{-\chi_{\ell, k, n_g}(t_2)} \times \left( \frac{\log_2 \left( 1 + \frac{\tau P_{\ell, k, n_g}^{\text{mMIMO}^2}(t_2) d_{\ell, k, n_g}^2 M_{\ell, k, n_g}}{1 + \tau \sum_{g=1}^G \sum_{\ell'=1}^L \sum_{n_g=1}^{N_g} P_{\ell', k, n_g'}^{\text{mMIMO}^2}(t_2) d_{\ell', k, n_g'}^2 M_{\ell', k, n_g'}} \right)}{\psi_{\ell, k, n_g}(t_2)} \right)^{-\psi_{\ell, k, n_g}(t_2)} \leq 1 \quad (16\text{-ب})$$

بطوری که:

$$\xi_{\ell, k, n_g}(t_2) = \frac{h_{\ell, k, n_g} P_{\ell, k, n_g}^{\text{OFDMA}}(t_2) h_{\ell, k, n_g}}{\sigma^2 + \sum_{g \in G} \sum_{\ell \in L} \sum_{n \in N_g} P_{\ell, k, n_g}^{\text{OFDMA}}(t_2-1) h_{\ell, k, n_g}} \times \frac{P_{\ell, k, n_g}^{\text{OFDMA}}(t_2) h_{\ell, k, n_g}}{\sigma^2 + \sum_{g \in G} \sum_{\ell' \neq \ell} \sum_{n \in N_g} P_{\ell', k, n_g'}^{\text{OFDMA}}(t_2) h_{\ell', k, n_g'}} \quad (17\text{-ب})$$

$$\mu = \frac{\varpi_1(t_2-1)}{Z} \quad (18\text{-ب})$$

$$\rho_{\ell, k, n_g}(t_2) = \frac{\log_2 \left( 1 + \frac{\tau P_{\ell, k, n_g}^{\text{mMIMO}^2}(t_2-1) d_{\ell, k, n_g}^2 M_{\ell, k, n_g}}{1 + \tau \sum_{g=1}^G \sum_{\ell'=1}^L \sum_{n_g=1}^{N_g} P_{\ell', k, n_g'}^{\text{mMIMO}^2}(t_2-1) d_{\ell', k, n_g'}^2 M_{\ell', k, n_g'}} \right)}{Z} \quad (19\text{-ب})$$

$$\pi_{\ell, k, n_g}(t_2) = \frac{\log_2 \left( 1 + \frac{P_{\ell, k, n_g}^{\text{OFDMA}}(t_2-1) h_{\ell, k, n_g}}{\sigma^2 + \sum_{g \in G} \sum_{\ell' \neq \ell} \sum_{n \in N_g} P_{\ell', k, n_g'}^{\text{OFDMA}}(t_2-1) h_{\ell', k, n_g'}} \right)}{Z} \quad (20\text{-ب})$$

$$\xi_{1\ell,k,n_g}(t_2) = \frac{\frac{2\tau P_{\ell,k,n_g}^{\text{mMIMO}}(t_2-1) d_{\ell,k,n_g}^2 M_{\ell,k,n_g}}{1+\tau \sum_{g=1}^G \sum_{\ell'=1}^L \sum_{n_g=1}^{N_g} P_{\ell',k,n_g}^{\text{mMIMO}^2}(t_2-1) d_{\ell',k,n_g}^2 M_{\ell',k,n_g}} \times \frac{\tau P_{\ell,k,n_g}^{\text{mMIMO}}(t_2)^2 d_{\ell,k,n_g}^2 M_{\ell,k,n_g}}{1+\tau \sum_{g=1}^G \sum_{\ell'=1}^L \sum_{n_g=1}^{N_g} P_{\ell',k,n_g}^{\text{mMIMO}^2}(t_2) d_{\ell',k,n_g}^2 M_{\ell',k,n_g}}}{Z} \quad (21-ب)$$

$$\begin{aligned} Z = & \sum_{g \in G} \sum_{\ell \in L} \sum_{k \in K} \sum_{n_g \in N_g} \log_2 \left( 1 + \frac{P_{\ell,k,n_g}^{\text{OFDMA}}(t_2-1) h_{\ell,k,n_g}}{\sigma^2 + \sum_{g \in G} \sum_{\ell' \neq \ell} \sum_{n \in N_g} P_{\ell',k,n_g}^{\text{OFDMA}}(t_2-1) h_{\ell',k,n_g}} \right) \\ & + \sum_{g \in G} \sum_{\ell \in L} \sum_{k \in K} \sum_{n_g \in N_g} \frac{h_{\ell,k,n_g}}{\sigma^2 + \sum_{g \in G} \sum_{\ell' \in L} \sum_{n \in N_g} P_{\ell',k,n_g}^{\text{OFDMA}}(t_2-1) h_{\ell',k,n_g}} \times \frac{P_{\ell,k,n_g}^{\text{OFDMA}}(t_2-1) h_{\ell,k,n_g}}{\sigma^2 + \sum_{g \in G} \sum_{\ell' \neq \ell} \sum_{n \in N_g} P_{\ell',k,n_g}^{\text{OFDMA}}(t_2-1) h_{\ell',k,n_g}} \\ & + \sum_{g \in G} \sum_{\ell \in L} \sum_{k \in K} \sum_{n_g \in N_g} \log_2 \left( 1 + \frac{\tau P_{\ell,k,n_g}^{\text{mMIMO}}(t_2-1)^2 d_{\ell,k,n_g}^2 M_{\ell,k,n_g}}{1 + \tau \sum_{g=1}^G \sum_{\ell'=1}^L \sum_{n_g=1}^{N_g} P_{\ell',k,n_g}^{\text{mMIMO}^2}(t_2-1) d_{\ell',k,n_g}^2 M_{\ell',k,n_g}} \right) \\ & + \sum_{g \in G} \sum_{\ell \in L} \sum_{k \in K} \sum_{n_g \in N_g} \frac{2\tau P_{\ell,k,n_g}^{\text{mMIMO}}(t_2-1) d_{\ell,k,n_g}^2 M_{\ell,k,n_g}}{1 + \tau \sum_{g=1}^G \sum_{\ell'=1}^L \sum_{n_g=1}^{N_g} P_{\ell',k,n_g}^{\text{mMIMO}^2}(t_2-1) d_{\ell',k,n_g}^2 M_{\ell',k,n_g}} \times \frac{\tau P_{\ell,k,n_g}^{\text{mMIMO}}(t_2)^2 d_{\ell,k,n_g}^2 M_{\ell,k,n_g}}{1 + \tau \sum_{g=1}^G \sum_{\ell'=1}^L \sum_{n_g=1}^{N_g} P_{\ell',k,n_g}^{\text{mMIMO}^2}(t_2) d_{\ell',k,n_g}^2 M_{\ell',k,n_g}} \\ & + w_1(t_2 - 1) \end{aligned} \quad (22-ب)$$

$$\begin{aligned} W = & x_{\ell,k,n_g} \times \log_2 \left( 1 + \frac{P_{\ell,k,n_g}^{\text{OFDMA}}(t_2-1) h_{\ell,k,n_g}}{\sigma^2 + \sum_{g \in G} \sum_{\ell' \neq \ell} \sum_{n \in N_g} P_{\ell',k,n_g}^{\text{OFDMA}}(t_2-1) h_{\ell',k,n_g}} \right) + y_{\ell,k,n_g} \\ & \times \log_2 \left( 1 + \frac{\tau P_{\ell,k,n_g}^{\text{mMIMO}}(t_2)^2 d_{\ell,k,n_g}^2 M_{\ell,k,n_g}}{1 + \tau \sum_{g=1}^G \sum_{\ell'=1}^L \sum_{n_g=1}^{N_g} P_{\ell',k,n_g}^{\text{mMIMO}^2}(t_2-1) d_{\ell',k,n_g}^2 M_{\ell',k,n_g}} \right) \end{aligned} \quad (23-ب)$$

$$\varrho(t_2) = \frac{\sigma^2}{\sigma^2 + \sum_{g \in G} \sum_{\ell \in L} \sum_{n \in N_g} P_{\ell,k,n_g}^{\text{OFDMA}}(t_2-1) h_{\ell,k,n_g} + P_{\ell,k,n_g}^{\text{OFDMA}}(t_2-1) h_{\ell,k,n_g}} \quad (24-ب)$$

$$\varsigma_{\ell,k,n_g}(t_2) = \frac{P_{\ell,k,n_g}^{\text{OFDMA}}(t_2-1) h_{\ell,k,n_g}}{\sigma^2 + \sum_{g \in G} \sum_{\ell \in L} \sum_{n \in N_g} P_{\ell',k,n_g}^{\text{OFDMA}}(t_2-1) h_{\ell',k,n_g} + P_{\ell,k,n_g}^{\text{OFDMA}}(t_2-1) h_{\ell,k,n_g}} \quad (25-ب)$$

$$\varphi(t_2) = \frac{\sigma^2}{\sigma^2 + \sum_{g \in G} \sum_{\ell \in L} \sum_{n \in N_g} P_{\ell',k,n_g}^{\text{mMIMO}}(t_2-1) h_{\ell',k,n_g} + P_{\ell,k,n_g}^{\text{mMIMO}}(t_2-1) h_{\ell,k,n_g}} \quad (26-ب)$$

$$\phi_{\ell,k,n_g}(t_2) = \frac{P_{\ell,k,n_g}^{\text{mMIMO}}(t_2-1) h_{\ell,k,n_g}}{\sigma^2 + \sum_{g \in G} \sum_{\ell \in L} \sum_{n \in N_g} P_{\ell',k,n_g}^{\text{mMIMO}}(t_2-1) h_{\ell',k,n_g} + P_{\ell,k,n_g}^{\text{mMIMO}}(t_2-1) h_{\ell,k,n_g}} \quad (27-ب)$$

$$\chi_{\ell,k,n_g}(t_2) = \frac{x_{\ell,k,n_g} \times \log_2 \left( 1 + \frac{P_{\ell,k,n_g}^{\text{OFDMA}}(t_2-1) h_{\ell,k,n_g}}{\sigma^2 + \sum_{g \in G, \sum_{\ell' \neq \ell} \sum_{n \in N_g, n \neq n_g}} P_{\ell',k,n'_g}^{\text{OFDMA}}(t_2-1) h_{\ell',k,n'_g}} \right)}{W} \quad (\text{ب-۲۸})$$

$$\psi_{\ell,k,n_g}(t_2) = \frac{y_{\ell,k,n_g} \times \log_2 \left( 1 + \frac{\tau P_{\ell,k,n_g}^{\text{mMIMO}^2}(t_2) d_{\ell,k,n_g}^2 M_{\ell,k,n_g}}{1 + \tau \sum_{g=1}^L \sum_{\substack{\ell'=1 \\ \ell' \neq \ell}}^G \sum_{n_g=1}^{N_g} P_{\ell',k,n'_g}^{\text{mMIMO}^2}(t_2-1) d_{\ell',k,n'_g}^2 M_{\ell',k,n'_g}} \right)}{W} \quad (\text{ب-۲۹})$$