

## بهینه‌سازی رقابتی در کانال‌های تداخلی انتخابگر - فرکانسی گوسی با استفاده از نظریه بازی‌ها

عبد جبار حسنوند<sup>۱</sup>، حمید فرخی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه بیرجند، j.hasanvand@gmail.com

<sup>۲</sup> استادیار گروه مخابرات، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه بیرجند، hfarrokhi@birjand.ac.ir

### چکیده

مفهوم رادیو شناخت‌گر با توجه به خصوصیتی مانند، حس کردن باند فرکانسی خالی و دستیابی دینامیکی طیف فرکانسی می‌تواند به منظور استفاده بهینه از باند فرکانسی در نسل‌های آینده سیستم‌های مخابراتی بسیار مفید باشد. یکی از موضوع‌های مهم و مورد بحث در شبکه‌های رادیو شناخت‌گر تخصیص منابع است. با توجه به خصوصیت رقابتی بودن کاربرها، در این مقاله ما یک شبکه رادیو شناخت‌گر را به صورت یک بازی بدون همکاری مدل می‌کنیم که در آن کاربرهای ثانویه با توجه به محدودیت‌های مجموع توان ارسالی و حداکثر توان ارسال در هر بازه فرکانسی به منظور بالا بردن نرخ ارسال خود به صورت خودسرانه و بدون داشتن یک مرکز تصمیم‌گیرنده با دیگر کاربرهای ثانویه در کانال‌های انتخابگر - فرکانسی به رقابت می‌پردازد. ما پاسخ مسئله را در قالب تعادل Nash بیان می‌کنیم و وجود و یکتایی تعادل Nash را مورد بررسی قرار می‌دهیم. همچنین به منظور دستیابی به تعادل Nash بازی از یک الگوریتم گسترده ناهمزمان که الگوریتم واترفیلینگ تکرار شونده ناهمزمان هموار نامیده می‌شود استفاده خواهیم کرد. به این معنی که به بعضی از کاربرها اجازه داده خواهد شد بیشتر از کاربرهای دیگر توان تخصیصی خود را به روز کنند.

**کلید واژه‌ها:** افزایش نرخ ارسال، الگوریتم ناهمزمان، بازی بدون همکاری، تعادل نش، رادیو شناخت‌گر.

### ۱- مقدمه

کاربرهای اولیه (PUs)<sup>۱</sup> استفاده مجدد نمود. اما سیستم‌های ارتباطات امروزی از چنین دستیابی به باند فرکانسی جلوگیری می‌کنند [۲]. بنابراین محققین به دنبال الگو و روش‌های جدیدی برای تخصیص باند فرکانسی هستند.

رادیو شناخت‌گر (CR)<sup>۲</sup> یکی از الگوهای ارائه شده بر پایه نرم‌افزار برای سیستم‌های نسل آینده است که در چند سال اخیر مورد توجه فراوان قرار گرفته است. در [۲] نویسنده رادیو شناخت‌گر را به این صورت تعریف کرده است: رادیو شناخت‌گر یک سیستم ارتباطی هوشمند است که از محیط اطراف خود آگاه بوده و به منظور آموختن از محیط اطراف خود و

با افزایش سرویس‌های مخابراتی تقاضا برای در اختیار گرفتن طیف فرکانسی افزایش یافته است. محدود بودن طیف فرکانسی در طبیعت باعث شده است که طیف فرکانسی یکی از منابع مهم و نایاب به شمار آید. تحقیقات نشان داده است که از باند فرکانسی تخصیص داده شده به سرویس‌های مختلف در زمان و مکان به صورت بهینه استفاده نمی‌شود [۱]. به این باندهای فرکانسی خالی حفره فرکانسی<sup>۱</sup> گفته می‌شود. به منظور افزایش در استفاده بهینه از طیف فرکانسی می‌توان با استفاده از کاربرهای ثانویه (SUs)<sup>۲</sup> از باندهای فرکانسی استفاده نشده توسط

اطلاعات محدود محلی که دارند به صورت خودسرانه یک پاسخ بهینه را برای خود محاسبه می‌کنند. تحلیل چنین سیستم‌هایی را که دارای خصوصیت تقابل بین کاربرهای باهوش بوده و به صورت خودسرانه تصمیم می‌گیرند را می‌توان با استفاده از نظریه بازی‌ها بیان نمود. با استفاده از نظریه بازی‌ها می‌توان نتایج را برای فعل و انفعال‌های متقابل بین افراد نوعی، جوامع، کمپانی‌ها و ... تحلیل و پیش‌بینی نمود. همچنین پاسخ‌های به‌دست آمده از تحلیل با استفاده از نظریه بازی‌ها اغلب با استفاده از الگوریتم‌های گسترده محاسبه می‌شود. این خصوصیت نظریه بازی‌ها باعث شده است که گزینه مناسبی برای طراحی و تحلیل شبکه‌های مخابراتی نسل آینده به شمار آید.

در طول ده سال گذشته به منظور تحلیل و طراحی سیستم‌های مخابراتی به طور وسیعی از نظریه بازی‌ها استفاده شده است. نظریه بازی‌ها می‌تواند برای حل مسائلی نظیر تخصیص منابع، تخصیص باند فرکانسی، کنترل توان، دستیابی دینامیکی باند فرکانسی مورد استفاده قرار گیرد که در یک تقسیم بندی به دو نوع بازی‌های با همکاری<sup>10</sup> و بدون همکاری<sup>11</sup> تقسیم می‌شود. در [4] و [5] بازی بیان شده دارای یک مرکز تصمیم‌گیرنده بوده و این مرکز باید اطلاعات تمام کاربرها را داشته باشد که باعث افزایش در حجم محاسبات می‌شود. در [6] نشان داده شده است که مسئله بهینه‌سازی نرخ ارسال بین کاربرها را می‌توان توسط یک بازی بدون همکاری بین دو بازیگر را مدل نمود که مطلوب ما در این مقاله است. همچنین نویسنده به منظور رسیدن به تعادل نش از الگوریتم واترفیلینگ تکرارشونده ترتیبی<sup>12</sup> استفاده نموده است. هر چند این الگوریتم دارای مزیت ساده‌گی در محاسبات است اما با افزایش تعداد کاربرها زمان رسیدن به تعادل افزایش می‌یابد. پاسخ این مسائل را می‌توان در قالب تعادل که تعادل نش<sup>13</sup> در بازی‌های بدون همکاری گفته می‌شود بیان نمود [7]. در [8]، [9] و [10] بازی بهینه‌سازی نرخ ارسال را در

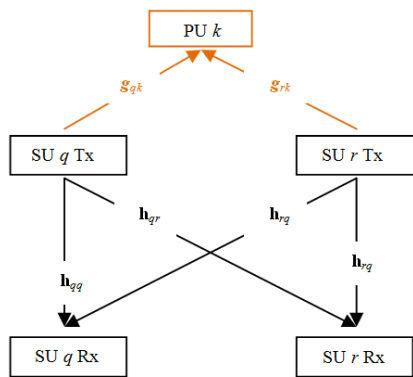
تطبیق‌دادن پارامترهای ارسال خود (توان ارسال، فرکانس حامل، مدولاسیون و ...) به صورت زمان حقیقی<sup>5</sup> با متغیرهای آماری وارد شده در فرکانس‌های رادیویی، از روش‌های یادگیری استفاده می‌کند که دارای دو هدف اولیه است: (1) ارتباط قابل اطمینان در هر زمان و در هر مکان؛ (2) استفاده بهینه از طیف رادیویی.

بر اساس تعریف بالا می‌توان وظایف، تحلیل چشم‌انداز رادیو، تعیین کانال، کنترل توان ارسال، دستیابی دینامیکی طیف را برای یک رادیو شناخت‌گر بیان نمود. یک گیرنده رادیو شناخت‌گر اطلاعات مهم محیط اطراف خود مانند مکان حفزه‌های فرکانسی و سطح تداخل را حس می‌کند. همچنین اطلاعات حالت کانال (CSI)<sup>6</sup> را تخمین می‌زند و ظرفیت کانال را برای استفاده فرستنده پیش‌بینی می‌کند و این اطلاعات توسط یک کانال برگشتی به فرستنده ارسال می‌شود. گیرنده رادیو شناخت‌گر این اطلاعات را دریافت کرده و پارامترهای اساسی مانند سطح توان ارسال را چنان انتخاب می‌کند که با اطلاعات حس شده از محیط اطراف خود مطابقت داشته باشد. هدف اصلی در این مقاله تخصیص بهینه‌ی توان ارسال به کاربرهای ثانویه می‌باشد.

رادیو شناخت‌گر این را ممکن می‌سازد که تکنولوژی‌های بی‌سیم ناهمگن<sup>7</sup> گوناگون و استانداردهای آینده بتوانند در یک طیف فرکانس رادیویی یکسان عمل کنند [3]. در چنین حالتی تداخل بین کاربرها حتما اتفاق خواهد افتاد. برای پیشگیری و کم کردن تداخل می‌توان از روش‌های سنتی که عموماً به صورت متمرکز<sup>8</sup> بوده استفاده نمود که به منظور مشخص کردن پارامترهای ارسال به اطلاعات فراوان و کاملی از تمام کاربرها نیازمند می‌باشد و بنابراین باعث افزایش در محاسبات، تحلیل و انتشار داده توسط کنترل‌کننده مرکزی می‌شود.

می‌توان پاسخ این مسئله را به صورت الگوریتم‌های گسترده<sup>9</sup> ارائه داد، به این صورت که کاربرها با توجه به

گیرنده  $q$  می‌باشد،  $n=1, \dots, N$  و  $q, r=1, \dots, Q$  و  $h_{qq}(n)$  بیان‌کننده تابع انتقال کانال برای کاربر  $q$  در  $\Pi$  امین بازه فرکانسی می‌باشد. استراتژی انتقال برای هر کدام از کاربرهای ثانویه را توسط بردار توان تخصیصی آن  $\mathbf{p}_q @ (p_q(n))_{n=1}^N$  در  $N$  بازه فرکانسی نشان می‌دهیم که دارای محدودیت‌های زیر می‌باشد:



شکل 1: مدل سیستم برای یک سیستم رادیو شناختگر شامل چندین کاربر اولیه و چندین کاربر ثانویه بدون همکاری

$$p_q^{\text{pow}} @ \{ \mathbf{p}_q \in R^N : \mathbf{1}^T \mathbf{p}_q \leq P_q^{\text{ave}}, 0 \leq p_q \leq p_q^{\text{peak}} \} \quad (1)$$

در اینجا  $P_q^{\text{ave}}$  بیان‌کننده مقدار توان در هر ارسال می‌باشد و  $\mathbf{p}_q^{\text{peak}} @ (p_q^{\text{peak}}(n))_{n=1}^N$  حداکثر توان ارسال در هر بازه فرکانسی می‌باشد. حداکثر نرخ ارسال برای کاربر  $q$  را می‌توان به صورت زیر نشان داد:

$$R_q(\mathbf{p}_q, \mathbf{p}_{-q}) @ \sum_{n=1}^N \log(1 + \text{sin r}(n)) \quad (2)$$

که در آن:

$$\text{sin r}(n) = \frac{|h_{qq}(n)|^2 p_q(n)}{d_q^2(n) + \sum_{r \neq q} |h_{rq}(n)|^2 p_r(n)} \quad (3)$$

شبکه‌های مخابراتی امروزی و در کانال‌های تداخلی انتخابگر- فرکانسی گوسی مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقالات تابع واترفیلینگ را توسط نرم اقلیدسی در یک مجموعه‌ی محدب<sup>14</sup> بازنویسی کرده‌اند. در این مقاله، ما یک شبکه‌های رادیو شناختگر را با چند کاربر ثانویه که با هم هیچ‌گونه همکاری ندارند را در کانال‌های تداخلی انتخابگر- فرکانسی گوسی در نظر می‌گیریم و مسئله تخصیص توان بین کاربرهای ثانویه را به صورت یک بازی بدون همکاری فرمول نویسی می‌کنیم. هر کاربر با در نظر گرفتن محدودیت‌های مجموع توان ارسالی و حداکثر توان ارسال در هر بازه فرکانسی، برای به دست آوردن حداکثر نرخ ارسال با کاربرهای دیگر به رقابت می‌پردازد. هر کاربر به منظور همگرایی در تعادل از یک الگوریتم واترفیلینگ تکرارشونده ناهمزمان هموار<sup>15</sup> که دارای سرعت همگرایی بالاتری نسبت به الگوریتم‌های دیگر است، استفاده می‌کند و ما مسئله را از نظر وجود و یکتایی و همگرایی در تعادل نش، مورد بررسی قرار می‌دهیم.

نمادهای استفاده شده به شرح ذیل می‌باشند: حروف درشت بیان‌کننده بردار می‌باشد.  $R$  و  $R_+^{Q \times Q}$  به ترتیب نشان دهنده اعداد حقیقی و ماتریس غیر منفی است.  $[x]_{ij}$  بیان‌کننده  $(i, j)$  امین المان از ماتریس  $x$  است.  $\mathbf{1}$  برداری از یک‌ها را نشان می‌دهد. شعاع طیفی<sup>16</sup> ماتریس با  $r(\cdot)$  بیان می‌شود.

## 2- مدل سیستم و فرمول نویسی مسئله

ما یک شبکه رادیو شناختگر شامل  $Q$  کاربر ثانویه و  $K$  کاربر اولیه است را در نظر می‌گیریم که در یک مکان و در یک فرکانس همزیستی دارند شکل (1). فرض می‌کنیم باند فرکانسی که کاربرها در آن ارسال انجام می‌دهند را بتوان به  $N$  بازه فرکانسی تقسیم نمود و  $\Omega @ \{1, \dots, Q\}$  بیان‌کننده مجموعه  $Q$  کاربر ثانویه است.  $h_{nq}(n)$  بیان‌کننده تابع انتقال کانال متقاطع در  $\Pi$  امین بازه فرکانسی بین فرستنده  $I$  و

$\mathbf{g}$  پیامد (مقدار توان تخصیصی) هر کدام از بازیکنان در استراتژی‌های خود یک تابع مقعر<sup>18</sup> باشد و هر مجموعه‌ی قابل قبول برای هر کدام از بازیکنان محدب و متراکم<sup>19</sup> باشد آنگاه برای هر مجموعه‌ای از ماتریس کانال، توان ارسال کاربران و محدودیت‌های توان حداقل دارای یک تعادل نش است [8]. همان‌طور که پیش‌تر بیان شد به دلیل پیچیدگی در محاسبات، نمی‌توان از فرمول 5 برای به‌دست آوردن تعادل نش استفاده نمود. یکی از راه‌های رسیدن به تعادل نش، به‌دست آوردن نقطه‌ی ثابت پاسخ واترفیلینگ مسئله‌ی  $\mathbf{g}$  است. بنابراین مشاهده می‌شود که فقط با داشتن محدودیت  $\mathbf{1}^T \mathbf{p}_q \leq P_q^{ave}$ ، تعادل نش بازی  $\mathbf{g}$  که استراتژی بهینه  $\{\mathbf{p}_q^*\}_{q=1}^Q$  است از معادله نقطه ثابت واترفیلینگ زیر به دست می‌آید [6] و [12]:

$$\mathbf{p}_q^* = \text{WF}_q(\mathbf{p}_{-q}^*) \quad \forall q \in \Omega \quad (6)$$

در اینجا  $\mathbf{p}_{-q}^* @ \{\mathbf{p}_r\}_{r \in \Omega, r \neq q}$  و عملگر واترفیلینگ برای  $n = 1, \dots, N$  به صورت زیر است:

$$[\text{WF}_q(\mathbf{p}_q)]_n @ (m_q - \text{insr}(\mathbf{p}_{-q}))_0^{p_q^{\text{peak}}(n)} \quad (7)$$

که در آن

$$[\text{insr}_q(\mathbf{p}_{-q})]_n @ \frac{d_q^2(n) + \sum_{r \neq q} |h_{rq}(n)|^2 p_r(n)}{|h_{qq}(n)|^2} \quad (8)$$

در اینجا  $m_q$  طوری انتخاب می‌شود که محدودیت  $\mathbf{1}^T \mathbf{p}_q \leq P_q^{ave}$  را برآورده کند. اما با حضور محدودیت حداکثر توان در هر بازه فرکانسی (پوشش فرکانسی) نمی‌توان تعادل نش استراتژی خالص بازی  $\mathbf{g}$  را از 7 محاسبه نمود. اما با معادل‌سازی مسئله به فرم طرح اقلیدسی از  $-\text{insr}_q$  با محدودیت  $P_q^{\text{pow}}$ ، می‌توان راه حل مسئله را محاسبه نمود. بنابراین ابتدا قضیه زیر را بیان می‌کنیم [9]:

قضیه 1: دو مسئله بهینه‌سازی محدب زیر را در نظر بگیرید:

و  $\mathbf{p}_{-q} @ (\mathbf{p}_r)_{r \neq q}$  بیان‌کننده توان تخصیصی به کاربرهای ثانویه به جز کاربر  $q$  می‌باشد و  $d_q^2(n)$  بیان‌کننده مجموع واریانس نویز و تداخل ایجاد شده توسط کاربرهای اولیه در بازه فرکانسی  $\Omega$  بر روی کاربر ثانویه  $q$  می‌باشد.

## 1-2-1- فرمول نویسی مسئله در یک بازی

مسئله تخصیص توان بین کاربرهای ثانویه را می‌توان به فرم بازی بدون همکاری  $\mathbf{g} = \left( \Omega, \{p_q^{\text{pow}}\}_{q \in \Omega}, \{R_q\}_{q \in \Omega} \right)$  بیان نمود. در اینجا  $\Omega @ \{1, \dots, Q\}$  مجموعه کاربرهای ثانویه می‌باشد و  $R_q$  تابع هزینه تعریف شده در 2 می‌باشد. هر کاربر ثانویه با توجه به مقدار توان تخصیص داده شده به کاربرهای دیگر و محدودیت‌های بیان شده در 1 مسئله بهینه‌سازی زیر را حل می‌کند و مقدار بهینه  $\mathbf{p}_q^*$  را به دست می‌آورد:

$$\text{maximize } R_q(\mathbf{p}_q, \mathbf{p}_{-q}) \quad (4)$$

$g :$

$$\text{subject to: } \mathbf{p}_q \in p_q^{\text{pow}} \quad \forall q \in \Omega$$

مقدار  $\mathbf{p}^* = \{\mathbf{p}_q^*\}_{q=1}^Q$  را برای  $\mathbf{g}$  تعادل نش گوئیم اگر رابطه زیر برقرار باشد:

$$R_q(\mathbf{p}_q^*, \mathbf{p}_{-q}^*) \geq R_q(\mathbf{p}_q, \mathbf{p}_{-q}^*), \quad (5)$$

$$\mathbf{p}_q \in p_q^{\text{pow}} \quad \forall q \in \Omega$$

به دست آوردن تعادل با استفاده از رابطه 5 مشکل می‌باشد. بنابراین با توجه به نتایج به دست آمده در [8] بدون از دست دادن فرم اولیه مسئله می‌توان از استراتژی خالص<sup>17</sup> برای به دست آوردن تعادل استفاده نمود.

## 1-2-1-1- تعادل نش برای بازی

در هر بازی باید ابتدا مشخص شود که این بازی دارای حداقل یک پاسخ می‌باشد. بنابراین اگر در بازی

## 2-2- الگوریتم واترفیلینگ تکرارشونده ناهمزمان

### هموار

برای به دست آوردن تعادل نش در بازی  $\mathbf{g}$ ، ما از الگوریتم واترفیلینگ تکرارشونده ناهمزمان هموار استفاده خواهیم نمود. به این معنی که به بعضی از کاربرها اجازه داده می‌شود بیشتر از بقیه کاربرها به روز رسانی توان خود را انجام دهند. ما ابتدا بعضی از تعریف‌های اولیه بیان شده در [10] را معرفی می‌کنیم. فرض می‌کنیم مجموعه زمان‌هایی را که کاربرها اجازه به روز رسانی توان خود را دارند را با  $t = N_+ = \{0, 1, 2, \dots\}$  نشان دهیم.  $\mathbf{p}_q^{(t)}$  بیان‌کننده توان تخصیص داده شده برای هر کدام از کاربرها در  $t$  امین دوره تناوب از الگوریتم است و  $t_q \leq t$  بیان‌کننده مجموعه زمانهایی است که  $\mathbf{p}_q^{(t)}$  به روز می‌شود (بنابراین در زمان  $t \notin t_q$ ،  $\mathbf{p}^{(t)}$  تغییر نخواهد کرد).  $t_r^q(t)$  بیان‌کننده آخرین زمانی است که کاربر  $q$  تداخل ناشی از کاربر  $r$  را مشاهده می‌کند (بنابراین  $0 \leq t_r^q(t) \leq t$ ). در  $t$  امین دوره تناوب، کاربر  $q$  با توجه به سطح تداخل دریافتی  $(p_{-q}^{(t_q(t))}, \dots, (p_{q-1}^{(t_q(t))}), \dots, (p_{q+1}^{(t_q(t))}), \dots, (p_Q^{(t_q(t))}))$  بهترین پاسخ را برای خود انتخاب می‌کند. توضیحات بیشتر در مرجع [10] آورده شده است.

برای بازی بیان‌شده  $\mathbf{g}$  می‌توان مجموعه  $D_q^{\min} \subseteq \{1, \dots, N\}$  را که بیان‌کننده زیرمجموعه‌ای از بازه‌های فرکانسی  $\{1, \dots, N\}$  است که کاربر در به دست آوردن بهترین پاسخ از آنها استفاده می‌نماید را به صورت زیر تعریف نمود [10]:

$$D_q^{\min} @ \left\{ n \in \{1, \dots, N\} : \exists \mathbf{p}_{-q} \in P_{-q}^{\text{pow}} \right. \\ \left. \text{such that } [WF_q(\mathbf{p}_{-q})] \neq 0 \right\} \quad (13)$$

در اینجا  $WF_q(\cdot)$  در (7) داده شده است و  $P_{-q}^{\text{pow}}$  به صورت  $P_{-q}^{\text{pow}} @ P_1^{\text{pow}} \times \dots \times P_{q-1}^{\text{pow}} \times P_{q+1}^{\text{pow}} \times \dots \times P_Q^{\text{pow}}$  تعریف می‌شود. ماتریس غیر منفی  $\mathbf{S}^{\max} \in \mathbb{R}_+^{Q \times Q}$  را نیز به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$\begin{aligned} & \text{maximize}_{\mathbf{p}_q} R_q(\mathbf{p}_q, \mathbf{p}_{-q}) \\ (J_1): & \quad \forall q \in \Omega \\ & \text{subject to: } \mathbf{p}_q \in P_q^{\text{pow}}, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} & \text{minimize}_{\mathbf{p}_q} \|\mathbf{p}_q - X_0\|_2^2 \\ (J_2): & \quad \forall q \in \Omega \\ & \text{subject to: } \mathbf{p}_q \in P_q^{\text{pow}}. \end{aligned} \quad (10)$$

اگر  $X_0$  را به صورت  $X_0 = -\text{insr}_q$  تعریف نماییم، آنگاه مسائل  $J_1$  و  $J_2$  دارای پاسخ یکتا و یکسانی می‌باشند.

بنابراین عملگر واترفیلینگ  $WF_q(\cdot)$  را می‌توان برای  $n = 1, \dots, N$  به صورت زیر تعریف نمود:

$$\begin{aligned} & [WF_q(\mathbf{p}_{-q})]_n @ [m_q - \text{insr}(\mathbf{p}_{-q})]_0^{p_q^{\text{peak}(n)}} \\ & @ [-\text{insr}(\mathbf{p}_{-q})]_{P_q^{\text{pow}}}. \end{aligned} \quad (11)$$

که در اینجا  $m_q$  طوری انتخاب می‌شود که محدودیت  $\mathbf{1}^T \mathbf{p}_q \leq P_q^{\text{ave}}$  را برآورده کند.  $[x]_a^b$  بیان‌کننده نرم اقلیدسی  $x$  در فاصله  $[a, b]$  می‌باشد. سطح آب  $m_q$  با استفاده از محدودیت  $\mathbf{1}^T \mathbf{p}_q \leq P_q^{\text{ave}}$  محاسبه می‌شود. با مقایسه 6 و 11 به سادگی می‌توان مشاهده نمود که تعادل نش استراتژی خالص بازی  $\mathbf{g}$  را می‌توان از به دست آوردن نقطه‌ی ثابت نگاشت تعریف شده در 11 محاسبه گردد:

$$\mathbf{p}_q^* = [-\text{insr}_q(\mathbf{p}_{-q}^*)]_{P_q^{\text{pow}}} \quad (12)$$

در حالت متداول و با توجه به سطح تداخلی که بازیکنان بر هم وارد می‌کنند، بازی  $\mathbf{g}$  ممکن است دارای چندین تعادل باشد [8]. بنابراین ما در قسمت آینده شرط کافی برای یکتایی در تعادل نش را مورد بررسی قرار می‌دهیم و به منظور دستیابی به این تعادل، یک الگوریتم گسترده را معرفی خواهیم کرد.

### 3- نتایج عددی

در این بخش شبیه‌سازی‌های کامپیوتری را برای درک بهتر الگوریتم بیان شده را نمایش می‌دهیم. این نتایج با میانگین گیری از 1000 اجرای مختلف الگوریتم به ازای کانال‌های مختلف به دست آمده است. بهره‌های کانال  $h_{rq}(n)$  و  $h_{qq}(n)$  با توزیع‌های گوسی مختلط متقارن دایره‌ای با میانگین صفر و واریانس یک و گوسی مختلط متقارن دایره‌ای با میانگین صفر و واریانس 2.5 می‌باشد و  $d_q^2(n) = 1 \forall n = 1, \dots, N$  است. همچنین  $P_q^{ave} = 5$  برای همه کاربرها یکسان بوده و  $P_q^{peak}(n) = 0.5$  برای تمام کانال‌ها یکسان می‌باشد.

در شکل 2، ما تعداد تکرارهای الگوریتم که برای یک کانال تصادفی اجرا شده است را نشان داده‌ایم. همان‌طور که مشاهده می‌شود بعد از گذشتن چند مرحله از اجرای الگوریتم مقادیر نرخ ارسال برای هر کدام از کاربرهای ثانویه به یک مقدار بهینه و یک تعادل در بازی همگرا می‌شود. در شکل 3 مشاهده می‌شود با افزایش تعداد کاربرها (که باعث افزایش تداخل در شبکه می‌شود) میانگین نرخ ارسال برای آنها کاهش می‌یابد. شکل 4 نشان می‌دهد که با افزایش بازه‌های فرکانسی و در نتیجه افزایش باند فرکانسی میانگین نرخ ارسال برای کاربرها افزایش می‌یابد. می‌توان در شکل 5 مشاهده نمود که با افزایش تعداد کاربرها در شبکه مدت زمان لازم برای همگرا شدن الگوریتم افزایش می‌یابد.

### 4- نتیجه‌گیری:

در این مقاله، ما بهینه‌سازی نرخ ارسال را در کانال تداخلی انتخابگر- فرکانسی گوسی در شبکه‌های رادیو شناخت‌گر با در نظر گرفتن محدودیت‌های توان ارسال و حداکثر توان ارسال در هر بازه فرکانسی را بررسی نمودیم و آن را به صورت یک بازی بدون همکاری مدل کردیم و مشاهده می‌شود الگوریتم بعد از مدتی از اجرای آن به یک پایدار همگرا می‌شود. به

$$\left[ \mathbf{S}^{\max} \right]_{rq} @ \begin{cases} \max_{n \in D_q \cap D_r} \frac{|h_{rq}(n)|^2}{|h_{qq}(n)|^2}, & \text{if } r \neq q \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

با استفاده از تعریف‌های گفته شده در بالا، الگوریتم واترفیلینگ تکرار شونده ناهمزمان هموار را به صورت زیر تعریف می‌کنیم (T بیان‌کننده شماره تناوب است):

### الگوریتم واترفیلینگ تکرار شونده ناهمزمان هموار

1- مقدار دهی اولیه:

$$t = 0, \mathbf{p}_q^{(0)} \leftarrow \text{any } \mathbf{p} \in P_q^{\text{pow}}, \forall q \in \Omega$$

2- برای  $t = 0$  to  $T$  انجام بده:

3- برای هر  $q \in \Omega$  محاسبه کن:

$$\mathbf{p}_q^{(t+1)} = \begin{cases} b_q \mathbf{p}_q^{(t)} + (1 - b_q) \text{WF}_q^{\text{pow}}(\mathbf{p}^{(t^*(t))}), & \text{if } t \in t_q \\ \mathbf{p}_q^{(t)} & \text{other wise.} \end{cases}$$

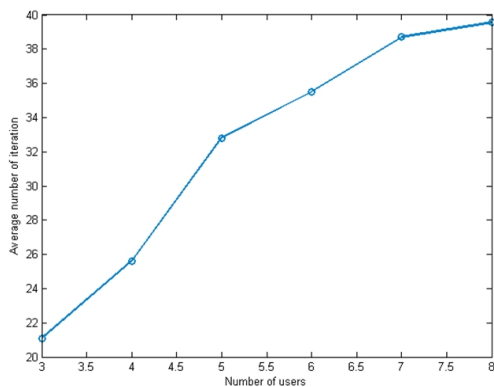
4- پایان

ضریب  $b_q \in [0, 1)$  را ضریب فراموشی<sup>21</sup> گویند. بزرگ بودن  $b_q$  بیان‌کننده بیشتر بودن حافظه برای کاربر  $q$  می‌باشد. همچنین اضافه کردن  $b_q$  باعث از بین رفتن خصوصیت همگرایی در الگوریتم نمی‌شود و حتی سرعت همگرایی را افزایش می‌دهد. بنابراین قضیه زیر را بیان می‌کنیم [10]:

قضیه ۲: فرض می‌کنیم شرط زیر برقرار باشد:

$$r(\mathbf{S}^{\max}) < 1 \quad (15)$$

که در آن  $r(\mathbf{S}^{\max})$  بیان‌کننده شعاع طیفی ماتریس  $\mathbf{S}^{\max}$  می‌باشد. سپس، اگر  $\infty \rightarrow T$ ، الگوریتم واترفیلینگ تکرار شونده ناهمزمان هموار بیان‌شده برای هر مقدار از شرایط اولیه قابل قبول، زمان‌های به روز رسانی و  $\{b_q\}_{q \in \Omega}$  که  $b_q \in [0, 1), \forall q \in \Omega$  همواره به یک تعادل نش یکتا همگرا می‌شود.



شکل 5: میانگین نرخ ارسال با افزایش بازه‌های فرکانسی

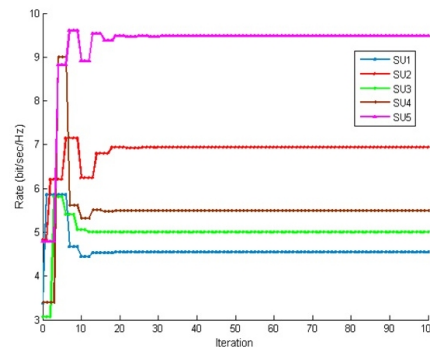
### سپاسگزاری

از همکاری و حمایت موسسه تحقیقات ارتباطات و فناوری اطلاعات در تهیه این مقاله سپاسگزاری می‌گردد.

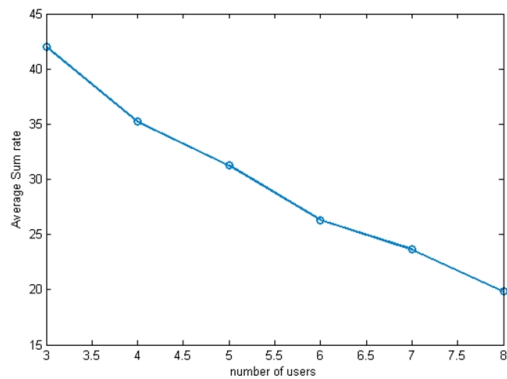
### 5- مراجع:

- [1] "Federal communications commission: spectrum policy task force report," *Federal Communications Commission ET Docket 02-135*, November 2002.
- [2] S. Haykin, "Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications," *IEEE J. Select. Areas Commun*, vol. 23, no. 2, pp. 201–220, 2005.
- [3] F. Beltran, J. Gutierrez, and J. Melus, "Technology and market conditions toward a new competitive landscape in the wireless access market," *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, no. 6, pp. 46–52, June 2010.
- [4] E. G. Larsson, E. A. Jorswieck, Lindblom, and R. Mochaourab, "Game theory and the flat fading Gaussian interference channel," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 26, no. 5, pp. 18–27, Sep. 2009.
- [5] A. Leshem and E. Zehavi, "Game theory and the frequency selective interference channel—A

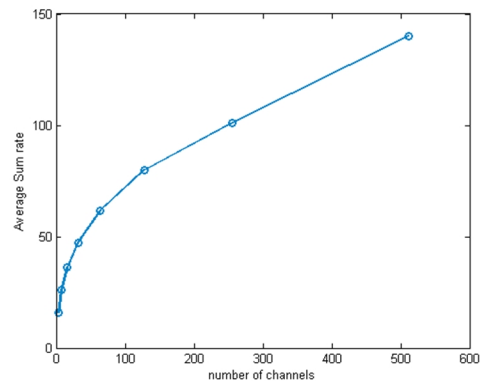
منظور همگرایی در به دست آوردن یک تعادل یکتا از الگوریتم واترفیلینگ تکرارشونده ناهمزمان هموار استفاده کردیم. همچنین شرایط وجود، یکتایی و همگرا شدن در تعادل نش را بررسی نمودیم.



شکل 2: نرخ ارسال بهینه برای کاربرها. محاسبات برای رسیدن به تعادل برای  $Q = 5$  و  $N = 16$  انجام شده است.



شکل 3: میانگین مجموع نرخ ارسال با افزایش تعداد کاربرها



شکل 4: میانگین مجموع نرخ ارسال با افزایش بازه‌های فرکانسی

- 1 -Spectrum Hole
- 2 Secondary Users
- 3 Primary Users
- 4 -Cognitive Radio
- 5 -Real Time
- 6 -Cannel State Information
- 7 -Heterogenous wireless technologies
- 8 -Centralized
- 9 Distributed Algorithm
- 10 Cooperative -
- 11 -Non-Cooperative
- 12 -Sequential Iterative Water-Filling Algorithm
- 13 -Nash Equilibrium
- 14 -Convex Set
- 15 -Smooth Asynchronous Iterative Water-Filling Algorithm
- 16 - Spectral Radius
- 17 - Pure Strategy
- 18 - Concave
- 19 - Compact

۲۰ - نرم اقلیدسی را به صورت زیر تعریف می کنیم:

$$[x]_a^b = a, \text{ if } x \leq a, [x]_a^b = x, \text{ if } a < x < b, \text{ and } [x]_a^b = b, \text{ if } b \leq x$$

- 21 - Forgetting Factor

- tutorial,” *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 26, no. 5, pp. 28–40, Sep. 2009.
- [6] W. Yu, G. Ginis, and J. M. Cioffi, “Distributed multiuser power control for digital subscriber lines,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 20, no. 5, pp. 1105–1115, June 2002.
- [7] M. J. Osborne and A. Rubinstein, *A Course in Game Theory*. MIT Press, 1999.
- [8] W. Yu, G. Ginis, and J. M. Cioffi, “Distributed multiuser power control for digital subscriber lines,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 20, no. 5, pp. 1105–1115, Jun. 2002.
- [9] G. Scutari, D. P. Palomar, and S. Barbarossa, “Optimal linear precoding strategies for wideband noncooperative systems based on game theory – part I: Nash equilibria,” *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 56, no. 3, pp. 1230–1249, March 2008.
- [10] G. Scutari, D. P. Palomar, and S. Barbarossa, “Optimal linear precoding strategies for wideband noncooperative systems based on game theory – part II: algorithms,” *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 56, no. 3, pp. 1250–1267, March 2008.
- [11] G. Scutari, D. P. Palomar, and S. Barbarossa, “Asynchronous iterative water-filling for Gaussian frequency-selective interference channels,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 54, no. 7, pp. 2868–2878, July 2008.
- [12] T. M. Cover and J. A. Thomas, *Elements of Information Theory*. New York: Wiley, 1991.
- [13] S. T. Chung, S. J. Kim, J. Lee, and J. M. Cioffi, “A game-theoretic approach to power allocation in frequency-selective Gaussian interference channels,” in Proc. 2003 IEEE Int. Symp. Information Theory (ISIT 2003), Lausanne, Switzerland, Jun. 2003, p. 316.

Archive