



دانشگاه صنعتی شریف  
دانشکده مهندسی برق

پایان نامه کارشناسی ارشد  
گرایش مخابرات سیستم

بررسی کارایی شبکه‌های همکاری محور از نظر توان مصرفی

نگارش:  
هادی گودرزی

استاد راهنما:  
دکتر محمدرضا پاکروان

شهریور 1387

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شریف  
دانشکده مهندسی برق

پایان نامه کارشناسی ارشد  
گرایش مخابرات سیستم

بررسی کارایی شبکه‌های همکاری محور از نظر توان مصرفی

نگارش:  
هادی گودرزی

استاد راهنما:  
دکتر محمدرضا پاکروان

شهریور 1387

تقديم به مادر و پدرم

## سپاس مخصوص پروردگار دو جهان است

از خداوند سپاسگذارم، که هر چه دارم و هر چه آموختم از سر لطف و عنایت او و قطره ای از علم بی کرانش بوده است.

پس از آن به رسم سپاسگذاری از نعمت های او، قدردان خانواده و مادر و پدر عزیزم هستم که در طول دوران زندگی و تحصیل همواره پشتیبان من بوده و تا این مرحله همراه و یاور من بوده اند.

بر خود لازم میدانم که از استاد گرامیم، دکتر پاکروان، تشکر ویژه نمایم که بدون راهنماییهای ارزشمند و پشتیبانی و همفکری ایشان در تمامی مراحل، اتمام این پروژه بصورت حاضر امکان پذیر نبود.

ضمناً از سروران و اساتید ارجمند، آقایان دکتر جواد صالحی، دکتر بابک حسین خلیج و دکتر پاییز عزمی که زحمت داوری این پروژه را بر عهده گرفته اند، صمیمانه قدردانی می شود.

همچنین از دوست خوبم سینا خالقی سپاسگزاری می کنم که در تمام دوره ی تحصیل در دانشگاه همراه و یاور من بوده است و از راهنمایی های او در انجام این رساله استفاده کرده ام. از دوستان خوبم احسان یزدیان، سید پویا شریعت پناهی، مسیح نیلچیان و امیرحسام صلواتی نیز بخاطر همفکری های شان تشکر می نمایم.

## چکیده

همکاری در شبکه اثر قابل توجهی بر کارایی کاربران و شبکه می‌گذارد. همکاری در شبکه‌های بی‌سیم منجر به نوعی دایورسیتی به نام دایورسیتی مشارکتی می‌شود. این تکنیک دایورسیتی نوع خاصی از دایورسیتی فضایی بشمار می‌آید. بنابراین با همکاری در شبکه‌های بی‌سیم می‌توانیم همانند انواع دیگر دایورسیتی توان ارسالی کاربران را برای رسیدن به شرایط دلخواه در شبکه کاهش دهیم. در این رساله ما الگوریتم مناسبی برای اختصاص توان و انتخاب مجموعه‌ی کاربران همکار در شبکه‌های دایورسیتی مشارکتی که از استراتژی تقویت و ارسال بهره می‌برند، ارائه کرده‌ایم که توان کل مورد نیاز برای ارسال را به مینیمم مقدار ممکن برای راضی کردن شرط احتمال خاموشی می‌رساند. برای این کار مسئله‌ی بهینه سازی را با پارامترهای جدیدی مدل کرده و آن را با روش KKT حل کرده‌ایم. برای انتخاب بهترین مجموعه‌ی کاربران همکار برای کاهش توان مورد نیاز ارسال نیز الگوریتمی با پیچیدگی بسیار کم طراحی کرده ایم و با شبیه‌سازی نشان داده‌ایم که نتایج این الگوریتم به نتایج جستجوی کامل بسیار نزدیک است. همچنین برای تعداد کاربران مشارکت کننده در ارسال حد بالایی بدست آورده‌ایم که همکاری با بیشتر از این تعداد کاربران بهینه نخواهد بود.

همکاری در شبکه‌های مشارکتی در بسیاری از حالات دوطرفه است. یکی از مهمترین مسائلی که در همکاری دوطرفه میان کاربران خودخواه در شبکه وجود دارد، انتخاب کاربران همکار است. تمام کاربران خودخواه شبکه برای ماکزیمم کردن کارایی خود برای بدست آوردن بهترین همکارها با هم رقابت می‌کنند. ما در این رساله به بررسی رفتار خودخواهانه در حالت اختصاص بهینه‌ی توان پرداخته و الگوریتمی برای انتخاب کاربر همکار بصورت خودخواهانه ارائه کرده‌ایم.

الگوریتم‌های ارائه شده برای اختصاص بهینه‌ی توان در حالت توان ثابت در کارهای گذشته نیاز به تکرار برای بدست آوردن جواب نهایی دارد. در این رساله الگوریتمی را برای اختصاص توان در این حالت ارائه کرده‌ایم که نیاز به تکرار ندارد و جوابی بسیار نزدیک به حالت بهینه دارد.

**کلمات کلیدی:** دایورسیتی مشارکتی، استراتژی تقویت و ارسال، اختصاص توان، انتخاب همکار، جفت کردن کاربران بصورت خودخواهانه.

## فهرست مطالب

### 1-مقدمه ای بر شبکه های مشارکتی بی سیم 1

- 1-1-1-مقدمه ..... 1
- 2-1-روشهای مختلف همکاری در شبکه های بی سیم ..... 7
- 1-2-1-استراتژی تقویت و ارسال ..... 7
- 2-2-1-استراتژی دیکد و ارسال ..... 10
- 3-2-1-مقایسه دو استراتژی یاد شده از لحاظ احتمال خاموشی ..... 11
- 3-3-1-اختصاص توان در شبکه های مشارکتی ..... 13
- 4-1-کاهش توان ارسال با استفاده از همکاری در شبکه های بی سیم ..... 16
- 5-1-انتخاب رله و انتخاب همکار در شبکه های مشارکتی بی سیم ..... 19

### 2- انتخاب بهینه همکار و اختصاص توان برای کاهش توان ارسالی 23

- 1-2-1-مقدمه ..... 23
- 2-2-مدل سیستم در نظر گرفته شده و پارامترهای بکاررفته ..... 24
- 3-2-مدل کردن رفتار احتمال خطا در استراتژی تقویت و ارسال ..... 26
- 4-2-تقسیم بهینه توان برای مینیمم کردن توان کل مصرفی کاربران ..... 29
- 5-2-حد بالای تعداد کاربران همکار ..... 33
- 6-2-الگوریتم انتخاب بهترین مجموعهی کاربران همکار ..... 37
- 1-6-2-روش انتخاب کاربر همکار در حالت  $m = 1$  ..... 39
- 2-6-2-روش انتخاب کاربر همکار در حالت  $m = 1$  ..... 41
- 3-6-2-الگوریتم انتخاب بهترین مجموعه ی کاربران همکار ..... 44

- 46.....7-2-حالت اختصاص مساوی توان در شبکه
- 46.....1-7-2-توان کل مورد نیاز در حالت پخش مساوی توان
- 48.....2-7-2-انتخاب مجموعه ی کاربران همکار در حالت اختصاص توان مساوی
- 51.....8-2-نتایج شبیه سازی
- 57.....3- همکاری بهینه دوطرفه**
- 57.....1-3-مقدمه
- 58.....2-3-دلایل انتخاب همکاری دوطرفه به جای همکاری چندطرفه
- 59.....3-3-توان مورد نیاز هر گره در همکاری دوطرفه در حالت بهینه
- 63.....4-3-ناحیه همکاری عادلانه
- 68.....5-3-الگوریتم انتخاب همکار به صورت عادلانه
- 70.....1-5-3-بیان الگوریتم
- 74.....2-5-3-اثبات همگرایی الگوریتم
- 79.....3-5-3-نتایج الگوریتم
- 82.....4-5-3-اثر استفاده از ناحیه همکاری عادلانه در الگوریتم ارائه شده

#### **4- اختصاص بهینه ی توان و انتخاب همکار در حالت توان ثابت 85**

- 85.....1-4-مقدمه
- 86.....2-4-اختصاص توان در شبکه های دایورسیتی مشارکتی در حالت توان ثابت
- 86.....1-2-4-بیان مسئله ی بهینه سازی
- 87.....2-2-4-راه حل های ارائه شده در کارهای قبلی
- 88.....3-2-4-راه حل پیشنهادی برای مسئله ی اختصاص توان در حالت توان ثابت
- 89.....4-2-4-بررسی نتایج اختصاص توان بهینه از روی شبیه سازی



92 ..... 3-4 همکاری دوطرفه در حالت توان ثابت

92 ..... 1-3-4 همکاری با یک کاربر همکار و نحوه انتخاب آن

94 ..... 2-3-4 نواحی همکاری عادلانه در حالت توان ثابت ارسال

## 5- جمع بندی و پیشنهادات پژوهشی 98

101 ..... ضمیمه «الف»

103 ..... ضمیمه «ب»

105 ..... ضمیمه «ج»

107 ..... ضمیمه «د»

109 ..... ضمیمه «ه»

111 ..... فهرست مراجع

## فهرست جداول

جدول 1-2 بهترین مجموعه های انتخابی در حالت های مختلف  $m$  ..... 54

جدول 2-2 بهترین مجموعه های انتخابی در حالت های مختلف  $m$  ..... 56

## فهرست شکل‌ها

- شکل 1-1 استراتژی تقویت و ارسال ..... 8
- شکل 2-1 استراتژی دیکد و ارسال ..... 10
- شکل 3-1 احتمال خاموشی با استراتژیهای مختلف (الف) در حالت رله نزدیک به مبدا (ب) در حالت رله نزدیک به مقصد ..... 12
- شکل 1-2 احتمال خاموشی و تقریبهای مختلف آن در SNR های مختلف ..... 29
- شکل 2-2 مقدار پارامتر  $\lambda i'$  در مکانهای مختلف کاربر رله ..... 33
- شکل 3-2 حدبالای تعداد بهینه کاربران در حالتهاى مختلف ..... 35
- شکل 4-2 حدبالای نرخ ارسال برای همکاری در حالتهاى قید احتمال خاموشی ..... 37
- شکل 5-2 مقدار توان کل نرمالیزه شده لازم در حالت  $m=1$  ..... 40
- شکل 6-2 نمودار گردشی الگوریتم انتخاب بهترین مجموعهی کاربران همکار ..... 45
- شکل 7-2 مقدار پارامتر  $\beta i$  برای مکانهای مختلف کاربران همکار در حالت EPA ..... 49
- شکل 8-2 نمودار گردشی الگوریتم انتخاب کاربر همکار در حالت اختصاص مساوی توان ..... 50
- شکل 9-2 مکان کاربران آمادهی همکاری ..... 51
- شکل 10-2 توان کل مورد نیاز با کاربران همکار  $n3, n17$  با استراتژیهای مختلف ..... 52
- شکل 11-2 توان کل مورد نیاز با کاربران همکار  $n3, n17, n7$  با استراتژیهای مختلف ..... 53
- شکل 12-2 توان مورد نیاز سیستم در حالتهاى مختلف انتخاب کاربران همکار ..... 55
- شکل 1-3 مقدار پارامتر  $\theta 1$  برای مکانهای مختلف گرهی 2 ..... 61
- شکل 2-3 نسبت توان رلههای گرههای 1 و 2 برای مکانهای مختلف گره 2 ..... 63
- شکل 3-3 نسبت کاهش توان کل به توان حالت بدون همکاری و ناحیه همکاری عادلانه ..... 66
- شکل 4-3 نسبت کاهش توان کل به توان حالت بدون همکاری و ناحیه همکاری عادلانه ..... 67
- شکل 5-3 نسبت کاهش توان کل به توان حالت بدون همکاری در حالت EPA و ناحیه همکاری عادلانه ..... 67
- شکل 6-3 نسبت کاهش توان کل به توان حالت بدون همکاری در حالت EPA و ناحیه همکاری عادلانه ..... 68
- شکل 7-3 نمودار گردشی الگوریتم انتخاب همکار به صورت عادلانه ..... 72

- 75..... شکل 3-8 حلقه 3 کاربره .....
- 76..... شکل 3-9 گرهای با درخواست سری .....
- 77..... شکل 3-10 حلقه n کاربره .....
- 78..... شکل 3-11 ملاک انتخاب همکار روی خط .....
- 78..... شکل 3-12 حالت اولیهای انتخاب همکار روی خط .....
- 80..... شکل 3-13 40 کاربر در اطراف گره مقصد .....
- 80..... شکل 3-14 اولین درخواست کاربران .....
- 81..... شکل 3-15 حالت نهایی در حالت  $Pou - th = 5e - 3$  و  $R = 2bit/s/Hz$  .....
- شکل 3-16 حالت نهایی انتخاب همکار (الف) حالت  $Pou - th = 1e - 3$  و  $R = 1bit/s/Hz$  (ب)
- 82..... حالت 3-17  $Pou - th = 1e - 3$  و  $R = 4bit/s/Hz$  .....
- 83..... شکل 3-17 حالت اولیه با در نظر گرفتن ناحیه همکاری عادلانه .....
- 84..... شکل 3-18 میانگین تعداد درخواستهای ارائه شده برای یک گره در الگوریتم انتخاب همکار .....
- 84..... شکل 3-19 تعداد کل مراحل مورد نیاز در الگوریتم انتخاب همکار .....
- 90..... شکل 4-1 احتمال خاموشی بر اساس روشهای مختلف اختصاص توان در حالت یک کاربر همکار .....
- 91..... شکل 4-2 احتمال خاموشی بر اساس روشهای مختلف اختصاص توان در حالت دو کاربر همکار .....
- 91..... شکل 4-3 احتمال خاموشی بر اساس روشهای مختلف اختصاص توان در حالت سه کاربر همکار .....
- 93..... شکل 4-4 نرمالیزه شدهی احتمال خاموشی برای مکانهای مختلف گرهی همکار .....
- 95..... شکل 4-5 سود دوطرف همکاری از ارسال با رله و ناحیهی همکاری عادلانه .....
- 96..... شکل 4-6 سود دوطرف همکاری از ارسال با رله و ناحیهی همکاری عادلانه .....
- 96..... شکل 4-7 سود دوطرف همکاری از ارسال با رله و ناحیهی همکاری عادلانه در حالت توان مساوی .....

## 1- مقدمه‌ای بر شبکه‌های مشارکتی بی‌سیم

### 1-1- مقدمه

شبکه‌های بی‌سیم<sup>1</sup> در سالهای اخیر حجم گسترده‌ای از فعالیت‌های تحقیقاتی را به خود معطوف کرده‌اند. کاربرد این شبکه‌ها نیز در سالهای اخیر روند رو به رشدی داشته است. شبکه‌های تلفن همراه<sup>2</sup>، شبکه‌های محلی<sup>3</sup> بی‌سیم 802.11 و شبکه‌های دسترسی بی‌سیم غیر متحرک<sup>4</sup> نمونه‌های بسیار مهم این شبکه‌ها هستند که نقش مهمی در زندگی روزمره‌ی ما ایفا می‌کنند. یکی از مهمترین دلایل استفاده‌ی روزافزون از شبکه‌های بی‌سیم، سرعت راه‌اندازی بالا و سهولت کاربرد آنها نسبت به شبکه‌های سیمی<sup>5</sup> است.

---

<sup>1</sup> *Wireless networks*

<sup>2</sup> *Mobile phone*

<sup>3</sup> *Local Area Network (LAN)*

<sup>4</sup> *Fixed Wireless Access*

<sup>5</sup> *Wired networks*

یکی از مهمترین مشکلات کانال‌های بی‌سیم محوشدگی<sup>6</sup> در این کانال‌ها است. محوشدگی در کانال‌های بی‌سیم براساس مشخصات آن به محوشدگی آرام<sup>7</sup> یا سریع<sup>8</sup> و محوشدگی گزینشی فرکانس<sup>9</sup> و غیر گزینشی فرکانس<sup>10</sup> تقسیم می‌شود. مهمترین ابزار مقابله با محوشدگی در کانال‌های بی‌سیم استفاده از تکنیک دایورسیتی<sup>11</sup> است. دایورسیتی از نظر نحوه‌ی ایجاد به دایورسیتی زمانی<sup>12</sup>، فرکانسی<sup>13</sup> و فضایی<sup>14</sup> تقسیم می‌شود [1].

دایورسیتی زمانی به دایورسیتی‌ای گفته می‌شود که توسط ارسال اطلاعات در چند زمان مختلف ایجاد می‌شود. برای ایجاد این دایورسیتی، زمان‌های مختلف ارسال باید به گونه‌ای انتخاب شوند که ضرایب کانال در این بازه‌های زمانی مستقل از هم باشند. با توجه به اینکه در کانال‌های بی‌سیم آرام، می‌توان ضرایب کانال در یک بازه بزرگ (نسبت به طول بسته‌ی ارسال) را ثابت در نظر گرفت، ایجاد دایورسیتی زمانی در این کانال‌ها مقرون به صرفه نخواهد بود. اما برای دستیابی به دایورسیتی زمانی در کانال‌های بی‌سیم محوشدگی سریع، می‌توان اطلاعات را چندین بار با فاصله‌ی زمانی بیشتر از زمان همبستگی کانال<sup>15</sup> ارسال نمود که این کار ضامن استقلال ضرایب کانال در ارسال‌های متفاوت است.

دایورسیتی فرکانسی، مشابه دایورسیتی زمانی، توسط ارسال اطلاعات در چند فرکانس مختلف ایجاد می‌شود. برای این نوع دایورسیتی نیز باید فاصله کانال‌های فرکانسی به اندازه‌ای باشد که ضرایب کانال در فرکانس‌های مختلف ارسال از هم مستقل باشند. در این دایورسیتی نیز به علت آنکه در کانال‌های بی‌سیم

---

<sup>6</sup> Fading

<sup>7</sup> Slow fading

<sup>8</sup> Fast fading

<sup>9</sup> Frequency selective fading

<sup>10</sup> Frequency non-selective fading

<sup>11</sup> Diversity

<sup>12</sup> Time diversity

<sup>13</sup> Frequency diversity

<sup>14</sup> Space diversity

<sup>15</sup> Chanel Coherence Time

محوشدگی غیر گزینشی فرکانس، پهنای فرکانسی بزرگی از کانال ضرایب همبسته دارند، نمی توانیم به سادگی دایورسیتی فرکانسی را برای این کانال‌ها ایجاد کنیم. در عوض در کانال‌های گزینشی فرکانس می‌توانیم به سادگی و با قرار دادن اطلاعات در فواصل فرکانسی بیشتر از پهنای باند همبستگی کانال<sup>16</sup> به دایورسیتی فرکانسی دست یابیم.

یکی دیگر از انواع دایورسیتی، دایورسیتی فضایی است. در این نوع دایورسیتی نیز کانال‌های ایجاد کننده-ی دایورسیتی باید مستقل از هم باشند. در دایورسیتی فضایی، از آرایه‌ای از آنتن‌ها استفاده می‌کنیم که برای راضی کردن شرط استقلال کانال‌ها، فاصله‌ی آنها باید از مقداری مشخص بزرگتر باشد. این فاصله برای آنتن‌های بی‌سیم متحرک در حد یک چهارم طول موج ارسالی آنهاست. یعنی اگر دو آنتن بی‌سیم متحرک در فاصله‌ای بیشتر از یک چهارم طول موج ارسالی قرار گرفته باشند، کانال‌های دیده شده‌ی این آنتن‌ها از هم مستقل خواهند بود و ارسال با آنها می‌تواند دایورسیتی فضایی ایجاد کند. این فاصله برای آنتن‌های ثابتی که در مکان‌های بلند نصب می‌شوند، خیلی بیشتر از این مقدار است چون در ارتفاع پایین انعکاس دهنده‌های بیشتری وجود دارد و با یک تغییر مکان کوچک کانال نقطه‌ی جدید مستقل از کانال نقطه قبلی می‌شود [2].

هنگامی که در یک سیستم مخابراتی یک داده از طریق چندین کانال مستقل دریافت شود، ساختارهای گیرنده متفاوتی را برای استخراج داده‌ی ارسالی از این سیگنال‌های دریافتی می‌توان به کار برد [1]. به عنوان مثال بهترین کارایی (ماکزیمم SNR) را گیرنده‌های Maximum Ratio Combining (MRC) ایجاد می‌کنند که با داشتن ضرایب کانال در تمام شاخه‌ها، داده‌های کانال‌های مختلف را به نحوی با هم تلفیق می‌کنند که SNR نهایی ماکزیمم شود. شکل‌های ساده‌تری از این گیرنده نیز وجود دارد که در آنها

---

<sup>16</sup> Chanel Coherence Bandwidth

سیگنال‌های رسیده از کانالهای مختلف با نسبت مساوی با هم تلفیق می‌شوند یا اینکه بهترین سیگنال رسیده از کانالهای مستقل را به عنوان سیگنال دریافتی در نظر گرفته و از آن برای استخراج داده ارسالی استفاده می‌کنند.

در روش های مختلف دایورسیتی به علت مستقل بودن کانال‌های دریافتی امکان قرار گرفتن برآیند سیگنال‌های دریافتی در حالت محوشدگی کاهش می‌یابد. برای مثال اگر احتمال خطای سیستم بدون دایورسیتی در کانال با محوشدگی رایلی<sup>۱۷</sup>، متناسب با عکس SNR ارسالی باشد، با بکار بردن دایورسیتی و با فرض یکسان بودن SNR های کانال‌های مختلف دایورسیتی، احتمال خطای دریافتی با عکس SNR کانال‌ها به توان تعداد سیگنال‌های ارسالی مستقل متناسب خواهد بود. به تعداد کانال‌های ارسال مستقل، مرتبه‌ی دایورسیتی<sup>۱۸</sup> نیز می‌گویند. برای مثال اگر مرتبه‌ی دایورسیتی برابر 2 باشد، برای اینکه احتمال خطای سیستم را ده مرتبه کوچک کنیم، با دایورسیتی نیاز داریم که SNR ارسالی را حدوداً 3/2 برابر کنیم اما در سیستم بدون دایورسیتی باید SNR ارسالی را 10 برابر کنیم. بر این اساس برای رسیدن به یک قید احتمال خطای متوسط، در سیستم با دایورسیتی میزان مصرف توان ارسالی کاهش چشمگیری خواهد داشت.

یکی از راه‌های دستیابی به دایورسیتی، مشارکت است. این دایورسیتی که به دایورسیتی مشارکتی<sup>۱۹</sup> معروف است بر اساس مشارکت کاربران مختلف در شبکه ایجاد می‌شود. مبحث همکاری در شبکه‌های بی‌سیم به نوعی ادامه مباحث مطرح شده در کانال‌های رله<sup>۲۰</sup> است که نخستین بار توسط کاور<sup>۲۱</sup> و

---

<sup>17</sup> Rayleigh

<sup>18</sup> Diversity order

<sup>19</sup> Cooperative diversity

<sup>20</sup> Relay channel

<sup>21</sup> T. M. Cover



الجمال<sup>۲۲</sup> [3] در دهه 1970 مطرح شد. بحث های کانال رله که به موضوع بکار بردن یک رله برای ارسال مجدد اطلاعات می پرداخت، در ابتدا منحصر به کانال های گوسی بود اما به تدریج این مبحث به کانال های بی سیم با خاصیت محوشدگی نیز تعمیم یافت تا اینکه آژنگ [4] مسئله دایورسیتی مشارکتی را مطرح نمود.

یکی از اولین و تاثیرگذارترین کارهای انجام شده در زمینه دایورسیتی مشارکتی و الگوریتم های آن رساله دکتری لینمن<sup>۲۳</sup> [5] است که در سال 2002 انجام شده است. در دایورسیتی مشارکتی، برای ارسال هر گره، یک یا چند گرهی همکار با در اختیار قرار دادن آنتن هایشان همانند یک آرایه مجازی آنتن ها رفتار می کنند. به دلیل آنکه فاصله آنتن کاربرهای مختلف از فاصله مورد نیاز برای استقلال کانال ها در سیستم دایورسیتی فضایی بیشتر است، این آرایه های آنتن ها مانند دایورسیتی فضایی عمل می کند. برای مطالعه ی ابتدایی الگوریتم ها و خصوصیات شبکه های دایورسیتی مشارکتی می توانید به مراجع [6]، [7]، [8] و [9] مراجعه کنید.

شبکه های مشارکتی بی سیم (دایورسیتی مشارکتی) تفاوت هایی با کانال رله ای دارند. در شبکه های مشارکتی، برخلاف کانال رله متداول، هر دو طرف همکاری اقدام به رله کردن اطلاعات می کنند. همچنین بحث غالب کانال های رله افزایش ظرفیت یا افزایش نرخ قابل حصول در سیستم با بکارگیری رله بوده است اما با توجه به اینکه همکاری در شبکه های بی سیم، دایورسیتی را برای کاربران ایجاد می کند، بحث های گسترده تری را در این شبکه ها مطرح کرده است. یکی از مهم ترین این بحث ها، کاهش توان ارسال کاربران با استفاده از سیستم های دایورسیتی مشارکتی است.

---

<sup>22</sup>A. El Gamal

<sup>23</sup>J. N. Laneman

در این پروژه، ما به مبحث توان در سیستم دایورسیتی مشارکتی پرداخته‌ایم و این مبحث را از جنبه‌های گوناگون مورد بررسی قرار داده‌ایم. همانطور که اشاره شد وجود مرتبه‌هایی از دایورسیتی باعث می‌شود که برای راضی کردن شرطی روی ارسال (مانند قید احتمال خطا<sup>۲۴</sup> یا قید احتمال خاموشی<sup>۲۵</sup>) نیاز به توان ارسالی کمتری داشته باشیم. این میزان صرفه جویی در توان ارسالی در شبکه‌های بی‌سیم متحرک که باتری‌های محدودی دارند باعث افزایش طول عمر گره‌های بی‌سیم<sup>۲۶</sup> می‌شود. بر این اساس ما نحوه پخش بهینه توان میان کاربران مختلف (در یک ارسال از مبدا به مقصد با تعدادی گره‌ی رله‌کننده همکار) و همچنین حداقل توان مورد نیاز برای راضی کردن احتمال خاموشی را بدست آورده‌ایم.

به علت کیفیت متفاوت کانال‌های مختلف بی‌سیم در شبکه (به علت محوشدگی و اثر سایه‌ای<sup>۲۷</sup>) استراتژی انتخاب کاربران همکار اثر بسیار مهمی بر روی کارایی سیستم دایورسیتی مشارکتی می‌گذارد. به همین دلیل مسئله انتخاب کاربران همکار و همچنین تعداد کاربران همکار برای کاهش توان مورد نیاز برای ارسال نیز در این پروژه بررسی شده است.

مسئله انتخاب خودخواهانه کاربران برای حداکثر کردن سود حاصله از مشارکت خودشان نیز مسئله‌ی بسیار مهمی است که در شبکه‌هایی که گره‌های خودخواه در آنها وجود دارد، نقش بسیار مهمی در تعیین کاربران همکار دارد. بر این اساس این مسئله نیز در این پروژه بررسی و الگوریتم مناسبی برای انتخاب کاربران همکار در حالت خودخواهانه ارائه شده است.

در ادامه‌ی این فصل، ابتدا به بررسی دو استراتژی متداول همکاری می‌پردازیم و آنها را از نظر کارایی با هم مقایسه می‌کنیم. سپس به بررسی سرفصل‌های مهم مبحث توان در سیستم‌های دایورسیتی مشارکتی پرداخته و مقالات مهم این سرفصل‌ها را نیز به اختصار بیان می‌کنیم.

---

<sup>24</sup> Error probability

<sup>25</sup> Outage probability

<sup>26</sup> Wireless node

<sup>27</sup> Shadowing effect

## 1-2-1- روشهای مختلف همکاری در شبکه‌های بی‌سیم

از ابتدای مطرح شدن مبحث کانال رله، روش‌های مختلفی برای رله کردن اطلاعات مطرح شده است. این روشها در شبکه‌های مشارکتی بی‌سیم نیز مطرح و بررسی شده‌اند. این روشها هر کدام پیچیدگی-های خاص خودشان را دارند و در شرایط مختلف کاربر ارسال کننده اطلاعات و کاربر رله کننده هر کدام کارایی متفاوتی دارند.

روشهایی از قبیل تقویت و ارسال<sup>۲۸</sup>، فشرده کردن و ارسال<sup>۲۹</sup>، تخمین و ارسال<sup>۳۰</sup>، دیکد و ارسال<sup>۳۱</sup> و مشارکت کد شده<sup>۳۲</sup>، روشهایی هستند که برای کانال رله به وجود آمده‌اند و در کانالهای بی‌سیم رله نیز توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. با توجه به گستردگی بررسی و اهمیت، ما در اینجا تنها دو روش تقویت و ارسال و دیکد و ارسال را به طور مختصر شرح می‌دهیم.

### 1-2-1- استراتژی تقویت و ارسال

یکی از روشهای مرسوم رله کردن روش تقویت و ارسال است. در این روش ابتدا کاربر مبدا ارسال خود را انجام می‌دهد و بعد از آن گره‌ای که وظیفه رله کردن اطلاعات را دارد (با توجه به خاصیت broad cast در کانال بی‌سیم) اطلاعات گره مبدا را که دریافت کرده است بدون آنکه هیچ پردازشی بر روی آن انجام دهد، تقویت و مجدداً برای گره مقصد ارسال می‌کند.

با توجه به اینکه گره رله نیاز به هیچ نوع پردازشی بر روی اطلاعات دریافتی از گره مبدا ندارد، فاصله این گره تا گره مبدا می‌تواند زیاد باشد. این مسئله باعث برتری این الگوریتم رله کردن بر الگوریتم‌هایی می‌شود که نیاز به دیکد اطلاعات کاربر مبدا در گره رله دارند (مانند دیکد و ارسال و ارسال کد شده).

---

<sup>28</sup> Amplify and Forward

<sup>29</sup> Compress and Forward

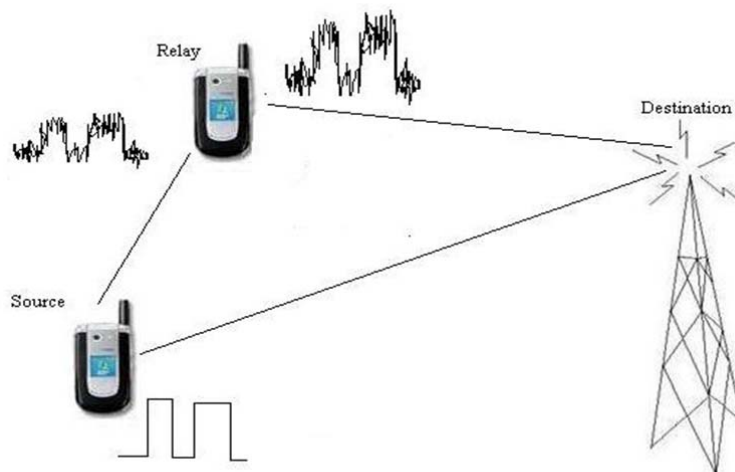
<sup>30</sup> Estimate and Forward

<sup>31</sup> Decode and Forward

<sup>32</sup> Coded Cooperation

این به آن معنی است که اگر گره همکار یا گره رله فاصله زیادی تا گرهی مبدا داشته باشد، الگوریتمهای ذکر شده کارایی قابل قبولی نخواهند داشت.

یکی از معایب این الگوریتم آن است که در این الگوریتم، گرهی رله، نویزی که با سیگنال اطلاعات گره مبدا در هنگام دریافت اطلاعات مبدا جمع شده است را به همراه اطلاعات دریافتی تقویت و برای گره مقصد ارسال می‌کند. این نویز باعث افت کارایی این الگوریتم از نظر SNR دریافتی در گیرنده خواهد شد. در شکل 1-1 عملکرد این استراتژی در حالت وجود یک کاربر رله نشان داده شده است.



شکل 1-1 استراتژی تقویت و ارسال

SNR دریافتی در گیرنده این سیستم ارتباط زیادی با نوع گیرنده به کار رفته در سیستم دارد. در این رساله برای تمام بررسی‌ها گیرنده MRC در طرف گیرنده فرض شده است. در این گیرنده سیگنالهای دریافتی از شاخه‌های مختلف (در اینجا از گره‌های مختلف) به صورتی با هم تلفیق می‌شوند که SNR نهایی ماکزیمم شود.

اگر فرض کنیم که کانال دارای محوشدگی آرام باشد، به این معنا که ضریب کانال در طول ارسال یک بسته‌ی اطلاعات ثابت بماند، اگر ضرایب کانال میان مبدا و مقصد، مبدا و کاربر رله و کاربر رله و

مقصد را به ترتیب با  $h_1$ ,  $h_{1r}$  و  $h_r$  نشان دهیم، سیگنال دریافتی از ارسال کاربر مبداء در مقصد و کاربر رله از روابط زیر به دست می‌آیند.

$$y_1 = h_1 \sqrt{P_s} m_1 + n_1 \quad (1-1)$$

$$y_{1r} = h_{1r} \sqrt{P_s} m_1 + n_{1r} \quad (2-1)$$

که در آنها  $m_1$  پیام ارسالی کاربر مبداء را نشان می‌دهد که دارای انرژی واحد است. همچنین  $n_r$  و  $n_{1r}$  نویزهای دریافتی در گره‌های مقصد و رله هستند.

براین اساس سیگنال دریافتی دوم در مقصد که از ارسال مجدد سیگنال تقویت شده مبداء به دست می‌آید را می‌توان به شکل زیر نشان داد.

$$y_r = h_r \sqrt{\frac{P_r}{P_s + N_{1r}}} y_{1r} + n_r = h_r h_{1r} \sqrt{\frac{P_r}{P_s + N_{1r}}} \sqrt{P_s} m_1 + h_r \sqrt{\frac{P_r}{P_s + N_{1r}}} n_{1r} + n_r \quad (3-1)$$

بنابراین با توجه به نحوه عملکرد گیرنده MRC، SNR دریافتی به شکل عبارت (4-1) خواهد بود.

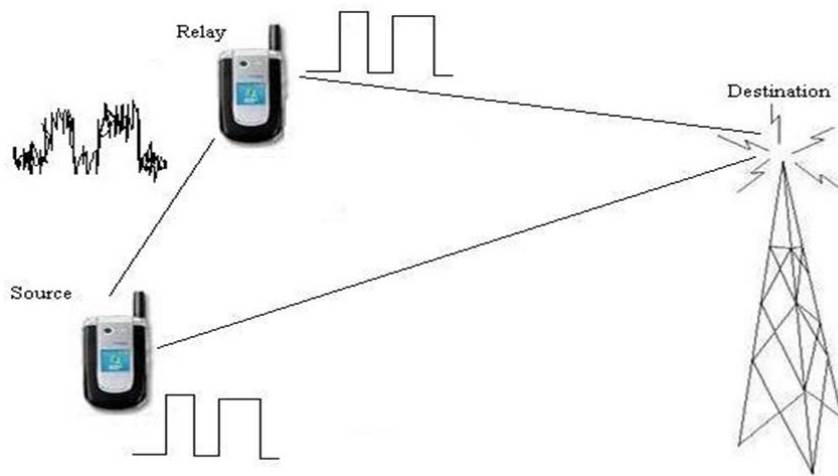
$$SNR_{AF} = \frac{P_s |h_1|^2}{N_1} + \frac{\frac{P_s |h_{1r}|^2 P_r |h_r|^2}{N_{1r} N_r}}{\frac{P_s |h_{1r}|^2}{N_{1r}} + \frac{P_r |h_r|^2}{N_r} + 1} \quad (4-1)$$

عبارت (4-1) که SNR کانال بی‌سیم با وجود یک رله در سیستم را نشان می‌دهد، عبارت بسیار مهمی است که ما در فصل بعد از تعمیم آن به حالت  $m$  کاربر رله کننده استفاده خواهیم کرد. برای جزئیات بیشتر این محاسبه می‌توانید مرجع [8] را مطالعه نمایید.

یکی از مهمترین مسائل در این استراتژی رله کردن، مسأله مرتبه‌ی دایورسیتی است. لینمن در [8] اثبات کرده است که این استراتژی مرتبه کامل دایورسیتی را که در حالت یک کاربر رله برابر 2 است، را به دست می‌آورد.

## 1-2-2- استراتژی دیکد و ارسال

یکی از قدیمی‌ترین روشهای همکاری کاربران مختلف در شبکه‌های بی‌سیم، استراتژی دیکد و ارسال است. مسیریابی‌های چندپرسی که یکی از مهمترین مباحث شبکه‌های بی‌سیم بوده است به نوعی از استراتژی دیکد و ارسال استفاده می‌کند. در این استراتژی رله کردن، گرهی رله اطلاعات کاربر مبدا را دیکد کرده و آن را مجدداً برای مقصد ارسال می‌کند. در شکل 1-2 عملکرد این استراتژی در حالت وجود یک کاربر رله نشان داده شده است.



شکل 1-2 استراتژی دیکد و ارسال

یکی از مهمترین مزایای این استراتژی سادگی پیاده‌سازی آن است. این به آن دلیل است که این استراتژی نیاز به هیچ تجهیزات جدیدی برای پیاده‌سازی ندارد و در شبکه حال حاضر نیز اگر گیرنده مناسب را در مقصد قرار دهیم، قادر خواهیم بود این استراتژی را پیاده‌سازی کنیم. از طرف دیگر این استراتژی نمی‌تواند به مرتبه دایورسیتی کامل برسد و آن به این دلیل است که گرهی که عمل رله را انجام می‌دهد ممکن است اطلاعاتی که می‌خواهد دیکد کند را از کانال مناسبی دریافت نکرده باشد و این باعث می‌شود که عمل دیکد یا انجام نشود و یا اینکه با خطا انجام شود که هر دو باعث می‌شود مرتبه دایورسیتی به مرتبه کامل دایورسیتی این حالت نرسد. به علت این مشکل، این استراتژی در حالتی که

گره رله کننده فاصله‌ای زیاد (در مقایسه با فاصله فرستنده و گیرنده) با گره فرستنده داشته باشد، کارایی مناسبی نخواهد داشت.

بر این اساس اگر گره رله کننده اطلاعات گره مبداء را به صورت کامل دریافت کند و آن را دیکد و دوباره ارسال کند، SNR به دست آمده در گیرنده MRC به شکل عبارت (5-1) خواهد بود.

$$SNR_{DF-Conditional} = \frac{P_s|h_1|^2}{N_1} + \frac{P_r|h_r|^2}{N_r} \quad (5-1)$$

### 1-2-3- مقایسه دو استراتژی یاد شده از لحاظ احتمال خاموشی

یکی از مهمترین معیارهای بررسی یک سیستم بی سیم احتمال خاموشی است [2]. این معیار برای محاسبه ظرفیت کانالهای بی سیم (با یک تعریف خاص) نیز استفاده می‌شود. با توجه به اینکه این معیار مستقل از نوع کدینگ و مدولاسیون به کار گرفته شده در سیستم بی سیم است و تنها به ساختار گیرنده و فرستنده و شرایط کانال بستگی دارد، برای بررسی سیستمهایی همچون سیستمهای مشارکتی استفاده فراوان دارد. برای بیان تعریفی از احتمال خاموشی باید ابتدا تعریفی از مقدار اطلاعات به دست آمده از یک ارسال ارائه کنیم. عبارت (6-1) مقدار اطلاعات دریافتی از یک ارسال را مشخص می‌کند.

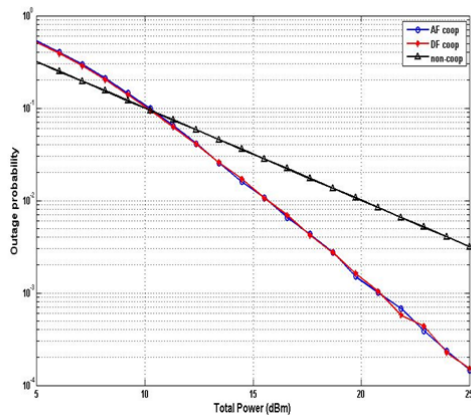
$$I = \log(1 + SNR) \quad (6-1)$$

بنابر این تعریف می‌توانیم احتمال خاموشی که احتمال آن است که مقدار اطلاعات به دست آمده از ارسال کمتر از نرخ ارسال اطلاعات باشد، را با عبارت (7-1) بیان کنیم.

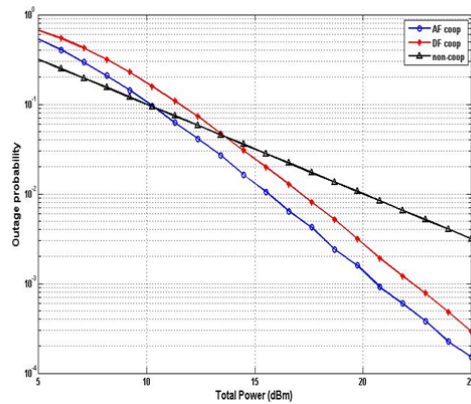
$$P_{out} = Prob\{I < R\} = Prob\{\log(1 + SNR) < R\} = Prob\{SNR < 2^R - 1\} \quad (7-1)$$

برای نشان دادن تفاوت دو استراتژی‌ای که در زیربخشهای قبلی به آنها اشاره کردیم برای دو حالت رله بسیار نزدیک به مبداء و رله بسیار نزدیک به مقصد، احتمال خاموشی را در این استراتژی‌ها به دست

آورده و آنها را در شکل 1-3 ترسیم نموده‌ایم. در این شبیه‌سازی‌ها فاصله مبدا تا مقصد 100 متر و توان نویز  $10^{-7}$  وات است. همچنین توان ارسالی گره مبدا و گره رله یکسان می‌باشد. برای به دست آوردن احتمال خاموشی در این حالتها از مدل کانال ریلی با اثر چندمسیری<sup>33</sup> با مرتبه‌ی افت 2 استفاده کرده‌ایم.



(الف)



(ب)

شکل 1-3 احتمال خاموشی با استراتژی‌های مختلف (الف) در حالت رله نزدیک به مبدا (ب) در حالت رله نزدیک به مقصد

در این شکل‌ها دیده می‌شود که احتمال خاموشی این دو استراتژی در حالت رله نزدیک به مشابه هم است و تنها به علت اینکه در استراتژی تقویت و ارسال نویز دریافت شده در رله تقویت و مجدداً همراه سیگنال ارسال می‌شود، احتمال خاموشی به دست آمده با این استراتژی کمی بیشتر است. اما در حالت رله نزدیک به مقصد دیده می‌شود که استراتژی دیکد و ارسال عملکرد ضعیف‌تری نسبت به استراتژی تقویت و ارسال دارد.

<sup>33</sup> Multi path



### 1-3- اختصاص توان در شبکه‌های مشارکتی

یکی از مهمترین خصوصیات شبکه‌های بی‌سیم متحرک، محدود بودن انرژی ذخیره شده در باتری آنها است. بسیاری از دستگاههای متحرک بی‌سیم مانند گوشی‌های تلفن همراه باتریهایی دارند که می‌تواند فعالیت را برای مدت زمان محدودی تضمین نماید. به این دلیل سیستم‌هایی که در شبکه‌های بی‌سیم متحرک به کار گرفته می‌شوند باید نهایت دقت را در مصرف توان باتری کاربر داشته باشند. مسأله توان در بعضی شبکه‌های بی‌سیم مانند شبکه حسگرهای بی‌سیم<sup>34</sup> تا اندازه‌ای اهمیت دارد که به عنوان یکی از مهمترین قیده‌های تمام الگوریتم‌های این شبکه‌ها لحاظ می‌شود.

اهمیت توان در شبکه‌های بی‌سیم در هنگام استفاده از همکاری در این شبکه‌ها باعث شد موضوع مهمی با نام اختصاص توان میان کاربران ایجاد شود. این مبحث به بررسی نحوه پخش توان میان کاربران مختلف، مقدار توان لازم برای ارسال اطلاعات و مقدار توان لازم برای رله کردن اطلاعات کاربر همکار می‌پردازد.

اولین و ساده‌ترین نحوه اختصاص توان میان کاربران همکار، اختصاص مساوی توان میان آنها است. این شکل ساده اختصاص توان که ریشه در بررسی کانالهای رله در حالت گوسی و کانالهای بی‌سیم ثابت دارد، مقداری از منابع شبکه را به هدر می‌دهد. این مقدار به هدر رفته توان می‌تواند باعث کاهش طول عمر کاربران در سیستم شود و ممکن است بتوان با اختصاص بهینه آن، با هزینه کمتری، سود بیشتری بدست آورد.

همانطور که بیان شد، با توجه به سابقه کانالهای رله که برای افزایش ظرفیت کانالها پایه گذاری شده بودند، شبکه‌های مشارکتی بی‌سیم نیز با این هدف به عرصه تحقیقات راه پیدا کردند. افزایش ظرفیت در

---

<sup>34</sup> *Wireless sensor network*

کانالهای بی‌سیم به معنای کاهش احتمال خاموشی است. به این دلیل اولین کارهای انجام شده در مسئله اختصاص توان در شبکه‌های همکاری محور بی‌سیم بر روی اختصاص یک مقدار توان ثابت برای کاهش احتمال خاموشی و به دنبال آن افزایش نرخ قابل حصول از کانال بیسیم متمرکز شده بود.

یکی از قدیمی‌ترین مقاله‌هایی که به بررسی نحوه اختصاص یک توان ثابت میان کاربران برای مینیمم کردن احتمال خاموشی پرداخته است، مرجع [10] است. در این مقاله به بررسی نحوه اختصاص توان در استراتژی دیکد و ارسال پرداخته شده است. از آنجا که شکل بسته‌ای نمی‌توان برای SNR استراتژی دیکد و ارسال ارائه کرد، جواب مسأله بهینه‌سازی که هدف آن مینیمم کردن احتمال خاموشی ارسال کاربر مبداء با کمک کاربرهای رله همکار است، نمی‌تواند جواب کاملاً بسته‌ای داشته باشد. از این رو این مقاله سعی در استفاده از روشهای تجربی و بر مبنای سیستمهای گذشته داشته است. در این مقاله پیشنهاد شده است که بر اساس مشاهداتی که از مقدار زیادی شبیه‌سازی به دست آمده است، نیمی از توان کل ثابتی که باید میان کاربر مبداء و بقیه کاربرهای همکار تقسیم شود به کاربر مبداء اختصاص یابد. برای اختصاص باقیمانده توان میان کاربران همکار نیز دو روش بر اساس مقالات گذشته پیشنهاد کرده است که در روش اول تنها تعدادی از گره‌هایی را که وضعیت بهتری در دریافت اطلاعات ارسال شده داشته‌اند، به عنوان کاربر همکار انتخاب شده و توان میان آنها متناسب با وضعیت‌شان تقسیم می‌گردد و در روش دوم تعدادی از گره‌ها انتخاب و توان باقیمانده میان آنها بطور مساوی تقسیم می‌گردد. با توجه به اینکه در این مقاله استفاده از شرایط کانال برای تخصیص بهینه توان استفاده نشده است، نتایج به دست آمده با حالت بهینه فاصله دارد اما با نتایج شبیه‌سازی نشان داده شده است که روش تقسیم مساوی توان میان مجموعه انتخاب شده‌ی کاربران، عملکرد نزدیک بهینه‌ای را در شرایط وسیعی از حالات دارد.

در مراجع [11] و [12]، مسأله بهینه سازی برای ماکزیمم کردن اطلاعات دریافتی از ارسال برای انواع مختلف استراتژی های رله ارائه و روشهای حل آن بر مبنای روش کاروش-کوهن-توکر (KKT) بررسی شده است. یکی از مهمترین مباحث مطرح شده در این مقاله‌ها بحث تغییر استراتژی همکاری در صورت تغییر توانهای ارسال است. در این مقاله‌ها جوابهای به دست آمده برای اختصاص توان در شبکه بر مبنای اطلاعات لحظه‌ای کانال ارائه شده است.

مرجع [13] نیز به بررسی احتمال خاموشی در استراتژی‌های مختلف پرداخته و با توجه به آنها روشی را برای اختصاص توان ارائه کرده است. روش اختصاص توان iterative نیز در مرجع [14] بررسی شده است.

مهمترین مراجع مربوط به اختصاص توان میان مبدا و رله‌ها، مراجع [15] و [16] هستند. در [15]، ابتدا به بررسی احتمال خاموشی در استراتژی‌های تقویت و ارسال، دیکد و ارسال و رله کردن با استفاده از کدهای فضای زمان پخش<sup>35</sup> پرداخته شده است. این بررسی‌ها به تخمین احتمال خاموشی در SNR های بالا منجر شده است. سپس از این تقریب‌ها برای تعریف مسأله اختصاص توان استفاده شده است. جواب مسأله اختصاص توان بررسی شده در این مقاله در حالت تقویت و ارسال شکل کاملاً بسته ای ندارد اما نسبت به شکل جواب این مسأله در دو استراتژی دیگر حالت عمومی تر و قابل پیاده‌سازی‌تری دارد. این به آن دلیل است که جواب مسأله اختصاص توان در استراتژی‌های دیکد و ارسال و کدهای فضا زمان فقط در حالت‌های خاص یک و دو کاربر همکار بیان شده است که این جوابها نیز ریشه‌های معادله‌هایی هستند که حل آنها باید به شکل عددی انجام شود.

---

<sup>35</sup> Distributed Space Time Coding (DSTC)

مقاله [16] نیز به بررسی احتمال خاموشی در سیستم مشارکتی با استراتژی تقویت و ارسال پرداخته است و دو باند بالا و پایین برای این احتمال خاموشی به دست آورده است. در این مقاله با استفاده از این دو باند، در دو حالت داشتن اطلاعات لحظه‌ای کانال یا داشتن اطلاعات متوسط ضرایب کانال، مسأله بهینه سازی برای مینیمم کردن احتمال خاموشی بررسی شده و جوابی کاملاً مشابه جواب مقاله‌ی [15] بدست آمده است. این جواب نیز مانند جواب گذشته جواب کاملاً بسته‌ای نیست و نیازمند روشهای عددی برای پیاده سازی است.

ما در فصل چهارم به بررسی این راه‌حل‌ها و ارائه‌ی جوابی که نیاز به روش‌های عددی نداشته باشد، می‌پردازیم.

#### 1-4- کاهش توان ارسال با استفاده از همکاری در شبکه‌های بی‌سیم

همانطور که در قسمتهای قبل اشاره کردیم، یکی از مهمترین محدودیت‌ها در شبکه‌های بی‌سیم متحرک توان مصرفی کاربران است. همانطور که در قسمت قبل ذکر کردیم، استفاده از همکاری در شبکه‌های بی‌سیم می‌تواند منجر به کاهش احتمال خاموشی شود که این امر به معنای امکان افزایش نرخ ارسال در این سیستمها است. حال اگر ما فرض بگیریم که نرخ ارسال سیستم بی‌سیم ثابت است، می‌توان نتیجه گرفت که برای رسیدن به احتمال خاموشی مورد نظر در سیستم بدون همکاری، در سیستم مشارکتی می‌توانیم توان کمتری برای ارسال مصرف کنیم. این خاصیت به دلیل اهمیت مصرف توان در شبکه‌های بی‌سیم، خاصیت بسیار مهمی برای شبکه‌های مشارکتی به شمار می‌رود.

یکی دیگر از دلایلی که استفاده از خاصیت کاهش توان را جذاب‌تر از خاصیت افزایش نرخ ارسال سیستم می‌کند این است که برای افزایش نرخ ارسال در حالت همکاری نیاز به تغییر ساختارهای کلی در شبکه ضروری به نظر می‌رسد. اما برای پیاده‌سازی همکاری‌ای که به کاهش توان مصرفی کاربران منجر

می‌شود تنها نیاز داریم که گیرنده را تغییر و الگوریتم‌های همکاری را در گره‌های مختلف پیاده‌سازی کنیم. البته الگوریتم‌های زیادی برای استفاده از ساختارهای فعلی شبکه‌های بی‌سیم و افزایش نرخ قابل حصول در آنها ارائه شده است که استفاده از آنها نیاز به تغییر در ساختار شبکه را کاهش می‌دهد اما این الگوریتم‌ها در حال حاضر در شبکه‌های معدودی قابل پیاده‌سازی و بهره‌برداری هستند. به عنوان مثال، [17] روشی را بر مبنای ارسال چندپرسی، که نوعی همکاری محسوب می‌شود، ارائه کرده است که با استفاده از پروتکل 802.11 بتوان نرخ بیت متوسط کل شبکه را در حالت تمام بار افزایش داد. همچنین یزدیان در [18] روشی را بر مبنای مدولاسیون تطبیقی ارائه کرده است که در آن پیشنهاد شده است که از بهبود خصوصیات سیستم در تغییر مرتبه مدولاسیون استفاده شود.

بر این اساس استفاده از استراتژی‌های همکاری و رله‌کردن در سالهای اخیر توجه زیادی را برای کاهش توان مصرفی در شبکه‌های بی‌سیم به خود معطوف کرده است. یکی از جالب‌ترین و کامل‌ترین این مقالات، مرجع [19] است. در این مقاله مسأله افزایش طول عمر<sup>36</sup> گره‌های حسگر توسط همکاری در شبکه‌های حسگرهای بی‌سیم بررسی شده است. در این مقاله که از الگوریتم دیکد و ارسال برای رله کردن و همکاری استفاده شده است، یک قید برای هر ارسال در شبکه در نظر گرفته شده است (احتمال متوسط خطا) و نشان داده شده است که استفاده از کاربر همکار چقدر می‌تواند در کاهش این توان مصرفی کمک کند و در ادامه الگوریتمی را ارائه کرده است که هر گره بر اساس توان مصرفی ارسالی در حالت همکاری، توان مصرفی ارسالی در حالت بدون همکاری و توان باقیمانده‌اش تصمیم می‌گیرد که همکاری با گره‌ای را انجام دهد یا خیر. همچنین در این مقاله استفاده از رله‌های ثابت با توان نامحدود برای افزایش طول عمر گره‌های حسگر پیشنهاد شده است که می‌تواند تا 12 برابر طول عمر این گره‌ها

---

<sup>36</sup> Life time

را افزایش دهند. در این مقاله بیان شده است که استفاده از همکاری و الگوریتم پیشنهادی تا 2 برابر طول عمر گره‌های حسگر را افزایش می‌دهد.

مسئله کاهش توان کل مصرفی کاربران یک شبکه با قید احتمال خطای ارسالی در [20] بررسی شده است. در این مقاله نیز که از استراتژی همکاری دو نفره بر مبنای دیکد و ارسال استفاده می‌کند، مسئله مینیم کردن توان کل مصرفی شبکه مدل شده است و راه‌حل آن با روشهای بهینه سازی ترکیبی<sup>37</sup> بررسی شده است. همچنین روشی برای کاهش پیچیدگی این راه حل ارائه شده است که کارایی نزدیک به کارایی جواب بهینه دارد. در این مقاله همچنین نواحی‌ای که همکاری کاربران در استراتژی دو کاربره دیکد و ارسال به نفع توان مصرفی شبکه است، بررسی شده است.

جمشیدی در [21] روشهایی را برای کاهش توان مصرفی با همکاری در شبکه‌های حسگرهای نامتقارن پیشنهاد داده و آنها را بررسی کرده است. در این روشها که از استراتژی تقویت و ارسال در حالت 2 کاربر رله استفاده شده است، دایورسیتی مرتبه 3 و 4 به دست آمده است و اثر این مرتبه‌های دایورسیتی در کاهش توان مصرفی گره‌های حسگر بررسی شده است. همچنین بررسی‌های این مقاله نشان داده است که استراتژی‌های همکاری پیشنهاد شده غیر از توان مصرفی برای ارسال اطلاعات در مجموع نیز باعث کاهش چشمگیر توان مصرفی گره‌های حسگر شده و عمر این گره‌ها را افزایش می‌دهد.

مقاله [22] هم کاهش توان در شبکه‌های سنسوری را با همکاری کاربران بر اساس استراتژی تقویت و ارسال و در حالت عمومی  $m$  کاربره بررسی کرده است. در این مقاله سه روش زیر بهینه برای این بررسی پیشنهاد و مقایسه شده است. در روش اول توان گره‌های رله متناسب با SNR حالت غیرمشارکتی تنظیم شده است. در روش دوم رله‌هایی که SNR آنها از یک حدی پایین‌تر باشند حذف و بقیه با توان ثابت ارسال می‌کنند و در روش سوم تنها بهترین گره رله به ارسال مجدد می‌پردازد. با مقایسه این

---

<sup>37</sup> *Combinatorial Optimization*

روشهای زیر بهینه، حالت سوم یعنی انتخاب بهترین گره رله به عنوان تنها گره و اختصاص کل توان به آن عملکرد بهتری نسبت به بقیه حالتها نشان داده است.

مسأله کاهش توان ارسال در [23] نیز مورد بررسی قرار گرفته است اما تنها صورت مسأله به صورت کامل بیان شده است و راه حلی برای آن ارائه نشده است و تنها به شبیه سازی مسأله بهینه سازی پرداخته شده است. لازم به ذکر است که این مقاله در صورت مسأله کاهش توان ارسال از قید احتمال خاموشی استفاده کرده است و آن را معیار بهتری از احتمال خطا می داند.

در مجموع هرچه از معرفی شبکه‌های مشارکتی بی‌سیم گذشته است، تمایل به بررسی اثرات این همکاری در کاهش توان ارسالی بیشتر شده است. بنابر این دید بنای این رساله نیز بر بررسی کاهش توان مصرفی در شبکه‌های مشارکتی بی‌سیم بوده است.

## 1-5- انتخاب رله و انتخاب همکار در شبکه‌های مشارکتی بی‌سیم

مسأله انتخاب رله در حالتی که تنها همکاری یک طرفه داریم و مسأله انتخاب همکار در حالت همکاری دوطرفه در شبکه‌های بی‌سیم که در آنها تمام کاربران شبکه که توان ارسالی کاربر مبدا را دریافت می‌کنند، می‌توانند بعنوان رله یا همکار فعالیت کنند، مسأله بسیار مهمی است.

مثلاً اگر فرض کنیم که قرار است که مجموع توان مصرفی کاربر مبدا و رله‌ی آن مقدار ثابتی باشد، اگر این کاربر رله‌ای را انتخاب کند که وضعیت کانال آن رله تا مقصد بسیار بدتر از وضعیت کانال خودش تا مقصد باشد، این رله بر اساس تخصیص توان، توان زیادی را نمی‌تواند بفرستد و به این دلیل وضعیت این حالت بدتر از حالت بدون همکاری خواهد بود. اما اگر گره مبدا یک رله را انتخاب کند که کانال آن رله تا گره مقصد و کانال مبدا تا آن رله وضع مناسبی داشته باشد، این رله تاثیر بسیار زیادی در کاهش توان مصرفی کاربر مبدا و یا کاهش احتمال خاموشی ارسال، که به معنای افزایش نرخ قابل حصول

سیستم است، خواهد داشت. مسأله انتخاب رله یا همکار یا گروهی از رله‌ها یا همکارها را می‌توان مانند حالتی دانست که تعدادی گره کاندید همکاری وجود داشته باشد و این گره‌ها بر اساس اینکه همکار گره مبداء هستند یا نه، برای ارسال اطلاعات گره مبداء توان مصرف می‌کنند یا اینکه توانی مصرف نمی‌کنند و اطلاعاتی را مجدداً ارسال نمی‌کنند.

مسأله انتخاب گره همکار یا رله یک مسأله شبکه‌ای بسیار پیچیده است. این مسأله با توجه به نوع خواسته‌ای که از جفت کردن<sup>38</sup> گره‌ها در شبکه وجود دارد به یک مسأله بهینه سازی ترکیبی منجر خواهد شد که اگر تعداد گره‌های موجود در شبکه زیاد باشد، راه حل موجود برای این مسائل بهینه‌سازی ترکیبی پیچیدگی زیادی خواهد داشت. از نظر خواسته‌های جفت کردن گره‌ها در شبکه می‌توان شبکه‌ها را به دو دسته‌ی شبکه‌های با گره‌های خودخواه<sup>39</sup> و شبکه‌های همکاری محور تقسیم کرد. البته خودخواه در این جا به معنی استفاده نکردن از همکاری نیست بلکه استفاده گره‌های خودخواه از همکاری در شبکه‌های بی‌سیم برای افزایش کارایی خود خواهد بود نه برای افزایش کارایی شبکه.

یکی از مهمترین مقالات مطرح در انتخاب کاربر همکار برای افزایش کارایی شبکه مرجع [20] است. در این مقاله که کارایی شبکه، توان کل مصرف شده شبکه در نظر گرفته شده است، الگوریتمی با پیچیدگی کم برای جفت کردن کاربرهای شبکه ارائه شده است. گره‌های شبکه در این الگوریتم بر اساس وضعیت کانال خود از بدترین وضعیت تا بهترین وضعیت گره همکار خود را برای کاهش توان مصرفی شبکه انتخاب می‌کنند. در این مقاله با بررسی‌های انجام شده بر روی الگوریتم دیکد و ارسال، بهترین حالت موقعیت دو گره، برای کاهش توان مصرفی شبکه به دست آمده است.

---

<sup>38</sup> Matching  
<sup>39</sup> Selfish nodes



یکی از اولین الگوریتم‌های انتخاب کاربر همکار در [24] ارائه شده است. در این الگوریتم، تمام گره‌های شبکه سعی در همکاری با کاربری می‌کنند که ارسال آن انجام شده است. بر این مبنا هنگامی که هر کاربر اطلاعات خود را به گیرنده ارسال می‌کند بقیه کاربران اطلاعات را دریافت کرده و شمارنده‌ای را بر اساس ضرایب کانال میان کاربر ارسال کننده و آنها و ضرایب کانال میان آنها و مقصد تنظیم می‌کنند و اولین کاربری که شمارش این شمارنده‌اش به اتمام رسید، به عنوان تنها گره رله عمل کرده و اطلاعات را دوباره ارسال می‌کند.

در مقالات [16] و [25] به بررسی مسأله همکاری با بهترین کاربر در دسترس پرداخته شده است و با نتایج شبیه سازی نشان داده اند که محدود کردن مجموعه کاربران همکار به یک کاربر، که ساده‌ترین نوع انتخاب همکار است، نتیجه مناسبتری از حالت همکاری با تمام کاربران موجود را بوجود می‌آورد. همچنین در [26]، مسأله تعداد کاربران همکار و اثر آن در احتمال خاموشی به دست آمده از ارسال بررسی شده است و نشان داده شده است که افزایش تعداد کاربران همکار همواره کارایی سیستم را افزایش نمی‌دهد و ممکن است به کارایی سیستم ضربه بزند. مرجع [27] نیز به بررسی مسأله انتخاب کاربران همکار و خصوصاً مسأله تعداد کاربران همکار در دو حالت توان کل ثابت و احتمال خطای ثابت پرداخته است. در این دو حالت هدف از انتخاب کاربران همکار و یا مشخص کردن تعداد کاربران همکار به ترتیب مینیمم کردن احتمال خطا و مینیمم کردن توان مصرفی کل سیستم می‌باشد.

نصرتی‌نیا در [28] مسأله گروه بندی و انتخاب کاربران همکار را در شبکه‌های بی‌سیم بررسی کرده است. در این مقاله قید گروه بندی این است که هر کاربر بتواند با انتخاب یک مجموعه مناسب از کاربران داخل گروه به مرتبه دایورسیتی از پیش تعیین شده برسد. این به آن معنی است که در هر ارسال کاربر به اندازه مرتبه دایورسیتی مورد نظرش کاربر مناسب داشته باشد که آنها را برای همکاری انتخاب

کند. البته چون شرایط کانالها متغیرهای تصادفی هستند، نمی‌توان فرض گرفت که تمام کاربران شرایط تغییرناپذیری در طول ارسالهای مختلف دارند بلکه تنها باید احتمال اینکه نتوان به اندازه مرتبه دایورسیتی مورد نیاز همکار پیدا کرد را به مقدار بسیار کمی کاهش داد.

یزدیان در [29] مسأله شرایط کاربران همکار را در حالت همکاری دوطرفه از نظر مفهوم عدالت بررسی کرده است. این مسأله مربوط به بررسی انتخاب خودخواهانه کاربران همکار مربوط می‌شود. در این مقاله با توجه به تعریف ارائه شده از سود کاربران مختلف از همکاری (نسبت به حالت بدون همکاری) نمودارهایی برای مقایسه این سود در حالت‌های مختلف فرارگیری کاربران ترسیم شده است. همچنین روشهایی برای بهبود عدالت (با مفهوم تعریف شده) در همکاری دوطرفه پیشنهاد شده است.

در این رساله از دو جنبه به مسأله‌ی انتخاب همکار می‌پردازیم. در فصل دوم انتخاب رله‌کننده‌ها بر مبنای کاهش توان کل مصرفی بررسی شده است و در فصل سوم که به بررسی همکاری دوطرفه پرداخته‌ایم، مسأله‌ی انتخاب خودخواهانه‌ی همکار برای مینیمم کردن مقدار توان ارسالی هر گره را بررسی کرده‌ایم.

## 2- انتخاب بهینه همکار و اختصاص توان برای کاهش توان ارسالی

### 2-1- مقدمه

همان‌طور که در فصل اول بیان کردیم، یکی از کاربردهای شبکه‌ی مشارکتی بی‌سیم کاهش توان مصرفی است. ما در این فصل به این مبحث در همکاری یک‌طرفه پرداخته و آن را از جنبه‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌دهیم.

در این فصل در ابتدا به مسئله‌ی مینیمم کردن توان ارسالی با شرط راضی کردن قید احتمال خاموشی می‌پردازیم و الگوریتم کاملی را برای آن ارائه می‌کنیم [30]. سپس به بررسی نقش کاربران مختلف در کاهش توان ارسالی پرداخته و حد بالایی را برای تعداد کاربران رله‌کننده برای کاهش توان مصرفی بیان می‌کنیم. همچنین بر اساس الگوریتم اختصاص بهینه‌ی توان، الگوریتمی برای انتخاب بهترین مجموعه‌ی کاربران رله‌کننده ارائه می‌کنیم [31].

برای مقایسه با حالت بهینه، حالت اختصاص مساوی توان برای راضی کردن قید احتمال خاموشی نیز بررسی و روشی برای انتخاب کاربران رله‌کننده در این حالت ارائه می‌کنیم [32].

## 2-2- مدل سیستم در نظر گرفته شده و پارامترهای بکاررفته

در این رساله کانال بی‌سیم که در نظر گرفته‌ایم، یک کانال با محوشدگی آرام و غیر گزینشی فرکانس است. به بیان دیگر، پهنای باند سیگنال از پهنای باند همبستگی کانال کوچکتر است و معکوس نرخ ارسال از زمان همبستگی کانال کوچکتر است. با توجه به این فرضیات، ضرایب محوشدگی کانال بی‌سیم در چند بازه‌ی ارسال می‌تواند بدون تغییر در نظر گرفته شود. رفتار متوسط ضرایب کانال بی‌سیم نیز با اثر چندمسیری  $D^\alpha$  در نظر گرفته شده است که در آن  $D$  فاصله میان فرستنده و گیرنده است و  $\alpha$  یک ثابت مثبت میان 2 تا 6 است. مدل محوشدگی در نظر گرفته شده در این سیستم برای مشخص کردن رفتار احتمال خاموشی نیز مدل محوشدگی رایلی است.

استراتژی رله‌کردن در نظر گرفته شده در این رساله، استراتژی تقویت و ارسال است که در ارسال‌های متعامد<sup>40</sup> انجام می‌شود. این به آن معناست که ارسال‌های کاربران مختلف و رله‌ی اطلاعات آنها در یکی از حوزه‌های زمان یا فرکانس بطور کامل از هم جدا شده‌اند.

در این استراتژی هر گره تعدادی از گره‌های موجود در شبکه را به عنوان رله برای ارسال مجدد اطلاعات ارسالی به مقصد انتخاب می‌کند. هر کدام از رله‌ها در زمانهای دیگر می‌توانند به عنوان مبدا ارسال‌های دیگر باشند. در این فصل برای به دست آوردن بهترین مجموعه کاربران همکار فرض کرده‌ایم که کاربران برای انتخاب مجموعه‌ای از کاربران داخل شبکه محدودیتی ندارند و این به آن معناست که در این فصل هیچ محدودیتی در پروسه انتخاب کاربران همکار نداریم.

الگوریتم‌های ارائه شده در این فصل برای انتخاب همکار و اختصاص توان میان کاربران بر اساس اطلاعات میانگین ضرایب کانال‌ها میان کاربر مبدا و کاربران رله و میان رله‌ها و مقصد است. یعنی گره

---

<sup>40</sup> Orthogonal transmission

مبدأ از اطلاعات لحظه‌ای کانال‌ها<sup>41</sup> اطلاعی ندارد. اما در گره مقصد فرض بر آن است که اطلاعات لحظه‌ای مربوط به کانالها در دسترس قرار دارد و از گیرنده MRC برای به دست آوردن اطلاعات ارسالی مبدأ با کمک همکارهایش استفاده می‌شود.

در این فصل نشانه‌های  $s$ ،  $d$  و  $r_i$  به ترتیب نشان دهنده‌ی گره‌های مبدأ، مقصد و  $i$  امین رله است. همچنین فاصله میان گره‌های  $a$ ،  $b$  با پارامتر  $d_{ab}$  نشان داده می‌شود و در بعضی قسمت‌ها نیز از نرمالیزه شده فاصله با فاصله‌ی  $d_{sd}$  به شکل  $D_{ab}$  استفاده می‌کنیم. همچنین توان ارسالی کاربر مبدأ و رله‌ها را برای ارسال و رله کردن به ترتیب با  $P_s$  و  $P_{r_i}$  نشان می‌دهیم.

متغیرهای تصادفی SNR دریافتی میان گره‌ی مبدأ و رله‌ها و رله‌ها و گره‌ی مقصد را به ترتیب با  $A_i$  و  $B_i$  و میانگین این متغیرهای تصادفی را به ترتیب با  $a_i$  و  $b_i$  نشان می‌دهیم. همچنین  $B_0$  و  $b_0$  متغیر تصادفی و میانگین SNR دریافتی میان گره‌ی مبدأ و مقصد است.

نرخ ارسال در این پروژه برابر نرخ ارسال حالت غیر مشارکتی<sup>42</sup> و برابر پارامتر  $R$  در نظر گرفته شده است و همچنین توان نویز تمام گره‌ها با هم برابر گرفته شده است و با پارامتر  $\sigma_N^2$  نشان داده شده است. بر اساس مدل رایلی در نظر گرفته شده برای ضرایب کانال، توان دوم اندازه ضرایب کانال دارای توزیع نمایی است. بنابراین مقدار  $a_i$  و  $b_i$  ها را که متوسط‌های توزیع‌های نمایی‌اند را می‌توانیم به شکل SNR ارسالی در تضعیف  $D^{-\alpha}$  در نظر بگیریم. در این رساله برای مشخص کردن اهمیت فواصل میان گره‌ی مبدأ و رله‌ها و میان رله‌ها و گره‌ی مقصد و همچنین تعیین اولویت کاربران برای کاهش توان ارسالی مورد نیاز، به جای استفاده از پارامتر متوسط ضرایب کانال از شکل SNR ارسالی در  $D^{-\alpha}$  استفاده می‌کنیم. طبیعی است که مقدار متوسط SNR ارسال میان رله‌ها و گره‌ی مبدأ (و به تبع آن  $d_{sr_i}^\alpha$ ) از

<sup>41</sup> *Chanel Side Information (CSI)*

<sup>42</sup> *Non-cooperative scheme*

اندازه‌گیری توان دریافتی در گره مبدا (با فرض متقارن بودن ضرایب کانال) به دست می‌آید و همچنین متوسط SNR ارسال میان رله‌ها و گرهی مقصد (و به تبع آن  $d_{r_i}^{\alpha}$ ) از اندازه‌گیری (و متوسط‌گیری) توان دریافتی در گره مقصد بدست می‌آید که برای اجرای الگوریتم باید این مقادیرها به گره مبدا اطلاع داده شود. البته چون مبنای الگوریتم‌های ارائه شده در این رساله اطلاعات میانگین ضرایب کانال است، اگر فرض را بر سکون گره‌های شبکه بگذاریم، این اندازه‌گیریها برای یک بار کافی است و اگر فرض بر متحرک بودن گره‌ها باشد، این اندازه‌گیریها باید با فواصل زمانی متناسب با عکس میانگین سرعت حرکت کاربران تکرار شود.

## 2-3- مدل کردن رفتار احتمال خاموشی در استراتژی تقویت و ارسال

برای مشخص کردن رفتار احتمال خاموشی در استراتژی تقویت و ارسال دایورسیتی مشارکتی باید ابتدا رفتار SNR و نرخ قابل حصول را در این سیستم بررسی کنیم. بر مبنای فرض گیرنده MRC و بر اساس [16] می‌توانیم شکل نرخ قابل حصول سیستم با یک کاربر مبدا و  $m$  کاربر همکار را بر مبنای bit/sec/HZ در (1-2) بیان کنیم.

$$I = \frac{1}{m+1} \log \left( B_0 + \sum_{i=1}^m \frac{A_i B_i}{A_i + B_i + 1} \right) \quad (1-2)$$

بنا به آنچه ذکر شد، تمام ترمهای  $\mathbf{A}_i$  و  $\mathbf{B}_i$  دارای توزیع نمایی‌اند. به خاطر شکل پیچیده SNR معادل در سیستم MRC، به دست آوردن رفتار احتمالی سیستم بالا بسیار پیچیده است. هسنا<sup>۴۳</sup> در [33] شکل تابع توزیع احتمال<sup>۴۴</sup> SNR موجود در عبارت (1-2) را به دست آورده است، اما به دلیل آنکه ما نیاز داریم که از این شکل تابع توزیع احتمال خاموشی‌ای که با آن به دست می‌آید در پروسه بهینه‌سازی استفاده

<sup>43</sup> M. O. Hasna

<sup>44</sup> Probability Distribution Function (PDF)

نماییم، نیاز داریم که تقریبی ساده‌تر از تابع توزیع مقاله [33] در نظر بگیریم. بر این مبنا به سراغ ترم‌های کسری در SNR معادل می‌رویم. در SNR های بالا می‌توانیم ترم کسری را با عبارت (2-2) تقریب بزنیم.

$$\frac{A_i B_i}{A_i + B_i + 1} \cong \left( \frac{1}{A_i} + \frac{1}{B_i} \right)^{-1} \quad (2-2)$$

در (2-2)، ما از عدد 1 که در مخرج عبارت کسری قرار داشت، صرف‌نظر کرده‌ایم که این معتبر بودن تقریب در SNR های بالا را بیان می‌کند. این تقریب نشان می‌دهد که میانگین هر کدام از  $A_i$  یا  $B_i$  اگر بسیار بزرگتر از میانگین دیگری باشد، این ترم قابل حذف کردن از کسر است. بنابراین PDF ترم‌های کسری در دو حالت حدی به توزیع نمایی می‌رسد. بر اساس این مشاهده، ما توزیع هر کدام از ترم‌های کسری را با توزیع نمایی تقریب می‌زنیم. همچنین می‌توانیم برای به دست آوردن میانگین این توزیع‌های نمایی، میانگین‌های  $A_i$  و  $B_i$  را داخل ترم کسری قرار دهیم.

$$\lambda_i = \frac{a_i b_i}{a_i + b_i} \quad (3-2)$$

حال با این تقریب‌ها، در SNR معادل،  $(m + 1)$  ترم نمایی جمع شونده مستقل داریم. این ترم‌های نمایی که مقدار متوسط آنها در (3-2) بیان شده است را با  $\Lambda_i$  نشان می‌دهیم. همچنین SNR دریافتی از ارسال گره مبدا نیز که خود یک ترم نمایی است و متوسط آن برابر  $a_0$  است را با  $\Lambda_0$  نشان خواهیم داد. بر اساس تعریف، احتمال خاموشی را می‌توانیم با این تقریب SNR به شکل عبارت (4-2) بنویسیم.

$$P_{out} = Prob\{I < R\} = Prob\left\{ \sum_{i=1}^m \Lambda_i < (2^{(m+1)R} - 1) \right\} \quad (4-2)$$

با روش توابع تولیدکننده‌ی ممان<sup>45</sup> و طبق ضمیمه الف می‌توانیم بسط تیلور احتمال خاموشی را به دست آوریم و بر این اساس جمله اول غیر صفر بسط تیلور احتمال خاموشی به شکل (5-2) خواهد بود.

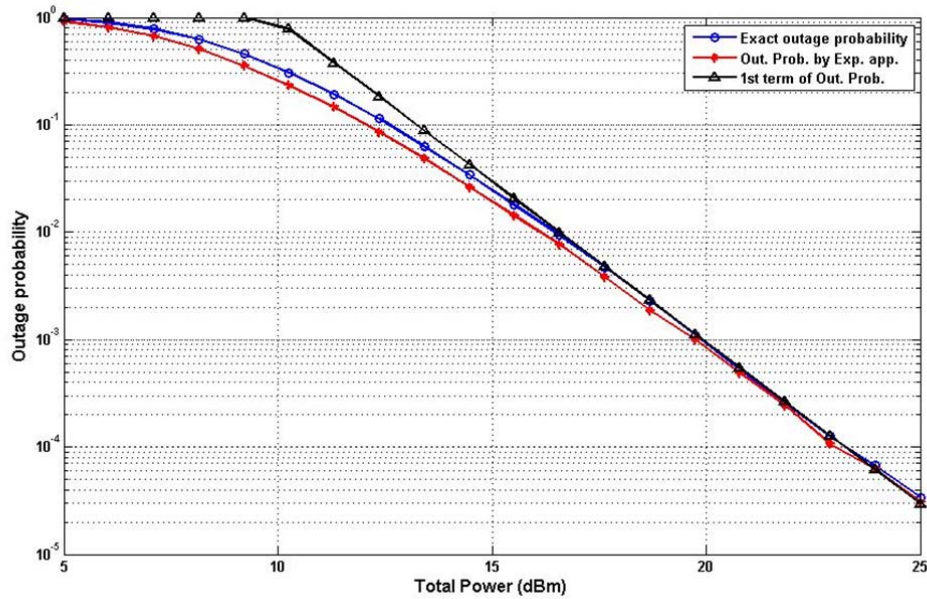
$$P_{out} \cong \frac{(2^{(m+1)R} - 1)^{m+1}}{(m+1)!} * \frac{1}{\prod_{i=1}^m \lambda_i} \quad (5-2)$$

این تقریب معادل تقریب احتمال خاموشی در SNR های بالا در مرجع [15] است. تقریب زده شده به علت دقت بیشتر متوسط توزیع‌های نمایی در SNR های بالا، عملکرد بهتری در SNR های بالا دارد. ما از این تقریب احتمال خاموشی برای مسأله بهینه سازی قسمت بعد استفاده خواهیم کرد.

برای حالتی که دو کاربر همکار در مکان‌های نرمالیزه شده  $[D_{s1}, D_{1d}] = [0.5, 0.7]$  و  $[D_{s2}, D_{2d}] = [0.1, 0.9]$  قرار دارند در حالت تقسیم مساوی توان، در SNR های مختلف احتمال خاموشی واقعی (با channel realization)، احتمال خاموشی با تقریب توزیع عبارت‌های کسری با توزیع نمایی و تقریب اولین جمله بسط تیلور عبارت (5-2) در شکل 1-2 نشان داده شده است. در این شکل پارامتر  $\alpha$  برابر 2 در نظر گرفته شده است. این شکل نشان می‌دهد که در SNR های بالا تقریب (5-2)، تقریب بسیار نزدیکی است و در SNR های پایین، این تقریب مقداری از مقدار واقعی بزرگتر است که برای مسأله بهینه سازی ما مناسب خواهد بود.

<sup>45</sup> Moment Generating Functions (MGF)





شکل 1-2 احتمال خاموشی و تقریب‌های مختلف آن در SNR های مختلف

## 2-4- تقسیم بهینه توان برای مینیمم کردن توان کل مصرفی کاربران

در این بخش می‌خواهیم مینیمم توانی را که با اختصاص بهینه آن میان مجموعه‌ی مشخصی از کاربران همکار و کاربر مبدأ، قید احتمال خاموشی راضی می‌شود را پیدا کنیم. این به آن معنی است که در استراتژی دایورسیتی مشارکتی، با ثابت نگه داشته نرخ ارسال و قرار دادن یک قید برای احتمال خاموشی می‌خواهیم توان مصرفی را مینیمم کنیم. این مسأله را می‌توان به شکل عبارت (2-6) بیان کرد.

$$\min P_s + \sum_{i=1}^m P_{r_i}$$

$$\text{Subject to } P_{out}(P_s + \sum_{i=1}^m P_{r_i}) \leq P_{out-th} \quad (6-2)$$

$$P_{max} \geq P_s, P_{r_i} \geq 0$$

که در آن  $P_{out-th}$  حد بالای احتمال خاموشی مورد نیاز است و  $P_{max}$  بزرگترین مقدار قابل قبول برای توان فرستنده‌ها است.

همانطور که در بخش قبلی بیان کردیم، شکل دقیق احتمال خاموشی بسیار پیچیده است و ما از تقریب احتمال خاموشی به جای عبارت دقیق استفاده می‌کنیم که همانطور که بیان کردیم این تقریب در SNR های بالا دقت بیشتری دارد.

به دلیل آنکه عبارت احتمال خاموشی تقریبی بر اساس  $\lambda_i$  ها به دست آمده است، در اینجا  $P_s$  و  $P_{r_i}$  ها را نیز بر حسب این متغیرها بیان می‌کنیم تا یک متغیر در مسأله بهینه‌سازی داشته باشیم. بر اساس عبارت (3-2) می‌توانیم عبارت (7-2) را بنویسیم.

$$\lambda_i = \frac{\frac{P_s}{\sigma_N^2 d_{sr_i}^\alpha} * \frac{P_{r_i}}{\sigma_N^2 d_{r_i d}^\alpha}}{\frac{P_s}{\sigma_N^2 d_{sr_i}^\alpha} + \frac{P_{r_i}}{\sigma_N^2 d_{r_i d}^\alpha}} = \frac{\frac{P_s}{\sigma_N^2 d_{sd}^\alpha} * \frac{d_{sd}^\alpha}{d_{sr_i}^\alpha} * \frac{P_{r_i}}{\sigma_N^2 d_{r_i d}^\alpha}}{\frac{P_s}{\sigma_N^2 d_{sd}^\alpha} * \frac{d_{sd}^\alpha}{d_{sr_i}^\alpha} + \frac{P_{r_i}}{\sigma_N^2 d_{r_i d}^\alpha}} = \lambda_0 \frac{\frac{1}{D_{sr_i}^\alpha} * \frac{P_{r_i}}{\sigma_N^2 d_{r_i d}^\alpha}}{\frac{\lambda_0}{D_{sr_i}^\alpha} + \frac{P_{r_i}}{\sigma_N^2 d_{r_i d}^\alpha}}$$

$$= \lambda_0 \frac{\frac{P_{r_i}}{\sigma_N^2 d_{r_i d}^\alpha}}{\lambda_0 + D_{sr_i}^\alpha \frac{P_{r_i}}{\sigma_N^2 d_{r_i d}^\alpha}} \quad (7-2)$$

و بر اساس آن،  $P_{r_i}$  را می‌توانیم بر حسب  $\lambda_i$  به شکل (8-2) بنویسیم.

$$P_{r_i} = \frac{\lambda_i \lambda_0}{\lambda_0 - \lambda_i D_{sr_i}^\alpha} d_{r_i d}^\alpha \sigma_N^2 = \frac{\lambda'_i}{1 - \lambda'_i D_{sr_i}^\alpha} \lambda_0 d_{r_i d}^\alpha \sigma_N^2 \quad (8-2)$$

که در آن  $\lambda'_i$  نرمالیزه شده‌ی  $\lambda_i$  با  $\lambda_0$  است. همچنین رابطه میان  $\lambda_0$  و  $P_s$  به شکل عبارت (9-2) خواهد بود.

$$P_s = \lambda_0 d_{sd}^\alpha \sigma_N^2 \quad (9-2)$$

بنابر روابط بالا  $P_{r_i}$  ها و  $P_s$  را بر مبنای  $\lambda_i$  ها و  $\lambda_0$  بیان کردیم و در بخش قبلی نیز احتمال خاموشی تقریبی را به صورت تابعی از  $\lambda_i$  ها و  $\lambda_0$  به دست آورده‌ایم. حال می‌توانیم مسأله بهینه‌سازی (6-2) را بر مبنای این پارامترها دوباره در (10-2) بازنویسی کنیم.

$$\min P_T = \sigma_N^2 \lambda_0 d_{sd}^\alpha + \sum_{i=1}^m \left( \frac{\lambda_i \lambda_0}{\lambda_0 - \lambda_i D_{sr_i}^\alpha} d_{r_i d}^\alpha \sigma_N^2 \right)$$

$$\text{Subject to } \lambda_0 \prod_{i=1}^m \lambda_i \geq \frac{(2^{(m+1)R} - 1)^{m+1}}{(m+1)! P_{out-th}} \quad (10-2)$$

$$P_{max} \geq P_s, P_{r_i} \geq 0$$

مسئله بهینه سازی (10-2) به شکل استاندارد مسئله بهینه سازی مقید است [34] و با حل آن به روش KKT بر اساس ضمیمه‌ی ب عبارت‌های (11-2) و (12-2) بدست می‌آید.

$$\lambda'_i = \frac{D_{sr_i}^\alpha + \frac{1}{2} \zeta_i D_{r_i d}^\alpha - \sqrt{\frac{1}{4} \zeta_i^2 D_{r_i d}^{2\alpha} + (1 + \zeta_i) D_{sr_i}^\alpha D_{r_i d}^\alpha}}{D_{sr_i}^{2\alpha} - D_{sr_i}^\alpha D_{r_i d}^\alpha} \quad (11-2)$$

$$\lambda_0 = \frac{(2^{(m+1)R} - 1)^{m+1}}{\sqrt[m+1]{\prod_{i=1}^m \lambda'_i (m+1)! P_{out-th}}} \quad (12-2)$$

که در آنها:

$$\zeta_i = 1 + \sum_{j=1}^m (\lambda'_j D_{sr_j}^\alpha) - \lambda'_i D_{sr_i}^\alpha \quad (13-2)$$

و براساس آنها، برای به دست آوردن توانهای مبدا و رله‌ها باید مقادیر  $\lambda_i$  ها و  $\lambda_0$  به دست آمده را در عبارت‌های (8-2) و (9-2) قرار دهیم.

وجود پارامتر  $\zeta_i$  در جواب نهایی مسئله‌ی بهینه‌سازی نشان از نیاز به iteration برای دست‌یابی به حل کامل این مسئله دارد. همچنانکه جوابی که در [15] و [16] برای مسئله مینیم کردن احتمال خاموشی با توان کل ثابت ارائه شده است نیاز به روند iterative برای به دست آوردن جواب کامل دارد. برای حذف iteration های مورد نیاز برای پیدا کردن جواب کامل مسئله‌ی بهینه‌سازی دو نوع تخمین برای  $\zeta_i$  ارائه می‌کنیم. در تخمین اول از مقدار  $\zeta_i$  به دست آمده در iteration دوم با روش نیوتون و با  $\zeta_i = 1$  برای گام ابتدایی استفاده می‌شود که به شکل عبارت (14-2) است. این پارامتر  $\zeta_i$  وابسته به مجموعه‌ی کاربران فعال است.

$$\zeta_i \cong 1 + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m \left( \frac{D_{sr_j}^\alpha + \frac{1}{2} D_{r_j d}^\alpha - \sqrt{\frac{1}{4} D_{r_j d}^{2\alpha} + 2 D_{sr_j}^\alpha D_{r_j d}^\alpha}}{D_{sr_j}^\alpha - D_{r_j d}^\alpha} \right) \quad (14-2)$$

در بخش نتایج شبیه‌سازی نشان خواهیم داد که این تخمین  $\zeta_i$  برای یک مجموعه‌ی کاربران ثابت رفتار بسیار نزدیکی با حالت iterative خواهد داشت و مقدار افت کارایی الگوریتم با این تخمین بسیار کم خواهد بود.

دومین تخمین از پارامتر  $\zeta_i$  حذف این پارامتر با تعیین آن به مقدار ثابت 1 است. این به آن معنی است که برای هر گره فرض را بر تنها بودن در مجموعه‌ی کاربران همکار می‌گذاریم. با اینکه دقت تعیین توان در حالت  $\zeta_i = 1$  برای حالت  $m > 1$  کمتر از دقت تخمین  $\zeta_i$  با عبارت (14-2) است اما این افت کارایی باز هم مقدار قابل توجهی نخواهد بود و مزیت این روش آن است که دیگر نیازی به محاسبه این عبارت نداریم و  $\zeta_i$  دیگر وابسته به مجموعه‌ی کاربران رله‌کننده نیست و از آن می‌توان در الگوریتم انتخاب کاربر همکار که در بخش‌های بعدی ارائه می‌شود، استفاده کرد.

همانطور که بیان شد، SNR به دست آمده از عبارت کسری با SNR هر دو لینک تشکیل دهنده‌ی آن

محدود می‌شود. برای بدست آوردن حد پارامتر  $\lambda'_i$  و براساس عبارت (7-2) می‌توانیم بنویسیم:

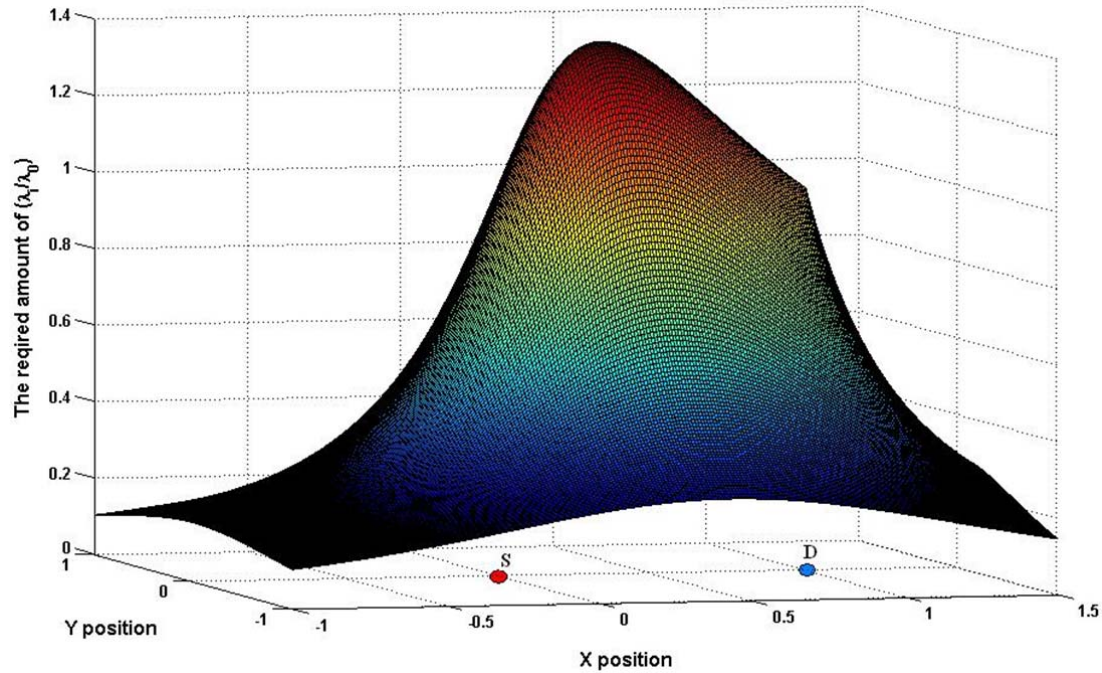
$$\lambda'_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_0} = \left( D_{sr_i}^\alpha + \frac{\lambda_0}{(P_{r_i}/d_{r_i d}^\alpha \sigma_N^2)} \right)^{-1} \quad (15-2)$$

این عبارت نشان می‌دهد که مقدار  $\lambda'_i$  در بازه  $(0, \frac{1}{D_{sr_i}^\alpha})$  تغییر می‌کند و  $\lambda'_i = 0$  معادل توان صفر از کاربر

همکار  $i$  ام است و  $\lambda'_i \rightarrow \frac{1}{D_{sr_i}^\alpha}$  معادل  $\frac{P_{r_i}}{d_{r_i d}^\alpha \sigma_N^2} \rightarrow \infty$  است.

برای مشخص شدن رفتار الگوریتم اختصاص توان، شکل 2-2 مقدار پارامتر  $\lambda'_i$  از عبارت (11-2) را

در حالت  $\alpha = 2$  در مکانهای مختلف کاربر رله نشان می‌دهد.



شکل 2-2 مقدار پارامتر  $\lambda'_i$  در مکانهای مختلف کاربر رله

این شکل نشان می‌دهد که هنگامی که گره رله بسیار نزدیک به مقصد است، مقدار  $\lambda'_i$  حدوداً برابر حداکثر مقدار ممکن برای  $\lambda'_i$  در آن مکان‌ها یعنی 1 است. این به آن دلیل است که گره‌های رله‌کننده در این مکان‌ها با توان کمی می‌توانند  $\lambda'_i$  ماکزیمم را به دست آورند اما هرچه از این نقاط دور می‌شویم به علت هزینه بالاتری که افزایش SNR ارسالی کاربر همکار دارد مقدار  $\lambda'_i$  بهینه از مقدار ماکزیمم قابل حصول در هر نقطه دورتر می‌شود و در نقاط بسیار دور مقدار  $\lambda'_i$  به سمت صفر می‌رود که این به آن معناست که این نقاط نمی‌توانند اثر زیادی در کاهش توان مورد نیاز گرهی مبدا در ارسال به گرهی مقصد داشته باشند.

## 2-5- حد بالای تعداد کاربران همکار

تعداد کاربران رله‌کننده یا همکار یکی از مهم‌ترین مسائلی است که در مسئله انتخاب کاربران همکار بررسی می‌شود. تعداد زیادی از مقالات سالهای اخیر به بررسی کارایی همکاری تعداد زیادی کاربر با هم

پرداخته اند. ما در این بخش به بررسی تعداد بهینه‌ی کاربران همکار در حالت نرخ ارسال ثابت و قید احتمال خاموشی مشخص می‌پردازیم.

اگر فرض کنیم که تمام کاربران کاندید همکاری، شرایط گره  $i$  ام را داشته باشند، مقدار توان کل مورد نیاز در حالت  $m$  کاربره به شکل عبارت (16-2) خواهد بود.

$$P_T = \frac{2^{(m+1)R} - 1}{m+1 \sqrt{(m+1)! P_{out-th}}} * \frac{d_{sd}^\alpha \sigma_N^2}{\sqrt{\lambda_i'^m}} * (1 + mP_{i-n}) \quad (16-2)$$

که در آن  $P_{i-n}$  مقدار نرمالیزه شده‌ی توان کاربر رله‌کننده‌ی  $i$  ام است.

قضیه‌ی زیر بیان می‌دارد که هرچه وضعیت کاربر همکار بهتر باشد، تعداد بهینه‌ی کاربران عدد بزرگتری خواهد بود.

قضیه- فرض کنید تمام کاربران کاندید همکاری در وضعیت کاربر  $i$  ام قرار گرفته‌اند و توان کل مورد نیاز برای راضی کردن قید احتمال خاموشی برابر عبارت (16-2) باشد. حال اگر یک نقطه‌ی بهینه برای تعداد کاربران در این سیستم وجود داشته باشد، اگر مقدار  $\lambda_i'$  زیاد شود و یا مقدار توان نرمالیزه شده‌ی گره‌ی رله‌کننده کم شود، تعداد بهینه‌ی کاربران افزایش پیدا می‌کند.

اثبات- برای اثبات به ضمیمه‌ی ج مراجعه کنید.

از این قضیه نتایج مهمی را می‌توان بدست آورد.

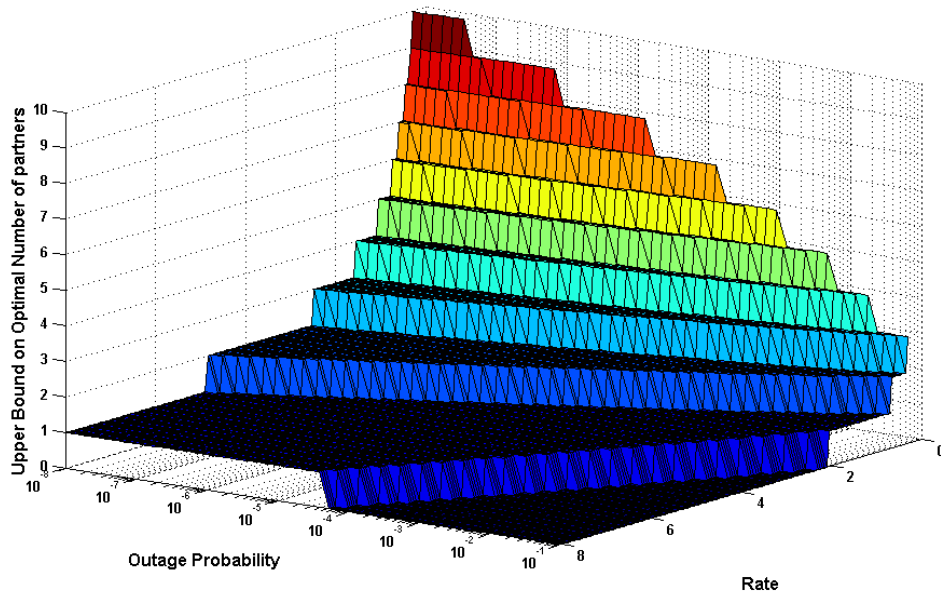
نتیجه 1- با توجه به این قضیه برای بدست آوردن حد بالای تعداد کاربران بهینه می‌توان تمام گره‌های کاندید همکاری را با بهترین گره جایگزین کرد و تعداد بهینه‌ی کاربران را با این فرض بدست آورد. اما با توجه به اینکه مشخص کردن بهترین کاربر با توجه به عدم استقلال مقدار توان نرمالیزه شده‌ی گره‌ی رله‌کننده از مقدار پارامتر  $\lambda'$ ، کار ساده‌ای نیست، برای بدست آوردن حد بالای تعداد بهینه‌ی کاربران، یک ابر گره تعریف می‌کنیم. مشخصات این ابر گره در عبارت‌های (17-2) و (18-2) بیان شده است.

$$\lambda'_a = \max(\lambda') = \lambda'(D_{sr_i} = 0.5, D_{r_{id}} = 0.5) = \frac{2^\alpha}{3} \quad (17-2)$$

$$P_{a-n} = 0 \quad (18-2)$$

بنابراین توان نرمالیزه شده‌ی رله‌کردن این کاربر برابر صفر و مقدار  $\lambda'$  آن ماکزیمم مقدار ممکن در نظر گرفته شده است. حال با توجه به قضیه‌ی بیان شده در بالا، اگر تعداد کاربران همکار را برای این گره بدست آوریم، این تعداد حد بالای تعداد کاربران بهینه خواهد بود.

شکل 2-3 تعداد بهینه کاربران در حالت قرار دادن تعداد زیادی ابر گره برای انتخاب را نشان می‌دهد که در واقع حد بالای تعداد کاربران در حالت‌های مختلف شبکه است. در این شکل مقدار پارامتر  $\alpha$  برابر 2 در نظر گرفته شده است.



شکل 2-3 حد بالای تعداد بهینه کاربران در حالت‌های مختلف

شکل 2-3 نشان می‌دهد که اگر نرخ ارسال را ثابت فرض کنیم، با کم کردن قید احتمال خاموشی حد بالای تعداد کاربران افزایش می‌یابد که نشان از احتیاج به مراتب بالاتر دایورسیتی در این حالت‌ها است.

همچنین اگر قید احتمال خاموشی را ثابت کرده و نرخ ارسال را افزایش دهیم، تعداد بهینه کاربران کاهش می‌یابد که دلیل آن نیاز به استفاده‌ی مفیدتر از پهنای باند در نرخ ارسال‌های بزرگتر است.

حد بالای نمایش داده شده در شکل 2-3 از مقایسه‌ی تمام حالت‌های  $m$  و بدست آوردن بهترین حالت با مینیمم توان کل مورد نیاز بدست آمده است. با روشی که در ضمیمه‌ی د بیان شده است، می‌توانیم حد بالایی را به شکل عبارت (2-19) برای مقادیر مختلف پارامترهای شبکه بیان کنیم.

$$m_0 = \frac{0.41 - R \ln 2 + \sqrt{0.168 - (1.53 + \ln(P_{out-th}) - \alpha \ln 2) R \ln 2}}{R \ln 2} \quad (19-2)$$

همانطور که در ضمیمه‌ی چهارم نیز بیان شده است، این حد بالا برای نرخ ارسال‌های بزرگ به مقادیر نشان داده شده در شکل بسیار نزدیک است اما برای نرخ ارسال‌های کوچک فاصله‌ی بیشتری تا مقادیر نشان داده شده در شکل دارد. مهمترین مزیت این حد بالا نسبت به شکل 2-4 داشتن شکل بسته است که ما را قادر می‌سازد که در الگوریتم‌های انتخاب کاربران بهینه به سادگی از آن استفاده کنیم.

نتیجه 2- اگر گره‌ای با تعدادی بیشتر از تعداد حد بالای بدست آمده برای کاربران همکار، همکاری داشته باشد، این مجموعه‌ی کاربران به هیچ وجه نمی‌تواند بهترین مجموعه کاربران همکار باشد.

نتیجه 3- از حد بالای تعداد کاربران همکار می‌توان شرایطی را که به هیچ وجه همکاری با هیچ گره‌ای

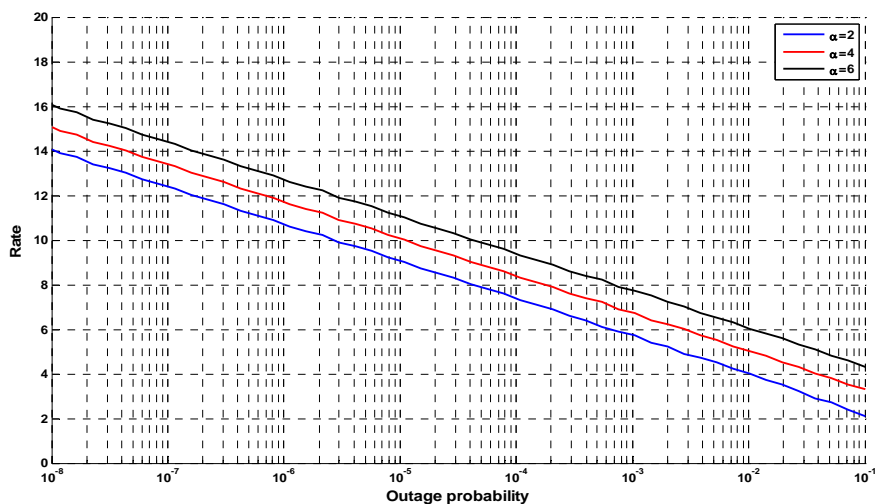
منجر به کاهش توان مصرفی کل سیستم نخواهد شد، بدست آورد. این شرایط نقاطی هستند که در آنها

حد بالای تعداد کاربران برابر صفر است. اگر برای هر قید احتمال خاموشی داده شده‌ای مقدار  $R_0$  ای را

پیدا کنیم که شرط  $R > R_0$  منجر به انتخاب حالت بدون همکاری شود، مقدار  $R_0$  مطابق شکل 2-4

خواهد شد.





شکل 2-4- حد بالای نرخ ارسال برای همکاری در حالت‌های مختلف قید احتمال خاموشی

شکل 2-4 نشان می‌دهد که حد بالای نرخ ارسال برای انتخاب همکاری ( $R_0$ ) را می‌توان به شکل عبارت (20-2) تقریب زد.

$$R_0 \cong -0.58 + 0.5\alpha - 1.69 \log_{10}(P_{out-th}) \quad (20-2)$$

اگر نرخ ارسال در شبکه‌ای بالاتر از مقدار بیان شده در عبارت (20-2) باشد، هیچ گره‌ای در شبکه با استراتژی تقویت و ارسال نمی‌تواند به عنوان کاربر همکار مقدار توان مصرفی را نسبت به حالت بدون همکاری کاهش دهد.

## 2-6- الگوریتم انتخاب بهترین مجموعه‌ی کاربران همکار

در بخش چهارم این فصل، توان کل مورد نیاز برای رسیدن به قید احتمال خاموشی معین و نحوه اختصاص توان میان گره‌ی مبدا و کاربرهای رله‌کننده را در حالتی که مجموعه‌ی کاربران همکار در آن مشخص است را بر اساس مسأله بهینه‌سازی به دست آوریم. بر اساس روابط مشخص است که مقدار توان کل مورد نیاز برای مبدا و کاربران همکار با تغییر گره‌های موجود در مجموعه کاربران همکار تغییر پیدا می‌کند. بر این اساس در این بخش قصد داریم مسأله پیدا کردن بهترین مجموعه‌ی کاربران همکار را

برای کاهش توان کل بررسی کنیم. در این بخش فرض می‌گیریم که یک گرهی مبدا و یک گرهی مقصد داریم و مجموعه‌ای شامل  $N$  کاربر مختلف برای همکاری با این گرهی مبدا آماده هستند. در این بخش فرض می‌کنیم که کاربران همکار بدون محدودیت از میان مجموعه کاربران کاندید همکاری انتخاب می‌شوند. هدف از این کار این است که بتوانیم بهترین مجموعه‌ی کاربران همکار که توان کل لازم برای ارسال گرهی مبدا را مینیمم می‌کند را پیدا کنیم. البته توجه کنید که این توانی که ما با تغییر مجموعه کاربران سعی در مینیمم کردن آن داریم توان ارسالی یک کاربر نیست و مجموع توان مبدا و توان کاربران همکار است. با این کار اگر هیچ محدودیتی در انتخاب‌ها نداشته باشیم می‌توانیم با انجام این عمل برای تمام کاربران شبکه، توان مجموع شبکه را مینیمم کنیم.

انتخاب بهترین مجموعه‌ی کاربران همکار با توجه به داشتن توان کل لازم برای هر مجموعه یک مسأله‌ی بهینه‌سازی ترکیبی است. تعداد مجموعه‌های موجود در این مسأله با افزایش تعداد کاربران به صورت نمایی افزایش پیدا می‌کند. بنابراین پیچیدگی این مسأله بهینه‌سازی نیز با افزایش تعداد کاربران آماده‌ی همکاری افزایش پیدا می‌کند. ما برای حل این مسأله و به دست آوردن بهترین مجموعه کاربران همکار که مینیمم توان کل را برای راضی کردن قید احتمال خاموشی لازم دارد، ابتدا روش پیدا کردن بهترین مجموعه‌ها را در حالتی که یک قید روی تعداد کاربران داخل مجموعه قرار داده‌ایم (در حالت  $m = 1$  و  $m > 1$ ) بیان می‌کنیم. سپس بر اساس این روش‌ها، الگوریتمی را برای پیدا کردن بهترین مجموعه‌ی کاربران همکار بدون قید تعداد کاربران پیشنهاد می‌کنیم.

روش‌های بیان شده برای پیدا کردن بهترین مجموعه‌های کاربران همکار (در حالت  $m$  ثابت) پیچیدگی در حد دو بار الگوریتم مرتب کردن<sup>۴۶</sup>  $N$  مقدار را دارد و همچنین تعداد مراحل که این روش را برای پیدا کردن بهترین مجموعه کاربران انجام می‌دهیم نیز محدود خواهد بود. بنابراین پیچیدگی الگوریتم

---

<sup>46</sup> Sort

ارائه شده برای انتخاب بهترین مجموعه‌ی کاربران همکار بسیار کم است و این مسئله به پیاده‌سازی این الگوریتم کمک زیادی می‌کند.

## 2-6-1- روش انتخاب کاربر همکار در حالت $m = 1$

وقتی که می‌خواهیم بهترین مجموعه کاربران همکار را در حالت  $m = 1$  انتخاب کنیم به این معنی است که بهترین کاربر رله‌کننده را که توان کل لازم برای رسیدن به قید احتمال خاموشی مورد نظر را مینیمم می‌کند، بدست آوریم. به همین دلیل در این حالت تنها نیاز داریم توان کل مورد نیاز کاربران را در حالت انتخاب هر کدام از گره‌های کاندید را به دست آورده و مینیمم مقدار توان را انتخاب کنیم.

در حالت  $m = 1$  مقدار  $\gamma_i$  برابر با 1 خواهد بود و بنابراین رابطه (2-11) به شکل (2-21) در خواهد آمد.

$$\lambda'_i = \frac{D_{sr_i}^\alpha + \frac{1}{2}D_{r_id}^\alpha - \sqrt{\frac{1}{4}D_{r_id}^{2\alpha} + 2D_{sr_i}^\alpha D_{r_id}^\alpha}}{D_{sr_i}^{2\alpha} - D_{sr_i}^\alpha D_{r_id}^\alpha} \quad (21-2)$$

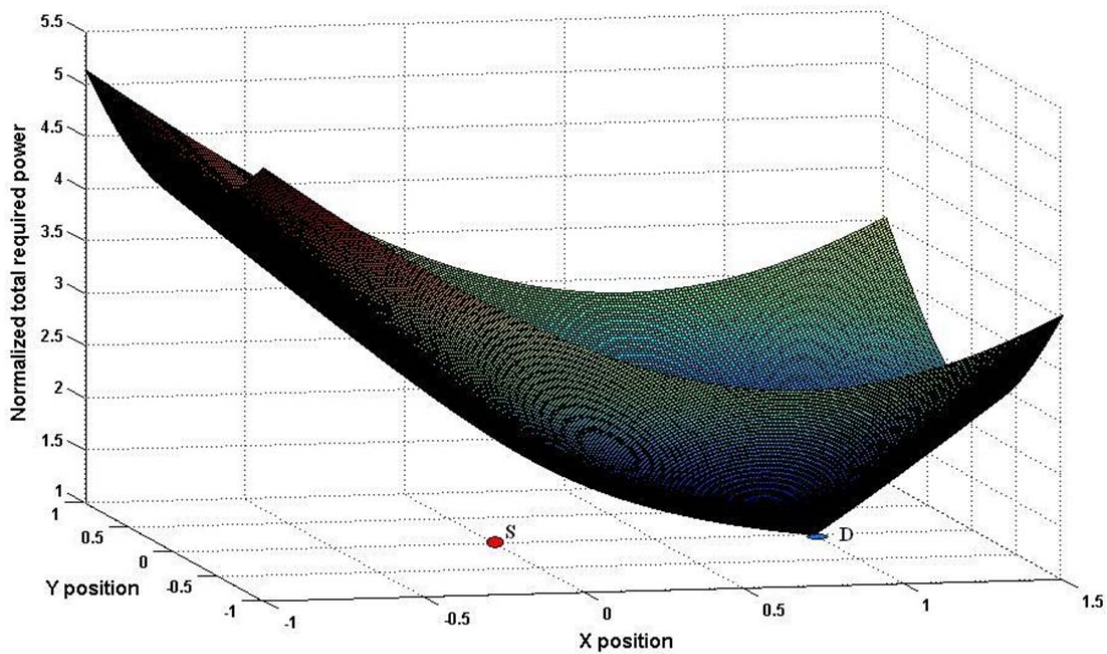
در این بخش، اندیس  $i$  مشخص کننده  $i$  امین کاربر آماده‌ی همکاری است و این کاربرها ممکن است در مجموعه انتخابی حضور نداشته باشند. بنابر روابط (2-8) و (2-9)، مقدار توان کل مورد نیاز در صورت انتخاب کاربر  $i$  ام به عنوان تنها کاربر همکار به شکل عبارت (2-22) خواهد بود.

$$P_{T-i} = \frac{2^{2R} - 1}{\sqrt{2P_{out-th}}} * d_{sd}^\alpha \sigma_N^2 * \frac{1 + \frac{\lambda'_i D_{r_id}^\alpha}{1 - \lambda'_i D_{sr_i}^\alpha}}{\sqrt{\lambda'_i}} \quad (22-2)$$

که در آن  $P_{T-i}$  نشان دهنده توان کل لازم برای حالت  $m = 1$  با انتخاب  $i$  امین کاربر همکار است. در این عبارت دیده می‌شود که یک مقدار ثابت غیر متغیر با  $i$  داریم که برای مقایسه می‌توانیم آن را حذف کنیم. بنابراین برای مقایسه کاربران در حالت  $m = 1$  کافی است مقدار (2-23) را محاسبه کنیم.

$$r_{i-1} = \frac{1}{\sqrt{\lambda'_i}} + \frac{\sqrt{\lambda'_i} D_{sr_i}^\alpha}{1 - \lambda'_i D_{sr_i}^\alpha} \quad (23-2)$$

وجود عدد یک در نام  $r_{i-1}$  نشانگر حالت  $m = 1$  است. اگر این مقدار را برای مکان‌های مختلف کاربران همکار رسم کنیم، شکل 2-5 به دست می‌آید. در این شکل مبداء و مقصد به ترتیب در مکانهای  $(x,y) = (0,0)$  و  $(x,y) = (1,0)$  قرار گرفته‌اند و تمام فواصل به مقدار  $d_{sd}$  نرمالیزه شده است و مقدار پارامتر  $\alpha$  برابر 2 در نظر گرفته شده است.



شکل 2-5 مقدار توان کل نرمالیزه شده لازم در حالت  $m=1$

این شکل نشان می‌دهد بهترین گره‌ها برای کاهش توان کل مورد نیاز برای ارسال گره‌های بسیار نزدیک به مقصد هستند به این دلیل که این گره‌ها  $\lambda'$  حدود 1 (معادل SNR گره مبداء در مقصد) را با توان مصرفی بسیار پایینی برای گرهی مبداء فراهم می‌کند.

همچنین این شکل نشان می‌دهد که انتخاب گره‌های نزدیک به مبداء توان کل نرمالیزه شده 2 نیاز دارد به این معنی که این گره‌ها که  $\lambda'$  حدود 1 را ایجاد می‌کند برای همکاری مقدار توانی در حد توان گره مبداء

مصرف می‌کنند. همچنین این شکل نشان می‌دهد که رابطه کاملاً مستقیمی میان توان کل مصرفی و مقدار  $\lambda'$  وجود ندارد.

بنابراین با استفاده از این شکل یا با محاسبه  $r_{i-1}$  از رابطه (2-23) می‌توان گره‌های کاندید همکاری را برای همکاری (در حالت  $m = 1$ ) بترتیب کرد و بهترین گره برای همکاری را انتخاب نمود.

## 2-6-2 روش انتخاب کاربر همکار در حالت $m > 1$

در حالت  $m > 1$ ، تعداد  $\binom{N}{m}$  انتخاب ممکن برای مجموعه کاربران همکار داریم که می‌بایست بهترین مجموعه را برای مینیمم کردن توان کل لازم بیابیم. یک راه برای پیدا کردن بهترین مجموعه ممکن این است که توان مورد نیاز تمام  $\binom{N}{m}$  مجموعه‌ی ممکن را محاسبه کرده و بهترین آن را انتخاب کنیم. اما این کار پیچیدگی بسیار زیادی دارد و با افزایش  $N$ ، پیچیدگی آن را به طور نمایی افزایش پیدا می‌کند. در این قسمت روشی را برای پیدا کردن بهترین مجموعه کاربران در حالت  $m > 1$  ارائه می‌کنیم.

همانطور که بخش چهارم این فصل بیان کردیم، در الگوریتم انتخاب کاربران همکار برای اینکه  $\lambda'$  محاسبه شده برای کاربران مستقل از بقیه گره‌های داخل مجموعه کاربران همکار باشد، از رابطه (2-21) برای محاسبه  $\lambda'$  استفاده خواهیم کرد. در این حالت اگر مقدار توان کل مورد نیاز را بنویسیم، به عبارت خواهیم (2-24) رسید.

$$P_T = \frac{(2^{(m+1)R} - 1)}{m+1 \sqrt{(m+1)! P_{out-th}}} * \frac{d_{sd}^\alpha \sigma_N^2}{m+1 \sqrt{\prod_{i \in S} \lambda'_i}} * \left( 1 + \sum_{i \in S} \frac{\lambda'_i D_{r_{id}}^\alpha}{1 - \lambda'_i D_{sr_i}^\alpha} \right)$$

$$= C(R, P_{out-th}, m) \frac{\left( 1 + \sum_{i \in S} \frac{\lambda'_i D_{r_{id}}^\alpha}{1 - \lambda'_i D_{sr_i}^\alpha} \right)}{m+1 \sqrt{\prod_{i \in S} \lambda'_i}} \quad (24-2)$$

که در آن  $S$  مجموعه کاربران همکار را نشان می‌دهد. دیده می‌شود که وابستگی توان کل به موقعیت هر کدام از کاربران همکار به شکل ضرب در جمع است که به این علت نمی‌توان روش دقیق و کاملی را

برای رتبه بندی کاربران ارائه داد. بنابراین در اینجا یک روش دو مرحله ای را برای رتبه بندی کاربران و تشکیل مجموعه بهینه ارائه می کنیم.

در ابتدای کار برای تمام کاربران پارامتر  $r_{i-m}$  را از عبارت (25-2) محاسبه می کنیم.

$$r_{i-m} = \frac{1}{m+1\sqrt{\lambda'_i}} + \frac{m+1\sqrt{(\lambda'_i)^m} D_{r_i d}^\alpha}{1 - \lambda'_i D_{sr_i}^\alpha} \quad (25-2)$$

این پارامتر قسمتی از توان کل است که تنها به وضعیت گرهی  $i$  ام بستگی دارد و مستقل از وضعیت بقیه ی گره های مجموعه ی انتخابی است. بعد از محاسبه این پارامتر برای تمام کاربران،  $m$  کاربری را که پایین ترین مقدارهای  $r_{i-m}$  را دارند را به عنوان مجموعه اولیه انتخاب می کنیم و این مجموعه را با  $P$  نشان می دهیم. حال می توانیم یک کاربر داخل مجموعه ی انتخاب شده را با کاربری خارج این مجموعه مقایسه کنیم. این مقایسه با جایگزین کردن یک کاربر داخل مجموعه ی اولیه (کاربر  $k$  ام) با یک کاربر خارج از مجموعه ی اولیه (کاربر  $z$  ام) انجام می شود و برای این کار مقدار توان کل مورد نیاز هر دو مجموعه را با هم مقایسه می کنیم.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{m+1\sqrt{\prod_{\substack{i \in P \\ i \neq k}} \lambda'_i}} * \frac{1}{m+1\sqrt{\lambda'_k}} * \left( 1 + \frac{\lambda'_k D_{r_k d}^\alpha}{1 - \lambda'_k D_{sr_k}^\alpha} + \sum_{\substack{i \in P \\ i \neq k}} \frac{\lambda'_i D_{r_i d}^\alpha}{1 - \lambda'_i D_{sr_i}^\alpha} \right) \\ & \leq \frac{1}{m+1\sqrt{\prod_{\substack{i \in P \\ i \neq k}} \lambda'_i}} * \frac{1}{m+1\sqrt{\lambda'_j}} * \left( 1 + \frac{\lambda'_j D_{r_j d}^\alpha}{1 - \lambda'_j D_{sr_j}^\alpha} + \sum_{\substack{i \in P \\ i \neq k}} \frac{\lambda'_i D_{r_i d}^\alpha}{1 - \lambda'_i D_{sr_i}^\alpha} \right) \end{aligned} \quad (26-2)$$

با توجه به نامساوی بیان شده در بالا، دیده می شود به علت اینکه گرهی  $k$  ام در مجموعه اولیه جای دارد، پارامتر  $r$  آن کوچک تر از پارامتر  $r$  کاربر  $z$  ام است. بنابراین اگر  $\lambda'_k < \lambda'_j$ ، ممکن است مقدار توان کل مجموعه ی جدید کمتر از مقدار توان مجموعه ی اولیه باشد. بنابراین تنها کاربرانی که  $\lambda'$  بزرگتر از

حداقل  $\lambda'$  های مجموعه اولیه دارند امکان تغییر دادن مجموعه‌ی اولیه را دارند. به همین دلیل تمام گره-هایی که این شرط را ندارند در این مرحله از انتخاب حذف خواهند شد.

نامساوی بالا به ما نشان می‌دهد که معیار  $\epsilon^v$  دیگری برای انتخاب کاربران رله کننده باید در نظر گرفت، اما این معیار برای هر کاربر متفاوت است. به عنوان بهترین متریک برای رتبه‌بندی مجدد کاربران و انتخاب گره‌های رله کننده‌ی نهایی، ما از متریک  $o_{i-m}$  استفاده می‌کنیم.

$$o_{i-m} = \frac{1}{m+1\sqrt{\lambda'_i}} * \left( 1 + \frac{\lambda'_i D_{r_{id}}^\alpha}{1 - \lambda'_i D_{sr_i}^\alpha} + \sum_{j \in P} \frac{\lambda'_j D_{r_{jd}}^\alpha}{1 - \lambda'_j D_{sr_j}^\alpha} - \max_{j \in P} \frac{\lambda'_j D_{r_{jd}}^\alpha}{1 - \lambda'_j D_{sr_j}^\alpha} \right) \quad (27-2)$$

در این معیار فرض بر این است که مجموع توان‌های نرمالیزه شده‌ی کاربران همکار در حالت نهایی نزدیک به حالت انتخاب اولیه است و ما این مجموع را که در رتبه بندی و انتخاب کاربران همکار تاثیر دارد به شکل نشان داده شده در متریک بالا تخمین زده‌ایم. دقت کنید که این معیار تنها برای کاربرانی که از فرآیند انتخاب حذف نشده‌اند محاسبه می‌شود و  $m$  کاربری که کمترین مقدار را دارند به عنوان مجموعه‌ی بهینه انتخاب می‌شوند.

توجه داشته باشید که مجموعه اولیه که از رتبه بندی با معیار  $r_{i-m}$  بدست می‌آید نیز مجموعه مناسبی است و مقدار تغییری که در این مجموعه در مرحله دوم رتبه بندی ایجاد می‌شود تغییر چندانی در توان کل مجموعه انتخابی ایجاد نمی‌کند. بر این اساس می‌توان تعداد iteration های الگوریتم را بیشتر از 2 هم کرد، اما این کار تغییر چندانی در مجموعه انتخابی ایجاد نخواهد کرد. در بخش شبیه سازی نشان خواهیم داد که متوقف کردن انتخاب مجموعه در مرحله دوم انتخاب، افت چندانی در کارایی بدست آمده ایجاد نخواهد کرد.

<sup>47</sup> Metric

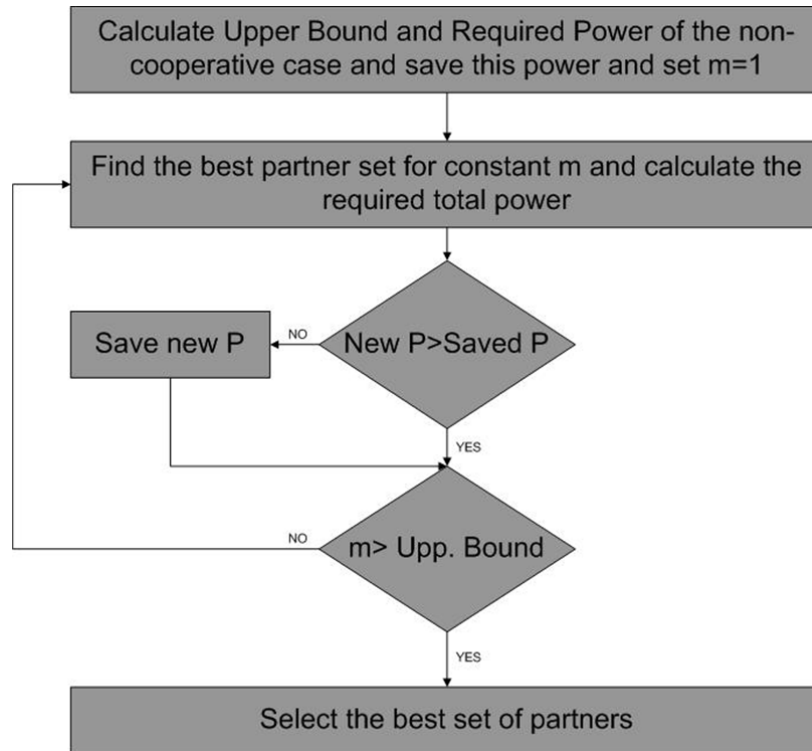
## 2-6-3- الگوریتم انتخاب بهترین مجموعه‌ی کاربران همکار

در دو زیر بخش قبلی روش بدست آوردن بهترین مجموعه کاربران همکار در حالت  $m = 1$  و  $m > 1$  را بیان کردیم. همان طور که دیده شد پیچیدگی این روشها بسیار کم و در حد دو بار مرتب کردن گره‌ها بر اساس دو پارامتر مختلف است. در این قسمت روش پیدا کردن بهترین مجموعه کاربران همکار را بر اساس روش‌های بیان شده‌ی قبلی، بیان می‌کنیم.

در قسمت قبل نشان دادیم که تعداد بهینه‌ی کاربران در هر حالت شبکه و کاربران کاندید یک حد بالا دارد. بنابراین می‌توانیم با استفاده از این مطلب که تعداد کاربران انتخابی در هیچ حالتی بزرگتر از این مقدار نخواهد بود، الگوریتم انتخاب کاربران همکار را بیان کنیم.

در این الگوریتم در اولین قدم مقدار توان مورد نیاز حالت بدون همکاری و حد بالای تعداد کاربران بهینه را از (2-19) بدست می‌آوریم. سپس  $m$  را برابر یک قرار داده و با استفاده از روش ارائه شده در زیر بخش اول، بهترین کاربر همکار را بدست آورده و مقدار توان کل مورد نیاز این حالت را محاسبه می‌کنیم. سپس  $m$  را یکی یکی اضافه کرده و با استفاده از الگوریتم ارائه شده در زیربخش دوم، بهترین مجموعه‌ی کاربران همکار را انتخاب و توان کل مورد نیاز آن حالت‌ها را محاسبه می‌کنیم. این عمل تا رسیدن مقدار  $m$  به حد بالای بدست آمده در قدم اول ادامه پیدا می‌کند.





شکل 2-6 نمودار گردش الگوریتم انتخاب بهترین مجموعه‌ی کاربران همکار

با توجه به اینکه هدف این الگوریتم پیدا کردن بهترین مجموعه‌ی کاربران همکار با کمترین مقدار توان مصرفی است، کافی است تا مینیمم مقدار توان کل مورد نیاز حالت‌های گذشته و حالت فعلی را برای انجام مراحل بعدی ذخیره کنیم. با این کار در انتهای کار مینیمم تمام حالت‌های  $m = 0$  تا  $m = U.B.$  را به عنوان حالت بهینه برای همکاری خواهیم داشت و بر اساس آن بهترین مجموعه‌ی کاربران همکار را انتخاب خواهیم کرد. در شکل 2-6، نمودار گردش الگوریتم انتخاب بهینه کاربران همکار را نشان داده‌ایم.

بنا بر روشی که بیان شد، پیچیدگی الگوریتم انتخاب مجموعه‌ی کاربران همکار به اندازه حد بالای تعداد کاربران در پیچیدگی هر مرحله از بدست آوردن مجموعه بهینه با  $m$  ثابت که حداکثر به اندازه دو بار مرتب کردن کاربران است، خواهد بود.

<sup>48</sup> Flow chart

در قسمت نتایج شبیه سازی نشان خواهیم داد که الگوریتم انتخاب کاربران بهینه کارایی بسیار مناسبی دارد و مجموعه‌ی انتخاب شده اگر به خاطر قطع کردن iteration ها در مرحله ی دوم انتخاب کاربران در حالت  $m$  ثابت هم دقیقاً معادل مجموعه‌ی بهینه بدست آمده از جستجوی کامل نباشد اما مقدار توان کل لازم برای مجموعه‌ی بدست آمده بسیار نزدیک به توان مورد نیاز مجموعه‌ی بهینه خواهد بود.

## 2-7- حالت اختصاص مساوی توان در شبکه

در قسمتهای قبل به بررسی حالت پخش بهینه توان میان کاربران رله‌کننده و کاربر مبدا و چگونگی انتخاب بهینه کاربران همکار براساس این نحوه‌ی پخش توان پرداختیم. ابتدایی‌ترین نوع پخش توان میان کاربران همکار و کاربر مبدا روش پخش مساوی توان<sup>49</sup> است. این روش در حالت توان کل مصرفی ثابت هیچ نوع پیچیدگی‌ای برای محاسبه‌ی توان‌های کاربران ندارد و فقط توان کل میان گره مبدا و گره‌های همکار به طور مساوی تقسیم می‌شود. ما در اینجا روش تخصیص مساوی توان میان کاربران را برای مقایسه با روش پخش بهینه بیان کرده و مقدار توان کل لازم برای رسیدن به قید احتمال خاموشی را به دست می‌آوریم. همچنین ارزش گره‌های رله‌کننده در حالت اختصاص مساوی توان را بررسی کرده و الگوریتم انتخاب کاربران همکار را بر اساس آن به طور مختصر ارائه می‌کنیم.

## 2-7-1- توان کل مورد نیاز در حالت پخش مساوی توان

در این زیربخش می‌خواهیم حداقل مقدار توان لازم برای راضی کردن قید احتمال خاموشی را در حالت EPA و با یک مجموعه از پیش مشخص شده‌ی کاربران همکار به دست آوریم. به بیان دیگر می‌خواهیم مسأله بهینه‌سازی (2-6) را با قید  $P_{r_i} = P_s$  حل کنیم. برای این کار ابتدا به بررسی پارامتر  $\lambda'_i$  در حالت EPA می‌پردازیم.

<sup>49</sup> Equal Power Allocation (EPA) Scheme

$$\lambda_i = \frac{\frac{P_s}{\sigma_N^2 d_{sr_i}^\alpha} * \frac{P_{r_i}}{\sigma_N^2 d_{r_i d}^\alpha}}{\frac{P_s}{\sigma_N^2 d_{sr_i}^\alpha} + \frac{P_{r_i}}{\sigma_N^2 d_{r_i d}^\alpha}} = \frac{P_s \frac{1}{d_{sr_i}^\alpha} * \frac{1}{d_{r_i d}^\alpha}}{\sigma_N^2 \frac{1}{d_{sr_i}^\alpha} + \frac{1}{d_{r_i d}^\alpha}} = \frac{P_s}{\sigma_N^2} \frac{1}{d_{sr_i}^\alpha + d_{r_i d}^\alpha} = \lambda_0 \frac{1}{D_{sr_i}^\alpha + D_{r_i d}^\alpha} \quad (28-2)$$

بنابراین اگر قید احتمال خاموشی را در این حالت بنویسیم، به عبارت (29-2) می‌رسیم.

$$\lambda_0^{m+1} \prod_{i=1}^m \frac{1}{D_{sr_i}^\alpha + D_{r_i d}^\alpha} \geq \frac{(2^{(m+1)R} - 1)^{m+1}}{P_{out-th}(m+1)!}$$

$$\Rightarrow \lambda_0 \geq \frac{2^{(m+1)R} - 1}{\sqrt{m+1} P_{out-th}(m+1)!} \sqrt{\prod_{i=1}^m (D_{sr_i}^\alpha + D_{r_i d}^\alpha)} \quad (29-2)$$

بنابراین برای راضی کردن شرط احتمال خاموشی باید عبارت (30-2) برقرار باشد.

$$P_s \geq (2^{(m+1)R} - 1) \sigma_N^2 d_{sd}^\alpha \sqrt{\frac{\prod_{i=1}^m (D_{r_i d}^\alpha + D_{sr_i}^\alpha)}{P_{out-th}(m+1)!}} \quad (30-2)$$

و توان کل مصرفی در این حالت به علت مساوی بودن توان تمام گره‌های همکار با گرهی مبدأ،

(m + 1) برابر مقدار حداقل  $P_s$  در (30-2) است.

$$P_T = (m+1)(2^{(m+1)R} - 1) \sigma_N^2 d_{sd}^\alpha \sqrt{\frac{\prod_{i=1}^m (D_{r_i d}^\alpha + D_{sr_i}^\alpha)}{P_{out-th}(m+1)!}} \quad (31-2)$$

در بخش نتایج شبیه‌سازی نشان خواهیم داد که مقدار توان به دست آمده در این حالت در بعضی حالات

بسیار نزدیک به توان کل مورد نیاز حالت بهینه است و در بعضی از حالات تفاوت چشمگیری با آن

دارد. همچنین از این مقدار توان مورد نیاز در حالت تقسیم مساوی توان می‌توان به عنوان حدبالای

مصرف توان در هر نوع الگوریتمی برای تخصیص توان یاد کرد. به این دلیل که این الگوریتم هیچ

پیچیدگی‌ای ندارد و اگر الگوریتمی بدتر از این الگوریتم عمل کند می‌تواند با این الگوریتم با پیچیدگی

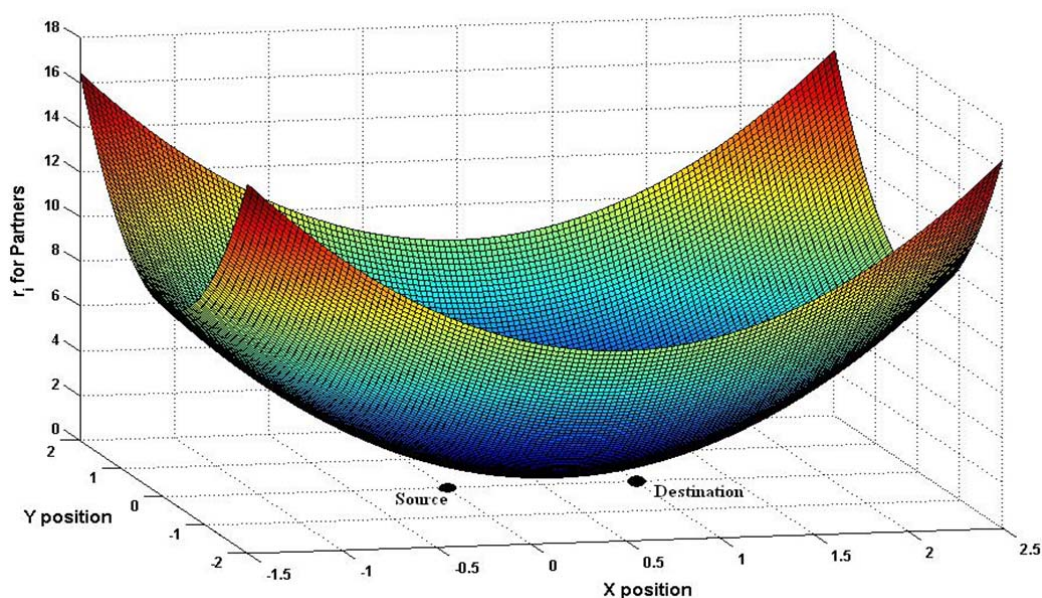
کمتر جایگزین شود.

## 2-7-2- انتخاب مجموعه‌ی کاربران همکار در حالت اختصاص توان مساوی

عبارت (2-31) نشان می‌دهد که با فرض  $m$  ثابت، هر چه مقدار عبارت  $\prod_{i=1}^m (D_{r_i d}^\alpha + D_{sr_i}^\alpha)$  بزرگتر باشد، توان بیشتری برای راضی کردن قید احتمال خاموشی لازم است. این نشان می‌دهد که تنها پارامتر مهم در حالت EPA برای کاربران همکار مقدار  $\beta_i$  در عبارت است.

$$\beta_i = D_{sr_i}^\alpha + D_{r_i d}^\alpha \quad (2-32)$$

این به آن معنی است که هرچه پارامتر  $\beta_i$  برای کاربری بزرگتر باشد منجر به توان بزرگتری برای راضی کردن قید احتمال خاموشی می‌شود. مثلاً اگر تمام گره‌های یک مجموعه کاربران همکار غیر از یکی را ثابت نگه داریم و آن گره را با یک گره‌ی دیگر که مقدار  $\beta_i$  در آن گره کمتر باشد جایگزین کنیم، مقدار توان کل مورد نیاز کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توانیم گره‌های مختلف را در حالت EPA بر اساس این پارامتر رتبه‌بندی کنیم و بهترین گره‌ها را بر اساس آن شناسایی کنیم. در شکل 2-7، مقدار این پارامتر برای مکانهای مختلف کاربر همکار رسم شده است. در این شکل گره مبدا در نقطه  $(0,0)$  و گره مقصد در نقطه  $(1,0)$  قرار دارند و پارامتر  $\alpha$  برابر 2 است.



شکل 2-7 مقدار پارامتر  $\beta_i$  برای مکانهای مختلف کاربران همکار در حالت EPA

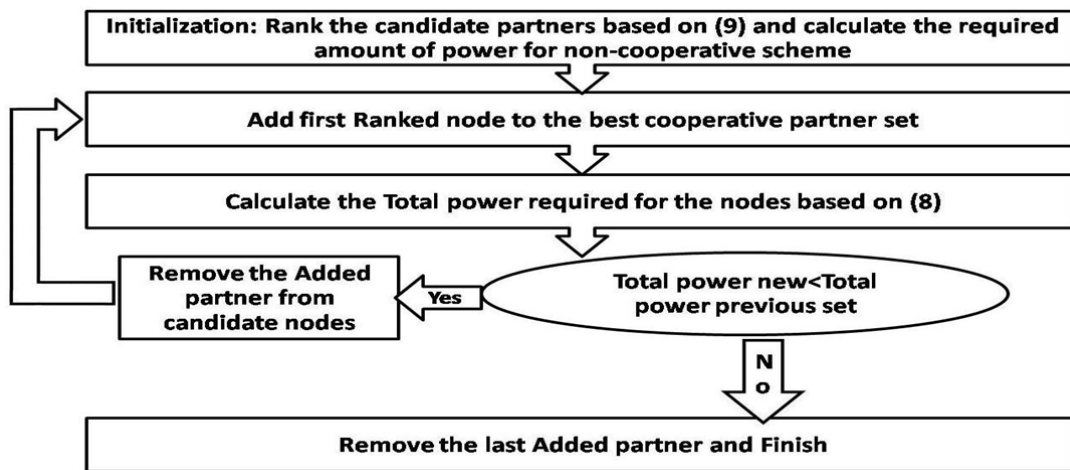
این شکل نشان می‌دهد که گره‌های نزدیک به میانه‌ی مبدا و مقصد کوچکترین مقدارهای  $\beta_i$  را دارا هستند و گره‌های نزدیک مبدا و مقصد نیز  $\beta_i$  های حدوداً برابری با هم دارند. این نشان می‌دهد که گره‌های میانی در EPA از همه بهتر عمل می‌کنند و عملکرد گره‌های نزدیک مبدا و مقصد برای کاهش توان کل مورد نیاز برای راضی کردن احتمال خاموشی معادل هم هستند. اگر این شکل را با شکل 2-5 مقایسه کنیم تفاوت این عملکرد را با حالت بهینه می‌بینیم. در این دو شکل گره‌های مختلف اولویت‌های متفاوتی در حالت‌های اختصاص بهینه و اختصاص مساوی دارند.

بنابراین الگوریتم به دست آوردن بهترین مجموعه کاربران همکار در حالت EPA بعد از رتبه‌بندی کاربران کاندید بر اساس پارامتر  $\beta_i$  تنها عمل به دست آوردن  $m$  را بر عهده دارد. الگوریتم انتخاب  $m$  را نیز بر مبنای روشی که در زیربخش‌های قبلی برای به دست آوردن  $m$  برای حالت بهینه بیان کردیم، پیاده‌سازی می‌کنیم. به این ترتیب که در هر مرحله بهترین مجموعه‌ی کاربران همکار را که از  $m$  تا کاربر با  $\beta_i$  کمتر تشکیل می‌شود را انتخاب و توان کل مورد نیاز را محاسبه می‌کنیم و هر جا که افزایشی نسبت

به مرحله قبل داشتیم کار را متوقف می‌کنیم. به این ترتیب الگوریتم انتخاب کاربران همکار در حالت EPA مراحل زیر را شامل می‌شود:

- 1- محاسبه مقدار توان مورد نیاز در حالت بدون همکاری و قرار دادن  $m = 1$
- 2- رتبه بندی کاربران بر مبنای پارامتر  $\beta_i$
- 3- انتخاب  $m$  تا رتبه برتر کاربران و محاسبه توان کل مورد نیاز از (2-31).
- 4- اگر افزایش نسبت به مرحله قبل داشتیم برو به 5 وگرنه  $m = m + 1$  و برگرد به 3.
- 5- حذف آخرین کاربر اضافه شده و نهایی کردن انتخاب کاربران همکار.

نمودار گردش این الگوریتم در شکل 2-8 آمده است.



شکل 2-8 نمودار گردش الگوریتم انتخاب همکار در حالت اختصاص مساوی توان

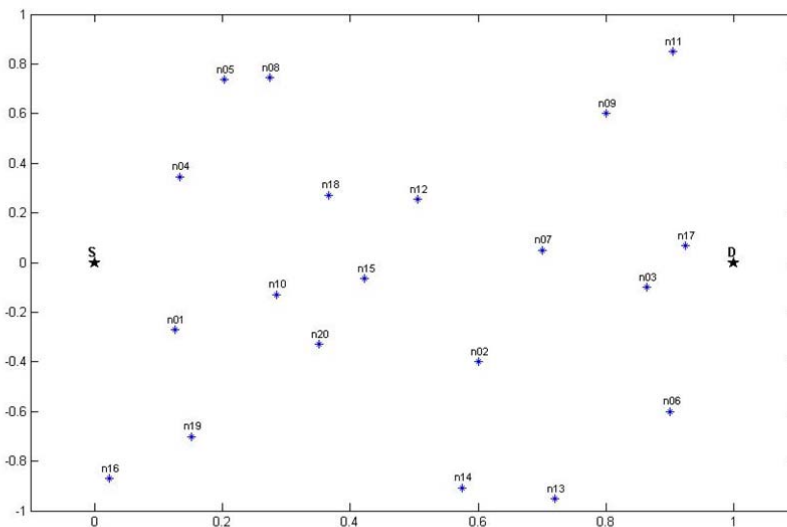
همانطور که بیان شد الگوریتم ارائه شده برای به دست آوردن بهترین مجموعه انتخابی کاربران در حالت EPA پیچیدگی بسیار کمی دارد و پیچیدگی آن در حد یک بار عمل sort کردن و به تعداد پله‌ها محاسبه توان است.

در بخش نتایج شبیه‌سازی، الگوریتم انتخاب کاربران همکار در حالت اختصاص مساوی توان را با الگوریتم حالت بهینه مقایسه می‌کنیم. توجه داشته باشید که اگر بهترین مجموعه کاربران همکار را در حالت بهینه به عنوان بهترین مجموعه در نظر بگیریم و الگوریتم توان مساوی را در بین کاربران اجرا کنیم ممکن است بهترین نتیجه را به دست نیاوریم و به دست آوردن بهترین مجموعه از این الگوریتم (در حالت اختصاص توان مساوی) می‌تواند توان کل مورد استفاده را کاهش دهد.

## 2-8- نتایج شبیه‌سازی

در این قسمت به بررسی نتایج شبیه‌سازی در مورد الگوریتم‌های ارائه شده در بخش‌های قبل می‌پردازیم.

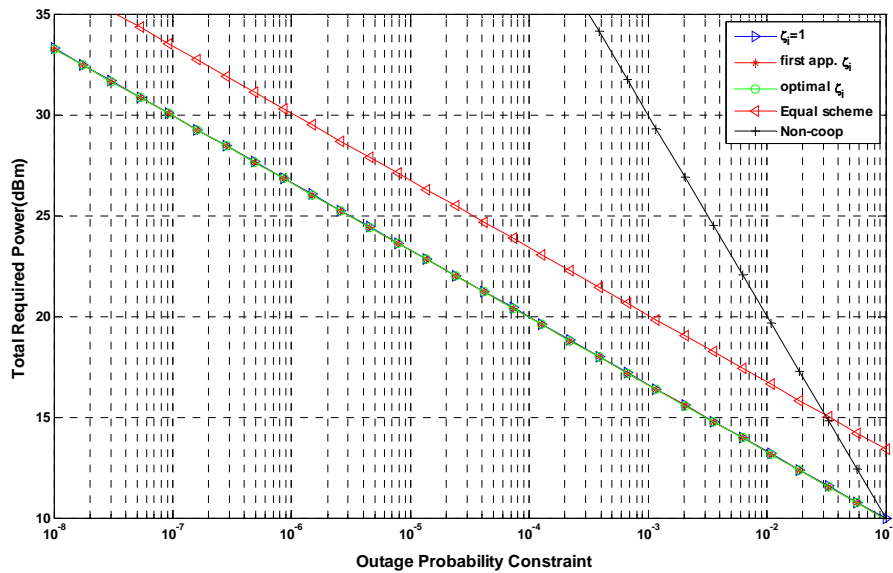
به عنوان یک حالت آزمایشی، مجموعه‌ای شامل 20 گرهی همکار را برای بررسی الگوریتم‌های ارائه شده در نظر می‌گیریم. وضعیت این 20 گره در شکل 2-9 نشان داده شده است.  $S$  ,  $D$  نشان دهنده مکان مبدا و مقصد در این شکل است. همچنین فاصله  $d_{sd}$  نرمالیزه شده است.



شکل 2-9 مکان کاربران آماده‌ی همکاری

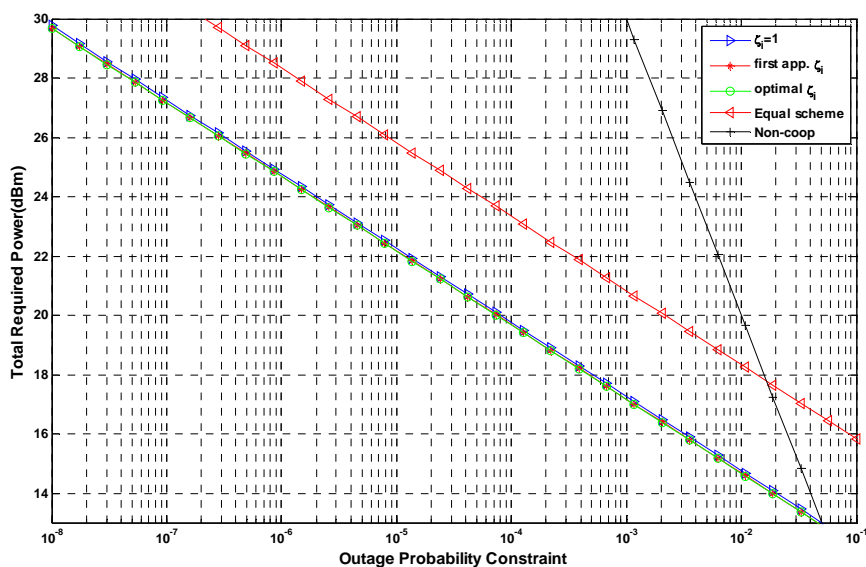
همچنین در این بخش،  $R = 1 \text{ bit/s/Hz}$  و  $\sigma_N^2 = 1e-7W$  و  $d_{sd} = 100m$  و  $\alpha = 2$  در نظر گرفته شده است.

در ابتدا به بررسی الگوریتم اختصاص توان و روشهای تخمینی که برای حذف خاصیت iterative این الگوریتم ارائه شده و تفاوت حالت بهینه با حالت تقسیم مساوی می پردازیم. شکل 2-10 و شکل 2-11 مقدار توان کل مورد نیاز در احتمال خاموشی های مختلف در حالت های اختصاص توان به ترتیب برای دو مجموعه کاربر  $\{n_3, n_{17}\}$  و  $\{n_{17}, n_3, n_7\}$  به عنوان مجموعه کاربران همکار، نشان می دهند.



شکل 2-10 توان کل مورد نیاز با کاربران همکار  $\{n_3, n_{17}\}$  با استراتژی های مختلف





شکل 2-11 توان کل مورد نیاز با کاربران همکار  $\{n_3, n_{17}, n_7\}$  با استراتژی‌های مختلف

در این شکل‌ها دیده می‌شود که مقدار توان کل مورد نیاز اولین تخمین ارائه شده برای  $\zeta_i$  که بستگی به مجموعه‌ی انتخابی داشت، بر حالت بهینه‌ی با 5 بار تکرار کاملاً منطبق است. همچنین حالت حذف  $\zeta_i$  با قرار دادن مقدار آن برابر با 1 نیز فقط در حدود 0.1dB با این دو حالت تفاوت دارد. این نشان دهنده‌ی آن است که این روش نیز کارایی حالت بهینه را افت چندانی نمی‌دهد. این دوشکل نشان می‌دهد که تفاوت حالت بهینه با حالت EPA نیز بستگی به تعداد کاربران و مکان این کاربران دارد. همچنین تفاوت حالت بدون همکاری با حالت‌های مشارکتی با کاهش مقدار قید احتمال خاموشی زیادتر می‌شود که به علت شیب بیشتر نمودارهای حالت‌های مشارکتی به دلیل داشتن مراتب دایورسیتی بالاتر است.

برای مقایسه کارایی الگوریتم انتخاب بهترین مجموعه‌ی کاربران همکار علاوه بر پیاده سازی روش ارائه شده در بخش 6، روش جستجوی کامل را نیز که تمام مجموعه‌های ممکن را برای پیدا کردن بهترین مجموعه کاربران همکار امتحان می‌کند، را پیاده‌سازی کردیم.

همانطور که در بخش 6 نشان داده شد، انتخاب بهترین مجموعه‌ی کاربران همکار با  $m$  ثابت، ربطی به پارامترهای شبکه  $(P_{out-th}, R)$  و پارامترهای کاربر مبدا  $(d_{sd}, \sigma_N^2)$  ندارد. به همین خاطر با حذف این پارامترها در انتخاب، برای  $m$  میان 1 تا 10، بهترین مجموعه‌های انتخابی توسط الگوریتم ارائه شده و توسط روش جستجوی کامل از میان گره‌های شکل 2-9، در جدول 1-2 نشان داده شده است. در این جدول مقدار توان کل مورد نیاز نرمالیزه شده برای بهترین مجموعه انتخابی هر دو الگوریتم و تفاوت آنها نیز آورده شده است.

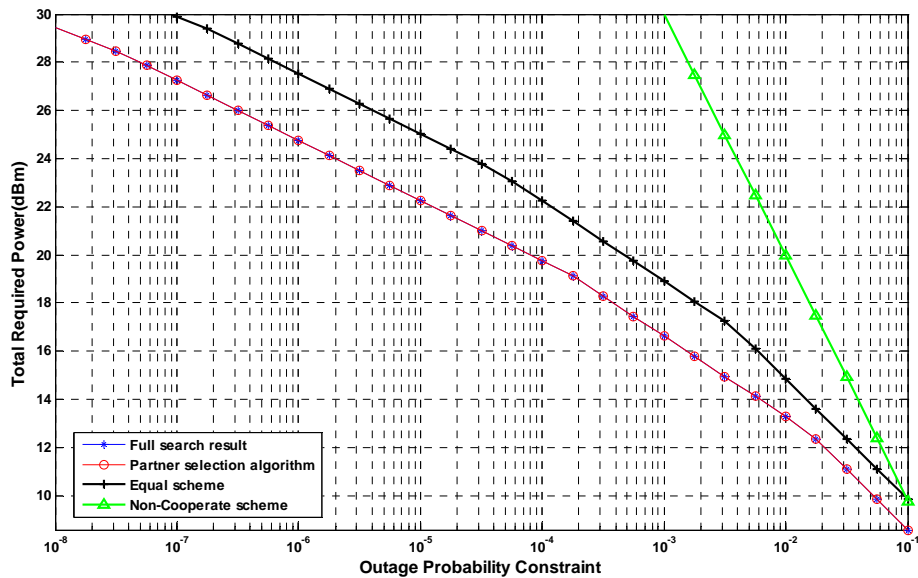
جدول 1-2 بهترین مجموعه‌های انتخابی در حالت‌های مختلف  $m$

M	Optimal set (full search)	Optimal set (our alg.)	Diff
1	{n17} $P_{T-n}=0.7593$	{n17} $P_{T-n}=0.7593$	0
			0
2	{n17,n03} $P_{T-n}=0.6566$	{n17,n03} $P_{T-n}=0.6566$	0
			0
3	{n17,n03,n07} $P_{T-n}=0.6297$	{n17,n03,n07} $P_{T-n}=0.6297$	0
			0
4	{n17,n03,n07,n12} $P_{T-n}=0.7128$	{n17,n03,n07,n12} $P_{T-n}=0.7128$	0
			0
5	{n17,n03,n07,n12,n15} $P_{T-n}=0.7779$	{n17,n03,n07,n12,n15} $P_{T-n}=0.7779$	0
			0
6	{n17,n03,n07,n12,n15,n02} $P_{T-n}=0.8411$	{n17,n03,n07,n12,n15,n02} $P_{T-n}=0.8411$	0
			0
7	{n17,n03,n07,n12,n15,n02,n18} $P_{T-n}=0.9163$	{n17,n03,n07,n12,n15,n02,n18} $P_{T-n}=0.9163$	0
			0
8	{n17,n03,n07,n12,n15,n02,n18,n10} $P_{T-n}=0.9880$	{n17,n03,n07,n12,n15,n02,n18,n9} $P_{T-n}=0.9976$	1
			0.9%
9	{n17,n03,n07,n12,n15,n02,n18,n10,n20} $P_{T-n}=1.0492$	{n17,n03,n07,n12,n15,n02,n18,n9,n6} $P_{T-n}=1.0691$	2
			1.9%
10	{n17,n03,n07,n12,n15,n02,n18,n10,n20,n9} $P_{T-n}=1.1148$	{n17,n03,n07,n12,n15,n02,n18,n9,n6,n20} $P_{T-n}=1.1262$	1
			1.1%

جدول 1-2 نشان می‌دهد که الگوریتم ارائه شده تا حالت  $m = 7$  دقیقاً مجموعه کاربران را برابر با حالت مجموعه‌ی انتخابی حالت جستجوی کامل انتخاب می‌کند که این نشان از دقت بالای الگوریتم

ارائه شده دارد. برای حالت‌های  $m \geq 8$  مجموعه انتخابی در 1 یا 2 عضو با مجموعه انتخابی روش جستجوی کامل تفاوت دارد. اما تفاوت مقدار توان مورد نیاز حالت‌های مختلف از 2٪ بیشتر نشده است که این نشان از این است که تفاوت ایجاد شده در این حالتها که از قطع الگوریتم انتخاب کاربران در پله دوم ناشی می‌شود، باعث کاهش کارایی بسیار کمی در سیستم شده است.

در شکل 2-12، مقدار توان مورد نیاز سیستم در حالت‌های انتخاب مجموعه با جستجوی کامل، انتخاب مجموعه با الگوریتم پیشنهادی و انتخاب بهترین مجموعه حالت EPA با الگوریتم پیشنهادی و حالت بدون همکاری در احتمال خاموشی‌های مختلف نشان داده شده است.



شکل 2-12 توان مورد نیاز سیستم در حالت‌های مختلف انتخاب کاربران همکار

این شکل نشان می‌دهد که حالت انتخاب کاربران با جستجوی کامل با حالت الگوریتم پیشنهادی برای انتخاب بهترین مجموعه کاملاً مطابقت دارد به دلیل اینکه در هیچ کدام از این حالت‌های نشان داده شده، تعداد کاربران مجموعه انتخابی به عدد 8 نرسیده است. تغییر شیب در این نمودار نشان دهنده تغییر

تعداد کاربران داخل مجموعه انتخاب شده است. در ، مجموعه‌های انتخابی در حالت‌های مختلف این شکل نشان داده شده است.

جدول 2-2 بهترین مجموعه‌های انتخابی در حالت‌های مختلف  $m$

Out. prob.	Optimal set (full Search)	Optimal set (Proposed Method)	Best set for EPA (Proposed Method)	Up B.	Up. B. (19)
1.00E-15	{n17,n03,n07,n12,n15,n02}	{n17,n03,n07,n12,n15,n02}	{n15,n07,n10,n12,n18,n20}	7	7
1.00E-14	{n17,n03,n07,n12,n15}	{n17,n03,n07,n12,n15}	{n15,n07,n10,n12,n18}	6	
1.00E-13					
1.00E-12					
1.00E-11				6	
1.00E-10	{n17,n03,n07,n12}	{n17,n03,n07,n12}	{n15,n07,n10,n12}		5
1.00E-09					
1.00E-08				5	
1.00E-07	{n17,n03,n07}	{n17,n03,n07}	{n15,n7,n10}		4
1.00E-06					
1.00E-05					
1.00E-04				4	
1.00E-03	{n17,n03}	{n17,n03}	{n15,n7}		3
1.00E-02					
1.00E-01	{n17}	{n17}	{n15}	2	2

تفاوت نشان داده شده در مجموعه‌های انتخابی در حالت EPA , OPA از تفاوت متریک های انتخاب در دو حالت است که در قسمتهای قبل ذکر شده است. همچنین دیده می‌شود که تعداد کاربران حالت EPA نیز در حد بالای تعداد کاربران نشان داده شده در ستون آخر جدول کمتر است که این تأیید کننده این مطلب است که اگر استراتژی همکاری هم از حالت OPA تغییر کند، مقدار کاربران هر حالت upper bound نمی تواند بیشتر شود چون OPA بهترین حالت را مشخص می‌کند.

### 3- همکاری بهینه دوطرفه

#### 3-1- مقدمه

در فصل گذشته به بررسی همکاری بهینه پرداختیم. در آن فصل در الگوریتم توزیع توان و الگوریتم انتخاب کاربران همکار فرض را بر آن گرفتیم که تنها یک گره (مبداء) قصد ارسال اطلاعات را دارد و در زمان ارسال آن گره، بقیه گره ها تنها وظیفه کمک رسانی به گره مبداء را دارند. همچنین در آن فصل فرض گرفتیم که انتخاب گرهی همکار برای گره مبداء تنها بر مبنای مینیمم کردن توان کل مورد نیاز برای ارسال گره مبداء با شرط راضی کردن قید احتمال خاموشی انجام می‌شود و هیچ قید دیگری در تعداد کاربران همکار و یا محدودیت انتخاب کاربران را در نظر نگرفتیم تا بهترین حالت ممکن برای توان کل پیدا شود.

در این فصل به بررسی همکاری دوطرفه خواهیم پرداخت. همکاری دوطرفه به این معناست که اگر گره-ی 1 برای گره 2 عمل رله را انجام می‌دهد، گره 2 نیز این عمل را به صورت متقابل برای گرهی 1 انجام دهد. در این فصل ابتدا با توجه به روابط به دست آمده در فصل گذشته، روابط همکاری بهینه دوطرفه را به دست می‌آوریم. سپس به بررسی نواحی‌ای که در آنها همکاری دوطرفه در حالت خودخواهانه قابل

انجام است خواهیم پرداخت و بعد از آن الگوریتمی را برای انتخاب کاربر همکار به صورت خودخواهانه ارائه خواهیم کرد.

### 3-2- دلایل انتخاب همکاری دوطرفه به جای همکاری چندطرفه

در فصل گذشته نشان دادیم که تعداد بهینه کاربران همکار تابعی از موقعیت کاربران کاندید همکاری، نرخ ارسال و قید احتمال خاموشی مورد نظر است. همچنین حد بالای تعداد بهینه کاربران در شکل 2-3 نشان داده شد. آن شکل نشان می‌دهد که در قسمت عمده‌ای از حالاتی که در شکل نشان داده شده‌است، حد بالای تعداد کاربران کمتر از 2 است. این به آن معنی است که در بیشتر حالت همکاری دوطرفه نزدیک به بهترین حالت ممکن است.

علاوه بر این همکاری چندطرفه محدودیتهای زیادی دارد از جمله اینکه در این همکاری‌ها الگوریتم‌های کنترل دسترسی<sup>50</sup> کاربران بسیار پیچیده‌تر از حالت همکاری دوطرفه است و همچنین در همکاری‌های چندطرفه تعداد دفعات خاموش و روشن کردن فرستنده‌ها زیادتر از حالت دوطرفه است و این پروسه‌ها نیز توان مصرفی می‌کنند که اگر این خاموش و روشن شدن‌ها بر مبنای مکانیزم خواب<sup>51</sup> باشد، مقدار توان مصرفی آنها با توان مصرفی ارسال قابل مقایسه می‌شود.

یکی دیگر از دلایلی که می‌توان برای انتخاب حالت همکاری دوطرفه به جای چندطرفه در نظر گرفت، بسته‌های کنترلی مورد نیاز برای ایجاد ارتباط است. در حالت همکاری چندطرفه تعداد بسته‌های ارسال، توان مورد نیاز برای ارسال این بسته‌ها و زمانبندی مورد نیاز برای ارسال این بسته‌ها مسائل بسیاری را ایجاد می‌کند که این مسائل در همکاری‌های دوطرفه با توجه به کمتر بودن طرفه‌هایی که با هم همکاری می‌کنند، به مراتب کمتر است.

---

<sup>50</sup> *Medium Access Control*

<sup>51</sup> *Sleep discipline*

با توجه به دلایل ذکر شده، در حال حاضر به نظر می‌رسد که روش همکاری دوطرفه بسیار عملی‌تر از همکاری‌های چندطرفه است. بنابراین در این فصل به این مسأله خواهیم پرداخت.

### 3-3- توان مورد نیاز هر گره در همکاری دوطرفه در حالت بهینه

در فصل گذشته با حل مسأله بهینه‌سازی مقید، توان مورد نیاز هر گره برای ارسال گره مبدا که مجموع توان مورد نیاز برای ارسال را مینیمم می‌کند، را به دست آوردیم. در این قسمت می‌خواهیم به بررسی توان کل مورد نیاز هر گره در حالت همکاری دوطرفه را بپردازیم. این به آن معنی است که اگر گره 1 و 2 با هم همکاری دوطرفه دارند، یک بار توان مورد نیاز هر گره برای ارسال گره 1 به عنوان گره مبدا و گره 2 به عنوان رله و یک بار توان مورد نیاز هر دو گره در حالت ارسال گره 2 به عنوان گره مبدا و گره 1 به عنوان رله را به دست آوردیم و توان این دو حالت را برای هر گره با هم جمع کنیم. این جمع کردن با این فرض است که ارسال هر دو گره با یک نرخ انجام می‌شود. یعنی فرض شود که هر دو گره به یک میزان اطلاعات برای ارسال دارند.

در فصل گذشته دیدیم که در حالت همکاری دوطرفه (حالت  $m = 1$ )، پارامتر  $\lambda_1$  برابر 1 خواهد بود و بنابراین الگوریتم اختصاص بهینه توان هیچ پارامتر غیر مشخصی ندارد و نیازی به تخمین پارامتر  $\lambda_1$  برای حذف رفتار iterative آن نیست. در این قسمت برای بررسی توان مورد نیاز حالت همکاری دوطرفه، دو کاربر را با اندیس‌های 1 و 2 مشخص می‌کنیم. بنابراین، پارامتر  $\lambda'$  این دو کاربر به شکل عبارت‌های (1-3) و (2-3) خواهد بود.

$$\lambda'_1 = \frac{D_{21}^\alpha + \frac{1}{2}D_{1d}^\alpha - \sqrt{\frac{1}{4}D_{1d}^{2\alpha} + 2D_{21}^\alpha D_{1d}^\alpha}}{D_{21}^{2\alpha} - D_{21}^\alpha D_{1d}^\alpha} \quad (1-3)$$

$$\lambda'_2 = \frac{D_{12}^\alpha + \frac{1}{2}D_{2d}^\alpha - \sqrt{\frac{1}{4}D_{2d}^{2\alpha} + 2D_{12}^\alpha D_{2d}^\alpha}}{D_{12}^{2\alpha} - D_{12}^\alpha D_{2d}^\alpha} \quad (2-3)$$

در این بخش توان مورد نیاز دو کاربر در حالت ارسال گرهی 1 به عنوان گرهی مبدا را به ترتیب با  $P_{21}$  و  $P_{11}$  و توان مورد نیاز این دو کاربر در حالت ارسال گرهی 2 به عنوان مبدا را به ترتیب با  $P_{12}$  و  $P_{22}$  نشان می‌دهیم که مقدار این توانها در روابط بعدی آمده است.

$$P_{11} = \frac{2^{2R} - 1}{\sqrt{2P_{out-th}}} * \frac{d_{1d}^\alpha \sigma_N^2}{\sqrt{\lambda'_2}} \quad (3-3)$$

$$P_{21} = \frac{2^{2R} - 1}{\sqrt{2P_{out-th}}} * \frac{\sqrt{\lambda'_2}}{1 - \lambda'_2 D_{12}^\alpha} * d_{2d}^\alpha \sigma_N^2 \quad (4-3)$$

$$P_{12} = \frac{2^{2R} - 1}{\sqrt{2P_{out-th}}} * \frac{\sqrt{\lambda'_1}}{1 - \lambda'_1 D_{21}^\alpha} * d_{1d}^\alpha \sigma_N^2 \quad (5-3)$$

$$P_{22} = \frac{2^{2R} - 1}{\sqrt{2P_{out-th}}} * \frac{d_{2d}^\alpha \sigma_N^2}{\sqrt{\lambda'_1}} \quad (6-3)$$

بنابراین توان کل مورد نیاز هر کدام از گره‌ها که آنها را به ترتیب با  $P_1$  و  $P_2$  نشان می‌دهیم به شکل عبارت‌های (7-3) و (8-3) خواهند بود.

$$\begin{aligned} P_1 = P_{11} + P_{12} &= \frac{2^{2R} - 1}{\sqrt{2P_{out-th}}} * \frac{d_{1d}^\alpha \sigma_N^2}{\sqrt{\lambda'_2}} + \frac{2^{2R} - 1}{\sqrt{2P_{out-th}}} * \frac{\sqrt{\lambda'_1}}{1 - \lambda'_1 D_{21}^\alpha} * d_{1d}^\alpha \sigma_N^2 \\ &= \frac{2^{2R} - 1}{\sqrt{2P_{out-th}}} * d_{1d}^\alpha \sigma_N^2 * \left( \frac{1}{\sqrt{\lambda'_2}} + \frac{\sqrt{\lambda'_1}}{1 - \lambda'_1 D_{21}^\alpha} \right) \end{aligned} \quad (7-3)$$

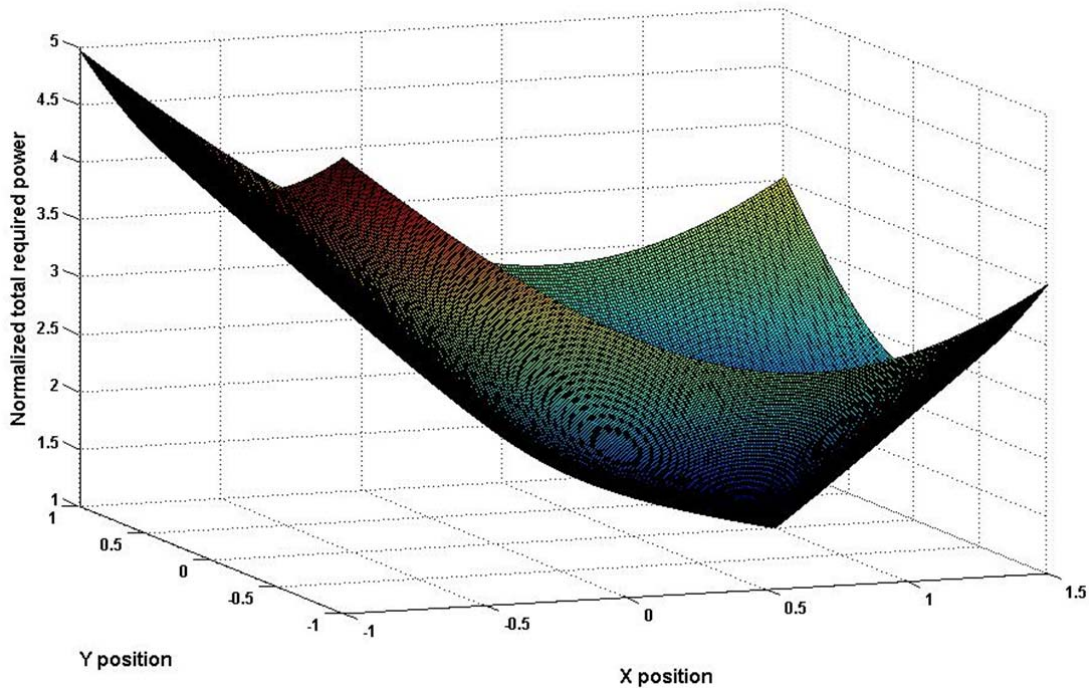
$$\begin{aligned} P_2 = P_{22} + P_{21} &= \frac{2^{2R} - 1}{\sqrt{2P_{out-th}}} * \frac{d_{2d}^\alpha \sigma_N^2}{\sqrt{\lambda'_1}} + \frac{2^{2R} - 1}{\sqrt{2P_{out-th}}} * \frac{\sqrt{\lambda'_2}}{1 - \lambda'_2 D_{12}^\alpha} * d_{2d}^\alpha \sigma_N^2 \\ &= \frac{2^{2R} - 1}{\sqrt{2P_{out-th}}} * d_{2d}^\alpha \sigma_N^2 * \left( \frac{1}{\sqrt{\lambda'_1}} + \frac{\sqrt{\lambda'_2}}{1 - \lambda'_2 D_{12}^\alpha} \right) \end{aligned} \quad (8-3)$$

در عبارت‌های (7-3) و (8-3) یک قسمت ثابت وجود دارد که به حالت کاربر همکار هیچ وابستگی ندارد و تنها به شرایط شبکه و شرایط گره مبدا بستگی دارد. اگر این ترم‌ها را از توان مورد نیاز گرهی 1 بیرون بیاوریم پارامتر  $\theta_1$  بدست می‌آید که در عبارت (9-3) نشان داده شده است.



$$\theta_1 = d_{1a}^\alpha \left( \frac{1}{\sqrt{\lambda_2}} + \frac{\sqrt{\lambda_1}}{1 - \lambda_1 D_{21}^\alpha} \right) \quad (9-3)$$

حال اگر مانند شکل‌های قبل فرض کنیم گره 1 در نقطه مبدا قرار گرفته است و گره مقصد در نقطه نرمال شده (0 و 1) قرار گرفته است، مقدار پارامتر  $\theta_1$  را برای گره 2 که در مکان‌های مختلف قرار گرفته باشد، در شکل 1-3 نشان داده‌ایم.



شکل 1-3 مقدار پارامتر  $\theta_1$  برای مکان‌های مختلف گره 2

این شکل رفتاری بسیار شبیه به شکل 2-5 دارد که در آن توان نرمال شده کل یک ارسال (مبدا همراه با رله) رسم شده است. این تشابه نشان می‌دهد که مقدار توانی که گره 2 برای ارسال گره 1 مصرف می‌کند باید در حدود مقدار توانی باشد که گره 1 به عنوان رله گره 2 مصرف می‌کند.

برای نشان دادن دقیقتر این مطلب مقدار توان مصرف شده در حالت رله بودن گره‌ها را ساده می‌کنیم. با توجه به محاسبات انجام شده در ضمیمه ه، مقدار توان مصرف شده ی گره 1 به عنوان رله ی گره 2، را می‌توان به شکل عبارت (3-10) بیان کرد.

$$P_{12} = \frac{2^{2R} - 1}{\sqrt{2P_{out-th}}} * \frac{\sqrt{\lambda'_1}}{1 - \lambda'_1 D_{21}^\alpha} * d_{1d}^\alpha \sigma_N^2 = \sigma_N^2 \frac{2^{2R} - 1}{\sqrt{2P_{out-th}}} * \frac{\sqrt{d_{1d}^\alpha d_{2d}^\alpha}}{\sqrt{1 + \lambda'_1 D_{21}^\alpha}} \quad (10-3)$$

و بر این اساس  $P_{21}$  را نیز می‌توان به شکل عبارت (11-3) بیان کرد.

$$P_{21} = \frac{2^{2R} - 1}{\sqrt{2P_{out-th}}} * \frac{\sqrt{\lambda'_2}}{1 - \lambda'_2 D_{12}^\alpha} * d_{2d}^\alpha \sigma_N^2 = \sigma_N^2 \frac{2^{2R} - 1}{\sqrt{2P_{out-th}}} * \frac{\sqrt{d_{1d}^\alpha d_{2d}^\alpha}}{\sqrt{1 + \lambda'_2 D_{12}^\alpha}} \quad (11-3)$$

عبارت‌های (10-3) و (11-3) نشان می‌دهند که مقدار توان مورد نیاز برای رله کردن اطلاعات گره‌های 1

و 2 تنها در یک قسمت  $\frac{1}{\sqrt{1+\lambda'D^\alpha}}$  با هم تفاوت دارند که با توجه به اینکه این قسمت تغییراتی را در بازه

$[\frac{1}{\sqrt{2}}, 1]$  دارد، مقدار این توانها حدودا در سطح هم خواهند بود.

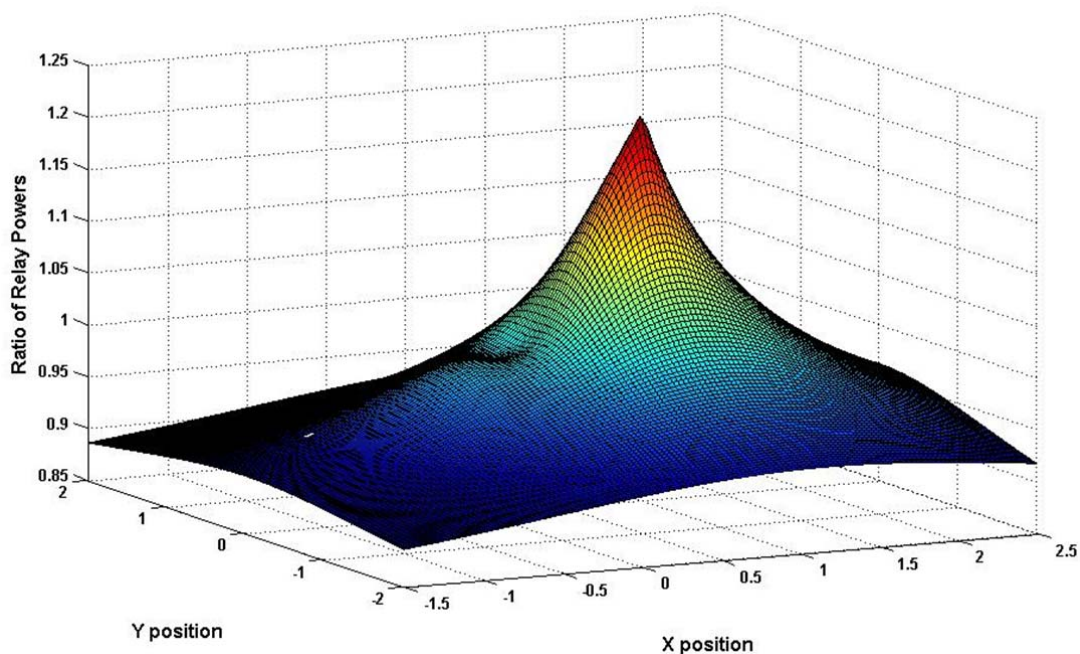
برای مشخص شدن رابطه این دو توان نسبت این دو را برای حالت گره 1 در نقطه مبدا و برای مکانهای

مختلف گره 2 در شکل 2-3 رسم کرده‌ایم.

این شکل نشان می‌دهد که این نسبت توان‌های مصرف شده برای رله کردن از مقدار 0/82 تا 1/2 تغییر

خواهد کرد. این شکل نشان می‌دهد که تفاوت این دو توان حداکثر به اندازه 20٪ خواهد بود. این

خاصیت جالبی است که تقسیم بهینه توان کاربران آن را ایجاد کرده است.



شکل 3-2 نسبت توان رله‌های گره‌های 1 و 2 برای مکانهای مختلف گره 2

### 3-4- ناحیه همکاری عادلانه

در این قسمت حالت انتخاب خودخواهانه کاربر همکار در حالت بهینه اختصاص توان که در قسمت قبل بیان شد را بررسی خواهیم کرد. انتخاب خودخواهانه کاربر همکار به این معنی است که هر کاربر تلاش می‌کند از تمام کاربران موجود در شبکه، کاربری را انتخاب کند که مجموع توان مصرفی برای ارسال خود گره با رله گره همکار به علاوه توان مصرفی گره برای رله کردن اطلاعات گره همکار کمترین مقدار ممکن را داشته باشد. این انتخاب خودخواهانه با انتخاب بهترین کاربر همکار در حالت  $m = 1$  در فصل قبل این تفاوت را دارد که در این انتخاب هر گره قصد دارد مجموع توان خودش را مینیمم کند در حالی که در فصل قبل در انتخاب بهترین کاربر همکار مینیمم کردن توان کل مورد نیاز برای یک ارسال در نظر گرفته شده بود که یک رویکرد همکاری محور صرف در جهت مینیمم کردن توان کل مصرفی شبکه است.

اولین و مهمترین محور انتخاب خودخواهانه گرهی همکار این است که توان مصرفی کاربر باید کمتر از توان مصرفی حالت بدون همکاری باشد وگرنه این همکاری از منظر خودخواهانه قابل انجام نیست. بر این اساس، ابتدا باید توان مورد نیاز حالت بدون همکاری را به دست آوریم.

با توجه به اینکه تخمین ارائه شده از احتمال خاموشی در فصل قبل، قابل تعمیم به حالت بدون همکاری است، توان کل لازم هر گره برای راضی کردن قید احتمال خاموشی در حالت بدون همکاری از عبارات (12-3) به دست می‌آید.

$$P_{n-i} = \frac{2^R - 1}{P_{out-th}} * d_{1d}^\alpha \sigma_N^2 \quad (12-3)$$

حال، برای راضی کردن شرط ابتدایی همکاری با یک گره که همان کوچکتر بودن توان مصرفی کل همکاری از توان حالت بدون همکاری است، باید نامساوی (13-3) برقرار باشد. در این نامساوی گره 1 گره‌ای است که دو حالت برای آن مقایسه می‌شود و گره 2 گره‌ای است که همکاری با آن انجام می‌شود.

$$P_1 \leq P_{n-1} \Rightarrow \frac{2^{2R} - 1}{\sqrt{2P_{out-th}}} * d_{1d}^\alpha \sigma_N^2 * \left( \frac{1}{\sqrt{\lambda'_2}} + \frac{\sqrt{\lambda'_1}}{1 - \lambda'_1 D_{21}^\alpha} \right) \leq \frac{2^R - 1}{P_{out-th}} * d_{1d}^\alpha \sigma_N^2 \quad (13-3)$$

بنابراین

$$\left( \frac{1}{\sqrt{\lambda'_2}} + \frac{\sqrt{\lambda'_1}}{1 - \lambda'_1 D_{21}^\alpha} \right) \leq \frac{2^R - 1}{2^{2R} - 1} * \sqrt{\frac{2}{P_{out-th}}} \Rightarrow \theta_1 \leq \frac{2^R - 1}{2^{2R} - 1} * \sqrt{\frac{2}{P_{out-th}}} \quad (14-3)$$

نامساوی (14-3) نشان می‌دهد که برای راضی کردن شرط ابتدایی همکاری برای گره 1، مقدار  $\theta_1$  که در شکل 3-1 برای مکانهای مختلف کاربر همکار نشان داده شده است، باید از یک مقدار مشخص که به پارامترهای شبکه  $(P_{out-th}, R)$  بستگی دارد، کوچکتر باشد.

بنابراین، این نامساوی در هر پارامتر شبکه به یک ناحیه در شکل 3-1 منجر می‌شود که همکاری با کاربرانی که در این ناحیه قرار گرفته‌اند، برای گره 1 که در این شکل در مبدا قرار گرفته است، شرط اولیه همکاری خودخواهانه را ارضا می‌کند.

در نظر گرفتن این نامساوی و این ناحیه، فقط بیانگر ارضاء شرط اولیه همکاری برای گرهی 1 یعنی یک طرف همکاری است. برای اینکه، ارضای شرط اولیه برای هر دو گره را در نظر بگیریم، نیاز داریم تا ناحیه دیگری را نیز تعریف کنیم.

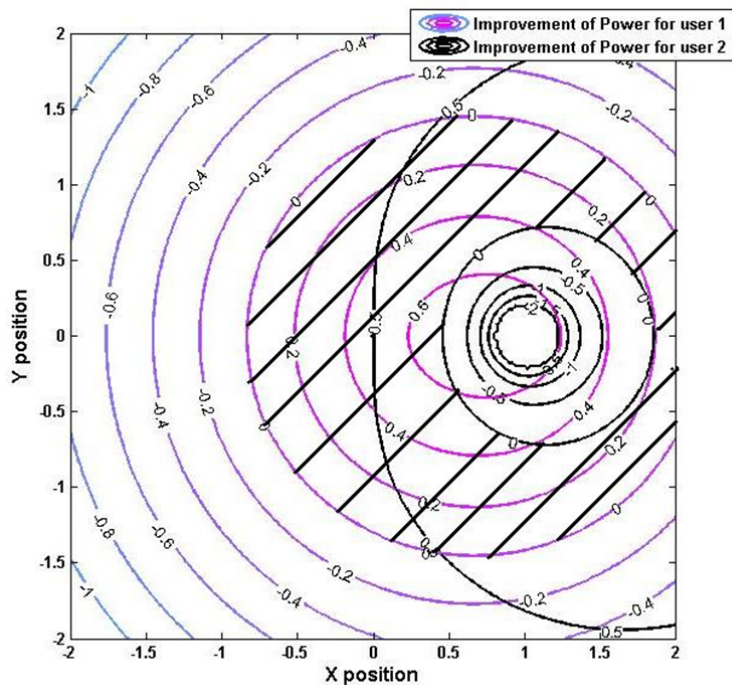
برای ارضا کردن شرط اولیه همکاری برای طرف دوم همکاری که نام آن را گرهی 2 گذاشته‌ایم، مانند شرط (3-14)، باید نامساوی (3-15) برقرار باشد.

$$\left(\frac{1}{\sqrt{\lambda'_1}} + \frac{\sqrt{\lambda'_2}}{1 - \lambda'_2 D_{12}^\alpha}\right) \leq \frac{2^R - 1}{2^{2R} - 1} * \sqrt{\frac{2}{P_{out-th}}} \quad (15-3)$$

نامساوی (3-15) نیز ناحیه ای را در صفحه کاربران مشخص می‌کند که همکاری کاربرانی که در آن ناحیه قرار دارند با گره 1 که در نقطه مبدا فرض شده است، شرط اولیه همکاری برای آن کاربرها را راضی می‌کند.

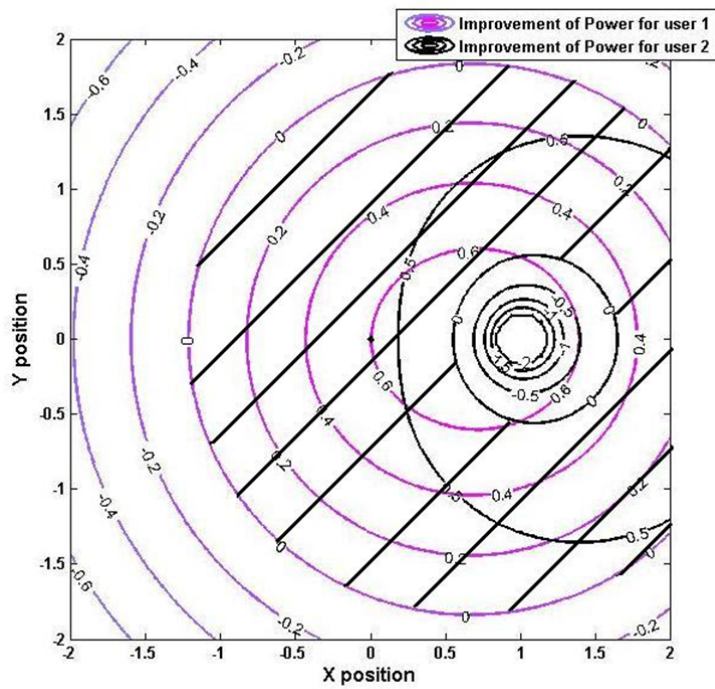
برای به دست آوردن ناحیه همکاری عادلانه باید دو ناحیه‌ای را که نامساوی‌های (3-14) و (3-15) مشخص می‌کنند را با هم در نظر گرفت. به این ترتیب که اشتراک این دو ناحیه، ناحیه‌ی همکاری عادلانه که در آن شرط اولیه همکاری برای هر دو طرف ارضاء می‌شود، را مشخص می‌کند.

برای نشان دادن این دو ناحیه از نسبت کاهش توان کل مورد نیاز در حالت همکاری به توان حالت بدون همکاری استفاده می‌کنیم. در شکل 3-3 این نسبت‌ها برای مکانهای مختلف برای هر دو طرف همکاری در حالت  $R = 2 \text{ bit/s/Hz}$  و  $P_{out-th} = 5e - 3$  نشان داده شده است. ناحیه میان دو قسمتی است که مقدار صفر را نشان می‌دهند. این ناحیه همکاری عادلانه با هاشور مشخص شده است.



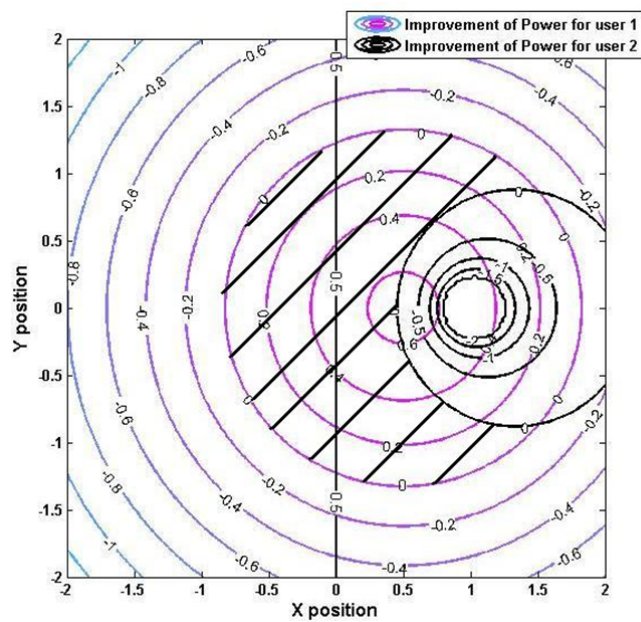
شکل 3-3 نسبت کاهش توان کل به توان حالت بدون همکاری و ناحیه همکاری عادلانه

این نسبت‌ها و این ناحیه همکاری عادلانه برای حالت  $R = 3 \text{ bit/s/Hz}$  و  $P_{out-th} = 1e-3$  در شکل 3-4 نشان داده شده است. همانطور که در نامساوی‌های (3-14) و (3-15) مشخص است، تغییر پارامترهای  $P_{out-th}$  و  $R$  باعث تغییر شکل و تغییر مساحت ناحیه همکاری عادلانه خواهد شد. همانطور که از نامساوی‌های (3-14) و (3-15) مشخص است، کاهش مقدار  $R$  و مقدار  $P_{out-th}$  باعث افزایش مساحت ناحیه همکاری عادلانه خواهد شد و این به آن معناست که با کاهش این دو پارامتر گره‌ها گزینه‌های بیشتری برای همکاری عادلانه خواهند داشت.

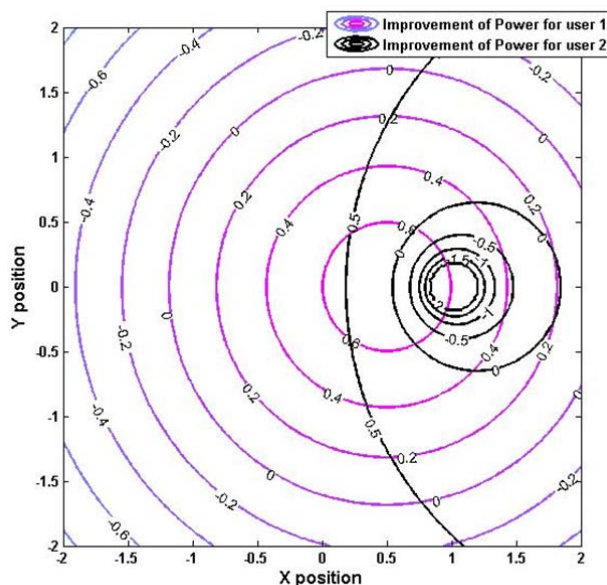


شکل 3-4 نسبت کاهش توان کل به توان حالت بدون همکاری و ناحیه همکاری عادلانه

برای مقایسه با شکل 3-3 و شکل 3-4 ناحیه همکاری عادلانه در حالت تقسیم مساوی توان با شرایط بیان شده در این شکل‌ها به ترتیب در شکل 3-5 و شکل 3-6 نشان داده شده‌اند.



شکل 3-5 نسبت کاهش توان کل به توان حالت بدون همکاری در حالت EPA و ناحیه همکاری عادلانه



شکل 3-6 نسبت کاهش توان کل به توان حالت بدون همکاری در حالت EPA و ناحیه همکاری عادلانه

مقایسه این شکل‌ها نشان می‌دهد که به علت اینکه الگوریتم EPA تقسیم توان غیر بهینه دارد و از توانهای کاربران به بهترین نحو استفاده نمی‌کند، ناحیه همکاری عادلانه در این الگوریتم کوچکتر از ناحیه همکاری عادلانه در حالت اختصاص بهینه توان خواهد بود.

در ادامه خواهیم دید که استفاده از این نواحی باعث کاهش پیچیدگی و کاهش مقدار توان مصرفی برای رد و بدل کردن بسته‌های کنترلی برای پیدا کردن کاربر همکار خواهد شد به این دلیل که درخواستهای همکاری به گره‌هایی که خارج از این محدوده‌اند با استفاده از تعریف این محدوده حذف خواهند شد.

### 3-5- الگوریتم انتخاب همکار به صورت عادلانه

در فصل قبل الگوریتمی را برای انتخاب مجموعه کاربران همکار برای مینیمم کردن توان کل لازم برای ارسال یک کاربر ارائه شد. در این قسمت قصد داریم الگوریتمی را برای انتخاب یک کاربر همکار برای همکاری دوطرفه ارائه کنیم. در این الگوریتم فرض می‌کنیم که  $N$  گره با هم قصد دارند بهترین گره همکار خودشان را برای ارسال انتخاب کنند تا توان کل مصرفی گره که شامل توان ارسال و توان رله



برای کاربر مقابل است، مینیمم گردد. با توجه به اینکه تمام این  $N$  کاربر به دنبال پیدا کردن بهترین همکار برای خود هستند، مطمئناً این انتخاب نمی تواند قطعی انجام شود و باید به صورت پله‌ای انجام شود. به عنوان مثال گره‌ای که فاصله زیادی از گره مقصد دارد برای کاهش توان کل لازم برای ارسال سعی می‌کند گره‌ای در نزدیکی مقصد را برای همکاری انتخاب کند اما این گره نزدیک به مبدا ترجیح می‌دهد که با گره‌ای دیگر همکاری کند و این باعث می‌شود که انتخاب کاربر اول به جایی نرسد و این کاربر مجبور است تا گره دیگری را برای همکاری انتخاب کند.

در این الگوریتم انتخاب کاربر همکار برای کاهش توان ارسال خودی، انتخابی کاملاً خودخواهانه است. این به آن معنی است که هر کاربر تنها منافع خود، که کاهش توان ارسالی و افزایش طول عمر خود است، را در نظر می‌گیرد و به منافع شبکه مانند کاهش توان کل ارسال و یا افزایش طول عمر شبکه توجهی ندارد.

در الگوریتم ارائه شده، فرض بر این است که نحوه‌ی همکاری و میزان توان کاربران تنها بر مبنای الگوریتم بهینه ارائه شده در قسمتهای قبل تنظیم شده است و کاربران از الگوریتمهای دیگری برای همکاری استفاده نمی‌کنند. با این فرض نشان خواهیم داد که الگوریتم با اطلاعات کامل گره‌ها به جواب نهایی همگراست و همچنین این جواب نهایی بهترین همکار را برای هر کاربر شبکه مشخص می‌کند و بدون تغییر استراتژی تخصیص توان، نمی توان همکاری بهتر از حالت جواب نهایی این الگوریتم بدست آورد.

در ادامه ابتدا به بیان الگوریتم خواهیم پرداخت. سپس اثبات همگرایی الگوریتم و نتایج به دست آمده با این الگوریتم را ارائه می‌کنیم.

### 3-5-1- بیان الگوریتم

در این الگوریتم فرض می‌کنیم  $N$  کاربر وجود دارند که برای برقراری ارتباط با یک گره مقصد به دنبال همکاری هستند تا توان ارسال خود را کاهش دهند. در این الگوریتم کاربران از اطلاعات میانگین کانالهای موجود در شبکه برای پیدا کردن بهترین همکار و اختصاص توان استفاده می‌کنند.

برای به دست آوردن اطلاعات میانگین کانالهای موجود در شبکه، در اولین قدم الگوریتم به کاربران یک مشخصه شناسایی اختصاص داده می‌شود و هر کدام از کاربران با یک توان ثابت و با یک ترتیب خاص شروع به ارسال بسته‌های pilot به مقصد می‌کنند. در این بسته‌ها فقط مشخصه شناسایی کاربران وجود دارد. برای اینکه کاربران بتوانند اطلاعات میانگین کانالها را به دست آورند، کار ارسال بسته‌های pilot برای تعداد خاصی تکرار می‌شود. این تعداد بستگی به مشخصات محوشدگی کوتاه کانالها دارد. در انتهای این قدم تمام کاربران، مشخصات کانالهای میانی خود را دارند و مقصد نیز مشخصات کانالهای میان کاربران و گره مقصد را دارد که آن را با یک بسته به صورت Broadcast به اطلاع گره‌ها می‌رساند. بعد از این قدم هر کاربر اطلاعات میانگین کانالهای میان آن کاربر و بقیه کاربرها و اطلاعات میانگین کانالهای هر کاربر با مقصد را نیز دارد.

در قدم دوم، هر کاربر  $(N - 1)$  کاربر دیگر را برای همکاری با خودش به ترتیب می‌کند، یعنی اینکه بر اساس اطلاعاتی که در قدم قبلی بدست آورده است، مقدار پارامتر  $\theta$  را در عبارت (3-9) برای همه کاربران شبکه محاسبه می‌کند و از روی آن مقدار توان مورد نیاز برای همکاری با هر کاربر را محاسبه می‌کند و آنها را به ترتیب صعودی مرتب می‌کند. همچنین مقدار توان مورد نیاز حالت بدون همکاری را نیز به دست آورده و آن را نیز در میان  $(N - 1)$  داده مرتب شده در جایی قرار می‌دهد که روند صعودی

حفظ شود. از اینجا به بعد الگوریتم به صورت iterative انجام می‌شود و در هر iteration اعمال زیر انجام می‌شود:

هر کاربر (به ترتیب) به بهترین کاربری که در لیست همکاری‌های احتمالی دارد درخواست همکاری می‌دهد. اگر درخواست به این کاربر یک بار داده شده باشد، نیازی به ارائه درخواست مجدد نیست.

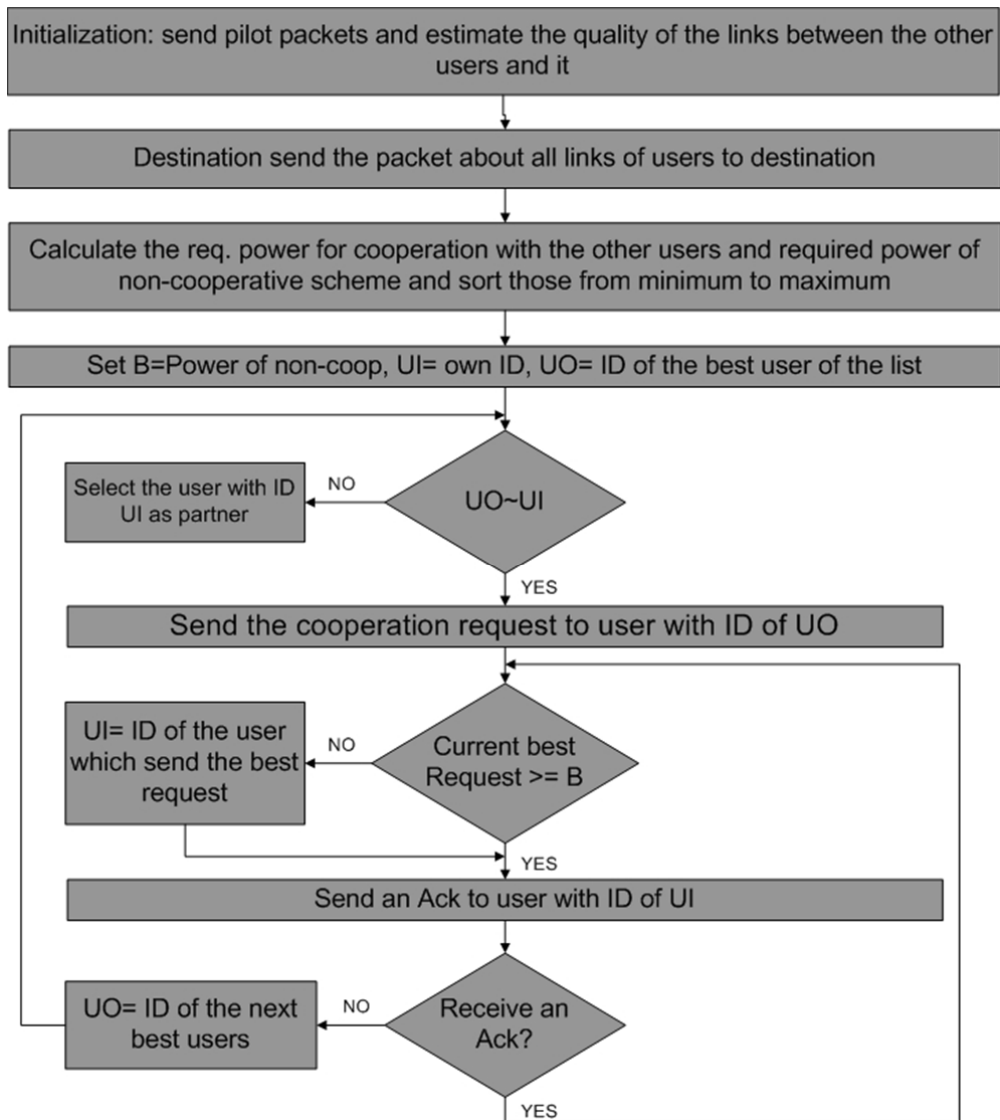
بعد از انتهای تمام ارائه درخواستها، هر کاربر بهترین درخواست میان درخواستهای رسیده و درخواست باقی مانده از مرحله قبل (بر مبنای لیست همکاریهای خود) را به صورت موقت به عنوان همکار انتخاب می‌کند و به آن پیام پذیرش درخواست را می‌دهد. عدم دریافت پیام پذیرش درخواست به معنای رد درخواست کاربر دیگر تلقی می‌شود و آن کاربر باید گزینه ابتدایی خود را از لیست همکاریهای احتمال حذف کند. پیام پذیرش درخواست باید در زمان متعلق به کاربر روبرو ارسال شود.

اگر در مرحله ارائه درخواستها، درخواستی ارائه نشد به منزله پایان الگوریتم است. این امر می‌تواند توسط گره مقصد به اطلاع گره‌ها برسد چون گره‌ها در تمام بازه‌های زمانی به کانال گوش نمی‌کنند و پایان الگوریتم را متوجه نخواهند شد.

با انتهای مراحل iterative، الگوریتم به پایان می‌رسد و کاربران می‌توانند ارسال اطلاعات خود را آغاز کنند. توجه داشته باشید که در این الگوریتم ممکن است بعضی از کاربرها به حالت بدون همکاری راضی شوند که این به معنی درخواست همکاری از خود است که مطمئناً قبول خواهد شد. در شکل 3-7، نمودار گردش این الگوریتم ترسیم شده است.

الگوریتم ارائه شده غیر از مراحل ابتدایی در مراحل iterative برای رسیدن به بهترین همکار، زمانی معادل 2 برابر کل زمان ارسال کاربران را مصرف خواهد کرد که با توجه به اینکه تعداد مراحل iterative

حداکثر به اندازه  $N^2$  است، این الگوریتم زمان مصرفی  $2N^2$  برابر زمان مصرفی ارسال  $N$  کاربر را برای انتخاب کاربران همکار مصرف خواهد کرد.



شکل 3-7 نمودار گردش الگوریتم انتخاب همکار به صورت عادلانه

یکی از بزرگترین مزایای این الگوریتم distributed بودن آن است که در آن نیازی به وجود گره مرکزی که تمام شبکه را در نظر بگیرد، وجود ندارد. همچنین گره انتخاب شده برای هر کاربر، بهترین همکار ممکن برای آن کاربر از میان تمام گره های آن شبکه خواهد بود به شرطی که شرایط شبکه مخصوصاً

مکان کاربران تغییر نکند. برای شبکه‌های پویا می‌توان الگوریتم بالا را با فرکانس متناسب با سرعت متوسط حرکت گره‌های شبکه اجرا نمود.

در انتهای هر مرحله‌ی تکرار الگوریتم بالا، با فرض از بین رفتن درخواستهای تأیید نشده، هر کاربر حداکثر یک درخواست همکاری از بقیه کاربرها دارد و حداکثر یک درخواست همکاری به بقیه کاربرها دارد. هرگاه که این دو درخواست تشکیل یک حلقه بدهند، این دو کاربری که در این حلقه هستند به همکاری‌های مورد نظر خود رسیده‌اند و این دو کاربر دیگر نیازی به مشارکت در الگوریتم را ندارند. اما تا انتهای الگوریتم و تشکیل تمام این حلقه‌ها و شناخته شدن بقیه همکاری‌ها باید برای ارسال اطلاعات خود صبر کنند. درخواست حالت بدون همکاری، که نیازی به رد و بدل کردن پیغامی ندارد، نیز به عنوان یک حلقه شناخته می‌شود که در این حالت نیز کاربر نیاز به مشارکت در ادامه الگوریتم ندارد چون حالت بدون همکاری را انتخاب کرده است.

یکی از مهم‌ترین خصوصیات این الگوریتم آن است که اگر تمام مراحل الگوریتم بطور کامل انجام شود، هر گره به بهترین همکار ممکن دست پیدا می‌کند. این به آن معناست که اگر در انتهای الگوریتم یکی از گره‌ها بخواهد همکاری غیر از همکار انتخاب شده‌اش در الگوریتم انتخاب کند، مجبور است که با گره-ای همکاری کند که توان مصرفی او را نسبت به حالت فعلی افزایش می‌دهد. دلیل این مطلب آن است که این گره در طول الگوریتم به تمام گره‌هایی که وضعیت بهتری از گره‌ی انتخابی‌اش داشته‌اند، پیغام همکاری داده است اما آن گره‌ها یا به علت آنکه همکاری با این گره اصلاً به سود آنها نبوده است یا به دلیل اینکه درخواست همکاری از گره‌ای مناسب‌تر گرفته‌بودند، درخواست همکاری این گره را رد کرده‌اند.

### 3-5-2- اثبات همگرایی الگوریتم

الگوریتم ارائه شده برای پیدا کردن بهترین کاربر همکار یک الگوریتم iterative محسوب می‌شود. بنابراین ما نیاز داریم که اثبات کنیم این الگوریتم در حلقه نمی‌افتد تا بتوانیم اثبات کنیم که این الگوریتم حداکثر در  $N^2$  پله همگرا می‌شود. برای اثبات عدم وجود حلقه ما ابتدا اثبات می‌کنیم که اگر در ابتدایی ترین قدم حلقه وجود نداشته باشد، الگوریتم باعث ایجاد حلقه نخواهد شد و بعد از آن اثبات می‌کنیم که اگر در حالت ساده، گره‌ها روی یک خط قرار گرفته باشند، در اولین قدم نیز وجود این حلقه امکان ناپذیر است.

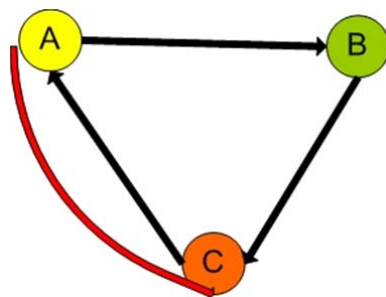
برای اثبات عدم ایجاد حلقه توسط الگوریتم ابتدا حالت حلقه 3 کاربره را بررسی می‌کنیم و آن را به حلقه n کاربره بسط می‌دهیم. برای این اثبات دو خاصیت اساسی الگوریتم برای درخواستهای وارد شده به یک گره و درخواستهای خارج شده از یک گره را بیان می‌کنیم. توجه داشته باشید که درخواست وارد شده به گره را درخواستی می‌گوییم که در انتهای یک مرحله قبول شده است نه تمام درخواستهای وارد شده در ابتدای هر مرحله.

خاصیت 1: درخواست وارد شده به یک گره در هر مرحله نمی‌تواند از درخواست وارد شده به این گره در مرحله قبل بدتر باشد. این به آن معناست که درخواست وارد شده به یک گره یا همان درخواست وارد شده به گره در مرحله قبل است یا اینکه وضعیت بهتری از درخواست مرحله قبل دارد. این خاصیت به این علت است که گره بهترین درخواست هر مرحله را با بهترین درخواست مرحله قبل مقایسه می‌کند و اگر این درخواست بهتر از درخواست مرحله قبل بود با آن موافقت می‌کند و گرنه آن را رد می‌کند.

خاصیت 2: درخواست خارج شده از یک گره در هر مرحله نمی‌تواند بدتر از درخواست وارد شده به این گره در مرحله‌ی کنونی باشد. این خاصیت بسیار واضح است به این علت که اگر گره‌ی 1 از گره‌ی 2 درخواست همکاری داشته باشد، گره‌ی 2 هیچگاه به گره‌ای بدتر از گره 1 (برای خودش) درخواست همکاری نمی‌دهد به این علت که در حال حاضر می‌تواند به گره 1 که گره‌ای بهتر است درخواست همکاری دهد.

در نظر گرفتن خاصیت 2 همراه با خاصیت 1 به این خاصیت منجر می‌شود که درخواست خارج شده از یک گره در هر مرحله نمی‌تواند بدتر از هیچ کدام از درخواستهای رسیده به گره در تمام مراحل قبلی باشد.

برای اثبات عدم امکان به وجود آمدن حلقه در غیر حالت شروع از برهان خلف استفاده می‌کنیم. البته به این نکته توجه کنید که حلقه در غیر حالت شروع به مفهوم این نیست که گره‌های موجود در این حلقه اولویت‌هایی قبل از مرحله ایجاد حلقه نداشته باشند. بلکه منظور این است که گره‌های موجود در این حلقه لااقل یک درخواست رد شده در مراحل قبل میان خود داشته باشند. برای روشن شدن موضوع حلقه نشان داده شده در شکل 3-8 را در نظر بگیرید. بدون از دست دادن کلیت موضوع فرض کرده‌ایم یک درخواست از گره A به گره C در یکی از مراحل قبلی وجود داشته است و این درخواست توسط گره C رد شده است.

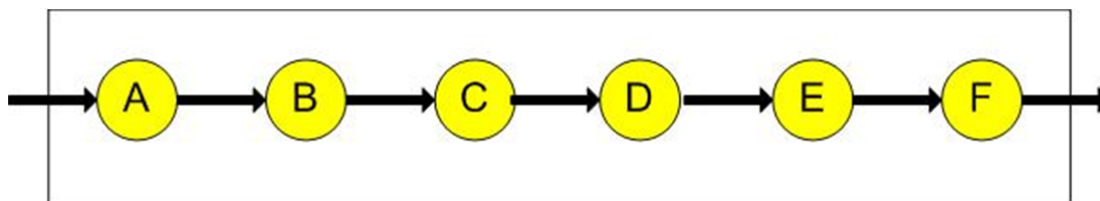


شکل 3-8 حلقه 3 کاربره

با توجه به اینکه در این حلقه گرهی B به گرهی C درخواست داده است و این درخواست مورد موافقت قرار گرفته است، با توجه به خاصیت 1 به این نتیجه می‌رسیم که از منظر گرهی C، گرهی B به گرهی A مرجح است.

اما درخواست خارج شده از گره C به گرهی A رسیده است که این مخالف خاصیت 2 است. چون درخواست خارج شده از گرهی C نمی‌تواند بدتر از درخواست وارد شده به گره C در حال حاضر (یعنی گره B) باشد. بنابراین به وجود آمدن این حلقه نقض خاصیت 2 است و بنابراین امکان ندارد این حلقه به وجود بیاید.

برای حالت حلقه n کاربره، از تعمیم حالت 3 کاربره استفاده می‌کنیم. مجموعه‌ای از تعدادی کاربر را در نظر بگیرید که مطابق با شکل 3-9 از طریق درخواستهای خارج شده و وارد شده خود با هم در ارتباط-اند. اگر تمام این مجموعه را داخل جعبه نشان داده شده در این شکل قرار دهیم، می‌توان اثبات کرد که هر دو خاصیت 1 و 2 که برای یک گره بیان شده است، برای این جعبه نیز قابل بیان است. خاصیت 1 که مربوط به درخواستهای ورودی به اولین کاربر جعبه است و همواره برقرار است و خاصیت 2 نیز با استقرا میان درخواستهای خروجی کاربران نتیجه می‌شود. برای اثبات عدم امکان به وجود آمدن حلقه در حالت n کاربره از این جعبه استفاده خواهیم کرد.

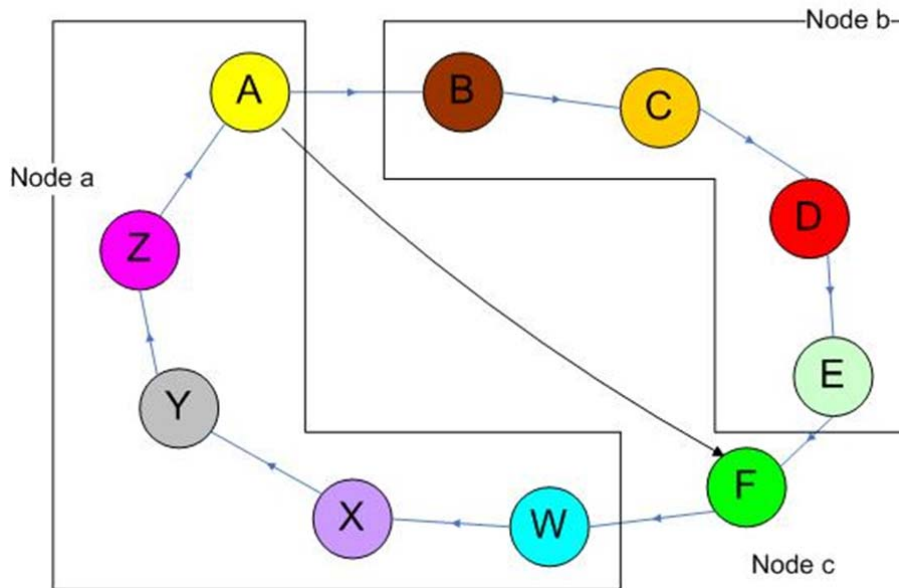


شکل 3-9 گره‌های با درخواست سری

برای اثبات عدم امکان به وجود آمدن حلقه در حالت n کاربره نیز از برهان خلف استفاده می‌کنیم. حلقه نشان داده شده در شکل 3-10 را در نظر بگیرید. در اینجا نیز فرض می‌شود که این حلقه در حالت



شروع نیست و لافل یک درخواست رد شده در میان کاربران این حلقه وجود دارد. حال اگر جعبه‌های نشان داده شده در این شکل را در نظر بگیریم، با توجه به اینکه خاصیت‌های 1 و 2 در مورد این جعبه‌ها برقرار است، می‌توانیم فرض کنیم که این حلقه به شکل حلقه شکل 3-8 درمی‌آید و بر این اساس اثبات می‌شود که این حلقه امکان ندارد توسط الگوریتم به وجود آید.

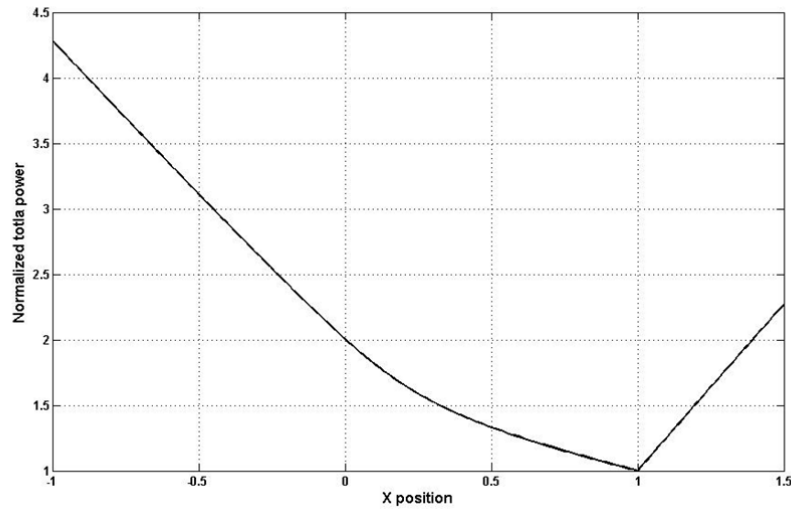


شکل 3-10 حلقه n کاربره

برای اثبات عدم امکان وجود حلقه در حالت اولیه، به دلیل اینکه این اثبات در حالت دوبعدی بسیار پیچیده است، این اثبات را در حالت یک بعدی ارائه می‌کنیم.

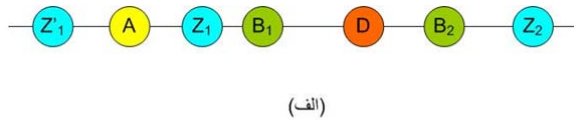
برای نشان دادن گره‌های یک حلقه از نمادهای  $a, b, \dots, z$  استفاده می‌کنیم که  $a$  به  $b$ ,  $b$  به  $c$  و  $\dots$  و  $z$  به  $a$  متصل شده‌اند. چون این حلقه در حالت صفر فرض شده است هر گره به بهترین همکار موجود در بین تمام گره‌های موجود در حلقه وصل شده است.

برای مثال گره  $a$ , گره  $b$  را به تمام کاربران دیگر این حلقه ترجیح می‌دهد. برای مشخص شدن ملاک ترجیح در حالت یک بعدی، از شکل انتخاب کاربر همکار بخش قبل، خطی را که مربوط به همکاری روی یکی از خط‌هایی است که از مقصد می‌گذرد را در شکل 3-11 نشان داده‌ایم.



شکل 3-11 ملاک انتخاب همکار روی خط

بدون از دست دادن کلیت مسأله فرض می‌کنیم که گره  $a$  روی نقطه مبدا قرار گرفته است (یعنی مکانی که ملاک نشان داده شده در شکل بالا برای آن معتبر است). حال چهار نوع انتخاب برای گره  $b$  داریم. این 4 نوع انتخاب در شکل 3-12 نشان داده شده‌اند. اگر گره  $b$  نزدیکتر از گره  $a$  به مقصد باشد (شکل 3-12 الف) بقیه گره‌های حلقه نمی‌توانند در فاصله‌ی میان گره  $b_1$ ,  $b_2$  قرار بگیرند.



(الف)



(ب)

شکل 3-12 حالت اولیه با انتخاب همکار روی خط

بدون در نظر گرفتن بقیه گره‌ها فرض می‌کنیم که گره  $Z$  در نزدیکی یکی از مکانهای  $Z_1$ ,  $Z_2$  و یا  $Z_1'$  قرار گرفته باشد. اگر گره  $Z$  در مکان  $Z_2$  قرار گرفته باشد که واضح است چه گره  $b$  در مکان  $b_1$  و یا  $b_2$  قرار گرفته باشد، گره  $Z$  به جای گره  $a$ ، گره  $b$  را برای همکاری انتخاب می‌کند. اگر گره  $Z$  در مکان  $Z_1$  یا

' $z_1$  قرار گرفته باشد واضح است که اگر گره  $b$  در مکان  $b_1$  قرار گرفته باشد، گره  $b$  برای آن گره به گره  $a$  مرجح است. همچنین اگر گره  $b$  در مکان  $b_2$  قرار گرفته باشد، به علت اینکه گره  $a$  گره  $b_2$  را به این دو گره ترجیح داده است (و بنابر شکل 9) این گره نیز گره  $b_2$  را به گره  $a$  ترجیح می‌دهد. بنابراین در حالت شکل 3-12 الف، حلقه در نظر گرفته شده لااقل در یکی از اضلاع سازنده مشکل دارد و این حلقه امکان به وجود آمدن در حالت اولیه را ندارد.

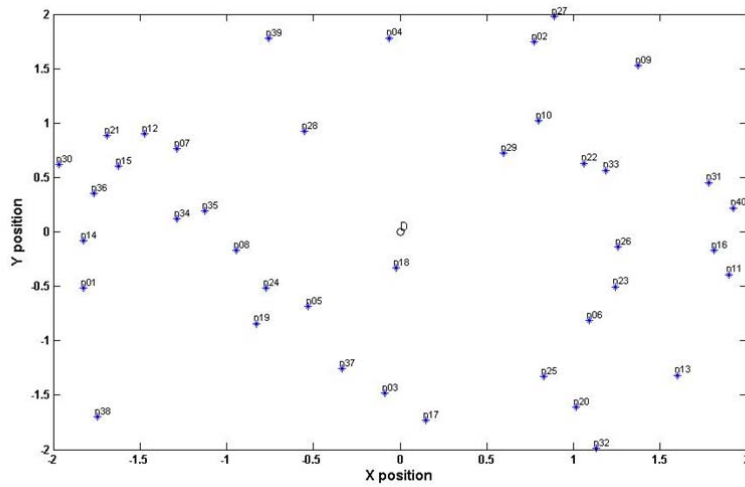
اگر گره  $b$  حالت نشان داده شده در شکل 3-12 ب را داشته باشد، باز هم بقیه گره‌ها نمی‌توانند در بازه  $b_3$  تا  $b_4$  قرار بگیرند. اگر فرض کنیم که گره  $b$  در مکان  $b_3$  قرار گرفته باشد، هیچ مکانی برای گره‌های دیگر قابل تصور نیست و بنابراین، این حالت هیچگاه بوجود نمی‌آید. اگر فرض کنیم که گره  $b$  در مکان  $b_4$  قرار گرفته باشد، گره  $z$  می‌تواند در مکان  $z_2$  قرار گرفته باشد که باز هم این گره، گره  $b$  را به گره  $a$  برای همکاری ترجیح می‌دهد و این حلقه نیز در حالت اولیه به وجود نخواهد آمد.

البته توجه داشته باشید که این اثبات بر این مبنا است که تنها عامل چند مسیری در نظر گرفته شود که با آن بتوان هر گره را با در دست داشتن اطلاعات میانگین کانالها به یک نقطه در صفحه تصویر کرد.

با این اثبات نشان دادیم هیچ حلقه‌ای در الگوریتم در حالت اولیه وجود ندارد و الگوریتم هیچ حلقه‌ای را ایجاد نمی‌کند. بنابراین با توجه به اینکه هر گره حداکثر  $N$  درخواست می‌دهد می‌توان نشان داد که الگوریتم حداکثر در  $N^2$  مرحله به حالت پایدار و حالت نهایی خواهد رسید.

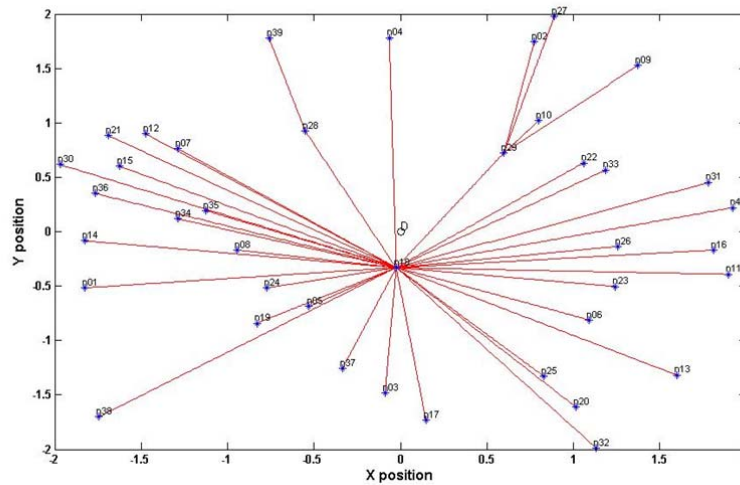
### 3-5-3 نتایج الگوریتم

برای نشان دادن نتایج الگوریتم یک مجموعه 40 کاربره با یک گرهی مقصد که در شکل 3-13 نشان داده شده است را در نظر می‌گیریم. فواصل در این شکل به 100 متر نرمال شده است.



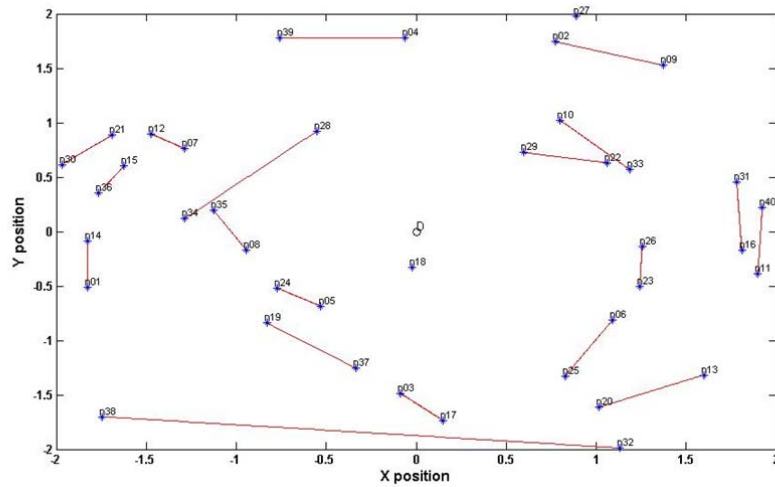
شکل 3-13 کاربر در اطراف گره مقصد

برای حالت  $P_{ou-th} = 5e - 3$  و  $R = 2 \text{ bit/s/Hz}$  حالت اولیه درخواستها در اولین مرحله الگوریتم ارائه شده به است. این شکل نشان می دهد که اولین گزینه کاربران مشترکات زیادی دارد.



شکل 3-14 اولین درخواست کاربران

حالت نهایی الگوریتم در شکل 3-15 مشاهده می شود. این شکل نشان می دهد که تمام کاربران بجز دو کاربر در این شبکه با توجه به پارامترهای شبکه و موقعیت بقیه کاربران به یک همکار برای ارسال اطلاعات خود دست پیدا کرده اند.



شکل 3-15 حالت نهایی در حالت  $R = 2 \text{ bit/s/Hz}$  و  $P_{ou-th} = 5e - 3$

با توجه به اینکه در قسمتهای قبل دیدیم که تغییر پارامترهای شبکه در شکل ناحیه همکاری عادلانه تأثیر

زیادی دارد، در شکل 3-16 الف، حالت نهایی شبکه را در حالت  $P_{ou-th} = 1e - 3$  و  $R =$

$1 \text{ bit/s/Hz}$  و در شکل 3-16 ب، در حالت  $P_{ou-th} = 1e - 3$  و  $R = 4 \text{ bit/s/Hz}$  رسم شده

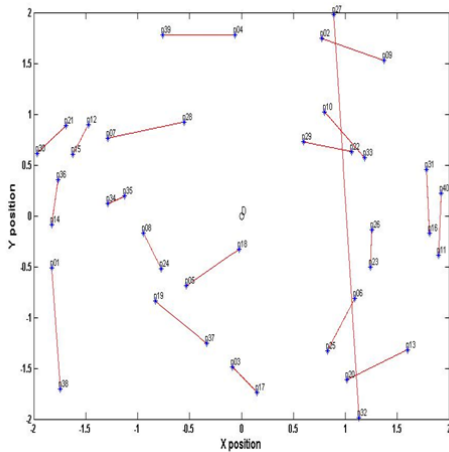
است.

در حالت شکل 3-16 ب نسبت به حالت شکل 3-15 تنها چند رابطه حذف و حالت بدون همکاری

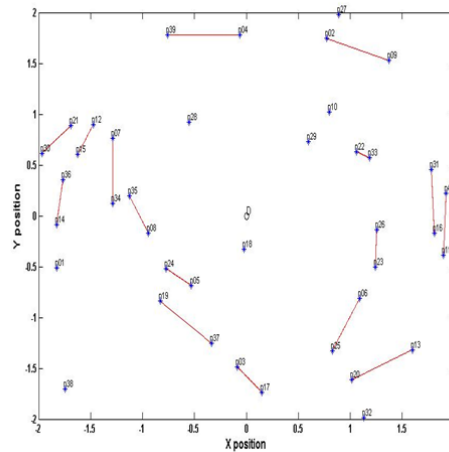
جایگزین آنها شده است. اما در حالت شکل 3-16 الف چند ارتباط از هم گسسته شده و ارتباطهای

دیگری جایگزین آن شده‌اند. در این حالت دیده می‌شود که به علت اینکه شرایط شبکه مناسب همکاری

است، تمام کاربرا همکار پیدا کرده‌اند و فاصله‌ی بعضی از همکارها بسیار زیاد است.



(الف)



(ب)

شکل 3-16 حالت نهایی انتخاب همکار (الف) حالت  $P_{ou-th} = 1e - 3$  و  $R = 1bit/s/Hz$  (ب) حالت  $P_{ou-th} = 1e - 3$  و

$$R = 4bit/s/Hz$$

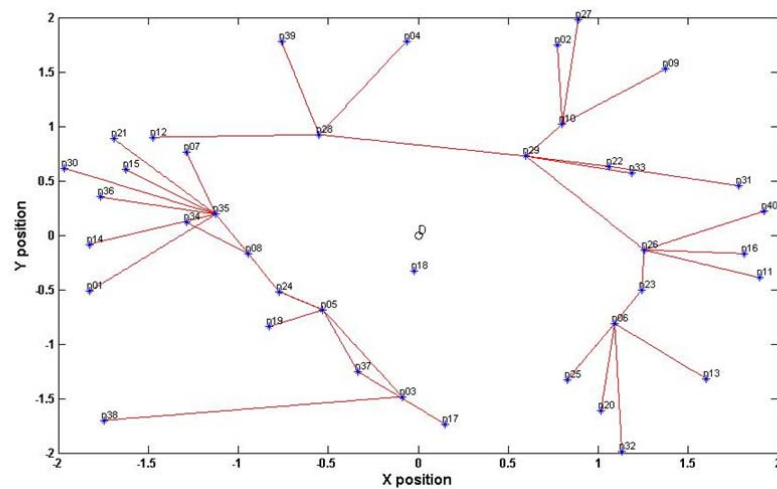
این موضوع اهمیت بسیاری دارد که تا وقتی که اثر ناحیه همکاری عادلانه محدودیتی را برای همکاری کاربران مختلف ایجاد نکرده است، تنها عامل ایجاد ارتباط همکاری، رقابت میان کاربران مختلف برای همکاریهای بهتر است. اما در حالتی که ناحیه همکاری عادلانه اثر قابل توجهی پیدا می‌کند، غیر از رقابت برای به دست آوردن همکارها، شرایط پارامترهای فیزیکی نیز در تعیین نحوه ارتباط کاربران مختلف یا بدون همکار ماندن بعضی از کاربرها نقش قابل توجهی خواهد داشت. این نقش آنجا مشخص می‌شود که در حالت  $P_{ou-th} = 5e - 3$  و  $R = 5bit/s/Hz$  هیچ نوع همکاری در حالت نهایی الگوریتم ایجاد نخواهد شد و تمام کاربران شکل 3-13 به تنهایی به ارسال خواهند پرداخت.

### 3-5-4- اثر استفاده از ناحیه همکاری عادلانه در الگوریتم ارائه شده

همانطور که اشاره کردیم، در بعضی از پارامترهای شبکه، ناحیه همکاری عادلانه اثر مهمی در انتخاب کاربران همکار خواهد داشت. به عنوان مثال اگر گره‌ای ناحیه همکاری عادلانه را در نظر بگیرد، تعدادی از گره‌هایی که می‌خواهد به آنها درخواست همکاری بدهد را باید از لیست خود حذف کند. به این دلیل

که اگر به آنها درخواست همکاری نیز بدهد آنها به علت اینکه همکاری با این کاربر بدتر از حالت بدون همکاری برای آنها خواهد بود، درخواست این کاربر را رد خواهند کرد. البته باید به این نکته توجه کرد که الگوریتم ارائه شده شرط اول همکاری عادلانه که به همکاری با کاربرانی که حالتی بهتر از حالت بدون همکاری را ایجاد می‌کنند، در نظر می‌گیرد اما در نظر گرفتن شرط دوم همکاری عادلانه در الگوریتم باعث خواهد شد که تعداد مراحل و تعداد تلاشهای هر کاربر برای رسیدن به همکار کاهش یابد چون این کار درخواستهای غیر عادلانه را از الگوریتم حذف می‌کند.

برای نشان دادن این اثر، در شکل 3-17، ابتدا حالت اولیه‌ای شکل 3-14 را در حالتی که الگوریتم، شروط همکاری عادلانه را در نظر بگیرد، نشان داده‌ایم.

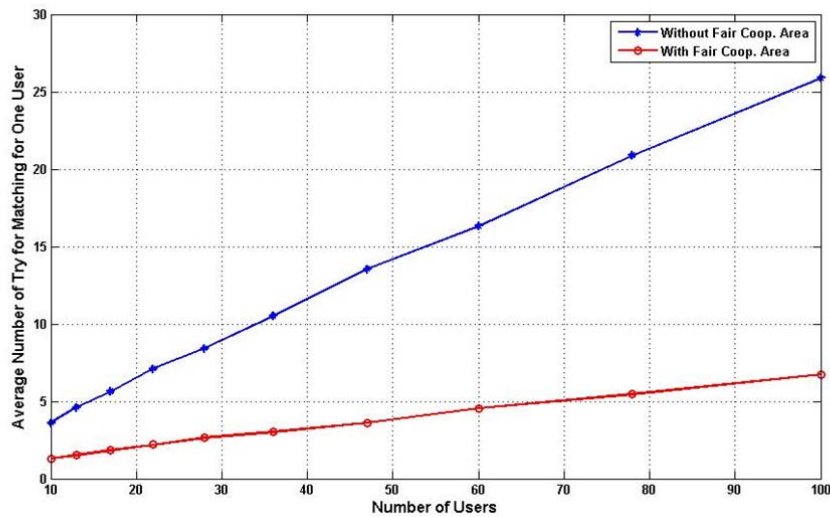


شکل 3-17 حالت اولیه با در نظر گرفتن ناحیه همکاری عادلانه

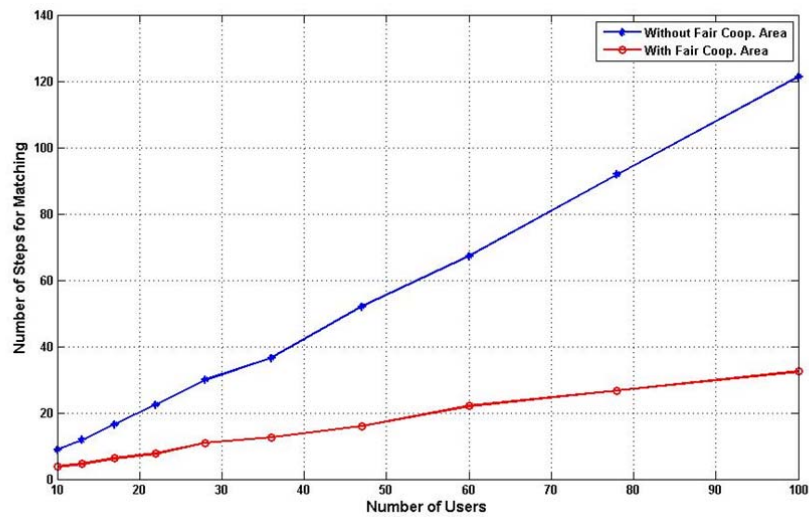
دیده می‌شود که این حالت اولیه تجمع کمتری روی گره‌های بسیار نزدیک به مقصد دارد و بیشتر پخش است که این اثر در نظر گرفتن شروط همکاری عادلانه در هر کاربر است.

در شکل 3-18 و شکل 3-19، میانگین تعداد درخواست‌های ارائه شده و کل مراحل مورد نیاز برای رسیدن به حالت نهایی در حالت  $P_{ou-th} = 5e - 3$  و  $R = 2.5 \text{ bit/s/Hz}$  با تعداد گره‌های مختلف

بررسی شده است. این اعداد از میانگین 8 بار پخش گره‌ها به صورت تصادفی و اجرای الگوریتم اولیه و الگوریتم با در نظر گرفتن ناحیه همکاری عادلانه به دست آمده است.



شکل 3-18 میانگین تعداد درخواستهای ارائه شده برای یک گره در الگوریتم انتخاب همکار



شکل 3-19 تعداد کل مراحل مورد نیاز در الگوریتم انتخاب همکار

در این شکلها دیده می‌شود که در نظر گرفتن ناحیه همکاری عادلانه، تأثیر بسیار زیادی در کاهش پیچیدگی و افزایش سرعت همگرا شدن جواب الگوریتم ارائه شده برای انتخاب همکار دارد.



#### 4- اختصاص بهینه‌ی توان و انتخاب همکار در حالت توان ثابت

##### 4-1- مقدمه

در دو فصل گذشته به بررسی سیستم دایورسیتی مشارکتی در حالتی پرداختیم که ارسال کاربران یک قید روی احتمال خاموشی داشت و بر این اساس الگوریتم‌ها و روش‌هایی را برای تقسیم توان، انتخاب کاربران رله کننده و انتخاب کاربر همکار ارائه کردیم تا میزان توان مصرفی شبکه یا میزان توان مصرفی هر گره را به مینیمم مقدار ممکن کاهش دهیم. در این فصل می‌خواهیم مسئله کاهش احتمال خاموشی در شرایط توان ارسال ثابت را به اختصار بررسی کنیم.

همان طور که در فصل اول اشاره کردیم، مسئله‌ی اختصاص توان در شبکه‌های بی‌سیم با دایورسیتی مشارکتی در ابتدا برای افزایش ظرفیت شبکه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. بر این اساس در این مسائل مجموع توان مصرفی برای ارسال باید از مقدار مشخصی که اغلب اوقات همان توان مصرفی حالت بدون همکاری است، کمتر باشد و این توان باید بگونه‌ای میان کاربران تقسیم گردد که احتمال خطا یا احتمال خاموشی سیستم را به حداقل ممکن برساند. مینیمم کردن احتمال خاموشی را در شبکه‌های بی‌سیم می‌توان با ماکزیمم کردن نرخ قابل حصول معادل گرفت. به این دلیل می‌توان گفت که این مسائل اختصاص

توان با تخصیص توان میان مجموعه‌ای از کاربران سعی می‌کنند نرخ قابل حصول سیستم بی‌سیم را ماکزیمم کنند.

در این فصل ابتدا مسئله‌ی اختصاص توان در حالت توان ثابت برای مینیمم کردن احتمال خاموشی و جوابهایی را که برای این مسئله وجود داشته است را بیان می‌کنیم. سپس به بیان راه حل پیشنهادی [35] که از جهاتی بر راه‌حل‌های موجود برتری دارد، می‌پردازیم. مسئله‌ی ناحیه‌ی همکاری عادلانه را نیز که در فصل سوم برای حالت احتمال خاموشی ثابت بیان کردیم، برای حالت توان ثابت بیان می‌کنیم.

#### 4-2- اختصاص توان در شبکه‌ای دایورسیتی مشارکتی در حالت توان ثابت

##### 4-2-1- بیان مسئله‌ی بهینه‌سازی

در مسئله‌ی اختصاص توان در شبکه‌های مشارکتی بی‌سیم در حالت توان ثابت، سعی بر مینیمم کردن احتمال خاموشی ارسال است. این مسئله‌ی بهینه‌سازی را می‌توانیم به شکل عبارت (4-1) نشان دهیم.

$$\begin{aligned} \min \quad & P_{out}(P_s + \sum_{i=1}^m P_{r_i}) \\ \text{subject to} \quad & P_s + \sum_{i=1}^m P_{r_i} \leq P_T \\ & P_{max} \geq P_s, P_{r_i} \geq 0 \end{aligned} \quad (1-4)$$

این مسئله‌ی بهینه‌سازی شباهت زیادی به مسئله‌ی مینیمم کردن توان کل که در فصل دوم بیان شده است، دارد. اگر از تقریب ارائه شده در ابتدای فصل دوم و تغییر پارامترهایی که در آن فصل پیشنهاد شده است، استفاده کنیم می‌توانیم شکل مسئله‌ی بهینه‌سازی را به شکل استاندارد (4-2) تغییر دهیم.

$$\begin{aligned} \max \quad & (\lambda_0 * \prod_{i=1}^m \lambda_i) \\ \text{s. t.} \quad & \lambda_0 * d_{sd}^\alpha + \sum_{i=1}^m \left( \frac{\lambda_i'}{1 - \lambda_i' D_{sr_i}^\alpha} \right) * \lambda_0 * d_{r_i d}^\alpha \leq P_T \\ & P_{max} \geq P_s, P_{r_i} \geq 0 \end{aligned} \quad (2-4)$$

بر اساس [36]، این مسئلهی بهینه‌سازی دوگان مسئلهی بهینه‌سازی مطرح شده در فصل دوم است. به همین دلیل برای حل این مسئله می‌توانیم از راه‌حل ارائه شده در فصل دوم استفاده‌ی زیادی کرد.

#### 4-2-2- راه‌حل‌های ارائه شده در کارهای قبلی

مسئلهی بهینه‌سازی (1-4) در دو مقاله‌ی [15] و [16] بررسی شده است و راه‌حل‌های مشابهی برای حل آن ارائه شده است.

در [16] برای حل مسئلهی بهینه‌سازی به روش KKT و ارائه‌ی جوابی با شکل بسته، فرض شده است که مقدار توان گره‌ی مبدا ( $P_S$ ) مشخص است. بر این اساس توان گره‌های رله‌کننده را می‌توان براساس عبارت (3-4) بیان کرد.

$$P_{r_i} = \frac{-P_S \left( \frac{d_{r_i d}}{d_{sr_i}} \right)^\alpha + \sqrt{P_S^2 \left( \frac{d_{r_i d}}{d_{sr_i}} \right)^{2\alpha} + 4P_S \left( \frac{d_{r_i d}}{d_{sr_i}} \right)^\alpha \lambda}}{2} \quad (3-4)$$

پارامتر  $\lambda$  ضریب لاگرانژ است که با تغییر آن قید توان کل را راضی می‌کنیم. این به آن معناست که در عبارت بیان شده برای مقدار توان کاربران رله‌کننده دو پارامتر مجهول  $P_S$  و  $\lambda$  وجود دارد. بنابراین برای بدست آوردن جواب کامل این مسئله نیاز به روش‌های بهینه‌سازی عددی داریم. این مسئله نشان می‌دهد که برخلاف بیان این مقاله، جواب ارائه شده به هیچ وجه جواب بسته‌ای نیست.

در [15] نیز با حل مسئلهی بهینه‌سازی با روشی مشابه، جوابی مشابه عبارت (3-4) بدست آمده است. تنها تفاوت راه حل ارائه شده در این مقاله آن است که مقدار پارامتر  $\lambda$  در آن برابر  $\frac{P_T}{m+1}$  قرار داده شده است. با این کار یکی از متغیرهای نامشخص در عبارت (3-4) حذف شده است اما راه‌حل تبدیل به راه‌حلی زیربینه شده است. همچنین در این مقاله عبارتی برای تعیین مقدار  $P_S$  نیز بیان شده است که مشابه حالت قبل برای پیاده‌سازی نیاز به روش‌های بهینه‌سازی عددی دارد.

بنابراین هر دو جواب ارائه شده برای مسئلهی بهینه‌سازی صورت ساده‌ای دارند اما بدون پروسه‌ی iterative قابل پیاده‌سازی نیستند.

#### 4-2-3- راه‌حل پیشنهادی برای مسئلهی اختصاص توان در حالت توان ثابت

همان‌طور که بیان شد، مسئلهی بهینه‌سازی (4-2) دوگان مسئلهی بهینه‌سازی فصل دوم است و بر این اساس راه حل ارائه شده برای این مسئله همان راه‌حل ارائه شده برای مسئلهی فصل دوم خواهد بود. بر این اساس مقدار بهینه‌ی  $\lambda'_i$  از عبارت (4-4) بدست خواهد آمد.

$$\lambda'_i = \frac{D_{sr_i}^\alpha + \frac{1}{2} \zeta_i D_{r_i d}^\alpha - \sqrt{\frac{1}{4} \zeta_i^2 D_{r_i d}^{2\alpha} + (1 + \zeta_i) D_{sr_i}^\alpha D_{r_i d}^\alpha}}{D_{sr_i}^{2\alpha} - D_{sr_i}^\alpha D_{r_i d}^\alpha} \quad (4-4)$$

که در آن

$$\zeta_i = 1 + \sum_{j=1}^m (\lambda'_j D_{sr_j}^\alpha) - \lambda'_i D_{sr_i}^\alpha \quad (5-4)$$

تنها تفاوت این راه‌حل با جواب ارائه شده در فصل دوم این است که برای راضی کردن شرط توان کل،  $\lambda_0$  باید مقداری معادل عبارت (6-4) داشته باشد.

$$\lambda_0 = \frac{P_T}{d_{sd}^\alpha + \sum_{i=1}^m \left( \frac{\lambda'_i}{1 - \lambda'_i D_{sr_i}^\alpha} \right) * d_{r_i d}^\alpha} \quad (6-4)$$

برای بدست آوردن توان‌های کاربران رله‌کننده و توان مبدا نیز از عبارت‌های (4-7) و (4-8) می‌توان استفاده کرد.

$$P_{r_i} = \frac{\lambda_i \lambda_0}{\lambda_0 - \lambda_i D_{sr_i}^\alpha} d_{r_i d}^\alpha \sigma_N^2 = \frac{\lambda'_i}{1 - \lambda'_i D_{sr_i}^\alpha} \lambda_0 d_{r_i d}^\alpha \sigma_N^2 \quad (7-4)$$

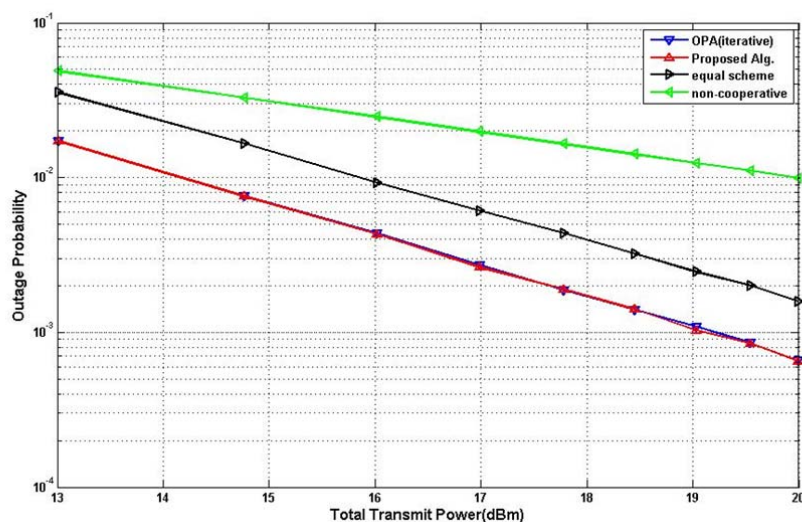
$$P_s = \lambda_0 d_{sd}^\alpha \sigma_N^2 \quad (8-4)$$

با اینکه شکل راه‌حل پیشنهادی در اینجا براساس وجود پارامتر  $\zeta_i$  که وابسته به مقدار  $\lambda'_i$  گره‌های داخل مجموعه‌ی کاربران رله‌کننده است، شکلی iterative است، اما با روشهایی که در فصل دوم برای تخمین مقدار  $\zeta_i$  ارائه کردیم می‌توانیم این شکل iterative را حذف کنیم. در ادامه با شبیه‌سازی نشان خواهیم داد که این تخمین‌ها کارایی سیستم را نسبت به حالت بهینه‌ای که نیاز به انجام iteration برای رسیدن به جواب دارد، افت چندانی نمی‌دهد.

#### 4-2-4- بررسی نتایج اختصاص توان بهینه از روی شبیه‌سازی

در این قسمت، در سه حالت مختلف برای مجموعه‌ی کاربران رله‌کننده احتمال خاموشی بدست آمده بر اساس روش‌های مختلف اختصاص توان را رسم و مقایسه می‌کنیم. برای حالت اختصاص بهینه‌ی توان از روش ارائه شده در [15] با 20 تکرار استفاده می‌کنیم. برای بدست آوردن احتمال خاموشی در این قسمت از تعداد زیادی شبیه‌سازی کانال استفاده می‌کنیم.

در حالتی که تنها یک کاربر رله‌کننده در سیستم داریم، همانطور که در فصل دوم بیان شد، پارامتر  $\zeta_i$  مقدار ثابت 1 خواهد داشت و نیازی به تخمین آن از روش‌های بیان شده نداریم. احتمال خاموشی سیستم را در شرایط  $R = 1 \text{ bit/s/Hz}$ ،  $\sigma_N^2 = 1e - 7$ ،  $d_{sd} = 100m$  و  $\alpha = 2$  برای مقادیر مختلف توان کل ارسال با یک کاربر رله‌کننده در مکان نرمال شده‌ی  $[D_{sr_1}, D_{r_1d}] = [0.9, 0.14]$  نشان می‌دهد. در این شکل برای مقایسه، احتمال خاموشی حالت تقسیم مساوی توان کل و حالت بدون همکاری نیز نشان داده شده است.



شکل 4-1 احتمال خاموشی بر اساس روش‌های مختلف اختصاص توان در حالت یک کاربر همکار

در این شکل دیده می‌شود که احتمال خاموشی هر دو سیستم بهینه یکسان است. این نشان می‌دهد که

الگوریتم پیشنهادی بدون نیاز به iteration جواب بهینه را بدست می‌آورد.

برای حالت‌های  $m > 1$ ، مقدار پارامتر  $\zeta_i$  در الگوریتم پیشنهادی براساس یکی از دو تخمین بیان شده

در فصل دوم مشخص می‌شود. برای بررسی کارایی احتمال خاموشی الگوریتم پیشنهادی با دو تخمین

ارائه شده، در شکل 4-2 و شکل 4-3 احتمال خاموشی الگوریتم بهینه با 20 تکرار به همراه الگوریتم

پیشنهادی با هر دو تخمین ارائه شده نشان داده شده است. پارامترهای شبکه همانند حالت شکل 4-1

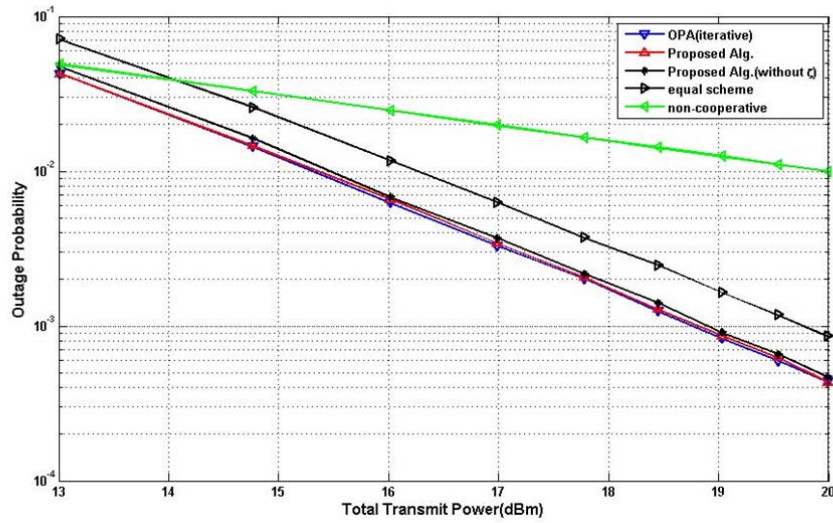
تنظیم شده‌اند و در شکل 4-2، دو کاربر رله‌کننده با موقعیت‌های  $[D_{sr_1}, D_{r_1d}] = [0.81, 0.22]$  و

$[D_{sr_2}, D_{r_2d}] = [0.14, 0.9]$  و در شکل 4-3، سه کاربر رله‌کننده با موقعیت‌های  $[D_{sr_3}, D_{r_3d}] =$

$[0.9, 0.14]$ ،  $[D_{sr_2}, D_{r_2d}] = [0.5, 0.58]$  و  $[D_{sr_1}, D_{r_1d}] = [0.3, 0.7]$  به کاربر ارسال‌کننده کمک می-

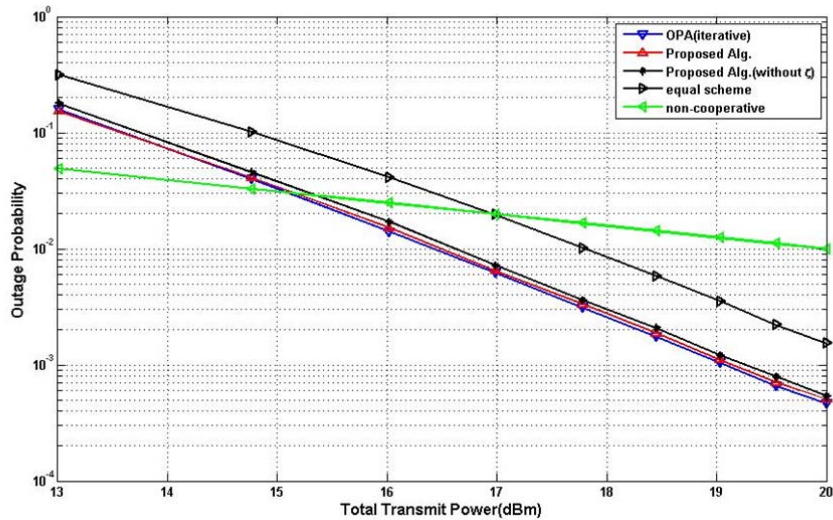
کنند. در این شکل‌ها نیز برای مقایسه احتمال خاموشی حالت تقسیم مساوی توان کل و حالت بدون

همکاری نشان داده شده‌اند.



شکل 2-4 احتمال خاموشی بر اساس روش‌های مختلف اختصاص توان در حالت دو کاربر همکار

همان‌طور که دیده می‌شود الگوریتم ارائه شده با تخمین مقدار پارامتر  $\beta$  بر اساس گره‌های موجود در مجموعه‌ی کاربران همکار کارایی بسیار نزدیکی با الگوریتم بهینه با تکرار دارد. همچنین افت کارایی الگوریتمی که مقدار  $\beta$  را برابر یک قرار می‌دهد نیز مقدار بسیار کوچکی است و در بدترین حالت به 0.2dB می‌رسد.



شکل 3-4 احتمال خاموشی بر اساس روش‌های مختلف اختصاص توان در حالت سه کاربر همکار

#### 4-3- همکاری دوطرفه در حالت توان ثابت

در سیستم بررسی شده در فصل دوم و سوم، هدف از همکاری کاهش توان مصرفی شبکه یا کاربر بود. به این دلیل انتخاب کاربران رله‌کننده یا انتخاب کاربر همکار در آن فصل‌ها بر مبنای توان مصرفی برای ارسال بود. اما در همکاری در حالت توان ثابت، هدف از همکاری کاهش احتمال خاموشی (و افزایش نرخ قابل حصول) است. بنابراین در این حالت مبنای انتخاب کاربران رله‌کننده یا همکار، کارایی آنها در کاهش احتمال خاموشی سیستم است.

در این بخش ابتدا به بررسی نحوه‌ی رتبه‌بندی کاربران برای همکاری خواهیم پرداخت و همانند فصل دوم و سوم راهی را برای انتخاب یک گره‌ی همکار ارائه می‌کنیم. سپس به بررسی نواحی‌ای که در آنها همکاری در حالت توان ثابت برای گره‌های مختلف سودمند است می‌پردازیم و ناحیه‌ای را که در آن همکاری به سود هر دو طرف همکار است، معرفی می‌کنیم.

#### 4-3-1- همکاری با یک کاربر همکار و نحوه‌ی انتخاب آن

در حالت دوکاربره، مطابق فصل سوم، یکی از طرف‌های همکاری را کاربر 1 و طرف دیگر را کاربر 2 می‌نامیم. بنابر روابطی که در بخش قبلی بیان شد تقریب احتمال خاموشی ارسال کاربر 1 در حالت همکاری کاربر 2 به شکل عبارت (4-9) خواهد بود.

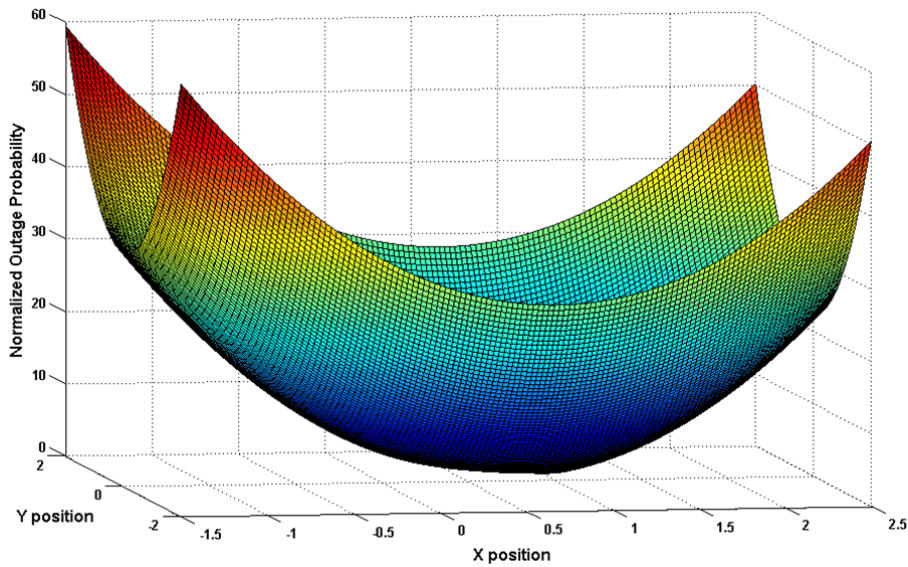
$$P_{out-1} \cong \frac{(2^{2R} - 1)^2}{2!} * \frac{\left(1 + \frac{\lambda'_2 D_{2d}^\alpha}{1 - \lambda'_2 D_{12}^\alpha}\right)^2}{\left(\frac{P_T}{\sigma_N^2 d_{1d}^\alpha}\right)^2 \lambda'_2} \quad (9-4)$$

در عبارت (4-9) قسمتی وجود دارد که وابسته به گره‌ی انتخابی نیست و تنها بستگی به پارامترهای شبکه دارد. اگر این قسمت را از این عبارت حذف کنیم، عبارت (4-10) بدست می‌آید.



$$\gamma_1 = \left(1 + \frac{\lambda'_2 D_{2d}^\alpha}{1 - \lambda'_2 D_{12}^\alpha}\right)^2 * \frac{1}{\lambda'_2} \quad (10-4)$$

بر اساس مقدار  $\gamma_1$  می‌توانیم کاربران مختلف را به ترتیب کارایی آنها در همکاری مرتب نماییم. این به آن معناست که هر گره‌ای که مقدار  $\gamma_1$  کمتری داشته باشد، در حالت همکاری با توان ثابت، احتمال خاموشی کمتری را برای ارسال کاربر 1 ایجاد می‌کند. اگر مقدار این پارامتر را در حالت  $\alpha = 2$  و در صفحه‌ای با مقیاس نرمال شده به فاصله‌ی گره‌ی 1 و گره‌ی مقصد که به ترتیب در مبدا مختصات و نقطه‌ی  $(x, y) = (1, 0)$  قرار گرفته‌اند، رسم نماییم، شکل 4-4 بدست می‌آید.



شکل 4-4 نرمالیزه شده‌ی احتمال خاموشی برای مکان‌های مختلف گره‌ی همکار

بر این اساس بهترین کاربران برای همکاری در این حالت نیز گره‌های بسیار نزدیک به مقصد هستند و هرچه گره‌ها از مبدا و مقصد دورتر می‌شوند، مقدار احتمال خاموشی بدست آمده از این همکاری افزایش می‌یابد.

#### 4-3-2- نواحی همکاری عادلانه در حالت توان ثابت ارسال

همان‌طور که در شکل 4-4 دیده می‌شود، مقدار احتمال خاموشی بدست آمده از همکاری در حالت توان ثابت برای مکان‌های مختلف کاربر همکار نسبت به مبدا و مقصد، تفاوت زیادی دارد. بنابراین هر کاربر باید بداند که همکاری با کدام گره‌ها به سود او خواهد بود. برای تعریف سود ابتدا باید یک معیار داشته باشیم. بهترین معیار در این حالت، احتمال خاموشی بدست آمده در حالت بدون همکاری است. در حالت بدون همکاری که کاربر 1 تمام توان کل را در یک بازه برای مقصد ارسال می‌کند، احتمال خاموشی تقریبی را می‌توان از عبارت (4-11) بدست آورد.

$$P_{out-n-1} \cong \frac{(2^R - 1)}{1!} * \frac{d_{1d}^\alpha}{\left(\frac{P_T}{\sigma_N^2}\right)} \quad (11-4)$$

بر این اساس اگر همکاری با گره‌ای به احتمال خاموشی بیشتر از احتمال خاموشی بدست آمده در (4-11) منجر شود، این همکاری به ضرر کاربر 1 خواهد بود. بنابراین برای همکاری کاربر 1 باید نامساوی (4-12) برقرار باشد.

$$\frac{(2^{2R} - 1)^2}{2!} * \frac{\left(1 + \frac{\lambda_2' D_{2d}^\alpha}{1 - \lambda_2' D_{12}^\alpha}\right)^2}{\left(\frac{P_T}{\sigma_N^2 d_{1d}^\alpha}\right)^2 \lambda_2'} \leq \frac{(2^R - 1)}{1!} * \frac{d_{1d}^\alpha}{\left(\frac{P_T}{\sigma_N^2}\right)} \quad (12-4)$$

$$\Rightarrow \gamma_2 \leq 2! * \frac{2^R - 1}{(2^{2R} - 1)^2} * \left(\frac{P_T}{\sigma_N^2 d_{1d}^\alpha}\right)$$

در همکاری دوطرفه عادلانه، هر دو طرف همکاری باید سود ببرند. بر این اساس تقریب احتمال خاموشی ارسال کاربر 2 که در آن کاربر 1 به رله کردن پرداخته است، در عبارت (4-13) آمده است.

$$P_{out-2} \cong \frac{(2^{2R} - 1)^2}{2!} * \frac{\left(d_{2d}^\alpha + \frac{\lambda'_1 d_{1d}^\alpha}{1 - \lambda'_1 D_{21}^\alpha}\right)^2}{\left(\frac{P_T}{\sigma_N^2}\right)^2 \lambda'_1} \quad (13-4)$$

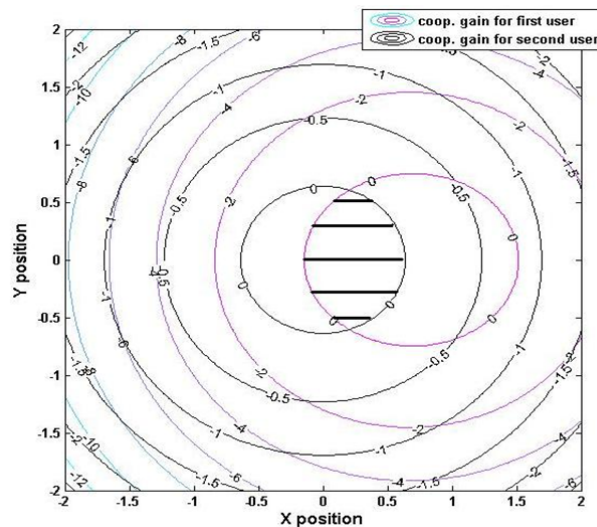
مشابه نامساوی (12-4) برای اینکه همکاری برای کاربر 2 نیز سودمند باشد، باید عبارت (14-4) برقرار باشد.

$$\frac{(2^{2R} - 1)^2}{2!} * \frac{\left(d_{2d}^\alpha + \frac{\lambda'_1 d_{1d}^\alpha}{1 - \lambda'_1 D_{21}^\alpha}\right)^2}{\left(\frac{P_T}{\sigma_N^2}\right)^2 \lambda'_1} \leq \frac{(2^R - 1)}{1!} * \frac{d_{2d}^\alpha}{\left(\frac{P_T}{\sigma_N^2}\right)} \quad -4)$$

$$\Rightarrow \frac{\left(D_{2d}^\alpha + \frac{\lambda'_1}{1 - \lambda'_1 D_{21}^\alpha}\right)^2}{D_{2d}^\alpha \lambda'_1} \leq 2! * \frac{2^R - 1}{(2^{2R} - 1)^2} * \left(\frac{P_T}{\sigma_N^2 d_{1d}^\alpha}\right) \quad (14)$$

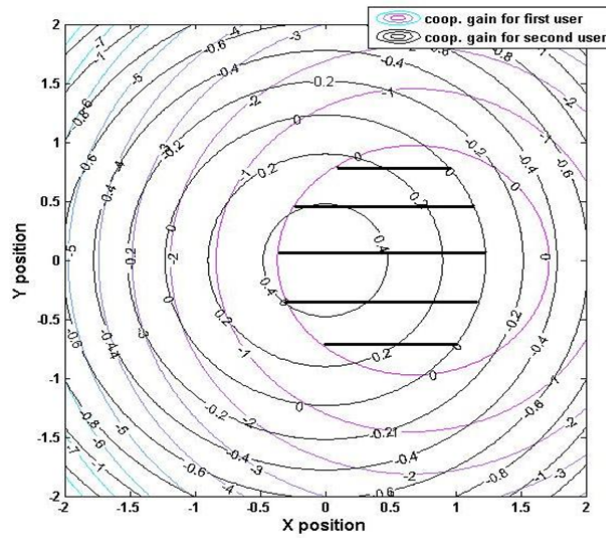
بر این اساس اگر سود بدست آمده از همکاری برای کاربران 1 و 2 را در یک شکل رسم نماییم، ناحیهی همکاری عادلانه به قسمتی گفته می‌شود که هر دو کاربر از همکاری سود ببرند. در شکل 4-5 سود همکاری برای هر دو کاربر و ناحیهی همکاری عادلانه در حالت توان ثابت با پارامترهای  $\sigma_N^2 = 1e-7$  و  $\alpha = 2$ ،  $d_{sd} = 100m$ ،  $P_T = 23dBm$ ،  $R = 2bit/s/Hz$  در

این شکل، کاربر 1 در مبدا مختصات قرار گرفته و مقصد در نقطه  $(x, y) = (1, 0)$  است.



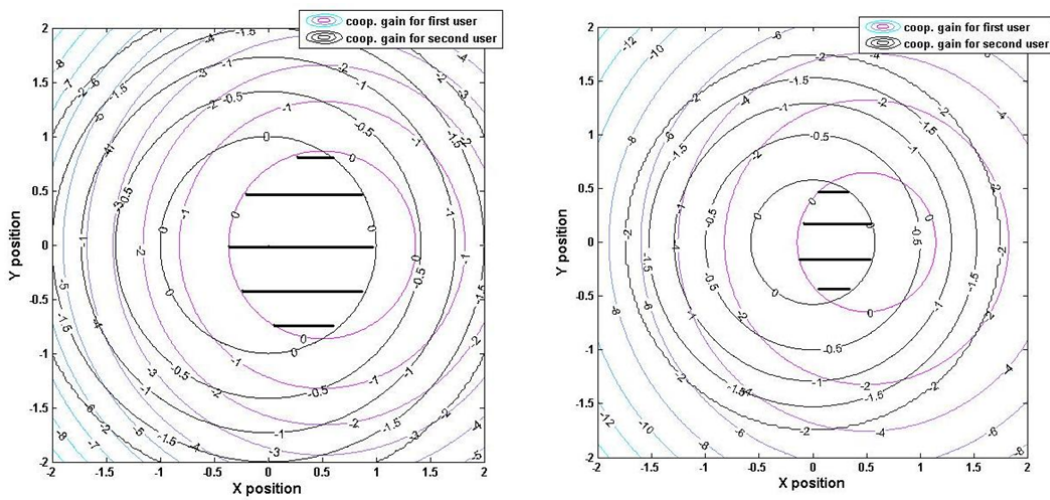
شکل 4-5 سود دوطرف همکاری از ارسال با رله و ناحیهی همکاری عادلانه

برای نشان دادن تاثیر پارامترهای شبکه بر ناحیه همکاری عادلانه، شکل 4-6 نمودارهای شکل 4-5 را در حالت  $P_T = 25dBm$  نشان می دهد.



شکل 4-6 سود دوطرف همکاری از ارسال با رله و ناحیه همکاری عادلانه

دیده می شود که تغییر پارامترهای شبکه تاثیر بسیار زیادی در سود کاربران از همکاری و ناحیه همکاری عادلانه می گذارد. برای نشان دادن تاثیر انتخاب الگوریتم اختصاص توان بر ناحیه همکاری عادلانه، شکل 4-7 نمودارهای شکل 4-5 و شکل 4-6 را در حالت تقسیم مساوی توان نشان می دهد.



شکل 4-7 سود دوطرف همکاری از ارسال با رله و ناحیه همکاری عادلانه در حالت تقسیم مساوی

این شکل نشان می‌دهد که تغییر استراتژی اختصاص بهینه توان مساحت ناحیه‌ی همکاری عادلانه را کاهش می‌دهد به علت آنکه استفاده نکردن از الگوریتم اختصاص توان بهینه سود بدست آمده از همکاری را در اکثر حالات کاهش می‌دهد.

## 5- جمع‌بندی و پیشنهادات پژوهشی

### جمع‌بندی

در این رساله به بررسی کارایی توان در شبکه‌های مشارکتی بی‌سیم پرداختیم. برای این منظور الگوریتمی را برای اختصاص بهینه‌ی توان ارسالی میان کاربر ارسال کننده و کاربران رله کننده ارائه کردیم. این الگوریتم بر مبنای جواب مسئله‌ی مینیمم کردن توان ارسالی با قید احتمال خاموشی بدست آمده است. بر این اساس نشان دادیم که توان مصرفی کل سیستم با استفاده از این الگوریتم بهینه کاهش قابل توجهی نسبت به حالت تقسیم مساوی توان ایجاد می‌کند. همچنین نشان دادیم که با کاهش قید احتمال خاموشی مورد نظر، تفاوت میان توان مورد نیاز حالت مشارکتی با حالت غیر مشارکتی بطور نمایی افزایش پیدا می‌کند.

همچنین برای بررسی اثر مجموعه‌ی کاربران همکار به بررسی تعداد کاربران همکار برای ارسال پرداختیم و حد بالایی را برای تعداد بهینه‌ی کاربران همکار بدست آوردیم. این حد بالا نه تنها برای حالت اختصاص بهینه‌ی توان بلکه برای تمامی حالات اختصاص توان، حداکثر تعداد کاربران همکاری را که می‌توانند به کاهش مقدار توان مورد نیاز ارسال کمک کنند را مشخص می‌کند. براین اساس همکاری با تعداد بیشتر از این حد بالا نمی‌تواند بهترین حالت مجموعه‌ی کاربران باشد.

براساس روابط بدست آمده در الگوریتم اختصاص توان و حدبالای بدست آمده برای تعداد کاربران همکار الگوریتمی را برای انتخاب بهترین مجموعه‌ی کاربران همکار ارائه کردیم که توان مورد نیاز را به حداقل مقدار ممکن می‌رساند. این الگوریتم پیچیدگی بسیار کمی دارد و با شبیه‌سازی نشان داده‌ایم که مجموعه‌ی انتخاب شده با آن نزدیکی بسیاری با انتخاب مجموعه براساس جستجوی کامل است.

برای مقایسه با الگوریتم‌های بهینه، مقدار توان مورد نیاز حالت تقسیم مساوی توان و الگوریتمی با پیچیدگی بسیار کم برای انتخاب کاربران همکار در حالت تقسیم مساوی توان ارائه شد. با نتایج شبیه‌سازی نشان داده شد که با توجه به وضعیت کاربران همکار تفاوت مقدار توان مورد نیاز این حالت با حالت بهینه تغییر خواهد کرد.

همچنین حالت همکاری دوطرفه را نیز بر اساس الگوریتم اختصاص بهینه‌ی توان بررسی کردیم و الگوریتمی برای انتخاب کاربر همکار برای مینیمم کردن مقدار توان مورد نیاز برای ارسال ارائه کردیم. همچنین نواحی‌ای که همکاری دوطرفه در آنها به سود هر دوطرف همکاری است را معرفی کردیم و نقش آن را در کاهش پیچیدگی الگوریتم انتخاب کاربر همکار بررسی کردیم. در انتها الگوریتمی برای اختصاص بهینه‌ی توان در حالت توان ثابت برای مینیمم کردن احتمال خاموشی ارائه کردیم که برخلاف الگوریتم ارائه شده‌ی قبلی نیاز به تکرار ندارد. همچنین به بررسی نواحی همکاری دوطرفه‌ی عادلانه در این حالت نیز پرداختیم.

### **پیشنهاد‌های پژوهشی**

در این رساله به بررسی کانال بی‌سیم با مدل رایلی پرداختیم. تغییر این مدل احتمال خاموشی بدست آمده از ارسال را تغییر خواهد داد و می‌تواند بعنوان مسئله‌ای جداگانه بررسی شود. مسئله‌ی انتخاب کاربران در شبکه‌های بی‌سیم مشارکتی که در این رساله به آن پرداخته شده است، یکی از حوزه‌های فعال تحقیقاتی است که بررسی آن از جنبه‌های مختلف از جمله بررسی با دید تئوری بازی و بررسی حالت همکاری محور صرف برای مینیمم کردن مقدار توان کل سیستم و یا ماکزیمم کردن طول عمر شبکه، قابل انجام است.

در این رساله تنها به بررسی استراتژی تقویت و ارسال پرداخته شد. بر این اساس تمام مباحث مطرح شده در اینجا قابل بررسی در استراتژی‌های مختلف و حتی در استراتژی‌های ترکیبی (تقویت و ارسال – دیکد و ارسال و تقویت و ارسال – فشرده کردن و ارسال) است.



## ضمیمه «الف»

### بدست آوردن اولین جمله بسط تیلور احتمال خاموشی

در این ضمیمه اولین جمله بسط تیلور احتمال خاموشی را برای استراتژی تقویت و ارسال بدست می-آوریم. برای به دست آوردن بسط تیلور احتمال خاموشی از روش توابع تولید کننده‌ی ممان استفاده می‌کنیم. تابع مشخصه عبارت نمایی با میانگین  $\lambda$  را بر اساس [37] می‌توانیم به شکل (الف-1) نشان دهیم.

$$\Phi(s) = \frac{1}{s\lambda + 1} \quad (\text{الف-1})$$

هنگامی که چند متغیر تصادفی مستقل با هم جمع می‌شوند، تابع مشخصه آنها با هم ضرب می‌شود. بنابراین با توجه به اینکه SNR معادل، جمع  $(m + 1)$  متغیر تصادفی نمایی مستقل است، تابع مشخصه آن را می‌توان به شکل (الف-2) نوشت.

$$\Phi_{SNR}(s) = \prod_{i=0}^m \frac{1}{s\lambda_i + 1} \quad (\text{الف-2})$$

برای به دست آوردن احتمال خاموشی، باید تابع توزیع تجمعی SNR معادل را در  $(2^{(m+1)R} - 1)$  به دست آوریم. می‌دانیم که تابع توزیع تجمعی انتگرال تابع توزیع احتمال است، بنابراین برای بدست آوردن تابع مشخصه تابع توزیع تجمعی باید  $\frac{1}{s}$  را در عبارت (الف-2) ضرب کنیم. حال برای به دست آوردن مشتق  $k$  ام تابع توزیع تجمعی در نقطه صفر و به دست آوردن شکل بسط تیلور باید عبارت (الف-3) را محاسبه کنیم.

$$f^{(k)}(0) = \lim_{s \rightarrow +\infty} s^{k+1} \left( \frac{1}{s} \prod_{i=0}^m \frac{1}{s\lambda_i + 1} - \sum_{j=1}^{k-1} \frac{f^{(j)}(0)}{s^{j+1}} \right) \quad (\text{الف-3})$$

براساس (الف-3)، مقدار مشتق‌ها و ضرایب بسط تیلور برای  $(k < m + 1)$  برابر صفر است و اولین

جمله مخالف صفر جمله‌ی  $(m + 1)$  ام است. بنابراین:

$$f^{(m+1)}(0) = \lim_{s \rightarrow +\infty} s^{m+2} \left( \frac{1}{s} \prod_{i=0}^m \frac{1}{s\lambda_i + 1} \right) = \frac{1}{\prod_{i=0}^m \lambda_i} \quad (\text{الف-4})$$

بنابراین جمله اول بسط تیلور تابع توزیع تجمعی در نقطه  $(2^{(m+1)R} - 1)$  برابر (الف-5) است.

$$P_{out} = \frac{(2^{(m+1)R} - 1)^{m+1}}{(m + 1)!} * \frac{1}{\prod_{i=0}^m \lambda_i} \quad (\text{الف-5})$$

### ضمیمه «ب»

تخصیص بهینه‌ی توان برای مینیمم کردن توان کل ارسالی

مسئله‌ی مطرح شده در عبارت‌های (2-10) شکل استاندارد مسئله‌ی بهینه‌سازی مقید را دارد. با فرض

فعال بودن قید احتمال خاموشی و با روش KKT، می‌توانیم مشتق تابع توان کل را مساوی ضریبی از

مشتق قید احتمال خاموشی نسبت به متغیرهای بهینه‌سازی قرار دهیم.

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial P_T}{\partial \lambda_0} \\ \vdots \\ \frac{\partial P_T}{\partial \lambda_m} \end{pmatrix} = \theta \begin{pmatrix} \frac{\partial (\prod_{i=0}^m \lambda_i)}{\partial \lambda_0} \\ \vdots \\ \frac{\partial (\prod_{i=0}^m \lambda_i)}{\partial \lambda_m} \end{pmatrix} \quad (1-ب)$$

که در آن  $\theta$  ضریب لاگرانژ در روش KKT است. براین اساس می‌توانیم عبارت (2-ب) را بنویسیم.

$$\begin{pmatrix} d_{sd}^\alpha - \sum_{k=1}^m \frac{\lambda_k^2 D_{srk}^\alpha}{(\lambda_0 - \lambda_k D_{srk}^\alpha)^2} d_{rkd}^\alpha \\ \vdots \\ \frac{\lambda_0^2}{(\lambda_0 - \lambda_m D_{sr_m}^\alpha)^2} d_{r_m d}^\alpha \end{pmatrix} = \theta \begin{pmatrix} \prod_{i=1}^m \lambda_i \\ \vdots \\ \prod_{i=0}^{m-1} \lambda_i \end{pmatrix} \quad (2-ب)$$

حال اگر بجای  $\lambda_i$  ها  $\lambda_i'$  قرار دهیم و ماتریس‌های دو طرف تساوی را در  $(\lambda_0, \dots, \lambda_m)^T / \lambda_0$  ضرب

کنیم، عبارت (3-ب) بدست می‌آید.

$$\begin{pmatrix} d_{sd}^\alpha - \sum_{k=1}^m \frac{\lambda_k^2 D_{srk}^\alpha}{(1 - \lambda_k' D_{srk}^\alpha)^2} d_{rkd}^\alpha \\ \vdots \\ \frac{\lambda_m'}{(1 - \lambda_m' D_{sr_m}^\alpha)^2} d_{r_m d}^\alpha \end{pmatrix} = \theta \begin{pmatrix} \lambda_0^m \prod_{i=1}^m \lambda_i' \\ \vdots \\ \lambda_0^m \prod_{i=1}^m \lambda_i' \end{pmatrix} \quad (3-ب)$$

حال اگر اولین تساوی موجود در ماتریس‌ها را ساده کنیم، عبارت (4-ب) بدست می‌آید.

$$d_{sd}^\alpha - \sum_{k=1}^m \frac{\lambda_k^2 D_{srk}^\alpha}{(1 - \lambda_k' D_{srk}^\alpha)^2} d_{rkd}^\alpha = d_{sd}^\alpha - \theta \sum_{k=1}^m (\lambda_k' D_{srk}^\alpha \lambda_0^m \prod_{i=1}^m \lambda_i') = \theta \lambda_0^m \prod_{i=1}^m \lambda_i'$$

$$\Rightarrow \theta \lambda_0^m \prod_{i=1}^m \lambda_i' = \frac{d_{sd}^\alpha}{1 + \sum_{k=1}^m (\lambda_k' D_{srk}^\alpha)} \quad (4-ب)$$

بر این اساس اگر تساوی بالا را در تمام سطرهای تساوی ماتریسی (ب-3) جاگذاری کنیم، معادله‌هایی از درجه‌ی 2 بدست می‌آید که جواب مثبت آنها به شکل عبارت (ب-5) خواهد بود.

$$\lambda'_i = \frac{D_{sr_i}^\alpha + \frac{1}{2}\zeta_i D_{r_i d}^\alpha - \sqrt{\frac{1}{4}\zeta_i^2 D_{r_i d}^{2\alpha} + (1 + \zeta_i) D_{sr_i}^\alpha D_{r_i d}^\alpha}}{D_{sr_i}^{2\alpha} - D_{sr_i}^\alpha D_{r_i d}^\alpha} \quad (5-ب)$$

که در آن،

$$\zeta_i = 1 + \sum_{j=1}^m (\lambda'_i D_{sr_j}^\alpha) - \lambda'_i D_{sr_i}^\alpha \quad (6-ب)$$

و برای راضی کردن شرط احتمال خاموشی باید داشته باشیم:

$$\lambda_0 = \frac{(2^{(m+1)R} - 1)^{m+1}}{\sqrt[m+1]{\prod_{i=1}^m \lambda'_i (m+1)! P_{out-th}}} \quad (7-ب)$$

برای حالت خاص  $D_{sr_i}^\alpha = D_{r_i d}^\alpha$ ، مقدار  $\lambda'_i$  به شکل عبارت (ب-8) خواهد بود.

$$\lambda'_i = \frac{1}{(2 + \zeta_i) D_{sr_i}^\alpha} \quad (8-ب)$$

توجه به این نکته ضروری است که مقدار پارامترهای  $\lambda'_i$  و  $\lambda_0$  باید به اندازه‌ای کوچک باشند که قید توان ماکزیمم برای تمامی گره‌ها راضی شود. البته از روش KKT می‌دانیم که اگر مقادیر بدست آمده برای این پارامترها بزرگتر از این حد باشد، مقدار توان این کاربران به مقدار توان ماکزیمم گره‌ها اشباع می‌شود.

## ضمیمه «ج»

### اثبات قضیه تعداد کاربران بهینه

برای اینکه بتوانیم از مشتق برای پیدا کردن نقطه‌ی بهینه تعداد کاربران استفاده کنیم،  $m$  را پارامتری پیوسته در نظر می‌گیریم. برای این منظور باید تابع فاکتوریل را با تابع گاما جایگزین کنیم. همچنین برای ساده کردن شکل مشتق، از تابع توان کل لگاریتم گرفته و از آن بجای تابع اصلی استفاده می‌کنیم. بنابراین تابع  $P$  را بصورت عبارت (ج-1) تعریف می‌کنیم.

$$P(m) = \text{Ln}(P_T) \\ = \text{Ln}(2^{(m+1)R} - 1) - \frac{\text{Ln}(\Gamma(m+2)P_{out-th})}{m+1} - \frac{m \text{Ln}(\lambda'_i)}{m+1} + \text{Ln}(1 + mP_{i-n}) + C \quad (\text{ج-1})$$

که در آن  $P_{i-n}$  نرمالیزه شده‌ی توان ارسالی کاربر همکار است و  $C$  مقدار ثابتی است که در مشتق-گیری نقشی نخواهد داشت. حال اگر فرض کنیم نقطه‌ی مینیمم کننده‌ی  $m_0$  در این تابع وجود دارد که مشتق اول این تابع را صفر می‌کند در حالیکه مشتق دوم آن عددی مثبت است، می‌خواهیم اثر تغییر در مقدار  $\lambda'_i$  و  $P_{i-n}$  را بر روی مقدار  $m_0$  بصورت جداگانه بررسی کنیم.

برای این منظور اگر  $\lambda'_i$  را با  $k\lambda'_i$  و  $P_{i-n}$  را با  $tP_{i-n}$  جایگزین کنیم، مشتق عبارت جدید  $(Q(m))$  را می‌توانیم به شکل (ج-2) بیان کنیم.

$$Q'(m) = P'(m) - \frac{1}{(m+1)^2} \text{Ln}(k) + \frac{(t-1)P_{i-n}}{(1+mtP_{i-n})(1+mP_{i-n})} \quad (\text{ج-2})$$

حال اگر بدون در نظر گرفتن  $t$ ، مقدار  $k$  عددی بزرگتر از یک باشد (یعنی  $\lambda'_i$  بزرگتر)، عبارت  $Q'(m_0)$  مقداری منفی خواهد داشت که این نشان دهنده‌ی آن است که نقطه‌ی مینیمم تابع جدید مقداری بزرگتر از  $m_0$  خواهد داشت. بطور مشابه اگر بدون در نظر گرفتن  $k$ ، مقدار  $t$  عددی بزرگتر از یک باشد (یعنی  $P_{i-n}$  بزرگتر)، عبارت  $Q'(m_0)$  مقداری مثبت خواهد داشت که این نشان دهنده‌ی آن است که اگر تابع جدید مینیمم کننده‌ی داشته باشد، مقدار آن کوچکتر از  $m_0$  خواهد بود.

بنابراین با فرض استقلال دو پارامتر  $\lambda'_i$  و  $P_{i-n}$ ، اگر مقدار  $\lambda'_i$  بزرگ شود یا مقدار  $P_{i-n}$  کوچک شود، مقدار مینیمم کننده‌ی تابع (در صورت وجود) که نشان دهنده‌ی تعداد بهینه‌ی کاربران همکار است، افزایش پیدا می‌کند.

## ضمیمه «د»

### تقریب حد بالای تعداد کاربران بهینه

برای بدست آوردن فرم بسته‌ی حد بالای تعداد کاربران بهینه از عبارت (ج-1) استفاده می‌کنیم با این تغییر که مقدار  $P_{i-n}$  را برابر صفر و مقدار  $\lambda'_i$  را برابر  $\lambda'_a$  قرار می‌دهیم.

$$P(m) = \text{Ln}(2^{(m+1)R} - 1) - \frac{\text{Ln}(\Gamma(m+2)P_{out-th})}{m+1} - \frac{m\text{Ln}(\lambda'_a)}{m+1} + C \quad (1-د)$$

حال اگر از عبارت (د-1) مشتق بگیریم، عبارت (د-2) بدست می‌آید.

$$P'(m) = \frac{2^{(m+1)R} R \text{Ln} 2}{(2^{(m+1)R} - 1)} + \frac{\text{Ln}(\Gamma(m+2))}{(m+1)^2} - \frac{\Psi(m+2)}{m+1} + \frac{\text{Ln}(P_{out-th})}{(m+1)^2} - \frac{\text{Ln}(\lambda'_a)}{(m+1)^2} \quad (2-د)$$

برای بدست آوردن نقطه‌ی بهینه باید نقطه‌ای که در آن عبارت (د-2) برابر صفر می‌شود را پیدا کرد. بنابراین در نقطه‌ی بهینه‌ای که نام آن را  $m_0$  می‌گذاریم، عبارت (د-3) باید برقرار باشد.

$$\frac{2^{(m_0+1)R} R \text{Ln} 2}{(2^{(m_0+1)R} - 1)} = \frac{\Psi(m_0+2)}{m_0+1} - \frac{\text{Ln}(\Gamma(m_0+2))}{(m_0+1)^2} - \frac{\text{Ln}(P_{out-th})}{(m_0+1)^2} + \frac{\text{Ln}(\lambda'_a)}{(m_0+1)^2} \quad (3-د)$$

بدلیل آنکه  $P_{out-th} < 1$  و  $\lambda'_a > 1$  هستند، عبارت سمت راست (د-3) عبارتی نزولی اکید خواهد بود که در بینهایت به سمت صفر میل می‌کند. همچنین عبارت سمت چپ (د-3) نیز تابعی نزولی اکید است که از مقدار  $\frac{R \text{Ln} 2}{2^R - 1}$  در نقطه‌ی صفر شروع و به  $R \text{Ln} 2$  در بینهایت میل می‌کند. این به آن معناست که برای  $R$  های بزرگ، تابع سمت چپ عبارت (د-3) مقداری برابر  $R \text{Ln} 2$  برای تمام نقاط  $m$  دارد.

برای بدست آوردن حد بالای تعداد بهینه‌ی کاربران می‌توانیم حداقل مقدار عبارت سمت چپ (د-3) را برابر عبارت سمت راست قرار دهیم. این به آن دلیل است که عبارت سمت راست یک عبارت نزولی اکید است و هرچه مقدار عبارت سمت راست کاهش یابد، مقدار  $m_0$  بدست آمده بزرگتر خواهد بود.

بنابراین بجای حل معادله‌ی (د-3) به حل معادله‌ی (د-4) می‌پردازیم.

$$R \text{Ln} 2 = \frac{\Psi(m_0+2)}{m_0+1} - \frac{\text{Ln}(\Gamma(m_0+2))}{(m_0+1)^2} - \frac{\text{Ln}(P_{out-th})}{(m_0+1)^2} + \frac{\text{Ln}(\lambda'_a)}{(m_0+1)^2} \quad (4-د)$$

بدلیل آنکه هنوز شکل معادله پیچیده است، دو تابع اول سمت راست (د-4) را در بازه‌ی 0 تا 10 با روش تطبیق منحنی بر اساس روش حداقل میانگین توان دوم خطا به شکل عبارت (د-5) تخمین می‌زنیم.

$$\frac{\Psi(m_0 + 2)}{m_0 + 1} - \frac{\text{Ln}(\Gamma(m_0 + 2))}{(m_0 + 1)^2} \cong \frac{-0.44}{(m + 1)^2} + \frac{0.82}{m + 1} \quad (\text{د-5})$$

حال عبارت (د-4) را می‌توانیم به شکل عبارت (د-6) بنویسیم.

$$R\text{Ln}2 = \frac{-0.44}{(m_0 + 1)^2} + \frac{0.82}{m_0 + 1} - \frac{\text{Ln}(P_{out-th})}{(m_0 + 1)^2} + \frac{\text{Ln}(\lambda'_a)}{(m_0 + 1)^2} \quad (\text{د-6})$$

عبارت (د-6) یک معادله‌ی درجه‌ی 2 است که جواب قابل قبول آن برای تعداد تقریبی بهینه‌ی کاربران همکار در عبارت (د-7) نشان داده شده است.

$$m_0 = \frac{0.41 - R\text{Ln}2 + \sqrt{0.168 - R\text{Ln}2(1.53 + \text{Ln}(P_{out-th}) - \alpha\text{Ln}2)}}{R\text{Ln}2} \quad (\text{د-7})$$

مقدار  $m_0$  بدست آمده در (د-7) برای  $R$  های بزرگ که در آنها مقدار تابع سمت چپ عبارت (د-3) برای تمامی  $m$  ها حدوداً ثابت و برابر مقدار  $R\text{Ln}2$  است، به مقدار نشان داده شده در شکل حد بالای تعداد کاربران بسیار نزدیک است. اما در  $R$  های کوچک مقدار بدست آمده در عبارت (د-7) بزرگتر از مقدار نشان داده شده در شکل حد بالای تعداد کاربران خواهد بود به این دلیل که مقدار تابع سمت چپ (د-3) برای  $R$  های کوچک در نقاط ابتدایی از مقدار مینیمم تابع که در (د-4) جایگزین آن شده است، بزرگتر است.



ضمیمه (ه)

ساده کردن شکل توان رله کردن در حالت دوکاربره

در اینجا می‌خواهیم شکل توان رله کردن کاربران را در حالتی که دوکاربر به همکاری می‌پردازند را بصورت ساده‌تری بنویسیم. برای این منظور توانی که کاربر 1 برای رله کردن اطلاعات کاربر 2 مصرف می‌کند را در عبارت (1-ه) نشان داده‌ایم.

$$P_{12} = \frac{2^{2R} - 1}{\sqrt{2P_{out-th}}} * \frac{\sqrt{\lambda'_1}}{1 - \lambda'_1 D_{21}^\alpha} * d_{1d}^\alpha \sigma_N^2 \quad (1-ه)$$

که مقدار پارامتر  $\lambda'_1$  در آن از عبارت (2-ه) بدست می‌آید.

$$\lambda'_1 = \frac{D_{21}^\alpha + \frac{1}{2} D_{1d}^\alpha - \sqrt{\frac{1}{4} D_{1d}^{2\alpha} + 2D_{21}^\alpha D_{1d}^\alpha}}{D_{21}^{2\alpha} - D_{21}^\alpha D_{1d}^\alpha} \quad (2-ه)$$

حال اگر پارامتر  $\lambda'_1$  را در عبارت (1-ه) جایگزین کنیم، عبارت (3-ه) بدست می‌آید.

$$P_{12} = \frac{2^{2R} - 1}{\sqrt{2P_{out-th}}} * \sqrt{\frac{D_{21}^\alpha + \frac{1}{2} D_{1d}^\alpha - \sqrt{\frac{1}{4} D_{1d}^{2\alpha} + 2D_{21}^\alpha D_{1d}^\alpha}}{D_{21}^{2\alpha} - D_{21}^\alpha D_{1d}^\alpha}} * \frac{d_{1d}^\alpha \sigma_N^2}{-\frac{3}{2} D_{1d}^\alpha + \sqrt{\frac{1}{4} D_{1d}^{2\alpha} + 2D_{21}^\alpha D_{1d}^\alpha}} * \frac{1}{D_{21}^\alpha - D_{1d}^\alpha} \quad (3-ه)$$

حال اگر معرج عبارت (3-ه) را به توان دو برسانیم، می‌توانیم آن را به شکل عبارت نهایی (4-ه) ساده کنیم.

$$\begin{aligned}
& \left( \frac{-\frac{3}{2}D_{1d}^\alpha + \sqrt{\frac{1}{4}D_{1d}^{2\alpha} + 2D_{21}^\alpha D_{1d}^\alpha}}{D_{21}^\alpha - D_{1d}^\alpha} \right)^2 = \frac{\frac{5}{2}D_{1d}^{2\alpha} + 2D_{21}^\alpha D_{1d}^\alpha - \frac{3}{2}D_{1d}^\alpha \sqrt{\frac{1}{4}D_{1d}^{2\alpha} + 2D_{21}^\alpha D_{1d}^\alpha}}{(D_{21}^\alpha - D_{1d}^\alpha)^2} \\
& = D_{1d}^\alpha \frac{\frac{5}{2}D_{21}^\alpha D_{1d}^\alpha + 2D_{21}^{2\alpha} - \frac{3}{2}D_{21}^\alpha \sqrt{\frac{1}{4}D_{1d}^{2\alpha} + 2D_{21}^\alpha D_{1d}^\alpha}}{D_{21}^\alpha (D_{21}^\alpha - D_{1d}^\alpha)^2} \\
& = D_{1d}^\alpha \left( \frac{D_{21}^\alpha + \frac{1}{2}D_{1d}^\alpha - \sqrt{\frac{1}{4}D_{1d}^{2\alpha} + 2D_{21}^\alpha D_{1d}^\alpha}}{D_{21}^{2\alpha} - D_{21}^\alpha D_{1d}^\alpha} \right) \left( \frac{2D_{21}^\alpha - \frac{1}{2}D_{1d}^\alpha - \sqrt{\frac{1}{4}D_{1d}^{2\alpha} + 2D_{21}^\alpha D_{1d}^\alpha}}{D_{21}^{2\alpha} - D_{21}^\alpha D_{1d}^\alpha} \right) \\
& = D_{1d}^\alpha \lambda_1' (1 + \lambda_1' D_{21}^\alpha) \tag{4-ه}
\end{aligned}$$

بنابراین، توان ارسالی کاربر 1 را می‌توانیم به شکل (5-ه) بنویسیم.

$$P_{12} = \frac{2^{2R} - 1}{\sqrt{2P_{out-th}}} * \frac{\sqrt{\lambda_1'}}{\sqrt{D_{1d}^\alpha \lambda_1' (1 + \lambda_1' D_{21}^\alpha)}} * d_{1d}^\alpha \sigma_N^2 = \sigma_N^2 \frac{2^{2R} - 1}{\sqrt{2P_{out-th}}} * \frac{\sqrt{d_{1d}^\alpha d_{2d}^\alpha}}{\sqrt{1 + \lambda_1' D_{21}^\alpha}} \tag{5-ه}$$

- [1] J.G. Proakis, "Digital Communication (The fourth edition)", 2001, New York: McGraw-Hill.
- [2] D. Tse, P. Viswanath, "Fundamentals of Wireless Communication", Cambridge University Press.
- [3] T. M. Cover and A. A. El Gamal, "Capacity theorems for the relay channel," IEEE Trans. Inform. Theory, vol. IT-25, pp. 572–584, Sept.1979.
- [4] Sendonaris, E. Erkip, and B. Aazhang, "Increasing uplink capacity via user cooperation diversity," in Proc. IEEE Int. Symp. Information Theory (ISIT), Cambridge, MA, Aug. 1998, p. 156.
- [5] J. N. Laneman, "Cooperative Diversity in Wireless Networks: Algorithms and Architectures", Ph.D. dissertation, MIT Univ., Aug 2002.
- [6] A. Sendonaris, E. Erkip, and B. Aazhang, "User cooperation diversity, Part II: Implementation aspects and performance analysis," IEEE Transaction On communications, vol. 51, no. 11, pp. 1939–1948, Nov. 2003.
- [7] A. Sendonaris, E. Erkip, and B. Aazhang, "User cooperation diversity–part I: system description," IEEE Trans. Commun., vol. 51, no. 11, pp.1927–1938, Nov. 2003.
- [8] J. N. Laneman, D. N. C. Tse, and G. W. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior," IEEE Trans Inform. Theory, vol. 50, no. 12, pp. 3062-3080, Dec. 2004.
- [9] J. N. Laneman and G. W. Wornell, "Distributed space–time coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks," IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 49, no. 10, pp. 2415–2525, Oct. 2003.
- [10] J. Luo, R. S. Blum., L. J. Cimini, L. J. Greenstein and A. M. Haimovich, "Decode-and-Forward Cooperative Diversity with Power Allocation in Wireless Networks," IEEE Trans. on Wireless Communications, vol. 6, no. 3, pp. 793-799, March 2007.
- [11] S. Serbetli and A. Yener, "Optimum Power Allocation for Relay Assisted F/TDMA Ad Hoc Networks," in Proceedings of the International Conference on Wireless Networks, Communications, and Mobile Computing, WirelessCom'05, Maui, Hawaii, June 2005.
- [12] S. Serbetli and A. Yener, "Relay Assisted F/TDMA Ad Hoc Networks: Node Classification, Power Allocation and Relaying Strategies," *IEEE Transactions on Communications*, June 2008, 56(6), pp. 937 - 947.
- [13] N. Ahmed, M. A. Khojastepour, B. Aazhang, "Outage Minimization and Optimal Power Control for the Fading Relay Channel," IEEE Information Theory Workshop, San Antonio, TX, October 24-29, 2004.
- [14] K. Lee and A. Yener, "Iterative Power Allocation Algorithms for Amplify/Estimate/Compress-and-Forward Multi-Band Relay Channels," in Proceedings of the Conference on Information Sciences and Systems, CISS'06, Princeton, NJ, March 2006.
- [15] R. Annavajjala, P. C. Cosman, L. B. Milstein, "Statistical channel knowledge-based optimum power allocation for relaying protocols in the high SNR regime," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 25, no. 2, pp.292–305, Feb. 2007.
- [16] Y. Zhao, R. Adve, and T. Lim, "Improving amplify-and-forward relay networks: optimal power allocation versus selection," IEEE Trans. on Wireless Communications, vol. 6, no. 8, pp. 3114-3123, August 2007.
- [17] P. Liu, Z. Tao, T. Korakis and S. S. Panwar, "CoopMAC: A Cooperative MAC for Wireles LANs," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Special Issue on Cooperative Communications and Networking, vol. 25, no. 2, pp. 369-378, Feb. 2007.

- [18] E. Yazdian, M.R. Pakravan, "Adaptive Modulation Technique for Cooperative Diversity in Wireless Fading Channel," PIMRC, Sep 2006.
- [19] T. Himsoon, W.P. Siriwongpairat, Z. Han, and K.J.R. Liu, "Lifetime Maximization via Cooperative Nodes and Relay Deployment in Wireless Networks", IEEE Journal of Selected Areas in Communications, Special Issue on Cooperative Communications and Networking, vol 25, no 2, pp.306-317, Feb 2007.
- [20] V. Mahinthan, L. Cai, J. W. Mark and X. Shen, "Maximizing Cooperative Diversity Energy Gain for Wireless Networks," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 6, no. 7, pp.2530–2539, Jul. 2007.
- [21] A. Jamshidi, M. N. Kenari, "Performance Analysis of Transmitter Side Cooperation-Receiver side Relaying Schemes for Heterogeneous Sensor Networks," IEEE Trans. on Vehicular Technology, to appear.
- [22] W. Haung, F. Chiu, C. J. Kuo and Y. Hong, "Comparison of Power Control Scheme for Relay Sensor Networks," IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 2007. ICASSP 2007, pp.477–480, April. 2007.
- [23] C. Fischione, A. Bonivento, A. Sangiovanni-Vincentelli and K. H. Johansson, "Cooperative Diversity with Disconnection Constraints and Sleep Discipline for Power Control in Wireless Sensor Networks", in Proc. of IEEE 64th Semiannual Vehicular Technology Conference - Spring 2006 (IEEE VTC Spring 06), Melbourne, Australia, May 2006.
- [24] A. Bletsas, A. Khisti, D.P. Reed, A. Lippman, "A Simple Cooperative. Diversity Method based on Network Path Selection," IEEE Journal on Selected Areas in Com., vol. 25, no. 2, pp.340–354, Mar. 2006.
- [25] E. Beres and R. S. Adve, "On selection cooperation in distributed networks", IEEE Trans. on Wireless Communications, to appear.
- [26] Y. Zhao, R.S. Adve and T.J. Lim, "Outage probability at arbitrary SNR in cooperative diversity networks", IEEE Communication Letters, vol. 9, no. 8, pp. 700-702, August 2005.
- [27] D. S. Michalopoulos, G. K. Karagiannidis, T. A. Tsiftsis and R. K. Mallik, "Distributed Transmit Antenna Selection (DTAS) under Performance or Energy Consumption Constraints", IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 7, No. 4, 1168-1173, April 2008.
- [28] A. Nosratinia, T. E. Hunter, "Grouping and partner selection in cooperative wireless networks," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Special Issue on Cooperative Communications and Networking, vol. 25, no. 2, pp. 369-378, Feb. 2007.
- [29] E. Yazdian, M.R. Pakravan, "Fairness Analysis of Adaptive Modulation Technique for Cooperative Diversity in Wireless Fading Channel," ICT08, June 2008.
- [30] H. Goudarzi and M.R. Pakravan, "Optimal partner selection and power allocation for amplify and forward cooperative diversity," in proceeding of PIMRC 2008.
- [31] H. Goudarzi and M.R. Pakravan, "Optimal partner selection and power allocation for amplify and forward cooperative diversity," to be submitted to IET communication.
- [32] H. Goudarzi and M.R. Pakravan, "Equal Power Allocation Scheme for Cooperative Diversity," in proceeding of IEEE/IFIP international conference on Internet, ICI 2008.
- [33] M. O. Hasna, M. S. Alouini, "End-to-End Performance of Transmission Systems with Relays over Rayleigh-Fading Channels," IEEE Trans. on Wireless Comm., vol. 2, no. 6, pp. 1126-1131, Nov. 2003.
- [34] J.Nocedal and S. J. Wright, "Numerical optimization," Springer press.

- [35] H. Goudarzi and M.R. Pakravan, "Practical Power Allocation and Greedy Partner Selection for Cooperative Networks," Accepted for publication in proceeding of IEEE/IFIP Wireless Days conference.
- [36] R. Fletcher, "Practical method of Optimization," John Wiley & Sons press.
- [37] A.Papoulis, S. U. Pillai, "Probability, random variables and stochastic processes," 4th edition, Mc Graw Hill publication.

## **ABSTRACT**

Cooperation in network has a valuable impact on the performance of the nodes and network. Cooperation in Wireless networks provides a different kind of diversity called Cooperative Diversity. This diversity technique is a special case of the space diversity. Cooperative diversity can be used to reduce the power consumption of nodes on the entire network. Also, we can use the cooperative diversity to reduce the required power of transmission of the nodes and network. In this thesis, we present a novel algorithm for partner selection and power allocation in the Amplify-and-Forward cooperative diversity scheme with multiple relays in order to minimize the required total transmit power by a given outage probability constraint. We represent the problem with a new formulation and solve the optimal power allocation by KKT method for a fixed set of partners. For optimal partner selection, we use a novel algorithm with low complexity to find the best set with minimum required power. We present a novel upper bound on the number of cooperative partners such that cooperation with more partners than this bound is not optimal. We present simulations which demonstrate that the results of the proposed algorithm are very close to the results of full search for finding the optimal set.

One of the most important problems in cooperation between selfish nodes is the issue of partner selection and matching. All selfish nodes compete to select the best partners to improve their own performance. We study this selfish behavior in optimal power allocation case and propose a distributed algorithm for partner selection in selfish case.

**Keywords** : Cooperative Diversity, Amplify and Forward, Power Allocation, Partner Selection, Greedy Matching.



**Sharif University of Technology  
Electrical Engineering School**

**M. Sc. Thesis**

# **Power Performance Analysis of Cooperative Networks**

**By:  
Hadi Goudarzi**

**Supervisor:  
Mohammad Reza Pakravan**

**September 2008**