

## طراحی مکانیزم بهینه ارسال بسته‌ها در شبکه‌های Slotted ALOHA مبتنی بر حذف تداخل غیرایده‌ال

زهرا غلامی مقدم<sup>۱</sup>، عبدالرسول قاسمی<sup>۲\*</sup>

\*نویسنده مسئول، دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۰۴، بازنگری: ۱۴۰۰/۰۳/۱۰، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۱۵

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران  
<sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

### چکیده

پروتکل IRSA یکی از روش‌های مناسب برای مدیریت دسترسی کاربران در ارتباطات ماشین به ماشین است. ایده اصلی در این پروتکل ارسال چندین کپی از هر بسته و استفاده از فرآیند حذف تداخل است. در مطالعات انجام شده تاکنون، توزیع درجه بهینه تعداد تکرار بسته‌ها با فرض ایده‌ال بودن حذف تداخل استخراج شده است. اما این احتمال وجود دارد که حذف تداخل ایده‌ال اجرا نشود؛ یعنی پس از کدگشایی یک بسته، اثر آن و همچنین کپی‌های مربوطه به‌طور کامل از فریم حذف نشود. این موضوع باعث کاهش گذردهی شبکه می‌شود. در این مقاله دو مدل مختلف از حذف تداخل را که از نظر معیار لازم برای کدگشایی متفاوت هستند در نظر می‌گیریم. سپس بیشینه‌سازی گذردهی IRSA را با فرض غیرایده‌ال بودن حذف تداخل برای این دو مدل انجام می‌دهیم. در این راستا ابتدا احتمال از بین رفتن یک بسته را در هر یک از دو مدل مفروض استخراج می‌کنیم. سپس با استفاده از آن، توزیع درجه‌های بهینه‌ی تعداد کپی‌های ارسالی کاربران را بدست می‌آوریم. نتایج نشان می‌دهد در هر دو مدل توزیع‌های بدست آمده در این مقاله دارای گذردهی بیشتری نسبت به توزیع‌های دیگر از جمله توزیع‌های مبتنی بر فرض حذف تداخل ایده‌ال هستند.

**کلمات کلیدی:** دسترسی تصادفی، پروتکل IRSA، حذف تداخل، الگوریتم تکامل تفاضلی.

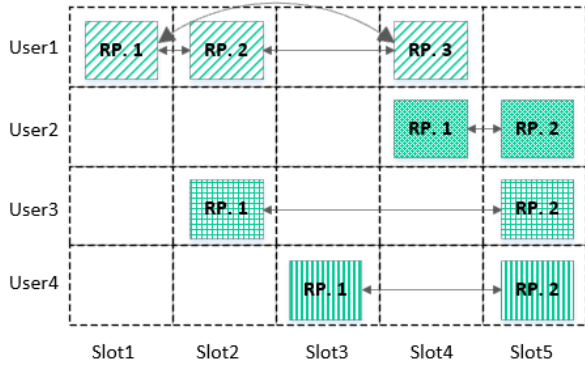
### ۱- مقدمه

در شبکه‌های نسل پنجم (5G) توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است. ویژگی ارتباطات M2M تولید داده‌های کم‌حجم اما به تعداد زیاد است. بنابراین پروتکل دسترسی تصادفی روش مناسبی برای کنترل دسترسی کاربران در ارتباطات M2M شبکه‌های 5G است [۲].

ساده‌ترین پروتکل دسترسی تصادفی، Slotted ALOHA (SA) است که در آن زمان به چند فریم زمانی و هر فریم نیز به  $n$  شیار زمانی<sup>۲</sup> با طول یکسان تقسیم می‌شود. در این پروتکل هر کاربر یک شیار زمانی را به تصادف انتخاب و بسته خود را در آن شیار ارسال می‌کند. در صورت ارسال همزمان چند بسته در یک شیار تداخل<sup>۳</sup> رخ می‌دهد و این جزء ویژگی‌های اجتناب‌ناپذیر دسترسی تصادفی است. در SA در صورت ارسال تنها یک بسته در یک شیار آن بسته با موفقیت کدگشایی می‌شود. اما با تداخل چند بسته در یک شیار، تمام آن‌ها از بین می‌روند و در فریم بعدی مجدداً ارسال می‌شوند. بیشترین گذردهی این پروتکل

در بسیاری از شبکه‌ها یک رسانه‌ی انتقال بین چندین کاربر به اشتراک گذاشته می‌شود. به‌منظور مدیریت دسترسی همزمان و استفاده‌ی بهینه از کانال مشترک، پروتکل‌های دسترسی چندگانه معرفی شدند. بر اساس نوع ترافیک بسته‌های ارسالی و نیازمندی‌های موجود در هر شبکه، انواع مختلفی از این پروتکل‌ها ارائه شدند. یکی از انواع آن‌ها پروتکل دسترسی تصادفی است که در آن هر کاربر بدون نیاز به هماهنگی با سایر کاربران یا کنترل‌کننده مرکزی اقدام به ارسال داده می‌کند. این روش نسبت به سایر روش‌ها از جمله دسترسی چندگانه تقسیم زمانی و دسترسی چندگانه تقسیم فرکانسی دارای سربار سیگنالینگ، تاخیر و پیچیدگی پیاده‌سازی کمتری است [۱]. با توجه به افزایش روز افزون تعداد دستگاه‌ها و اشیای هوشمند در ارتباطات ماشین به ماشین (M2M<sup>۱</sup>)، موضوع دسترسی انبوه

گیرنده شکل موج سیگنال مربوط به بسته‌ی کدگشایی شده را بازسازی و از کل سیگنال دریافتی موجود در شیارهایی که آن بسته و کپی‌های مربوطه ارسال شده‌اند کسر می‌کند. حذف کردن تداخل‌ها ممکن است در تکرارهای بعدی امکان کدگشایی سایر بسته‌های ارسال شده در فریم را فراهم کند و این موجب افزایش گذردهی می‌شود [۳]. شکل ۱ مثالی از پروتکل IRSA را نشان می‌دهد. علامت فلش نشان‌دهنده اشاره‌گر است.



شکل ۱- مثال از پروتکل IRSA.

در این مثال اولین کپی ارسالی از کاربر ۱ به علت عدم وجود تداخل با سایر بسته‌ها با موفقیت کدگشایی می‌شود و اثر آن از شیارهای دوم و چهارم حذف می‌شود. در نتیجه بسته‌ی مربوط به کاربر دوم در شیار چهارم و بسته‌ی کاربر سوم در شیار دوم نیز قابل کدگشایی هستند.

فرآیند IC را از یک جنبه دیگر می‌توان به دو دسته ایده‌ال و غیرایده‌ال تقسیم کرد. همان‌طور که بیان شد در فرآیند IC پس از کدگشایی یک بسته، سیگنال مربوط به آن و همچنین سیگنال‌های مربوط به کپی‌های آن بسته از فریم حذف می‌شوند. حذف کردن یک سیگنال از فریم نیازمند دانستن پارامترهای کانال مربوط به آن سیگنال است (مانند تضعیف سیگنال، شیفت فاز و ...). با توجه به عدم اطلاع دقیق گیرنده از پارامترهای کانال، می‌بایست این پارامترها توسط گیرنده تخمین زده شوند. در سیستم‌های واقعی ممکن است به دلایل مختلف از جمله محدودیت‌های باتری و سخت‌افزاری، پارامترهای کانال به درستی تخمین زده نشوند و در نتیجه حذف تداخل به صورت کامل و ایده‌ال انجام نشود [۱۳]. حذف غیرایده‌ال سیگنال کدگشایی شده منجر به باقی‌ماندن مقداری از توان آن سیگنال در شیار مربوطه می‌شود. وجود این اثرات باقی‌مانده ناشی از حذف کردن موجب کاهش گذردهی سیستم می‌شود و این موضوع یکی از چالش‌های پیاده‌سازی واقعی فرآیند IC است [۱۴].

در [۳] به منظور بهینه‌سازی کردن گذردهی پروتکل IRSA، بهینه‌سازی مکانیزم ارسال بسته‌ها با فرض فرآیند IC مبتنی بر برخورد و ایده‌ال بودن این فرآیند انجام شده است؛ منظور از ایده‌ال بودن IC آن است که پس از کدگشایی یک بسته، اثر آن و همچنین کپی‌های مربوطه به طور کامل از فریم حذف شود. در [۱۲] نیز بهینه‌سازی مکانیزم ارسال بسته‌ها است با فرض IC ایده‌ال اما مبتنی بر SINR انجام شده است. همچنین در برخی از مراجع از جمله [۱۵، ۱۶] استفاده از IC غیرایده‌ال در پروتکل IRSA مورد بررسی قرار گرفته است و روش‌هایی برای کاهش اثر IC غیرایده‌ال ارائه شده است. رویکرد این روش‌ها بهینه‌سازی مکانیزم ارسال بسته‌ها نیست، بلکه ارائه روش‌هایی صرفاً در گیرنده برای بهبود تخمین پارامترهای کانال است. هدف از این مقاله بهینه‌سازی مکانیزم ارسال بسته‌ها در شبکه‌های مبتنی بر IRSA با فرض غیرایده‌ال بودن فرآیند IC است. این پروتکل را  $I$ -IRSA می‌نامیم. بهینه‌سازی مذکور را برای دو حالت IC مبتنی بر برخورد و IC مبتنی بر SINR به صورت جداگانه انجام می‌دهیم.

تقریباً ۰.۳۷ است [۳]. منظور از گذردهی ( $T$ ) نسبت تعداد بسته‌های کدگشایی شده به تعداد کل شیارها است.

در سال‌های اخیر چندین نسخه بهبودیافته از SA ارائه شده است. یکی از انواع بهبودیافته‌ی SA پروتکل  $DSA^f$  است که در آن تمام کاربران تعداد یکسانی کپی از بسته‌ی خود را در شیارهای به تصادف انتخاب شده ارسال می‌کنند [۴]. پروتکل  $CRDSA^h$  نیز یکی از نسخه‌های بهبودیافته SA است که در آن مانند DSA تمام کاربران تعداد یکسانی کپی از بسته خود را در شیارهای مختلف ارسال می‌کنند، اما در این پروتکل برخلاف DSA به منظور حل مشکل تداخل، از فرآیند حذف تداخل ( $IC^c$ ) در گیرنده استفاده می‌شود. گذردهی این روش تقریباً ۰.۵۵ است [۵]. نسخه بعدی، پروتکل  $IRSA^v$  است که مانند CRDSA از IC برای رفع تداخل بهره می‌گیرد، اما برخلاف آن تعداد کپی‌های ارسالی کاربران یکسان نیست و بر اساس یک توزیع درجه از پیش تعیین شده مشخص می‌شود. هر توزیع درجه بیانگر آن است که هر کاربر با چه احتمالی چه تعداد کپی از بسته خود را ارسال کند. استفاده از این پروتکل باعث افزایش قابل توجه گذردهی می‌شود. بیشترین گذردهی این پروتکل برای فریم‌های بزرگ تقریباً ۰.۹۷ و برای پیاده‌سازی‌های عملی تقریباً ۰.۸ است [۳].

فرآیند IC مورد استفاده در گیرنده، از نظر معیار لازم برای کدگشایی بسته‌ها می‌تواند به دو صورت مدل مبتنی بر برخورد<sup>۸</sup> و مدل مبتنی بر نسبت سیگنال به تداخل و نویز ( $SINR^v$ ) اجرا شود. در IC مبتنی بر برخورد در صورت وجود تنها یک بسته در یک شیار زمانی، آن بسته با موفقیت کدگشایی می‌شود و در صورت وجود چند بسته در یک شیار زمانی، تمام آن بسته‌ها از بین می‌روند [۶]. در مراجع [۴، ۵] که به ترتیب نسخه اولیه از پروتکل‌های CRDSA و IRSA ارائه شد، فرآیند IC مبتنی بر برخورد فرض شده است. اگرچه این دو پروتکل میزان گذردهی پروتکل SA را تا حد خوبی افزایش می‌دهند؛ اما در صورت نزدیک شدن تعداد کاربران به تعداد شیارهای زمانی گذردهی این دو پروتکل به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد [۷].

استفاده از معیار SINR در فرآیند IC موجب افزایش احتمال کدگشایی بسته‌ها می‌شود. در این روش اگر مقدار SINR یک بسته در یک شیار بزرگتر یا مساوی یک مقدار آستانه<sup>۱۱</sup> از پیش تعریف شده باشد، آن بسته با موفقیت کدگشایی می‌شود [۸، ۹]. به عبارت دیگر صرف نظر از تداخل تعدادی سیگنال در یک شیار زمانی، در صورتی که یک سیگنال تا حد کافی قوی‌تر از سایر سیگنال‌ها باشد، می‌توان آن را با موفقیت کدگشایی کرد. به این ویژگی، اثر تسخیر<sup>۱۱</sup> گفته می‌شود [۶]. در مواردی که بسته‌های دریافتی در یک شیار زمانی دارای توان‌های متفاوتی باشند، استفاده از IC مبتنی بر SINR نسبت به IC مبتنی بر برخورد مناسب‌تر خواهد بود. در سناریوهای واقعی ارتباطات بی‌سیم، به دلایل مختلف از جمله محوشدگی<sup>۱۲</sup>، برخورد با موانع و عبور سیگنال‌ها از چندین مسیر، ممکن است برخی از بسته‌های دریافت شده در یک شیار زمانی دارای توان‌های متفاوتی باشند. به همین دلیل IC مبتنی بر SINR در واقعیت کاربرد بیشتری دارد [۱۰].

در [۱۱] چندین سطح توان در نظر گرفته شده و نشان داده شده است که استفاده از چندگانگی توان ارسالی<sup>۱۳</sup> در طرف فرستنده و فرآیند IC مبتنی بر SINR در طرف گیرنده موجب بهبود گذردهی پروتکل CRDSA می‌شود. منظور از چندگانگی توان ارسالی آن است که هر کاربر برای ارسال کپی‌های بسته‌ی خود، یکی از سطوح توان فرض شده را به صورت تصادفی انتخاب کند. استفاده از این راهکار در پروتکل IRSA نیز باعث افزایش گذردهی این پروتکل می‌شود [۱۲].

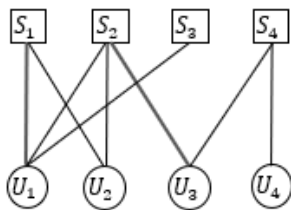
فرآیند IC یک الگوریتم تکرار شونده است و هر تکرار از آن به این صورت انجام می‌شود که در سرآیند هر بسته یک اشاره‌گر به کپی‌های آن بسته وجود دارد. زمانی که یک بسته با موفقیت در گیرنده کدگشایی می‌شود، با استفاده از اشاره‌گرها می‌توان اندیس شیارهایی که کپی‌های مربوطه در آنجا ارسال شده‌اند را شناسایی و تداخل ناشی از کپی‌ها را در آن شیارها حذف کرد. به عبارت دیگر

## ۲- مدل سیستم

IC می‌پردازیم. این کار را به ازای هر یک از دو مدل IC مبتنی بر تداخل و IC مبتنی بر SINR به صورت مجزا انجام می‌دهیم. به همین منظور در بخش ۱-۲-۳ مروری بر روابط تحلیلی مربوط به احتمال از بین رفتن یک بسته در حالتی که IC مبتنی بر برخورد باشد و ایده‌ال اجرا شود (روابط مرجع [۳]) خواهیم داشت. سپس این روابط را به حالتی که IC غیرایده‌ال اجرا شود تعمیم می‌دهیم. در بخش ۲-۲-۳ نیز مروری بر روابط تحلیلی مربوط به احتمال از بین رفتن یک بسته در حالتی که IC مبتنی بر SINR باشد و ایده‌ال اجرا شود (روابط مرجع [۱۲]) خواهیم داشت. سپس این روابط را به حالت IC غیرایده‌ال تعمیم می‌دهیم.

### ۳-۱- نمایش گرافی

به منظور درک بهتر، پروتکل IRSA را می‌توان به صورت یک گراف دوبخشی به منظور  $G = (U, S, E)$  در نظر گرفت که  $U$  مجموعه‌ای از  $m$  گره کاربر  $S$ ،  $S$  مجموعه‌ای از  $n$  گره شیار و  $E$  مجموعه‌ای از یال‌های گراف است. در صورتی که کاربر  $U_i$  بسته‌ای را در شیار  $S_j$  ارسال کرده باشد یک یال از  $U_i$  به  $S_j$  خواهیم داشت [۳]. به عنوان مثال شکل ۲ نمایش گرافی ارسال‌های انجام شده در یک فریم با ۴ شیار و ۴ کاربر را نشان می‌دهد. فرآیند IC را می‌توان به صورت حذف متوالی یال‌های گراف  $G$  در نظر گرفت [۳]. با کدگذاری یک بسته از کاربر  $U_i$  تمام یال‌های متصل به  $U_i$  از گراف حذف می‌شوند و  $\alpha\%$  از توان سیگنال مربوط به آن بسته در شیارهای مربوطه باقی می‌ماند.



شکل ۲- نمایش گرافی فرآیند IC

هر گره در گراف  $G$  دارای توزیع درجه است. بر اساس [3] توزیع درجه هر گره کاربر از دو دیدگاه گره و یال به ترتیب برابر است با [۳]:

$$\Lambda(x) = \sum_{l=2}^{l_{max}} \Lambda_l x^l, \quad \lambda(x) = \sum_{l=2}^{l_{max}} \lambda_l x^{l-1} \quad (3)$$

که در آن احتمال ارسال  $l$  کپی توسط هر کاربر و  $\lambda_l$  احتمال اتصال یک یال به یک کاربر با درجه  $l$  است. با داشتن  $\Lambda(x)$  می‌توان  $\lambda(x)$  را از رابطه زیر محاسبه نمود [۳].

$$\lambda(x) = \frac{\Lambda'(x)}{\Lambda'(1)} \quad (4)$$

توزیع درجه هر گره شیار نیز از دیدگاه یال برابر با رابطه‌ی زیر است [۳].

$$\rho(x) = \sum_d \rho_d x^{d-1} \quad (5)$$

احتمال اتصال یک یال به یک شیار با درجه  $d$  و برابر است با [۳]:

$$\rho_d = \frac{d}{d!} (G\Lambda'(1))^{d-1} e^{-G\Lambda'(1)} \quad (6)$$

### ۳-۲- تحلیل درختی

تحلیل درختی یک روش پرکاربرد در تحلیل و ارزیابی عملکرد حدی<sup>۱۷</sup> پروتکل IRSA است که در مراجع مختلف از جمله [۳، ۱۲] مورد استفاده قرار گرفته است. با ساخت درخت از روی گراف دوبخشی و تحلیل بر روی این درخت می‌توان رابطه ریاضی مربوط به احتمال از بین رفتن بسته‌ها را یافت. نحوه ساخت درخت از روی گراف دوبخشی به این صورت است که یک گره کاربر را به صورت تصادفی انتخاب

فرض می‌کنیم  $m$  کاربر ارسال کننده در ارتباط فراسو را داریم، هر کاربر تنها مجاز به ارسال یک بسته (به همراه کپی‌های مربوطه) در هر فریم است و تعداد شیارها نیز برابر  $n$  است. همانند [۳] پارامتر  $G = \frac{m}{n}$  را به عنوان بار ترافیکی شبکه در نظر می‌گیریم که بیانگر متوسط تعداد بسته‌های ارسال شده در هر شیار زمانی است. هر کاربر  $l$  تکرار از بسته خود را بر اساس توزیع احتمالاتی  $\{A_l\}$  در شیارهای زمانی که به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند ارسال می‌کند. در حالت اول فرض می‌کنیم تمام کاربران از سطح توان یکسانی برای ارسال استفاده می‌کنند و برای مدل کردن IC غیرایده‌ال نیز از پارامتر  $w_d$  استفاده می‌کنیم. یک شیار با درجه اولیه  $d$  را در نظر می‌گیریم (منظور از درجه اولیه شیار تعداد بسته ارسال شده در آن است). احتمال کدگذاری یک بسته در این شیار پس از کدگذاری  $d-1$  بسته را برابر  $w_d$  و مقدار آن را به صورت رابطه زیر فرض می‌کنیم. در این رابطه  $d_{thr}$  آستانه در نظر گرفته شده برای درجه اولیه هر شیار است.

$$w_d = \begin{cases} 1 & d \leq d_{thr} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

در حالت دوم، تعداد  $k$  سطح توان با مقادیر  $L = \{P_1, P_2, P_3, \dots, P_k\}$  را در نظر می‌گیریم و هر کاربر هنگام ارسال هر یک از کپی‌های بسته خود، یکی از این سطوح توان را به صورت تصادفی و بر اساس توزیع یکنواخت انتخاب می‌کند. فرض می‌کنیم کانال از نوع نویز گوسی سفید جمع‌شونده<sup>۱۵</sup> است. یعنی توان دریافتی در هر شیار برابر با مجموع توان‌های ارسال‌ی علاوه نویز سفید است و موارد مربوط به محوشدگی کانال را در نظر نگرفتیم. رابطه ۲ شرط لازم برای کدگذاری بسته  $U_i$  در شیار  $S_j$  را بیان می‌کند. در این رابطه  $P_i(j)$  توان دریافتی مربوط به بسته  $U_i$  در شیار  $S_j$  و  $P_{others}(j)$  مجموع توان دریافتی مربوط به سایر بسته‌های موجود در شیار  $S_j$  است که هنوز کدگذاری نشده‌اند.  $P_{residual}(j)$  مجموع توان باقی‌مانده ناشی از بسته‌های کدگذاری شده در شیار  $S_j$  برابر با توان نویز سفید و  $\gamma$  مقدار آستانه لازم برای کدگذاری بسته‌ها است [۱۴].

$$\text{SINR}_i(j) = \frac{P_i(j)}{P_{others}(j) + P_{residual}(j) + P_{noise}} \geq \gamma \quad (2)$$

در هر تکرار از فرآیند IC تمام شیارها به صورت متوالی مورد پردازش قرار می‌گیرند. در هر شیار نیز بسته‌ها به ترتیب نزولی مقادیر توان آن‌ها، برای کدگذاری بررسی می‌شوند. فرآیند IC برای یک بسته در یک شیار زمانی به این صورت انجام می‌شود که اگر گیرنده یک کپی از بسته  $U_i$  در شیار  $S_j$  را با موفقیت کدگذاری کند، با استفاده از اشاره‌گرهای مربوطه اندیس شیارهای مربوط به سایر کپی‌های بسته  $U_i$  را شناسایی می‌کند. سپس سهم تداخل ناشی از بسته کدگذاری شده را از شیار  $S_j$  و همچنین سایر شیارهایی که کپی‌های دیگر  $U_i$  در آنجا ارسال شده‌اند حذف می‌کند. به دلیل غیرایده‌ال بودن فرآیند IC نیز  $\alpha\%$  از توان سیگنال مربوط به بسته کدگذاری شده در  $S_j$  و سایر شیارهای مربوطه باقی می‌ماند. در صورتی که بسته‌های بعدی موجود در شیار  $S_j$  شرط لازم برای کدگذاری را داشته باشند؛ سه مرحله‌ی فوق برای هر یک از آن‌ها نیز انجام می‌شود. با پایان یافتن بسته‌های موجود در شیار  $S_j$ ، بسته‌های موجود در شیار بعدی، مشابه با آنچه بیان شد مورد پردازش قرار می‌گیرند. این فرآیند تا جایی ادامه می‌یابد که تعداد تکرارها به تعداد مشخصی برسد.

### ۳- تحلیل احتمال از بین رفتن بسته‌ها

در این بخش با فرض IC غیرایده‌ال به یافتن احتمال از بین رفتن یک بسته (نسبت تعداد بسته‌های کدگذاری نشده به تعداد کل بسته‌ها) پس از پایان فرآیند

$$p_i = 1 - e^{-G \Lambda'(1)} \times \sum_{d=1}^{d_{thr}} \frac{\left( (1 - \lambda(p_{i-1})) G \Lambda'(1) \right)^{d-1}}{(d-1)!} \quad (10)$$

شرط اولیه برابر  $p_0 = 1$  است، زیرا در شروع فرآیند IC هنوز هیچ بسته‌ای کدگشایی نشده است. با تکرار رابطه بازگشتی فوق به تعداد زیاد ( $i_{max}$ ) می‌توان احتمال از بین رفتن یک بسته ( $P_L$ ) را بدست آورد. به عبارت دیگر احتمال از بین رفتن یک بسته برابر است با احتمال آن که پس از تکرار بسیاری از فرآیند IC هیچ یک از کپی‌های آن بسته به‌طور مستقیم قابل کدگشایی در فریم نباشند [۳]. هر بسته با احتمال  $\Lambda_l$  دارای  $l$  کپی در هر فریم است، بنابراین:

$$P_L(G, \{\Lambda_l\}_{l=2}^{l_{max}}, d_{thr}) = \sum_{l=2}^{l_{max}} \Lambda_l (p_{i_{max}}(G, \{\Lambda_l\}_{l=2}^{l_{max}}, d_{thr}))^l \quad (11)$$

طبق تعریف بیان شده از گذردهی، مقدار  $T$  برابر است با:

$$T = G [1 - P_L(G, \{\Lambda_l\}_{l=2}^{l_{max}}, d_{thr})] \quad (12)$$

### ۳-۲-۲- تحلیل درختی در حالت IC مبتنی بر SINR

در صورتی که IC مبتنی بر SINR باشد و به‌صورت ایده‌آل اجرا شود، بر اساس مفاهیم تحلیل درختی در [۱۷] روابط زیر را خواهیم داشت [۱۲].

$$q_i = \sum_{l=2}^{l_{max}} \lambda_l p_i^{l-1} = \lambda(p_i) \quad (13)$$

$$p_i = 1 - \sum_{d=1}^{\infty} \rho_d \sum_{r=1}^d P(r, L, \gamma) \binom{d-1}{r-1} (q_{i-1})^{r-1} (1 - q_{i-1})^{d-r} \quad (14)$$

$P(r, L, \gamma)$  در رابطه ۱۴ برابر با احتمال آن است که بسته  $U_i$  به‌طور مستقیم در شیار  $S_j$  قابل کدگشایی باشد؛ به شرط آن که  $r - 1$  بسته در شیار  $S_j$  موجود باشند که هنوز کدگشایی نشده‌اند، مجموعه مقادیر توان‌ها برابر  $L$  و آستانه لازم برای کدگشایی بسته‌ها  $\gamma$  باشد [۱۲]. رابطه فوق را می‌توان به‌صورت زیر نوشت [۱۲].

$$p_i = 1 - e^{-\lambda(p_{i-1}) G \Lambda'(1)} \sum_{r=1}^{\infty} \frac{(\lambda(p_{i-1}) G \Lambda'(1))^{r-1}}{(r-1)!} \times P(r, L, \gamma) = f(p_{i-1}, G, L, \{\Lambda_l\}) \quad (15)$$

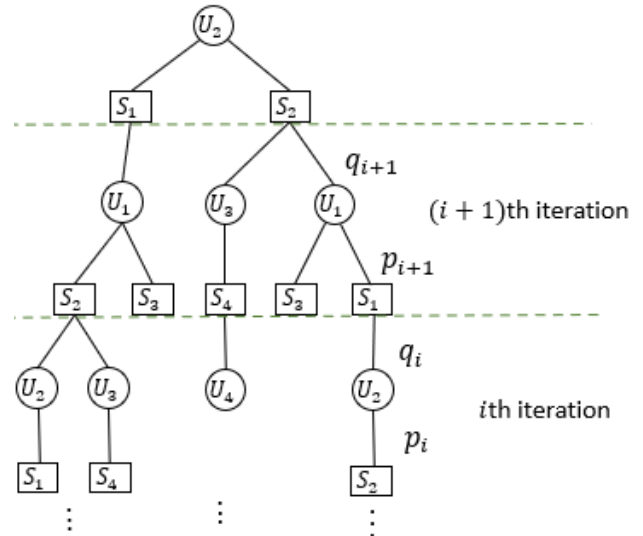
مقادیر  $P_L$  و  $T$  در حالت IC مبتنی بر SINR و ایده‌آل بودن این فرآیند از روابط زیر قابل محاسبه هستند [۱۲].

$$P_L(G, \{\Lambda_l\}, L) = \sum_{l=2}^{l_{max}} \Lambda_l (p_{i_{max}}(G, \{\Lambda_l\}, L))^l \quad (16)$$

$$T = G [1 - P_L(G, \{\Lambda_l\}, L)] \quad (17)$$

با توجه به زیاد بودن تعداد الگوهای مختلف تداخل، یافتن رابطه تحلیلی برای  $P(r, L, \gamma)$  دشوار است و مقدار این پارامتر به‌صورت دقیق محاسبه می‌شود [۱۲]. برای محاسبه دقیق این احتمال، باید تمام الگوهای تداخل مختلف را در نظر گرفت. شکل ۴ مثالی از تمام الگوهای تداخل ممکن را با فرض  $L = \{3dBm, 7dBm\}$  و  $\gamma = 0dB$  نشان می‌دهد.

می‌کنیم و به‌عنوان ریشه قرار می‌دهیم. فرزندان هر گره در این درخت برابر با همسایگان آن گره (بجز پدرش) در گراف است و عمق این درخت دو برابر تعداد تکرارهای فرآیند IC در نظر گرفته می‌شود [۱۱]. شکل ۳ مثالی از نمایش درختی گراف موجود در شکل ۲ را نشان می‌دهد. در اکثر مراجع به منظور تحلیل درختی پروتکل IRSA و یافتن روابط تحلیلی از دو پارامتر  $p_i$  و  $q_i$  استفاده می‌شود. هر کپی در هر فریم یا به‌طور مستقیم قابل کدگشایی است یا از طریق کپی‌های دیگر قابل کدگشایی است.  $p_i$  احتمال آن است که یک کپی در تکرار  $i$  از فرآیند IC به‌طور مستقیم قابل کدگشایی نباشد و  $q_i$  احتمال آن است که یک کپی در تکرار  $i$  از فرآیند IC از طریق هیچ‌یک از کپی‌های دیگر قابل کدگشایی نباشد [۱۷].



شکل ۳- نمایش درختی ارسال‌های انجام شده در فریم موجود در شکل ۲.

### ۳-۲-۱- تحلیل درختی در حالت IC مبتنی بر برخورد

در صورتی که IC مبتنی بر برخورد باشد و به‌صورت ایده‌آل اجرا شود، بر اساس مفاهیم تحلیل درختی در [۱۷] روابط زیر را خواهیم داشت [۳].

$$q_i = \sum_{l=2}^{l_{max}} \lambda_l p_i^{l-1} = \lambda(p_i) \quad (7)$$

$$p_i = 1 - \sum_{d=0}^m \rho_d (1 - q_{i-1})^{d-1} \quad (8)$$

یک کپی ارسال شده توسط فرستنده با درجه  $l$  را در نظر می‌گیریم. با فرض اجرای غیرایده‌آل IC، این بسته در صورتی در تکرار  $i$  از فرآیند IC از طریق سایر کپی‌ها قابل کدگشایی نخواهد بود که هیچ‌یک از  $l - 1$  کپی دیگر در تکرار  $i$  به‌طور مستقیم قابل کدگشایی در فریم نباشند. بنابراین رابطه ۷ در حالت IC غیرایده‌آل نیز قابل استفاده است. اما برای محاسبه  $p_i$  در حالت غیرایده‌آل به پارامترهای بیشتری در مقایسه با حالت ایده‌آل نیاز است. مقدار  $p_i$  با فرض IC مبتنی بر برخورد و غیرایده‌آل بودن این فرآیند برابر با رابطه زیر است که در آن  $w_d$  از رابطه ۱ قابل محاسبه است.

$$p_i = 1 - \sum_{d=0}^m w_d \rho_d (1 - q_{i-1})^{d-1} \quad (9)$$

با ترکیب روابط (۷) و (۹) و استفاده از روابط (۱) و (۶) خواهیم داشت:

$$p_i = 1 - e^{-G A'(1)} \sum_{r=1}^{\infty} \sum_{d=r}^{\infty} P(r, d, L, \gamma, \alpha) \times \frac{(G A'(1))^{d-1} (q_{i-1})^{r-1} (1 - q_{i-1})^{d-r}}{(r-1)! (d-r)!} \quad (20)$$

همچنین با جایگذاری  $q_i = \lambda(p_i)$  در رابطه فوق، رابطه‌ی زیر را خواهیم داشت.

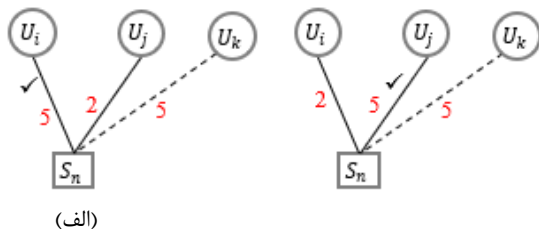
$$p_i = 1 - e^{-G A'(1)} \sum_{r=1}^{\infty} \sum_{d=r}^{\infty} P(r, d, L, \gamma, \alpha) \times \frac{(G A'(1))^{d-1} (\lambda(p_{i-1}))^{r-1} (1 - \lambda(p_{i-1}))^{d-r}}{(r-1)! (d-r)!} \quad (21)$$

با تحلیلی مشابه با مطالب بیان شده در انتهای بخش ۱-۲-۳ مقادیر  $P_L$  و  $T$  در حالت IC مبتنی بر SINR و غیرایده‌ال بودن این فرآیند نیز از روابط زیر قابل محاسبه هستند.

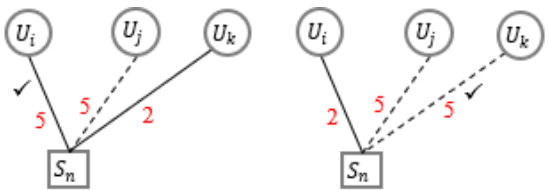
$$P_L(G, \{\Lambda_l\}, \gamma, \alpha, L) = \sum_{l=2}^{l_{max}} \Lambda_l (p_{i_{max}}(G, \{\Lambda_l\}, \gamma, \alpha, L))^l \quad (22)$$

$$T = G [1 - P_L(G, \{\Lambda_l\}, \gamma, \alpha, L)] \quad (23)$$

همان‌طور که بیان شد  $P(r, d, L, \gamma, \alpha)$  احتمال کدگشایی مستقیم یک بسته در یک شیار بر اساس فرضهای در نظر گرفته شده است. با توجه به آن‌که تعداد الگوهای مختلف تداخل زیاد است؛ یافتن عبارت تحلیلی برای  $P(r, d, L, \gamma, \alpha)$  دشوار است. به همین دلیل ما به محاسبه‌ی دقیق این احتمال می‌پردازیم. برای محاسبه این احتمال باید تمام الگوهای تداخل مختلف را بدست آورد. یک شیار با درجه‌ی اولیه  $d$  و درجه‌ی باقیمانده  $r$  را در نظر می‌گیریم؛ بر اساس توان‌های ارسالی هر یک از کاربران، الگوهای مختلفی از تداخل را در شیار مربوطه خواهیم داشت. به عبارت دیگر هر تغییر در توان ارسالی کاربران منجر به ایجاد یک الگوی تداخل جدید می‌شود. بنابراین برای محاسبه پارامتر  $P$  باید جایگشت‌های مختلف از هر الگوی تداخل را نیز در نظر گرفت. شکل ۵ تعدادی از جایگشت‌های مختلف یک الگوی تداخل را نشان می‌دهد. یال‌های نقطه‌چین مربوط به بسته‌های کدگشایی شده و یال‌های دیگر مربوط به بسته‌های کدگشایی نشده هستند. علامت  $\checkmark$  نیز قابل کدگشایی بودن یال مربوطه را نشان می‌دهد.

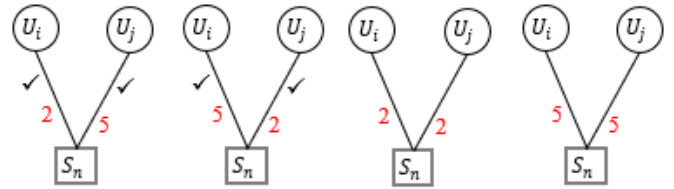


(الف)



شکل ۵- جایگشت‌های مختلفی از الگوی برخورد شکل (الف).

اگر تعداد جایگشت‌های مختلف یک الگوی تداخل با  $r$  بسته‌ی کدگشایی نشده و  $d-r$  بسته کدگشایی شده را با  $N_p(r, d)$  نمایش دهیم، این تعداد بر اساس



شکل ۴- نمایشی از تمام الگوهای تداخل ممکن با فرض

$$L = \{3\text{dBm}, 7\text{dBm}\} r = 2, \gamma = 0\text{dB},$$

در این شکل اعداد بر روی یال‌ها نشان‌دهنده توان‌های دریافتی مربوط به هر بسته بر حسب میلی وات است و علامت  $\checkmark$  بیانگر آن است که بسته مربوطه شرط لازم برای کدگشایی را دارد. در این مثال  $P(r, L, \gamma)$  برابر با ۰.۵ است.

مشابه با تحلیل بیان شده در بخش ۱-۲-۳، یک کپی ارسال شده توسط فرستنده با درجه  $l$  را در نظر می‌گیریم. با فرض اجرای غیرایده‌ال IC، این بسته در صورتی در تکرار  $i$  از فرآیند IC از طریق سایر کپی‌ها قابل کدگشایی نخواهد بود که هیچ‌یک از  $l-1$  کپی دیگر در تکرار  $i$  به‌طور مستقیم قابل کدگشایی در فریم نباشند. بنابراین رابطه ۱۳ در حالت IC غیرایده‌ال نیز قابل استفاده است، اما برای محاسبه احتمال آن‌که یک کپی به‌طور مستقیم در فریم قابل کدگشایی نباشد به پارامترهای بیشتری در مقایسه با حالت ایده‌ال نیاز است. مقدار  $p_i$  با فرض فرآیند IC مبتنی بر SINR و غیرایده‌ال بودن این فرآیند به‌صورت رابطه زیر قابل محاسبه است که تعمیم یافته رابطه ۱۴ است.

$$p_i = 1 - \sum_{d=1}^m \rho_d \sum_{r=1}^d P(r, d, L, \gamma, \alpha) \times (1 - q_{i-1})^{d-r} \binom{d-1}{r-1} (q_{i-1})^{r-1} \quad (18)$$

در این رابطه  $d$  درجه اولیه یک شیار (درجه یک شیار قبل از اجرای فرآیند IC) و  $r$  درجه باقی‌مانده (درجه‌ی یک شیار پس از اجرای فرآیند IC) است.  $(1 - q_{i-1})^{d-r} \binom{d-1}{r-1} (q_{i-1})^{r-1}$  احتمال وجود  $r-1$  بسته کدگشایی نشده در شیار مربوطه است.  $P(r, d, L, \gamma, \alpha)$  برابر است با احتمال آن‌که یک بسته به‌طور مستقیم در یک شیار قابل کدگشایی باشد؛ به شرط آن‌که  $r-1$  بسته در شیار مورد نظر موجود باشند که هنوز کدگشایی نشده‌اند، درجه اولیه آن شیار برابر با  $d$ ، مجموعه مقادیر توان‌ها برابر  $L$ ، آستانه لازم برای کدگشایی بسته‌ها  $\gamma$  و درصد توان باقی‌مانده هر سیگنال پس از کدگشایی برابر  $\alpha$  باشد. با توجه به آن‌که درجه اولیه و درجه باقیمانده مقادیر مختلفی می‌توانند داشته باشند بر روی کل حالات ممکن میانگین گرفته شده است. یک شیار با درجه اولیه  $d$  و درجه باقی‌مانده  $r$  را در نظر می‌گیریم، در حالت IC ایده‌ال احتمال کدگشایی مستقیم یک کپی در این شیار مستقل از درجه اولیه، اما در حالت غیرایده‌ال وابسته به آن است. بنابراین در حالت غیرایده‌ال به جای  $P(r, L, \gamma)$  (پارامتر استفاده شده در [۱۲])،  $P(r, d, L, \gamma, \alpha)$  را خواهیم داشت. رابطه ۱۸ را می‌توان به‌صورت رابطه زیر نوشت.

$$p_i = 1 - \sum_{r=1}^m \sum_{d=r}^m \rho_d P(r, d, L, \gamma, \alpha) \times \binom{d-1}{r-1} (q_{i-1})^{r-1} (1 - q_{i-1})^{d-r} \quad (19)$$

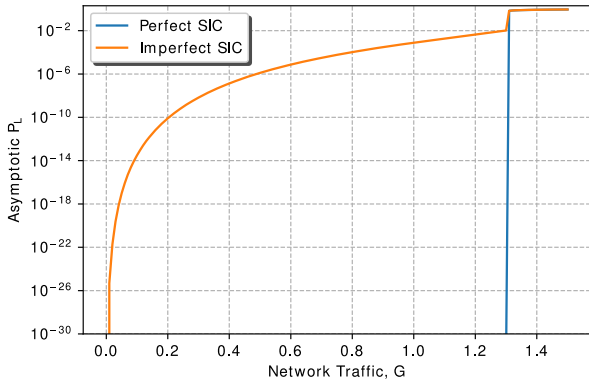
رابطه فوق برای  $\infty \rightarrow n$  صادق است. بنابراین طبق رابطه  $G = \frac{m}{n}$  مقدار  $m$  نیز به  $\infty$  میل می‌کند. پس از جایگذاری مقدار پارامتر  $\rho_d$  در رابطه ۱۹ خواهیم داشت:

احتمال از بین رفتن بسته‌ها به صفر میل می‌کند و بعد از آن افزایش سریع در  $P_L$  را داریم؛ از رابطه ۲۵ برای یافتن  $G^*$  استفاده می‌کنیم [۳، ۱۲]. در غیر در این صورت یک مقدار مشخص را برای احتمال از بین رفتن بسته‌ها در نظر می‌گیریم  $(\bar{P}_L)$  و  $G^*$  را از رابطه ۲۶ محاسبه می‌کنیم [۱۸].

$$G^* = \sup\{G: f(p, G, L, \{\Lambda_l\}) < p\} \quad (25)$$

$$G^* = \sup\{G: P_L < \bar{P}_L\} \quad (26)$$

شکل ۷ نمودار تئوری احتمال از بین رفتن یک بسته را با فرض فرآیند IC مبتنی بر SINR در دو حالت ایده‌آل و غیرایده‌آل نشان می‌دهد. توزیع درجه یک توزیع درجه فرضی در نظر گرفته شده است. مقادیر  $P_L$  نیز از روابط ۱۶ و ۲۲ محاسبه شده‌اند. در شکل مربوط به حالت IC ایده‌آل، مقدار  $G^*$  برابر ۱.۳ است. همان‌طور که مشاهده می‌شود برای  $G \leq 1.3$  احتمال از بین رفتن بسته‌ها کمتر از  $10^{-30}$  است، که این مقدار بسیار نزدیک به ۰ است و پس از آن افزایش ناگهانی در  $P_L$  را داریم. در حالت IC غیرایده‌آل در نقطه‌ی  $G = 1.3$  مقدار  $P_L$  تقریباً از ۰.۰۱ به ۰.۶۹ تغییر پیدا کرده است و بنابراین مقدار  $G^*$  برابر ۱.۳ است، اما برای  $G \leq G^*$  احتمال از بین رفتن بسته‌ها نزدیک ۰ نیست. این موضوع به دلیل غیرایده‌آل بودن حذف تداخل و کاهش احتمال کدگشایی بسته‌ها است. بنابراین در صورت اجرای غیرایده‌آل فرآیند IC از  $P_L$  برای بدست آوردن  $G^*$  استفاده می‌کنیم.



شکل ۷- مقادیر تئوری احتمال از بین رفتن بسته‌ها در دو پروتکل IRSA و I-IRSA با فرض IC مبتنی بر SINR

فرض می‌کنیم مقدار گذردهی به ازای  $G = G^*$  برابر  $T^*$  باشد؛ یعنی  $T^*$  بیشترین مقداری از  $T$  است که به‌ازای آن، مقادیر احتمال از بین رفتن بسته‌ها کمتر از  $\bar{P}_L$  باشد. با توجه به آن که برای  $G \leq G^*$ ،  $P_L$  کمتر از  $\bar{P}_L$  است و معمولاً نیز مقدار کمی برای  $\bar{P}_L$  در نظر گرفته می‌شود، طبق رابطه گذردهی،  $T^* \approx G^*$  است. بنابراین می‌توان گفت توزیع درجه با بیشترین مقدار از  $G^*$  دارای بیشترین مقدار از  $T^*$  نیز هست. ما به‌دنبال یافتن توزیع درجه‌ای هستیم که در حالت IC غیرایده‌آل دارای بیشترین مقدار از  $T^*$  باشد. به‌همین منظور مسئله‌ی بهینه‌سازی زیر را تعریف می‌کنیم.

$$\text{maximize } T^* \quad (23-الف)$$

$$\{\Lambda_l\}_{l=2}^{l_{max}} \quad (23-ب)$$

$$\text{s.t. } T^* = G^* (1 - P_L) \quad (23-ج)$$

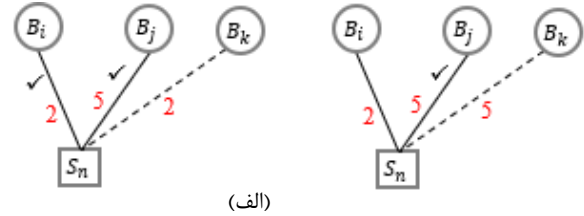
$$\sum_{l=2}^{l_{max}} \Lambda_l = 1 \quad (23-د)$$

$$0 \leq \Lambda_l \leq 1 \quad \forall l \in [2, \dots, l_{max}] \quad (23-ه)$$

رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است. فرض می‌کنیم  $n_1$  یال دارای توان  $P_1$ ،  $n_2$  یال دارای توان  $P_2$ ، ...،  $n_k$  یال دارای توان  $P_k$  باشند.

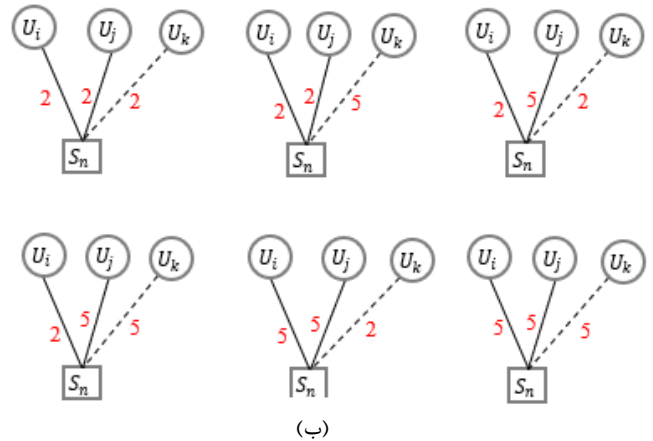
$$N_p(r, d) = \frac{d!}{(d-r)! n_1! n_2! \dots n_k!} \quad (24)$$

با بدست آوردن الگوهای تداخل مختلف و بررسی تعداد یال‌های قابل کدگشایی در هر یک از آن‌ها می‌توان پارامتر  $P(r, d, L, \gamma, \alpha)$  مورد استفاده در رابطه ۲۱ را محاسبه نمود. شکل ۶ مثالی از نحوه محاسبه‌ی این پارامتر را نشان می‌دهد.



(الف)

$$\rightarrow n_s = 2 * \left( \frac{3!}{2!} + \frac{3!}{2!} + 3! + 3! + \frac{3!}{2!} + \frac{3!}{2!} \right) = 48$$



(ب)

$$\rightarrow n_e = 2 * 3! + 3! = 18$$

شکل ۶- مثالی از نحوه محاسبه  $P(r, d, L, \gamma, \alpha)$  برای  $r = 2, d = 3$   
 $\alpha = 0.1, L = \{3\text{dBm}, 6\text{dBm}\}, \gamma = 0\text{dB}$

در قسمت (الف) تعداد اعضای فضای مطلوب و در قسمت (ب) تعداد اعضای فضای نمونه محاسبه شده است.

#### ۴- بهینه‌سازی توزیع درجه

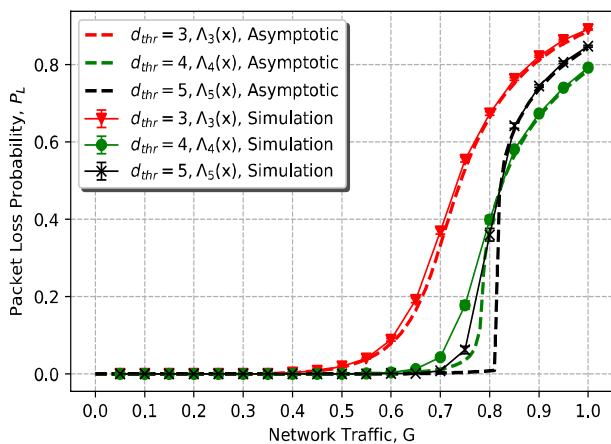
فرآیند IC نقشی بسیار کلیدی در رفع تداخل و افزایش گذردهی پروتکل IRSA دارد. همان‌طور که در مقدمه بیان شد اجرای غیرایده‌آل IC باعث می‌شود فرآیند بازبازی بسته‌ها کمتر پیش برود و گذردهی کمتری حاصل شود. طبق روابط ۱۷ و ۲۳ با ثابت بودن مقادیر پارامترهای  $G, d_{thr}, \gamma, \alpha, L$  مقدار گذردهی سیستم در هر دو حالت IC مبتنی بر تداخل و IC مبتنی بر SINR تنها به توزیع درجه  $\Lambda(x)$  است. بنابراین بهینه کردن توزیع درجه منجر به بیشینه شدن گذردهی می‌شود و دارای اهمیت ویژه‌ای است. یکی از معیارهای تعیین توزیع درجه بهینه پارامتر  $G^*$  است که به‌عنوان آستانه‌ی بار ترافیکی شبکه در نظر گرفته می‌شود. توزیع درجه بهینه، توزیع درجه‌ای است که دارای بیشترین مقدار از  $G^*$  باشد [۳]. نقطه‌ای است که پس از آن افزایش سریع در  $P_L$  را داشته باشیم. در مراجع مختلف بسته به مسئله‌ی مورد نظر از دو روش متفاوت برای یافتن  $G^*$  استفاده می‌شود. در مواردی که اطمینان داشته باشیم برای مقادیر  $G \leq G^*$

ثابت در نظر گرفتیم ( $n = 200$ ) و با اضافه کردن تعداد کاربران ( $m$ ) مقدار  $G$  را افزایش دادیم. به‌ازای هر مقدار  $G = \frac{m}{n}$  دو مجموعه گره  $U$  و  $S$  را به‌ترتیب با تعداد  $m$  و  $n$  عضو تشکیل دادیم. سپس هر گره  $U_i \in U$  را به  $l$  گره موجود در مجموعه  $S$  که به‌طور تصادفی انتخاب شدند متصل کردیم. مقدار  $l$  نیز بر اساس توزیع درجه  $\Lambda(x)$  تعیین می‌شود. به‌این‌ترتیب به‌ازای هر مقدار از  $G$  یک گراف دوبخشی تصادفی تولید کردیم. پس از تشکیل گراف دوبخشی اولیه، فرآیند IC را مطابق با مدل بیان شده در ابتدای بخش ۲ تا ۲۰ بار تکرار اجرا کردیم و سپس به محاسبه  $P_L$  و  $T^*$  پرداختیم. اما به‌منظور تخمین دقیق‌تر سناریوی شبیه‌سازی شده را به تعداد ۲۰۰۰ بار تکرار کردیم و میانگین آن‌ها را به‌عنوان  $P_L$  و  $T^*$  در نقطه‌ی  $G$  در نظر گرفتیم. شکل‌های ۹ و ۱۰ به‌ترتیب نتایج  $P_L$  و  $T^*$  پروتکل I-IRSA را برای  $d_{thr} = 3, 4, 5$  در دو حالت تئوری و شبیه‌سازی نشان می‌دهند. توزیع درجه‌ها، توزیع درجه‌های موجود در جدول ۱ هستند. مقادیر تئوری از روابط ۱۰، ۱۱ و ۱۲ محاسبه شده‌اند و پارامترهای مورد نیاز برای یافتن این مقادیر نیز مطابق بخش ۵ مقداردهی شده‌اند.

برای هر نقطه در شبیه‌سازی، فاصله اطمینان ۹۵٪ نیز رسم شده است و به معنی آن است که ۹۵٪ از مقادیر  $P_L$  و  $T^*$  بدست آمده در شبیه‌سازی در بازه‌ی مشخص شده قرار دارند. فاصله اطمینان ۹۵٪ در نظر گرفته شده برابر  $\left[ \bar{X} - Z \frac{S}{\sqrt{N-1}}, \bar{X} + Z \frac{S}{\sqrt{N-1}} \right]$  است که در آن  $\bar{X}$ ،  $N$  و  $S$  به‌ترتیب برابر تعداد، میانگین و انحراف معیار نمونه‌ها است. پارامتر  $Z$  نیز مقدار متناسب با سطح اطمینان ۰.۹۵ است که طبق [۲۰] برابر ۱.۹۶ است. طول بسیار کم بازه‌ها در شکل، نشان‌دهنده‌ی دقت بالای تخمین بدست آمده از  $P_L$  و  $T^*$  است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در شبیه‌سازی نیز مانند تئوری با افزایش  $d_{thr}$  احتمال از بین رفتن بسته کاهش و گذردهی افزایش می‌یابد.

جدول ۱- عملکرد حدی توزیع درجه‌های بهینه در پروتکل I-IRSA با فرض IC مبتنی بر برخورد.

$d_{thr}$	$\Lambda(x)$	$T^*$	$G^*$
3	$\Lambda_3(x) = 0.2232x^3 + 0.7768x^4$	0.45	0.46
	$\Lambda_0(x) = 0.5x^2 + 0.28x^3 + 0.22x^8$	0.3	0.31
4	$\Lambda_4(x) = x^3$	0.67	0.68
	$\Lambda_0(x)$	0.44	0.45
5	$\Lambda_5(x) = 0.1162x^2 + 0.3448x^3 + 0.5391x^4$	0.8	0.81
	$\Lambda_0(x)$	0.57	0.58



شکل ۹- مقادیر احتمال از بین رفتن بسته در پروتکل I-IRSA، با فرض IC مبتنی بر برخورد، استفاده از مقادیر مختلف  $d_{thr}$  و توزیع درجه‌های جدول ۱.

به‌منظور حل مسئله‌ی بهینه‌سازی فوق از الگوریتم تکامل تفاضلی (DE<sup>۱۸</sup>) استفاده می‌کنیم. الگوریتم DE که در اکثر مراجع به‌منظور یافتن توزیع درجه بهینه مورد استفاده قرار گرفته است، یک رویکرد مکاشفه‌ای برای بهینه‌سازی توابع مشتق‌ناپذیر و غیرخطی است. این الگوریتم جزء الگوریتم‌های تکاملی محسوب می‌شود. ابتدا یک جمعیت اولیه به‌صورت تصادفی و بر اساس توزیع یکنواخت تولید می‌شود که هر عضو از جمعیت، یک بردار از اعداد حقیقی است. سپس به‌منظور تکامل فرآیند یا ایجاد پاسخ‌های بهتر به‌ترتیب از مراحل جهش، بازترکیب و انتخاب استفاده می‌شود [۱۹]. با انتخاب هر یک از اعضای جمعیت به‌عنوان والد و استفاده از مراحل جهش و بازترکیب تعدادی فرزند تولید می‌شود. سپس در مرحله‌ی انتخاب، با مقایسه‌ی هر یک از فرزندان با والد خود، در صورتی که فرزندان تابع هدف بهتری داشته باشند جایگزین والد می‌شوند و به‌عنوان عضوی از نسل جدید در نظر گرفته می‌شوند. به‌عبارت دیگر پس از اعمال این سه مرحله بر روی جمعیت نسل قبل، نسلی جدید با جمعیتی بهتر از نسل قبل تولید می‌شود. این فرآیند سه مرحله‌ای برای هر نسل جدید ایجاد شده تکرار می‌شود و تا رسیدن تعداد نسل‌ها به  $gen_{max}$  ادامه می‌یابد. جزئیات بیشتر الگوریتم در [۱۹] بیان شده است.

جهت یافتن توزیع درجه‌ی بهینه با استفاده از الگوریتم DE هر توزیع درجه را به‌صورت یک بردار مانند شکل ۸ در نظر گرفتیم. هر یک از درایه‌های این بردار یکی از ضرایب توزیع درجه است و بیانگر احتمال ارسال بسته به تعداد اندیس آن درایه از بردار است. همچنین تابع هدف در مسئله‌ی بهینه‌سازی ما برابر مقدار تئوری  $T^*$  است که از رابطه ۲۳- ج محاسبه می‌شود.

$l = 2$	$l = 3$	$l = 4$	$l = 5$	$l_{max}$
$\Lambda_2$	$\Lambda_3$	$\Lambda_4$	$\Lambda_5$	$\Lambda_{l_{max}}$

شکل ۸- نمایش برداری یک توزیع درجه در الگوریتم تکامل تفاضلی.

## ۵- نتایج عددی

در هر دو حالت IC مبتنی بر برخورد و IC مبتنی بر SINR مقادیر پارامترهای مورد نیاز برای بهینه‌سازی را به‌صورت  $P_L = 10^{-2}$ ،  $l_{max} = 500$  و  $gen_{max} = 500$  در نظر گرفتیم. همچنین به‌دلیل وجود محدودیت تعداد اشاره‌گرها در سرآیند هر بسته، بیشترین تعداد تکرار هر بسته ( $l_{max}$ ) را برابر با ۸ در نظر گرفتیم. در حالت IC مبتنی بر SINR علاوه بر پارامترهای ذکر شده، مقادیر سایر پارامترها را به‌صورت  $\gamma = 0 \text{ dBm}$ ،  $\alpha = 0.05$  و  $p_{noise} = 0$  در نظر گرفتیم. همچنین برای سطوح توان، سه حالت مختلف را در نظر گرفتیم. فرض کردیم در حالت اول تمام کاربران از یک سطح توان با مقدار  $L = \{3\text{dBm}, 6\text{dBm}\}$  حالت دوم از دو سطح توان با مقادیر  $L = \{3\text{dBm}, 6\text{dBm}, 7.78\text{dBm}\}$  و حالت سوم از سه سطح توان با مقادیر  $L = \{3\text{dBm}, 6\text{dBm}, 7.78\text{dBm}\}$  استفاده می‌کنند. در ادامه به نتایج بهینه‌سازی و شبیه‌سازی در دو حالت IC مبتنی بر تداخل و IC مبتنی بر SINR می‌پردازیم.

### ۵-۱- نتایج عددی در حالت IC مبتنی بر برخورد

جدول ۱ نتایج بهینه‌سازی توزیع درجه را برای مقادیر مختلف  $d_{thr}$  در حالت IC مبتنی بر برخورد و غیرایده‌ال بودن این فرآیند نشان می‌دهد. نتایج با استفاده از الگوریتم DE بدست آمده‌اند. در این جدول مقدار تئوری  $T^*$  و  $G^*$  هر یک از توزیع درجه‌ها نیز ذکر شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش  $d_{thr}$  مقدار تئوری  $T^*$  و  $G^*$  حاصل از توزیع درجه‌های بهینه‌ی بدست آمده افزایش می‌یابد. زیرا افزایش  $d_{thr}$  منجر به افزایش احتمال کدگشایی بسته‌ها می‌شود.

به‌منظور ارزیابی بیشتر عملکرد توزیع‌های بدست آمده از شبیه‌سازی مونت-کارلو استفاده کردیم. شبیه‌سازی به‌این صورت انجام شده است که طول فریم را

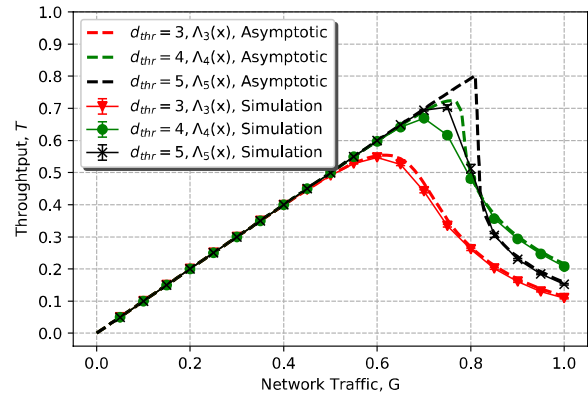
## ۵-۲- نتایج عددی در حالت IC مبتنی بر SINR

جدول ۲ نتایج بهینه‌سازی توزیع درجه را برای هر یک از سه حالت بیان شده در بخش ۵ با فرض IC مبتنی بر SINR و غیریاده‌ال بودن این فرآیند نشان می‌دهد. در این جدول، توزیع درجه‌های بهینه بدست آمده برای فرض مذکور با نماد  $\Lambda(x)$  مشخص شده‌اند و مقدار تئوری  $G^*$  و  $T^*$  هر یک از آن‌ها نیز ذکر شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود توزیع درجه بدست آمده برای حالت  $k=1$  مشابه با توزیع درجه  $\Lambda_0(x)$  موجود در جدول ۱ است. زیرا در صورت استفاده‌ی تمام کاربران از یک سطح توان  $L = \{3\text{dBm}\}$ ، با توجه به مقادیر در نظر گرفته شده برای  $\gamma$  و  $P_{noise}$  شرط لازم و کافی برای کدگشایی یک بسته در یک شیار، درجه ۱ بودن شیار مربوطه می‌شود. همچنین در صورت استفاده‌ی کاربران از سطوح توان متفاوت، با به‌کارگیری فرآیند IC مبتنی بر SINR احتمال کدگشایی یک بسته در یک شیار با درجه بزرگتر از ۱ نیز ممکن می‌شود. به‌همین دلیل  $T^*$  برای  $k=1$  کمتر از  $T^*$  مربوط به  $k=2$  و  $k=3$  می‌شود. بهینه‌سازی توزیع درجه در گیرنده یعنی ایستگاه پایه<sup>۱۹</sup> انجام می‌شود. در شروع هر دوره از انتقال، ایستگاه پایه با توجه به مقادیر  $L, \gamma$  و  $\alpha$  توزیع احتمالاتی بهینه مربوط به تعداد کپی‌ها را محاسبه و به تمام کاربران ارسال می‌کند.

جدول ۲- عملکرد حدی توزیع درجه‌های بهینه در پروتکل I-IRSA با فرض IC مبتنی بر SINR

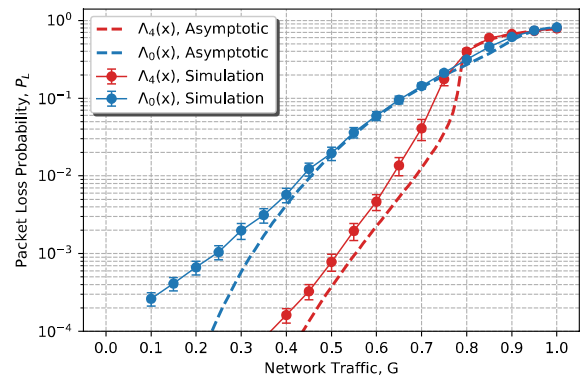
$k$	Degree distribution	$T^*$	$G^*$
1	$\Lambda_1(x) = 0.5152 x^2 + 0.2555 x^3 + 0.2293 x^8$	0.45	0.46
	$\phi_1(x) = 0.5152 x^2 + 0.2555 x^3 + 0.2293 x^8$	0.3	0.31
2	$\Lambda_2(x) = 0.4019 x^2 + 0.5164 x^3 + 0.0463 x^7 + 0.0353 x^8$	1.32	1.33
	$\phi_2(x) = 0.6675 x^2 + 0.1381 x^3 + 0.1944 x^8$	1.07	1.08
3	$\Lambda_3(x) = 0.1264 x^2 + 0.7325 x^3 + 0.0659 x^5 + 0.0752 x^6$	1.38	1.39
	$\phi_3(x) = 0.7961 x^2 + 0.0525 x^5 + 0.1514 x^8$	1.01	1.02

برای بررسی بیشتر عملکرد توزیع‌های بدست آمده در جدول ۲ از شبیه‌سازی استفاده کردیم. با انجام شبیه‌سازی (مطابق پاراگراف دوم بخش ۵-۱) به ازای هر مقدار از  $G$  یک گراف دوبخشی تصادفی تولید کردیم. به هر یال از این گراف یک وزن اختصاص دادیم. این وزن‌ها را بر اساس یک توزیع یکنواخت از مجموعه مقادیر توان فرض شده انتخاب کردیم. پس از تشکیل گراف دوبخشی اولیه، فرآیند IC را مطابق مدل بیان شده در پاراگراف سوم بخش ۲ تا ۲۰ بار تکرار اجرا کردیم. سپس به محاسبه  $P_L$  و  $T$  پرداختیم. شکل‌های ۱۳ و ۱۴ به ترتیب نتایج  $P_L$  و  $T$  پروتکل I-IRSA را با فرض IC مبتنی بر SINR در دو حالت تئوری و شبیه‌سازی نشان می‌دهند. توزیع درجه‌ها، توزیع‌های  $\Lambda(x)$  بدست آمده در جدول ۲ هستند. مقادیر تئوری از روابط ۲۱، ۲۲ و ۲۳ محاسبه شده‌اند و پارامترهای مورد نیاز برای یافتن این مقادیر نیز طبق بخش ۵ مقادیر شده‌اند. در نمودار رنگ قرمز  $L = \{3\text{dBm}\}$ ، در نمودار مشکی  $L = \{3\text{dBm}, 6\text{dBm}\}$  و در نمودار سبز  $L = \{3\text{dBm}, 6\text{dBm}, 7.78\text{dBm}\}$  در نظر گرفته شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در شبیه‌سازی نیز مانند تئوری  $\Lambda_3$  از  $\Lambda_2$  و همچنین  $\Lambda_2$  از  $\Lambda_1$  نظر  $P_L$  و  $T$  دارای عملکرد بهتری است و این صحت تحلیل‌های انجام شده را نشان می‌دهد.

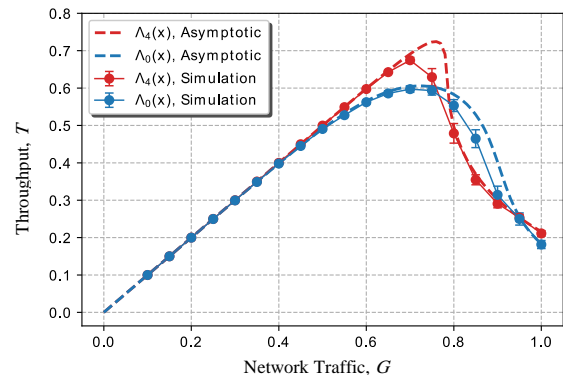


شکل ۱۰- مقادیر گذردهی در پروتکل I-IRSA با فرض استفاده از IC مبتنی بر برخورد، مقادیر مختلف  $d_{thr}$  و توزیع درجه‌های جدول ۱.

همچنین به‌منظور مقایسه عملکرد توزیع درجه‌های بدست آمده در این بخش از پژوهش با سایر توزیع‌ها، مقدار تئوری  $T^*$  و  $G^*$  متناظر با  $\Lambda_0(x)$  را برای مقادیر مختلف  $d_{thr}$  در جدول ۱ ذکر کرده‌ایم.  $\Lambda_0(x)$  توزیع درجه بهینه‌ی بدست آمده در [۲] است که با فرض  $d_{max} = 8$  فرآیند IC مبتنی بر برخورد، اما ایده‌ال بودن IC بدست آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود به ازای هر سه مقدار  $d_{thr}$ ، از نظر تئوری مقدار  $T^*$  و  $G^*$  حاصل از توزیع‌های بدست آمده در این مقاله بیشتر از  $\Lambda_0(x)$  است. شکل‌های ۱۱ و ۱۲ به ترتیب مقادیر  $P_L$  و  $T$  پروتکل I-IRSA را در دو حالت شبیه‌سازی و تئوری با فرض IC مبتنی بر تداخل و  $d_{thr} = 4$  نشان می‌دهند. توزیع درجه‌های مورد استفاده  $\Lambda_0(x)$  و  $\Lambda_4(x)$  هستند. بر اساس این دو شکل از نظر شبیه‌سازی نیز توزیع درجه‌های بدست آمده در این بخش دارای عملکرد بهتری نسبت به  $\Lambda_0(x)$  هستند.

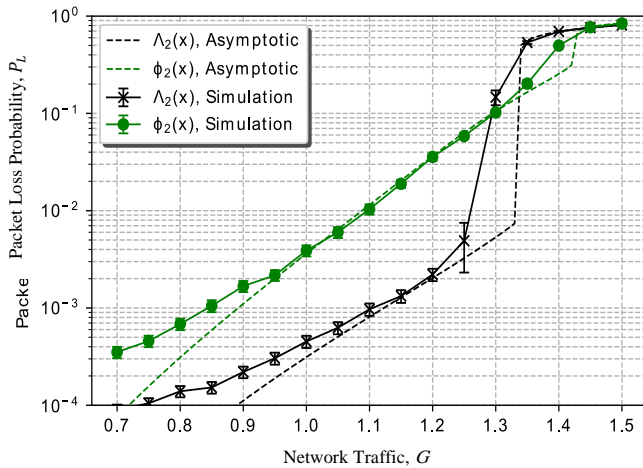


شکل ۱۱- مقایسه‌ی عملکرد  $\Lambda_0(x)$  و  $\Lambda_4(x)$  از نظر احتمال از بین رفتن بسته در پروتکل I-IRSA با فرض IC مبتنی بر برخورد و  $d_{thr} = 4$ .

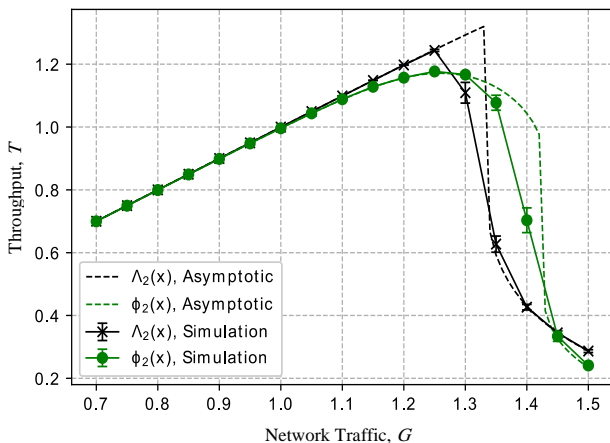


شکل ۱۲- مقایسه‌ی عملکرد  $\Lambda_0(x)$  و  $\Lambda_4(x)$  از نظر گذردهی پروتکل I-IRSA با فرض IC مبتنی بر برخورد و  $d_{thr} = 4$ .

توزیع‌های  $\Lambda(x)$  دارای عملکرد بهتری نسبت به  $\phi(x)$  هستند. این نتایج به دلیل آن است که در طراحی توزیع درجه‌های  $\phi(x)$  موضوع غیرایده‌ال بودن IC در نظر گرفته نشده است. بنابراین در شرایطی که فرآیند IC غیرایده‌ال اجرا شود استفاده از این توزیع درجه‌ها موجب کاهش گذردهی و افزایش احتمال از بین رفتن بسته‌ها می‌شود.

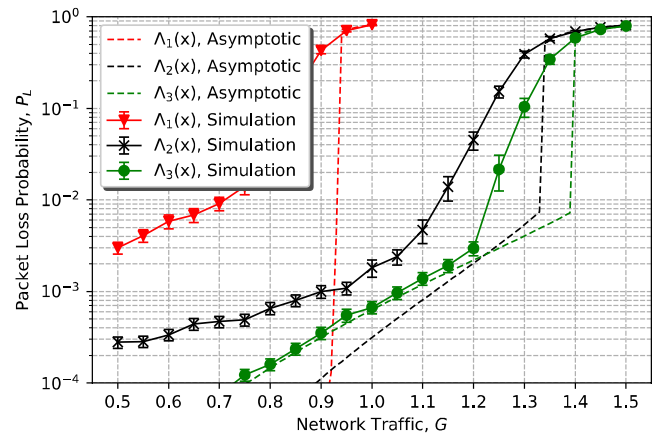


شکل ۱۳- مقایسه عملکرد  $\Lambda_2(x)$  و  $\phi_2(x)$  از نظر احتمال از بین رفتن یک بسته در پروتکل I-IRSA با فرض IC مبتنی بر SINR،  $n=10^3$ ،  $\alpha=0.05$ ،  $P_{noise}=0\text{dB}$ ،  $L=\{3\text{dBm}, 6\text{dBm}\}$ ،  $I_{max}=20$ ،  $\gamma=0\text{dB}$ .

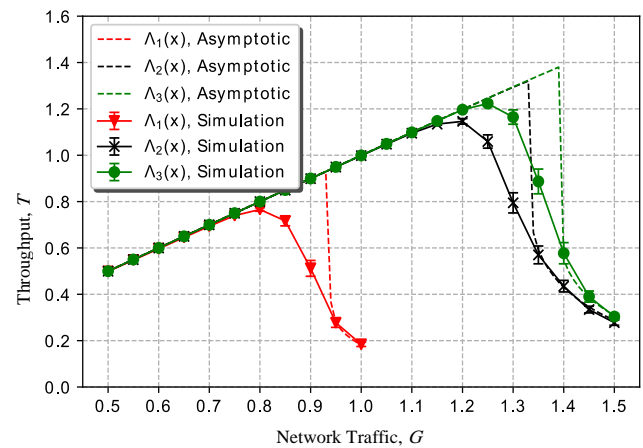


شکل ۱۴- مقایسه عملکرد  $\Lambda_2(x)$  و  $\phi_2(x)$  از نظر گذردهی پروتکل I-IRSA، با فرض IC مبتنی بر SINR،  $P_{noise}=0\text{dB}$ ،  $I_{max}=20$ ،  $\gamma=0\text{dB}$ ، SINR،  $\alpha=0.05$ ،  $n=10^3$ ،  $L=\{3\text{dBm}, 6\text{dBm}\}$ .

طبق بررسی‌های انجام شده در صورتی که مقدار  $\gamma$  برابر با کمترین توان در نظر بگیریم؛ کاهش بسیاری در مقدار  $T^*$  خواهیم داشت. به‌عنوان مثال اگر به‌جای  $\gamma=0\text{dB}$ ،  $\gamma=3\text{dB}$  در نظر گرفته شود، بهترین توزیع درجه بدست آمده برای  $L=\{3\text{dBm}, 6\text{dBm}\}$  و  $\alpha=0.05$  برابر  $0.3192x^7 + 0.6808x^8$  است که دارای  $T^*=0.46$  است. حتی با کاهش مقدار  $\alpha$  به  $0.01$  نیز تغییر چندانی در مقادیر  $T^*$  توزیع درجه بهینه بدست آمده ایجاد نخواهد شد. توزیع درجه بهینه با فرض  $\alpha=0.01$  برابر  $0.294x^6 + 0.1645x^7 + 0.5415x^8$  و دارای  $T^*=0.47$  است. بنابراین در شرایطی که فرآیند IC غیرایده‌ال باشد، نیاز به طراحی و استفاده از آشکارسازهایی است که امکان کدگذاری در مقادیر کم  $\gamma$  را نیز داشته باشند.



شکل ۱۵- مقادیر  $P_L$  بدست آمده در پروتکل I-IRSA با فرض IC مبتنی بر SINR، استفاده از توزیع درجه‌های موجود در جدول ۲،  $P_{noise}=0\text{dB}$ ،  $\alpha=0.05$ ،  $n=200$ ،  $i_{max}=500$ ،  $I_{max}=20$ ،  $\gamma=0\text{dB}$ .



شکل ۱۶- مقادیر گذردهی بدست آمده در پروتکل I-IRSA با فرض IC مبتنی بر SINR، استفاده از توزیع درجه‌های موجود در جدول ۲،  $P_{noise}=0\text{dB}$ ،  $\alpha=0.05$ ،  $n=200$ ،  $i_{max}=500$ ،  $I_{max}=20$ ،  $\gamma=0\text{dB}$ .

در ادامه به مقایسه عملکرد توزیع درجه‌های بدست آمده در این بخش با سایر توزیع‌ها می‌پردازیم. به‌همین منظور با فرض IC مبتنی بر SINR و ایده‌ال بودن این فرآیند، توزیع درجه بهینه را به ازای  $k=1, 2, 3$  و مقادیر توان مربوطه بدست آوردیم. این توزیع‌ها در جدول ۲ با نماد  $\phi(x)$  مشخص شده‌اند. نحوه یافتن این توزیع درجه‌ها بر اساس [۱۲] است که در بدست آوردن آن‌ها از روابط ۱۵، ۱۶ و ۱۷ استفاده شده است. همچنین در این سناریو پارامترهای  $gen_{max}$  و  $i_{max}$  را برابر ۵۰۰ در نظر گرفتیم. همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود توزیع درجه‌های  $\Lambda(x)$  از نظر تئوری دارای مقادیر  $T^*$  و  $G^*$  بیشتری نسبت به  $\phi(x)$  هستند و میزان بهبود ایجاد شده در گذردهی به‌طور متوسط برابر ۲۰٪ است. شکل ۱۵ مقدار تئوری و همچنین شبیه‌سازی  $P_L$  را برای پروتکل I-IRSA با فرض IC مبتنی بر SINR نشان می‌دهد. توزیع درجه‌های مورد استفاده  $\Lambda_2(x)$  و  $\phi_2(x)$  هستند. بر اساس این شکل  $\Lambda_2(x)$  میزان  $P_L$  کمتری نسبت به  $\phi_2(x)$  دارد. به‌عنوان مثال اگر در نمودار شبیه‌سازی مقدار  $10^{-3}$  را برای  $P_L$  در نظر بگیریم، در صورت استفاده از  $\Lambda_2(x)$  برای  $G \leq 1.1$  و در صورت استفاده از  $\phi_2(x)$  برای  $G \leq 0.85$  مقدار  $P_L$  کمتر از  $10^{-3}$  را خواهیم داشت. شکل ۱۶ نیز مقدار گذردهی بدست آمده را برای سناریوی بیان شده نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در حالت شبیه‌سازی بیشترین گذردهی قابل حصول با استفاده از  $\Lambda_2(x)$  تقریباً به مقدار ۷٪ بیشتر از  $\phi_2(x)$  است. بنابراین از نظر شبیه‌سازی نیز

## ۶- نتیجه گیری

در این مقاله عملکرد پروتکل IRSA را در شرایطی که فرآیند حذف تداخل به صورت غیرایده‌ال اجرا شود مورد تحلیل و بررسی قرار دادیم. در تحلیل‌های انجام شده، برای حذف تداخل دو مدل مختلف حذف تداخل مبتنی بر برخورد و حذف تداخل مبتنی بر معیار SINR را در نظر گرفتیم. اجرای غیرایده‌ال حذف تداخل در پروتکل IRSA منجر به افت شدید عملکرد شبکه می‌شود. به منظور پیشینه کردن گذردهی و آستانه‌ی بار ترافیکی ( $G^*$ ) در حضور این شرایط، تغییرات لازم در نحوه‌ی بدست آوردن  $G^*$  و روابط تحلیلی مربوط به احتمال از بین رفتن یک بسته و گذردهی اعمال شد. سپس با تعریف یک مسئله‌ی بهینه‌سازی و استفاده از روابط تحلیلی بدست آمده به عنوان تابع هدف، توزیع درجه‌ی بهینه‌ی مربوط به تعداد کپی‌های ارسالی کاربران را بدست آوردیم. این کار را برای هر یک از دو مدل حذف تداخل مبتنی بر برخورد و حذف تداخل مبتنی بر SINR به صورت مجزا انجام دادیم. در مدل اول یکی از پارامترهای در نظر گرفته شده در بهینه‌سازی، آستانه‌ی درجه‌ی اولیه یک شیار ( $d_{thr}$ ) است. بر اساس نتایج بدست آمده، مقادیر مختلف  $d_{thr}$  منجر به ایجاد توزیع درجه‌های کاملاً متفاوتی می‌شود. همچنین با افزایش  $d_{thr}$  گذردهی شبکه افزایش و احتمال از بین رفتن بسته‌ها کاهش می‌یابد. در مدل دوم نیز نتایج نشان می‌دهد مجموعه مقادیر توان‌های متفاوت باعث ایجاد توزیع درجه‌های متفاوتی می‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که در صورت اجرای غیرایده‌ال حذف تداخل، برای حفظ کارایی شبکه مکانیزم ارسال بسته‌ها باید متناسب با مجموعه مقادیر توان‌ها طراحی شود. توزیع درجه‌های بدست آمده و به طور کلی تحلیل‌های انجام شده در این مقاله می‌توانند جهت کاهش اثر حذف تداخل غیرایده‌ال بر عملکرد شبکه‌های 5G مورد استفاده قرار گیرند.

## ۷- مراجع

- [1] H. Lin, "Studies on Power Allocation for Multiple Access with Successive Interference Cancellation," The University of Electro-Communications, 2016.
- [2] T. Akyildiz and T. M. Duman, "Irregular repetition ALOHA with packet length diversity," 2019 IEEE Glob. Commun. Conf., pp. 1-6, 2019.
- [3] G. Liva, "Graph-Based Analysis and Optimization of Contention Resolution Diversity Slotted ALOHA," IEEE Trans. Commun., vol. 59, no. 2, pp. 477-487, 2011.
- [4] G. L. Choudhury and S. S. Rappaport, "Diversity ALOHA-A Random Access Scheme for Satellite Communications," IEEE Trans. Commun., vol. 31, no. 3, pp. 450-457, 1983.
- [5] E. Casini, R. De Gaudenzi, and O. Del Rio Herrero, "Contention resolution diversity slotted ALOHA (CRDSA): An enhanced random access scheme for satellite access packet networks," IEEE Trans. Wirel. Commun., vol. 6, no. 4, pp. 1408-1419, 2007.
- [6] A. Mengali, R. De Gaudenzi, and C. Stefanovic, "On the Modeling and Performance Assessment of Random Access with SIC," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 36, no. 2, pp. 292-303, 2018.
- [7] T. Nonaka, T. Fujii, O. Takyu, and M. Ohta, "Adapting the number of replicas in the E-IRSA system using the power control," Int. Conf. Inf. Netw., pp. 787-792, 2020.
- [8] A. Zanella and M. Zorzi, "Theoretical Analysis of the Capture Probability in Wireless Systems with Multiple Packet Reception Capabilities," IEEE Trans. Commun., vol. 60, no. 4, pp. 1058-1071, 2012.
- [9] Č. Stefanović, M. Momoda, and P. Popovski, "Exploiting capture effect in frameless ALOHA for massive wireless random access," IEEE Wirel. Commun. Netw. Conf. WCNC, vol. 2, pp. 1762-1767, 2014.
- [10] F. Clazzer, E. Paolini, I. Mambelli, and C. Stefanovic, "Irregular repetition slotted ALOHA over the Rayleigh block fading channel with capture," IEEE Int. Conf. Commun., pp. 1-6, 2017.
- [11] S. Alvi, S. Durrani, and X. Zhou, "Enhancing CRDSA with Transmit Power Diversity for Machine-Type Communication," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 67, no. 8, pp. 7790-7794, 2018.

- [12] X. Shao, Z. Sun, M. Yang, S. Gu, and Q. Guo, "NOMA-Based Irregular Repetition Slotted ALOHA for Satellite Networks," IEEE Commun. Lett., vol. 23, no. 4, pp. 624-627, 2019.
- [13] X. Chen, R. Jia, C. Zhong, D. Wing, K. Ng, and Z. Zhang, "Massive Access in the Presence of Imperfect Successive Interference Cancellation," 2018 10th Int. Conf. Wirel. Commun. Signal Process., pp. 1-6, 2018.
- [14] Q. Lin and M. A. Weitnauer, "Practical Residual Interference after Cancellation for Constant Envelope Modulation with Data-Aided Synchronization," IEEE Access, vol. 6, pp. 69230-69241, 2018.
- [15] K. Zidane, J. Lacan, M. L. Boucheret, and C. Poulliat, "Improved channel estimation for interference cancellation in random access methods for satellite communications," 7th Adv. Satell. Multimed. Syst. Conf. 13th Signal Process. Sp. Commun. Work., pp. 73-77, 2014.
- [16] K. Zidane et al., "Effect of residual channel estimation errors in random access methods for satellite communications," IEEE Veh. Technol. Conf., pp. 1-5, 2015.
- [17] M. G. Luby, M. Mitzenmacher, and M. A. Shokrollahi, "Analysis of random processes via And-Or tree evaluation," Proc. Annu. ACM-SIAM Symp. Discret. Algorithms, vol. 98, pp. 364-373, 1998.
- [18] A. Stajkic, F. Clazzer, and G. Liva, "Neighbor discovery in wireless networks: A graph-based analysis and optimization," 2016 IEEE Int. Conf. Commun. Work. ICC, pp. 511-516, 2016.
- [19] R. Storn and K. Price, "Differential Evolution - A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces," J. Glob. Optim., vol. 11, no. 4, pp. 341-359, 1997.
- [20] A. Hazra, "Using the confidence interval confidently," J. Thorac. Dis., vol. 9, pp. 4125-4130, 2017.

### زهرا غلامی مقدم مدرک کارشناسی مهندسی

کامپیوتر گرایش نرم‌افزار را از دانشگاه شهید بهشتی تهران و مدرک کارشناسی ارشد خود را در رشته مهندسی کامپیوتر گرایش شبکه‌های کامپیوتری از دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی تهران اخذ



نموده است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان شامل بهینه‌سازی و مدل‌سازی ریاضی، ارتباطات ماشین به ماشین و دسترسی انبوه در شبکه‌های نسل پنجم است. آدرس پست الکترونیکی ایشان عبارت است از:

zahra.gholami@email.kntu.ac.ir

### عبدالرسول قاسمی مدرک کارشناسی

خود را از دانشگاه صنعتی اصفهان و مدرک کارشناسی ارشد و دکتری خود را از دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران در رشته مهندسی برق - الکترونیک اخذ نموده و هم‌اکنون دانشیار دانشکده مهندسی کامپیوتر



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان شامل علوم شبکه و کاربردهای آن در مهندسی، شبکه‌های کامپیوتری و مخابراتی، سیستم‌های پیچیده، کاربرد بهینه‌سازی و نظریه بازی‌ها در شبکه و ارزیابی کارایی سیستم‌های کامپیوتری است. آدرس پست الکترونیکی ایشان عبارت است از:

arghasemi@kntu.ac.ir

- 
- <sup>1</sup> Machine 2 Machine
  - <sup>2</sup> Time Slot
  - <sup>3</sup> Interference
  - <sup>4</sup> Diversity Slotted ALOHA
  - <sup>5</sup> Contention Resolution Diversity Slotted ALOHA
  - <sup>6</sup> Interference Cancellation
  - <sup>7</sup> Irregular Repetition Slotted ALOHA
  - <sup>8</sup> Collision
  - <sup>9</sup> Interference
  - <sup>10</sup> Threshold
  - <sup>11</sup> Capture Effect
  - <sup>12</sup> Fading
  - <sup>13</sup> Transmit power diversity
  - <sup>14</sup> Imperfect-IRSA
  - <sup>15</sup> Additive White Gaussian Noise
  - <sup>16</sup> User node
  - <sup>17</sup> Asymptotic
  - <sup>18</sup> Differential Evolution
  - <sup>19</sup> Base station

## Designing an optimal mechanism for sending packets in Slotted ALOHA networks with imperfect interference cancellation

Zahra Gholami Moghadam<sup>1</sup>, Abdorasoul Ghasemi<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Faculty of Computer Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

---

### Abstract

IRSA protocol efficiently manages user accesses in machine-to-machine communications. The main idea of this protocol is to send several copies of each packet and employing the interference cancellation process at the receiver. In previous studies, the optimal degree distribution has been extracted by assuming perfect interference cancellation. In practice, the interference cancellation is not perfect, and after decoding a packet, the receiver could not remove its effect and the corresponding copies from the frame. The imperfect interference cancellation decreases the network throughput. In this paper, we consider two different models of interference cancellation that are different in the required criteria for decoding. We then maximize the IRSA's throughput for these two models by assuming imperfect interference cancellation. In this regard, we derive the packet loss probability for each of the two considered models. Then we deal with the degree distribution optimization corresponding to the number of copies using the obtained analytical relation. The results show that the obtained degree distributions by the proposed method can lead to improvement compared with other distributions, including optimal ones obtained through the assumption of perfect interference cancellation.

**Keywords:** random access, Slotted ALOHA protocol, differential evolution algorithm, capture effect, interference cancellation.