

بازپیکربندی توپولوژی مبتنی بر انتروپی برای بهبود استحکام شبکه‌های پیچیده در برابر خرابی‌های تصادفی و حملات هدفمند

فرشاد صفایی^۱ حسین یگانلو^۲

^۱دانشکده مهندسی و علوم کامپیوتر، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
^۲پژوهشکده علوم کامپیوتر، پژوهشگاه دانش‌های بنیادی (IPM)، تهران، ایران

چکیده

یکی از راهبردهای دفاعی جهت افزایش تاب‌آوری در شبکه‌های تحت حمله، مکانیزم سیم‌بندی مجدد^۱ است که در آن گره‌های آسیب دیده، اتصال خویش را از گره‌های معیوب قطع کرده و با یک احتمال مشخص به گره‌های مناسب دیگری متصل می‌شوند. در این مقاله، یک روش سیم‌بندی مجدد مبتنی بر مفهوم انتروپی شانون^۲ برای اصلاح پیکربندی شبکه‌های پیچیده و به‌منظور افزایش و بهبود تاب‌آوری آن‌ها پیشنهاد گردیده است. استحکام شبکه براساس طیف توزیع درجه، ناهمگنی و نیز متوسط اندازه بزرگترین خوشه هم‌بند در حین حذف گره‌ها با دنباله‌ای از حملات نظام‌مند به مرکزیت‌های درجه، بینیت و نزدیکی دانگالچو^۳ مورد ارزیابی و سنجش قرار داده شده است. رویکرد سیم‌بندی مجدد پیشنهادی به شش شبکه ساختگی و نیز شش شبکه دنیای واقعی اعمال گردیده و نشان داده شده است که از طریق حدوداً ۳۰٪ جابه‌جایی پیوندها می‌توان به بهبود چشمگیری در استحکام و تاب‌آوری کلی شبکه‌ها دست یافت.

کلمات کلیدی: شبکه‌های پیچیده، استحکام شبکه، انتروپی شانون، سیم‌بندی مجدد لبه، بهینه‌سازی شبکه و شبکه پیاوراه^۴.

۱- مقدمه

شبکه ارتباطی امری حیاتی محسوب می‌شود؛ بدین سیاق، موضوع استحکام و تاب‌آوری شبکه‌ها اهمیت به‌سزایی در زمینه پژوهش شبکه‌های پیچیده و اجتماعی دارد. با افزایش روزافزون شبکه‌های کامپیوتری و استفاده از این شبکه‌ها با اهداف حیاتی، نیاز به استحکام و تاب‌آوری نیز افزایش یافته و به‌ویژه در صورت بروز حملات بدخواهانه^۵ و هدفمند^۶ این اهمیت بیش از پیش افزون می‌گردد.

افزایش تهدید نفوذگرها، خرابی مسیریاب‌ها و امثال آن، پژوهش‌ها در زمینه تاب‌آوری و استحکام شبکه را به مرکز ثقلی در بسیاری از پژوهش‌های اخیر مبدل ساخته و منجر شده که اخیراً کارهای نسبتاً زیادی پیرامون اندازه‌گیری و سنجش استحکام شبکه‌های پیچیده در برابر خرابی‌های تصادفی و حملات هدفمند صورت پذیرد [۴]. دلایل این توجه و نیز انبوه مطالعات در ادبیات پژوهش درباره اهمیت استحکام و تاب‌آوری شبکه‌ها را می‌توان در دو هدف عمده زیر خلاصه کرد:

مطالعه و تحلیل شبکه‌های پیچیده اخیراً بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. این شبکه‌ها در حوزه‌های مختلفی از علم مانند فناوری اطلاعات (WWW و اینترنت) [۱]، جامعه‌شناسی (روابط اجتماعی) [۲]، بیولوژی (شبکه‌های سلولی و پروتئین) [۳] و امثال‌هم مورد استفاده واقع می‌شوند. درک و فهم کارکرد و روابط حاکم بر آن‌ها به یک نیاز ضروری و اساسی بدل شده است؛ زیرا ساختار چنین شبکه‌هایی کارایی آن‌ها را تحت‌الشعاع قرار می‌دهد. برای مثال، توپولوژی شبکه‌های اجتماعی می‌تواند بر فرآیند انتشار اطلاعات و بیماری‌ها اثرگذار باشد.

برای ساخت هر شبکه ارتباطی موفق، جنبه‌های مختلفی را می‌بایست مدنظر قرار داد. بر این اساس می‌توان به عوامل مهمی از جمله هزینه، امنیت، تمامیت، مقیاس‌پذیری و تحمل‌پذیری اشکال اشاره داشت. عامل اخیر به ویژه برای هر

استراتژی‌های حملات نظام‌مند در بخش ۳ شرح داده شده است. بخش ۴ به شرح جزئیات مکانیزم سیم‌بندی پیشنهادی اختصاص دارد. نتایج عددی، شرح جزئیات و تحلیل نتایج شبیه‌سازی در بخش ۵ آورده شده است. سرانجام در بخش واپسین، یعنی ۶، یافته‌های مقاله و نکات مهم آن جمع‌بندی و نتیجه‌گیری شده و همچنین راه‌کارهایی جهت انجام کارهای آتی پیشنهاد گردیده است.

۲- مقدمات

در این بخش، مفاهیم پایه و اصطلاحات مورد استفاده در سراسر این مقاله را معرفی خواهیم کرد. شبکه‌های پیچیده نمایش گراف‌واره از سیستم‌های پیچیده دنیای پیرامون ما هستند و همه جا در سیستم‌های زیستی، بوم‌شناسی، اجتماعی و زیرساخت‌ها حضور دارند. بی‌تردید استفاده از گراف‌ها و شبکه‌ها برای ارائه اسکلتی از سیستم‌های پیچیده سرمشق موفقیت‌آمیزی محسوب می‌شود و چنین نمایش ساده‌ای می‌تواند به نحو موثری تعاملات میان موجودیت‌ها در این قبیل سیستم‌ها را نشان داده و بسیاری از ویژگی‌های ساختاری و دینامیکی موجود در آن‌ها را استخراج کند. آشکارا، در سراسر مقاله حاضر فرض می‌کنیم که شبکه‌ها با گراف‌ها نشان داده می‌شوند و به همین دلیل نیز این دو واژه را به‌جای هم و مترادف با یکدیگر به کار برده‌ایم. خواننده علاقه‌مند برای درک دقیق‌تر و با جزئیات بیشتری از اصطلاحات و نوشت‌گذاری استاندارد درباره موضوعات گراف می‌تواند به کارهای پایه و کلاسیکی مانند باندی و مورتی^۸ [۱۷]، و دیتزل^۹ [۱۸] مراجعه کند.

در این متن ما گراف‌های ساده $G(V, E)$ را که فاقد جهت^{۱۰}، فاقد لبه‌های چندگانه^{۱۱} و فاقد طوقه^{۱۲} هستند ملاحظه می‌کنیم طوری که $V = \{v_i, i = 1, 2, \dots, n\}$ مجموعه رئوس و $E = \{(v_i, v_j), i, j = 1, 2, \dots, n, i \neq j\}$ مجموعه لبه‌ها و $n = |G|$ مرتبه یا اندازه گراف است. در سراسر این مقاله هر کجا یادی از گراف می‌کنیم مقصودمان گراف ساده است مگر آنکه به صراحت خلاف آن را بیان کنیم. $G(n, m)$ مجموعه‌ای از تمام گراف‌هایی است که n راس و m لبه دارند. درجه^{۱۳} d_i راسی مانند v_i عبارت از تعداد لبه‌هایی از آن است که در آن مشارکت دارند. می‌توانیم دنباله^{۱۴} درجه $d = \{d_i, i = 1, 2, \dots, n\}$ را تعریف کنیم که به صورت ترتیبی از شماره‌گذاری مجموعه رئوس ملاحظه می‌گردد. این دنباله را می‌توان با مقدار نیز مرتب کرد که غالباً به شیوه‌ای غیرافزایشی مرتب می‌شود و یک دنباله مرتب درجه را تولید می‌کند.

گراف k -منتظم است هرگاه هر راس واقع در G درجه یکسانی برابر با k داشته باشد. چنانچه هیچ $k \in \mathbb{N}$ وجود نداشته باشد تا G گرافی k -منتظم باشد، آنگاه G نامنتظم^{۱۵} است. تنها یک گراف برای هر ترتیبی وجود دارد که گراف کامل (K_n) نامیده می‌شود و شامل تمامی لبه‌های ممکن است. هر مسیر در گراف، خانواده‌ای از لبه‌های مجاور متوالی است. گراف، هم‌بند نامیده می‌شود هر گاه برای هر زوج v_i و v_j ، مسیری وجود داشته باشد که v_i را به v_j مرتبط سازد؛ در غیر این صورت گراف ناهم‌بند خوانده می‌شود. چون لبه‌ها بدون وزن فرض می‌شوند، فاصله^{۱۶} مسیر واقع بین v_i و v_j در گراف G که با $d_G(v_i, v_j)$ نشان داده می‌شود، عبارت از کوتاه‌ترین مسیر ارتباطی است که بین v_i و v_j قرار دارد. مسیر P را که ارتباط‌دهنده^{۱۷} v_i و v_j در G است ژئودزیک می‌نامیم هرگاه یک مسیر القایی^{۱۸} باشد؛ یعنی فاصله بین v_i و v_j در G دقیقاً با طول مسیر P برابر باشد. قطر گراف G عبارت از بزرگترین فاصله واقع مابین دو راس در G است که با نماد $D(G)$ بیان می‌گردد. هر مجموعه مستقل عبارت از مجموعه‌ای از رئوس است که هیچ زوج گره‌ای یک لبه را تعریف نکنند. ماتریس‌های متعددی را می‌توان با یک گراف مفروض مرتبط دانست و شناخته‌شده‌ترین آن‌ها ماتریس مجاورت $A = [a_{ij}]$ نام دارد که اگر $\exists (v_i, v_j) \in E$ در این صورت $a_{ij} = 1$ و در غیر این صورت $a_{ij} = 0$ است.

• طراحی شبکه‌های جدید از سیستم‌های مناسب و مجتمع، با در نظر گرفتن این که در این شبکه‌ها هم اِشکال^{۱۹} ممکن است روی دهد و هم این که احتمال بروز حملات توسط افراد مَعْرُض وجود دارد.

• حفاظت از شبکه‌های موجود با هدف شناسایی گره‌های مهم و حساس و انجام اقداماتی در جهت کاهش حساسیت آن‌ها و افزایش و بهبود استحکام و تاب‌آوری آن‌ها در برابر حملات تصادفی و هدفمند.

هزینه خرابی‌ها در شبکه‌های ارتباطی یک عامل برجسته است و تقریباً روندی روبه رشد دارد؛ طوری که شدت آن ممکن است گنش‌های اجتماعی ما را به مخاطره بیندازد. اگر چه برخی از جنبه‌های تاب‌آوری شبکه مانند کاربرد تکنیک‌های سیستم‌های تحمل‌پذیر اشکال مطالعه و به‌کار گرفته شده است، با این حال در شبکه‌های اجتماعی و پیچیده‌ای مانند اینترنت کم‌کم شاهد آسیب‌پذیری‌هایی در برابر حملات بدخواهانه و اشتباهات انسانی و گستره‌ای از چالش‌ها و تغییرات محیطی هستیم. به هر رو، به دلیل فقدان ناشی از نگرشی جامع به مسأله تاب‌آوری و استحکام از منظر مدیریتی شاهد راه‌حل‌هایی نامناسب و بعضاً دشوار هستیم.

نشان داده شده که انجام اصلاحات ساده در توپولوژی شبکه و تغییر در الگوی اتصالات گره‌ها از طریق پیوندها را می‌توان به‌عنوان روش کارآمدی برای افزایش استحکام تحت خرابی‌ها و حملات به گره/پیوند نگاه کرد [۵-۸]. بر این اساس مکانیزم‌های مختلفی مانند افزودن یا حذف پیوندها [۹]، سیم‌بندی مجدد یال‌ها [۱۰] و نظایر آن [۱۱-۱۵] در مقالات تحقیقی گزارش شده است. دانستن این نکته که آیا می‌توان یک راه‌برد ساده و کارآمدی را در شبکه به‌کار بست تا با حذف پیوسته مولفه‌هایش توسط حمله‌کننده کم‌کم به نحو موثری قادر به حفظ وضعیت کاری خویش باشد، از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. یکی از راه‌بردهای دفاعی جهت افزایش استحکام در شبکه‌های تحت حمله، الگوریتمی است که توسط گره آسیب دیده اجرا می‌شود. بدین ترتیب که گره مزبور تصمیم می‌گیرد وقتی گره (های) همسایه‌اش مورد حمله قرار گرفته و از دست رفته است، به یکی از گره‌های سالم شبکه متصل گردد. به چنین رویکردهایی معمولاً مکانیزم سیم‌بندی مجدد گفته می‌شود؛ زیرا گره (های) آسیب‌دیده، اتصال خویش را از گره معیوب حذف کرده و با یک احتمال مشخص به گره مناسب دیگری متصل می‌کنند.

به مقوله سیم‌بندی عمدتاً به دو صورت نگاه می‌شود. نگرشی - که رویکرد ما در این مقاله نیز بر همین اساس قرار دارد - به سیم‌بندی به‌عنوان روشی در جهت بهبود تاب‌آوری و افزایش استحکام شبکه نگاه می‌کند. در ادبیات تحقیق، مقالات متعددی با چنین نگرشی، اقدام به سیم‌بندی به‌منظور بهبود استحکام شبکه‌ها کرده‌اند [۲۲-۲۵] که در بخش ۳، یعنی ادبیات تحقیق، مروری بدان‌ها اختصاص یافته است. رویکرد دوم سیم‌بندی در قلمرو نگرشی قرار می‌گیرد که از سیم‌بندی برای تبیین و توصیف شیوه و روند تکامل در شبکه‌ها بهره می‌گیرد. در مقالاتی چند، پژوهشگران مکانیزم سیم‌بندی را به‌عنوان راه‌کاری جهت تبیین مدل رشد و تکامل شبکه‌ها مورد توجه قرار داده‌اند [۶، ۹، ۱۰، ۱۲، ۱۴-۱۶]. چنین نگرشی به سیم‌بندی معمولاً در مواردی کاربرد دارد که اندازه شبکه و تعداد گره‌ها ثابت بوده و افزایشی نمی‌یابد (مانند شبکه مغز، شبکه دوستی در مدارس و امثال آن). تحت تاثیر وضعیت‌های مخاطره‌آمیزی که بدان‌ها اشاره شد، در مطالعه حاضر ما به کمک نظریه اطلاعات شانون، یال‌هایی را از یک شبکه مفروض (اعم از ساختگی و واقعی) گزینش کرده و سپس سیم‌بندی می‌کنیم طوری که جابه‌جایی و تعویض این یال‌ها بتواند مقدار انتروپی را ماکزیمم ساخته و در نتیجه بیشترین تاثیر را در بهبود استحکام شبکه به‌دنبال داشته و در عین حال از پیچیدگی محاسباتی ناچیزی نیز برخوردار باشد.

ادامه مقاله در ۶ بخش سازمان‌دهی شده است. مطالب پیش‌زمینه درباره گراف، تعاریف و مقدمات و نیز انواع مدل‌های مختلف شبکه در بخش ۲ بیان شده است. جنبه‌های مختلف طراحی و تحلیل استحکام شبکه‌ها همراه با انواع

از ویژگی‌های توپولوژیکی و دینامیکی شبکه‌های آپولونین در راستای مدل‌سازی شبکه‌های عصبی مانند کورتکس مغز بهره‌جسته‌اند [۲۳]. ANها به سه دسته قطعی (DAN) [۲۲]، تصادفی (RAN) [۲۳] و تکاملی (EAN) [۲۴] تقسیم‌بندی می‌شوند. این مدل‌ها توسط Zhou و همکارانش [۲۴] معرفی شدند و این مولفان فرمول‌هایی را برای برآورد مرتبه، اندازه، توزیع درجه، ضریب خوشه‌بندی و قطر ارائه داده و استدلال کردند که RANها قادرند تا ویژگی‌های گراف‌های واقعی را از خویش به نمایش بگذارند. RANها را می‌توان با استفاده از یک الگوریتم ساده تکراری تولید کرد و در [۲۵] نشان داده شده که توزیع درجه آن‌ها از مدل قدرت تبعیت می‌کند.

سرانجام، توپولوژی برخی شبکه‌ها به گونه‌ای است که تحت تاثیر محدودیت‌های جغرافیایی قرار می‌گیرد. در این شبکه‌ها، گره‌ها از طریق فاصله فیزیکی از یکدیگر متمایز می‌شوند و بدین ترتیب توانایی آن‌ها در شناسایی وضعیت کل گره‌های شبکه در هر لحظه خاص محدود می‌گردد. واپسین گراف‌های ساختگی که در این مقاله مورد آزمون قرار داده‌ایم به مدل پیشنهادی اوزیک^{۲۲} [۲۶] تعلق دارند که کلاسی از گراف‌های هندسی^{۲۳} (GR) به شمار می‌روند. شبکه‌های RG بدین گونه‌اند که گره‌ها در آن‌ها به شکل تصادفی در فضا توزیع می‌شوند و هر گره تنها به گره‌هایی در همسایگی جغرافیایی خویش اتصال دارد. این شبکه‌ها غالباً برای شبکه‌های سنسور مناسب‌اند و استحکام آن‌ها (یعنی وجود یک نقطه بحرانی، وقوع نقاط کور^{۲۴} یا گره‌های ایزوله در شبکه‌های سنسور) در [۲۷] بررسی شده است. در مدل اوزیک [۲۶]، به هنگام ورود گره جدید، این گره تنها با گره‌هایی تشکیل پیوند می‌دهد که از نظر جغرافیایی در نزدیکی او قرار گرفته باشند. بنابراین، با توجه به این که پیوندها منحصراً به شکل محلی شکل می‌گیرند، پیوندهایی با گستره طولانی ممکن است به دلیل رشد شبکه پدید آیند. مدل اوزیک از $m+1$ گره کاملاً متصل واقع بر محیط یک دایره آغاز می‌شود و در هر گام زمانی یک گره جدید به شکل تصادفی در وسط فاصله بین دو گره قرار داده می‌شود طوری که احتمال انتخاب بازها مساوی باشد. سپس این گره جدید به m نزدیکترین همسایه خود واقع بر محیط دایره متصل می‌گردد و این فرآیند تا رسیدن سیستم به یک اندازه مشخص تکرار می‌شود. اوزیک [۲۶] نشان داده که مدل پیشنهادی او به ساز و کاری جهت تولید و تکامل شبکه‌هایی با ویژگی دنیای کوچک تبدیل می‌شود.

۳- طراحی شبکه‌های مستحکم

هر شبکه در صورتی مستحکم است که حتی پس از حذف بخشی از گره‌ها یا لبه‌ها از آن تا حد امکان از منظر سراسری هم‌بند باقی بماند. تنها عده قلیلی از شبکه‌ها هستند که تاب تحمل در برابر هر دو نوع حمله هدفمند و خرابی تصادفی را دارا هستند. افزایش تهدید نفوذگرها، هکرها، خرابی‌ها در مسیراب‌ها، انتشار ویروس‌ها و اپیدمی‌ها و بروز حملات بدخواهانه و هدفمند، پژوهش‌ها در زمینه تاب‌آوری و استحکام شبکه‌ها و سیستم‌های پیچیده را به مرکز ثقلی در این قبیل پژوهش‌ها بدل ساخته است.

۳-۱- راهبردهای حمله

برای مطالعه آسیب‌پذیری شبکه‌هایی که تحت انواع حملات نظام‌مند قرار دارند، انتخاب رویه‌ای که براساس آن به مولفه‌های شبکه حمله می‌شود از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. هر حمله به شبکه (یعنی حذف مولفه‌ای از آن) ممکن است سطوح مختلفی از آسیب را در ساختار و به تبع آن در عملکرد شبکه ایجاد کند. در این مقاله ما آسیب‌پذیری وارده به شبکه را از نوع حملات نظام‌مند و مولفه

حذف هر راسی مانند $u \in V$ از گراف G را به مثابه یک خرابی/حمله فرض می‌کنیم. در نتیجه، زیر گراف باقیمانده به صورت $G(V \setminus \{u\})$ به دست خواهد آمد و لبه‌های متصل به u نیز از گراف حذف خواهد شد. به محض حذف هر راس، گراف ممکن است به تعدادی مولفه هم‌بند تجزیه گردد که تعداد گره‌های واقع در هر یک از آن‌ها (اندازه مولفه‌های هم‌بند) می‌تواند سنجه مهمی برای ارزیابی عددی استحکام شبکه باشد.

۲-۱- مدل‌های شبکه

در یک شبکه پیچیده، گره‌ها از طریق پیوندها با هم در حال تعامل‌اند و رفتار پیچیده‌ای را از خویش بازتاب می‌دهند که می‌تواند سیستم‌های تکنیکی و زیستی را نتیجه دهند. توپولوژی یا ساختار شبکه پیچیده با روشی معین می‌شود که توسط آن گره‌ها به یکدیگر اتصال می‌یابند. برای مثال، گراف‌های تصادفی کلاسیک اردوش و رینی^{۱۵} که با ER نشان داده می‌شود [۱۹]، از اتصال زوج گره‌هایی از گراف با یک احتمال یکنواخت p ($0 \leq p \leq 1$) ساخته شده‌اند. در مقابل، شبکه‌هایی موسوم به مقیاس-آزاد^{۱۶} (SF) قرار دارند که برخلاف مدل ER که توزیع درجه در آن‌ها از پواسن و به بیانی از نوعی توزیع دموکراتیک درجات گره تبعیت می‌کند، در آن‌ها رفتاری کاملاً متفاوت را شاهد هستیم به گونه‌ای که شبکه‌های SF رفتاری خیلی خودخواهانه را از خود به نمایش می‌گذارند؛ یعنی تعداد قلیلی از گره‌ها (موسوم به هاب) درجات بزرگی دارند در حالی که اغلب گره‌ها از درجات نسبتاً پایینی برخوردارند. به زبان ریاضی، توزیع درجه در این قبیل شبکه‌ها، دنباله‌روی رژیم قدرت^{۱۷} است. اصطلاح SF توصیف‌کننده این واقعیت است که با مقیاس‌بندی درجه با یک عامل ثابت، تغییری در توزیع درجه ایجاد نخواهد شد. شبکه‌های SF به خانواده‌ای تعلق دارند که براساس الگوریتم شناخته‌شده اتصال ترجیحی مدل پیشنهادی باراباشی و آلبرت^{۱۸} [۲۰] تحت نام اختصاری BA ایجاد شده‌اند. مدل BA از گراف هسته کوچکی به اندازه m_0 آغاز شده و به شکل تکراری در هر گام زمانی یک گره جدید برای اتصال به m گره ($1 \leq m \leq m_0$) با احتمالی متناسب با درجه گره‌های موجود وارد شبکه می‌شود. با حال این دیده شده که مدل کلاسیک ER و نیز مدل پیشنهادی BA ممکن است نتوانند برخی از خواص تجربی، اساسی و مهم شبکه‌های واقعی از جمله متوسط درجه کم، ضرایب خوشه‌بندی بالا و متوسط فواصل ژئودزی ناچیز را به خوبی بیان کنند.

دو مورد اخیر به ویژه بازتابی از ویژگی‌های ساختاری شناخته‌شده‌ای موسوم به مدل دنیای کوچک (SW) هستند که توسط واتس و استروگانز (WS) [۲۱] پیشنهاد شد و حاکی از این واقعیت است که اغلب زوج گره‌های شبکه‌های دنیای واقعی تنها از طریق چند گام کوتاه به یکدیگر اتصال می‌یابند. مدل WS با درونیایی بین یک حلقه منتظم آغاز می‌شود که در شیوه‌ای تکراری، هر راس به k نزدیک‌ترین همسایه‌اش متصل می‌شود و در ادامه به شیوه‌ای ساعت‌گرد، راس انتخاب شده و لبه متصل به نزدیکترین همسایه آن به شکل تصادفی با احتمال p سیم‌بندی می‌شود طوری که امکان تشکیل طوقه و لبه‌های چندگانه وجود نداشته باشد. پارامتر p در مدل WS به‌عنوان سطح تصادفی بودن^{۱۹} گراف تعریف شده است.

دسته چهارم از گراف‌هایی که در این مقاله آن‌ها را مورد بررسی قرار داده‌ایم، گراف‌های آپولونین^{۲۰} (AN) نام دارند که به کلاس جالبی از خانواده گراف‌های ماکزیمال مسطح متعلق‌اند و همزمان خواصی مانند خوشه‌بندی بالا، دنیای کوچک بودن، مقیاس-آزاد و پیمانگی^{۲۱} را از خویش به نمایش می‌گذارند [۲۲]. مطالعه و ارزیابی استحکام در شبکه‌های آپولونین امر بایسته‌ای است چرا که فرآیندهای دینامیکی شناخته شده‌ای مانند پروکالوسون، انتشار اپیدمی، همگام‌سازی و گام زدن تصادفی بر روی چنین شبکه‌هایی قابل اعمال بوده و حتی برخی پژوهشگران

در ردهٔ حملات سراسری قرار دارند و در حقیقت تلاش می‌کنند تا با دقت بیشتری گره‌های مهم‌تر را در شبکه یافته و آن‌ها را سریع‌تر نابود کنند.

۴- مکانیزم سیم‌بندی مجدد پیشنهادی

بسیاری از شبکه‌ها در برابر خرابی تصادفی مستحکم‌اند، لیکن حملات مغرضانه تنها با حذف بخش کوچکی از گره‌ها یا لبه‌ها ممکن است به آشفتگی شبکه دامن زند. یک راه حل ساده و سرراست برای اجتناب از آشفتگی و افزایش قابلیت اطمینان و تاب‌آوری شبکه استفاده از روش‌های افزونگی یعنی افزودن لبه‌هایی جدید بین گره‌ها است. افزونگی، بر حضور مولفه‌های موازی و توابعی دلالت دارد که در صورت لزوم می‌توانند جایگزین مولفه یا تابع از دست رفته شوند. بدین ترتیب، با توجه به وجود مسیرهای متعدد بین اغلب زوج‌گره‌ها، شبکه‌ها افزونگی قابل توجهی را در قابلیت‌های خویش جهت هدایت جریان اطلاعات میان گره‌ها به نمایش می‌گذارند. با این همه، عیبی که دامن‌گیر چنین روش‌هایی است این است که افزودن لبه‌های اضافی به شکل چشمگیری به افزایش هزینه‌ها منجر خواهد شد که در بیشتر موارد از دید سرپرستان شبکه پذیرفتنی نیست.

بایستی اذعان داشت که بسیاری از شبکه‌های دنیای واقعی (برای نمونه، شبکه‌های اجتماعی، استنادی^{۳۱} و زیستی) با بازآرایی (سیم‌بندی) پیوندهای بین گره‌هایشان مشخص می‌شوند که نشان‌دهندهٔ ویژگی مهم تکامل آن‌ها در گذر زمان است. در حقیقت، عدهٔ ناچیزی از شبکه‌های مشخصاً طبیعی وجود دارند که پیکربندی آن‌ها در طی زمان ایستا (مانند نیروگاه برق) باشد. بدین ترتیب، مطالعهٔ ویژگی‌های این قبیل شبکه‌ها و آنچه که در طی فرآیند سیم‌بندی روی می‌دهد می‌تواند بسیار حائز توجه باشد. افزودن یا جابجایی پیوندها و ورود گره‌های جدید به شبکه از موارد جالب توجه در تکامل ساختاری شبکه‌ها است. عامل مهم دیگر در فرآیند تکوین شبکه، رویکرد سیم‌بندی است. یعنی به شکل تصادفی پیوندی بین دو گره اختیار شده و سپس این پیوند از سوی یکی از این دو گره حذف و به گره سومی که او نیز به شکل تصادفی یا با یک احتمال مشخص انتخاب می‌شود اتصال می‌یابد. در این بخش، تلاش بر این است که برای یک شبکهٔ موجود و با یک توزیع درجهٔ مفروض، یک روش سیم‌بندی را پیشنهاد دهیم تا به شبکه‌ای با حداکثر بهبود در تاب‌آوری دست یابیم. میزان استحکام در شبکه‌های تحت حملات هدفمند را می‌توان با معیارهای مختلفی محک زد. یکی از مهم‌ترین این معیارها انتروپی شبکه است که می‌توان آن را به‌عنوان درجه‌ای از بی‌نظمی در یک سیستم تعینی تعریف کرد [۳۳]. تعریف دیگری که ریشه در مکانیک آماری دارد، متشکل از تعدادی ریزحالت^{۳۲} است که یک سیستم می‌تواند اختیار کند. تعداد این حالات با معادلهٔ انتروپی بولتزمن^{۳۳} قابل محاسبه است [۳۴].

$$S = k_B \ln W \quad (۴)$$

که در آن S انتروپی، k_B ثابت بولتزمن و W تعداد ریزحالات است. از مکانیک آماری می‌دانیم که رابطهٔ انتروپی برحسب توزیع احتمال، بسیار باورپذیر به‌نظر می‌رسد و عملاً همانند اغلب مسایل آماری، مانند مسایل شبکه، فراگیری بیشتری دارد و به جای شمارش دقیق تعداد حالت‌ها، به یک تابع توزیع از تعداد ریزحالات تبدیل می‌شود. بر این اساس، انتروپی شانون را می‌توان از طریق توزیع احتمال محاسبه کرد [۳۴].

$$S(\Omega, p) = -\sum_{k=1}^{\Omega} p_k \log_2 p_k \quad (۵)$$

که در آن Ω تعداد حالات ممکن سیستم و p_k ، $k=1, 2, \dots, \Omega$ احتمال بودن سیستم در وضعیت k ام است.

شبکه را از نوع گره فرض کرده و به‌عنوان شکلی از حملات هدفمند، حملات تطبیقی مبتنی بر مرکزیت بالا^{۳۵} (HCAA) را انتخاب کرده‌ایم که خود متناظر با خرابی در گره‌هایی با بیشترین استرس در شبکه‌های تحت آزمون است. ما حملات هوشمند را براساس معیارهای مرکزیت گره یعنی درجه، بینیت و نزدیکی دانگالچو^{۳۶} [۲۸] ترتیب داده‌ایم. برای یک $G(n,m)$ مرکزیت درجه عبارتست از نسبت تعداد لبه‌های واقعی گره v_i به ماکزیمم تعداد لبه‌های ممکن متصل به این گره. یعنی [۲۹].

$$C_D(v_i) = d(v_i) / (n-1) \quad (۱)$$

این معیار بیانگر توانایی هر گره در برقراری ارتباط مستقیم با سایر گره‌ها است. بدین ترتیب هر قدر این معیار بیشتر باشد اهمیت گره مزبور نیز بیشتر خواهد بود.

بینیت نیز معیار دیگری برای سنجش مرکزیت یک گره در شبکه است و معمولاً با کسری از کوتاه‌ترین مسیرهای واقع بین زوج گره‌های گذرنده از این گره تعریف می‌شود. برای گراف G با مرتبه n و اندازهٔ m ، مرکزیت بینیت گره v_i که با $C_B(v_i)$ بیان می‌شود عبارتست از [۲۹].

$$C_B(v_i) = \sum_{s \neq v_i \in V} \sigma_{st}(v_i) / \sigma_{st} \quad (۲)$$

به‌قسمی که σ_{st} تعداد کوتاه‌ترین مسیرها بین زوج گره‌های s و t و $\sigma_{st}(v_i)$ عبارتست از تعداد کوتاه‌ترین مسیرهای واقع بین این زوج گره که از گره v_i گذر می‌کند. یکی از معیارهایی که در متون شبکه‌های پیچیده برای بیان میزان اهمیت گره در نظر گرفته می‌شود، مرکزیت نزدیکی است که اهمیت گرهٔ موردنظر را براساس نزدیکی‌ای که به سایر گره‌ها دارد بیان می‌کند. برای مرکزیت نزدیکی یک گره، معیارهای مختلفی از جمله معیار نزدیکی سایدوسی^{۳۷} [۳۰]، معیار نزدیکی فریمن^{۳۸} [۳۱]، معیار نزدیکی لتورا و مارچینوری^{۳۹} [۳۲]، معیار نزدیکی دانگالچو [۲۸] و معیار نزدیکی مانده‌ای^{۴۰} [۲۸] مطرح گردیده است. این معیارها را می‌توان براساس دو رویکرد دقت و کارایی مورد مقایسه قرار داد. معیار نزدیکی فریمن و سایدوسی (در واقع معیار فریمن، معیار نزدیکی سایدوسی نرمال شده است) اصولاً برای برآورد نزدیکی در گراف‌های ناهم‌بند قابل تعریف نیستند و اطلاعاتی را برای مرکزیت نزدیکی گره‌ها در این نوع گراف‌ها به دست نمی‌دهند. این عیب البته در معیار نزدیکی لتورا و مارچینوری [۳۲] وجود ندارد و معیار پیشنهادی آن‌ها را می‌توان با همان پیچیدگی محاسباتی برای محاسبهٔ مرکزیت نزدیکی گره‌ها حتی در گراف‌های ناهم‌بند نیز مورد استفاده قرار داد. برای برقراری مصالحه‌ای بین دقت اندازه‌گیری و کارایی پیچیدگی محاسباتی، در مقالهٔ حاضر از معیار نزدیکی دانگالچو [۲۸] بهره برده‌ایم. بر طبق تعریف مرکزیت نزدیکی گره v_i عبارتست از معکوس مجموع فواصل ژئودزی از گره v_i به سایر گره‌های شبکه [۲۸].

$$C_C(v_i) = \sum_{t \in V, t \neq v_i} 2^{-d_G(v_i, t)} \quad (۳)$$

بدین سیاق در این سه نوع حمله، گره‌ای با بیشترین مرکزیت (درجه، بینیت و نزدیکی دانگالچو) از شبکه حذف می‌شود. نکته مهمی که در پایان این بحث می‌بایست بدان توجه کرد این است که راه‌برد حملات هدفمند مبتنی بر مرکزیت از نوع ترتیبی بوده و با محاسبهٔ مجدد اولویت و اهمیت مولفه‌ها در هر گام از حمله صورت می‌پذیرد؛ یعنی در این نوع حملات، پارامتر مرکزیت گره در هر گام مجدداً محاسبه شده و حمله به شبکه انجام می‌شود. بدین ترتیب، این نوع حملات ترتیبی

درجه‌ای از نوع پواسن دارند در حالی که توزیع درجه در شبکه‌های SF از مدل قدرت پیروی می‌کند و شبکه‌های SW نیز توزیع دو جمله‌ای تعمیم‌یافته برای درجه خویش دارند. بدین ترتیب ما پیکربندی شبکه را برحسب درجه‌گره‌ها در شبکه تعریف می‌کنیم و از مشخصه توزیع درجه گره برای تعریف حالات آن سود می‌جوییم.

در شکل ۱ گام‌های مختلف الگوریتم فرآیند سیم‌بندی مجدد پیشنهادی را براساس شیوه‌ی مونت-کارلو^{۲۵} و با هدف بهبود استحکام شبکه از طریق جابه‌جایی و تعویض لبه‌ها برای حداکثر ساختن مقدار انتروپی شانون و با صرف کمترین تغییر در ساختار شبکه همراه با حفظ هم‌بندی ارائه داده‌ایم. توضیحات کافی برای هر گام در این شکل مشخص شده و تنها نکته‌ای که لازم است بدان توجه کنیم این است که در گام ۲ از مکانیزم سیم‌بندی پیشنهادی، گره‌ای با درجه کمتر را برای انجام فرآیند سیم‌بندی نامزد می‌کنیم. دلیل این امر نیز آن است که همواره سعی داریم تا مینیمم درجه گره‌ها در گراف از مقدار اولیه آن کاهش بیشتری پیدا نکنند. مضافاً مورد مهمی که در سیم‌بندی در هر گام مورد توجه قرار داده‌ایم این است که فرآیند سیم‌بندی منجر به ناهم‌بندی گراف نگردد. این موضوع موردی بوده که حتی در روش‌های متداول و شناخته‌شده سیم‌بندی مانند پیازواره [۳۵] توجهی بدان نشده است. این موضوع را بیشتر در بخش ۵، یعنی نتایج حاصل از شبیه‌سازی، به گفتگو خواهیم نشست.

به‌طور کلی هر مساله (از جمله استحکام) می‌تواند راه‌حل‌های اختصاصی و عمومی داشته باشد و منطقاً راه‌حل‌های اختصاصی برای یک مساله، راندمان بهتری برای همان مساله به ما ارائه خواهد داد. همان‌طور که اشاره شد به دلیل هزینه تغییر درجه در شبکه‌های فیزیکی، مکانیزم‌های سیم‌بندی پیشنهادی مانند پیازواره [۳۵] سعی داشته‌اند علاوه بر استحکام بخشیدن به گراف اولیه، هزینه کمتری را به سیستم تحمیل کنند (با حفظ درجه). با این حال، پرسشی که مطرح می‌شود این است که آیا ویژگی حفظ توزیع درجه در این قبیل روش‌های سیم‌بندی، می‌تواند برای شبکه‌های منطقی نظیر تور^{۲۶}، تورنت^{۲۷} و سایر شبکه‌های رویین^{۲۸} نیز کماکان یک مزیت محسوب شود؟ در چنین شبکه‌هایی به دلیل اتصال منطقی بین گره‌ها یا نظیرها، هزینه سیم‌بندی مجدد ناچیز است و تغییر تعداد پیوندها می‌تواند با سهولت بیشتری انجام پذیرد. البته همچنان محدودیت‌هایی برای تغییر تعداد پیوندها به دلیل محدودیت منابع وجود دارد اما قابل مقایسه با محدودیت‌های غیر منقطع در شبکه‌های فیزیکی نیست. مورد دیگر، بحث هم‌بندی در گراف است.

نکته مهمی که بایسته است در اینجا بدان اشاره کنیم این است که تفسیر انتروپی به هنگام کاربرد آن در تحلیل شبکه‌های پیچیده و به ویژه اجتماعی مناقشه‌برانگیز است. بایستی اذعان داشت که استحکام در شبکه تلویحاً به معنای پذیرش این فرض است که پیوندهای شبکه پویا بوده و بدون هیچ‌گونه محدودیت یا قیدی قادر به تغییر یا تعویض (سیم‌بندی) هستند. برخی شبکه‌ها وجود دارند که بسیار پویا هستند و هیچ محدودیتی در سیم‌بندی ندارند (برای نمونه شبکه دوستی در اینترنت، تلگرام و فیس‌بوک). در نقطه مقابل، شبکه‌هایی نیز وجود دارند که در برابر تغییرات و جابه‌جایی پیوندها از خود مقاومت نشان می‌دهند و به آسانی رویکرد سیم‌بندی را بر نمی‌تابند (مانند شبکه ارتباط اعضای خانواده). بدین ترتیب، این نوع شبکه‌ها تعداد حالات یا پیکربندی‌های ناچیزی داشته و انتروپی پایینی دارند و بر طبق تعریف، از درجه استحکام ناچیزی نیز برخوردارند. از سویی، شبکه‌هایی با بیشینه انعطاف‌پذیری در برابر سیم‌بندی، بیشینه انتروپی را با داشتن تعداد ریز حالات بیشتر کسب می‌کنند.

طبق تعریف، گوئیم یک سیستم در حالت تعادل قرار دارد اگر برای تعداد مفروضی گره، ماکزیمم انتروپی را داشته باشد. تعادل معرف حالتی است که هیچ نیروی پتانسیل رانشی^{۲۹} در شبکه برای تغییر در پیکربندی آن وجود نداشته باشد. در این مقاله تمرکز و توجه ما بر این جنبه از استحکام شبکه‌ها است و سعی در قراردادن شبکه در حالت تعادل به کمک سیم‌بندی با افزایش انتروپی شانون آن را داریم. بدین ترتیب، انتروپی شبکه می‌تواند مشخصات شبکه‌های پیچیده را بهتر پُرتره کند و همچنین مفهوم شبکه‌های متعادل به کمک انتروپی قابل معرفی است و انتروپی می‌تواند یک معیار کمی برای توصیف میزان انحراف شبکه از وضعیت تعادل باشد.

با توجه به مطالب ذکر شده در بالا و براساس تعریف انتروپی در معادله (۵)، برای ارزیابی استحکام شبکه از داده‌های آن به یک تابع توزیع نیازمندیم که بتواند شبکه تحت بررسی را تبیین کند. می‌دانیم که انتروپی شبکه با احتمال قرارگیری شبکه در یک حالت مفروض در ارتباط است. "حالت" در هر سیستم را می‌توان به طرق مختلفی تعریف کرد و در مبحث شبکه نیز گزینه‌های متعددی برای تعریف حالت شبکه وجود دارد که یکی از پرکاربردترین آن‌ها تعداد پیوندهایی است که با یک گره (کشگرها در شبکه‌های اجتماعی) در ارتباط است. این عدد به‌عنوان درجه گره شناخته می‌شود و برای تمامی پژوهشگران فعال در این عرصه شناخته شده است. البته همان‌طور که اشاره شد، تبیین شبکه براساس درجه منجر به اشکال مختلف توزیع‌های احتمال خواهد شد. برای مثال، شبکه‌های ER توزیع

الگوریتم سیم‌بندی: بهبود استحکام شبکه‌های پیچیده براساس انتروپی شانون

ورودی: شبکه تحت آزمون بدون جهت و بدون وزن فرض می‌شود. همچنین، پیوندهای چندگانه و طوقه‌ها مجاز نیستند. هر شبکه حداقل ۱ و حداکثر m ، $n-1$ ، 2 ، \dots ، $m=1$ ، لبه دارد که n اندازه (تعداد گره‌ها) شبکه است. گره‌ها و پیوندها در طی فرآیند سیم‌بندی به شبکه اضافه یا از آن حذف نمی‌شوند. بدین سیاق، فرض بر این است که تعداد گره‌ها و یال‌ها در شبکه ثابت است.

R_{max} : ماکزیمم تعداد دفعات تلاش جهت سیم‌بندی

خروجی: گراف بهینه و مستحکم

شروع

۱- یالی از گراف (ei) را با احتمال یکنواخت از بین تمامی یال‌های موجود در گراف به شکل تصادفی انتخاب می‌کنیم

۲- گره انتهایی (ni) یال انتخاب شده را که درجه کمتری دارد به‌عنوان یک طرف یال جدید در نظر می‌گیریم

۳- از بین سایر گره‌های باقیمانده در گراف، با احتمال متناسب با معکوس درجه، گره‌ای (ni) را انتخاب می‌کنیم

۳-۱. اگر $ni=nj$ باشد، به گام ۳ باز می‌گردیم

۳-۲. اگر بین ni و nj یالی وجود داشته باشد به گام ۳ برمی‌گردیم

۳-۳. بین ni و nj یالی را برقرار کرده و یال ei را حذف می‌کنیم

۴- بررسی شرایط اعتبار مکانیزم سیم‌بندی پیشنهادی

۴-۱. چنانچه در اثر سیم‌بندی شبکه ناهم‌بند شده باشد، روند سیم‌بندی را مُلغی کرده و گراف را به حالت قبل بازمی‌گردانیم

۴-۲. بررسی می‌کنیم ببینیم که آیا پس از انجام سیم‌بندی مقدار انتروپی شانون شبکه افزایشی داشته است یا خیر؛ اگر چنین بود فرآیند سیم‌بندی را لغو کرده و گراف به حالت قبل بازگردانده می‌شود

۵- اگر تعداد دفعات تلاش برای سیم‌بندی به R_{max} نرسیده به گام ۱ باز می‌گردیم

پایان

ساخت شبکه‌های دنیای کوچک [۲۱] در این مقاله، مقدار پارامتر سیم‌بندی تصادفی را دو مقدار 0.3 و 0.65 در آزمون‌های مختلف در نظر گرفته‌ایم. دسته چهارم از گراف‌های مورد بررسی، گراف‌های آپولونین هستند که در این مقاله از مدل RAN [۱۴ و ۲۵] با ۱۰۲۴ گره برای اعمال راه‌برد سیم‌بندی پیشنهادی استفاده کرده‌ایم. با این وجود، بایستی اذعان داشت که مکانیزم پیشنهادی را می‌توان بر روی سایر مدل‌های شبکه آپولونین نیز به کار بست. برای پیاده‌سازی مدل گراف‌های هندسی اوزیک [۲۶] و شباهت هر چه بیشتر گراف تولیدی به مدل BA، پارامتر m در مدل اوزیک را برابر با ۳ در نظر گرفته‌ایم.

۵-۲- مجموعه داده‌های واقعی

در این زیربخش و با هدف نمایش تایید کارایی مکانیزم سیم‌بندی پیشنهادی به شکل تجربی، گروهی از مجموعه داده‌های دنیای واقعی را نیز مورد ارزیابی قرار داده‌ایم. این مجموعه شامل شش مجموعه داده واقعی است که عبارتند از Books about US, Dolphin social network, Zachary's karate club, USA airport transportation, Neural network C. elegans, politics network of 1997 و سرانجام Brain Network که این شبکه‌ها همگی نشان‌دهنده وارپته‌ای از سیستم‌های پیچیده زیستی، اطلاعاتی، اجتماعی و فناورانه هستند. به استثنای شبکه مغز که از [۳۶] استخراج شده، توصیف سایر شبکه‌ها و مشخصات اصلی آن‌ها همراه با مراجع، جهت ارجاع به منابع اصلی، در [۳۷ و ۳۸] آمده است.

در این مقاله تلاش بر این بوده که مکانیزم سیم‌بندی برای مستحکم ساختن گراف طوری انجام شود که استحکام گراف بهینه با توجه به درصد سیم‌بندی به میزان قابل قبولی افزایش یابد. به منظور ارزیابی کارایی روش سیم‌بندی پیشنهادی، روش سیم‌بندی پیازواره [۳۵] را نیز پیاده‌سازی کرده و نتایج حاصل از آنرا با نتایج حاصل از روش سیم‌بندی پیشنهادی مقایسه کرده‌ایم. رویه کلی شبیه‌سازی بدین شرح است که ابتدا یک گراف (ساختگی یا واقعی) به عنوان ورودی به الگوریتم سیم‌بندی (شکل ۱) داده می‌شود. سپس تا سقف ۳۰٪ تعویض و جابجایی لبه بر روی گراف انجام می‌شود؛ با این حال می‌توان درصد سیم‌بندی را به طور دلخواه به بیش‌تر/کم‌تر از این مقدار نیز افزایش/کاهش داد. در هر گام از سیم‌بندی، در صورت ناهمبند شدن گراف تغییرات انجام شده در گام مزبور مغلغلی شده و مجدداً برای انجام سیم‌بندی تلاش می‌شود.

تعداد تلاش‌های صورت گرفته برای سیم‌بندی گراف حداکثر ۲۰۰۰ گام فرض شده است. دلیل این امر به خاطر آن بوده است که بتوان فرآیند اجرای مکانیزم سیم‌بندی را تحت کنترل درآورد. بدین ترتیب در صورتی که ۳۰٪ از کل یال‌ها تعویض شده باشند، حتی اگر الگوریتم هنوز به گام ۲۰۰۰ نرسیده باشد، فرآیند سیم‌بندی خاتمه پیدا می‌کند. از سویی، برای پیشگیری از افتادن الگوریتم در حلقه نامتناهی، چنانچه تعداد گام‌های اجرایی به ۲۰۰۰ رسیده اما درصد تعویض لبه‌ها به ۳۰٪ نرسیده باشد، در این حالت نیز الگوریتم متوقف خواهد شد. در شکل‌های ۲ و ۳ به ترتیب توپولوژی اولیه شبکه‌های ساختگی و واقعی (ori*) را همراه با توپولوژی‌های بهینه‌ترین شبکه‌ها (opt*) با استفاده از روش سیم‌بندی پیشنهادی برای ۵٪، ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ از سیم‌بندی کل یال‌های گراف بدون اعمال هیچ‌گونه حمله هدفمند به تصویر کشیده شده است. هر چند در نگاه اول ممکن است شکل شبکه‌های بهینه مشابه به نظر آید، آن‌ها واقعاً از منظر خواص آماری و ساختاری با یکدیگر متفاوت‌اند. این موضوع به تفصیل و در ادامه همراه با ارائه نتایج شبیه‌سازی مورد بررسی و تحلیل قرار خواهد گرفت.

همچنین، در شکل‌های ۳ و ۴ توزیع درجه گره‌ها برای شبکه‌های مختلف به تصویر کشیده شده است. هر توزیع درجه حاصل متوسط‌گیری از ۱۰۰۰ نمونه از

آنچه در الگوریتم مربوط به تولید گراف‌های پیازواره ارائه گردیده مطلقاً اشاره‌ای به حفظ هم‌بندی گراف تولید شده بهینه ندارد. بنابراین، مجموعه جواب‌های حاصل از الگوریتم (با توجه به اینکه تنها معیار پذیرش در هر گام از سیم‌بندی مبتنی بر اندازه بزرگترین مولفه است) شامل پاسخ‌های شبکه ناهمبند نیز می‌شود. با این حال، می‌توان یک شرط را برقرار کرد و تنها پاسخ‌هایی را پذیرفت که در آن‌ها شرایط هم‌بندی لحاظ شده باشد، اما در نظر داشتن این قید سبب زمان‌بر شدن فرآیند دستیابی به پاسخ دلخواه نیز خواهد شد. شبکه‌های منطقی معمولاً همواره در حال تغییرند؛ بدین معنا که گره‌ها پیوسته در حال آمد و رفت به شبکه‌اند. بدین ترتیب، در چنین شبکه‌هایی، سرعت رسیدن به پاسخ اهمیت به‌سزایی دارد. به‌منظور حفظ هم‌بندی در گراف بهینه (سیم‌بندی شده) و نیز پیشگیری از نیاز به تکرار الگوریتم، در این مقاله از یک رویکرد حریم‌بانه بهره جست‌ایم. در هر گام از سیم‌بندی پیشنهادی و نیز روش پیازواره، شرط هم‌بندی گراف را سنجیده و در صورت نقض این شرط، فرآیند سیم‌بندی را مغلغلی ساخته‌ایم. با این حال لازم به ذکر است که این رویکرد بخشی از جواب‌های هم‌بند را نیز از خروجی الگوریتم حذف می‌کند.

۵- نتایج تجربی

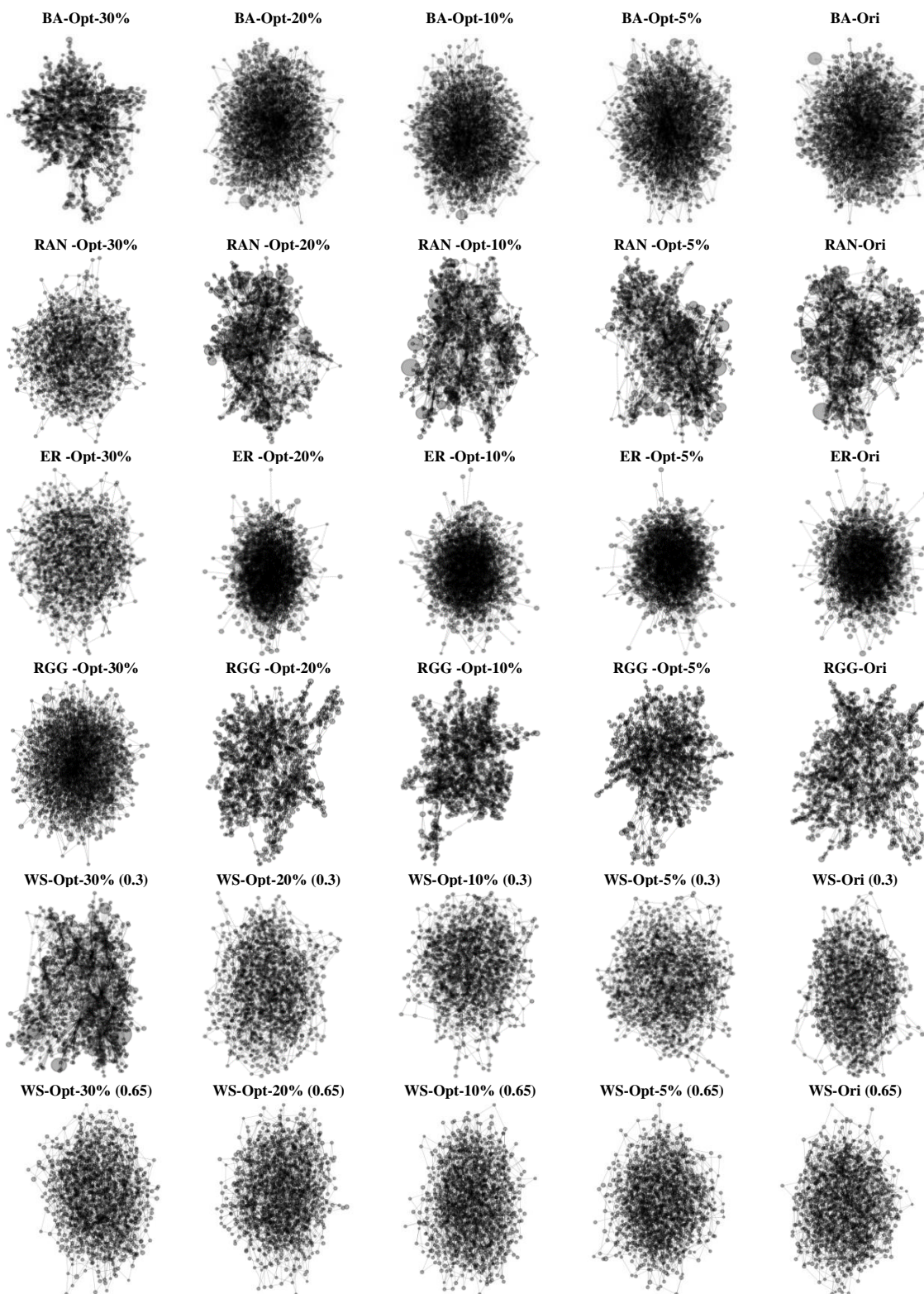
ارزیابی عددی و تجربی مشخصه‌های انواع گراف‌ها به سه بخش تقسیم می‌شود. ما کار را ابتدا با مطالعه مجموعه داده‌های ساختگی و مجموعه داده‌های واقعی آغاز کرده و سپس در بخش دوم، مکانیزم سیم‌بندی پیشنهادی را به هر دو مجموعه اعمال می‌کنیم. در بخش سوم، به‌منظور نمایش توانمندی روش سیم‌بندی پیشنهادی، کارایی استحکام شبکه‌های سیم‌بندی شده را با ترسیم و تحلیل نمودارهای توزیع و طیف درجه و نمودارهای ناهمگنی ارزیابی می‌کنیم. افزون بر این، شبکه‌های سیم‌بندی شده را مورد حملات هدفمند مبتنی بر مرکزیت درجه، بینیت و نزدیکی دانگ‌لچو قرار داده و سپس با متوسط‌گیری بر روی اندازه بزرگترین خوشه هم‌بند در طی حملات، میزان استحکام را برای هر شبکه اندازه‌گیری می‌کنیم. هر اندازه که مقدار این متوسط در برابر حمله مربوطه نرخ کاهش کمتری داشته باشد، گراف تحت آزمون از میزان استحکام بالاتری برخوردار خواهد بود. برای اینکه مقایسه عادلانه باشد، روش سیم‌بندی پیشنهادی را با روش شناخته‌شده پیازواره [۳۵] مقایسه کرده و نتایج را گزارش خواهیم کرد. مضافاً، فرض بر این است که حملات به شکل متوالی اتفاق می‌افتند. بهبود معیار انتروپی روشی است که قصد داریم به کمک آن نشان دهیم که استحکام شبکه صرف‌نظر از نوع راه‌برد حمله، به خوبی قابل اندازه‌گیری است. بدین سیاق، سعی می‌کنیم نشان دهیم که بهبود انتروپی گراف‌های تحت آزمون می‌تواند عیار و محک مناسبی جهت سنجش و برآورد استحکام آن در برابر حملات هدفمند باشد.

۵-۱- مجموعه داده‌های ساختگی

مجموعه داده‌های ساختگی شامل پنج نوع از مدل‌های گراف نمونه است. اولین گراف از این دسته گراف‌های تصادفی کلاسیک اردوش-رینی (ER) است [۱۹]. این شبکه‌ها با اتصال زوج گره‌هایی از گراف با یک احتمال یکنواخت $p=0.5$ ساخته شده‌اند. تعداد گره‌های گراف ER برابر ۱۰۲۴ فرض شده است. دسته دوم شبکه‌های مقیاس-آزاد (SF) هستند. ما اندازه گراف هسته اولیه برای ساخت شبکه را $m_0=4$ فرض کرده‌ایم؛ همچنین در هر گام از ساخت مدل BA [۲۰] هر گره جدیدالورود ۳ یال همراه با خود دارد که با یک احتمالی، که از اتصال ترجیحی [۲۰] تبعیت می‌کند، می‌تواند به گره‌های حاضر در شبکه متصل گردد. برای

باریکی در پایین ترین بخش شکل که بیانگر طیف درجه گره (k) برای انواع تمامی شبکه‌ها است و مشخص می‌کند که گره‌های موجود در گراف از چه تنوع درجه‌ای برخوردارند.

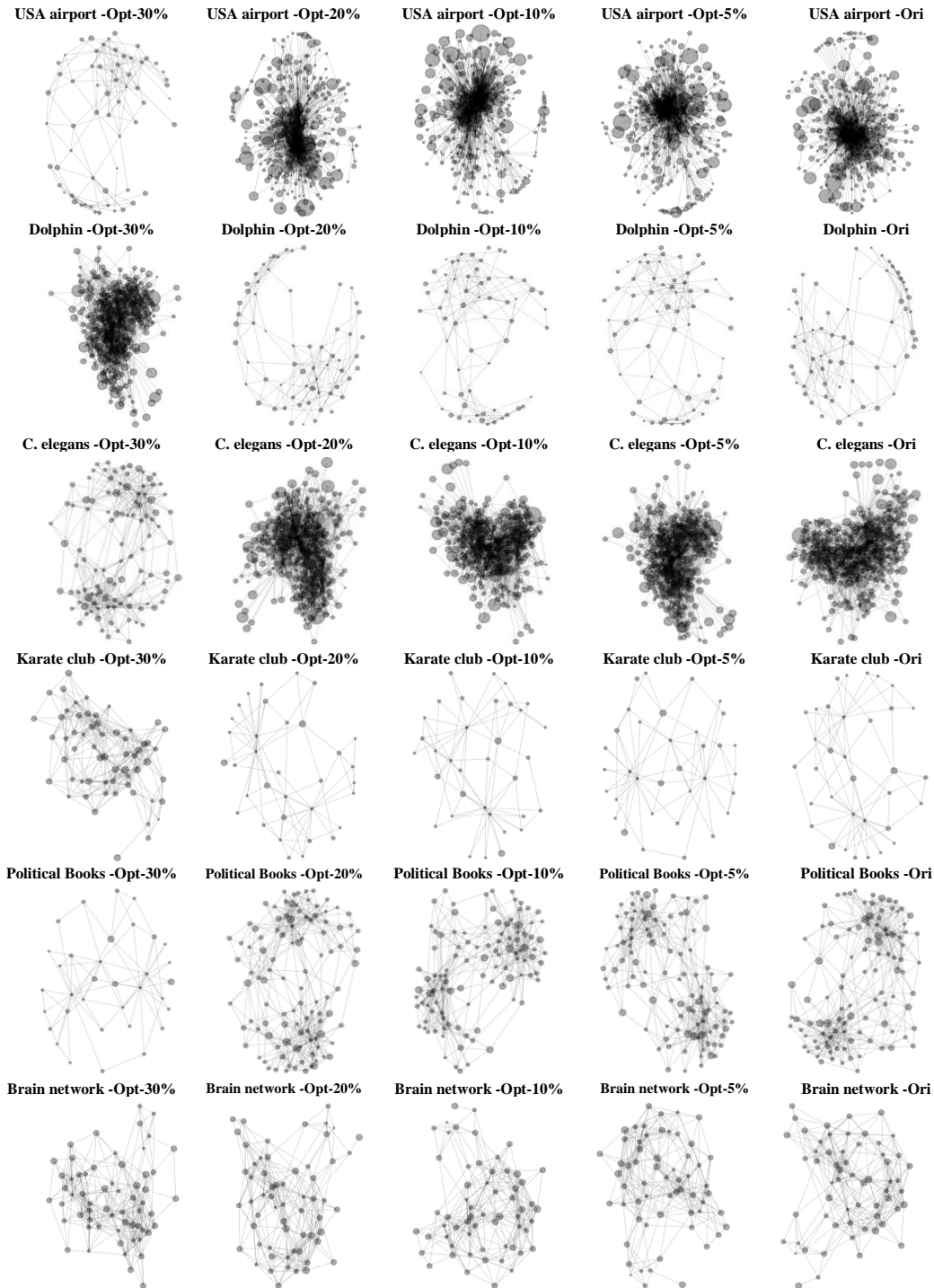
هر گراف تولیدی است. تعداد گره‌های شبکه‌ها به‌طور متوسط برابر با ۱۰۲۴ است. برای هر شبکه سه نمودار تولید شده است: نمودار اصلی توزیع درجه در مقیاس لگ-لگ، نمودار داخلی، همان فراوانی درجه (در مقیاس متعارف) و بالاخره نوار



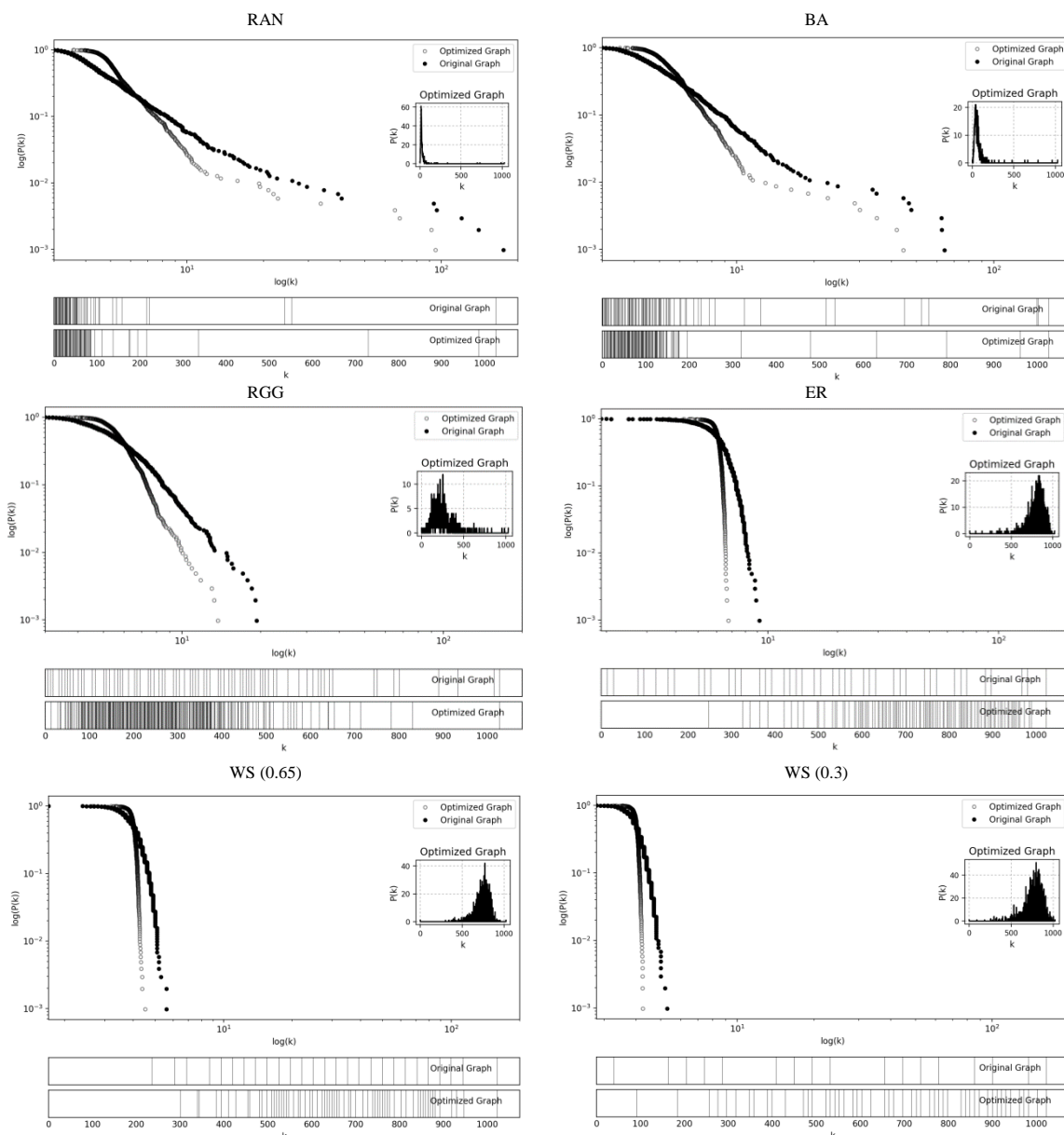
شکل ۲- نمایش توپولوژی شبکه‌های ساختگی فراهم آمده از مدل‌های اردوش-رینی (ER)، آپولونین تصادفی (RAN)، هندسی تصادفی (RGG) مدل اوزیک و واتس-استروگاتس (WS) با احتمال سیم‌بندی 0.3 و 0.65 قبل و بعد از بهینه‌سازی توسط مکانیزم سیم‌بندی پیشنهادی؛ نتایج برای ۰.۵٪، ۱.۰٪، ۲.۰٪ و ۳.۰٪ سیم‌بندی کل لبه‌های شبکه و بدون انجام حمله ترسیم شده‌اند (*-ori بیانگر شبکه اولیه، n%-opt* بیانگر شبکه بهینه پس از n% سیم‌بندی لبه‌ها است)

درجه نگاشت نشود. در [۳۹] از روش مکمل تابع توزیع تجمعی (CDF-1) استفاده و نشان داده شده که رگرسیون خطی در نمودار لگ-لگ یک تخمین‌گر ناریب است. در ترسیم نمودارهای توزیع درجه در شکل‌های ۳ و ۴ و به منظور اجتناب از اثر نویز و مشکل نمونه‌برداری غیریکنواخت گسسته‌سازی^{۳۹} خطی، از روش پیشنهادی در [۳۹] استفاده شده است.

طیف درجه هر گراف مبین میزان ناهمگنی آن گراف است. بدین ترتیب هر قدر میله‌های به نمایش درآمده در طول این نوار پراکنده‌تر و در عین حال چگال‌تر باشند، گراف موردنظر ناهمگن‌تر است. هدف از ترسیم این نمودارها این است که تشخیص دهیم که توزیع درجه در شبکه‌ها از چه رژیم‌های پیروی می‌کند و بدین منظور نیازمند روشی هستیم تا به کمک آن توزیع درجه را به صورت تابعی یک به یک از درجه نشان دهیم تا به ازای هر درجه یکسان، دو مقدار متفاوت برای آن



شکل ۳- نمایش توپولوژی شبکه‌های واقعی، USA airport transportation, Neural network C. elegans, Books about US politics, Dolphin social network, و [۳۷] network of 1997 Brain Network؛ نتایج برای ۵٪، ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ سیم‌بندی کل لبه‌های شبکه و بدون انجام حمله ترسیم شده‌اند (ori*- بیانگر شبکه اولیه، n-opt-%* بیانگر شبکه بهینه پس از n% سیم‌بندی لبه‌ها است)



شکل ۴- توزیع درجه در شبکه‌های ساختگی فراهم آمده از مدل‌های اردوش-رینی (ER)، آپولونین تصادفی (RAN)، هندسی تصادفی (RGG) مدل اوزبک و واتس - استروگاتس (WS) با احتمال سیم‌بندی 0.3 و 0.65 نتایج شبیه‌سازی ۱۰۰۰ بار تکرار شده و طیف درجه (k) برای تمامی انواع شبکه‌ها در دو حالت گراف اولیه و گراف بهینه (با اعمال سیم‌بندی) نشان داده شده است

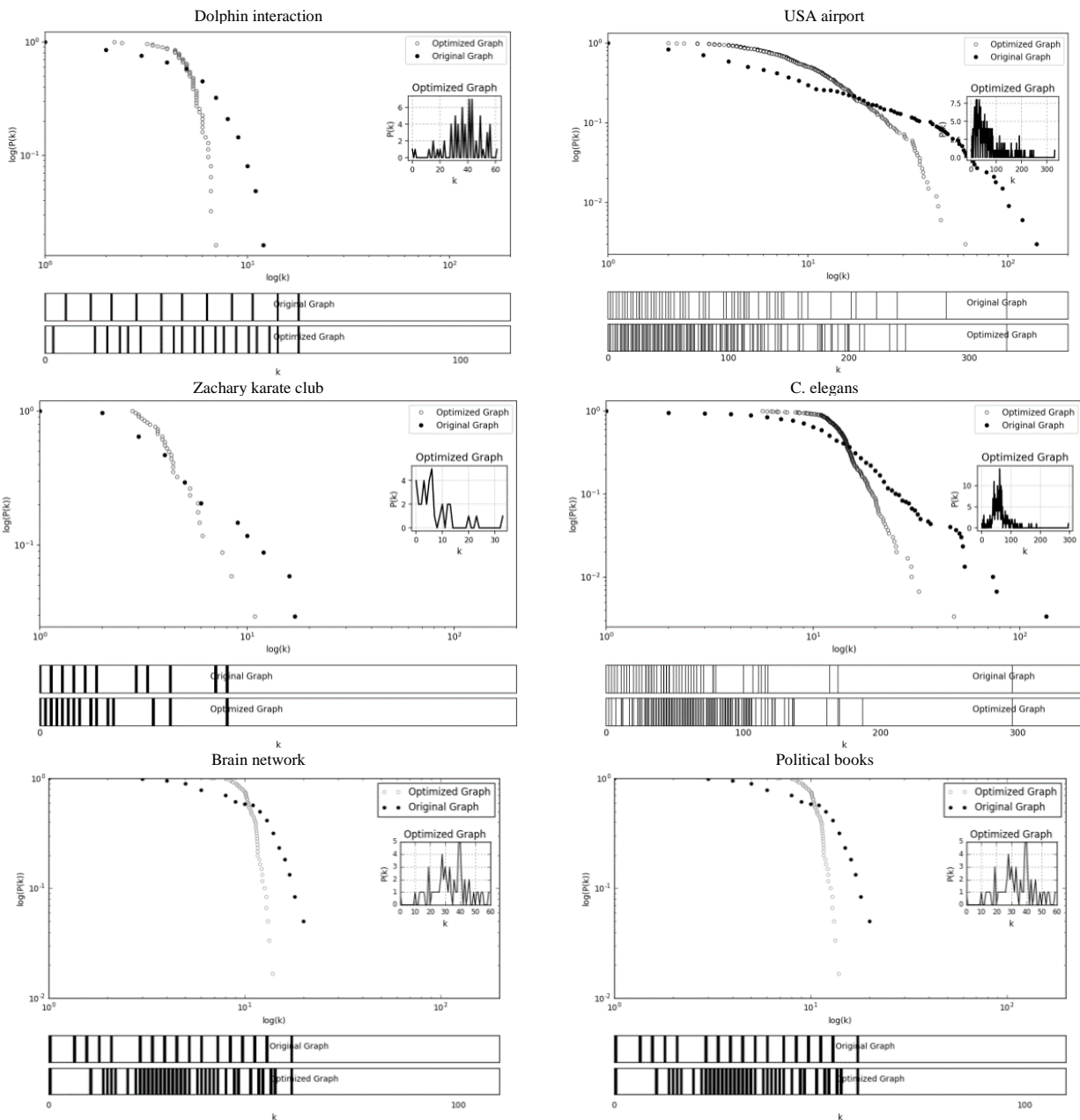
نگاهی به طیف درجه در حالت گراف اولیه و گراف بهینه و مقایسه این دو در می‌یابیم که روش پیشنهادی سعی در به هم نزدیک کردن درجات یا کاهش اختلاف بین k_{min} و k_{max} دارد. به عبارتی، با به کارگیری روش سیم‌بندی پیشنهادی فواصل بین میله‌ها کمتر شده است. این امر منجر به تراکم در طیف درجه گراف و گرایش هر چه بیشتر آن به سوی گراف منتظم (حالت تعادل در پیکربندی) خواهد شد. در حالت ایدئال انتروپی، تنها یک میله خواهیم داشت که همانا به گراف منتظم تعلق دارد.

در پارگراف‌های پیشین ما روند تقریبی توزیع درجه را به میزان استحکام شبکه‌ها مرتبط ساختیم. با این حال، برخی مولفان مانند استرادا [۴۰] به این نکته نیز توجه داشته‌اند که بسیاری از شبکه‌های دنیای واقعی به‌طور کامل از توزیع درجه قدرت پیروی نمی‌کنند؛ بلکه در زمره توزیع‌های دم‌کلفت قرار دارند. بدین ترتیب، واژه‌عام‌تر "دم‌کلفت" برای جهانی‌سازی چنین توزیع‌های درجه‌ای پیشنهاد شده است. در مقاله حاضر، با الهام از کار استرادا، ما ایده مربوط به

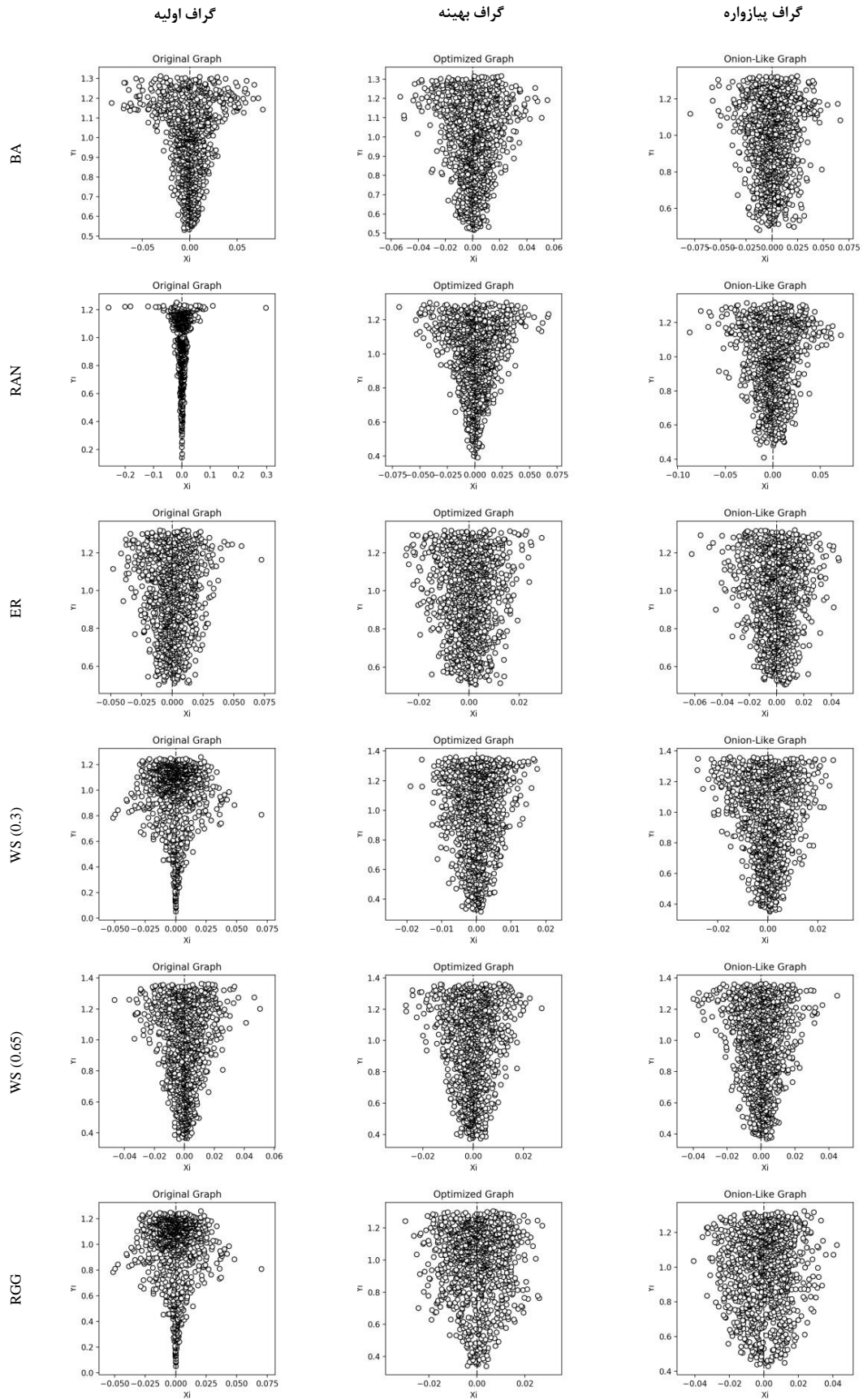
با نگاه به این نمودارها می‌بینیم که روند تقریبی توزیع درجه در هر دو حالت اولیه و حالت بهینه تقریباً برای تمامی شبکه‌های مورد مطالعه یکسان است. البته لازم به ذکر است که منحنی‌ها در گراف بهینه (سیم‌بندی شده) ابتدا شیب کمی دارند اما در انتها با شیب بسیار تندتری از گراف اصلی (بدون اعمال سیم‌بندی) سقوط می‌کنند. دلیل این پدیده نیز از آن‌روست که در مکانیزم سیم‌بندی پیشنهادی به روشی حریصانه عمل شده است؛ یعنی سیم‌بندی پیشنهادی سعی دارد با گرفتن یال‌ها از گره‌هایی با درجه بیشتر (هاب‌ها) و دادن آن به گره‌هایی با درجه کمتر به نوعی مساوات و عدالت را در شبکه برقرار سازد. از سویی، چون ممکن است روش حریصانه در برخی مواقع در انتخاب گره‌ها و تعویض یال‌ها به درستی عمل نکند، در کنار روش حریصانه از معیار انتروپی شانون نیز بهره برده‌ایم تا بدین ترتیب کیفیت فرآیند سیم‌بندی را بهبود بخشیم. لازم به ذکر است که از ترسیم منحنی‌های مربوط به روش‌هایی مانند پيازواره [۳۵] امتناع ورزیده‌ایم چرا که این قبیل سیم‌بندی‌ها در توزیع درجه تغییری ایجاد نمی‌کنند. همچنین، با

هنگامی حادث می‌شود که برخی شبکه‌ها اندازه کوچکی داشته باشند و تعداد نقاط داده برای داشتن یک نیکویی در برازش k^1 از یک توزیع کاندیدا اساساً کافی نباشد. نشان داده شده است که شبکه‌هایی با توزیع درجه دم‌کلفت، ناهمگنی زیادی را از خویش به نمایش می‌گذارند [۴۰]. به عبارت دیگر، اگر شبکه‌ای مانند ستاره خیلی نامنتظم باشد، در برابر خرابی‌های تصادفی بسیار مستحکم و لیکن در برابر حملات هوشمند آسیب‌پذیری فراوانی خواهد داشت. بدین سیاق، بین آسیب‌پذیری و ناهمگنی شبکه همبستگی زیادی وجود دارد و شبکه‌های نامنتظم در قبال خرابی برخی گره‌های خاص جداً آسیب‌پذیرند. از این‌رو، استرادا [۴۰] شاخص نرمال شده‌ای از ناهمگنی را برای چنین شبکه‌هایی پیشنهاد کرده که این شاخص در بازه (0,1) قرار دارد طوری که صفر متناظر با گراف‌های منتظم (گرایش بیشتر به ER) و ۱ متناظر با گراف‌های ستاره است. شاخصی که استرادا از خویش برجای گذاشته ملهم از شاخص رندیج k^2 [۴۱] است.

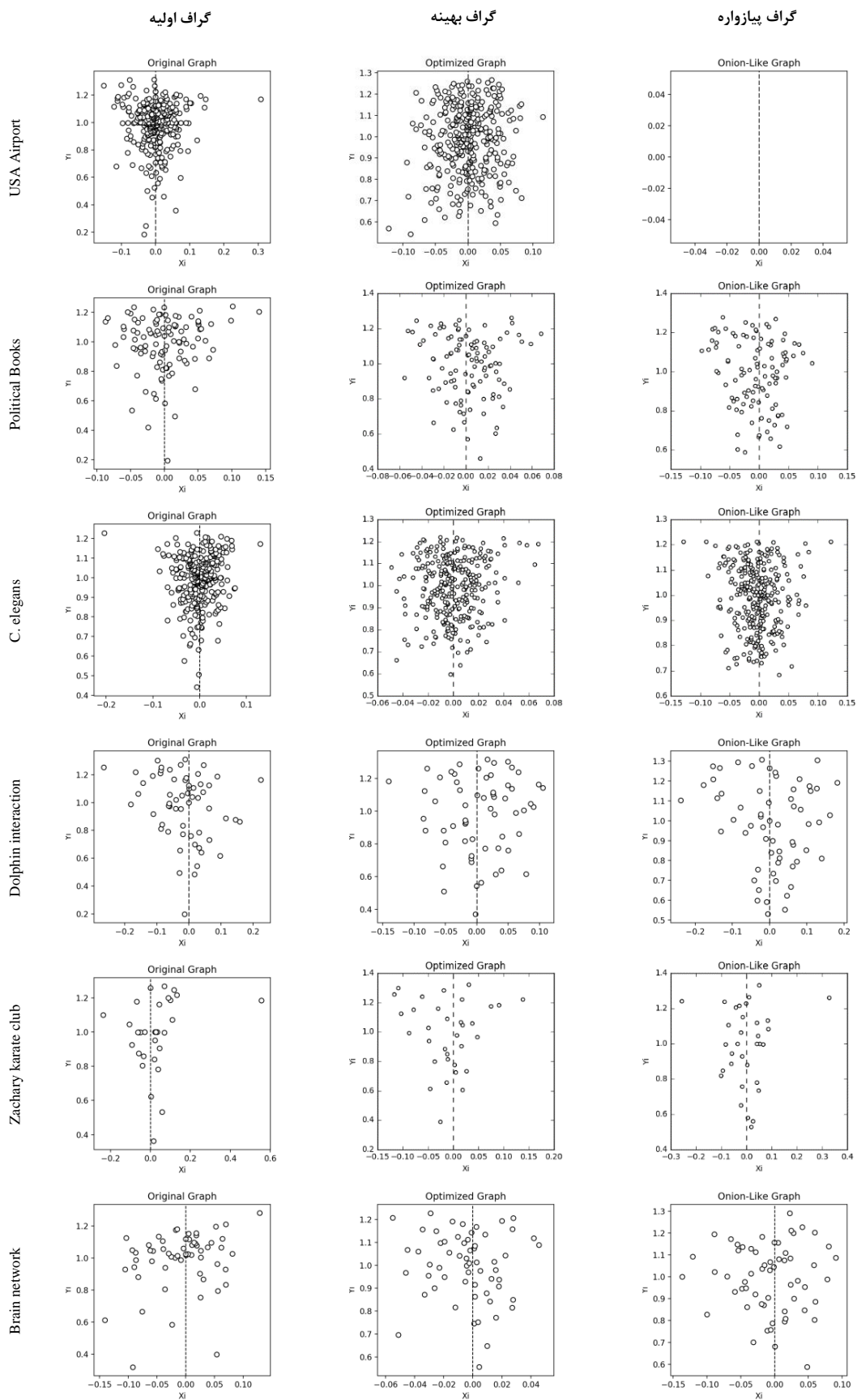
استحکام را بدین صورت مطرح می‌کنیم که هر قدر یک شبکه، توزیع دم‌کلفت‌تری را از خویش نمایش دهد، گره‌هایش در برابر خرابی‌های تصادفی استحکام بیشتری خواهند داشت. برای نمونه، ۸۰٪ از پروتئین‌ها در شبکه تعاملات پروتئین-پروتئین (PPI) دارای تعاملات اندکی هستند [۴۰]؛ یعنی خرابی‌ها، کل سیستم را دچار فروپاشی نمی‌کند. با این حال، یک حمله هدفمند به پروتئین‌هایی با اتصالات بیشتر باعث ناهم‌بندی شبکه به قطعات مجزا شده و کل عملکرد سیستم را دچار اختلال می‌کند. به همین دلیل، برای بیان میزان استحکام این قبیل شبکه‌ها به شاخص بهتر و کارآمدتری به عوض توزیع درجه نیاز هست؛ به بیان دیگر، نمی‌توان به‌مانند شکل‌های ۲ و ۳ و صرف‌انگیز به تحلیل توزیع و طیف درجه استحکام شبکه‌ها نظر داد. در واقع، اختلاف بین توزیع‌های درجه شبکه‌ها گاه بسیار ناچیز است و چندین توزیع درجه مختلف را می‌توان به آن‌ها برازش کرد. مشکل به ویژه



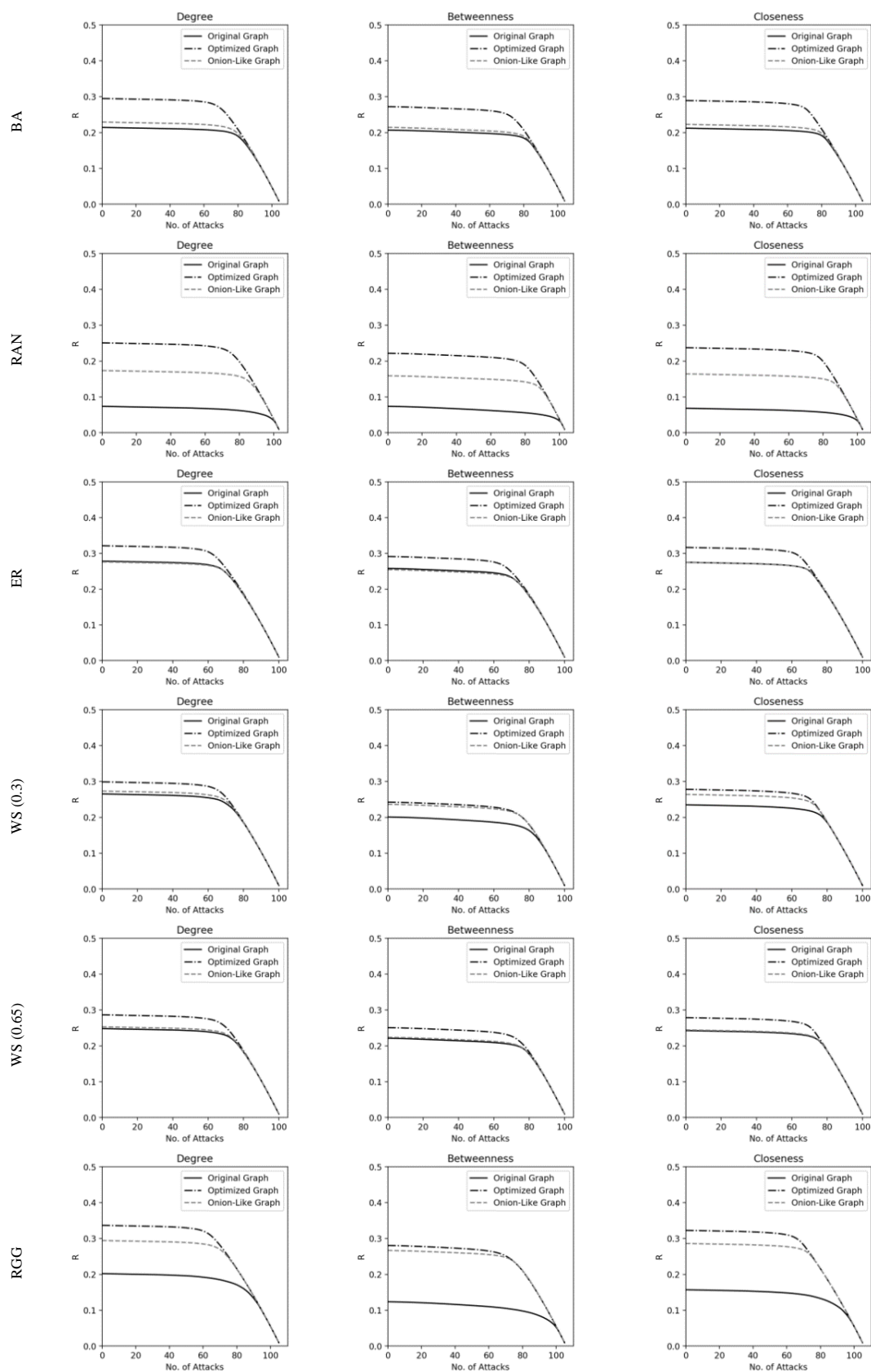
شکل ۵- توزیع درجه در شش شبکه واقعی Zachary's karate club، Dolphin social network، Books about US politics، C. elegans، Neural network، USA، airport transportation network of 1997 و Brain Network؛ نتایج شبیه‌سازی ۱۰۰۰ بار تکرار شده و طیف درجه (k) برای تمامی انواع شبکه‌ها در دو حالت گراف اولیه و گراف بهینه (با اعمال سیم‌بندی) نشان داده شده است



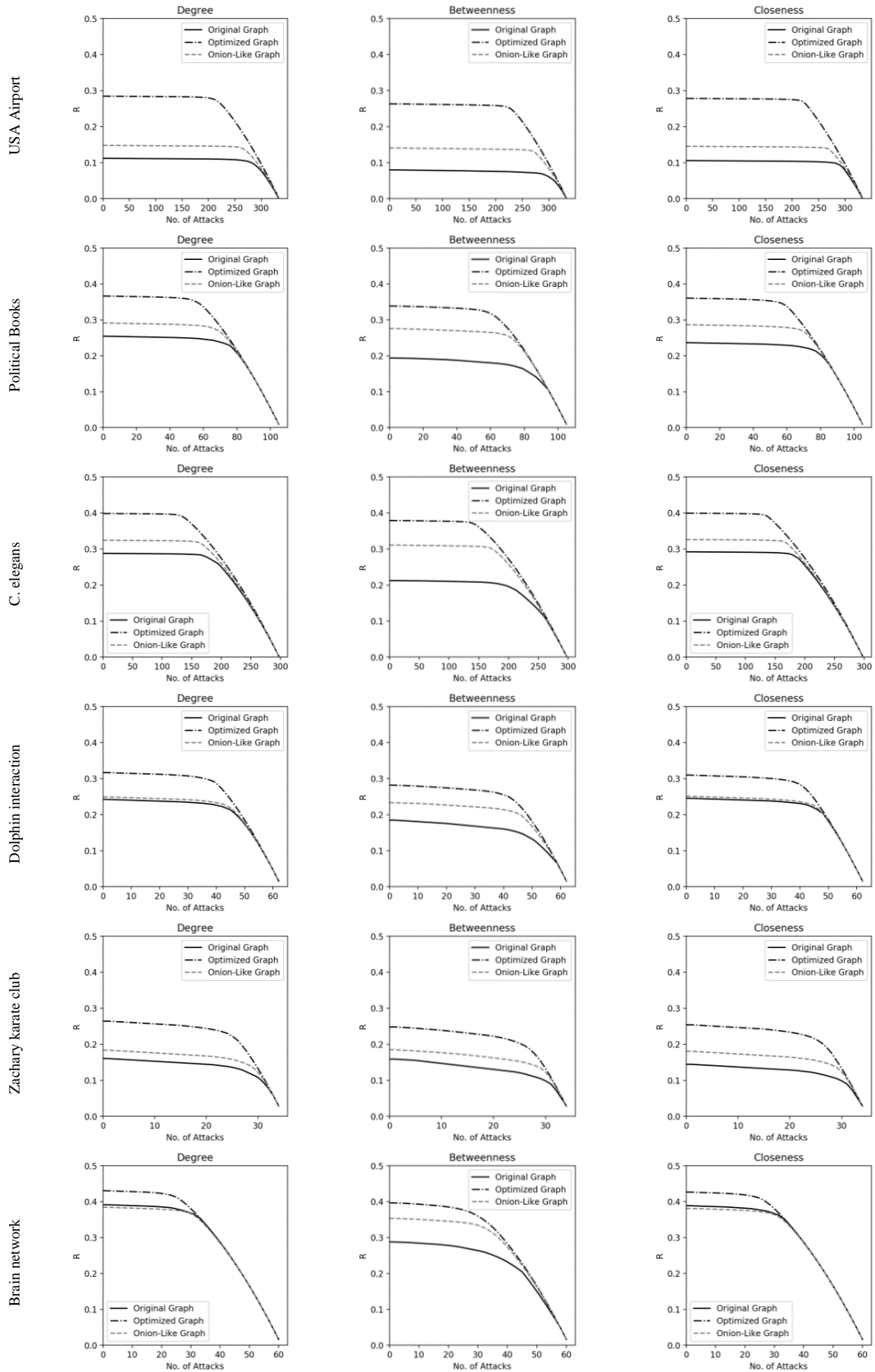
شکل ۶- نمایش نمودارهای ناهمگنی (H-plot) برای شبکه‌های ساختگی فراهم شده از مدل‌های اردوش-رینی (ER)، آپولونین تصادفی (RAN)، هندسی تصادفی (RGG) مدل اوزیک و واتس - استروگاتس (WS) با احتمال سیم‌بندی 0.3 و 0.65 تمامی شبکه‌های ساختگی به‌طور متوسط ۱۰۲۴ گره دارند



شکل ۷- نمایش نمودارهای ناهمگنی (H-plot) برای شش شبکه واقعی: Brain Network و USA airport transportation network of 1997, network C. Elegans, Dolphin social network, Zachary's karate club, Books about US politics, Neural.



شکل ۸- مقدار متوسط استحکام (R) برحسب تعداد حملات مبتنی بر مرکزیت درجه، بینیت و نزدیکی در شبکه‌های ساختگی: اردوش - رینی (ER)، آپولونین تصادفی (RAN)، هندسی تصادفی (RGG) مدل اوزیک و واتس - استروگاتس (WS) (با احتمال سیم‌بندی 0.3 و 0.65). برای هر شبکه سه نمودار در حالت گراف اصلی (بدون سیم‌بندی)، گراف بهینه (سیم‌بندی پیشنهادی) و گراف پوست‌پیزی (سیم‌بندی پیشنهادی در [۳۵]) به ازای هر یک از حملات مبتنی بر مرکزیت ترسیم شده است



شکل ۹- مقدار متوسط استحکام (R) برحسب تعداد حملات مبتنی بر مرکزیت درجه، بینیت و نزدیکی در شبکه‌های واقعی: Dolphin social, Zachary's karate club, Brain Network و USA airport transportation network of 1997, Neural network C. Elegans, Books about US politics.network برای هر شبکه سه نمودار در حالت گراف اصلی (بدون سیم‌بندی)، گراف بهینه (سیم‌بندی پیشنهادی) و گراف پیازواره (سیم‌بندی پیشنهادی در [۳۵]) به ازای هر یک از حملات مبتنی بر مرکزیت ترسیم شده است

$$R = \frac{1}{n+1} \sum_{q=0}^n s(Q) \approx \frac{1}{n} (0+1/n+2/n+\dots+n/n) \approx \frac{1}{n} \left(\frac{n}{2} (n+1) \right) \approx 0.5$$

بدین ترتیب می‌بینیم که معیار استحکام R مبتنی بر S(Q) در بازه [0, 0.5] قرار دارد، طوری که R=0 متناظر با شبکه‌ای مشتمل بر گره‌های ایزوله و R=0.5 متناظر با مستحکم‌ترین پیکربندی از شبکه (یک شبکه کاملاً همبند در طی حمله) است. معیار استحکام R همانند پرکولاسیون می‌تواند درصد بحرانیته^{۴۵} (نقطه شکنندگی)^{۴۶} شبکه را به ما عرضه کند. بدین سیاق، نمودارهای حاصل از برآورد استحکام نشان می‌دهند که پس از حذف چه تعداد گره، شبکه سقوط خواهد کرد که این خود معیاری متداول در نظریهٔ پرکولاسیون به شمار می‌رود. در شکل‌های ۸ و ۹ به ترتیب، نمودارهای استحکام R را بر حسب تابعی از تعداد حملات مبتنی بر مرکزیت برای شبکه‌های ساختگی و شبکه‌های واقعی در سه حالت شبکهٔ اولیه (بدون سیم‌بندی)، شبکه بهینه (سیم‌بندی پیشنهادی) و شبکه پیازواره (سیم‌بندی پیشنهادی در [۳۵]) به تصویر کشیده‌ایم. همانطور که می‌بینیم، کران بالای مقدار R در حالت ایدئال 0.5 است که البته هیچ یک از روش‌ها نتوانسته‌اند به این مقدار دست یابند و تنها در دو مورد یعنی شبکه مغز و C. elegans سیم‌بندی پیشنهادی توانسته به میزان متوسط استحکام تقریبی ۴۰٪ دست پیدا کند. نکته جالب این است که این هر دو شبکه در کلاس شبکه‌های زیستی قرار دارند.

در طی فرآیند شبیه‌سازی، یک حمله در هر گام صورت گرفته و حملات نیز به شکل ترتیبی انجام شده است. آشکارا می‌بینیم که در تمامی نتایج شبیه‌سازی، گراف بهینه حاصل از اعمال سیم‌بندی پیشنهادی دارای استحکام بیشتری در برابر انواع حملات هوشمند مبتنی بر مرکزیت‌های درجه، بینیت و نزدیکی دانگالچو است. در برخی توپولوژی‌ها مانند RGG (مدلاوزیک)، آپولونین تصادفی (RAN) و شبکهٔ واقعی US Airport، مشاهده می‌شود که روش سیم‌بندی پیشنهادی تفاوت چشمگیری با روش سیم‌بندی پیازواره دارد. با توجه به این نمودارها می‌توانیم این موضوع را بررسی کنیم که آیا به کارگیری روش سیم‌بندی پیشنهادی با توجه به تغییرات ایجاد شده در توزیع درجه و ساختار شبکه آیا اساساً می‌تواند روشی توجیه‌پذیر باشد؟ از مطالعه و بررسی نمودارها درمی‌یابیم که در اغلب موارد بهبود حاصل در استحکام گراف بهینه ارزش استفاده از سیم‌بندی پیشنهادی را دارد. البته موارد استثنایی نیز وجود دارد که در نمودارها قابل مشاهده است. یعنی با بررسی آنها درمی‌یابیم که به کارگیری سیم‌بندی پیازواره چندان کارآمد نبوده و همواره در قیاس با روش سیم‌بندی پیشنهادی بهبود یک متر یا مساوی با آن داشته است. برای نمونه، در نمودار مبتنی بر حمله براساس بینیت برای شبکهٔ RGG می‌بینیم که روش سیم‌بندی پیشنهادی و پیازواره تقریباً مشابه با یکدیگر عملکردند؛ هر چند که در مابقی شبکه‌های RGG، این روش پیشنهادی بوده که عملکرد بهتری داشته است.

در تمامی گراف‌های آپولونین شاهدیم که روش سیم‌بندی پیشنهادی بهتر عملکرده است. در شبکهٔ واقعی دلفین تحت حملهٔ مبتنی بر بینیت می‌بینیم که روش پیشنهادی به مراتب عملکرد بهتری داشته است اما گراف اولیه و گراف پیازواره تفاوت چندانی با یکدیگر نداشته‌اند. نکته جالب دیگر این است که در تمامی موارد و در مدل‌های BA و ER شاهد تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین گراف اولیه و پیازواره نیستیم. این امر بدین معنی است که روش مذکور خیلی قادر به ایجاد بهبود چشمگیری در این قبیل شبکه‌ها نیست. در گراف‌های WS و هنگامی که احتمال سیم‌بندی ناچیز باشد (یعنی 0.3) دیده می‌شود که هر دو روش سیم‌بندی پیشنهادی و رویکرد پیازواره عملکرد مشابه و نزدیک به یکدیگر داشته‌اند؛ لیکن، در جایی که این احتمال افزایش پیدا می‌کند، شاهد آنیم که روش پیازواره بهبود چندانی حاصل نکرده و از منظر استحکام مشابه با گراف اولیه عمل می‌کند.

استرادا با استفاده از قضیهٔ اوپلر^{۴۳} [۴۰] شاخص رندیج را به گونه‌ای بیان کرده که بین شاخص پیشنهادی و نمایش طیفی گراف‌ها یک ارتباط برقرار گردد. او هر گراف را با ترسیم x_i در برابر y_i برای تمامی مقادیر i نمایش داده که x_i ها و y_i ها برحسب کسینوس زاویه بین بردار ویژهٔ λ_m خود متعامد و λ_m مقدار ویژه ماتریس لاپلاسین نوشته می‌شوند. شاخص ناهمگنی را می‌توان برحسب مجموع مربعات افکنش‌های^{۴۴} تمامی این نقاط بر روی محورهای نمایش داد. بایستی توجه داشت که تمامی این افکنش‌ها بر روی محور y مثبت‌اند در حالیکه ممکن است بر روی محور x مقادیر مثبت یا منفی داشته باشند. بدین ترتیب، نمودارهایی به دست خواهد آمد که از آنها تحت عنوان نمودارهای ناهمگنی یا به اختصار H-plot یاد می‌شود.

نمودارهای ناهمگنی (H-plot) برای مجموعه داده‌های ساختگی و مجموعه داده‌های واقعی به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ به نمایش درآمده است. نکته مهمی که قبل از هر چیز لازم است بدان اشاره کنیم این است که در شبکه‌هایی که سیم‌بندی سبب ناهم‌بندی گردد، اصولاً امکان ترسیم H-plot وجود ندارد. به همین دلیل می‌بینیم که در شبکهٔ US Airline نمودار ناهمگنی با به‌کارگیری روش پیازواره ترسیم نشده است؛ چرا که استفاده از این روش سبب ناهم‌بندی شبکه می‌شود. نکته دیگر این است که بر طبق این نمودارها، در هر دو روش پیشنهادی و پیازواره، میزان همگنی شبکه در حال افزایش یا متقابلاً ناهمگنی رو به کاهش است. البته این همگنی لزوماً به معنای متعادل شدن درجه گره‌ها نیست بلکه بیشتر متاثر از ضریب هم‌تپی است. به همین دلیل است که روش پیازواره حتی بیشتر از روش پیشنهادی قادر است بر روی ضریب هم‌تپی شبکه اثر بگذارد.

علی‌رغم اینکه روش سیم‌بندی پیشنهادی به مراتب بیشتر از روش پیازواره باعث تغییر درجه شده، می‌بینیم که این تفاوت خصوصاً در گراف‌هایی مانند WS چندان محسوس نیست. پس نکته جالب این است که شاخص ناهمگنی پیشنهادی استرادا [۴۰] بیش‌تر از آنکه متاثر از توزیع درجه باشد، از ضریب هم‌تپی شبکه تأثیر پذیرفته است. این نکته مهمی بوده که در مقاله استرادا از نظر مغفول مانده است. در هر دو روش، یعنی مکانیزم پیشنهادی و روش پیازواره، سعی بر این بوده که تا حد امکان، گراف بهینه دارای همگنی بیشتری باشد و این موضوع مشخصاً در نمودارهای H-plot قابل مشاهده است. آشکارا دیده می‌شود که علی‌رغم تفاوت در توزیع درجه در دو روش پیشنهادی و پیازواره، نمودارهای H-plot در شبکه‌های بهینه شده تحت هر دو روش تقریباً مشابه یکدیگرند. بدین ترتیب، نکته مهمی که از نتایج فرعی این مقاله حاصل می‌شود این است که نمی‌توان از نمودارهای H-plot به شکل موثری برای تعیین میزان شباهت بین دو گراف بهره جست و در کنار آن نیازمند استفاده از معیار دیگری نیز هستیم.

برای بیان و سنجش استحکام شبکه، روش‌های مختلفی وجود دارد و ما مطابق با نظریهٔ پرکولاسیون، میزان استحکام شبکه، R، را با متوسط اندازهٔ بزرگترین خوشهٔ هم‌بند، S(Q)، در طی فرآیند حذف گره‌ها از شبکه مرتبط می‌سازیم. S(Q) خود تابعی از درصد حملات به شبکه است و بدین ترتیب معیار استحکام R از متوسط‌گیری بر روی درصدی از گره‌های واقع در بزرگترین خوشهٔ هم‌بند S(Q) پس از حذف Q گره از شبکه محاسبه می‌شود [۳۵].

$$R = \frac{1}{n+1} \sum_{q=0}^n S(Q) \quad (۶)$$

که در آن n تعداد گره‌های شبکه است. بایستی توجه داشت که معیار استحکام مزبور در واقع به نوعی با انتگرال سطح زیر منحنی S(Q) متناظر است. رابطهٔ (۶) را می‌توان به شکل تقریبی زیر نوشت.

جدول ۱- مقادیر معیارهای شبکه برای شبکه‌های اولیه (بدون اعمال سیم‌بندی مجدد)

	شبکه‌های واقعی						شبکه‌های ساختگی					
	Karate club	C. elegans	Political Books	USA Airport	Dolphin Network	Brain Network	RAN	BA	ER	RGG	WS (0.30)	WS (0.65)
تعداد لبه‌ها	78	2148	441	2126	159	322	3075	3076	3094	3077	2048	2048
تعداد گره‌ها	34	297	105	332	62	60	1027	1028	1024	1029	1024	1024
ضریب هم‌تیبی	-0.476	-0.163	-0.128	-0.208	-0.044	0.248	-0.166	-0.078	-0.001	0.231	-0.059	-0.100
متوسط ضریب خوشه‌بندی	0.571	0.292	0.488	0.625	0.259	0.564	0.812	0.030	0.006	0.611	0.183	0.027
متوسط فاصله	2.408	2.455	3.079	2.738	3.357	2.461	3.412	3.496	4.059	6.160	6.223	5.437
شاخص ناهمگنی	0.269	0.172	0.113	0.369	0.133	0.052	0.274	0.168	0.046	0.058	0.018	0.033
شاخص تراگذری	0.256	0.181	0.348	0.396	0.309	0.529	0.102	0.017	0.006	0.388	0.160	0.022

جدول ۲- مقادیر معیارهای شبکه برای شبکه‌های بهینه (با اعمال سیم‌بندی مجدد پیشنهادی)

	شبکه‌های واقعی						شبکه‌های ساختگی					
	Karate club	C. elegans	Political Books	USA Airport	Dolphin Network	Brain Network	RAN	BA	ER	RGG	WS (0.30)	WS (0.65)
تعداد لبه‌ها	78	2148	441	2126	159	322	3075	3076	3094	3077	2048	2048
تعداد گره‌ها	34	297	105	332	62	60	1027	1028	1024	1029	1024	1024
ضریب هم‌تیبی	-0.230	-0.070	0.025	0.016	0.129	0.277	-0.097	-0.013	0.064	0.229	-0.001	-0.012
متوسط ضریب خوشه‌بندی	0.223	0.130	0.193	0.225	0.145	0.278	0.245	0.012	0.005	0.204	0.070	0.011
متوسط فاصله	2.384	2.436	2.517	2.648	2.787	2.014	3.551	3.758	4.137	4.618	5.847	5.563
شاخص ناهمگنی	0.103	0.069	0.040	0.190	0.045	0.015	0.144	0.081	0.015	0.024	0.007	0.012
شاخص تراگذری	0.181	0.116	0.194	0.255	0.168	0.296	0.070	0.011	0.005	0.179	0.067	0.010

جدول ۳- مقادیر معیارهای شبکه برای شبکه‌های بهینه (با اعمال سیم‌بندی مجدد پیاواریه)

	شبکه‌های واقعی						شبکه‌های ساختگی					
	Karate club	C. elegans	Political Books	USA Airport	Dolphin Network	Brain Network	RAN	BA	ER	RGG	WS (0.30)	WS (0.65)
تعداد لبه‌ها	78	2148	441	2126	159	322	3075	3076	3094	3077	2048	2048
تعداد گره‌ها	34	297	105	332	62	60	1027	1028	1024	1029	1024	1024
ضریب هم‌تیبی	-0.398	-0.109	-0.070	-0.217	-0.053	0.078	-0.132	-0.009	-0.004	0.206	-0.030	-0.052
متوسط ضریب خوشه‌بندی	0.281	0.153	0.184	0.291	0.103	0.251	0.197	0.028	0.006	0.104	0.032	0.007
متوسط فاصله	2.312	2.388	2.430	-	2.790	2.064	3.182	3.591	4.063	4.137	5.580	5.393
شاخص ناهمگنی	0.231	0.160	0.108	0.375	0.125	0.071	0.220	0.137	0.046	0.055	0.017	0.031
شاخص تراگذری	0.176	0.119	0.153	0.247	0.130	0.264	0.047	0.028	0.006	0.071	0.028	0.006

دهد؛ هر چند که این میزان در روش پیاواریه از افزایش بیشتری برخوردار بوده است. به همین دلیل، متناظراً می‌بینیم که شاخص ناهمگنی در شبکه‌های بهینه تحت روش اخیر بیشتر بوده است. روش سیم‌بندی پیشنهادی توانسته است ضریب خوشه‌بندی و شاخص تراگذری را به‌طور تقریبی در قیاس با پیاواریه افزایش دهد؛ همچنین به موازات آن سعی داشته تا متوسط فاصله ژئودزی نیز تغییر چندانی محسوس پیدا نکند.

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای کارهای آتی

در این مقاله ما به کمک نظریه اطلاعات شانون، یال‌هایی از یک شبکه مفروض (اعم از ساختگی و واقعی) را گزینش و سپس مجدداً سیم‌بندی کردیم طوری که جابه‌جایی آن‌ها بتواند بیشترین تأثیر را در بهبود استحکام شبکه برجای بگذارد و در عین حال پیچیدگی محاسباتی ناچیزی را نیز به همراه داشته باشد. علاوه بر سادگی، سعی کردیم تا راه‌برد سیم‌بندی مجدد پیشنهادی، قابلیت نگهداشت بزرگترین خوشه موجود در شبکه را داشته باشد و در هر گام از سیم‌بندی توجه

در پایان این بخش و برای یک جمع‌بندی از میزان استحکام حاصل از به‌کارگیری روش سیم‌بندی پیشنهادی، این روش را بر روی مدل‌های مختلف شبکه‌های ساختگی و نیز شبکه‌های واقعی اعمال کرده و مقادیر عددی مشخصات توپولوژیکی گراف‌ها یعنی ضریب هم‌تیبی، ضریب خوشه‌بندی، متوسط فاصله ژئودزی، شاخص ناهمگنی و شاخص تراگذری را برای هر یک از شبکه‌ها محاسبه و در جدول ۲ فهرست کرده‌ایم. همچنین برای آن که بتوان مقایسه عادلانه‌ای انجام داد و میزان استحکام و تاب‌آوری شبکه‌های بهینه حاصل از به‌کارگیری سیم‌بندی مجدد پیشنهادی را با صحت و دقت بیشتری ارزیابی کرد، همین کمیت‌ها را برای شبکه اولیه (بدون سیم‌بندی) و شبکه بهینه حاصل از به‌کارگیری سیم‌بندی پیاواریه را، به‌ترتیب، در جداول ۱ و ۳ درج کرده‌ایم. تنها در یک مورد که به‌کارگیری روش پیاواریه منجر به ناهم‌بندی شبکه US Airline می‌شد و در نتیجه قادر به محاسبه متوسط فاصله ژئودزی نبودیم، مقدار عددی را در سلول متناظر از جدول ۳ درج نکرده‌ایم.

از مقایسه داده‌های عددی مندرج در این سه جدول درمی‌یابیم که روش سیم‌بندی پیشنهادی نیز به مانند روش پیاواریه توانسته ضریب هم‌تیبی را افزایش

[7] A. N. Zeng, and W. Liu, "Enhancing network robustness against malicious attacks," *Physical Review E*, vol. 85, no. 6, p. 066130, 2012.

[8] T. P. Peixoto, and S. Bornholdt, "Evolution of robust network topologies: emergence of central backbones," *Physical review letters*, vol. 109, p. 118703, 2012.

[9] H. Wang, and P. V. Mieghem, "Algebraic connectivity optimization via link addition," *Proceedings of IEEE/ACM Bionetics*, 2008, pp. 25-28, Hyogo, Japan.

[10] H. Chan, and L. Akoglu, "Optimizing Network Robustness by Edge Rewiring: A General Framework," *Data Mining and Knowledge Discovery*, vol. 30, no. 5, pp. 1395-1425, 2016.

[11] T. S. Evans, "Exact Solutions for Network Rewiring Models," *The European Physical Journal B*, vol. 56, no. 1, pp. 65-69, 2007.

[12] H. J. Herrmann, C. M. Schneider, A. A. Moreira, J. S. Andrade, and S. Havlin, "Onion-like network topology enhances robustness against malicious attacks," *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, vol. 01, p. 01027, 2011.

[13] J. Lindquist, Ma. Junling, P. Van den Driessche, and F. H. Willeboordse, "Network evolution by different rewiring schemes," *Physica D: Nonlinear Phenomena*, vol. 238, no. 4, pp. 370-378, 2009.

[14] C. M. Schneider, A. A. Moreira, J. S. Andrade, S. Havlin, and H. J. Herrmann, "Mitigation of malicious attacks on networks," *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, vol. 108, no. 10, pp. 3838-3841, 2011.

[15] A. Sydney, C. Scoglio, and D. Gruenbacher, "Optimizing algebraic connectivity by edge rewiring," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 219, pp. 5465-5479, 2013.

[16] B. Liang, "Smart Rewiring Improving Network Robustness Faster," *Chinese Physics Letters*, vol. 32, no. 7, p. 078901, 2015.

[17] J. A. Bondy, and U. S. R Murty, *Graph theory: Graduate texts in mathematics*, Springer-Verlag, 2008.

[18] R. Diestel, *Graph Theory, Graduate Texts in Mathematics*, vol. 173, 4th ed., Springer-Verlag, 2010.

[19] P. Erdős, and A. Rényi, "On the Evolution of Random Graphs," *Publications of the Math. Inst. of the Hungarian Academy of Sci.*, Issue 5, pp. 17-61, 1960.

[20] A- L. Barabási, and R. Albert, "Emergence of Scaling in Random Networks," *Science*, vol. 286, no. 5439, pp. 509-512, 1999.

[21] D. J. Watts, and S. H. Strogatz, "Collective dynamics of small-world networks," *Nature*, vol. 393, no. 6684, pp. 440-442, 1998.

داشتیم که جابه‌جایی یال‌ها موجب ناهم‌بندی شبکه نگردد. تنها مساله‌ای که ممکن است در طی فرآیند سیم‌بندی مجدد روی دهد این است که اهمیت هاب‌های شبکه در حفظ اتصال‌پذیری سراسری از طریق جابه‌جایی یال‌ها بین گره‌هایی با بیشترین درجه کاهش یابد. با این حال، سعی شد که تا حد امکان توزیع درجه چندان دستخوش تغییر نگردد.

بدین ترتیب، پیوندهای سیم‌بندی شده ممکن است نهایتاً بین بخش‌های مختلف شبکه پس از حمله به یک هاب و حذف آن، به مثابه یک پل ارتباطی عمل کنند. در مقایسه با گزینش تصادفی پیوندها، روش سیم‌بندی مجدد پیشنهادی قادر است تا میزان استحکام را به سرعت افزایش داده و همچنین یک توپولوژی متمایل به همگن با درجه بالایی از هم‌تیبی را ایجاد کند. ما تحت شرایط مختلف کاری شبکه، مکانیزم سیم‌بندی مجدد پیشنهادی را با یکی از شناخته‌شده‌ترین و پراستنادترین روش‌های سیم‌بندی، یعنی پیازواره، مقایسه کرده و نشان دادیم که روش پیشنهادی قادر است با تعویض مناسب لبه‌ها به کارایی بالاتری دست پیدا کند. مسلماً چنانچه تعداد مداخلات در تعویض لبه‌ها به گونه‌ای باشد که برای گنش‌های واقعی، قیود بودجه و سایر الزامات نیز برآورده گردد، آن‌گاه روش سیم‌بندی مجدد پیشنهادی می‌تواند مزایای فراوانی را به دنبال داشته باشد و به ابزار بالقوه‌ای برای طراحان و سیاست‌گذاران شبکه، که وظیفه حفاظت از شبکه را در برابر حملات هدفمند برعهده دارند، بدل گردد. بایستی توجه داشت که راه‌برد پیشنهادی برای پیوندهای وزن‌دار و جهت‌دار-که بیانگر تعداد و حجم انتقالات مابین گره‌های شبکه در یک تناوب مشخص است- قابل استفاده نیست. ارائه یک روش سیم‌بندی مجدد که بتواند مزایای چنین اطلاعاتی را علاوه بر سازگاری با مفهوم استحکام در برداشته باشد خود می‌تواند در بهینه‌سازی سیستم‌های واقعی، کاربردهای مستقیم و مشخصی داشته باشد که به‌عنوان یکی از کارهای آتی در تداوم کار فعلی پیشنهاد می‌گردد.

مراجع

[1] S. H. Strogatz, "Exploring complex networks," *Nature*, vol. 410, Issue 6825, pp. 268-276, 2001.

[2] N. Basov, J.-S. Lee, and A. Antoniuk, "Social Networks and Construction of Culture: A Socio-Semantic Analysis of Art Groups," *International Workshop on Complex Networks and their Applications*, pp. 785-796, 2016.

[3] L. D. F. Costa, F. A. Rodrigues, and A. S. Cristino, "Complex networks: the key to systems biology, Genetics and Molecular Biology," vol. 31, no. 3, pp. 591-601, 2008.

[4] F. Safaei, and H. Sotoodeh, "On the probability of facing random breakdowns: a measure of networks' vulnerability," *International Journal of Computer and Mathematics*, vol. 93, no. 7, pp. 1045-1073, 2016.

[5] JP. Sterbenz, D. Hutchison, EK. Çetinkaya, A. Jabbar, JP. Rohrer, M. Schöller, and P. Smith, "Resilience and Survivability in Communication Networks: Strategies, Principles, and Survey of Disciplines, Computer Networks, Special Issue on Resilient and Survivable Networks," vol. 54, no. 8, pp. 1245-1265, 2010.

[6] Z. Jiang, M. Liang, and D. Guo, "Enhancing network performance by edge addition," *International Journal of Modern Physics C*, vol. 22, pp. 1211-1226, 2011.

machine," *Clinical Neurophysiology*, Issue 127, pp. 2695-2703, 2016.

[37] Original website online: <http://www-personal.umich.edu/~mejn/netdata/>.

[38] J. Kunegis, KONECT: The Koblenz Network Collection, In *Proc. Int. Web Observatory Workshop*, 2013, pp. 1343-1350. Original website online: <http://konect.uni-koblenz.de/networks/>.

[39] A. Clauset, C. R. Shalizi, M. E. Newman, Power-Law Distributions in Empirical Data, *SIAM Review*, vol. 51, Issue 4, pp. 661-703, 2009.

[40] E. Estrada, "Quantifying Network Heterogeneity," *Physical Review E*, vol. 82, Issue 6, p. 066102, 2010.

[41] M. Randić, "Characterization of molecular branching," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 97, Issue 23, pp. 6609-6615, 1975.

فرشاد صفایی کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری

خویش را در مهندسی کامپیوتر، معماری سیستم‌های

کامپیوتری از دانشگاه علم و صنعت ایران، به ترتیب، در

سال‌های ۱۳۷۳، ۱۳۷۶ و ۱۳۸۶ دریافت کرد. او اکنون با

درجه استادیاری در دانشکده مهندسی و علوم کامپیوتر

دانشگاه شهید بهشتی به تدریس و پژوهش اشتغال دارد.

زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه او عبارتند از مدل‌سازی و ارزیابی کارایی سیستم‌های کامپیوتری، شبکه‌های پیچیده و اجتماعی، شبکه‌های میان ارتباطی و سامانه‌های ذخیره‌سازی پیشرفته.

آدرس پست الکترونیکی ایشان عبارت است از:

f_safaei@sbu.ac.ir



حسین یگانلو کارشناسی خویش را از دانشگاه آزاد واحد

تهران جنوب در رشته مهندسی کامپیوتر، نرم‌افزار در سال

۱۳۹۰ و مدرک کارشناسی ارشد خود را از دانشکده

مهندسی و علوم دانشگاه شهید بهشتی در سال ۱۳۹۶ در

رشته نرم‌افزار و فناوری اطلاعات دریافت کرد. زمینه‌های

پژوهشی مورد علاقه او عبارتند از شبکه‌های پیچیده و اجتماعی، یادگیری ماشین و



فرآیندهای تصادفی.

آدرس پست الکترونیکی ایشان عبارت است از:

hosein_yeganloo@ipm.ir

[22] J. S. Andrade Jr, H. J. Herrmann, R. F. Andrade, and L. R. Da Silva, "Apollonian networks: Simultaneously scale-free, small world, Euclidean, space filling, and with matching graphs," *Physical review letters*, vol. 94, no. 1, p. 018702, 2005.

[23] G. L. Pellegrini, L. de Arcangelis, H. J. Herrmann, and C. Perrone-Capano, "Modelling the brain as an Apollonian network," *arXiv preprint q-bio/0701045*, 2007.

[24] T. Zhou, G. Yan, and B.-H. Wang, "Maximal planar networks with large clustering coefficient and power-law degree distribution," *Physics Review E*, vol. 71, no.4, p. 046141, 2005.

[25] A. Frieze, and C. E. Tsourakakis, "On certain properties of random apollonian networks," *International Workshop on Algorithms and Models for the Web-Graph*, 2012, pp. 93-112, Berlin, Germany.

[26] J. Ozik, B. R. Hunt, and E. Ott, "Growing networks with geographical attachment preference: Emergence of small worlds," *Physical Review E*, vol. 69, no. 2, pp. 026108, 2004.

[27] J. Zhang, E. Yeh, and E. Modiano, "Robustness of interdependent random geometric networks," *54th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing*, 2016, pp. 172-179, Monticello, IL, USA.

[28] C. Dangalchev, "Residual closeness in networks," *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 365, Issue 2, pp. 556-564, 2006.

[29] E. Estrada, "The Structure of Complex Networks," *Oxford University Press*, 2011, UK.

[30] G. Sabidussi, "The centrality index of a graph," vol. 31, no. 4, pp. 581-603, 1966.

[31] L. C. Freeman, "Centrality in social networks conceptual clarification," *Social Networks*, vol. 1, Issue 215, pp. 215-239, 1979.

[32] V. Latora, and M. Marchiori, "Efficient behavior of small-world networks," *Physics Review Letters*, vol. 87, no. 19, p. 198701, 2001.

[33] R. Albert, and A.L. Barabási, "Statistical mechanics of complex networks," *Reviews of Modern Physics*, vol. 74, Issue 1, pp. 47-97, 2002.

[34] W. Greiner, L. Neise, and H. Stöcker, *Thermodynamics and statistical mechanics*, Springer Science & Business Media, 2012.

[35] Z.-Xi Wu, and P. Holme, "Onion structure and network robustness," *Physical Review E*, vol. 84, Issue 2, p. 026106, 2011.

[36] M. Zare, Z. Rezvani, and A. A. Benasich, "Automatic classification of 6-month-old infants at familial risk for language-based learning disorder using a support vector

اطلاعات بررسی مقاله:

تاریخ ارسال: ۱۳۹۶/۱۰/۲۳

تاریخ اصلاح: ۱۳۹۶/۱۲/۲۳

تاریخ قبول شدن: ۱۳۹۷/۰۱/۲۲

نویسنده مرتبط: دکتر فرشاد صفایی، دانشکده مهندسی و علوم کامپیوتر،

دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

-
- ¹Rewiring
 - ²Shannon's Entropy
 - ³Dangalchev's Closeness
 - ⁴Onion-Like
 - ⁵Malicious
 - ⁶Targetted
 - ⁷Fault
 - ⁸Bondy and Murty
 - ⁹Diestsel
 - ¹⁰Non-Oriented
 - ¹¹Multiple Edges
 - ¹²Self Loop
 - ¹³Irregular
 - ¹⁴InducedPath
 - ¹⁵Erdős and Rényi
 - ¹⁶Scale-Free
 - ¹⁷Power-Law
 - ¹⁸Barabási and Albert
 - ¹⁹Randomness
 - ²⁰Apollonian
 - ²¹Modularity
 - ²²Ozik
 - ²³Geometric
 - ²⁴Blind Spot
 - ²⁵High Centrality Adaptive Attck
 - ²⁶Dangalchev
 - ²⁷Sabidussi
 - ²⁸Freeman
 - ²⁹Latora and Marchiori
 - ³⁰Residual Closeness
 - ³¹Citation
 - ³²Microstate
 - ³³Boltzmann
 - ³⁴Driving Potential Force
 - ³⁵Monter-Carlo
 - ³⁶Tor Network
 - ³⁷Torrent
 - ³⁸Overlay Network
 - ³⁹Binning
 - ⁴⁰Fat-Tailed
 - ⁴¹Goodness of Fitness
 - ⁴²Randić Index
 - ⁴³Euler
 - ⁴⁴Projection
 - ⁴⁵Criticality
 - ⁴⁶Fragility