

SEICRS Information Dissemination Model Based on Rumor Spreading in Complex Networks

S. Hoseini*, A. Zandvakili

*Shahid Bahonar University of Kerman

(Received: 04/03/2020, Accepted: 05/08/2020)

ABSTRACT

Complex networks are currently being studied in many fields of science, and used to describe many natural systems. The Internet and the brain, which are networks of routers and neurons, respectively, are examples of complex networks. There are also different types of complex networks, which can be referred to as scale free networks, small world networks and random networks. In this paper, an epidemic model of rumor spreading in all three types of these networks is proposed. In this model, in addition to the existing cases (susceptible-infected-recovered), the rumor delay mechanism and the counter-attack mechanism have been added. The proposed model is presented as: Susceptible - Exposed - Infected - Counterattack - Recovered - Susceptible (SEICRS). The methods of diffusion and decontamination for these three types of networks are compared. The simulation results are exactly in line with the theoretical analysis and show that in scale free networks, the spread of pollution is faster than the other two types. It is also shown that in scale free networks, the presented model has lower pollution and faster decontamination in comparison to SIRS and SEIRS models.

Keywords: Basic Reproductive ratio, Counter Attack, Complex Network, Rumor, Exposed, Social Network

* Corresponding Author Email: so_hosseini@uk.ac.ir

علمی - پژوهشی

مدل انتشار اطلاعات SCEIRS مبتنی بر انتشار شایعه در شبکه‌های پیچیده

سوده حسینی^{۱*}، ابوذر زندوکیلی^۲

۱- استادیار بخش علوم کامپیوتر، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران، ۲- مربی گروه مهندسی کامپیوتر، واحد جیرفت، دانشگاه آزاد اسلامی، جیرفت، ایران (دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۲۵، پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۲۲)

چکیده

شبکه‌های پیچیده در حال حاضر در بسیاری از زمینه‌های علوم مورد مطالعه قرار گرفته و بسیاری از سامانه‌های طبیعی می‌توانند توسط آنها شرح داده شوند. اینترنت و مغز که به ترتیب شبکه‌ای از مسیریاب‌ها و نورون‌ها محسوب می‌شوند، نمونه‌هایی از شبکه‌های پیچیده هستند. همچنین انواع مختلفی از شبکه‌های پیچیده وجود دارد که می‌توان به شبکه‌های بی‌مقیاس، شبکه‌های دنیای کوچک و شبکه‌های تصادفی اشاره کرد. در این مقاله، یک مدل همه‌گیری از انتشار شایعه در هر سه نوع این شبکه‌ها پیشنهاد شده که در این مدل، علاوه بر حالات موجود (مستعد- شایعه پراکن- بازیابی شده)، ساز و کار تأخیر در انتشار شایعه همچنین سازوکار مقابله‌کننده اضافه شده است. مدل پیشنهادی به صورت: مستعد- در معرض شایعه- شایعه پراکن- مقابله‌کننده- بازیابی شده- مستعد (SECIRS) ارائه شده است. نحوه انتشار و رفع شایعه برای این سه نوع شبکه مقایسه شده است. نتایج شبیه‌سازی دقیقاً با تجزیه و تحلیل نظری مطابقت داشته و نشان می‌دهد در شبکه‌های بی‌مقیاس انتشار شایعه سریع‌تر از دو نوع دیگر بوده همچنین در شبکه‌های بی‌مقیاس مدل پیشنهادشده در مقایسه با دو مدل SIRS و SEIRS، دارای سرعت انتشار شایعه پایین‌تر و رفع شایعه سریع‌تر می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: نسبت بازتولید، مقابله‌کننده، شبکه پیچیده، شایعه، در معرض شایعه، شبکه اجتماعی.

۱- مقدمه

کنار مزایای غیرقابل انکار خود، فضا را برای نشر مطالب و اخبار و محتواهای غیرمعتبر و شایعه پراکنی، بازتر کرده است. امروزه انتشار شایعه، یک تهدید بزرگ در فضای اجتماعی محسوب می‌شود. پخش و انتشار یک شایعه در شبکه‌های اجتماعی شاید با فشردن یک دکمه، کسری از ثانیه زمان ببرد، اما تأثیرات اجتماعی، فرهنگی، سیاسی و حتی اقتصادی منفی این کار می‌تواند بسیار وسیع و دور از تصور کاربران باشد. شبکه‌های اجتماعی، در هر جامعه‌ای، یک مغز بزرگ را ساخته‌اند. مغزی که هر یک از ما، یک سلول از سلول‌های عصبی آن هستیم. نورون‌های مغز، دو وظیفه کلیدی دارند: اول این‌که بخشی از پیام‌های دریافتی را به نورون‌های دیگر انتقال دهند. دوم این‌که بخشی از پیام‌های دریافتی را حذف و فیلتر کنند.

در سال‌های اخیر، مدل‌سازی با استفاده از شبکه‌ها بدون شک یکی از راه‌های مطلوب محققان برای نمایش سامانه‌های اجتماعی، زیستی و فیزیکی بوده است [۱ و ۲]. مدل‌سازی بیماری‌های واگیر، ابزاری است که برای مطالعه ساز و کار پخش بیماری استفاده شده است تا بتوان پیش‌بینی‌های لازم را برای آینده و همچنین برای کنترل واگیری انجام داد. بر همین اساس در اکثر

انواع مختلفی از شبکه‌های پیچیده وجود دارد که می‌توان به شبکه‌های بی‌مقیاس^۱، شبکه‌های دنیای کوچک^۲ و شبکه‌های تصادفی^۳ اشاره کرد. برای این شبکه‌ها می‌توان ویژگی‌هایی همچون: ضریب خوشه‌بندی، توزیع درجه، تابع توزیع درجه و میانگین طول مسیر، تعیین کرد. از جمله تفاوت‌های اساسی بین شبکه‌های بی‌مقیاس و شبکه‌های دیگر، توزیع درجه است. شبکه‌های بی‌مقیاس دارای توزیع درجه ناهمگن بوده در صورتی که شبکه‌های دیگر توزیع درجه همگن دارند. شبکه‌های تصادفی دارای ضریب خوشه‌بندی پایین در صورتی که شبکه‌های بی‌مقیاس و دنیای کوچک دارای ضریب خوشه‌بندی بالا هستند.

یک نمونه از شبکه بی‌مقیاس، شبکه اجتماعی است که به‌عنوان یکی از بسترهای جدید برای شکل‌گیری رسانه، زمینه را برای نشر سریع اطلاعات و اخبار فراهم کرده و این قابلیت، در

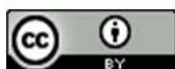
*رایانامه نویسنده مسئول: so_hosseini@uk.ac.ir

¹ Scale-Free Network

² Small-World

³ Random Network

⁴ Rumor



مطالعات، مدل‌سازی انتشار شایعه را بر اساس مدل‌های همه‌گیری شناختی انجام داده‌اند. در این مدل‌ها، طی فرآیند انتشار همه‌گیری، گره‌ها در یکی از حالات مستعد^۱ (S)، در معرض آلودگی (در معرض شایعه)^۲ (E)، شایعه‌پراکن یا آلوده^۳ (I) و بازیابی شده^۴ (R) قرار می‌گیرند [۳ و ۴]. از میان مدل‌های ممکن، مدلی که بیشتر مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، عبارت‌اند از: SIS و SIR [۵]. شایعه نیز همانند بیماری یکی از عناصر اصلی در روابط انسان‌ها با هم، به قدمت سؤالات بشر از پیرامون اطراف خود، بوده است. شایعه سریع منتشر می‌شود، قابل دیدن نیست، کنترل آن مشکل است و چون می‌تواند اثرات مخربی داشته باشد، قابل چشم‌پوشی نیست. شایعه را می‌توان تحت عنوان آلودگی ذهن تعبیر کرد. مدل اصلی پخش شایعه اولین بار توسط دلی و کندل معرفی شده است [۶].

۲- روش تحقیق

در مقاله [۹]، الگوی گسترش شایعات و معادلات دیفرانسیل مشتق شده که توصیف پویایی مدل در شبکه اجتماعی آنلاین است معرفی شده است، که در مقایسه با مدل SIR، توصیف دقیق‌تر و واقعی‌تری از روند گسترش شایعه را ارائه می‌دهد. همچنین مدل پخش شایعات را در یک بستر اجتماعی آنلاین به نام رنرن^{۱۱} مطالعه کرده است. جمعیت به چهار گروه تقسیم می‌شود: S^{۱۲} (پخش‌کننده)، H^{۱۳} (سالم): شخص سالم از شایعه خبر ندارد. K (آگاه): شخص آگاه از شایعه خبر دارد، اما آنرا گسترش نمی‌دهد و O^{۱۴} (مخالف) شخص مخالف شایعه را باور نمی‌کند و آنرا رد می‌کند.

در مقاله [۱۰]، یک مدل همه‌گیری متفاوت برای انتشار شایعه در شبکه اجتماعی آنلاین پیشنهاد شده است. در این مدل جمعیت به صورت زیر، بخش‌بندی می‌شود:

C^{۱۵} (افراد زود باور): این افراد شبیه به حالت مستعد در مدل SIR تمایل دارند که به‌راحتی شایعه را باور کنند و از انتشار شایعه لذت می‌برند.

S (افراد پخش‌کننده).

R^{۱۶} (افراد منطقی): شبیه به حالت مقاوم در مدل SIR است که در مواجهه با شایعه به شکل منطقی عمل کرده و آنرا باور نمی‌کند، آنها را می‌توان عقل‌گرایان توصیف کرد که قبل از آزمایش، به هر شایعه ایمان نمی‌آورند. در پایان فرآیند، همه افراد پخش‌کننده به افراد منطقی تبدیل می‌شوند.

همبستگی درجه، تأثیر قابل توجهی در شبکه‌های دنیای واقعی دارد. در مدل پخش شایعه کلاسیک همچنین مدل SIR شناخته شده، تمامی یال‌ها دارای قدرت پیوند یکسان بین گره‌ها هستند؛ بنابراین، برای شبکه‌های پیچیده دنیای واقعی، مدل SIR نیاز به اصلاح دارد تا وابستگی سرعت انتشار شایعه به وزن را بر اساس قدرت پیوند بین گره‌ها در نظر بگیرد. وزن لبه‌ها، استحکام

برای ایجاد تدابیر دفاعی و پیشگیرانه، مطالعه نحوه انتشار شایعه الزامی است. مدل‌سازی انتشار شایعه منجر می‌شود تا محققان بتوانند رفتار انتشاری آن‌ها را شناسایی و پیش‌بینی نموده و ساز و کارهای دفاعی مناسبی را برای دفاع در برابر آن‌ها به‌کار گیرند. مطالعات اخیر نشان داده است که اکثر شبکه‌های دنیای واقعی مانند اینترنت، شبکه‌های اجتماعی، زیستی و سامانه‌های ارتباطی دارای خصوصیات ساختاری مشترکی مانند توزیع درجه بی‌مقیاس، خاصیت دنیای کوچک و خاصیت ناهمگنی^۵ هستند [۶ و ۷]. این شبکه‌ها اغلب به‌عنوان شبکه‌های مستقل از مقیاس شناخته می‌شوند. مدل‌سازی انتشار شایعه در شبکه‌های بی‌مقیاس به ما کمک می‌کند تا فهم دقیق‌تری از پویایی انتشار شایعه داشته باشیم و روش‌های دفاعی مناسبی را ارائه دهیم.

مشهورترین شبکه‌ها، شبکه کامپیوتری هستند که همواره با چالش‌هایی همراه‌اند. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها امنیت و جلوگیری از نفوذ است. در مرجع [۸] با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی به تشخیص نفوذ در شبکه پرداخته است.

در این مقاله، بر اساس مدل همه‌گیری مستعد^۶ (S)، در معرض شایعه^۷ (E)، شایعه‌پراکن یا آلوده^۸ (I)، مقابله‌کننده^۹ (C) و بازیابی شده (R) (SEICRS^{۱۰})، به مدل‌سازی انتشار شایعه در شبکه بی‌مقیاس، شبکه‌های دنیای کوچک و شبکه‌های تصادفی،

¹ Susceptible

² Exposed

³ Infected

⁴ Recovered

⁵ Heterogeneity

⁶ Susceptible

⁷ Exposed

⁸ Infected

⁹ Counterattack

¹⁰ Susceptible-Exposed-Infected-Counterattack-Recovered-Susceptible

¹¹ Renren

¹² Spreader

¹³ Healthy

¹⁴ Opponent

¹⁵ Credulous

¹⁶ Rationals

روش‌های سنتی کشف شایعه بر اساس ویژگی‌ها همیشه بر ویژگی‌های استاتیک یا مسطح ناشی از محتوا، کاربران، انتشار و غیره متمرکز می‌شوند. اما اغلب اثر ساختار انتشار اطلاعات را نادیده می‌گیرد. با هدف رفع این مشکل، [۱۶] ابتدا مدل آبشار انتشار اطلاعات را در LPT (درخت انتشار برچسب گذاری شده) معرفی کرده و یک مدل بهبود یافته - درخت برچسب‌گذاری شده آبشار (CA-LPT) را ارائه می‌دهد که به ما اجازه می‌دهد تا اثر ساختار انتشار اطلاعات را در نظر بگیریم. در ادامه، به ارزیابی نفوذ کاربران با روشی پویا می‌پردازد.

بر اساس ویژگی‌های محتوایی اطلاعات، مقاله [۱۷] اول، سه ویژگی شایعه را ترکیب می‌کند: عمومیت موضوع، شدت ضربه و ابهام رویداد و یک تابع اعتماد محتوی را ایجاد می‌کند. دوم، از روش تخمین زنجیره مارکوف برای تعیین ارتباط شایعه استفاده می‌کند. مدل، مدل پیوستگی و مدل پیوسته مبتنی بر تابع اعتماد و سپس آستانه انتشار شایعه مربوطه را محاسبه می‌کند. در نهایت، از طریق شبیه‌سازی عددی، اعتبار سه ویژگی شایعه صحت یافته و اعتبار مدل اثبات می‌شود.

مقاله [۱۸] به کاستی‌های مدل سنتی SEIR می‌پردازد. در این راستا مدل SETQR را ایجاد و از قضیه احتمال استفاده می‌کند تا قانون انتشار اطلاعات را به دست آورد. در ادامه به شرح این مدل می‌پردازیم. S^2 : گره مستعد. E^3 : گره‌ای که پیام را دریافت می‌کند اما بلافاصله آنرا انتشار نمی‌دهد. T^4 : گره قابل اعتماد، گره‌ای که به پیام دریافت شده اعتقاد داشته و آنرا انتشار می‌دهد. Q^5 : گره‌ای که به اطلاعات دریافت شده اعتقاد نداشته ولی آنرا انتشار می‌دهد. R^6 : گره‌ای که مدت طولانی نیست که انتشاردهنده بوده یا به مرور زمان علاقه خود را برای انتشار از دست می‌دهد.

مقاله [۱۹] مدل SO_1O_2E را پیشنهاد داده است. در ادامه به شرح این مدل می‌پردازیم. S : گره مستعد. O_1^7 : به این معنی که فرد شایعه را انتشار می‌دهد اما به صورت غیر برخط. O_2^8 : به این معنی که فرد شایعه را انتشار می‌دهد اما به صورت برخط. E^9 : به این معنی که اشخاصی که آموزش دیده‌اند شایعه را نپذیرفته و جلوی انتشار آن را می‌گیرند.

به منظور بررسی تأثیر سکوت اجباری بر انتشاردهندگان، [۲۰] یک مدل انتشار شایعه با تابع سکوت در شبکه‌های

گره و همبستگی درجه بر آستانه گسترش شایعه تأثیر می‌گذارد. هدف اصلی مقاله [۱۱]، بررسی تأثیر همبستگی درجه در گسترش شایعه و اثربخشی راهبردهای تلقیح در شبکه‌های دنیای واقعی است.

در مدل انتشار شایعه استاندارد، هر گره به‌طور مساوی و هر لینک بین دو گره، وزن یکسانی دارد. اما در دنیای واقعی هر گره نماینده افراد است. یعنی باید با آن‌ها به ترتیب مشخص رفتار کنیم. بدین منظور در [۱۲]، دو وزن را برای یک لینک در بخش‌های مختلف در طول فرآیند پخش معرفی شده است، یکی هنگامی است که یک ناآگاه با یک پخش‌کننده را می‌بیند از طرف دیگر زمانی که یک پخش‌کننده با یک پخش‌کننده دیگر مواجه می‌شود. هر دوی وزن‌ها برای تعامل بین دو گره متصل معتبر هستند. در مقاله همچنین به صورت تحلیلی فرآیند انتشار شایعه در شبکه جهان کوچک و شبکه بدون مقیاس شبیه‌سازی شده است.

از آنجا که شبکه اجتماعی دارای ویژگی‌های تعاملی مناسب و قوی است، انتشار اطلاعات بر روی شبکه اجتماعی می‌تواند سرعت بیشتری داشته باشد. همچنین اطلاعات نادرست و غیرقانونی زیادی را کنترل نمی‌کند. ما این اطلاعات دروغین و غیرقانونی را شایعات می‌دانیم. برای کنترل انتقال شایعه در شبکه‌های اجتماعی، یافتن گره منبع شایعه مهم است. بسیاری از کارها چگونگی پیدا کردن گره منبع شایعه را بررسی کرده‌اند، اما بیشتر مبتنی بر یک مفهوم هستند که گراف‌ها بدون وزن هستند و این حقیقت را نادیده می‌گیرند که وزن نقش مهمی در گراف‌ها دارد. در مقاله [۱۳]، یک الگوریتم شایعه وزن‌دار برای یافتن یک‌گره منبع در شبکه ارائه شده است. به‌طور خاص، ابتدا یک تعریف وزن لبه در شبکه و سپس تعریفی در مورد وزن متوسط گره ارائه شده است. در نهایت، گره‌ای که بیشینه درست‌نمایی را به‌عنوان گره منبع در شبکه‌های دارای وزن داشته باشد انتخاب می‌شود. آزمایش در شبکه‌های بدون مقیاس وزن‌دار، خاصیت الگوریتم را اثبات می‌کند.

در [۱۴]، بر اساس مدل همه‌گیری مستعد (S)، شایعه‌پراکن یا آلوده (I)، ضد حمله (C) و بازیابی شده (R) ($SICR$) به مدل‌سازی انتشار شایعه در شبکه بی‌مقیاس پرداخته شده است.

در [۱۵]، یک مدل گسترش شایعه SIDR، که یک عامل روان‌شناختی "شک" را در نظر می‌گیرد، برای مطالعه قوانین پویای شایعه پیشنهاد شده است. در این مقاله مدل SIR کلاسیک بهبود داده شده و حالت D^1 (شک یا تردید) اضافه شده که در واقع بیشتر شبیه حالت در معرض آلودگی (E) است.

² Susceptible

³ Exposed

⁴ Trusted

⁵ Questioned

⁶ Recovered

⁷ Offline

⁸ Online

⁹ Educated

- پایین بودن ضریب خوشه‌بندی

۳-۲- شبکه دنیای کوچک

شبکه با خاصیت دنیای کوچک، گراف‌های ریاضی هستند که در آنها بیشتر رأس‌ها با یکدیگر همسایه نیستند اما فاصله کمی با یکدیگر دارند. دنیای واقعی و بیشتر شبکه‌های مشاهده شده واقعی شبیه این مدل می‌باشند. از خصوصیات این شبکه‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- همگن بودن تابع توزیع درجه
- کم بودن میانگین طول مسیر
- بالا بودن ضریب خوشه‌بندی

دو مدل اصلی برای تولید شبکه‌هایی با خاصیت دنیای کوچک وجود دارد:

- مدل واتز-استوگنز^۴
- مدل نیومن-واتز^۵

در این مقاله از مدل نیومن-واتز (با احتمال اتصال برابر با ۰/۲۶) استفاده شده است.

۳-۳. شبکه بی‌مقیاس

در این شبکه‌ها رئوس با درجه‌ی بالا کم و رئوس با درجه‌ی پایین زیاد هستند. از خصوصیات این شبکه‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ناهمگن بودن تابع توزیع درجه
- کم بودن میانگین طول مسیر
- بالا بودن ضریب خوشه‌بندی

چهار مدل اصلی برای تولید شبکه‌های بی‌مقیاس وجود دارد:

- مدل باراباسی-آلبرت^۶
- مدل هولم^۷
- کلیم-ایگوئیلز^۸
- فارست-فایر^۹

در این مقاله از مدل باراباسی-آلبرت استفاده شده است.

۴- انتشار شایعه

در فرآیند انتشار همه‌گیری، گره‌ها در یکی از حالات مستعد^{۱۰}

اجتماعی آنلاین پیشنهاد کرده است. مدلی که در این مقاله ارائه شده است SAIR می‌باشد که نماد A به معنای شخصی است که شایعه را باور نکرده و آنرا بازنشر نمی‌دهد.

در [۲۱] پنج بخش را برای توصیف حالت‌های مختلف کاربران در سیستم عامل معرفی شده است. S: کاربری که هنوز شایعه‌پراکن یا آلوده نشده است، را نشان می‌دهد. حالات آلوده I₁ و I₂، کاربرانی که شایعه یا حقیقت را باور دارد، بیان می‌کند. Q: کاربری که از حالت I₁ به‌طور موقت مسدود شده است و از این طریق نمی‌تواند در روند پخش شرکت کند، را نشان می‌دهد. R: بیانگر کاربری است که دیگر علاقه‌ای به گسترش شایعه یا حقیقت ندارد.

به‌منظور بهبود مدل SEIR، مرجع [۲۲] یک مدل انتشار شایعه با عنوان iSEIR پیشنهاد کرده است. حالت I² (فرد خاص) به مدل پایه اضافه شده است. رفتارهای خاص فردی در اپیدمی بیماری مشاهده شده است که دو نوع از این رفتارها بدین شکل است: یکی مربوط به تلاش‌های افراد مبتلا برای سرکوب این بیماری از طریق کاهش سطح تماس با بقیه جمعیت و دیگری حفاظت از خود از افراد مستعد است. رفتارهای خاص فردی در گسترش شایعه نیز امری قابل قبول به نظر می‌رسد. بنابراین نویسندگان یک چارچوب احتمال را برای مدل SEIR برای مدل‌سازی چنین رفتارهایی در گسترش شایعه پیشنهاد داده‌اند.

۳- شبکه‌های پیچیده

شبکه‌ای شامل مجموعه‌ای از رئوس و یال‌ها با خصوصیات توپولوژیکی پراهمیت، که نه کاملاً تصادفی محسوب می‌شود و نه می‌توان آن را کاملاً منظم در نظر گرفت. شبکه‌های پیچیده در حال حاضر در بسیاری از زمینه‌های علوم مورد مطالعه قرار می‌گیرند. بدون شک بسیاری از سامانه‌های طبیعی می‌توانند توسط مدل‌هایی از شبکه‌های پیچیده شرح داده شوند، که ساختار آنها تشکیل شده از تعدادی گره و یال است [۲۳].

۳-۱- شبکه تصادفی

گرافی که در طول یک فرایند تصادفی ایجاد شود را گراف تصادفی گویند. گراف‌های تصادفی اولین بار توسط اردش رنی^۳ مورد مطالعه قرار گرفتند. از خصوصیات این شبکه‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- همگن بودن تابع توزیع درجه
- کم بودن میانگین طول مسیر

⁴ Watts-Strogatz

⁵ Newman-Watts

⁶ Barabási-Albert

⁷ Holme

⁸ Klemm-Eguiluz

⁹ Forest-Fire

¹⁰ Susceptible

¹ Quarantined

² individual-specific

³ Erdos-Rényi

هم کاربرد دارد و بر اساس همین ایده به تغییر حالت این گره‌ها پرداخته شده است.

۵-۱- توصیف مدل

در این مقاله، با استفاده از مدل همه‌گیری SEIRS: مستعد (S)، در معرض شایعه (E)، شایعه‌پراکن (I) و بازیابی شده (R) با در نظر گرفتن فرضیات زیر به مدل‌سازی انتشار شایعه در شبکه بی‌مقیاس پرداخته شد: ۱- گره مقابله‌کننده (C) به مدل اضافه می‌شود. ۲- گره در معرض شایعه (E) به دو حالت E_1 و E_2 تبدیل می‌شود. جزئیات حالات و پارامترهای مدل در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول (۱): نمادهای مدل.

| نماد | توصیف |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| $S_k(t)$ | چگالی افراد مستعد با درجه k در زمان t. |
| $E1_k(t)$ | چگالی افراد در معرض شایعه کم با درجه k در زمان t. |
| $E2_k(t)$ | چگالی افراد در معرض شایعه زیاد با درجه k در زمان t. |
| $I_k(t)$ | چگالی افراد شایعه‌پراکن با درجه k در زمان t. |
| $C_k(t)$ | چگالی افرادی که ساز و کار مقابله‌کننده دارند، با درجه k در زمان t. |
| $R_k(t)$ | چگالی افراد مصون و یا بازیابی شده با درجه k در زمان t. |
| λ | متناسب با نرخ انتشار شایعه |
| β | احتمال از بین رفتن زمان نهفتگی برای گره‌های نهفته و یا در معرض شایعه |
| γ | متناسب با نرخ بازیابی از شایعه‌پراکن |
| α | متناسب با نرخ از بین رفتن گره‌های بازیابی شده |
| θ | متناسب با نرخ تبدیل گره مستعد به مقابله‌کننده |
| Λ | متناسب با نرخ الحاق گره جدید به شبکه که گره جدید در حالت مستعد قرار می‌گیرد. |
| μ | متناسب نرخ مرگ (نرخ ترک کردن از شبکه) که در هریک از حالات S, E, I, C و R ممکن است رخ دهد |

در هر زمان هر یک از گره‌های شبکه می‌توانند در یکی از این پنج وضعیت باشند که در ادامه، توصیف آنها قابل مشاهده است:

(۱) مستعد (S): گره‌هایی که در این وضعیت قرار دارند، اگر در مجاورت گره شایعه‌پراکن (I) قرار بگیرند، شایعه‌پراکن می‌شوند. (مستعد، شبیه وضعیت ناآگاه^۳ در مدل انتشار شایعه است.)

(۲) در معرض شایعه (E): گره‌ها در این حالت در معرض شایعه قرار دارند اما معمولاً علائم قابل توجهی را نشان نمی‌دهند. یعنی غیرفعال هستند و اگر یک شایعه را بشنوند، نه آنرا باور کرده، نه رد کرده و نه آنرا انتشار می‌دهند. (در معرض شایعه، شبیه وضعیت کمین‌گر^۴ در مدل انتشار شایعه است.)

(S)، در معرض آلودگی (شایعه)^۱ (E)، آلوده (شایعه‌پراکن)^۲ (I) و بازیابی شده (R) قرار می‌گیرند[۴]. در حالت مستعد، گره‌ها آسیب‌پذیر به آلودگی (شایعه) هستند ولی هنوز آلوده (شایعه‌پراکن) نشده‌اند. در حالت در معرض آلودگی، گره‌های مستعد به وسیله همسایه آلوده (شایعه‌پراکن) خود، آلوده شده‌اند ولی آلودگی را منتشر نکرده‌اند به عبارتی غیرفعال هستند. در حالت آلوده، گره‌های آلوده شده قادر به حمله به همسایگان مستعد خود هستند و آلودگی را منتشر می‌کنند. در حالت بازیابی شده، گره‌های شایعه‌پراکن بازیابی می‌شوند و دیگر قادر به شایعه‌پراکنی نیستند. بنابراین، اغلب مدل‌های همه‌گیری شناختی رایج عبارت‌اند از: مدل SI، مدل SIS و مدل SIR.

مدل انتشار شایعه بسیار شبیه به مدل انتشار همه‌گیر است. در مدل انتشار همه‌گیر هدف جلوگیری و کنترل بیماری از همه‌گیر شدن است. در مدل انتشار شایعه هدف سرعت بخشیدن به عدم انتشار شایعه در جامعه یا کند کردن روند انتشار شایعه می‌باشد. در این مدل افراد به سه دسته تقسیم می‌شوند:

$$I(i) + S(j) \xrightarrow{\lambda} S(i) + S(j) \quad \text{نا آگاه (I)}$$

$$S(i) + S(j) \xrightarrow{\alpha} R(i) + S(j) \quad \text{پخش‌کننده (S)}$$

$$S(i) + R(j) \xrightarrow{\alpha} R(i) + R(j) \quad \text{متوقف‌کننده (R)}$$

- یک شخص ناآگاه در مجاورت با یک شخص شایعه‌پراکن به شایعه‌پراکن تبدیل می‌شود.
- دو شخصی که شایعه‌پراکن هستند، اگر در مجاورت با یکدیگر قرار گیرند، یکی از آنها به متوقف‌کننده تبدیل می‌شود.
- یک شخص شایعه‌پراکن در مجاورت با یک شخص متوقف‌کننده به متوقف‌کننده تبدیل می‌شود.

۵- مدل پیشنهادی SE₁E₂CIRS

در این بخش به مدل‌سازی و تحلیل مدل انتشار همه‌گیری پیشنهاد شده در شبکه بی‌مقیاس پرداخته شده است. برای بررسی پویایی انتشار شایعه در شبکه‌های بی‌مقیاس، سیستم مبتنی بر یک مدل، تحت آزمایش قرار داده شده است. در مدل پیشنهادی شبکه‌های تصادفی، دنیای کوچک و بی‌مقیاس ساخته می‌شوند، همچنین گره در معرض شایعه به این صورت شایعه‌پراکن می‌شود که باید تعداد افراد شایعه‌پراکن در همسایگی آن از یک حدی بیشتر باشند تا اصطلاحاً فرد شایعه را باور کند. پس تعداد همسایگان شایعه‌پراکن هر گره مستعد را شمرده و بر اساس یک آستانه تصمیم گرفته می‌شود که این گره شایعه‌پراکن شود یا نه؟ این روند برای گره‌های در معرض شایعه و مقابله‌کننده

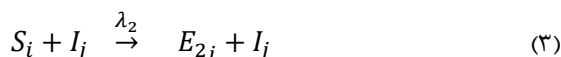
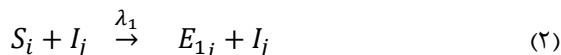
³ Ignorant

⁴ lurker

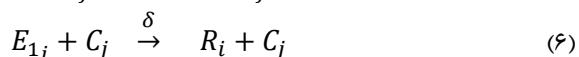
¹ Exposed

² Infected

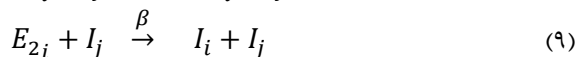
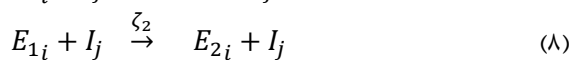
مشخصی رسید، آنگاه شایعه را باور می‌کند. همچنین این امکان وجود دارد که گره مستعد در مواجهه با گره شایعه‌پراکن به حالت مقابله‌کننده برود (معادله ۴) (با نرخ θ).



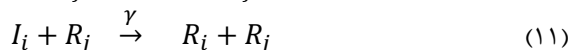
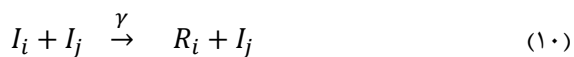
• در مدل پیشنهادی، یک حالت دیگر هم اضافه شده، این حالت برای افرادی در نظر گرفته شده که در جامعه، یک شایعه را می‌شنوند، در مقابل آن موضع گرفته، آنرا باور نکرده، جلوی انتشار شایعه را گرفته و همچنین باعث تغییر نظر افراد شایعه‌پراکن می‌شوند (حداقل یکی از همسایگان خود را از حالت شایعه‌پراکن به حالت مستعد تبدیل می‌کنند). یک فرد شایعه‌پراکن یا آلوده در مواجهه با یک فرد مقابله‌کننده به حالت بازیابی شده تبدیل می‌شود (معادله ۵) (با نرخ ζ). همچنین این امکان وجود دارد که یک مقابله‌کننده، در مواجهه با یک فرد در معرض شایعه قرار بگیرد که در این حالت فرد در معرض شایعه را به حالت بازیابی شده تبدیل می‌کند (معادله ۶) (با نرخ δ).



• اگر تعداد همسایه‌های شایعه‌پراکن یک فرد در معرض شایعه نوع اول، به حدنصاب رسید، به حالت در معرض آلودگی نوع دوم (E_2) می‌رود (معادله ۸) (با نرخ ζ_2). و اگر این شرط برقرار نبود به حالت بازیابی (R)، تغییر حالت می‌دهد (معادله ۷) (با نرخ ζ_1). با ادامه این روند اگر یک گره در حالت در معرض شایعه نوع دوم در مواجهه با فرد شایعه‌پراکن قرار داشته باشد، آنگاه شایعه‌پراکن می‌شود (معادله ۹) (با نرخ β).



• اگر یک فرد شایعه‌پراکن در مواجهه با یک فرد شایعه‌پراکن دیگر یا فرد بازیابی شده قرار بگیرد، به حالت بازیابی شده تبدیل می‌شود (معادلات ۱۰ و ۱۱). (با نرخ γ).



(۳) شایعه‌پراکن (I): گره‌هایی که در این وضعیت قرار دارند، شایعه‌پراکن هستند. (شایعه‌پراکن، شبیه وضعیت پخش‌کننده^۱ در مدل انتشار شایعه است).

(۴) مقابله‌کننده (C): گره‌هایی که در این وضعیت هستند، حالت ضد حمله دارند. این حالت برای افرادی در نظر گرفته شده که در جامعه، یک شایعه را می‌شنوند، در مقابل آن موضع گرفته، آنرا باور نکرده، جلوی انتشار شایعه را گرفته و همچنین باعث تغییر نظر افراد شایعه‌پراکن می‌شوند.

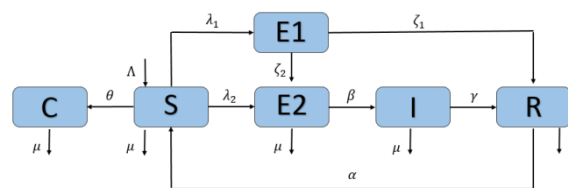
(۵) بازیابی شده (R): گره‌هایی که در این وضعیت قرار دارند، از حالت شایعه‌پراکن پاک شده‌اند، این حالت برای افرادی در نظر گرفته شده که در جامعه شایعه را شنیده و به آن باور داشته اما تمایل خود را به انتشار آن از دست می‌دهند. (بازیابی شده، شبیه وضعیت پخش‌کننده^۲ در مدل انتشار شایعه است).

با فرض اینکه تراکم جمعیت گره‌ها در هر زمان ثابت است، یعنی

$$N_{k,f}(t) = S_k(t) + I_k(t) + R_k(t) + C_k(t) + E1_k(t) + E2_k(t) \quad (1)$$

در مدل پیشنهادی، گره‌ها در طی انتشار شایعه در یکی از حالت‌های مستعد، در معرض شایعه نوع ۱، در معرض شایعه نوع ۲، شایعه‌پراکن، مقابله‌کننده و بازیابی شده قرار می‌گیرند. نمودار انتقال شایعه بین حالت‌های I، E₁، E₂، C، S، R در مدل پیشنهاد شده مطابق دستورالعمل زیر است:

همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است:



شکل (۱): نمودار انتقال حالت مدل انتشار شایعه SE_1E_2ICRS

• زمانی که گره مستعد، تحت حمله همسایه شایعه‌پراکن خود قرار می‌گیرد، مستقیماً به حالت شایعه‌پراکن نمی‌رود بلکه ابتدا به حالت، در معرض شایعه نوع اول (E_1) رفته (معادله ۲) (با نرخ λ_1) و اگر تعداد همسایه‌های شایعه‌پراکن (I) آن به حدنصاب رسید، به حالت در معرض شایعه نوع دوم (E_2) می‌رود (معادله ۳) (با نرخ λ_2). در واقع با این استدلال که یک شخص در مجاورت با شخص شایعه‌پراکن در ابتدا شایعه را باور نکرده، به حالت در معرض شایعه رفته و پس از آن اگر تعداد افراد شایعه‌پراکن به حد

¹ spreader

² stifler

۵-۲- فرضیات مدل

در مدل‌سازی انتشار شایعه در شبکه بی‌مقیاس، می‌توان فرضیات زیر را در نظر گرفت:

- همبندی شبکه تصادفی، بر اساس شبکه اردش-رنی است.
- همبندی شبکه دنیای کوچک، بر اساس شبکه نیومن-واتز است.
- همبندی شبکه بی‌مقیاس، بر اساس شبکه باراباسی-آلبرت با در نظر گرفتن پارامتر $m=2$ است.
- تعداد گره‌های مستعد و آلوده قابل تنظیم است.
- می‌توان با استفاده از تنظیم‌کننده‌ها تمامی ضرایب موجود در معادلات را تنظیم کرد.
- جمعیت کل گره‌های شبکه، ثابت و برابر با صد گره است.
- در ابتدا، تمام گره‌ها مستعد هستند. در ادامه به شکل تصادفی ۱۰ گره را آلوده می‌کنیم. همچنین یک درصد (۱٪) از گره‌های شبکه را به حالت مقابله‌کننده، تبدیل می‌کنیم.
- تغییر پویایی همبندی شبکه در طول فرآیند انتشار در نظر گرفته می‌شود و نرخ مرگ برابر با نرخ تولد است ($\Lambda = \mu$). برای هر گره نرخ مرگ یکسان است.

۵-۳- فرموله‌سازی مدل

برای بررسی پویایی انتشار اطلاعات با توجه به روند انتشار شایعه، یک مدل ریاضی از سیستم معرفی و به‌صورت تحلیلی حل و شبیه‌سازی شده است. در ادامه، مدل تحلیلی برای مدل‌سازی انتشار اطلاعات را معرفی می‌کنیم. شایعه‌پراکن بودن هر گره متناسب با درجه (k) است، بنابراین، سرعت انتشار شایعه برابر با λk و معادلات ۱۳ تا ۱۸ به ترتیب نشان‌دهنده تغییرات گره‌ها برای حالات S, E_1, E_2, I, R خواهد بود.

$$\psi_k(t) = \frac{k}{\langle K \rangle} \sum_i P(i) I_i(t) \quad (12)$$

$$\frac{\partial S_k(t)}{\partial t} = \Lambda + \alpha R_k(t) - S_k(t)\psi_k(t)(\lambda_1 + \lambda_2 + \theta) - \mu S_k(t) \quad (13)$$

$$\frac{\partial E_{1k}(t)}{\partial t} = \lambda_1 S_k(t)\psi_{k,f}(t) - \zeta_2 E_{1k}(t) - \zeta_1 E_{1k}(t)C_k(t) - \mu E_{1k}(t) \quad (14)$$

$$\frac{\partial E_{2k}(t)}{\partial t} = \lambda_2 S_k(t)\psi_k(t) + \zeta_2 E_{1k}(t) - \beta E_{2k}(t) - \mu E_{2k}(t) \quad (15)$$

$$\frac{\partial I(t)}{\partial t} = \beta E_{2k}(t)I_k(t) - \gamma I_k(t)(I_k(t) +$$

$$R_k(t)) - \mu I_k(t) \quad (16)$$

$$\frac{\partial R(t)}{\partial t} = \gamma I_k(t)(I_k(t) + R_k(t)) + \zeta_1 E_{1k}(t)C_k(t) - \alpha R_k(t) - \mu R_k(t) \quad (17)$$

$$\frac{\partial C(t)}{\partial t} = \theta S_k(t)I_k(t) - \mu C_k(t) \quad (18)$$

۵-۴- تحلیل مدل

در این قسمت به تحلیل پویایی مدل SE_1E_2CIRS می‌پردازیم. نسبت بازتولید^۱ (R_0)، یک پارامتر مهم در همه‌گیری محسوب می‌شود که برابر با میانگین تعداد آلودگی‌های ثانویه ناشی شده از یک آلودگی اولیه، در طول چرخه حیات آلودگی است [۲۵]. این پارامتر برای بررسی رفتار پویایی مدل استفاده می‌شود و معین می‌کند که آیا همه‌گیری در شبکه رخ داده است یا خیر. به‌طور کلی، اگر مقدار R_0 کمتر از یک باشد آنگاه آلودگی (شایعه) در شبکه از بین رفته است. در غیر این‌صورت، اگر مقدار R_0 بزرگ‌تر از یک باشد آنگاه آلودگی در شبکه پایدار است و همه‌گیری رخ داده است [۲۶].

قضیه ۱:

اگر $R_0 < 1$ باشد آنگاه آلودگی هر گره جدید از میانگین تعداد آلودگی‌های ثانویه کمتر است و مدل به یک نقطه تعادل فاقد آلودگی می‌رسد. بنابراین، یک نقطه تعادل فاقد آلودگی^۲ داریم (معادله ۱۹).

$$E_0\{(S_k^\infty, C_k^\infty, I_k^\infty, R_k^\infty, E_{1k}^\infty, E_{2k}^\infty)\} = (1, 0, 0, 0, 0, 0) \quad (19)$$

اگر $R_0 > 1$ باشد آنگاه آلودگی در مدل منتشر می‌شود و به یک تعادل در همه‌گیری می‌رسیم (معادله ۲۰) (حالت پایدار در همه‌گیری^۳)

$$E_1\{(S_k^\infty, C_k^\infty, I_k^\infty, R_k^\infty, E_{1k}^\infty, E_{2k}^\infty)\} = (S_k^*, C_k^*, I_k^*, R_k^*, E_{1k}^*, E_{2k}^*) \quad (20)$$

اثبات:

برای پیدا کردن نقاط تعادل، حالت پایدار مدل را در نظر می‌گیریم و سمت راست معادلات مدل را برابر با صفر قرار می‌دهیم.

$$\frac{dS_k(t)}{dt} = 0, \frac{dE_{1k}(t)}{dt} = 0, \frac{dE_{2k}(t)}{dt} = 0, \frac{dI_k(t)}{dt} = 0, \frac{dR_k(t)}{dt} = 0, \frac{dC_k(t)}{dt} = 0$$

¹ Reproductive Ratio

² Rumor-Free Equilibrium

³ Endemic Equilibrium

$$F = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial E1} (\lambda_1 S \psi) & \frac{\partial}{\partial E1} (\lambda_2 S \psi) & \frac{\partial}{\partial E1} (0) \\ \frac{\partial}{\partial E2} (\lambda_1 S \psi) & \frac{\partial}{\partial E2} (\lambda_2 S \psi) & \frac{\partial}{\partial E2} (0) \\ \frac{\partial}{\partial I} (\lambda_1 S \psi) & \frac{\partial}{\partial I} (\lambda_2 S \psi) & \frac{\partial}{\partial I} (0) \end{bmatrix}$$

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \lambda_1 S \psi & \lambda_2 S \psi & 0 \end{bmatrix}$$

$$A = f S_k^\infty \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ \dots \\ n \end{bmatrix} [1p(n) \quad 2p(n) \quad \dots \quad np(n)]$$

بنابراین، ماتریس F بعد از در نظر گرفتن A، به شکل زیر تغییر می‌کند:

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \lambda_1 A & \lambda_2 A & 0 \end{bmatrix}$$

همچنین ماتریس V به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$V = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial E1} (qE1) & \frac{\partial}{\partial E1} (wE2) & \frac{\partial}{\partial E1} (eI) \\ \frac{\partial}{\partial E2} (qE1) & \frac{\partial}{\partial E2} (wE2) & \frac{\partial}{\partial E2} (eI) \\ \frac{\partial}{\partial I} (qE1) & \frac{\partial}{\partial I} (wE2) & \frac{\partial}{\partial I} (eI) \end{bmatrix}$$

که در ماتریس V، ضرایب q، w و e به ترتیب به صورت معادلات (۲۱-۲۳) می‌باشند:

$$q = \zeta_2 + \zeta_1 C + \mu \quad (21)$$

$$w = -\zeta_2 E1 + (\beta + \mu) \quad (22)$$

$$e = -\beta E2 + (\gamma + \mu) \quad (23)$$

بنابراین، ماتریس V به صورت زیر خواهد بود:

$$V = \begin{bmatrix} (\zeta_2 + \zeta_1 C + \mu) & -\zeta_2 & 0 \\ 0 & (\beta + \mu) & -\beta \\ 0 & 0 & (\gamma + \mu) \end{bmatrix}$$

در وضعیت فاقد آلودگی ماتریس V به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$V = \begin{bmatrix} (\zeta_2 + \mu) & -\zeta_2 & 0 \\ 0 & (\beta + \mu) & -\beta \\ 0 & 0 & (\gamma + \mu) \end{bmatrix}$$

$$V = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & 0 \\ 0 & b_2 & b_3 \\ 0 & 0 & c_3 \end{bmatrix}$$

در این مرحله به محاسبه V^I می‌پردازیم:

در وضعیت فاقد آلودگی و در حالت پایدار مقادیر $C_k^\infty, I_k^\infty, R_k^\infty, E1_k^\infty, E2_k^\infty$ برابر با صفر است و از آنجا که نرخ مرگ برابر با نرخ تولد است ($\Lambda = \mu$) بنابراین، $S_k^\infty = 1$ است. همچنین با محاسبات ساده، نقاط تعادل در حالت پایدار در همه‌گیری نیز به دست می‌آید.

یکی از مفاهیم مهم در انتشار همه‌گیری، نسبت بازتولید اولیه (R_0) است که برابر با میانگین تعداد آلودگی‌های ثانویه ناشی شده از یک آلودگی اولیه، در طول چرخه حیات آلودگی شایعه است. با توجه به آستانه نسبت بازتولید، رفتار پویای مدل بررسی و معین می‌شود که آیا همه‌گیری در شبکه رخ داده است یا خیر.

در این مقاله، برای محاسبه R_0 از روش نسل-بعد^۱ استفاده شده است. R_0 به وسیله شعاع طیفی عملگر نسل-بعد به دست می‌آید $R_0 = \rho(FV^{-1})$. شعاع طیفی ماتریس G برابر با $\rho(G)$ است. ماتریس F، حالت آلوده جدید و ماتریس V حالت گذر از آلودگی را معین می‌کند. برای محاسبه نسبت بازتولید، مراحل زیر باید انجام شود:

- محاسبه دو پارامتر ترم‌های اضافه شده^۲ و ترم‌های از دست داده^۳ حالات E_1, E_2 و I
 - محاسبه نقطه تعادل فاقد آلودگی.
 - فهرست کردن ترم‌های اضافه شده و از دست داده برای هر کلاس.
 - محاسبه ماتریس F با استفاده از ترم‌های اضافه شده و محاسبه نقطه‌ی تعادل فاقد آلودگی
 - محاسبه ماتریس V با استفاده از ترم‌های از دست داده و محاسبه نقطه‌ی تعادل فاقد آلودگی
 - محاسبه ماتریس معکوس V
 - محاسبه ماتریس G بدین شکل: $G = FV^{-1}$
 - بزرگ‌ترین مقدار ویژه از ماتریس G برابر با R_0 است.
- با توجه به معادلات (۱۳-۱۵) فهرست ترم‌های اضافه شده و از دست داده به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\begin{bmatrix} \lambda_1 S \psi \\ \lambda_2 S \psi \\ 0 \\ (\zeta_2 + \zeta_1 C + \mu)E1 \\ -\zeta_2 E1 + (\beta + \mu)E2 \\ -\beta E2 + (\gamma + \mu)I \end{bmatrix}$$

بنابراین، ماتریس F به صورت زیر به دست می‌آید:

¹ next-generation

² Gain terms

³ Loss terms

$$R_0 = \frac{\zeta_2 \beta \lambda_1 \langle K^2 \rangle}{(\zeta_2 + \mu) * (\beta + \mu) * (\gamma + \mu) K} + \frac{\beta \lambda_2 \langle K^2 \rangle}{((\beta + \mu) * (\gamma + \mu)) K} \quad (28)$$

و پس از ساده‌سازی معادله (۲۸) نشان‌دهنده R_0 خواهد بود.

$$R_0 = \frac{[\zeta_2 \beta \lambda_1 + \beta \lambda_2 (\zeta_2 + \mu)] \langle K^2 \rangle}{(\zeta_2 + \mu) * (\beta + \mu) * (\gamma + \mu) K} \quad (29)$$

۶- نتایج و بحث

در ابتدا با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌ساز نتلوگو^۱ به شبیه‌سازی مدل پیشنهادی بر روی هر سه نوع شبکه پرداختیم. این نرم‌افزار توسط یوری ویلنسکی^۲ و بر اساس زبان لوگو^۳ ساخته شده و جهت انجام کارهای شبیه‌سازی کامپیوتری، بهینه‌سازی شده است. از ویژگی‌های این زبان برنامه‌نویسی، نزدیکی زبان آن به مکالمات روزمره (انگلیسی) است که این کار، برنامه‌نویسی را برای افرادی غیر از رشته‌های مرتبط با کامپیوتر، آسان می‌کند. از سوی دیگر، به دلیل متن باز بودن و رایگان بودن از محبوبیت خوبی برخوردار است.

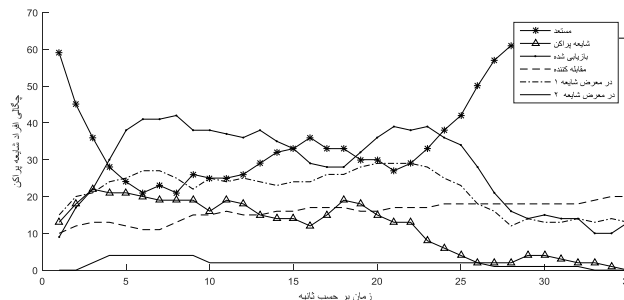
۶-۱- شبیه‌سازی شبکه دنیای کوچک

طبق جدول (۴)، احتمال اتصال برای هر یال جدید ۰/۲۶ می‌باشد، یعنی به احتمال ۰/۲۶ بین دو گره اتصال برقرار می‌شود.

جدول (۴): پارامترهای شبکه دنیای کوچک.

| مقدار | پارامتر |
|-------|------------------|
| ۱۰۰ | تعداد رأس |
| ۰/۲۶ | احتمال اتصال |
| ۰/۲۲ | ضریب خوشه‌بندی |
| ۴/۱۱ | میانگین طول مسیر |

با توجه به خصوصیات شبکه دنیای کوچک، همگن بودن و ضریب خوشه‌بندی بالا، طبق انتظار، شایعه با سرعت نسبتاً بالایی منتشر شده و با سرعت نسبتاً پایینی از بین می‌رود (شکل ۲).



شکل (۲): نمودار تغییر حالت شبکه دنیای کوچک با $\theta = 0.08, \lambda_1 = 0.2, \lambda_2 = 0.3, \zeta_1 = 0.2, \zeta_2 = 0.15, \beta = 0.4, \gamma = 0.2, \alpha = 0.1$

$$V^{-1} = \begin{bmatrix} 1/a_2 & -a_2/(a_1 * b_2) & (a_2 * b_3)/(a_1 * b_2 * c_3) \\ 0 & 1/b_2 & -b_3/(b_2 * c_3) \\ 0 & 0 & 1/c_3 \end{bmatrix}$$

پس از محاسبه ماتریس‌های F و V^{-1} به محاسبه ماتریس G می‌پردازیم.

$$G = FV^{-1} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ z & x & c \end{bmatrix}$$

که در ماتریس G ، مقادیر z, x و c به ترتیب به صورت معادلات ۲۴ تا ۲۶ می‌باشند:

$$z = d_1/a_1 \quad (24)$$

$$x = d_2/b_2 - (a_2 * d_1)/(a_1 * b_2) \quad (25)$$

$$c = (a_2 * b_3 * d_1)/(a_1 * b_2 * c_3) - (b_3 * d_2)/(b_2 * c_3) \quad (26)$$

بزرگ‌ترین مقدار ویژه ماتریس G که معادل R_0 می‌باشد به صورت معادله (۲۷) است:

$$R_0 = (a_2 * b_3 * d_1)/(a_1 * b_2 * c_3) - (b_3 * d_2)/(b_2 * c_3) \quad (27)$$

در جدول (۳) معادل هر یک از متغیرهای استفاده‌شده، قابل مشاهده است.

جدول (۳): متغیرهای استفاده‌شده به همراه معادل آنها.

| معادل متغیر | نام متغیر |
|-----------------|-----------|
| $\zeta_2 + \mu$ | a_1 |
| $-\zeta_2$ | a_2 |
| $\beta + \mu$ | b_2 |
| $-\beta$ | b_3 |
| $\gamma + \mu$ | c_3 |
| $\lambda_1 A$ | d_1 |
| $\lambda_2 A$ | d_2 |

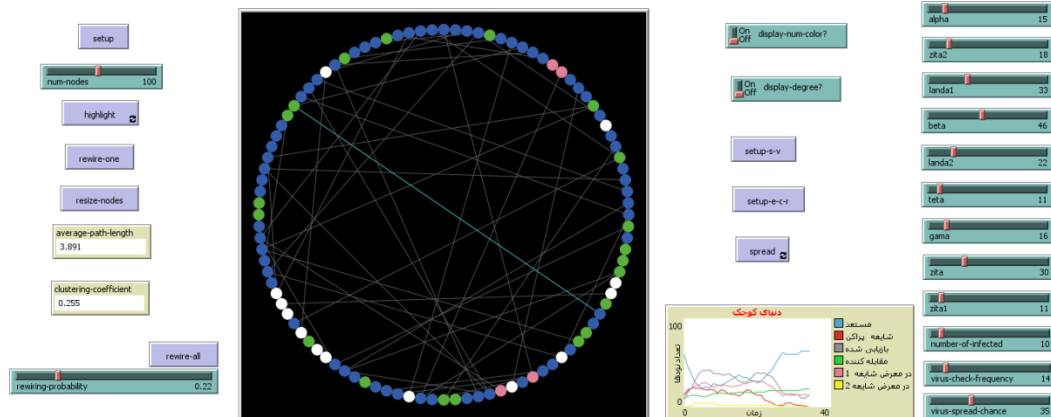
پس از انجام عملیات جایگزینی، R_0 به صورت معادله (۲۸) به‌دست می‌آید:

¹ Netlogo

² Uri Wilensky

³ Logo

هستیم. در شکل (۳) تصویر نرم‌افزار نتلوگو برای شبکه دنیای کوچک آورده شده است.



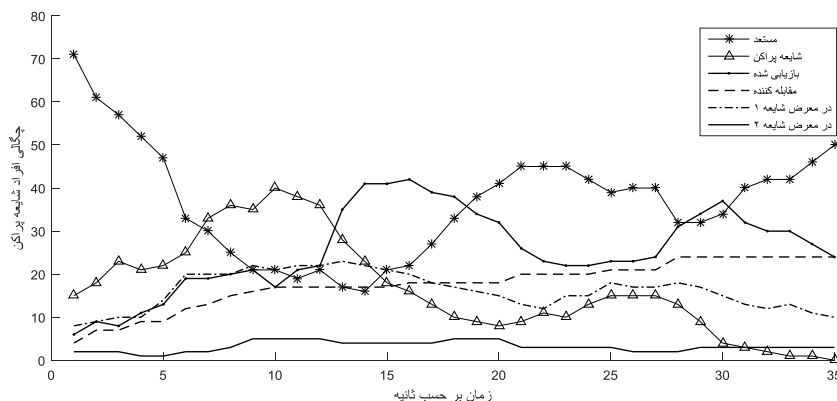
شکل (۳): تصویر نرم‌افزار نتلوگو برای شبکه دنیای کوچک.

۲-۶- شبیه‌سازی شبکه تصادفی

جدول (۵): پارامترهای شبکه تصادفی.

| پارامتر | مقدار |
|------------------|-------|
| تعداد رأس | ۱۰۰ |
| تعداد اتصال (m) | ۲ |
| ضریب خوشه‌بندی | ۰/۰۶ |
| میانگین طول مسیر | ۴/۴۶ |

طبق جدول (۵)، تعداد اتصال برای هر گره جدید ۲ است، یعنی گره جدید به‌طور تصادفی می‌تواند با ۲ گره دیگر اتصال برقرار کند. با توجه به خصوصیات شبکه تصادفی، همگن بودن و ضریب خوشه‌بندی پایین، طبق انتظار، شایعه با سرعت بسیار پایینی منتشر شده و با سرعت بالایی از بین می‌رود (شکل (۴)).



شکل (۴): نمودار تغییر حالت شبکه تصادفی با $\theta = 0.08, \lambda_1 = 0.2, \lambda_2 = 0.3, \zeta_1 = 0.2, \zeta_2 = 0.15, \beta = 0.4, \gamma = 0.2, \alpha = 0.1$

جدول (۶): پارامترهای شبکه بی‌مقیاس.

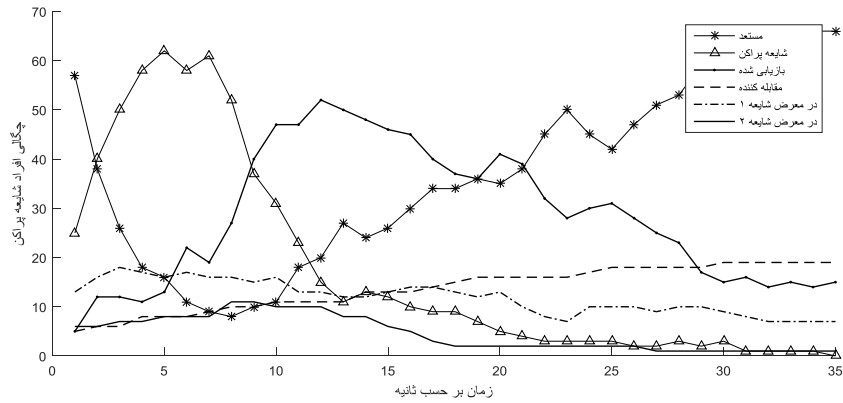
| پارامتر | مقدار |
|------------------|-------|
| تعداد رأس | ۱۰۰ |
| تعداد اتصال (m) | ۲ |
| ضریب خوشه‌بندی | ۰/۳ |
| میانگین طول مسیر | ۴/۰۵ |

در شکل (۴) آلودگی یا همان شایعه در شبکه تصادفی به صفر رسیده و حالت فاقد آلودگی را شاهد هستیم.

۳-۶- شبیه‌سازی شبکه بی‌مقیاس

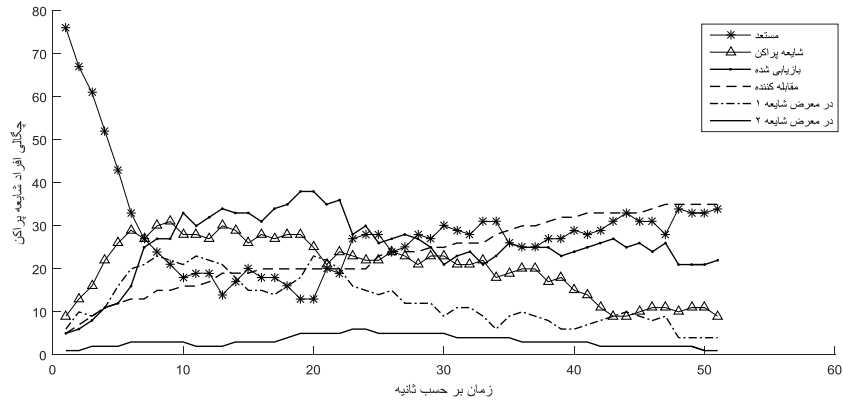
با توجه به خصوصیات شبکه بی‌مقیاس، ناهمگن بودن و ضریب خوشه‌بندی بالا، طبق انتظار، شایعه با سرعت بسیار بالایی منتشر شده و با سرعت پایینی از بین می‌رود (شکل (۵)).

طبق جدول (۶)، تعداد اتصال برای هر گره جدید ۲ است، یعنی گره جدید مطابق با اصل اتصال ترجیحی می‌تواند با ۲ گره دیگر اتصال برقرار کند.



شکل (۵): نمودار تغییر حالت شبکه بی مقیاس با $\theta = 0.08, \lambda_1 = 0.2, \lambda_2 = 0.3, \zeta_1 = 0.2, \zeta_2 = 0.15, \beta = 0.4, \gamma = 0.2, \alpha = 0.1$

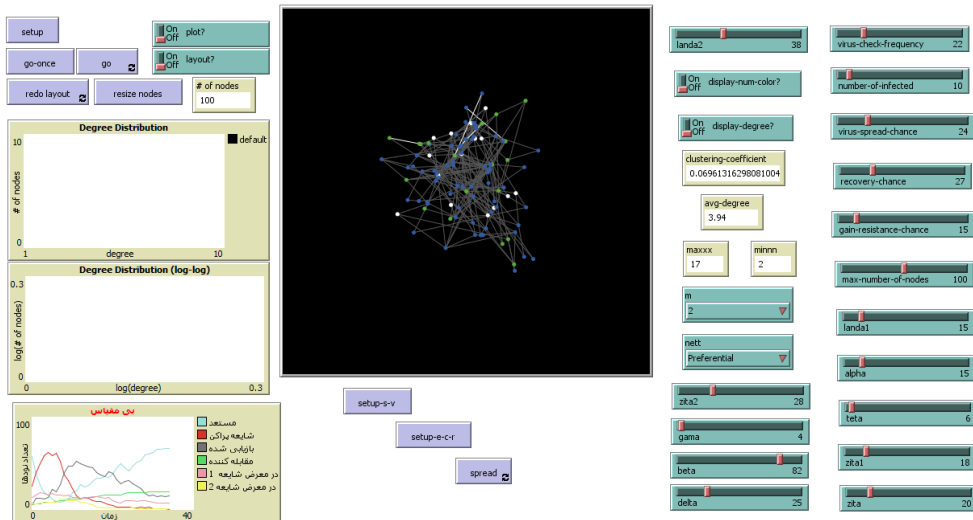
در شکل (۵) آلودگی یا همان شایعه در شبکه بی مقیاس به صفر رسیده و حالت فاقد آلودگی را شاهد هستیم.



شکل (۶): نمودار تغییر حالت شبکه بی مقیاس با $\theta = 0.09, \lambda_1 = 0.2, \lambda_2 = 0.3, \zeta_1 = 0.2, \zeta_2 = 0.15, \beta = 0.7, \gamma = 0.1, \alpha = 0.15$

شبکه بی مقیاس و تصادفی (با انتخاب از منوی net) آورده شده است.

در شکل (۶) با تغییر پارامترها به حالتی رسیدیم که در شبکه بی‌مقیاس شایعه بر طرف نشده و به صفر نرسیده و انتشار همه‌گیری رخ داده است. در شکل (۷) تصویر نرم‌افزار نتلوگو برای



شکل (۷): تصویر نرم‌افزار نتلوگو برای شبکه بی مقیاس و تصادفی (با انتخاب از منوی net).

شده است. همان‌طور که مشخص است تغییر جزئی در مقدار پارامترهای λ_2 و γ باعث تغییر زیاد در مقدار R_0 می‌شود.

در جدول (۷) به ازای مقادیر مختلف پارامترهایی که در معادله R_0 دخیل هستند (معادله ۲۹)، به محاسبه R_0 پرداخته

جدول (۷): محاسبه R_0 به ازای مقادیر مختلف پارامترها.

| λ_1 | | R_0 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-------|
| $\lambda_2 = 0.1$ $\zeta_1 = 0.2$ $\zeta_2 = 0.1$ $\beta = 0.3$ $\gamma = 0.2$ | ۰/۰۱ | ۴/۴۸ |
| | ۰/۰۵ | ۴/۹۳ |
| | ۰/۱ | ۵/۰۱ |
| | ۰/۵ | ۵/۶۷ |
| λ_2 | | R_0 |
| $\lambda_1 = 0.1$ $\zeta_1 = 0.2$ $\zeta_2 = 0.1$ $\beta = 0.3$ $\gamma = 0.2$ | ۰/۰۱ | ۰/۶۵ |
| | ۰/۰۵ | ۲/۵۹ |
| | ۰/۱ | ۵/۰۱ |
| | ۰/۵ | ۲۴/۴۰ |
| γ | | R_0 |
| $\lambda_1 = 0.1$ $\lambda_2 = 0.1$ $\zeta_1 = 0.2$ $\zeta_2 = 0.1$ $\beta = 0.3$ | ۰/۰۱ | ۵۲/۶۵ |
| | ۰/۰۵ | ۱۷/۵۵ |
| | ۰/۱ | ۹/۵۷ |
| | ۰/۵ | ۲/۰۶ |
| β | | R_0 |
| $\lambda_1 = 0.1$ $\lambda_2 = 0.1$ $\zeta_1 = 0.2$ $\zeta_2 = 0.1$ $\gamma = 0.2$ | ۰/۰۱ | ۲/۵۹ |
| | ۰/۰۵ | ۴/۳۱ |
| | ۰/۱ | ۴/۷۱ |
| | ۰/۵ | ۵/۰۷ |

کاهش این پارامتر به مقدار $0/01$ مقدار R_0 به $0/65$ کاهش پیدا کرده و طبق قضیه ۱ تعادل فاقد شایعه نتیجه می‌شود. پارامتر λ_2 نرخ تبدیل از حالت مستعد به حالت شایعه پراکن می‌باشد.

همان‌طور که مشخص است مقادیر بزرگ γ باعث کوچک شدن مقدار R_0 می‌شود، تا جایی که R_0 کوچک‌تر از ۱ شده و تعادل فاقد شایعه، مشاهده می‌شود. پارامتر γ نرخ تبدیل از حالت شایعه پراکن به حالت بازیابی شده می‌باشد.

به دلیل ماهیت پارامتر β که نرخ تبدیل از حالت شایعه پراکن به حالت مقابله‌کننده می‌باشد، کاهش آن به مقدار $0/03$ باعث می‌شود که مقدار R_0 کمتر از ۱ شده و طبق قضیه ۱ تعادل فاقد شایعه قابل مشاهده است.

۴-۶- مقایسه تغییر حالت گره‌های آلوده در شبکه‌های: تصادفی، دنیای کوچک و بی مقیاس

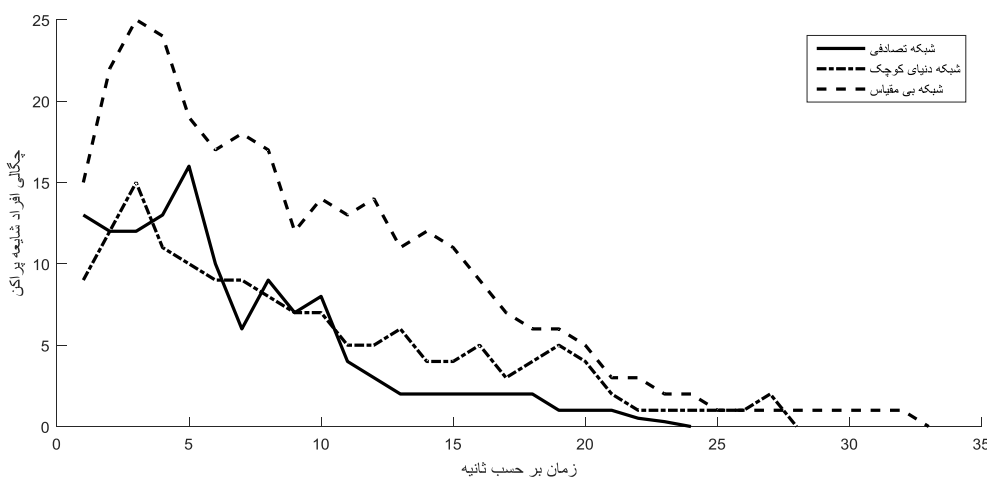
در تحلیل شکل (۸) می‌توان گفت:

- به دلیل ماهیت شبکه‌های تصادفی، انتشار آلودگی یا همان شایعه از الگوی خاصی پیروی نکرده و دچار نوسان در انتشار هستیم و همچنین در ابتدای شروع انتشار (گام‌های زمانی پایین)، سرعت انتشار به نسبت دو شبکه دیگر کمتر است.
- با توجه به خصوصیات شبکه دنیای کوچک، شایعه با سرعت نسبتاً بالایی منتشر شده و با سرعت نسبتاً پایینی از بین می‌رود.

- اما در شبکه بی مقیاس به دلیل وجود گره‌های با درجه‌ی بالا، سرعت انتشار بسیار زیاد بوده و نسبت به دو شبکه دیگر (تصادفی و دنیای کوچک) با سرعت پایینی از بین می‌رود.

طبق قضیه ۱، زمانی که R_0 کوچک‌تر از یک است یعنی آلودگی هر گره جدید از میانگین تعداد آلودگی‌های ثانویه کمتر است و مدل به یک نقطه تعادل فاقد آلودگی (شایعه) می‌رسد.

با توجه به نتایج به دست آمده در جدول (۷) مشخص می‌شود که پارامتر λ_2 نقش مؤثری در انتشار همه‌گیری شایعه دارد، با



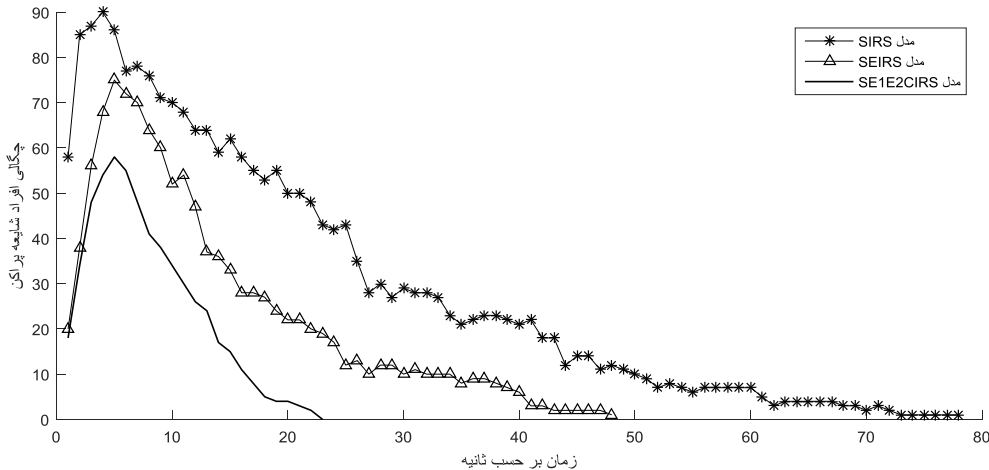
شکل (۸): نمودار تغییر حالت گره‌های آلوده در سه شبکه (تصادفی - دنیای کوچک - بی مقیاس) با $\theta = 0.08, \lambda_1 = 0.2, \lambda_2 = 0.3, \zeta_1 = 0.2, \zeta_2 = 0.1, \beta = 0.4, \gamma = 0.2, \alpha = 0.1$

۵-۶- مقایسه تغییر حالت گره‌های آلوده در شبکه بی

مقیاس برای مدل‌های SE1E2CIRS-SEIRS-SIRS

در شکل (۹) به مقایسه انتشار شایعه در شبکه بی مقیاس و در قالب مدل‌های مختلف، پرداختیم. همان‌طور که مشخص است

شبکه پیشنهاد شده (SE1E2CIRS) به دلیل وجود ساز و کارهای کندسازی انتشار، تعداد گره‌های آلوده کمتری داشته و زودتر به حالت فاقد آلودگی رسیده است. همین مورد برای مدل SEIRS به نسبت مدل SIRS قابل تحلیل است. وجود گره (E- در معرض آلودگی) به کند کردن سرعت انتشار کمک کرده است.



شکل (۹): نمودار تغییر حالت گره‌های آلوده در شبکه بی مقیاس (مدل‌های SE1E2CIRS-SEIRS-SIRS) با $\theta = 0.06, \lambda_1 = 0.2, \lambda_2 = 0.4, \zeta_1 = 0.2, \zeta_2 = 0.15, \beta = 0.5, \gamma = 0.2, \alpha = 0.1$

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، سه نوع شبکه با عناوین: شبکه‌های بی‌مقیاس، شبکه‌های دنیای کوچک و شبکه‌های تصادفی برای انتشار شایعه در نظر گرفته و یک مدل همه‌گیری از انتشار شایعه پیشنهاد شد که در این مدل، علاوه بر حالات موجود (مستعد - شایعه‌پراکن - بازیابی شده)، ساز و کار تأخیر در شایعه همچنین ساز و کار مقابله‌کننده اضافه شد. مدل پیشنهادی به صورت: مستعد - در معرض شایعه - شایعه‌پراکن - مقابله‌کننده - بازیابی شده - مستعد (SECIRS) است. نحوه انتشار و رفع آلودگی برای این سه نوع شبکه مقایسه شد. همچنین بر اساس مدل همه‌گیری SEICRS پویایی انتشار شایعه در شبکه بی‌مقیاس مورد مطالعه قرار گرفت. تأثیر وجود گره در معرض شایعه به عنوان یک استراتژی تأخیر در مدل‌سازی انتشار شایعه بررسی و یک حالت دیگر هم با نام حالت مقابله‌کننده، به مدل اضافه شد. این حالت برای افرادی در نظر گرفته شده است که در جامعه یک شایعه را می‌شنوند و در مقابل آن موضع گرفته و آن را باور نکرده و علاوه بر این جلوی انتشار شایعه را گرفته همچنین باعث تغییر نظر افراد شایعه‌پراکن می‌شوند. با توجه به خصوصیات شبکه تصادفی، همگن بودن و ضریب خوشه‌بندی پایین، طبق انتظار، شایعه با سرعت بسیار پایینی منتشر شده و با سرعت بیشتری از بین می‌رود، اما در شبکه بی‌مقیاس به دلیل وجود گره‌های با درجه بالا، سرعت انتشار بسیار زیاد است. مقایسه انتشار شایعه در شبکه

بی‌مقیاس و در قالب مدل‌های مختلف، بیانگر این واقعیت است که شبکه پیشنهاد شده (SE1E2CIRS) به دلیل وجود ساز و کارهای کندسازی انتشار، تعداد گره شایعه‌پراکن کمتری داشته و زودتر شایعه به صفر رسیده است.

۸- مراجع

- [1] S. N. Dorogovtsev and J. F. F. Mendes, "Evolution of networks," *Advances in Physics*, vol. 51, pp. 1079-1187, 2002.
- [2] R. Albert and A. L. Barab, "Statistical mechanics of complex networks," *Rev. Mod. Phys.*, vol. 74, p. 47, 2002.
- [3] J. Li, J. Lou, and M. Lou, "Some Discrete SI and SIS Epidemic Models," *Applied Mathematics and Mechanics*, vol. 29, pp. 113-119, 2008.
- [4] F. Zhang, J. Li, and J. Li, "Epidemic characteristics of two classic SIS models with disease-induced death," *Journal of Theoretical Biology*, vol. 424, pp. 73-83, 2017.
- [5] R. Pators-Satorras and A. Vespignani, "Dynamical and Correlation Properties of the Internet," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 86, Nov. 2001.
- [6] D. J. Daley and D. G. Kendal, "Stochastic Rumours," *J. Inst. Math. Appl.*, vol. 1, pp. 42-55, March 1965.
- [7] L. Zhang, M. Small, and K. Judd, "Exactly scale-free scale-free networks," *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 433, pp. 182-197, 2015.
- [8] A. Maroosi, E. Zabbah, and H. Ataei Khabbaz, "Network Intrusion Detection using a Combination of artificial Neural Networks in a Hierarchical Manner," vol. 1, pp. 89-99, 2020. (In Persian)

- [17] M. Jin and F. Liu, "A rumor propagation model based on content trust," IEEE 3rd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference, Chengdu, China, March 2019.
- [18] Y. Zhang, and Z. Chen, "SETQR Propagation Model for Social Networks," Digital Object Identifier, vol. 7, 2019.
- [19] H. Wang, T. Li, M. Lei, and J. Liu, "Online and Offline Rumor Spreading Dynamics On Scale-Free Networks," in proc. Chinese Control Conference, Guangzhou, China, July 2019.
- [20] L. Zhu and B. Wang, "Stability analysis of a SAIR rumor spreading model with control strategies in online social networks," Information Sciences, vol. 526, pp. 1-19, July 2020.
- [21] L. Ding, P. Hu, Z-H. Guan, and T. Li, "An Efficient Hybrid Control Strategy for Restraining Rumor Spreading," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, pp. 1-13, Jan 2020.
- [22] L. Di, Y. Gu, G. Qian, and G. X. Yuan, "A Dynamic Epidemic Model for Rumor Spread in Multiplex Network with Numerical Analysis," Physics Soc., 2020.
- [23] O. P. Kuznetsov, "Complex Networks and Activity Spreading," Automation and Remote Control, vol. 76, no. 12, pp. 2091-2109, 2015.
- [24] Q. Wu and F. Zhang, "Dynamical behavior of susceptible-infected-recovered-susceptible epidemic model on weighted networks," Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, vol. 491, pp. 82-390, February 2018.
- [25] Y. Wang and J. Cao, "Global Dynamics of a Network Epidemic Model for Waterborne Diseases Spread," Applied Mathematics and Computation, vol. 237, pp. 474-488, 2014.
- [9] G. Yiran and M. Fanrong, "Rumor spreading in the online social network: A case of a Renren account," Third International Conference on Digital Manufacturing & Automation, Guilin, China, 2012.
- [10] H. Wnag, L. Deng, Y. Huang, and S. Zhao, "A Variant Epidemic Propagation Model Suitable For Rumor Spreading In Online Social Network," in Proc. International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Xian, July 2012.
- [11] A. Singh, and Y. N. Singh, "Rumor Dynamics and Inoculation of Nodes in Weighted Scale Free Networks with Degree-Degree Correlation," International Conference on Signal-Image Technology & Internet-Based Systems, Kyoto, Japan, Dec 2013.
- [12] Q. Wang, Y. Jin, Y. Cui, and S. Cheng, "Rumor Spreading With Nonlinear Infectivities in Weighted Networks," in Proc. IEEE IC-BNMT, 2013.
- [13] X. Zhang, Y. Hu, and J. Wang, "Finding Rumor Source in Weighted Scale-Free Networks," Third International Conference on Cyberspace Technology, Beijing, China, Oct. 2015.
- [14] Y. Zan, J. Wua, P. Li, and Q. Yu, "SICR rumor spreading model in complex networks Counterattack and self-resistance," Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, vol. 466, pp. 159-170, 2014.
- [15] Q. Han, F. Miao, and W. Fan, "Rumor Spreading and Monitoring Deployment in Online Social Networks," IEEE International Conference on Communication Technology, 2017.
- [16] G. Cai, M. Bi, and J. Liu, "A Novel Rumor Detection Method Based on Labeled Cascade Propagation Tree," In: Proceedings of the 13th International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, 2017.