فصلنامه مهندسی مالی و مدیریت اوراق بهادار
شماره چهل و نه/ زمستان ۱۴۰۰

تشکیل سبد سهام براساس مدل‌سازی اپیدمیک مبتنی برشبکه در بازار سهام ایران

صمد صداقتی[۱]
روح اله فرهادی[۲]
میرفیض فلاح[۳]

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۱۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۲۶

چکیده

به دلیل اهمیت سرایت دربازارهای مالی، در تحقیق حاضر با استفاده از مدل‌سازی اپیدمیک مبتنی بر شبکه، بازار سهام ایران در دوره سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۸ درسه مقیاس روزانه، فصلی و سالانه مورد تجزیه و تحلیل گرفته است. لذا شبکه همبستگی ۴۶ گروه بازار سهام ایران ساخته شده و با ایجاد گراف‌های روزانه، فصلی و سالانه و برای شناسایی خواص توپولوژیک و ساختار شبکه بازار سهام ایران، درخت پوشای کمینه محاسبه شده و با استفاده از شبیه‌سازی، پویایی‌های سرایت تحلیل شده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که در دوره روزانه، ۱۳ گروه، در دوره فصلی ۱۹ گروه و در دوره سالانه ۲۸ گروه بر روی شاخه اصلی درخت پوشای کمینه قرار دارند. همچنین با مدل‌سازی اپیدمیک مبتنی بر شبکه (با هزارمرتبه تکرار) ملاحظه شد که در مقیاس زمانی کوتاه مدت سرایت در بازار با سرعت بیشتری اتفاق افتاده و تغییرات (مثلا ناشی از یک شوک اطلاعاتی) به گروه‌های بیشتری تسری می‌یابد و تقریبا تمام گروه‌های بازار از تغییرات ایجاد شده متاثر می‌شوند لذا وسعت و سرعت انتشار سرایت در کوتاه مدت بسیار بیشتر از بلندمدت است و در بلندمدت تعداد قابل توجهی از گروه‌ها مصون از سرایت می‌توانند باشند. اگرچه در بلندمدت سرعت بازگشت به وضعیت قبل از سرایت کمتر از کوتاه مدت است. لذا آگاهی و شناخت از نحوه قرارگیری گروه در درخت پوشا و نیز سرعت و نحوه سرایت، میتواند در نحوه تشکیل سبد سهام برای سرمایه گذاران بسیار کمک کننده باشد.

کلمات کلیدی

سرایت دربازارمالی، مدل‌سازی سازی اپیدمیک، شبکه‌های پیچیده، شبیه‌سازی مالی

۱-گروه مدیریت مالی، واحدتهران مرکزی، دانشگاه آزاداسلامی، تهران، ایران. sedaghati457@yahoo.com
۲-گروه مدیریت مالی، واحدتهران مرکزی، دانشگاه آزاداسلامی، تهران، ایران. (نویسنده مسئول) r.farhadi@iauctb.ac.ir
۳-گروه مدیریت مالی، واحدتهران مرکزی، دانشگاه آزاداسلامی، تهران، ایران. fallahshams@gmail.com

مقدمه

بازارهای مالی، پیچیده و متشکل از بازیگران زیادی هستند که با یکدیگر تعامل دارند و رفتاری آشفته[۱] و/یا جمعی[۲] را به نمایش می‌گذارند. به این خاطر توانایی توصیف و شناخت ارتباطات سیستم‌های پیچیده بازار مالی می‌تواند به مشارکت‌کنندگان و نهادهای ناظر و مقررات‌گذار بازار کمک کند تا اطلاعات بازار را به درستی‌درک نموده و ازحجم‌عظیم‌داده‌های مالی به منظور دستیابی به اهداف خاص خود بهره ببرند. یکی ازمزایای این شناخت نیز آن است که به فعالان بازار کمک می‌کند مکانیسم شکل‌گیری قیمت دارایی‌های‌مالی، نوسانات و پویایی‌های آنهارادرک‌وبرای‌مدیریت‌ریسک‌دارایی‌های مالی از آن استفاده کنند.

با این حال برای درک و مدل‌سازی چنین پیچیدگی‌هایی به یک ابزار نظری نیاز بوده و در سال‌های اخیر تحلیل‌های مبتنی بر شبکه‌های پیچیده[۳] توجه بسیاری از محققین مالی را برای این منظور به خود معطوف نموده است. به طور مثال الن و باباس[۴] (۲۰۰۸) و بیلیو و همکاران[۵] (۲۰۱۲) تحلیل‌های شبکه‌ای را جزء مهم تجزیه و تحلیل بازارهای مالی دانسته و آن را برای شناخت بیشتر بازارهای مالی به ویژه در دوره‌های بحران حیاتی می‌دانند. تحقیقاتی نظیر آلن و گیل[۶] (۲۰۰۰)، الیوت و همکاران[۷] (۲۰۱۴)، گابریلی (۲۰۱۱)، روجرز و ورات[۸] (۲۰۱۴)، عاسم اوقلو و همکاران[۹] (۲۰۱۵)، برندسن و همکاران[۱۰] (۲۰۱۸) و روکنی و همکاران[۱۱] (۲۰۱۸) اذعان دارند که در یک شبکه مالی، پویایی‌های شبکه در طول زمان، خواص توپولوژیک، تعداد و شدت ارتباطات بین اعضای شبکه در عکس‌العمل‌های آبشاری[۱۲]، سرایت[۱۳] و انتشار انواع ریسک‌ها در شبکه‌های مالی مهم هستند.

در واقع در تحلیل‌هایی که عموما مبتنی بر داده‌های سری زمانی سنتی هستند، مهم‌ترین نقص را احتمالا می‌توان نادیده گرفتن همبستگی‌های متقابل و اطلاعات ضمنی و پنهان در حجم بالای سری‌های زمانی دانست. وجود اعضای ناهمگن در بازارهای سهام رفتارهای پیچیده‌ای در این بازار مالی را منجر شده و غیرمحتمل است که با تحلیل‌های منفرد بنگاه‌ها و صنایع حاضر در بازار سهام، تمامی اطلاعات لازم را به ویژه برای مدیریت ریسک، مدیریت پرتفوی، مقررات‌گذاری و سیاست‌گذاری بدست آورد. ضمن اینکه تحلیل‌های سنتی از منظور کردن اثرات شبکه‌ای و دومینویی که در یک سیستم مالی وجود دارند و در ثبات مالی و ریسک سیستم تعیین کننده‌اند، ناتوان هستند. این پدیده‌ها پیچیدگی تعاملات، در هم تنیدگی وابستگی‌ها و سرایت در بازار سهام را تشدید نموده و عدم توجه به آنها می‌تواند توانایی مدیریت ریسک دارایی‌ها را کاهش دهد. از این رو خلاء یک تجزیه و تحلیل شبکه‌ای برای شناخت پویایی سرایت در بازار سهام ایران حس می‌شود.

با توجه به موارد ذکر شده، از آنجا که بسیاری از رخدادهای شبکه‌ای به صورت پویا رخ می‌دهند و فرآیندی ایستا ندارند (مثل اثرات آبشاری و یا رفتارهای گله‌ای که در بازارهای مالی متداول هستند)، در این تحقیق با استفاده از مدل‌سازی و شبیه‌سازی اپیدمیک مبتنی بر شبکه[۱۴]، پدیده سرایت در بازار سهام ایران در چارچوب یک تحلیل شبکه پیچیده مطالعه شده و بررسی خواهد شد که در صورت وقوع یک رخداد برای یک عضو بازار سهام دیگر اعضای بازار چطور درگیر می‌شوند و پویایی آن چگونه خواهد بود، چه زمانی بیشترین سرایت در بازار رخ می‌دهد و چقدر طول می‌کشد که بازار به وضعیت قبلی باز گردد. نتایج حاصل از چنین شناختی کمک می‌کند که مشارکت‌کنندگان بازار رفتارهای جمعی بازار را بهتر درک نموده و برای پیاده سازی استراتژی‌های سرمایه‌گذاری خود و مقررات‌گذاری از آن بهره‌برداری کنند.

ادامه مقاله حاضر به این صورت سازماندهی شده است: در بخش دوم مبانی نظری و پیشینه‌ای از تحقیقات انجام شده مرور می‌شود. در بخش سوم روش‌شناسی تحقیق برای تجزیه و تحلیل داده‌ها معرفی شده و سپس در بخش چهارم نتایج بدست آمده ارائه می‌شوند. نهایتاً بخش آخر به نتیجه‌گیری و پیشنهادات مستخرج از تحقیق اختصاص دارد.

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

ابتدا بهتر است مفهوم سرایت را بشناسیم. کامینسکی و راینهارت[۱۵] (۲۰۰۰) سرایت را انتقال شوک‌ها و ماسون[۱۶] (۱۹۹۹) سرایت را انتقال شوک‌ها فراتر از پیوندهای بنیادی[۱۷] تعریف می‌کنند.

مطابق تعریف فوربس و ریگبون[۱۸] (۲۰۰۱) نیز سرایت تغییر در مکانیسم‌های انتقال ریسک در دوره‌های بحران است.

سرایت به طور مشخص یک پدیده مرتبط با سیاست‌گذاری است. اول به این دلیل که برخی سرایت‌ها اثرات خارجی[۱۹] داشته و به تخصیص ناکارای ریسک در اقتصاد منجر می‌شوند، زیرا کارگزارانی که اثرات اعمال خود را بر دیگران در نظر نمی‌گیرند سطح ریسک اقتصاد را بالا می‌برند. در اینجا سیاست‌های پیش وقوع[۲۰]، مانند تنظیم بازار، می‌تواند برای برقراری مجدد کارایی استفاده شود. علاوه بر این، در صورت عدم عدم موفقیت، می‌توان در صورت لزوم، مداخله پس وقوع[۲۱] را انجام داد تا عامل سرایت خنثی شود یا اثرات آن را در بازارهای دیگر کاهش دهد. دوم، اگر سرایت بسیار گسترده باشد، چنین انتشاراتی[۲۲] می‌تواند به بی ثباتی عمومی سیستم مالی دامن زده و بر رشد اقتصادی تأثیر منفی بگذارد. در چنین سناریویی، سیاست‌های تثبیت اقتصاد کلان می‌تواند به مبارزه با عواقب سرایت گسترده برای کل اقتصاد کمک کند (ECB، ۲۰۰۵).

مطابق ادبیات مالی، کانال‌های سرایت به دو دسته قابل تقسیم هستند. کانال اول، پیوندهای حقیقی نظیر ارتباطات تجاری، مالی و سیاسی هستند. کانال دوم اما در رفتارهای سرمایه‌گذاران بوده و یک عامل غیربنیادی تلقی می‌شود. این تغییر چند علت می‌تواند داشته باشد. اول، رفتارهای گله‌ای[۲۳] سرمایه گذاران پس از بررسی اطلاعات جدید است، که عدم تقارن اطلاعات نیز آن را تشدید می‌کند. کودرس و پریتسکر[۲۴] (۲۰۰۲) نیز نشان دادند که انتقال شوکهای خاص[۲۵] در بین بازارها و از طریق تغییر پرتفوی اتفاق می‌افتد و توسط عدم تقارن اطلاعات تقویت می‌شود. دوم، خروج همزمان پول‌ها توسط سرمایه گذاران برای نقد کردن سرمایه‌گذاری‌ها است. لانگ استاف[۲۶] (۲۰۰۲) نیز نشان داد که سرمایه گذاران در زمان‌های نا اطمینانی دارایی‌های نقد را ترجیح می‌دهند. سوم، به سرمایه گذاران نهادی و رفتارهای جمعی آنها به ویژه در پاسخ به تغییر قوانین و مقررات مرتبط است (گلیگ و روز[۲۷]، ۱۹۹۹؛ دورنبوش[۲۸] و همکاران، ۲۰۰۰؛ ان‌نجی[۲۹] و همکاران، ۲۰۱۶).

در تحقیقات تجربی انجام شده در بازارهای مالی، کلی و گرادا[۳۰] (۲۰۰۰) با استفاده از مدل‌سازی شبکه اطلاعات مشارکت‌کنندگان یک بازار، سرایت را در رفتار سپرده گذاران ایرلندی بانک نیویورک مدل‌سازی نموده و دریافتند که شبکه اجتماعی آنها در خلال بحران رفتار تعیین کننده اصلی است. روسچ و کیسرر[۳۱] (۲۰۱۳) نشان دادند که ریسک نقدینگی[۳۲] بازار باعث انتقال عدم نقدینگی[۳۳] در بازارها می‌شود و بنابراین اشتراک نقدینگی[۳۴] می‌تواند نیروی محرکه سرایت مالی باشد.

سیپریانی و گوارینو[۳۵] (۲۰۰۸) نشان دادند که هنگام ناهمگن بودن ارزش‌های شخصی بین معامله‌گران مطلع، یک آبشار اطلاعاتی (به عنوان مثال، انسداد کامل اطلاعات[۳۶]) بوجود می‌آید و قیمت‌ها قادر به جمع آوری اطلاعات پراکنده بین معامله گران نیستند. در طی یک آبشار اطلاعاتی، تمام معامله گرانی که ترجیحات یکسانی دارند، عمل مشابهی را دنبال می‌کنند، یا دنباله رو بازار (گله‌ای) هستند و یا بر خلاف آن می‌روند (قانون شکنی[۳۷]). آنها همچنین سرایت مالی را در دو دارایی بررسی نموده و دریافتند که آبشارهای اطلاعاتی در یک بازار می‌تواند با سرریز اطلاعاتی[۳۸] از بازار دیگر تولید شود. چنین سرریزهایی عواقب آسیب شناختی دارند و باعث ایجاد عدم انطباق طولانی مدت بین قیمت‌ها و عوامل بنیادی می‌شوند.

گای و کاپادیا[۳۹] (۲۰۱۰) بررسی نمودند که چگونه احتمال و تأثیر بالقوه سرایت از شوک‌های کل و خاص[۴۰]، تغییرات در ساختار شبکه و نقدینگی بازار دارایی تأثیر می‌گیرد. در یک سیستم بسیار متصل، زیان‌های طرف مقابل یک موسسه در حال شکست می‌تواند به طور گسترده‌تری در سایر نهادها پخش

و جذب شود. بنابراین افزایش اتصالات و تقسیم ریسک ممکن است احتمال نکول مسری[۴۱] را کاهش دهد. همچنین تعداد زیادی از ارتباطات مالی نیز احتمال گسترش سرایت را افزایش می‌دهد. بنابراین، تأثیرات هر بحرانی که رخ دهد می‌تواند بسیار گسترده باشد.

گلسرمن و یانگ[۴۲] (۲۰۱۵) در یک شبکه مالی برآورد نمودند که تا چه حد اتصالات باعث کاهش زیانهای انتظاری و نکول‌های پیش بینی شده تحت طیف گسترده‌ای از توزیع شوک‌ها می‌شوند. نتایج آنها حاکی از این است که ساختار شبکه در سرایت و بزرگنمایی آن مهم است. همچنین هنگامی که اندازه گره‌های شبکه ناهمگن است اثرات سرریز چشم گیرتر می‌شوند.

چنگ و چنگ[۴۳] (۲۰۱۶)، سرایت بین بازارهای مالی (ارز، اوراق قرضه، سهام و پول) امریکا را با استفاده از آزمون علیت گرنجر بررسی نمودند. نتایج آنها حاکی از درجات مختلف سرایت بین بازارهای مالی امریکا بوده و آنها اذعان دارند که این نتایج توصیه‌های مناسبی برای استراتژی‌های تخصیص سرمایه داشته و می‌تواند در خلال دوره‌های بحران برای مدیریت پرتفوی مفید باشد.

ژانگ[۴۴] و همکاران (۲۰۲۰) اثرات سرریز و سرایت ریسک در بازار سهام کشورهای G20 را بر اساس شبکه تلاطم و اقتصادسنجی فضای مدل‌سازی و بررسی نمودند. آنها دریافتند که اثرات سرریز و سرایت قابل توجه بین بازارها وجود داشته و ساختار آن سلسه مراتبی است که ویژگی‌هایی شامل تحولات پویا را نیز به نمایش می‌گذارد.

در معدود تحقیقات مرتبط با مدلهای اپیدمیک در بازارهای مالی، شایو[۴۵] (۲۰۱۰) مدل اپیدمیک برای رفتار سرمایه گذاران در بازار سهام فنلاند را توسعه داد. وی نتیجه گرفت که معاملات با انگیزه اجتماعی بازده سهام را پیش بینی می‌کنند و اثرات آن برعکس نمی‌شود، از نظر وی این نشان می‌دهد که افراد اطلاعات مفید را به اشتراک می‌گذارند.

ژو[۴۶] و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از یک مدل اپیدمیک جریانات سرمایه در بازار سهام چین را بررسی نموده و نتیجه گرفتند که رفتار گله‌ای یا رفتار مسری در بازار سهام چین وجود دارد.

با توجه به دانسته محققین تا زمان نگارش این تحقیق، در ایران تحقیقی به مدل‌سازی بازارهای مالی ایران با توجه به پدیده سرایت و مدل‌سازی اپیدمیک مبتنی بر شبکه نپرداخته است. در نتیجه این تحقیق از این منظر دارای نوآوری است.

داده‌ها و روش شناسی

روش تجزیه و تحلیل تحقیق حاضر، نظریه گراف و تحلیل شبکه‌های پیچیده است. برای این منظور

ابتدا ضریب همبستگی بازده ۴۶ گروه بازار سهام ایران در سه مقیاس زمانی روزانه، فصلی و سالانه محاسبه می‌شود. لیست این گروه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. بعد از محاسبه همبستگی‌ها و پالایش همبستگی‌های معنادار از نظر آماری، شبکه همبستگی بازار سهام ایران در سه مقیاس زمانی مذکور ساخته شده و مدل‌سازی اپیدمیک مبتنی بر شبکه صورت خواهد گرفت. در ادامه این بخش ابتدا معرفی مختصری از نظریه گراف ارائه شده، سپس نحوه ساخت گراف (شبکه) مرور می‌شود. در بخش آخر مدل‌سازی اپیدمیک مبتنی بر شبکه معرفی می‌شود.

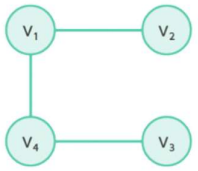
جدول ۱ - لیست گروه‌های بازار سهام ایران

نام صنعت	نام صنعت	نام صنعت
تولید کود و ترکیبات نیتروژن	شکر	سرمایه‌گذاری
خودرو	پیمانکاری صنعتی	لیزینگ
قطعات خودرو	سیمان، اهک و گچ	نرم افزار و خدمات
محصولات پاک کننده	فعالیت مهندسی	تجهیزات مخابراتی
چاپ و نشر	سایر محصولات کانی غیرفلزی	حفاری
نوشیدنی	حمل و نقل از طریق خطوط راه اهن	فراورده‌های نفتی
شیرینی جات	بنادر و کشتیرانی	مخابرات
محصولات لبنی	حمل و نقل بار زمینی	دارویی
محصولات کشاورزی	بانک‌ها و موسسات اعتباری	انبوه سازی، املاک و مستغلات
خرده فروشی، باستثنای وسایل نقلیه موتوری	بیمه	لاستیک و پلاستیک
سایر محصولات غذایی	زغال سنگ	کانی‌های فلزی
مواد شیمیایی-متنوع	محصولات فلزی	محصولات کاغذی
نساجی	کاشی و سرامیک	اهن و فولاد
ماشین الات الکتریکی	سخت افزار و تجهیزات	چوب
تجهیزات صنعتی	تولید فلزات گرانبهای غیراهن	وسایل خانگی
ماشین الات		

معرفی مفهوم گراف

در ترمینولوژی ریاضیاتی، نظریه گراف مطالعه گراف‌ها است. روابط جفتی بین اجزای یک مجموعه که با برخی ساختارهای ریاضیاتی مدل‌سازی شده است. یک گراف ساده را با $G = (V, E)$ نشان می‌دهیم که در آن V رأس‌ها[۴۷] یا گره‌ها[۴۸] و E مجموعه‌ای از یال‌ها[۴۹] است. یک گراف از یال‌هایی

شکل‌گرفته که گره‌ها را به هم متصل کرده است. می‌گوییم که دو گره متصل[۵۰] هستند اگر یک یال مشترک داشته باشند. ویژگی‌های اتصال‌های یک گراف را با استفاده از ماتریس مجاورت[۵۱] A توصیف می‌کنیم. ماتریس مجاورت ماتریسی $n \times n$ است که n در آن تعداد گره‌ها در گراف است. اگر یک جفت از گره‌ها با یک یال متصل باشند به آنها مجاور می‌گوییم و درایه سطر i و ستون j ماتریس مجاورت گراف که با a_{ij} نشان می‌دهیم به ازای آن مقدار ۱ می‌گیرد و در غیر این صورت مقدار صفر. اگر ماتریس مجاورت متقارن باشد یعنی $a_{ij} = a_{ji}$، آنگاه نشان‌دهنده یک گراف بی‌جهت[۵۲] است. در نمودار ۱، یک گراف ساده شامل (۴ گره و سه یال) و ماتریس مجاورت آن که متقارن بوده نمایش داده شده است.



$$A_G = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

نمودار ۱. یک گراف بی‌جهت و ماتریس مجاورت آن

ساخت گراف (شبکه) و درخت پوشای کمینه بازار سهام ایران

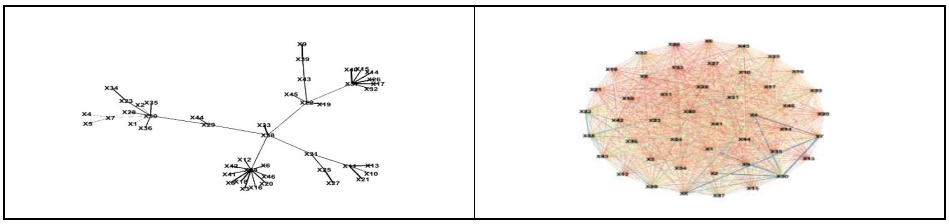
در گام نخست باید ماتریس مجاورت را ساخت که از محاسبه همبستگی دوبه دو بازده گروه‌ها بدست می‌آید. این ماتریس مجاورت را برای سه دوره روزانه، فصلی و سالانه محاسبه نموده و سپس سه گراف روزانه، فصلی و سالانه خواهیم داشت. به این منظور ابتدا داده‌های سری زمانی شاخص قیمت ۴۶ گروه بازار سهام ایران با تواتر روزانه، فصلی و سالانه از اولین روز معاملاتی سال ۱۳۹۰ تا پایان سال۱۳۹۸ استخراج شده، سپس بازده آن محاسبه می‌شود. آنگاه همبستگی دو به دوی بازده هر ۴۶ گروه بازار سهام برای هر تواتر روزانه، فصلی و سالانه محاسبه می‌شود. در نتیجه سه ماتریس با ۴۶ سطر و ستون از ضرایب همبستگی برای سه مقیاس زمانی روزانه، فصلی و سالانه تولید می‌شوند. سپس از مقدار بحرانی $2.58 \times \frac{۱}{\sqrt{T}}$ برای تعیین معنادار بودن یا نبودن همبستگی‌های متقابل در سطح اطمینان ۹۹ درصد استفاده می‌شود، که در آن T تعداد حجم نمونه است (کراهبیل[۵۳]، ۲۰۰۴). حجم نمونه در داده‌های روزانه ۲۰۴۰، فصلی ۳۲ و سالانه ۸ مشاهده است. بنابراین برای مقیاس روزانه مقدار بحرانی برابر ۰/۰۶۱۱، در مقیاس فصلی برابر ۰/۴۸۷۵ و مقدار بحرانی برای مقیاس سالانه برابر ۰/۹۱۲۱ بدست می‌آید. آنگاه اگر ضریب همبستگی متقابل بدست آمده برای هر دو گروه i و j از این مقادیر بیشتر باشد، همبستگی از نظری

آماری در سطح اطمینان ۹۹ درصدی معنی دار است.

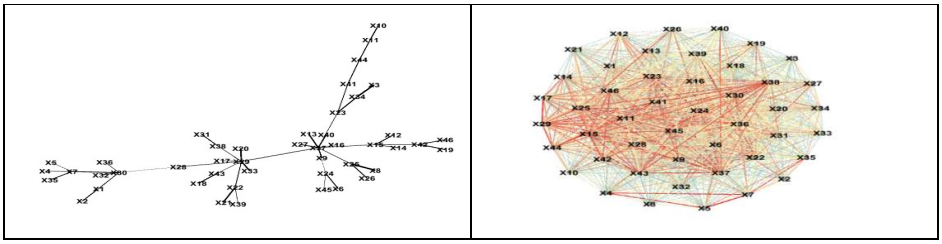
سپس ماتریس مجاورت برای گرافهای روزانه، فصلی و سالانه بر اساس همبستگی متقابل بازده گروه‌های اصلی بازار سهام ایران ساخته می‌شود. اگر ضریب همبستگی بین گروه i و j معنادار باشد، در ماتریس مجاورت مقدار ۱ گذاشته می‌شود و اگر ضریب همبستگی معنی دار نباشد، مقدار صفر جایگزین می‌شود. به این نوع ساختن ماتریس مجاورت رویکرد winner-takes-all گفته می‌شود. این عمل برای هر ۴۶ گروه بازار سهام به صورت دو به دو انجام می‌شود تا ماتریس مجاورت روزانه، فصلی و سالانه ساخته شود. پس از تعریف سه‌گراف جدید به تفکیک مقیاس زمانی روزانه، فصلی و سالانه بر اساس ماتریس فاصله، درخت پوشای کمینه مطابق با الگوریتم کروسکال برای سه مقیاس زمانی مورد نظر شناسایی و تولید می‌شود.

برای شناسایی درخت پوشای کمینه نیز از رابطه $d_{ij}=\sqrt{2\left(1-\rho_{ij}\right)}$ استفاده میکنیم تا ماتریس فاصله را تولید و به عنوان ماتریس مجاورت گراف تعریف کنیم. همانطور که مشخص است ماتریس فاصله مستقیما از ماتریس همبستگی ساخته می‌شود و هرچه همبستگی دو گره بیشتر باشد، فاصله آن دو کمتر خواهد بود. پس از تعریف سه گراف جدید به تفکیک مقیاس زمانی روزانه، فصلی و سالانه بر اساس ماتریس فاصله، درخت پوشای کمینه مطابق با الگوریتم کروسکال برای سه مقیاس زمانی مورد نظر شناسایی و تولید می‌شود. الگوریتم کروسکال به منظور شناسایی درخت پوشای کمینه ابتدا تمام طوقه‌ها و یال‌های موازی را حذف می‌کند (در شبکه بازار سهام طوقه و یال موازی وجود ندارد). سپس همه یال‌ها به ترتیب وزن آنها از کم به زیاد چیده می‌شوند. آنگاه یال‌ها، یکی یکی به گراف افزوده می‌شوند و این کار از یالی شروع می‌شود که کمترین وزن را دارد و ادامه داده می‌شود. نباید هیچ یالی افزوده شود که خاصیت پوشا بودن را نقض کند. افزودن یال‌های با اولویت کم وزن‌ترین یال‌ها تا جایی انجام می‌شود که تمام گره‌ها حداقل یک یال داشته باشند. نهایتا درخت پوشای کمینه بدست می‌آید.

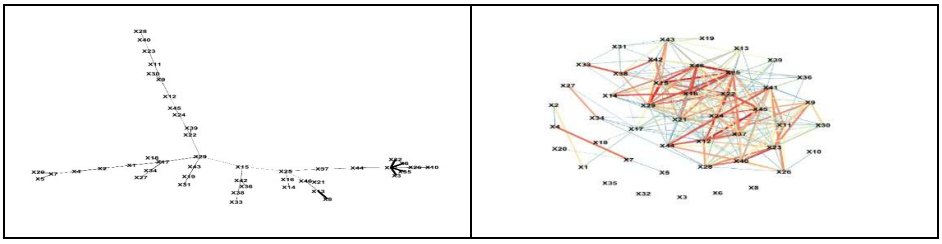
در نمودارهای ۲ الی ۴ گراف شبکه‌های ساخته شده و همچنین درخت پوشای کمینه برای سه بازه زمانی نمایش داده شده است.



نمودار ۲. گراف شبکه و درخت پوشای کمینه دردوره روزانه بازار سهام ایران



نمودار ۳. گراف شبکه و درخت پوشای کمینه دردوره فصلی بازار سهام ایران



نمودار ۴. گراف شبکه و درخت پوشای کمینه دردوره سالانه بازار سهام ایران

فرآیندهای اپیدمیک مبتنی بر شبکه[۵۴]

اصطلاح اپیدمی به پدیده‌ای گفته می‌شود که بیش از آنچه انتظار می‌رود، شیوع دارد. این اصطلاح بیشتر در زمینه بیماری‌ها و انتشار آنها در کل جمعیت استفاده می‌شود - مانند مالاریا، کرونا، طاعون و ایدز - اما در بعضی مواقع بطور گسترده در زمینه‌های دیگر از جمله در توصیف شیوع مسائلی در یک سیستم یا بازار نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد.

یکی از کلاس‌های پرکاربرد مدل‌های اپیدمیک، مدل‌های به اصطلاح مستعد-مبتلا-حذف‌شده[۵۵] یا SIR هستند. فرض کنیم یک جمعیت دارای N+1 عضو در هر نقطه از زمان است و یک تعداد تصادفی، بگوییم $N_S(t)$، از اعضای جامعه مستعد ابتلا هستند، تعداد تصادفی $N_I(t)$ عضو مبتلا هستند و $N_R(t)$

عضو در هر نقطه از زمان از ابتلا بهبود یافته‌اند (بگوییم ریکاور شده اند) و دوباره مبتلا نمی‌شوند (در نتیجه از فرآیند اپیدمی حذف می‌شوند).

فرض کنیم یک عضو مبتلا و N عضو مستعد داریم، یعنی $N_I(0) = 1$ و $N_S(0) = N$ و بگذاریم s و i تعداد مستعدین ابتلا و تعداد مبتلایان را نشان دهد. در مدل SIR تعداد مستعدین، مبتلایان و حذف شده‌ها، مطابق احتمالات انتقال آنی ذیل تغییر می‌یابند (کولاسیچک و ساردی[۵۶]، ۲۰۱۴):

$$\mathbb{P}(N_S(t+\delta t) = s-1, N_I(t+\delta t) = i+1 \mid N_S(t) = s, N_I(t) = i) \approx \beta s i \delta t \quad (۱)$$

$$\mathbb{P}(N_S(t+\delta t) = s, N_I(t+\delta t) = i-1 \mid N_S(t) = s, N_I(t) = i) \approx \gamma i \delta t \quad (۲)$$

$$\mathbb{P}(N_S(t+\delta t) = s, N_I(t+\delta t) = i-1 \mid N_S(t) = s, N_I(t) = i) \approx (1-(\beta s+\gamma) i \delta t \quad (۳)$$

که در آن δt اشاره به مقداری بی نهایت کوچک داشته و $N_R(t)$ با توجه به قید

$N_S(t) + N_I(t) + N_R(t) = N + 1$ بدست می‌آید.

مدل فوق بیان می‌کند که در هر زمان t، یک مبتلای جدید از میان مستعدین اتفاق می‌افتد (به دلیل تماس با یکی از مبتلایان) و احتمال آنی آن نسبتی است از حاصل ضرب تعداد مستعدین s و تعداد مبتلایان .iبه طور مشابه مبتلایان با نسبتی از احتمال آنی i ریکاور می‌شوند. این احتمالات با پارامترهای β و γ مقیاس‌دهی شده است که نرخ ابتدا و نرخ ریکاوری را نشان می‌دهند. همچنین پارامترهای β و γ پارامتر نرخ در توزیع نمایی[۵۷] هستند.

مدل بیان می‌کند که با تعداد s مستعد و i مبتلای مفروض در دوره t، فرآیند در حالت (s,i) برای یک زمان مشخص که به صورت متغیر تصادفی نمایی توزیع شده، با نرخ $(\beta s+\gamma)i$ باقی می‌ماند. آنگاه یک انتقال به حالت $(s-1, i+1)$ با احتمال $\beta s/(\beta s+\gamma)i$، یا انتقال به حالت $(s, i-1)$ با احتمال $\gamma i/(\beta s+\gamma)i$ اتفاق می‌دهد. مدل سازی اپیدمیک موضوع مورد علاقه محققانی است که بر روی مدل‌های فرآیند پویایی مبتنی بر شبکه کار می‌کنند.

G را یک گراف شبکه در نظر بگیریم که توصیف کننده ساختار ارتباط بین N_v عضو شبکه است. فرض کنیم در زمان $t = 0$ یک عضو (گره) درگیر می‌شود (مثلا در بازار سهام یک صنعت یا یک نماد دچار بحران شود). گره درگیر برای یک زمان مشخص که توزیع نمایی با نرخ گاما دارد درگیر است و پس از آن بهبود می‌یابد. در زمان درگیری، عضو با دیگر اعضای شبکه با توزیعی نمایی با نرخ بتا ارتباط

دارد که نتیجه‌اش سرایت پدیده به دیگر اعضای شبکه می‌شود. تعریف می‌کنیم $X_i(t) = 0,1,2$، که طبق آن یک گره مستعد است، درگیر شده است یا در زمان t بهبود یافته است.

بگذاریم $X(t) = (X_i(t))_{i\in V}$ فرآیند زمانی نتیجه شده برای گراف شبکه G باشد. با x حالت فرآیند را در زمان مشخص t نشان می‌دهیم. هر تغییر از x به x' دربرگیرنده یک تغییر در یک و تنها یک عضو در یک زمان است. فرض کنیم که x و x' در عضو i متفاوت باشد. آنگاه می‌توان نشان داد که فرآیند مدل با رابطه ذیل قابل توصیف است:

$$P(X(t+\delta t)=x'|X(t)=x)\approx\begin{cases}\beta M_i(x)\delta t, & \text{if } x_i=0 \text{ and } x_i'=1\\ \gamma\delta t, & \text{if } x_i=1 \text{ and } x_i'=2\\ 1-[\beta M_i(x)+\gamma]\delta t, & \text{if } x_i=2 \text{ and } x_i'=2\end{cases} \qquad (۴)$$

که در آن $M_i(x)$ تعداد همسایگان عضو i است که در زمان t درگیر شده‌اند، $N_S(t)$ اعضای شبکه مستعد درگیر شدن هستند، $N_I(t)$ اعضایی که درگیر شده‌اند $N_R(t)$ اعضایی هستند که بهبود یافته‌اند یا مصون بوده‌اند. خصوصیات فرآیندهای $N_S(t)$ و $N_I(t)$ و $N_R(t)$ تحت تاثیر خصوصیات و توپولوژی گراف شبکه G خواهد بود که از طریق شبیه‌سازی به آن می‌توان پی برد و دریافت که پویایی‌های سرایت در شبکه چگونه می‌شود.

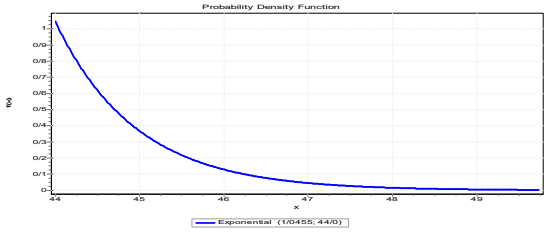
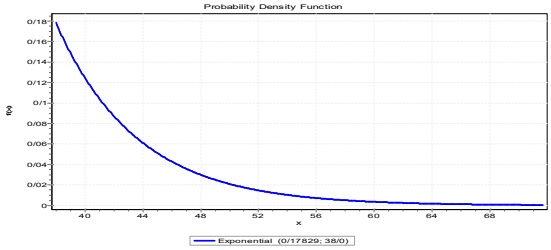
یافته‌های پژوهش

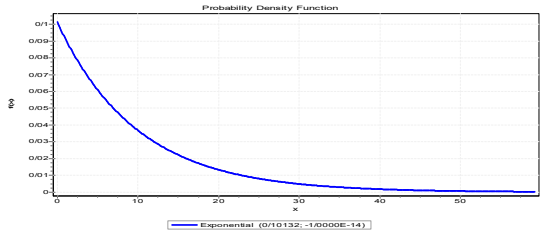
نتایج بررسی خواص توپولوژیکی گراف همبستگی گروه‌های بازار سهام ایران در تواترهای روزانه، فصلی و سالانه(نمودارهای ۲و۳و۴) نشان می‌دهند که در سطح روزانه، همبستگی متقابل گروه‌ها بسیار زیاد است و تمام گروه‌ها از تحولات یکدیگر متاثر می‌شوند. این پدیده در سطح فصلی نیز وجود دارد اما ناهمگنی همبستگی بین گروه‌ها کمی رشد می‌کند. نهایتا در سطح سالانه، همبستگی بازده گروه‌های بازار سهام به قدری متفاوت می‌شود که توپولوژی شبکه تغییر یافته و حتی شبکه دیگر یک گراف همبند نخواهد بود و ۶ مولفه خواهد داشت که همبستگی با یکدیگر ندارند. همچنین تعداد همبستگی‌های میان گروه‌ها کاسته می‌شود. ، با محاسبه معیارهای مرکزیت گروه‌های بازار سهام ایران بر اساس درجه اهمیتی که گروه‌ها دارند رتبه بندی شده و گروه‌های مهم در گراف‌های مذکور شناسایی می‌شوند. با رتبه بندی گروه‌ها بر اساس اهمیت آنها در شبکه می‌توان دریافت که کدام گروه‌ها توانایی انتشار اطلاعات بیشتری در بازار خواهند داشت و می‌توانند رفتار بازار را متاثر کنند. همچنین با ایجاد درخت پوشای کمینه با الگوریتم کروسکال(نمودارهای ۲و۳و۴)، ملاحظه می‌شود که هرچه از دوره زمانی روزانه به سمت فصلی و سالانه حرکت می‌کنیم به دلیل اینکه همبستگی‌های متقابل میان گروه‌های بازار سهام کاهش می‌یابند

تعداد گروه‌های بیشتری در تنه اصلی درخت پوشای کمینه قرار می‌گیرند. این گروه‌ها همچون واسطه اطلاعاتی و کنترل کننده تغییرات بازده بین گروه‌های مختلف همسایگانشان عمل می‌کنند و یالهای متصل بین آنها و همسایگان منتقل کننده اطلاعات و تغییرات هستند

از طرفی برای بررسی پویایی سرایت در شبکه بازار سهام ایران لازم است از شبیه‌سازی با تولید اعداد تصادفی استفاده می‌شود چرا که مدلهای SIR معرفی شده مبتنی بر شبیه‌سازی هستند، به این ترتیب تعداد دفعات تولید اعداد تصادفی، مرتبه تکرار شبیه‌سازی نامیده می‌شود و هرچه تعداد این دفعات بیشتر باشد همگرایی نتایج افزایش خواهد یافت، با این حال هرچه این تکرار افزایش یابد توان پردازش رایانشی بیشتری نیاز خواهد بود. همچنین از پارامتر نرخ توزیع نمایی یالهای شبکه برای مقدار دهی به پارامترهای β و γ استفاده می‌شوند. نهایتا نتایج تولید این اعداد تصادفی مطابق با قاعده توضیح داده شده پویایی سرایت را بنابر خصیصه و توپولوژی شبکه بازار نمایش خواهد داد.

از این رو پیش از انجام شبیه‌سازی، با ترسیم تابع چگالی احتمال یالهای گراف روزانه و سالانه پارامتر نرخ توزیع نمایی آنها را برآورد می‌کنیم. پارامتر نرخ در گراف روزانه برابر ۱. ۰۴، گراف فصلی ۰. ۱۷ و گراف سالانه ۰. ۱۰ بدست می‌آید (نمودار۵)[۵۸]. بنابراین پارامترهای β و γ در مدل برابر این پارامترهای نرخ برآوردی قرار داده می‌شوند.

توزیع نمایی یالها در گراف روزانه	
توزیع نمایی یالها در گراف فصلی	

	توزیع نمایی یالها در گراف سالانه

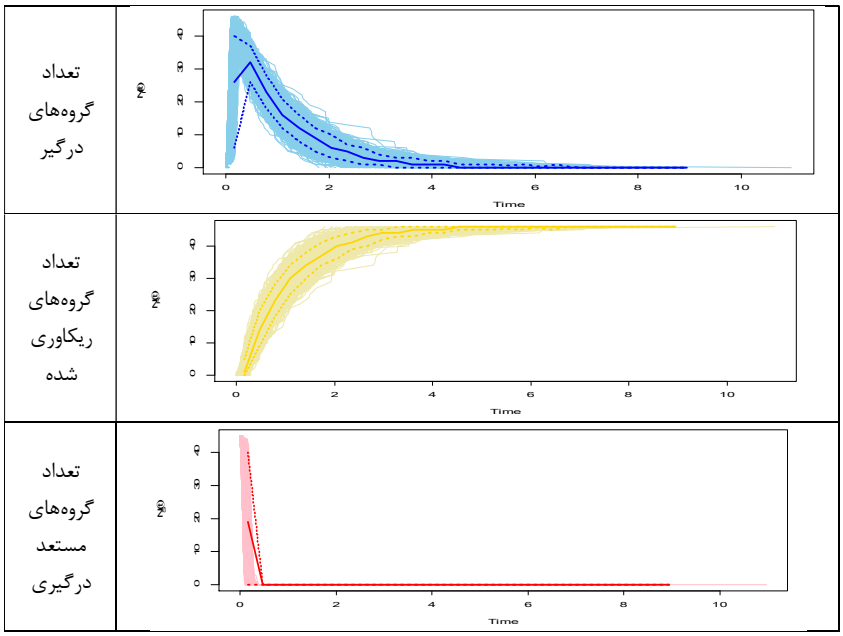
نمودار ۵. توزیع نمایی یال‌ها در گراف‌های روزانه، فصلی و سالانه

در نمودارهای ۶ و ۷ و۸ نتایج حاصل از شبیه‌سازی پویایی‌های سرایت در شبکه بازار سهام ایران در سه سطح روزانه، فصلی و سالانه با استفاده از مدل‌سازی اپیدمیک با ۱۰۰۰ مرتبه تکرار گزارش شده است. در نمودارها خطوط پر رنگ مقدار میانه و خطوط نقطه چین مقدار دهک اول و دهک نهم بدست آمده از شبیه‌سازی هستند. [۵۹] تفسیر نتایج بر حسب مقادیر میانه شبیه‌سازی‌ها انجام خواهد شد.

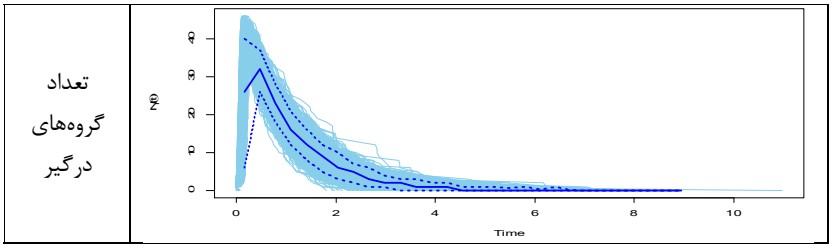
چنانچه از نتایج نمودارهای ۶و۷ پیداست در دوره روزانه و فصلی، اگر فرض کنیم که انتشار اطلاعات (یا یک شوک اطلاعاتی) برای یک گروه در بازار سهام ایران اتفاق بیافتد در کمتر از یک دوره زمانی شوک اطلاعاتی به بیش از ۳۰ گروه دیگر بازار سهام سرایت می‌کند. پس از این دوره تعداد گروه‌های درگیر شده (مبتلا) کاسته شده و نهایتا بعد از ۴ دوره زمانی اثر شوک اطلاعاتی بر گروه‌های بازار سهام مضمحل می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که تعداد گروه‌های ریکاوری شده از شوک بعد از دو دوره زمانی بیش از ۴۰ گروه است، یعنی اثر شوک از آنها تخلیه شده است. تعداد گروه‌های مستعد سرایت نیز نشان می‌دهد که بسیار سریع و در کمتر از یک دوره زمانی، تغییرات به تمام گروه‌های بازار سرایت می‌کند. بنابراین کاملا روشن است که در کوتاه مدت یکپارچگی مالی در بازار سهام ایران وجود دارد و البته اثر دومینویی مشهود است.

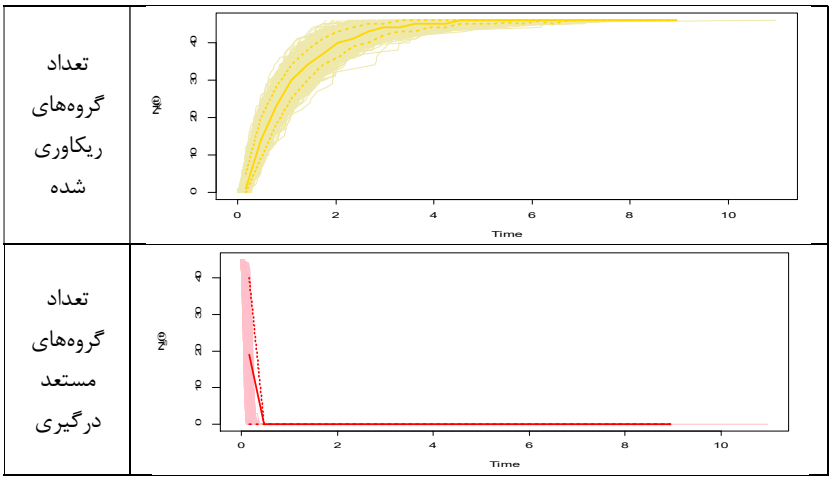
نهایتا نمودار ۸ نتایج شبیه‌سازی اپیدمیک را برای گراف سالانه نشان می‌دهد. چنانچه ملاحظه می‌شود تفاوت خواص توپولوژیک گراف سالانه با گراف روزانه در نتایج شبیه‌سازی سرایت نیز کاملا مشهود است. در این گراف با بروز یک شوک در یکی از گروه‌های بازار، حدود یک دوره بعد نزدیک به ۲۰ گروه بازار سهام درگیر (مبتلا) شده و این شوک به آنها سرایت می‌کند. نهایتا پس از حدود ۵ دوره زمانی سرایت به گروه‌های دیگر بازار به اتمام می‌رسد. تعداد گروه‌های ریکاوری شده از سرایت نیز نشان می‌دهد که در گراف سالانه، سرعت ریکاوری بسیار کمتر بوده و نهایتا بعد از ۵ دوره به تعداد ثابت ۳۵ گروه می‌رسد. تفاوت مهم گراف سالانه در تعداد گروه‌های مستعد است که به دلیل ارتباطات ناهمگنی که گروه‌ها با یکدیگر دارند تعداد گروه‌های مستعد با سرعت کمتری کاهش می‌یابد و نهایتا نیز در تعداد

تقریبا ۱۰ گروه به ثبات می‌رسد. از مضامین مهم نتایج این شبیه‌سازی این است که نشان می‌دهد سرایت شوکها در دوره‌های زمانی کوتاه مدت با سرعت بیشتری اتفاق می‌افتد و با سرعت بیشتری مضمحل می‌شود. در مقابل هرچه به سمت بلندمدت حرکت کنیم، شوکهای اطلاعاتی وارد شده بر گروه‌ها، شدت انتشار کمتری داشته و در دوره‌های بیشتری در بازار تداوم می‌یابند. همچنین در بلندمدت یکپارچگی مالی بازار به طور قابل توجهی کاسته می‌شود و اعضای مستقل نیز وجود دارند.

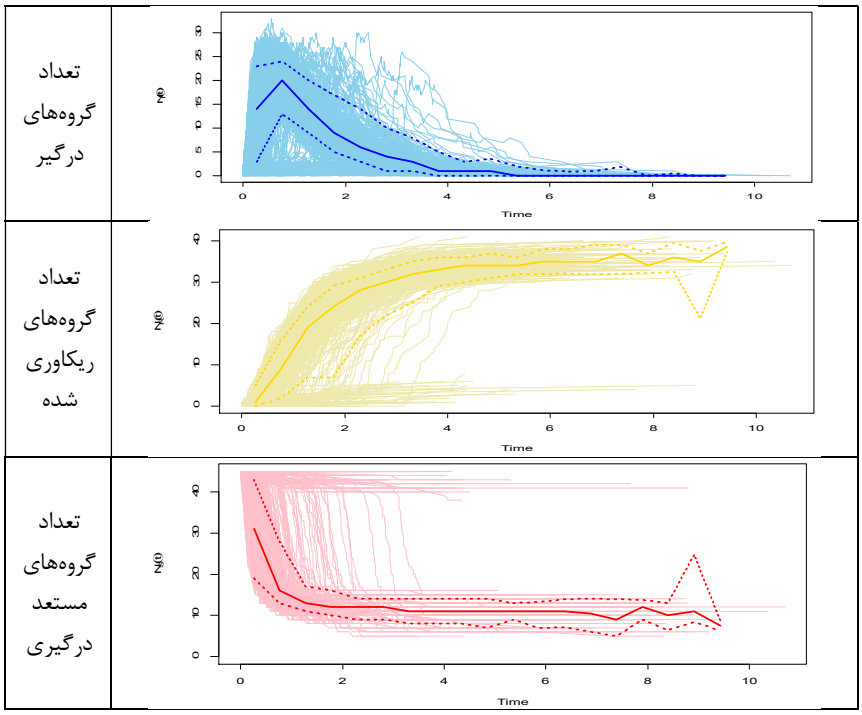


نمودار ۶. شبیه‌سازی اپیدمیک در گراف روزانه بازار سهام ایران





نمودار ۷. شبیه‌سازی اپیدمیک در گراف فصلی بازار سهام ایران



نمودار ۶. شبیه‌سازی اپیدمیک در گراف سالانه بازار سهام ایران

نتیجه گیری وبحث

برای پاسخ به این سئوال که شبکه همبستگی‌های متقابل بازار سهام ایران بر مبنای معیارهای نظریه گراف چه ساختاری دارد و سرایت در شبکه بازار سهام ایران چگونه است؟ با ایجاد گرافهای روزانه و فصلی و سالانه و محاسبه درخت پوشای کمینه جهت شناسایی خواص توپولوژیک و ساختار شبکه بازار سهام ایران، مشخص شد که بازار سهام دراین دوره‌ها، ساختار متفاوتی دارد. در دوره روزانه، درخت پوشای کمینه دارای ۱۳ گروه بر روی شاخه اصلی است. در دوره فصلی درخت پوشای کمینه دارای ۱۹ گروه بر روی شاخه اصلی بوده و در دوره سالانه ۲۸ گروه بر روی شاخه اصلی درخت پوشای کمینه قرار دارند. تعداد اعضای بر روی شاخه اصلی درخت پوشای کمینه تعداد گروه‌هایی را نشان می‌دهد که کنترل کننده رفتار بازار و تغییرات آن هستند. در نتیجه در کوتاه مدت شبکه همبستگی بازار سهام ایران تحت کنترل گروه‌های کمتری است و در بلندمدت تعداد آنها بیش از ۲ برابر می‌شود. در نتیجه ساختار درهم تنیده بازار در دوره‌های کوتاه مدت، به یک ساختار گسسته‌تر در بلندمدت تغییر می‌یابد. هرچه یک گروه بازار سهام با گروه‌های بیشتری ارتباط داشته باشد، احتمال سرایت‌پذیری بیشتر می‌شود. نه تنها گروه‌هایی که به طور مستقیم به یکدیگر متصل هستند، بلکه گروه‌هایی که مستقیما متصل نیستند نیز به واسطه ارتباطات میانی از یکدیگر متاثر می‌شوند. بنابراین لازم است در مدیریت ریسک پرتفوی به درجات اتصالات و همبستگیهای بین گروه‌ها و پویایی‌های سرایت در مقیاس‌های متفاوت زمانی توجه بیشتری شود و استراتژی‌های مدیریت ریسک متفاوتی برای مقیاسهای زمانی مختلف در نظر گرفت تا قوی سیاه بازار سهام ایران با احتمال بیشتری قابل شناسایی باشد و اقدامات پوشش ریسک مناسب را بتوان در چشم اندازهای مختلف برنامه ریزی نمود. همچنین مدل‌سازی اپیدمیک مبتنی بر شبکه نشان داد که در مقیاس زمانی کوتاه مدت سرایت در بازار سهام ایران با سرعت بیشتر اتفاق افتاده و تغییرات (مثلا ناشی از یک شوک اطلاعاتی) به گروه‌های بیشتری تسری می‌یابد و تقریبا تمام گروه‌های بازار از تغییرات ایجاد شده متاثر می‌شوند. در مقابل در مقیاس و دوره زمانی بلندمدت، سرایت در شبکه بازار سهام ایران با سرعت کمتری اتفاق می‌افتد و حتی گروه‌های کمتری درگیر می‌شوند. مهمتر اینکه حتی برخی گروه‌های بازار از تغییرات رخ داده در گروه‌های دیگر متاثر نمی‌شوند. همچنین تخلیه اثرات تغییرات تسری یافته به دیگر گروه‌ها در دوره‌های زمانی بلندمدت با سرعت کمتری نسبت به کوتاه مدت اتفاق می‌افتد. به نظر می‌رسد در کوتاه مدت استراتژی‌هایی نظیر متنوع‌سازی کمتر موثر باشند (با توجه به همبستگی قوی و مثبت اغلب گروه‌های بازار)، اما در بلندمدت متنوع‌سازی قطعا یک استراتژی بهینه مدیریت و

کنترل ریسک سرایت است. نتایج تحقیق همچنین می‌تواند در آینده نگری، شناسایی وسعت بحرانها و تشخیص درست جهت و زمان توزیع اثرات سرایت جهت اتخاذ سیاستهای ضد بحران و کنترل ریسک در سطح بازار راهگشا باشند که لازم است توسط سیاست‌گذاران بازار به آن توجه شود. ازطرفی در تحلیل اثرات تغییرات و شوک‌های اقتصادی بر بازار سهام، بهتر است به رتبه بندی انجام شده گروه‌ها توجه شود. به طور مثال اگر اطلاعاتی در خصوص یکی از گروه‌های مهم بازار سهام منتشر شود، این اطلاعات از طریق همبستگی‌های متقابلی که این گروه با گروه‌های دیگر دارد به آنها تسری می‌یابد. هرچه اطلاعات منتشر شده به گروه‌های با اهمیت کمتر مرتبط باشد، تاثیر پذیری کلیت بازار سهام از آن کمتر خواهد بود. ناظر بازار و مقررات‌گذار، برای تنظیم بازار و کنترل ثبات و ریسک آن، لازم است به درجه اهمیت هر گروه بازار سهام و تاثیری که آن گروه بر رفتار بازار دارد توجه داشته باشد.

منابع

1) Chang, G. D. , & Cheng, P. C. (2016). Evidence of cross-asset contagion in US markets. Economic Modelling, 58, 219-226.
2) Cipriani, M. , & Guarino, A. (2008). Herd behavior and contagion in financial markets. The BE Journal of Theoretical Economics, 8(1).
3) Dornbusch, R. , Park, Y. C. , & Claessens, S. (2000). Contagion: understanding how it spreads. The World Bank Research Observer, 15(2), 177-197.
4) ECB, Financial market contagion, Financial Stability Review, December 2005.
5) Forbes, K. J. , & Rigobon, R. (2002). No contagion, only interdependence: measuring stock market comovements. The journal of Finance, 57(5), 2223-2261.
6) Gai, P. , & Kapadia, S. (2010). Contagion in financial networks. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 466(2120), 2401-2423.
7) Glasserman, P. , & Young, H. P. (2015). How likely is contagion in financial networks?. Journal of Banking & Finance, 50, 383-399.
8) Glick, R. , & Rose, A. K. (1999). Contagion and trade: Why are currency crises regional?. Journal of international Money and Finance, 18(4), 603-617.
9) Kaminsky, G. L. , & Reinhart, C. M. (2000). On crises, contagion, and confusion. Journal of international Economics, 51(1), 145-168.
10) Kelly, Morgan, and Cormac O Grada. 2000. "Market Contagion: Evidence from the Panics of 1854 and 1857. " American Economic Review, 90 (5): 1110-1124.
11) Kodres, L. E. , & Pritsker, M. (2002). A rational expectations model of financial contagion. The journal of finance, 57(2), 769-799.
12) Kolaczyk, E. D. , & Csárdi, G. (2014). Statistical analysis of network data with R (Vol. 65). New York, NY: Springer.
13) Longstaff, F. A. (2002), "The flight-to-liquidity premium in US treasury bond prices", National bureau of economic research.
14) Masson, P. (1999). Contagion:: macroeconomic models with multiple equilibria. Journal of International Money and Finance, 18(4), 587-602.
15) Nneji, O. , Brooks, C. , & Ward, C. (2013). Commercial real estate and equity market bubbles: Are they contagious to REITs?. Urban Studies, 50(12), 2496-2516.
16) Shive, S. (2010). An epidemic model of investor behavior. Journal of Financial and Quantitative Analysis, 169-198.
17) Rösch, C. G. and Kaserer, C. (2013), "Market liquidity in the financial crisis: the role of liquidity commonality and flight-to-quality", Journal of Banking and Finance, Vol. 37 No. 7, pp. 2284-2302.

18) Zhang, W. , Zhuang, X. , & Lu, Y. (2020). Spatial spillover effects and risk contagion around G20 stock markets based on volatility network. The North American Journal of Economics and Finance, 51, 101064.
19) Zhou, Q. , Sun, S. , & Liu, Q. (2019). The capital flow of stock market studies based on epidemic model with double delays. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 526, 120733.
20) Caporin, M. , Gupta, R. , & Ravazzolo, F. (2021). Contagion between real estate and financial markets: A Bayesian quantile-on-quantile approach. The North American Journal of Economics and Finance, 55, 101347.
21) Fijorek, K. , Jurkowska, A. , & Jonek-Kowalska, I. Financial contagion between the financial and the mining industries–Empirical evidence based on the symmetric and asymmetric CoVaR approach. Resources Policy, 70, 101965.
22) Wang, H. , Yuan, Y. , Li, Y. , & Wang, X. (2020). Financial contagion and contagion channels in the forex market: A new approach via the dynamic mixture copula-extreme value theory. Economic Modelling, 94, 401-414.
23) Feng, Y. , & Li, X. (2021). The Cross-Shareholding Network and Risk Contagion from Stochastic Shocks: An Investigation Based on China's Market. Computational Economics, 1-25.
24) Dong, Y. , Wang, J. , & Chen, T. (2019). Price linkage rumors in the stock market and investor risk contagion on bilayer-coupled networks. Complexity, 2019.
25) Zhu, Y. , Yang, F. , & Ye, W. (2018). Financial contagion behavior analysis based on complex network approach. Annals of Operations Research, 268(1), 93-111.

یادداشت‌ها :

1 chaotic behavior
2 Collective behavior
3 complex networks
4 Allen and Babus
5 Billio
6 Allen and Gale
7 Elliott
8 Gabrieli
9 Rogers and Veraart
10 Acemoglu
11 Berndsen
12 cascade
13 contagion
14 Network-Based Epidemic Modeling
15 Kaminsky and Reinhart
16 Masson
17 fundamental linkage
18 Forbes and Rigobon
19 externality
20 ex ante
21 ex post
22 propagation
23 herding behavior
24 Kodres and Pritsker
25 idiosyncratic shocks
26 Longstaff
27 Glick and Rose
28 Dornbusch
29 Nneji
30 Kelly and Grada
31 Rösch and Kaserer
32 market liquidity risk
33 illiquidity
34 liquidity commonality
35 Cipriani and Guarino
36 complete blockage of information
37 contrarianism
38informational spillovers

39 Gai and Kapadia
40 aggregate and idiosyncratic shocks
41 contagious default
42 Glasserman and Young
43 Chang and Cheng
44 Zhang
45 shive
46 Zhou
47 vertex
48 node
49 edge
50 connected
51 Adjacency matrix
52 Undirected graph
53 Krehbiel
54 Network-Based Epidemic Modeling
55 susceptible-infected-removed
56 Kolasi Czech and Sardi
57 rate parameter of an exponential distribution

۵۸ در نمودارها پارامترهای β و γ داخل پرانتز گزارش شده اند.

۵۹ برای انجام شبیه سازی از محیط R و بسته igraph استفاده شده است.