کاربرد سنجش از دور و GIS در علوم محیطی، شماره ۳، سال اول، تابستان ۱۴۰۱، صص ۱۲۶-۱۰۷
Application of remote sensing and GIS in environmental sciences, Vol 1, No. 3, Summer 2022, pp. 107-126

مدل‌سازي و تحليل سيستم‌هاي تجربي با استفاده از مفاهيم شبكه‌هاي پيچيده

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۱۱

لیلا نقی‌پور*[۱]، محمدتقی اعلمی[۲]، وحید نورانی[۲]، ابوالفضل قنبری[۳]

۱- پژوهشگر فرادکتری، گروه سنجش از راه دور، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز
۲- استاد تمام، گروه مهندسی منابع آب، دانشکده فنی و مهندسی عمران، دانشگاه تبریز
۳-دانشیار، گروه سنجش از راه دور، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز

چکیده

تعیین اتصالات عملکردی در شبکه‌های پیچیده برای مطالعه‌ی طیف گسترده‌ای از سیستم‌های طبیعی و مصنوعی با استفاده از معیاره‌های همبستگی و علیتی از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشند. بسیاری از روش‌های ساخت مجدد شبکه براساس اعمال آستانه‌ی تعریفی بر روی ماتریس‌های همبستگی می‌باشند که مقادیر ماتریس‌ها از تحلیل همبستگی دودوئی به دست آمده و آستانه به طور تجربی مشخص شده است که فاقد تحلیل آماری پایه‌ای است. سایر روش‌هایی که همبستگی مشاهدات را نسبت به مدل‌های صفر تعریفی در تحلیل‌های آماری مورد مقایسه قرار می‌دهند، نتایج به دست آمده از آنها به لحاظ آماری بسیار قدرتمند می‌باشند. در مطالعه حاضر، نتایج نشان داد حتی استفاده از مدل‌های صفر برای ساخت مجدد شبکه در برگیرنده‌ی محدودیت‌های اساسی است که این محدودیت‌ها به سادگی برطرف نمی‌شوند. در این تحقیق روش‌های مختلفی مورد استفاده قرار گرفت از جمله، همبستگی متقابل، وابستگی طیفی، اطلاعات متقابل، آنتروپی انتقال، همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن و نگاشت متقابل همگرا. روش‌ها بر روی دینامیک جمعی خطی و غیرخطی به کار گرفته شده‌اند که به ترتیب از مدل‌های میانگین متحرک خودرگرسیونی و نمودار لاجستیگ حاصل گردیده‌اند. دینامیک واحدهای متصل به هم با استفاده از توپولوژی‌های پیچیده مختلفی شبیه‌سازی شده‌اند، که توپولوژی‌های منتخب به طور گسترده‌ای در سیستم‌های تجربی مشاهده می‌شوند. تحلیل نتایج غیرهمتراز در شبکه‌های متناظر بسیار متراکم و پراکنده به انجام بررسی بیشتر ترغیب نمود که این بررسی تحت عنوان اعتبارسنجی متقابل شناخته شده تا مقایسه‌ی اطمینان بخشی با استفاده از ابزارهای آماری به کار گرفته شده نسبت به داده مرجع انجام شود.

واژه‌های کلیدی: شبکه‌های پیچیده، دینامیک جمعی، توپولوژی، ابزار آماری، معیاره‌های همبستگی و علیتی.

* نویسنده مسئول
E-mail:naghipour.l@tabrizu.ac.ir

۱-مقدمه

سنجنده‌های از راه دور به عنوان روشی مطمئن برای جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز در مقیاس وسیع می‌باشند. در میان روش‌های ارزیابی داده‌های بزرگ جمع‌آوری شده شبکه‌های پیچیده روشی قدرتمند برای مدل‌سازی سیستم‌هایی همچون اقلیم کره زمین به شمار می‌آیند تا به طور همزمان دینامیک و عملکرد آنها مورد بررسی قرار گیرد (یه و سوگیهارا[۱]، ۲۰۱۶). شبکه‌ها الگوهای برهم‌کنش نهفته در سیستم دینامیکی مورد بررسی را مشخص می‌سازند که در این نوع سیستم‌ها توضیح مفصلی از دینامیک و ساختار آن به علت رفتار پیچیده و آشوبناک ممکن نیست (آلبرت و باراباسی[۲]، ۲۰۰۲؛ بوکالتی و همکاران[۳]، ۲۰۰۶).

در سال‌های اخیر تئوری شبکه در زمینه‌ی مدل‌سازی سیستم اقلیم کره‌ی زمین و نیز بررسی مؤلفه‌های هیدرولوژیکی مورد توجه قرار گرفته است که گره‌های شبکه نشان دهنده‌ی مکان‌های جغرافیایی و یال‌ها حاکی از جریان اطلاعات میان گره‌ها می‌باشند (نقی‌پور و همکاران[۴]، ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲؛ سیواکومار و ولدومسکل[۵]، ۲۰۱۵؛ ویدرمن و همکاران[۶]، ۲۰۱۹). به عنوان مثال از مفاهیم شبکه‌های پیچیده در انتخاب باند (خیا و همکاران[۷]، ۲۰۱۳)، طبقه‌بندی تصاویر (وانگ و همکاران[۸]، ۲۰۲۱) و نیز استخراج مزارع کشاورزی با استفاده از تصاویر سنجش از دور (واگنر و اپلت[۹]، ۲۰۲۰) بهره‌برداری شده است. همچنین در مدل‌سازی سیستم‌های دینامیکی با روش شبکه می‌توان برای بررسی الگوهای ایجادی در ترافیک شهری (و و همکاران[۱۰]، ۲۰۱۸)، محلی‌سازی منابع انتشار در سیستم پیچیده (هو و همکاران[۱۱]، ۲۰۱۸)، شناسایی انتشاردهنده‌های تاثیرگذار (لی و همکاران[۱۲]، ۲۰۱۸) و نیز بررسی سطح آب زیرزمینی (نقی‌پور[۱۳]، ۲۰۲۰) بهره گرفت. سیستم‌های پیچیده در دنیای واقعی لایه‌های چندگانه از ارتباطات نشان می‌دهند و وجود همزمان انواع مختلفی از اندرکنش‌ها توسط اجزاء اصلی ساختار و دینامیک شبکه‌های چندلایه قابل درک است (بوکالتی و همکاران[۱۴]، ۲۰۱۴؛ کیولا و همکاران[۱۵]، ۲۰۱۴). در سال‌های اخیر روش‌های محاسبات نرم به صورت گسترده‌ای برای مدل‌سازی متغیرهای اقلیم‌شناسی (خطیبی و همکاران[۱۶]، ۲۰۱۳؛ قربانی و همکاران[۱۷]، ۲۰۱۶) و سیستم‌های هیدرولوژیکی (وو و چاو[۱۸]، ۲۰۱۳؛ شمشیربند و همکاران[۱۹]، ۲۰۲۰) مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

1- Ye and Sugihara
2- Albert and Barabási
3- Boccaletti et al.
4- Naghipour et al.
5- Sivakumar and Woldemeskel
6- Wiedermann et al.
7- Xia et al.
8- Wang et al.
9- Wagner and Oppelt
10- Wu et al.
11- Hu et al.
12- Li et al.
13- Naghipour
14- Boccaletti et al.
15- Kivelä et al.
16- Khatibi et al.
17- Ghorbani et al.
18- Wu and Chau
19- Shamshirband et al.

به منظور درک طبیعت اندرکنش جاری در سیستم پیچیده موجود در دنیای واقعی لازم است ارتباط داخلی میان مولفه‌های سیستم مشخص گردد. به این منظور پیش از اینکه بتوان سیستم مورد بررسی را درک نمود لازم است ارتباطات ذاتی بین المان‌ها تعیین گردد، که توسط نگاشت اتصالات فیزیکی بر روی شبکه انجام می‌گیرد. به طور متناوب مفهوم همچون اتصالاتی با استفاده از تعریف وزن‌ها و تعیین جهت در قالب مفاهیم تئوری شبکه‌های پیچیده مورد مطالعه قرار می‌گیرد تا باتوجه به ویژگی‌های شبکه در مورد اینکه ساختار آن در آینده چگونه تغییر می‌کند و یا چه فرآیندهایی بر روی آن رخ می‌دهند، توضیحاتی ارائه داده و یا پیش‌بینی نمود (زو و همکاران[1]، ۲۰۱۹).

روش رایج برای ساخت شبکه‌های پیچیده اندازه‌گیری ارتباطات آماری دودوئی میان سری‌های زمانی مشاهداتی و داده‌های جایگزین (surrogate) با ایجاد اندرکنش میان واحدهای دینامیکی به هم پیوسته می‌باشد (لانکاستر و همکاران[2]، ۲۰۱۸). در این تحقیق از مفهوم آزمون فرض به منظور ساخت شبکه‌های پیچیده استفاده شده که به عنوان روشی قابل اطمینان برای اعمال سری‌های زمانی به شبکه‌ها می‌باشد. انتظار می‌رود شبکه پیشنهادی توانایی ما را در درک بهتر اندرکنش اقیانوس و اتمسفر، تشخیص لایه‌های اتمسفر، ساختار سلسله مراتبی قدرت اتصالات در شبکه‌ی اقلیمی و تأثیرات جفت‌شدگی فیزیکی افزایش دهد. از سوی دیگر تمامی توصیف‌گرهای شبکه به طور پیوسته پویایی به هم مرتبط از طریق ساختار شبکه‌های ساخته شده نشان دهند.

در این تحقیق برای درک بهتر رفتار سیستم‌های تجربی روش قابل قبولی برای ساخت شبکه‌های پیچیده بهره گرفته شده تا ضمن آشکارسازی الگوی رفتاری، در مطالعات آینده برای درک اندرکنش فیزیکی در سیستم دینامیکی مورد استفاده قرار گیرد. به این منظور روش‌های مختلفی انتخاب و قدرت آماری آنها بر روی مدل‌های ریاضی شبکه‌ای با دینامیک خطی و غیرخطی به طور مفصل مورد بحث و بررسی قرار گرفت. به این منظور در این تحقیق روش‌های مختلفی مورد استفاده قرار گرفت از جمله، همبستگی متقابل (CC)، وابستگی طیفی (SpeCoh)، اطلاعات متقابل (MI)، آنتروپی انتقال (TE)، همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن (SC) و نگاشت متقابل همگرا (CCM). روش‌ها بر روی دینامیک جمعی خطی و غیر خطی به کار گرفته شده‌اند که به ترتیب از مدل‌های میانگین متحرک خودرگرسیونی (ARMA) و نمودار لاجستیگ (LOG) حاصل گردیده‌اند. دینامیک واحدهای متصل به هم با استفاده از توپولوژی‌های پیچیده مختلفی شبیه‌سازی شده‌اند، که توپولوژی‌های منتخب به طور گسترده‌ای در سیستم‌های تجربی مشاهده می‌شوند. در این تحقیق با مدل‌های معروف شبکه‌ای از جمله، باراباسی-آلبرت (BA)، مدل بلوک تصادفی (SBM)، مدل بلوک تصادفی سلسله مراتبی (HSBM)، مدل

1- Zou et al.
2- Lancaster et al.

لَنسیچینِتّ-فورتوناتو-رادیسچی (LFR)، واتز-اِستروگز (WS)، اِردوش-رِنئی (ER) و گراف با هندسه تصادفی (RGG) شبیه‌سازی شده‌اند.

۲-روش تحقیق

شبکه مفهوم گسترده و عامی است که چگونگی ارتباط و برهمکنش میان مولفه‌های مختلف سیستم مورد بررسی توصیف می‌نماید و در تمامی جنبه‌های زندگی روزمره حضور دارند. بسیاری از شبکه‌ها قادرند انواع مختلفی از ارتباطات در خود داشته باشند مثل ارتباط میان متغیرهای مختلف اقلیم‌شناسی. ساختار شبکه به چگونگی ارتباط اجزاء آن با یکدیگر دلالت دارد و حالت شبکه ویژگی‌های رئوس و یال‌ها را توصیف می‌کند. تئوری شبکه ابزاری قدرتمند برای مدل‌سازی و درک رفتار سیستم‌های پیچیده هیدرولوژیکی/اقلیمی بوده و به کمک خصوصیات شبکه‌های ساخته شده می‌توان درک مناسبی از رفتار این نوع سیستم‌ها داشت.

ـ ساختار شبکه‌ها

شبکه‌های بدون-مقیاس مستقل از نوع سیستم و ماهیت اجزاء تشکیل‌دهنده‌ی آن دارای ویژگی بخصوص هستند، به این صورت که احتمال P(k) اینکه گره داخل شبکه با k گره دیگر در ارتباط باشد با قانون توانی کاهش می‌یابد، که برای بررسی این نوع شبکه‌ها مدل معروف باراباسی-آلبرت (BA) مورد استفاده قرار گرفته است. شبکه‌های مدولار یا خوشه‌ای (Modular Networks) برای آشکارسازی زیرشبکه‌های موجود در داخل شبکه مورد بررسی ایجاد شده‌اند، که هر کدام از اجزاء زیرشبکه‌ها با کارکرد بخصوص غالباً به صورت کاملاً متراکم در داخل زیرشبکه به یکدیگر متصل بوده و اتصالات میان هر کدام از زیرشبکه‌ها با همدیگر به صورت پراکنده می‌باشد. در این مطالعه برای ارزیابی قابلیت روش آماری پیشنهادی در استخراج خصوصیات شبکه‌های مدولار با استفاده از روش‌های مختلف به کار رفته از مدل بلوک تصادفی (SBM) و مدل بلوک تصادفی سلسله مراتبی (HSBM) استفاده شده است. روش رایج در تشخیص اجتماع در داخل شبکه استفاده از آزمون "چهار گروه" بوده که در این حالت شبکه به چهار گروه مساوی تقسیم می‌گردد. مدل HSBM نسخه‌ی سلسله مراتبی برای مدل SBM بوده به این صورت که شبکه بزرگ از تعدادی زیرشبکه‌های کوچکتر تشکیل شده است و هر کدام از زیرشبکه‌ها خصوصیات مدل SBM دارا هستند. برای ارزیابی ترکیب دو ساختار بدون-مقیاس و خوشه‌ای از مدل لَنسیچینِتّ-فورتوناتو-رادیسچی (LFR) استفاده شده است. مشخصات در نظر گرفته شده برای LFR مطابق با دو مدل قبلی است به این صورت که قانون توانی برای توزیع درجات در نظر گرفته و ضریب آن از مدل BA تبعیت کرده است. سیستم‌های دنیای-کوچک با دو مولفه‌ی متوسط طول مسیر و خوشه‌بندی مشخص می‌شوند به طوری که مقادیر این دو مولفه به ترتیب کوچک و بزرگ می‌باشند. در تحقیق حاضر این نوع سیستم‌ها با مدل شبکه‌ای واتز-اِستروگز (WS) شبیه‌سازی شده و به این منظور برای هر کدام از گره‌های شبکه

چهار همسایگی تعریف شده است. شبکه‌های تصادفی (RNs) از توزیع پواسون برای توزیع درجات خود تبعیت می‌کنند که توسط مدل اِردوش-رِنئی (ER) شبیه‌سازی می‌شوند. در این تحقیق برای ساخت RNs از تولید مقادیر تصادفی یکنواخت بر روی هر کدام از گره‌های شبکه استفاده شده است. در ادامه از گراف با هندسه تصادفی برای ساخت شبکه‌های تصادفی استفاده شده به این صورت که هر کدام از گره‌های شبکه با مختصات تصادفی در فضای واحد قرار گرفته می‌شوند.

ـ دینامیک شبکه‌ها

دینامیک طیف گسترده‌ای از سیستم‌های پیچیده توسط مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل معمولی گسسته در زمان قابل توصیف می‌باشند، و غالباً این نوع معادلات را می‌توان به معادلات دیفرانسیل مرتبه اول کاهش داد. با وجود سادگی معادلات مرتبه اول، این نوع معادلات در برگیرنده‌ی رفتارهای دینامیکی بسیار غنی هستند (گائو و همکاران[1]، ۲۰۱۶؛ می[2]، ۲۰۰۴). یکی از مثال‌های نمادین در خصوص این نوع معادلات مدل نمودار لاجستیگ (LOG) می‌باشد، در این مدل برهم‌کنش میان دینامیک دو گونه اساسی جامعه مورد بررسی قرار گرفته می‌شود که این دو گونه‌ی شامل تولیدمثل و مرگ است. نرخ فرآیند تولیدمثل به صورت نسبتی از اندازه سیستم در وضعیت کنونی بوده و در مرگ نرخ فرآیند نسبتی از ظرفیت نگهداری سیستم می‌باشد. بنابراین دینامیک مدل LOG در هر کدام از رویدادها توسط تابع غیرخطی مدیریت شده در حالی که اندرکنش میان دو جمعیت مجزاء توسط پاسخ خطی مدل‌سازی می‌شود.

سیستم‌های مالی توسط تعامل میان چندین عامل مورد بررسی قرار می‌گیرند که استراتژی‌های معامله‌ای توسط فرآیند قطعی به صورت خطی قابل مدل‌سازی است و این فرآیند همراه با حافظه محدود p می‌باشد که حافظه در نظر گرفته شده نشان می‌دهد مقادیر آینده متغیر در برگیرنده‌ی حالت سیستم بستگی به مقادیر گذشته از سیستم مورد بررسی دارد. علاوه بر این، شوک‌های ناخواسته توسط فرآیند استوکستیک به صورت خطی قابل مدل‌سازی است به نحوی که در این فرآیند میزان محدود حافظه q در نظر گرفته شده به طوری که نوسانات آینده به طور خطی به مقادیر گذشته بستگی دارد. این نوع مدل‌ها اصطلاحاً آرما (ARMA) از مرتبه‌ی p و q نامیده می‌شود. در این تحقیق مقادیر در نظر گرفته شده برای مرتبه‌های p و q به ترتیب ۵ و ۳ می‌باشند.

ـ روش آماری ساخت شبکه

در این بخش روش غیربیزین برای تعریف آستانه در ماتریس‌های همبستگی مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد تا با اعمال آستانه‌ی تعریفی بر روی مقادیر همبستگی میان جفت سری‌های مشاهداتی برای ساخت شبکه متناظر با سیستم مورد بررسی اقدام گردد. در پژوهش حاضر از روش آماری به دست آمده از آزمون فرض بهره

1- Gao et al.
2- May

گرفته شده است که این روش بر مبنای رویکرد فراوانی‌گرا (Frequentist Approach) می‌باشد، هر چند این رویکرد با چارچوب روش بیزین سازگار نیست.

D_{org} نشان‌دهنده‌ی ماتریس به دست آمده از محاسبه‌ی همبستگی (یا مشابهت، یا علیت) توسط روش‌های به کار گرفته شده میان واحدهای به هم پیوسته در سیستم مصنوعی و یا داده‌های جمع‌آوری شده در مقیاس زمانی مشاهداتی از سیستم اقلیم کره زمین/سیستم هیدرولوژیکی است. در ابتدا لازم است با توجه به مدل صفر (Null Model) مناسب، معنی‌داری هر کدام از معیاره‌ها مورد ارزیابی قرار بگیرد که در مطالعه‌ی حاضر ساختار و دینامیک سیستم در مدل صفر لحاظ شده است. مدل صفر منطقی با ایجاد داده‌های جانشین مناسب براساس روش برهم‌زدن مجدد (Reshuffling) به شکل تصادفی برای سری‌های تولیدی/مشاهداتی در هر کدام از ایستگاه‌ها انجام گرفته است.

فرضیه‌ی محتمل برای H_0 مطابق با روش ایجاد جانشین برای داده‌های به کار گرفته شده می‌تواند به صورت عدم وجود همبستگی (یا مشابهت، یا علیت) میان هر کدام از جفت گره مورد بررسی فرض شود، در حالی که فرضیه‌ی H_1 به صورت وجود همبستگی (یا مشابهت، یا علیت) میان این دو گره در نظر گرفته می‌شود. اگر در شرایطی هیچ‌گونه ارتباط بین دو سری وجود نداشته باشد و D_1 به عنوان مقدار مورد انتظار تعریف گردد، در این حالت H_0 به حالتی منجر می‌شود که در آن $D_0=D_{org}$، در حالی‌که H_1 سبب ایجاد شرایط $D_0 \neq D_{org}$ می‌شود.

ـ استنتاج ساختار شبکه

در این بخش روش‌های آماری مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند که به طور گسترده‌ای در مطالعات مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند تا با استفاده از آن‌ها ساختار شبکه‌ها با به کارگیری مشاهدات به دست آمده از دینامیک مجموع ساخت مجدد شوند. در حالی که تمامی روش‌ها در نوع همبستگی، مشابهت یا علیت متفاوت از هم هستند، محاسبات با استفاده از این روش‌ها بین دو فرآیند استوکستیک X_t و Y_t انجام گرفته شده است. در ادامه توصیف مختصری از روش‌های به کار گرفته شده در این تحقیق ارائه می‌گردد.

همبستگی-متقابل: برای دو متغیر استوکستیک که به ترتیب مقادیر مشاهداتی آنها در واحدهای زمانی یکسان t به صورت $\{x_t\}$ و $\{y_t\}$ بوده که در این مقادیر زمان مشاهدات دینامیک مجموع به صورت $(t=1,2,\ldots,T)$ تعریف می‌گردد. CC همبستگی خطی میان دو متغیر در زمان یکسان t یا تحت تأخیر τ محاسبه می‌نماید و به عنوان کوواریانس-متقابل میان مشاهدات به دست آمده از جفت متغیر مورد نظر بوده که توسط واریانس هر کدام از متغیرها نرمال‌سازی گردیده است.

وابستگی-طیفی: در این تحقیق از نماد Coh_{XY} برای معیاره استفاده می‌شود. مطابق با تعریف صورت گرفته هر دو مفهوم دامنه و فاز اطلاعات براساس دامنه فرکانس f بوده و رابطه خطی مستقل از زمان میان دو طیف به دست آمده از فرآیند تصادفی X_t و Y_t به ترتیب متناظر با سری‌های زمانی $\{x_t\}$ و $\{y_t\}$ بوده و $(t=1,2,\ldots,T)$ است. روش وابستگی-طیفی در واقع معیاره‌ای براساس همبستگی می‌باشد و به طور رسمی به عنوان طیف-متقابل نرمال شده با طیف توانی هر کدام از سری‌های مورد بررسی تعریف شده است (بلوم‌فیلد[1]، ۲۰۰۴).

اطلاعات متقابل: معیاره‌ای مبتنی بر نظریه-اطلاعات بوده در حالی که دو معیاره قبلی (یعنی CC و SpeCoh) قادر به تفکیک همچون روابطی از سایر رابطه‌های موجود نیستند. اطلاعات-متقابل براساس آنتروپی اطلاعاتی شانون تعریف می‌شود، در واقع میزان اطلاعات موجود در متغیرهای تصادفی X و Y براساس فراوانی اطلاعات اندازه‌گیری شده مشخص می‌گردد (شانون و ویور[2]، ۱۹۴۹).

آنتروپی انتقال: مجموعه‌ای از معیاره‌های ارائه شده در قسمت‌های قبل قادر به اعمال جهت اتصال در سیستم‌های دینامیکی نیستند، به این علت معیاره آنتروپی انتقال (TE) با توسعه روش MI معرفی شده است. TE روش جایگزینی برای معیاره اطلاعات-نظری براساس جهت‌داری اطلاعات زمانی و نیز واگرایی کولبَک-لِیبلر بین احتمالات گذرای مداخله‌ای بوده که این موارد توسط احتمالات مشترک بیان می‌شوند، سپس توسط تخمین هسته اصلی به دست می‌آیند (اسچریبر[3]، ۲۰۰۰).

همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن: این معیاره که با عنوان ρ اسپیرمن شناخته شده است، میزان همبستگی دو متغیر X_t و Y_t میان رتبه سری‌های زمانی مرتبط با هر کدام از متغیرها $\{x_t\}$ و $\{y_t\}$ با واحدهای زمانی $(t=1,2,\ldots,T)$ محاسبه می‌نماید.

نگاشت متقابل همگرا: این روش براساس ساخت مجدد فضای حالت بوده (تاکین[4]، ۱۹۸۱) و مطابق با خصوصیات آن این معیاره روابط علیتی نامتقارن اندازه‌گیری می‌نماید که همین عامل موجب می‌شود بتوان با استفاده از آن روابط علت-معلولی از همبستگی‌های نادرست تفکیک نماید. فرآیند ساخت مجدد براساس تاخیر محاط در تئوری آشوب می‌باشد، در حالی که کلیت الگوریتم روش نگاشت متقابل همگرا براساس طرح ساده (Simplex projection) می‌باشد. تعریف کلی از تئوری آشوب که توسط ادوارد لورنز خلاصه‌سازی شده به صورت زیر است (سوگیهارا و همکاران[5]، ۲۰۱۲).

1- Bloomfield
2- Shannon and Weaver
3- Schreiber
4- Takens
5- Sugihara et al.

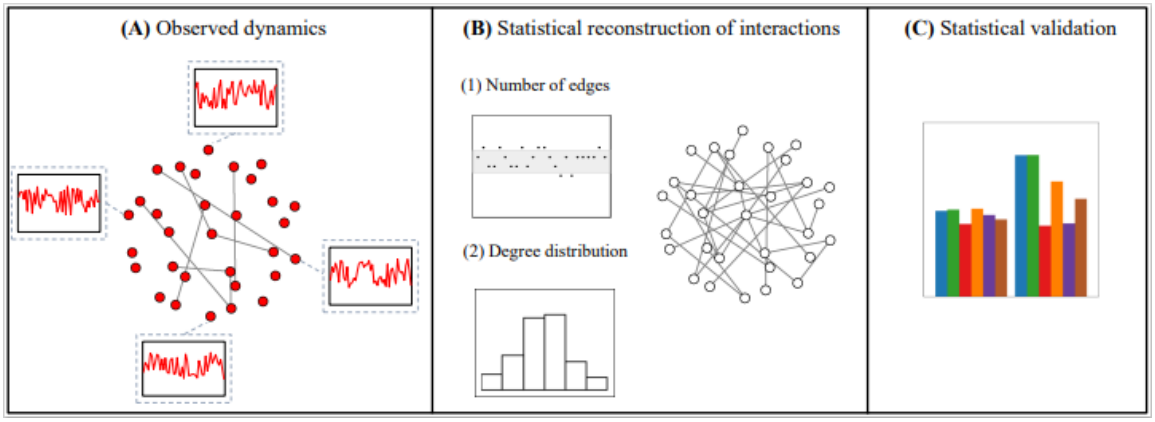
ـ خصوصیات اتصالات شبکه

برای بررسی قدرت آماری هر کدام از روش‌های به کار گرفته شده برای ساخت مجدد شبکه‌ها از یک سری معیاره‌ها بهره گرفته شده است. هرکدام از معیاره‌ها قابلیت روش‌ها را در ساخت مجدد نسبت به داده مرجع (Ground truth) مورد سنجش قرار می‌دهند. ماتریس درهم‌ریختگی ((Confusion Matrix (CM) اولین ابزار به کار گرفته شده است که با مقایسه‌ی آماری میان شبکه ساخته شده و شبکه مرجع میزان خطای رخ داده در قالب خطاهای نوع-۱ و نوع-۲ مشخص می‌نماید. به منظور اعمال مقادیر متفاوت سطح معنی‌دار در فرآیند ارزیابی از منحنی مشخصه گیرنده عملکردی Receiver Operating Characteristic (ROC) استفاده شده که دو توصیف‌گر حاصل از CM به ازاء آستانه‌های مختلف محاسبه و نحوه تغییرات آن در نمودار واحد ترسیم می‌نماید.

در ادامه به منظور ارزیابی عملکرد شبکه چندگانه یکی از پرکاربردترین نوع شبکه‌های ریاضیاتی (شبکه تصادفی) در نظر گرفته شد تا ضمن بررسی نحوه‌ی عملکرد این نوع شبکه‌های ساخته شده با استفاده از روش منتخب در این پژوهش، اثر تغییرات اندازه سیستم و نیز طول سری‌های تولیدی/مشاهداتی مورد بررسی قرار بگیرند. به این منظور از خصوصیات ساختاری شبکه‌های تصادفی استفاده شده است، از جمله تعداد یال‌ها، توزیع درجات، متوسط طول مسیر، و ضریب خوشه‌بندی موضعی و کلی. برای اطمینان از توزیع آماری مناسب برای درجات شبکه‌های تصادفی ساخته شده از معیاره اطلاعاتی آکاایکه Akaike Information Criterion (AIC) و بازه اطمینان حاصل از مقادیر متوسط به دست آمده از مدل ER استفاده شده است.

۳-نتایج

در این مقاله، ابتدا سیستم مصنوعی با استفاده از مدل‌های ریاضی شبکه‌ای مبتنی بر دینامیک خطی و غیرخطی مورد مدل‌سازی قرار گرفت تا درک جامعی از ضعف‌ها و قدرت‌های رویکرد آماری پیشنهاد شده -- بر مبنای آزمون فرض -- با استفاده از روش‌های پرکاربرد منتخب صورت پذیرد. تصویری شماتیک از فرآیند مدل‌سازی به کار رفته در تحقیق پیش رو در شکل ۱ ارایه شده است.

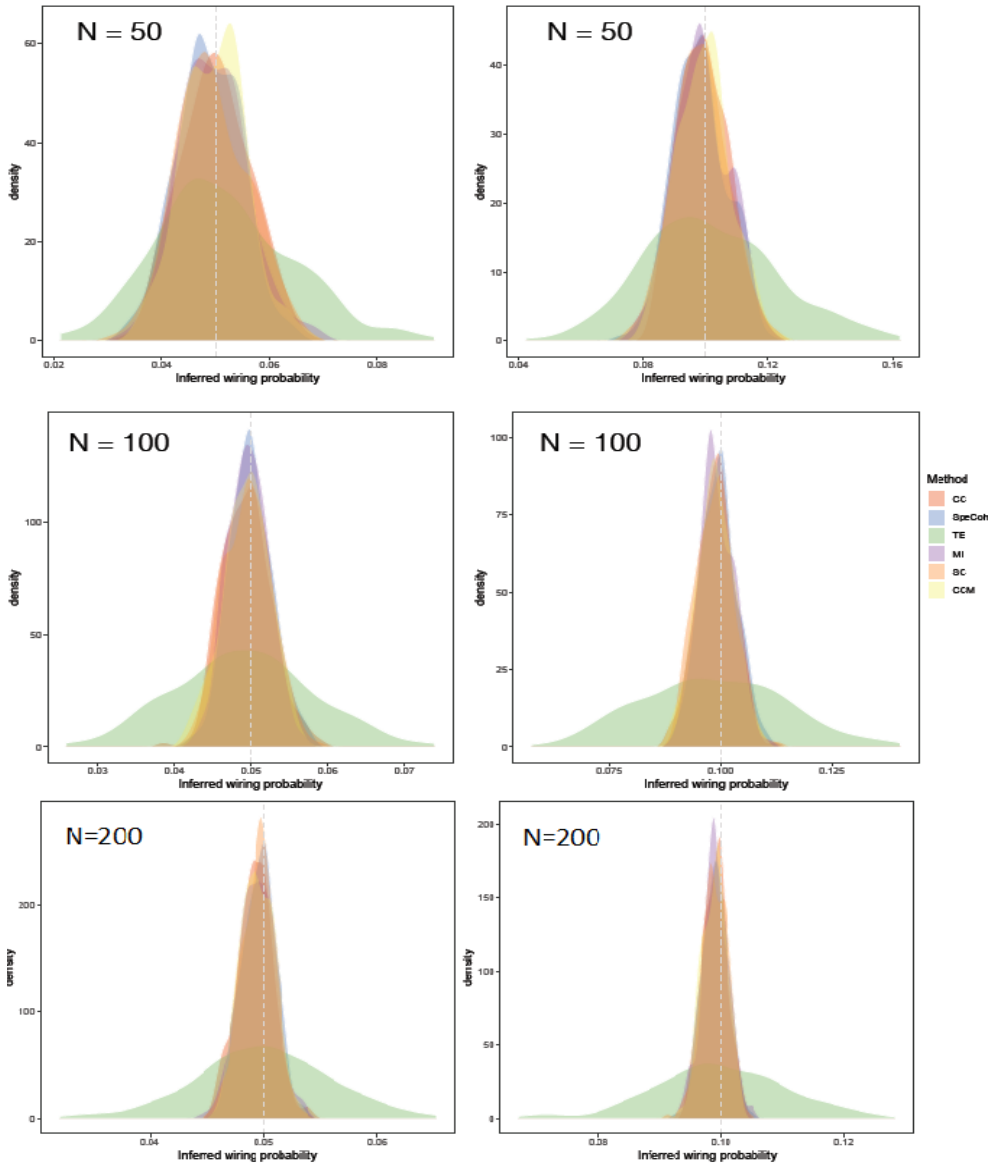


شکل (۱): شمای کلی از فرآیند طی شده در پژوهش حاضر؛ (الف) در هر مرحله مدل نمونه‌ای از میان شبکه شناخته شده انتخاب گردید. (ب) ساخت مجدد اندرکنش‌ها به صورت آماری با تعداد یال‌ها و سایر خصوصیات ساختاری تشخیص داده شد. (ج) اعتبارسنجی آماری با چندین معیاره انجام پذیرفت

Figure (1): An overall representation of the process in this study; (A) In each step, a toy model is chosen from a well-known network model. (B) Statistical reconstruction of interactions is identified by number of edges and other structural properties. (C) Statistical validation is done by several measures

در این تحقیق به منظور انتخاب روش مناسب برای ساخت شبکه‌های پیچیده حاصل از سیستم‌های طبیعی، مجموعه‌ای از مدل‌های شبکه‌ای انتخاب و دینامیک حاصل از اندرکنش میان جفت گره‌ها به صورت خطی و غیرخطی ایجاد گردید. برای توجیه‌پذیری فرض آماری تعریف شده، شبکه‌های تصادفی به همراه سایر مدل‌های شبکه‌ای ساخت مجدد شده‌اند. به این منظور ماتریس‌های مشابهتی، همبستگی و علیتی میان هرکدام از جفت گره‌ها مورد محاسبه قرار گرفت تا با استفاده از خصوصیات شبکه‌های ساخته شده فرض آماری مورد بررسی قرار گیرد.

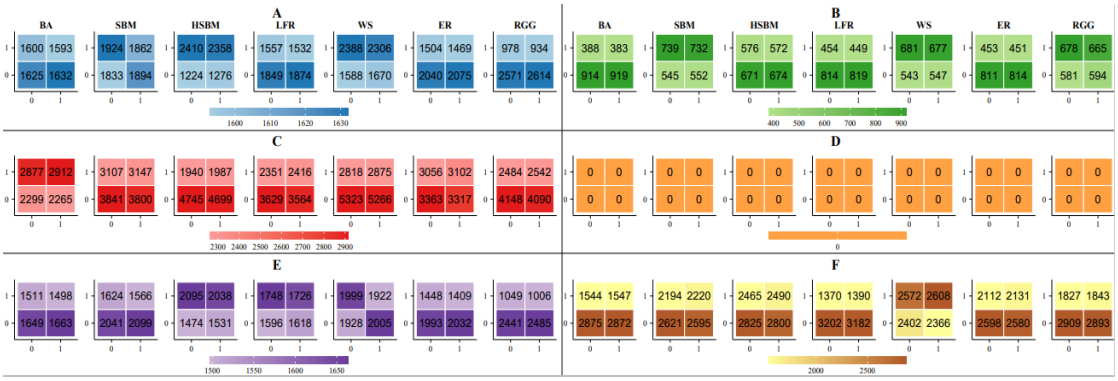
به منظور ایجاد اطمینان از فرض صفر در نظر گرفته شده در آزمون فرض، خصوصیات ساختاری شبکه‌های تصادفی ساخت مجدد شده توسط روش‌های به کار رفته نسبت به مدل ER مورد مقایسه قرار گرفته است. برای این منظور تعداد یال‌های به دست آمده نسبت به مدل مبنا مقایسه و خطای حاصله نسبت به مقادیر قابل قبول در سطح اطمینان تعریفی ترسیم گردیده است (شکل ۲). نمودار نتایج به دست آمده حاکی از دقت قابل قبول روش‌ها در ساخت مجدد شبکه‌های تصادفی با توجه به سطح اطمینان تعریف شده می‌باشد.



شکل (۲): توزیع احتمال استنباط شده، P، از مدل ساخت مجدد شده ER با تعداد گره‌های N = 50 (در اولین سطر)، N = 100 (در دومین سطر) و N = 200 (در سومین سطر) تا آزمون فرض به ازاء روش‌های مختلف –از جمله CC، SpeCoh و غیره– با دو مقدار مختلف برای سطح اطمینان به صورت α = 5% (در سمت چپ) و α = 10% (در سمت راست) تصدیق گردد

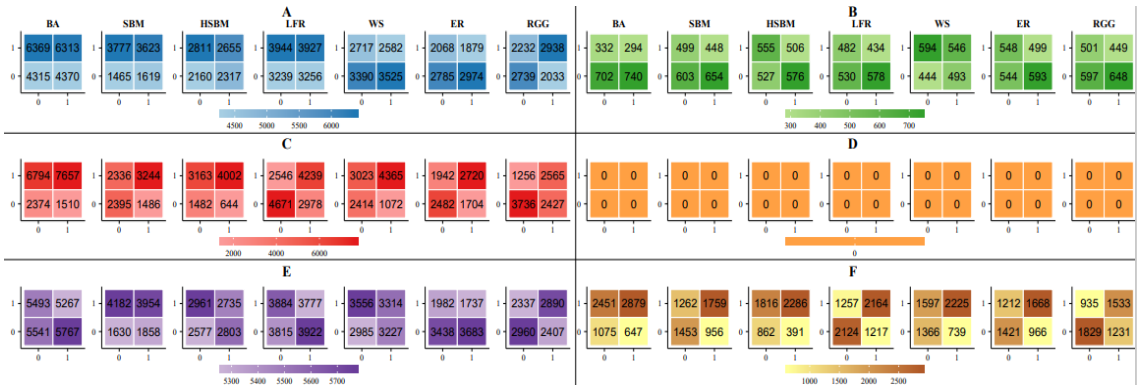
Figure (2): Distribution of inferred wiring probability, P, from reconstructed ER model with N = 50 (in first line), N = 100 (in second line) and N = 200 (in third line) to justify the hypothesis testing for different methods – namely CC, SpeCoh, etc – with two values for significance level as, α = 5% (left hand side) and α = 10% (right hand side)

با توجه به سیستم مصنوعی تعریفی براساس مدل‌های ریاضی شبکه‌ای عملکرد آماری تمامی روش‌های به کار رفته نسبت به هم مورد مقایسه قرار گرفته است (شکل‌های ۳ و ۴). به این منظور از معیاره‌های تعریفی برای بررسی سیستم مصنوعی استفاده شده تا دقت روش‌ها در ساخت مجدد ساختار شبکه‌های مورد نظر نسبت به مدل مرجع مورد مقایسه قرار گیرد. نتایج به دست آمده حاکی از این است تمامی روش‌ها در ساخت شبکه‌های حاصل از دینامیک خطی با مشکل مواجهه گردیده‌اند و در دینامیک غیرخطی وجود سطحی از خطا غیرقابل اغماض است، که در این میان دو روش MI و CCM نسبت به بقیه روش‌ها توانسته در ساخت مجدد شبکه‌ها از توانایی بیشتری برخوردار باشند. اهمیت روش علیتی CCM در ساخت شبکه‌های جهت‌دار قابل توجه است.



شکل (۳): ماتریس‌های درهم‌ریختگی (CMs) برای شبکه‌های غیرجهت‌دار ساخت مجدد شده برای توپولوژی شبکه به ازاء مدل‌های BA, SBM, HSBM, LFR, WS, ER و RGG با دینامیک ARMA، و سطح اطمینان ۵٪. معیارهای ساخت مجدد مختلف عبارتنداز: (الف) CC، (ب) SpeCoh، (ج) MI، (د) TE، (ی) SC، (ف) CCM

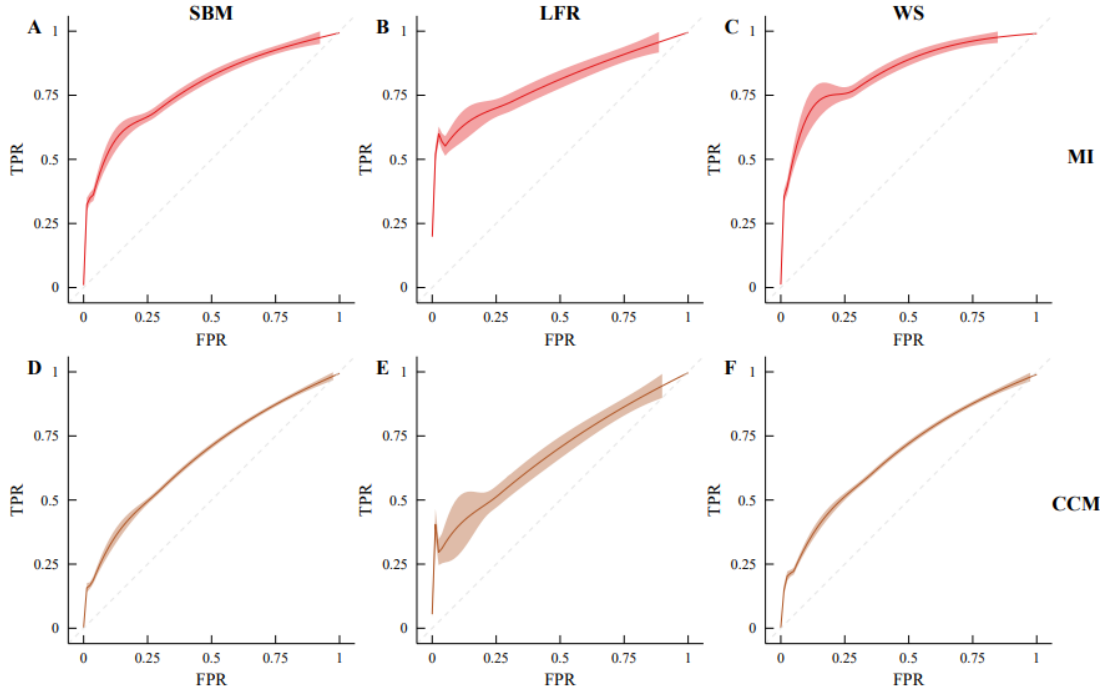
Figure (3): Confusion matrices (CMs) for reconstruction of undirected networks for network topology from BA, SBM, HSBM, LFR, WS, ER and RGG models with the ARMA dynamics, and significance level of 5%. Different reconstruction measures are: (A) CC, (B) SpeCoh, (C) MI, (D) TE, (E) SC, (F) CCM



شکل (۴): ماتریس‌های درهم‌ریختگی (CMs) برای شبکه‌های غیرجهت‌دار ساخت مجدد شده برای توپولوژی شبکه به ازاء مدل‌های BA, SBM, HSBM, LFR, WS, ER وRGG با دینامیک LOG، و سطح اطمینان ۵٪. معیارهای ساخت مجدد مختلف عبارتنداز: (الف) CC، (ب) SpeCoh، (ج) MI، (د) TE، (ی) SC، (ف) CCM

Figure (4): Confusion matrices (CMs) for reconstruction of undirected networks for network topology from BA, SBM, HSBM, LFR, WS, ER and RGG models with the LOG dynamics, and significance level of 5%. Different reconstruction measures are: (A) CC, (B) SpeCoh, (C) MI, (D) TE, (E) SC, (F) CCM

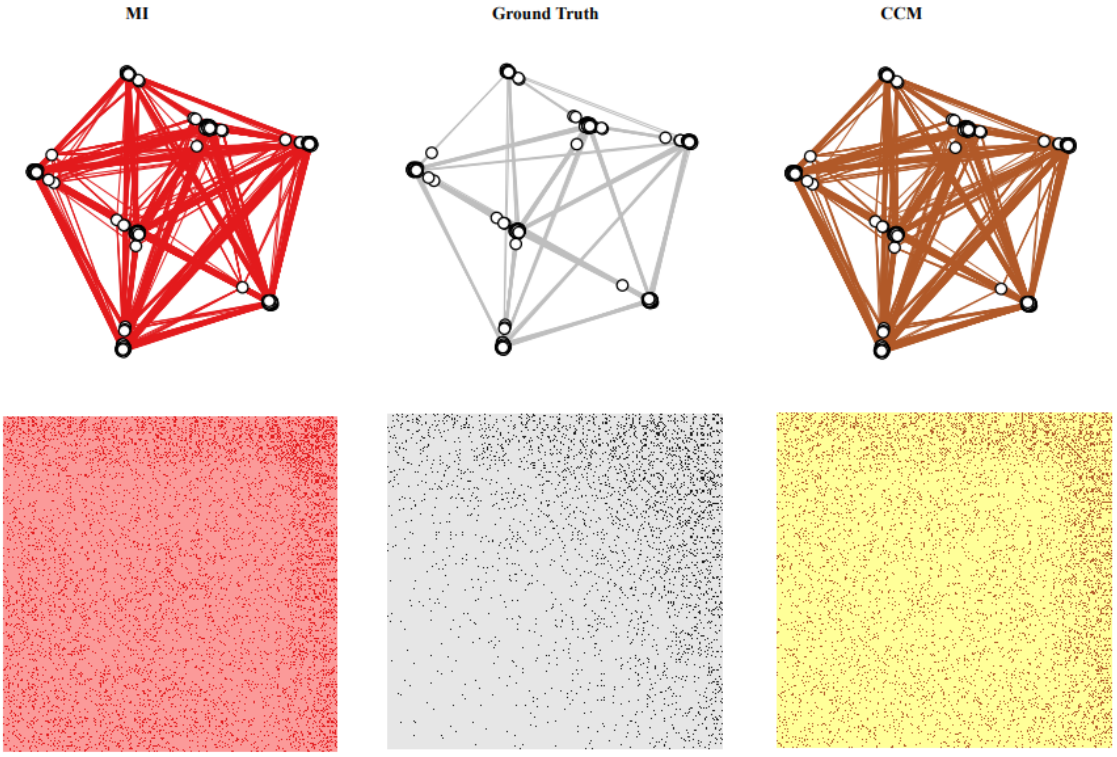
منحنی مشخصه گیرنده عملکردی (ROC) میزان نرخ مثبت صحیح ((True Positive Rate (TPR) در مقابل نرخ مثبت اشتباه (Positive Rate (FPR) False) به نمایش می‌گذارد، که هر کدام از مولفه‌ها به ترتیب حساسیت و ۱—مشخصه اطلاق می‌شوند. هر کدام از مولفه‌ها با تغییر میزان آستانه در سطح نسبتا معنی‌دار به دست می‌آیند و به عنوان روشی برای ارزیابی شبکه‌های ساخت مجدد شده به ازای توپولوژی‌ها و دینامیک مختلف به شمار می‌آید. در شکل ۵ به تعداد ده نمونه برای توپولوژی شبکه در نظر گرفته شده است، که این تعداد با ایجاد سایه در اطراف هر کدام از نمودارهای خطی مشخص شده و رنگ انتخابی برای هر کدام از نمودارها مطابق با شکل‌های قبلی برای روش‌های ساخت مجدد انتخابی، یعنی MI و CCM در راستای بعد افقی است.



شکل (۵): منحنی‌های مشخصه گیرنده عملکردی (ROC) به دست آمده از شبکه‌های غیرجهت‌دار ساخت مجدد شده با دینامیک غیرخطی (LOG). توپولوژی‌های شبکه، عبارتند از SBM, LFR وWS که در بعد قائم ارائه شده‌اند با روش‌های ساخت مجدد انتخابی، یعنی MI و CCM، که در بعد افقی مشخص شده‌اند

Figure (5): Receiver Operating Characteristic (ROC) curves from reconstruction of the undirected networks with the nonlinear dynamics (LOG). The network topologies are SBM, LFR and WS shown in vertical dimension to the selected reconstruction methods, namely MI and CCM, in horizontal dimension

در ادامه تصویری از شبکه‌های ساخته شده با روش‌های منتخب و توپولوژی‌های مناسب برای ساخت مجدد شبکه‌ها با روش آماری پیشنهاد شده به همراه ماتریس‌های درهم‌ریختگی در شکل۶ ارائه شده است.



شکل (۶): تصویری از شبکه‌های ساخت مجدد شده و مدل مبنا به همراه ماتریس‌های درهم‌ریختگی. در شکل ارائه شده، توپولوژی شبکه‌ها از مدل LFR تبعیت می‌کند، به همراه شبیه‌سازی صورت گرفته از واحدهای به هم پیوسته غیرخطی حاصل از مدل LOG، و یکی از شبیه‌سازی‌های شبکه به عنوان مدل مبنا (یال‌های خاکستری) مورد استفاده قرار گرفته است. رنگ‌های تیره نشان‌دهنده اتصالات در ماتریس‌های درهم‌ریختگی متناظر با شبکه‌های ساخت مجدد می‌باشند

Figure (6): A representation of reconstructed networks and ground truth together with accompanying adjacency matrices. In this illustration, topology of the networks follows LFR model with the simulations from the nonlinearly coupled units with the LOG, and one of the network realizations is used as ground truth (gray edges). The dark colors indicate links on the corresponding adjacency matrices of the reconstructed networks

۴- بحث و نتیجه‌گیری

ایجاد ساختار شبکه‌های پیچیده با استفاده از مشاهدات واحدهای دینامیکی خود وظیفه‌ی چالش‌برانگیزی بوده تا ساختار ایجاد شده برای درک الگوی به هم پیوسته و اندرکنش‌های فیزیکی به کار گرفته شود. کمی‌سازی همبستگی آماری دودوئی روش بسیار رایجی است، هر چند استفاده از این روش عیب‌هایی بر فرآیند مدل‌سازی تحمیل می‌نماید. در حقیقت، تحلیل آماری را می‌توان به طور اطمینان‌بخشی برای ترسیم اتصالات عملکردی

در سیستم پیچیده مورد استفاده قرار داد: در اغلب موارد چگونگی اینکه واحدهای سیستم به طور مستقیم به هم مرتبط نیستند، ولی قادر به تبادل اطلاعات با هم بوده یا همین واحدهای مجزاء با عملکرد بخصوص رفتار می‌نمایند، موجب شده درک همچون رفتارهایی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار باشد تا دیدگاه‌های جدیدی از سیستم مورد نظر به دست آید. در حالی که ساختار بسیاری از سیستم‌های پیچیده یا ناشناخته بوده یا به سختی قابل مشاهده است، در مقابل دینامیک واحدهای این نوع سیستم‌ها غالباً به سادگی اندازه‌گیری می‌شود. در زمینه‌های مختلف، ساخت مجدد ساختار شبکه با استفاده از دینامیک مشاهداتی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است، در واقع نوعی مسئله‌ی معکوس به شمار می‌آید. راهکار کلی برای این نوع مسائل معکوس هنوز شناخته شده نیست و اغلب از روش‌های ساخت مجدد بر مبنای داده‌کاوی استفاده می‌شود بدون اینکه درک واضحی از محدودیت‌ها صورت گرفته باشد یا اینکه فرآیند ساخت فاقد ارزیابی آماری است.

چالشی که همچنان محققان با آن رو به رو هستند استنتاج توپولوژی شبکه با استفاده از دینامیک مشاهداتی بدون توجه به الزامات روش به کار گرفته شده است تا وابستگی میان واحدهای دینامیکی سیستم مورد بررسی کمی‌سازی شود. از سوی دیگر، برخی مشکلات به علت استفاده اندک از اطلاعات آماری واحدهای دینامیکی به هم پیوسته ایجاد می‌شوند. در این پژوهش همچون عواملی مورد بررسی قرار گرفته‌اند تا روش مناسب برای ساخت مجدد اتصالات شبکه براساس رویکرد آماری قدرتمند -- آزمون فرض-- مورد بررسی قرار گیرد و تحلیل سیستماتیک برای شش روش متداول مورد استفاده -- همچون CC، SpeCoh، MI و غیره -- انجام پذیرفت تا همبستگی، مشابهت و علیت میان دو به دو سری‌ها استنتاج گردد. تعامل میان انواع مختلف توپولوژی‌های شبکه و نیز دینامیک مورد بررسی قرار گرفت، به این منظور از مدل‌هایی که به طور گسترده در مدل‌سازی طیف وسیعی از سیستم‌های تجربی استفاده شده شامل اتصالات بدون-مقیاس، ساختار مدولار یا دنیای-کوچک و شبکه احتمالی به همراه انواع مختلفی از دینامیک به کار گرفته شده است؛ در این تحقیق دینامیک ایجادی به طور خطی و غیرخطی به ترتیب ناشی از مشاهدات به دست آمده از مدل‌های ARMA و LOG است. به منظور ارزیابی عملکرد هر یک از روش‌های پرکاربرد به کار گرفته شده تحلیل جامعی انجام گرفت تا دقت این روش‌ها در استنتاج اتصالات عملکردی با استفاده از سیگنال‌های مشاهداتی بر روی هر کدام از واحدها آشکار گردد تا در ادامه بتوان با قابل اعتمادترین روش به کمک مفاهیم شبکه‌های پیچیده سیستم‌های مورد مطالعه از دنیای واقعی – مثلا اقلیم کره‌ی زمین و سطح آب زیرزمینی -- مورد بررسی قرار داد.

در این تحقیق چارچوب نظری کلی با یک سری فرضیات محدود کننده توصیف گردیده که این فرضیات معمولاً در این نوع مسائل معکوس در نظر گرفته می‌شوند؛ توصیف صورت گرفته این امکان را فراهم نمود تا در خصوص علت شکست روش‌های ساخت مجدد مرسوم پیش‌بینی صورت پذیرد. در حقیقت صرفاً وجود خطاهای آماری

مجاز توسط آزمون فرض به ناچار موجب ساخت مجدد روابط ساختاری و عملکردی غیرفیزیکی می‌شود. به این منظور ساخت کل شبکه‌های کاذب با استفاده از سیگنال‌های نویزدار ناهمبسته تولید شده از واحدهای دینامیکی ناپیوسته انجام گردیده‌اند، که نتایج به دست آمده نشان می‌دهد اثر اندرکنش‌های کاذب قابل اغماض نیست. در حالت کلی زمانی که سیگنال‌های به دست آمده از سیستم‌های تجربی به درستی ساختار یافته باشند، روش‌های مرسوم به طور اطمینان‌بخشی قادر به تشخیص روابط موجود است.

تحلیل انجام گرفته مشخص نمود که دقت ساخت مجدد شبکه با تعامل میان ساختار و دینامیک پیچیده دچار اشکال می‌شود. تنها ترکیب‌های به خصوص برای ساخت مجدد اطمینان‌بخش اجازه داده می‌شود و بدون پیش آگاهی از توپولوژی سیستم پیچیده و نوع دینامیک جمعی در هر کدام از مکان‌ها، انجام هرگونه ارزیابی در خصوص اتصال ساخت مجدد شده به شدت دشوار می‌باشد. در حالت کلی می‌توان گفت مورد اشاره شده به عنوان یکی از محدودیت‌های روش‌های دودوئی و فقدان مدل‌های مولد به شمار می‌آید: ممکن است با چارچوب‌های مناسب‌تری راهکارهای متعددی فراهم گردد، همچون استنتاج بیزین که در مطالعه‌ای که اخیراً انجام گرفته مدل پیشنهادی به طور همزمان برای ساختار و دینامیک سیستم در نظر گرفته شده است (نقی‌پور[1]، ۲۰۲۰).

نتایج به دست آمده نشان داد با آگاهی از محدودیت‌های ابزارهای آماری قادر به صحت‌سنجی درست از قدرت روش‌ها خواهیم بود که از این روش‌ها برای استنتاج نتایج استفاده شده است. یکی از محدودیت‌هایی که در استفاده از روش آماری پیشنهادی لازم است مدنظر قرار گیرد، مسئله‌ی ناهمترازی دو دسته‌ی موجود در شبکه است که مشکل حاضر با روش اعتبارسنجی متقابل (Cross-validation)، به عنوان مثال نمونه‌گیری تصادفی (Random subsampling) برطرف گردید. به طور کلی نتایج نشان داد که روش MI -- با استفاده از همبستگی غیرخطی در شبکه‌های غیرجهت‌دار -- و روش CCM -- با استفاده از ساخت مجدد فضای حالت به دست آمده از دینامیک مشاهداتی برای استنتاج روابط علیتی در شبکه‌های جهت‌دار -- به طور کلی نسبتاً خوب عمل کرده‌اند، اگرچه شرایط ساخت مجدد شبکه‌ها با روش‌های مورد اشاره زمانی که توپولوژی به صورت ترکیبی از مدولار و بدون-مقیاس و/یا دنیای-کوچک شرایط مطلوب‌تری ایجاد نموده است. در حالت کلی، زمانی که دینامیک جمعی به طور ذاتی غیرخطی باشد، ساخت مجدد قابل اطمینانی امکان‌پذیر خواهد بود.

به طور خلاصه می‌توان گفت ساخت مجدد شبکه با استفاده از مشاهدات حاصل از دینامیک جمعی هنوز هم چالش‌برانگیز به شمار می‌آید و نیاز به توجه بیشتری دارد، به همین صورت توسعه روش‌های قدرتمند ضروری

1 Naghipour

به نظر می‌رسد تا به طور همزمان تعامل میان ساختار و دینامیک نامشخص در نظر گرفته شود. علاوه بر این، پژوهش حاضر به توسعه روش‌های جدید برای ساخت مجدد شبکه فرا می‌خواند تا توانایی آماری لازم برای مواجه با عوامل متعدد از جمله اندازه‌ی سیستم داشته باشند.

تقدیر و تشکر

پژوهش حاضر حاصل نتایج به دست آمده در طول دوران فرصت مطالعاتی می‌باشد که توسط ل.ن. در دانشگاه رویرای ویرجیلی در کشور اسپانیا به سرپرستی پروفسور آلکس آرناس سپری شد. بخشی از هزینه‌های صرف شده توسط وزارت علوم، تحقیقات و فناوری کشور جمهوری اسلامی ایران تامین شده است.

۵-منابع

1-Albert R. Barabási A.L. (2002). Statistical mechanics of complex networks. Reviews of Modern Physics, 74:47. doi: https://doi.org/10.1103/RevModPhys.74.47.

2-Bloomfield P. (2004). Fourier analysis of time series: An introduction. John Wiley & Sons.

3-Boccaletti S. Latora V. Moreno Y. Chavez M. Hwang D.U. (2006). Complex networks: Structure and dynamics. Physics Reports. 424:175–308. doi: https://doi.org/10.1016/j.physrep.2005.10.009.

4-Boccaletti S. Bianconi G. Criado R. Del Genio C.I. Gómez-Gardenes J. Romance M. Sendina-Nadal I. Wang Z. Zanin M. (2014). The structure and dynamics of multilayer networks. Physics Reports. 544:1–122. doi: https://doi.org/10.1016/j.physrep.2014.07.001.

5-Hu Z.L. Shen Z. Tang C.B. Xie B.B. Lu J.F. (2018). Localization of diffusion sources in complex networks with sparse observations. Physics Letters A. 382(14):931-7. doi: https://doi.org/10.1016/j.physleta.2018.01.037.

6-Gao J. Barzel B. Barabási A.L. (2016). Universal resilience patterns in complex networks. Nature. 530(7590):307-12. doi: https://doi.org/10.1038/nature16948.

7-Ghorbani M.A. Khatibi R. FazeliFard M.H. Naghipour L. Makarynskyy O. (2016). Short-term wind speed predictions with machine learning techniques. Meteorology and Atmospheric Physics. 128(1):57-72. doi:https://doi.org/10.1007/s00703-015-0398-9.

8-Khatibi R. Naghipour L. Ghorbani M.A. Aalami M.T. (2013). Predictability of relative humidity by two artificial intelligence techniques using noisy data from two Californian gauging stations. Neural Computing and Applications. 23(7):2241-52. doi: https://doi.org/10.1007/s00521-012-1175-z.

9-Kivelä M. Arenas A. Barthelemy M. Gleeson J.P. Moreno Y. Porter M.A. (2014). Multilayer networks. *Journal of Complex Networks*. 2:203–271. doi: https://doi.org/10.1093/comnet/cnu016.

10-Lancaster G. Iatsenko D. Pidde A. Ticcinelli V. Stefanovska A. (2018). Surrogate data for hypothesis testing of physical systems. Physics Reports. 748:1–60. doi: https://doi.org/10.1016/j.physrep.2018.06.001.

11-Li C. Wang L. Sun S. Xia C. (2018). Identification of influential spreaders based on classified neighbors in real-world complex networks. Applied Mathematics and Computation. 320:512-23. doi: https://doi.org/10.1016/j.amc.2017.10.001.

12-May R.M. (2004). Simple mathematical models with very complicated dynamics. In The Theory of Chaotic Attractors (pp. 85-93). Springer, New York, NY.

13-Naghipour L. (2020). Multilayer analysis and modeling of complex climate networks. PhD thesis. Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz.

14-Naghipour L. Aalami M.T. Nourani V. (2021). Reconstruction of network connectivity by the interplay between complex structure and dynamics to discover climate networks. Theoretical and Applied Climatology. 143:969-987. doi: https://doi.org/10.1007/s00704-020-03410-1.

15-Naghipour L. Aalami M.T. Nourani V. (2022). Unravelling the backbone of climate networks from the analysis of collective dynamics and time reversal. International Journal of Climatology.

16-Schreiber T. (2000). Measuring information transfer. Physical review letters. 85(2):461. doi: https://doi.org/10.1103/physrevlett.85.461.

17-Shamshirband S. Hashemi S. Salimi H. Samadianfard S. Asadi E. Shadkani S. ... Chau K.W. (2020). Predicting standardized streamflow index for hydrological drought using machine learning models. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. 14(1):339-350. doi: https://doi.org/10.1080/19942060.2020.1715844.

18-Shannon CE. Weaver W. (1949). The mathematical theory of information. Urbana: University of Illinois Press. 97(6):128-64.

19-Sivakumar B. Woldemeskel F.M. (2015). A network-based analysis of spatial rainfall connections. *Environmental Modelling & Software*. 69:55-62. doi: https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.02.020

20-Sugihara G. May R. Ye H. Hsieh C.H. Deyle E. Fogarty M. Munch S. (2012). Detecting causality in complex ecosystems. Science. 338(6106):496-500. doi: https://doi.org/10.1126/science.1227079.

21-Takens F. (1981). Detecting strange attractors in turbulence. In Dynamical systems and turbulence, Warwick 1980 (pp. 366-381). Springer, Berlin, Heidelberg.

22-Wagner M.P. Oppelt N. (2020). Extracting agricultural fields from remote sensing imagery using graph-based growing contours. *Remote Sensing*. 12(7):1205. doi: https://doi.org/10.3390/rs12071205.

23-Wang C. Shao F. Zhang Z. Sui Y. Li S. (2021). Mining the features of spatial adjacency relationships to improve the classification of high resolution remote sensing images based on complex network. *Applied Soft computing*. 102:107089. doi: https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107089.

24-Wiedermann M. Donges J.F. Handorf D. Kurths J. Donner R.V. (2017). Hierarchical structures in Northern Hemispheric extratropical winter ocean-atmosphere interactions. *International Journal of Climatology*. 37(10):3821-3836. doi: https://doi.org/10.1002/joc.4956.

25-Wu C.L. Chau K.W. (2013). Prediction of rainfall time series using modular soft computing methods. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 26(3):997-1007. doi: https://doi.org/10.1016/j.engappai.2012.05.023.

26-Wu J. Zeng J. Chen Z. Chi KT. Chen B. (2018). Effects of traffic generation patterns on the robustness of complex networks. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 492:871-7. doi: https://doi.org/10.1016/j.physa.2017.11.016.

27-Xia W. Wang B. Zhang L. 2013. Band selection for hyperspectral imagery: A new approach based on complex networks. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 10(5):1229-33. doi: https://doi.org/10.1109/LGRS.2012.2236819.

28-Ye H. Sugihara G. 2016. Information leverage in interconnected ecosystems: Overcoming the curse of dimensionality. Science. 353:922–925. doi: https://doi.org/10.1126/science.aag0863.

29-Zou Y. Donner R.V. Marwan N. Donges J.F. Kurths J. 2019. Complex network approaches to nonlinear time series analysis. *Physics Reports*. 787:1-97. doi: https://doi.org/10.1016/j.physrep.2018.10.005.