

بررسی ماهیت و پیش‌بینی سری‌های زمانی زمین‌لرزه‌های شهر تهران

فریده مرادی طیبی^۱، ساسان معتقد^{۲*}، رضوان داستانیان^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیا بهبهان

۲. استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیا (ص) بهبهان

۳. استادیار، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیا (ص) بهبهان

sasanmotaghd1@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۹۷/۵/۲۲ تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۱/۱۰

چکیده

با بررسی تاریخچه تلاش‌های بشر برای ایمن‌سازی در برابر آثار زلزله، با حوادث تلخ و زیانبار بسیاری مواجه می‌شویم. با توجه به آنکه اغلب تصمیم‌گیری‌های مرتبط با تأثیر زمین‌لرزه، بر پایه تصادفی بودن آنها اتخاذ شده است، بررسی درستی این فرض می‌تواند گره بخشی از خطاها در مقدمات ایمن‌سازی را آشکار سازد. بررسی‌های اخیر نشان داده است که ساختار دینامیکی این رخدادهای پیچیده با استفاده از مفاهیم نظریه آشوب بیش از سایر تئوری‌ها قابل فهم است. در این مقاله، ۹ زمین‌لرزه رخ داده در محدوده شهر تهران انتخاب و ساختار شتاب‌نگاشت‌ها از نقطه نظر تصادفی و یا غیرخطی بودن سری زمانی مربوط به آنها بررسی شده است. به این منظور بازسازی فضای فاز برای تعیین زمان تأخیر با استفاده از روش تابع میانگین اطلاعات متقابل و همچنین روش نزدیک‌ترین همسایه‌های کاذب برای تخمین بعد محاط، بکار گرفته شده است. از روش بعد همبستگی برای بررسی حضور آشوب در ساختار سری زمانی زمین‌لرزه‌ها و از روش پیش‌بینی موضعی و شبکه عصبی مصنوعی، برای بررسی ماهیت آشوبی و پیش‌بینی زمین‌لرزه‌های آشوبی استفاده شده است. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که دینامیک حاکم بر زمین‌لرزه‌های این منطقه تصادفی نیست. این زلزله‌ها رفتار آشوبی با بعد بالا از خود نشان می‌دهند. پیش‌بینی زلزله‌ها با استفاده از شبکه عصبی نتایج رضایت بخش دارد.

واژگان کلیدی: زمان تأخیر، بعد محاط، بعد همبستگی، زمین‌لرزه، شبکه عصبی

۱- مقدمه

آشنایی با ماهیت شتاب‌نگاشت زلزله‌ها، لازمه انجام تحلیل‌هایی است که نیازمند بازسازی یا استفاده از این شتاب‌نگاشت‌ها است. به عنوان نمونه، از چنین تحلیل‌هایی، می‌توان تولید زلزله یا کنترل سازه‌ها را نام برد. در سال‌های اخیر ایده کنترل سازه‌ها پیشرفت‌های بسیاری داشته است. به صورت کلاسیک کنترل سازه‌ها به سه دسته، کنترل فعال، نیمه فعال و غیرفعال دسته‌بندی می‌شود. انجام کنترل فعال و نیمه فعال در لحظه t_2 مبتنی بر پردازش بازخورد پاسخ سازه به تحریک در لحظه t_1 است [1]. بدین ترتیب به دلیل تاخیر زمانی تمهید ظرفیت سختی و مقاومت نسبت به نیاز، می‌تواند منجر به ناکارآمدی کنترل شود. برای رفع این مشکل دو راهکار به نظر می‌رسد، اول آنکه بتوان با اصلاح سیستم سنسورینگ، پردازش و کنترل، زمان عکس‌العمل را کاهش داد و به واقعی شدن تحریک القایی کنترلی کمک کرد، بدیهی است رسیدن به چنین هدفی با محدودیت‌های علمی، تکنولوژیکی و اقتصادی مواجه است [2]. راهکار دوم پیش‌بینی گام‌های آتی سری زمانی تحریک بر اساس اطلاعات موجود تا لحظه t_1 به گونه‌ای است که پاسخ مناسب در لحظه t_2 (بر اساس پیش‌بینی) اعمال شده و با نزدیک کردن نیاز و ظرفیت ایمنی سازه تضمین شود [3].

به این ترتیب، تشخیص ماهیت رخداد زمین‌لرزه‌ها اعم از تصادفی، معین و یا آشوبی بودن برای بازتولید آنها، ضروری است. بسیاری از تحلیل‌های زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله مبتنی بر فرض تصادفی بودن زلزله‌هاست. ایده تصادفی بودن سری زمانی زلزله‌ها پذیرفته‌شده‌ترین ایده در این زمینه است. برخی پژوهشگران به ویژه در سالهای اخیر این فرض را به چالش کشیده‌اند. این پژوهشگران معتقدند که زمین-لرزه‌ها ظاهری تصادفی دارند و به نظر می‌رسد که از الگوی رفتاری خاصی پیروی نمی‌کنند. اما بررسی‌های دقیق‌تر با استفاده از نظریه آشوب، در برخی موارد وجود نظم و الگوی خاص در این پدیده را تایید کرده است.

پاولوس و همکاران [4] روش تحلیل آشوبی را درباره یک سری زمانی لرزه‌ای ثبت شده در ژاپن، بکار برده و نشان دادند که دارای سازوکار اساسی یک فرآیند آشوبی است. همچنین پاولوس و همکاران [5] سری زمانی زمین‌لرزه در منطقه یونان را با استفاده از بازسازی فضای فاز بررسی کردند که نتایج پژوهش آنها، دینامیک آشوبی با سری زمانی مورد بررسی در یونان را نشان می‌داد. یانگ و همکاران [6] شتاب‌نگاشت زمین‌لرزه را با استفاده از نظریه آشوب بررسی کردند و نشان دادند که شتاب‌نگاشت زمین‌لرزه خواص آشوبی دارد و بی‌نظمی و پیچیدگی حرکات، بازتابی از غیرخطی بودن فرآیند زمین‌لرزه است. کاستیک و همکاران [7] حرکات زمین ناشی از زمین‌لرزه کرالجبوو را که در سال ۲۰۱۰ در صربستان رخ داده بود و در ۶ ایستگاه لرزه‌نگاری ثبت شده بود بررسی کردند. نتایج حاکی از تصادفی بودن شتاب زمین‌لرزه در ایستگاه‌های بررسی شده بود. پوتیراکیس و همکاران رفتار غیر خطی زلزله‌های ۱۴ ژانویه ۲۰۱۴ و ۳ فوریه ۲۰۱۴ کفالونیا یونان را با استفاده از نظریه آشوب را بررسی کرده و نشان دادند که هر سری زمانی هر دو زلزله رفتار آشوبی دارد [8]. عباسی و غلامی در بررسی مسائل معکوس ژئوفیزیکی با استفاده از نظریه آشوب، این روش را در مقایسه با سایر روش‌های ارزیابی ژئوفیزیکی مناسب‌تر می‌دانند [9].

به این ترتیب نظریه آشوب می‌تواند ابزار بسیار مفیدی برای تعیین ماهیت زمین‌لرزه‌ها و تعیین ویژگی‌ها و متغیرهای حاکم بر فرآیند بازتولید آنها باشد. همچنین در صورتی که با استفاده از این نظریه، ماهیت آشوبناکی سری‌های مختلف زمانی لرزه‌ای به اثبات برسد، این نظریه می‌تواند گامی مثبت برای پیش‌بینی کوتاه مدت سری‌های زمانی لرزه‌ای و در پی آن انجام هر چه دقیق‌تر مراحل تحلیل، طراحی لرزه‌ای و بهینه‌سازی سازه‌ها بردارد. هدف اصلی این مقاله، تشخیص سازوکار عملکرد زلزله‌های شهر تهران از نقطه نظر تصادفی و یا غیرخطی بودن سری زمانی مربوط به آنها است. در صورت تایید روند غیرخطی بودن سری‌ها، آشوبناکی آنها و

امکان پیش‌بینی فرآیند زمین‌لرزه نیز بررسی می‌شود. به منظور درستی‌آزمایی نتایج پیش‌بینی زلزله، با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی، به عنوان تأییدی بر غیر تصادفی بودن فرآیند نیز در انتهای مقاله مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله، در بخش ۲ اطلاعات اولیه در مورد بازسازی فضای فاز با هدف تعیین ماهیت آشوبی یا تصادفی پدیده‌ها بیان می‌شود. اشاره مختصری از شبکه‌های عصبی مصنوعی در بخش ۳ آورده شده است. در بخش ۴، ماهیت ۹ زمین‌لرزه به مرکزیت شهر تهران بررسی و امکان پیش‌بینی این پدیده با روش پیش‌بینی موضعی و با کمک شبکه‌های عصبی مورد بررسی قرار گرفته است. در پایان، بخش ۵ نتیجه مقاله بیان می‌کند.

۲- بازسازی فضای فاز و بررسی ماهیت زمین‌لرزه

مفهوم فضای فاز ابزار مفیدی برای تشخیص سیستم‌های دینامیکی است. با توجه به این مفهوم یک سیستم دینامیکی می‌تواند توسط دیاگرام فضای فاز که اساساً یک سیستم مختصاتی است، توصیف شود که حالت سیستم را در هر لحظه توصیف می‌کند. در برخورد با سیستم‌های واقعی، مشکل اساسی، نبود اطلاعات کافی درباره متغیرهای تحت حاکمیت سیستم است. در چنین شرایطی یکی از روش‌های ارائه دینامیک سیستم، استفاده از روش بازسازی فضای فاز که به معنای بازسازی یا محاط کردن یک سری زمانی تک بعدی یا تک متغیره در یک فضای فاز چند بعدی است. بازسازی فضای مناسبی برای توصیف رفتار سیستم‌های دینامیکی با استفاده از سری زمانی اسکالر، توسط قضیه "ابعاد محدود شده تیکن" امکان‌پذیر است که به این فضای بازسازی شده، فضای فاز می‌گویند که از زمان تاخیر برای نگاشتن یک سری زمانی در فضای de بعدی استفاده می‌کند. بازسازی فضای حالت با این روش موجب می‌شود که بعد لازم برای افراز سیستم کاهش یافته، اما با فضای حالتی که داده‌های سری زمانی در آن تولید شده‌اند، معادل باشد. در راستای بازسازی فضای حالت، بردارهای تاخیر جایگزین

بردارهای حالت می‌شوند. برای تشکیل بردارهای تاخیر دو نکته حائز اهمیت است، یکی تعداد مولفه‌های (درایه‌های) موجود در این بردارها که بعد محاط یا m نامیده می‌شود و دیگری فاصله زمانی بین هر دو مولفه که زمان تاخیر یا τ نامیده می‌شود [10]. انتخاب یک زمان تاخیر مناسب اجازه آشکار شدن جاذب را می‌دهد و این در حالی است که بردارهای حالت در مستقل‌ترین وضعیت خود قرار دارند [11 و 12]. روش‌های متفاوتی برای تعیین زمان تاخیر وجود دارد که مهم‌ترین آنها تابع خودهمبستگی (ACF) و تابع میانگین اطلاعات متقابل (AMI) است. روش اطلاعات متقابل نسبت به روش خودهمبستگی دارای ارجحیت بیشتری است، چون تابع اطلاعات متقابل میزان وابستگی‌های خطی و یا غیرخطی مولفه‌های سری را تعیین می‌کند و برای سیستم‌های طبیعی مناسب‌تر است. در روش میانگین اطلاعات متقابل که بر پایه ایده شانون مطرح شد، زمان رخ دادن اولین مینیمم در نمودار تابع اطلاعات متقابل به عنوان زمان تاخیر مناسب در نظر گرفته می‌شود. یکی از روش‌های مرسوم برای پیدا کردن بعد محاط بهینه سری‌های زمانی آشوبی، روش شمارش نزدیکترین همسایه‌های کاذب است. این نگرش بر اساس بررسی این ویژگی پایه‌ای بنا شده است که در جاذب سیستم آشوبگونه مسیرهای حالت یکدیگر را قطع نمی‌کنند. بعد همبستگی برای تعیین ماهیت یک فرآیند بکار برده می‌شود. یک سری تصادفی از تمام ظرفیت فضای فاز موجود برای نمایش خود استفاده می‌کند، درحالی که یک سری آشوبناک، فقط بخشی از بعد فضای فاز را به نام بعد فرکتالی (بعد آشوبی) اشغال می‌کند.

از مشخصه‌های مهم سیستم‌های آشوبی، حساسیت آنها به شرایط اولیه است که این ویژگی توسط نمای لیاپانوف اندازه‌گیری می‌شود. آزمون نمای لیاپانوف بر مبنای این ویژگی از سری‌های آشوبی است که نقاط مجاور در این سری‌ها به مرور زمان از هم جدا شده و نسبت به هم واگرا می‌شوند. نمای لیاپانوف این واگرایی را از طریق اندازه‌گیری مقدار کشیدگی و یا خمیدگی که در حرکت سیستم رخ می‌دهد اندازه‌گیری

می‌کند. مثبت بودن نمای لیاپانوف نشان‌دهنده وجود حساسیت به شرایط اولیه است [13]. ویژگی مهم و قابل توجه روش پیش‌بینی موضعی، استحکام و قدرت آن است که حتی برای آنالیز و بررسی سری‌های زمانی با تعداد داده‌های اندک نیز مناسب است. فیزیک قرار گرفته در پس‌چنین بازسازی، این است که یک سیستم غیرخطی توسط اثر خودمقابلی (خود تعاملی) توصیف می‌شود به طوری که یک سری زمانی تک متغیره می‌تواند شامل اطلاعاتی درباره دینامیک سیستم چند متغیره باشد. به عبارت دیگر، یک رکورد ثبت شده از یک سیستم دینامیکی، نتیجه تمام متغیرهای متعامل است [14].

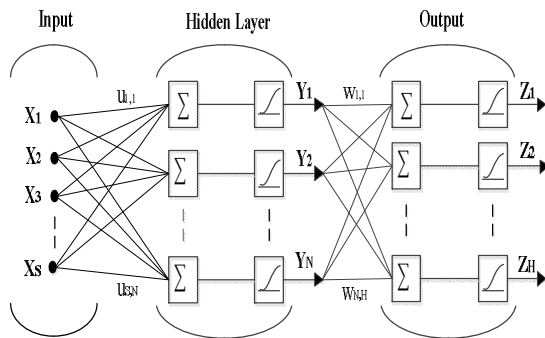


Fig. 1. Sample of 3 layer's neural network

معمول‌ترین تابع مورد استفاده در یک شبکه‌عصبی آموزش‌پذیر، تابع حلقوی است. تابع حلقوی، به صورت یکنواخت افزایش می‌یابد، پیوسته و در همه جا مشتق‌پذیر است. تابع حلقوی بیشتر برای شبکه‌عصبی به صورت رابطه (۲) است.

$$y_j = f(s_j) = \frac{1}{1 + e^{-s_j}} \quad (2)$$

که s_j می‌تواند در محدوده $\pm\infty$ متغیر باشد و y_j بین ۰ تا ۱ محدود شده است.

برای انجام فرآیند پیش‌بینی، برای مجموعه داده‌های سری زمانی، متغیرها در محدوده ۰ تا ۱ نرمال‌سازی شده‌اند. این محدوده به این دلیل انتخاب شده است که قرار است از تابع محاسبه‌ای و منطقی استفاده شود که بین ۰ تا ۱ محدود شده است و به عنوان تابع فعال برای لایه خروجی مورد استفاده قرار می‌گیرد. نرمال‌سازی با توجه به رابطه (۳) انجام می‌شود.

$$X_{norm} = \left(\frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \right) \quad (3)$$

که x_{min} و x_{max} بیشترین و کمترین مقادیر داده‌ها هستند. وزن سیناپسی شبکه‌ها، با اعداد تصادفی با توزیع نرمال در محدوده ۱ و -۱ مقدار دهی اولیه می‌شوند. آموزش به صورت

می‌کند. مثبت بودن نمای لیاپانوف نشان‌دهنده وجود حساسیت به شرایط اولیه است [13].

ویژگی مهم و قابل توجه روش پیش‌بینی موضعی، استحکام و قدرت آن است که حتی برای آنالیز و بررسی سری‌های زمانی با تعداد داده‌های اندک نیز مناسب است. فیزیک قرار گرفته در پس‌چنین بازسازی، این است که یک سیستم غیرخطی توسط اثر خودمقابلی (خود تعاملی) توصیف می‌شود به طوری که یک سری زمانی تک متغیره می‌تواند شامل اطلاعاتی درباره دینامیک سیستم چند متغیره باشد. به عبارت دیگر، یک رکورد ثبت شده از یک سیستم دینامیکی، نتیجه تمام متغیرهای متعامل است [14].

۳- شبکه عصبی

شبکه عصبی مصنوعی، یک سیستم پردازش اطلاعات با ساختار موازی است که کارایی مشخصی شبیه شبکه‌های عصبی زیستی مغز انسان را دارد، به صورتی که دانش، محصول یک فرآیند یادگیری و یافتن بهترین وزن‌ها برای ارتباطات مختلف بین سلول‌های عصبی جداگانه است. یک شبکه عصبی می‌تواند چند لایه داشته باشد. یک شبکه عصبی معمول با یک لایه پنهان، در شکل (۱) نمایش داده شده است. ورودی‌ها در شبکه عصبی پس‌انتشار از لایه ورودی به سمت لایه میانی (لایه پنهان) حرکت کرده و سپس به سمت لایه خروجی می‌روند. زمانی که شبکه وزن‌های اتصال خود را اصلاح می‌کند، روند اصلاح با واحدهای خروجی آغاز می‌شود و در میان لایه‌های میانی به سمت عقب منتشر شده و این فرآیند مرتباً تکرار می‌شود. اصطلاح پس‌انتشار با توجه به این روند اصلاح انتخاب شده است. هر گره j سیگنال‌های ورودی را از هر گره i در لایه قبلی دریافت می‌کند. همراه با سیگنال‌های ورودی، x_i ، یک وزن u_{ji} وجود دارد. سیگنال موثر s_j ، برای گره j ، مجموع وزنی همه سیگنال‌های ورودی است:

$$s_j = \sum_{i=0}^n u_{ji} x_i \quad (1)$$

یک الگو انجام می‌شود و به منظور ارائه نمونه‌های آموزشی به شبکه، به صورت منظم و به فرم تکرار به تکرار انجام می‌شود. معیار توقف برای فرآیند عملیاتی آموزش عبور از حد اعتبار در نظر گرفته شده است. [15 و 16]

۴- منطقه مورد مطالعه و داده‌های استفاده شده

کشور ایران نیز از جمله مناطق لرزه‌خیز کره زمین محسوب می‌شود. در این میان، منطقه تهران بین رشته کوه البرز و فلات ایران است و شامل گسل‌های فعالی است که نتیجه این نوع از بافت زمین‌شناسی است. در این مطالعه، از شتاب‌نگاشت‌های ۹ زمین‌لرزه شهر تهران (منطقه‌ای به مرکزیت تهران و با شعاع ۲۰۰ کیلومتر) که مشخصات آنها در جدول (۱) آمده، استفاده شده است. شتاب‌نگاشت این زمین‌لرزه‌ها در شکل (۲) نشان داده شده است. این زمین‌لرزه‌ها محدوده مناسبی از بزرگای شدت و زمان رخداد را در منطقه مورد مطالعه نمایندگی می‌کنند. برای بازسازی فضای فاز زمین‌لرزه‌های شهر تهران، نخستین مرحله تخمین زمان تاخیر است. برای این کار از روش تابع میانگین اطلاعات متقابل که در رابطه ۴ بیان شده است، استفاده می‌شود. مقدار زمان تاخیر زمین‌لرزه‌ها در جدول (۲) داده شده است. میانگین اطلاعات متقابل کمتر، تقابل کمتر در سری تاخیر را نشان می‌دهد و تاخیر کوچکتری بدست می‌آید.

$$I(\tau) = \sum_{x(i), x(i+\tau)} P(x(i), x(i+\tau)) \log_2 \left[\frac{P(x(i), x(i+\tau))}{P(x(i))P(x(i+\tau))} \right] \quad (4)$$

که $x(i)$ سری زمانی اصلی و $x(i+\tau)$ سری زمانی با زمان تاخیر τ هستند که احتمال‌های $P(x(i))$ ، $P(x(i+\tau))$ و $P(x(i), x(i+\tau))$ به ترتیب احتمال سری زمانی اصلی، احتمال سری زمانی تاخیر یافته و احتمال مشترک سری زمانی اصلی و تاخیر یافته است.

گام بعد تعیین بعد محاط سیستم است، برای این کار از روش نزدیک‌ترین همسایه‌های کاذب استفاده شده است.

جدول ۲. زمان تاخیر با استفاده از تابع میانگین اطلاعات متقابل

Earthquake	Delay Time (ms)
Arjmand	6
Boomehen	5
Damavand	9
Eshtehard	19
Firouzkoh	22
Taleghan1	11
Taleghan2	14
Taleghan3	13
Tehran	12

Table 2. delay time with using average mutual information

شکل (۳) نمودار تغییرات درصد همسایگان کاذب برحسب ابعاد محاط را نمایش می‌دهد. برای انتخاب بعد محاط مناسب نیازی نیست که درصد همسایه‌های کاذب به صفر برسد، بلکه رسیدن به یک مقدار حداقل همسایه‌های کاذب در یک بعد، به طوری که درصد همسایه‌های کاذب پس از آن بعد، کاهش چشمگیری نداشته باشند کفایت می‌کند [10]. کاهش درصد همسایگان کاذب با توجه به افزایش بعد محاط، در بخش نمودارهای نزدیک‌ترین همسایه‌های کاذب نیز می‌تواند دلیلی بر عدم حضور فرآیند تصادفی در سری‌های زمانی زمین‌لرزه‌ها باشد.

جدول ۱. مشخصات زمین‌لرزه‌های مورد مطالعه

Earthquake	Arjmand	Boomehen	Damavand	Eshtehard	Firouzkoh	Taleghan1	Taleghan2	Taleghan3	Tehran
Date of occurrence	1386/7/26	1385/9/29	1385/12/7	1369/3/30	1368/10/30	1371/12/17	1377/9/12	1377/9/28	1386/3/28
Magnitude (M _L)	3.2	4.2	4.4	7.7	5.8	4.4	4.5	3.4	5.7
Number of data	1306	9472	9728	9157	2583	1634	6400	4608	9984

Table 1. Characteristics of the studied earthquakes

شکل ۳. درصد نزدیک‌ترین همسایه‌های کاذب بر حسب بعد محاط

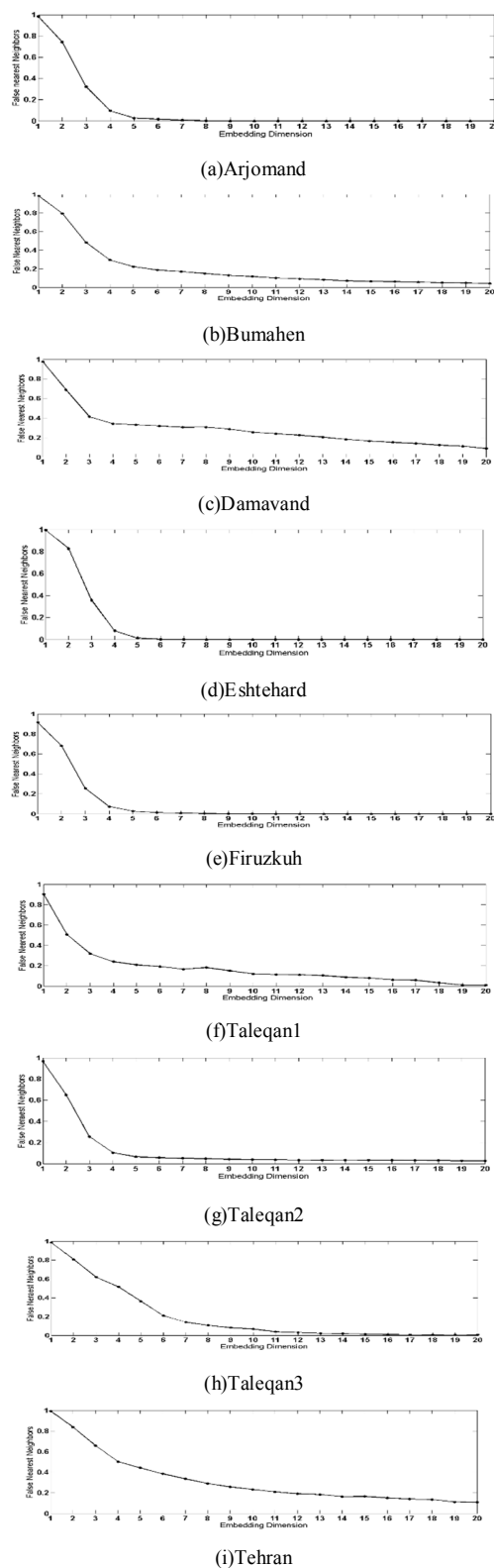


Fig. 3. Embedding dimension using false nearest neighbors

شکل ۲. شتاب نگاشت زمین‌لرزه‌ها

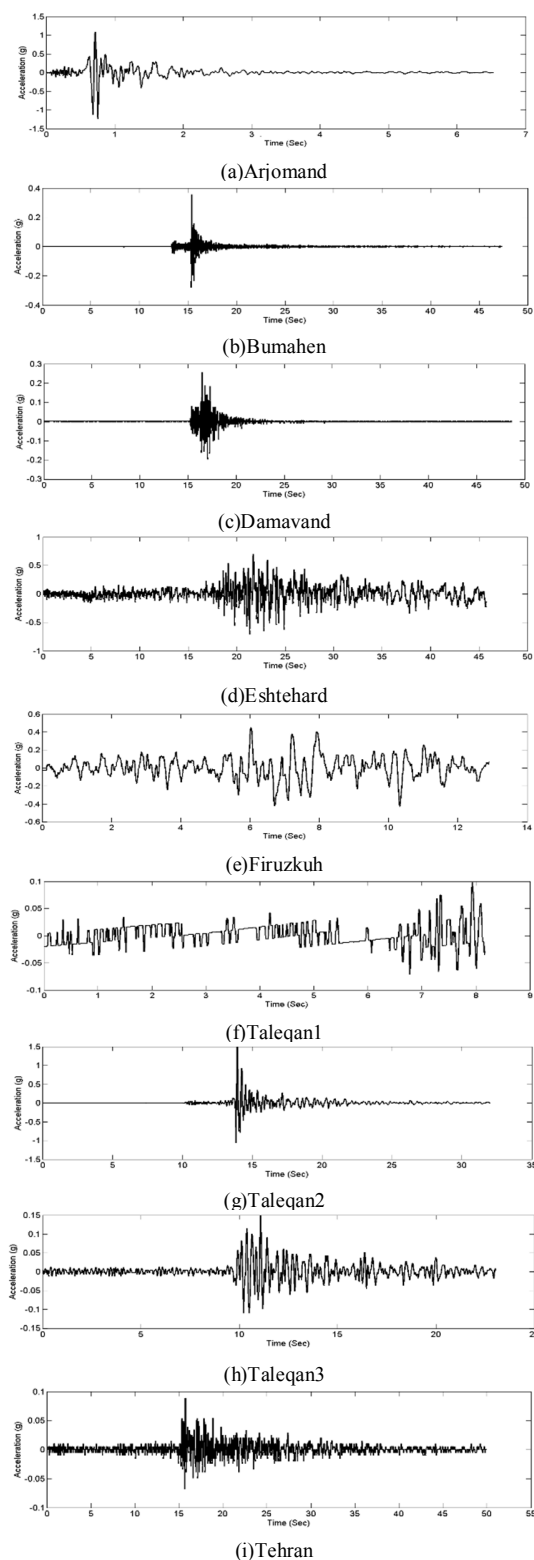


Fig. 2. Earthquakes acceleration

شکل (۵) نمودار تغییرات توان همبستگی در برابر ابعاد محاط زمین‌لرزه‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به نمودارهای شکل (۵)، توان همبستگی برای دو زمین‌لرزه بومهن و دماوند، با افزایش بعد محاط به سطح اشباعی نمی‌رسد و همچنان روند صعودی خود را طی می‌کنند. ولی ۷ زمین‌لرزه ارجمند، اشتهارد، فیروزکوه، طالقان ۱، ۲ و ۳ و تهران روند تکاملی تا رسیدن به مرحله اشباع را طی می‌کنند و این موضوع نشان می‌دهد رفتار ۷ زمین‌لرزه مذکور تصادفی نیست.

شکل ۵. تغییرات توان همبستگی در برابر ابعاد محاط زمین‌لرزه‌ها

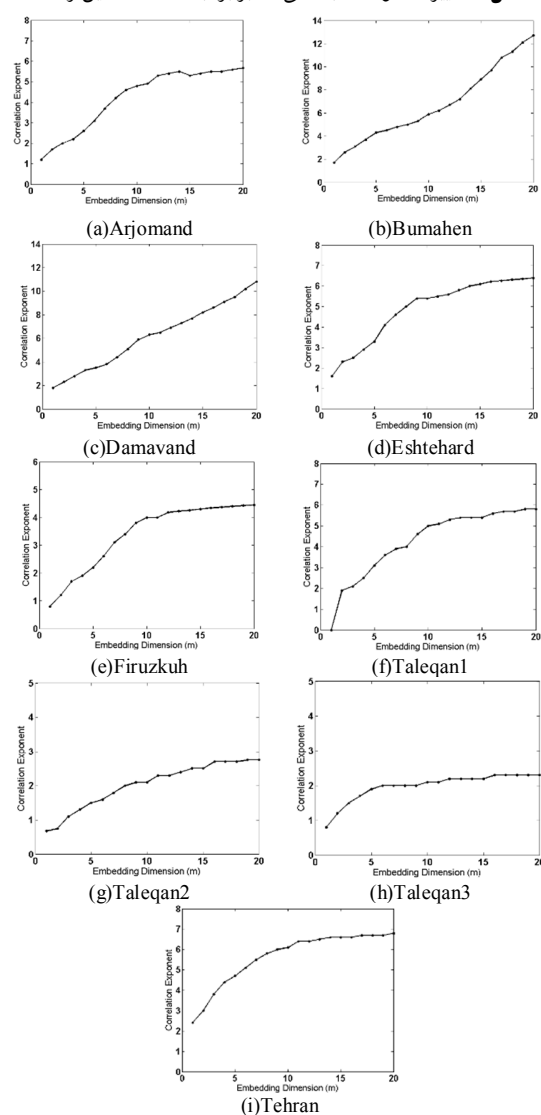


Fig. 5. Variation of correlation exponent versus embedding dimension

بازسازی فضای فاز در ابعاد زیاد نشان‌دهنده پیچیدگی سری زمانی است. در این صورت توصیف سری زمانی نیازمند متغیرهای زیادی است که باید تاثیر هر کدام را در یک سیستم مختصاتی با ابعاد زیاد نشان داد. بدیهی است که با توجه به دانش کنونی امکان ترسیم فضای فاز در ابعاد بالاتر از ۳ بر روی کاغذ وجود ندارد، در نتیجه فقط برای نمایش چگونگی بازسازی یک فضای فاز با استفاده از زمان تاخیر، بعد محاط $Y_t = \{x_t, x_{t-\tau}, x_{t-2\tau}, \dots, x_{t-(m-1)\tau}\}$ و معادله (۴) فضای فاز دو بعدی زمین‌لرزه‌ها را نشان داده است. عدم پراکندگی نقاط در کل محدوده فضای فاز و تمرکز آنها در بخشی از فضای فاز نشان‌دهنده رفتار غیرخطی و غیرتصادفی زمین‌لرزه‌ها است.

شکل ۴. فضای فاز دو بعدی زمین‌لرزه‌ها

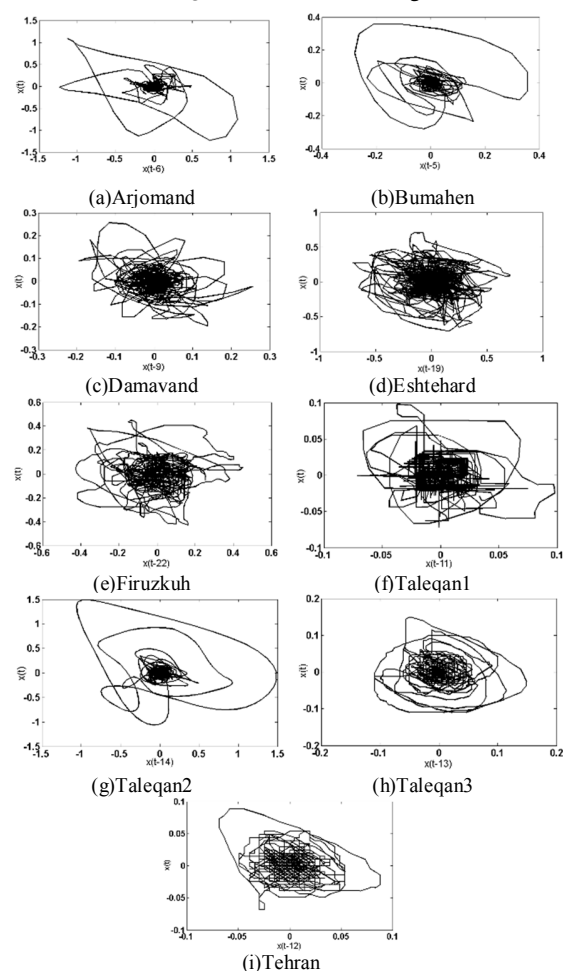


Fig. 4. 2D phase space of earthquakes

شکل ۶. دقت پیش‌بینی در ابعاد محاط مختلف در برابر تعداد همسایه‌های زمین‌لرزه‌ها

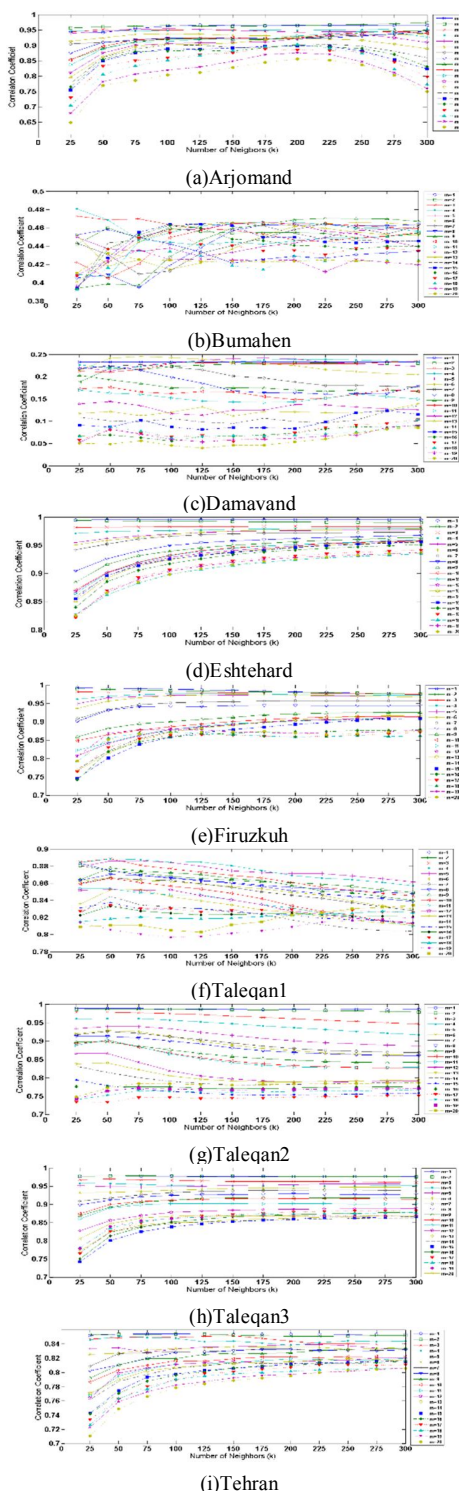


Fig. 6. The prediction accuracy of earthquakes for various embedding dimension versus neighbors number

به منظور انتخاب تعداد همسایه‌های مطلوب، پیش‌بینی در ابتدا به صورت اولیه در ابعاد محاط ۱ تا ۲۰ برای مقادیر مختلف همسایه‌ها از ۲۵ تا ۳۰۰ انجام می‌شود و در نهایت توسط معیار ضریب همبستگی، دقت پیش‌بینی در ابعاد محاط و تعداد همسایه‌های مختلف بررسی می‌شود و در نهایت بعد محاط مناسب به همراه تعداد همسایگانی که با در نظر گرفتن آنها دقت فرآیند پیش‌بینی به بالاترین حد ممکن می‌رسد، انتخاب می‌شوند. نمودار دقت پیش‌بینی در شکل (۶) نشان داده شده است.

لازم به ذکر است که هر چه بعد محاط و تعداد همسایه‌ها کمتر باشند، حجم محاسبات کاهش یافته و شرایط بهینه‌تری بدست می‌آید. در نتیجه انتخاب بعد محاط و تعداد همسایه‌های کمتر برای رسیدن به دقت پیش‌بینی قابل قبول، مناسب‌تر است. پس از مشخص شدن تعداد همسایه‌ها برای فرآیند پیش‌بینی برای زمین‌لرزه‌های مورد نظر، مقدار دقیق معیارهای دقت پیش‌بینی ضریب همبستگی (CC) و مقدار اصلاح شده بهره‌وری (MCE) با توجه به ابعاد محاط و تعداد همسایگانی تعیین شده، در جدول (۳) قرار داده شده است.

جدول ۳. بعد محاط انتخاب شده برای زمین‌لرزه‌های مورد مطالعه با توجه به معیارهای خطا و تعداد همسایگان

MCE	Correlation Coefficient	Number of Neighbors	Embedding Dimension	Earthquake
0.4590	0.9541	100	5	Arjmand
-0.2220	0.4704	225	9	Boomehen
-0.0426	0.1236	275	15	Damavand
0.9784	0.4494	300	6	Eshtehard
0.9733	0.5124	125	6	Firouzkuh
0.8777	0.2452	50	9	Taleghan1
0.9615	0.6600	50	4	Taleghan2
0.9395	0.3697	225	7	Taleghan3
0.8167	0.1760	300	14	Tehran

Table 3. The selected embedding dimension for the studied earthquakes according to error criteria and neighbors number

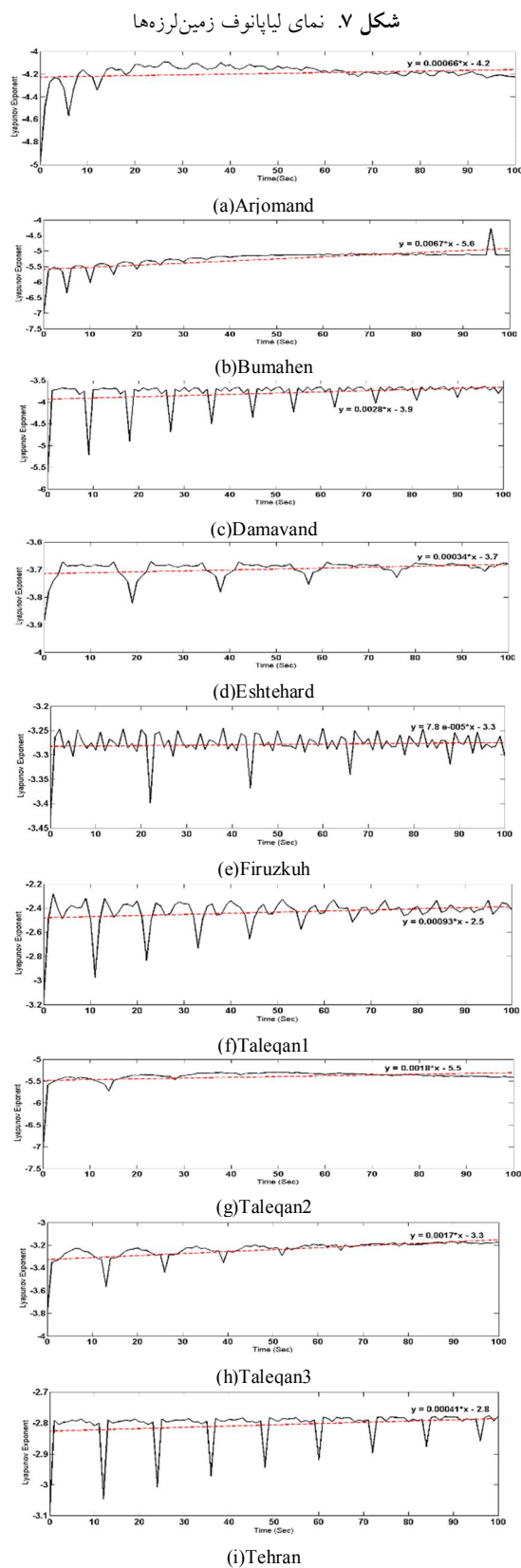


Fig. 7. The Lyapunov exponent of earthquakes

بالاترین ضریب اصلاح بهره‌وری، مربوط به زمین‌لرزه اشتهدارد با میزان $0/9784$ و بعد محاط 6 است، اما با توجه به نتایج پیش‌بینی و نمودارهای پراکندگی نقاط پیش‌بینی و نقاط هدف، مناسب‌ترین پیش‌بینی مربوط به زمین‌لرزه طالقان 2 با ضریب اصلاح بهره‌وری $0/9715$ و بعد محاط 4 است. واضح است که وجود بعد محاط پایین چنین تاثیری بر نتیجه پیش‌بینی داشته است. هر چه بعد محاط برای پیش‌بینی و بازسازی فضای فاز یک سری زمانی کمتر باشد، سیستم دینامیکی ساده‌تر است و برای بازسازی و توصیف آن به متغیرها و پارامترهای کمتری احتیاج می‌شود و دارای ویژگی‌های آشوبی قوی‌تری می‌باشد. یعنی یک سیستم با بعد محاط کمتر برای افزایش فضای فاز خود، تحت حاکمیت یک فرآیند غیرخطی بسیار ساده هست که برای توصیف آن به پارامترهای زیادی نیاز است. به نظر می‌رسد که زمین‌لرزه طالقان 2 دارای چنین ویژگی باشد.

قبل از پیش‌بینی زمین‌لرزه‌ها، معیار حساسیت به شرایط اولیه با استفاده از نمای لیاپانوف برای زمین‌لرزه‌ها بررسی می‌شود. مثبت بودن نمای لیاپانوف نشان‌دهنده حضور آشوب در سیستم دینامیکی نیست بلکه فقط نشان‌دهنده حساسیت سیستم به شرایط اولیه است که این شرایط می‌تواند در یک فرآیند تصادفی هم رخ دهد. نمای لیاپانوف برای زمین‌لرزه‌های مورد مطالعه در شکل (۷) نشان داده شده است. طبق تعریف فاکتور کشیدگی با برازش یک خط به نماهای لیاپانوف بدست آمده، محاسبه می‌شود. در صورتی که شیب خط برازش داده شده به نمودار نماهای لیاپانوف مثبت باشد، سیستم به شرایط اولیه حساس و در غیر اینصورت سیستم به شرایط اولیه حساسیتی ندارد. شیب خط برازش داده شده به نمودار نماهای لیاپانوف برای زمین‌لرزه‌ها مورد مطالعه در تمامی 9 مورد مثبت است که نشان‌دهنده حساسیت سری زمانی زمین‌لرزه‌ها به شرایط اولیه است، بنابراین ماهیت این زمین‌لرزه‌ها تصادفی یا آشوبی هستند.

شده است. نمودارهای حاصل از پیش‌بینی هر دو روش به همراه شتاب‌نگاشت اصلی، بر هم نهی شده و در شکل (۸) ارائه شده‌اند. پیش‌بینی با هر دو روش فضای فاز و روش شبکه عصبی مصنوعی تقریباً مشابه هستند.

گام بعد، انجام پیش‌بینی است. ۲۰ درصد انتهایی شتاب‌نگاشت‌ها انتخاب و نتایج بدست آمده از پیش‌بینی با آن مقایسه خواهد شد. همچنین نتایج پیش‌بینی با استفاده روش بازسازی فضای فاز با روش شبکه عصبی نیز مقایسه

شکل ۸. نتایج پیش‌بینی با استفاده از روش بازسازی فضای فاز و روش شبکه عصبی مصنوعی برای زمین‌لرزه‌های مطالعه شده

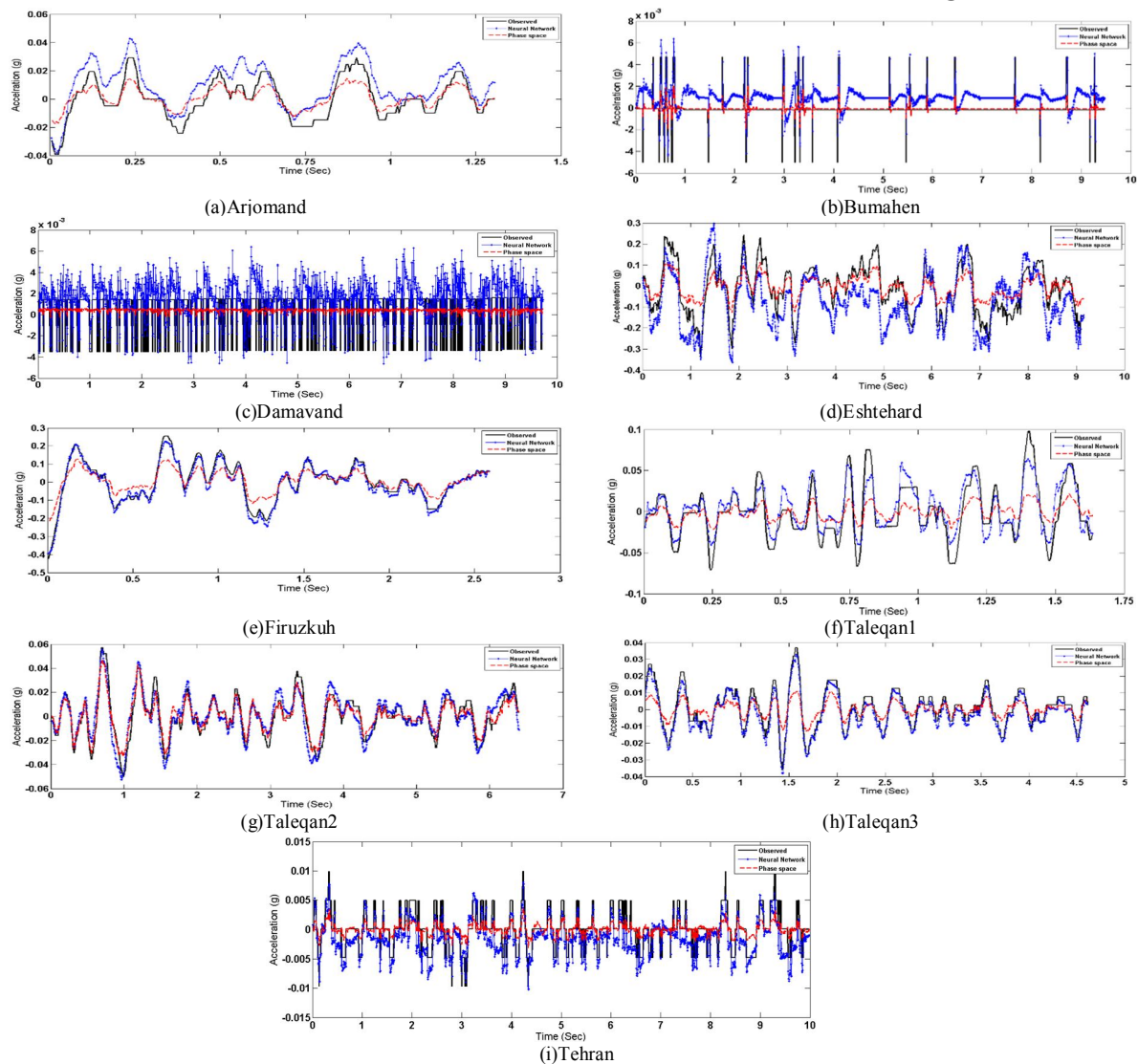


Fig. 8. The results of prediction using phase space reconstruction and artificial neural network for the studied earthquakes

۵- نتیجه گیری

در این مقاله برای تعیین ماهیت سری زمانی شتاب‌نگاشت ۹ زمین‌لرزه رخ داده در منطقه تهران چند بررسی صورت گرفته است. نخست، هر ۹ زمین‌لرزه دارای یک جاذب مشخص در بخشی از فضای فاز دو بعدی بوده که نشان دهنده وجود یک فرآیند غیرخطی و عدم حضور فرآیند تصادفی حاکم بر سیستم دینامیکی است. دوم، کاهش درصد همسایگان کاذب با توجه به افزایش بعد محاط، نیز دلیلی بر عدم حضور فرآیند تصادفی در سری‌های زمانی زمین‌لرزه‌ها باشد. سوم، وجود نمای لیاپانوف مثبت شاهدهی بر آشوبی بودن سری‌های زمانی است. بر اساس نتایج این بررسی‌ها سری‌های زمانی مورد بررسی قطعاً تصادفی محض نیستند، اما نمی‌توان گفت تا چه حد آشوبی هستند. به منظور روشن شدن این موضوع، بررسی توان همبستگی صورت گرفت. توان همبستگی سری زمانی طالقان ۱ و تهران، در حد بالا به اشباع می‌رسد و اما زلزله بومهن و دماوند به حالت اشباع نمی‌رسد. یعنی از میان ۹ زلزله بررسی شده دو زمین‌لرزه بومهن و دماوند آشوبی با بعد بسیار بالا و یا تصافی با درجه‌ای کم از آشوب هستند که نتایج پیش‌بینی برای آنها چندان مناسب نخواهد بود. دو زلزله طالقان ۱ و تهران آشوبی با بعد بالاست و به سختی قابل بازسازی هستند. سایر زلزله‌ها آشوبی با بعد پایین هستند و به خوبی قابل بازسازی هستند.

بعد محاط مناسب برای پیش‌بینی زمین‌لرزه‌های ارجمند، اشتهاارد، فیروزکوه، طالقان ۲ و طالقان ۳ ابعاد محاط نسبتاً پایینی است و با توجه به نتایج بخش شناسایی سری‌های زمانی نیز، بعدهای منطقی به نظر می‌رسند و نشان‌دهنده وجود آشوب در سیستم است. در مقابل بعد محاط برای زمین‌لرزه‌های بومهن، دماوند، طالقان ۱ و تهران ابعاد محاط نسبتاً بالایی است و نشان‌دهنده حضور آشوب ضعیف و یا حتی عدم وجود آشوب در سیستم است. با توجه به نتایج بدست آمده از تحلیل و بررسی زمین‌لرزه‌های منطقه تهران با استفاده از بازسازی فضای فاز و همچنین

دو زمین‌لرزه بومهن و دماوند به هیچ کدام از دو روش پیش‌بینی مورد استفاده پاسخ مناسبی نداده‌اند و با استفاده از این دو روش پیش‌بینی روند منطقی و معینی برای روند تکاملی این زمین‌لرزه‌ها پیدا نشد. در واقع ممکن است این دو زمین‌لرزه از هیچ گونه روند آشوبی تبعیت نکنند و بتوان ماهیت رخداد آنها را در دسته فرآیندهای تصادفی قرار داد. اما ۷ زمین‌لرزه ارجمند، اشتهاارد، فیروزکوه، طالقان ۱، ۲ و ۳ و تهران با هر دو روش پیش‌بینی نتایج خوبی را ارائه کرده‌اند. هر چند که در برخی از نقاط فاصله مقدار پیش‌بینی شده و مقدار حقیقی زیاد است اما تشخیص فراز و فرودهای به هنگام و حدود نوسانات به صورت مناسبی پیش‌بینی شده است. در واقع این ویژگی‌ها و روند پیش‌بینی‌پذیری نسبتاً مناسب این ۷ زمین‌لرزه، نشان دهنده حضور روندی غیر تصادفی حاکم بر ماهیت رخداد زمین‌لرزه‌ها است. همچنین در برخی از موارد بازسازی فضای فاز نتایج بهتری را ارائه کرده است و در برخی موارد شبکه عصبی مصنوعی پیش‌بینی مناسب‌تری را فراهم کرده است. در مجموع کیفیت هر دو روش قابل قبول است و می‌توان از هر دو روش برای بررسی ماهیت رفتاری زمین‌لرزه‌ها استفاده نمود.

در نهایت با توجه به نتایج بدست آمده از تحلیل و بررسی زمین‌لرزه‌های منطقه تهران می‌توان گفت که دینامیک حاکم بر زمین‌لرزه‌های این منطقه تصادفی نیستند و به عبارت دیگر آشوبی با بعد بالا هستند. یعنی امکان پیش‌بینی روند تکاملی آنها وجود دارد ولی پیش‌بینی پذیری و دقت پیش‌بینی آنها کمتر از سیستم‌های آشوبی با بعد پایین است. وجود چنین برجستگی بر ماهیت زمین‌لرزه‌های منطقه تهران می‌تواند پیامدهای مهمی در مطالعه سازوکار تولید زمین‌لرزه‌ها و رفتارهای دینامیکی آنها را در پی داشته باشد. از طرفی وجود چنین ویژگی در زمین‌لرزه‌های این بخش از کشور که یکی از مناطق مهم به ویژه از دیدگاه سیاسی و استراتژیک است، می‌تواند موجب ارائه یک مدل مناسب برای تعیین خطر لرزه‌ای در این مناطق شود.

- earthquake ground motion. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 392(18), 4134-4145.
- [8] Potirakis S. M., Contoyiannis Y., Melis N. S., Kopanas J., Antonopoulos G., Balasis G., Kontoes C., Nomicos C. & Eftaxias K. 2016 Recent seismic activity at Cephalonia (Greece): a study through candidate electromagnetic precursors in terms of non-linear dynamics. *Nonlinear processes in Geophysics*, 23(4), 223-240.
- [9] Abbasi M. & Gholami A. 2017 Polynomial chaos expansion for nonlinear geophysical inverse problems. *GEOPHYSICS*, 82(4), R259-R268.
- [10] Pari Zangeneh M., Ataei M. & Moallem P. 2010 Phase space reconstruction of chaotic time series using an intelligent method. *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, 1(3), 3-10. (In Persian)
- [11] Ng W. W., Panu U. S. & Lennox W. C. 2007 Chaos based analytical techniques for daily extreme hydrological observations. *Journal of Hydrology*, 342(1-2), 17-41.
- [12] Sangoyomi T. B., Lall U. & Abarbanel H. D. I. 1996 Nonlinear dynamics of the great salt lake: dimension estimation. *Water Resources Research*, 32(1), 149-159.
- [13] Abarbanel H. & Brown R. 1996 Analysis of observed chaotic data. Springer-Verlag, New York.
- [14] Lakshmi S. & Tiwari R. 2009 Model dissection from earthquake time series: A comparative analysis using modern non-linear forecasting and artificial neural network approaches. *Computers & Geosciences*, 35(2), 191-204.
- [15] Sivakumar B., Jayawardena A. W. & Fernando T. M. K. G. 2002 River flow forecasting: use of phase-space reconstruction and artificial neural networks approaches. *Journal of Hydrology*, 265(1-4), 225-245.
- [16] Arjomand M. A., Mahmoudi J., Rezaei M. & Mohammadi M. H. 2016 The earthquake magnitude prediction using multilayer perceptron neural network. *Modares Civil Engineering journal*, 16(4), 1-8. (In Persian)
- [17] Chelidze, T. 2017 Complexity of seismic process: a mini-
شبکه‌های عصبی، می‌توان گفت که دینامیک حاکم بر زمین‌لرزه‌های این منطقه تصادفی نیست بلکه آشوبی است. همخوانی یافته‌های این پژوهش با روش شبکه عصبی و واقعیت موجود، تاییدی بر نتایج بدست آمده است. از این یافته‌های با یافته‌های جهانی پژوهشگران در سایر نقاط دنیا همخوانی نشان می‌دهد [17-19]. اما در منطقه تهران یافته جدیدی است و لازم به نظر می‌رسد که در طراحی‌ها مورد توجه قرار گیرد.
- ## ۶-مراجع
- [1] Zheng Y. G., Huang J. W., Sun Y. H. & Sun J. Q. 2018 Building vibration control by active mass damper with delayed acceleration feedback: multi-objective optimal design and experimental validation. *Journal of Vibration and Acoustics*, 140(4), 041002.
- [2] Tusset A. M., Janzen F. C., Piccirillo V., Rocha R. T., Balthazar J. M. & Litak G. 2018 On nonlinear dynamics of a parametrically excited pendulum using both active control and passive rotational (MR) damper. *Journal of Vibration and Control*, 24(9), 1587-1599.
- [3] Cao L. & Laflamme S. 2017 Real-time variable multidelay controller for multihazard mitigation. *Journal of Engineering Mechanics*, 144(2), 04017174.
- [4] Pavlos G. P., Karakatsanis L., Latoussakis J. B., Dialetis D. & Papaioannou G. 1994 Chaotic analysis of a time series composed of seismic events recorded in Japan. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 04(01), 87-98.
- [5] Iliopoulos A. C. & Pavlos G. P. 2010 Global low dimensional seismic chaos in the hellenic region. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 20(7), 2071-2095.
- [6] Yang D., Yang P. & Zhang Ch. 2012 Chaotic Characteristic analysis of strong earthquake ground motions. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 22(3), 1250045.
- [7] Kostic S., Vasovic N., Perc M., Toljic M. & Nikolic D. 2013 Stochastic nature of

- Engineering*, June 25-29, 2018 Los Angeles, California.
- [19] Chelidze T., Zhukova N. & Matcharashvili T. 2018 Phase space portraits of earthquake time series of caucasus: signatures of strong earthquake preparation. *Complexity of Seismic Time Series*, 419-436.
- [18] Bachmann, J. A., Strand, M., Vassiliou, M. F., Broccardo, M. & Stojadinovic, B. 2018 Rocking motion: chaotic or not chaotic, dose it matter for seismic design. *11th U.S. National Conference on Earthquake* review. *Physics & Astronomy International Journal*, 1(6), 00035.

Nature Evaluation and Time Series Prediction of Tehran Earthquakes

Farideh Moradi Tayebi, sasan motaghed, Rezvan Dastanian

1-M.Sc, Civil Engineering, Behbahan Khatam Alanbia University

2-Assistant Prof, Civil Engineering, Behbahan Khatam Alanbia University

3-Assistant Prof, Civil Engineering, Behbahan Khatam Alanbia University

abstract:

The history of the human efforts for safety against earthquakes shows the catastrophic and harmful events, even nowadays. The majority of decisions in seismic safety policy are based on randomness assumption for earthquake time series. The accuracy of this assumption assessment, can accurate the strategies and resulted in more secure decisions. Also in structural control context, seismic time series prediction in the feedback systems, can reduces the time of control system reaction and in subsequent decreases structural damages.

Recent studies have shown that dynamical structure of these complex time series can be better understand using nonlinear dynamics theory. In the present paper, we evaluate randomness and nonlinear characteristics of 9 earthquakes time series from metropolitan Tehran earthquake database using chaos theory conceptions. These earthquakes are Arjomand, Bumahen, Damavand, Eshtehard, Firuzkooh, Taleqan 1, Taleqan 2, Taleqan 3 and Tehran earthquake. To this end, we reconstruct phase space for delay time calculation using average mutual information function. Embedding dimension is calculated based on false nearest neighbors. Correlation dimension is used for earthquake chaotic behavior assessment and local prediction algorithm and artificial neural network are employed for earthquake prediction. Results illustrate nonrandom nature of evaluated earthquakes. These earthquakes have high dimension chaotic behavior. Earthquake prediction is good and acceptable accuracy using chaos theory and artificial neural network. The existence of the specific attractors in a part of 2D reconstructed phase space for the earthquakes show the presence of a nonlinear processes. This is an evidence for no stochastic behavior of the earthquakes. Also, reduction in the false neighbors with embedding dimension increases, shows no stochastic time series. Lyapanov exponent positive gradient displays a nondeterministic process, although it cannot warranty the chaotic behavior. Correlation exponents have high values for Taleqan1 and Tehran earthquakes. So these earthquakes saturate in large quantities. Bumahen and Damavand earthquakes correlation exponents have increasing trend and do not saturate. These observations prove the chaotic behavior of high dimension or random process with inconsiderable chaos. So these earthquakes cannot be predicted properly. Performing the local prediction based on the selected embedding dimensions and the neighbor's number, showed that the predicted time series are relatively good for the earthquakes of Arjomand, Eshtehard, Firuzkooh, Taleqan 2 and Taleqan 3. Proper anticipated of trends, upward and downward branches as well as amplitudes illustrate the chaotic nature of the earthquakes. The correlation coefficient for Arjomand, Eshtehard, Firuzkooh, Taleqan 2 and Taleqan 3 are 0.9541, 0.4494, 0.5124, 0.6600 and 0.3697 respectively. In the case of Taleqan1 and Tehran earthquakes, time series amplitudes and peaks do not predicted appropriately, but the prediction is acceptable. Correlation coefficient of Taleqan1 and Tehran are 0.2452 and 0.1760 respectively. Bumahen and Damavand earthquakes do not trace properly. It should be noted that for each earthquake, 20% of the endpoints of accelerations are used to evaluate the prediction process.

According to the results of the analysis and earthquakes prediction in Tehran region, using phase reconstruction and artificial neural networks, we can say that the dynamics governing the earthquakes in this region are not random, but, chaos with high dimension. Earthquake prediction is good and acceptable accuracy using chaos theory and artificial neural network.

Keywords: Earthquakes, Phase Space Reconstruction, Embedding Dimension, Delay Time, Artificial Neural Network