

## شبیه‌سازی شتاب‌نگاشت مصنوعی زلزله سازگار با طیف ساختگاه با استفاده از تحلیل سری‌های زمانی

محمد رضا فدوی امیری<sup>۱\*</sup>، سید علی سلیمانی ایوری<sup>۲</sup>، حمید حسن پور<sup>۳</sup>، محمد شامخی امیری<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی کامپیوتر، دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۳- استاد، دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۴- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

### چکیده

در طراحی سازه‌های مهم و حیاتی مانند سدها، نیروگاه‌ها و پل‌ها، لزوم انجام تحلیل تاریخچه زمانی لرزه‌ای یکی از مهم‌ترین نیازهای مهندسی می‌باشد. با توجه به اینکه شتاب‌نگاشت‌های واقعی مربوط به ساختگاه این سازه‌ها در بسیاری از موارد وجود ندارد و یا به تعداد کافی در دسترس نیست، لذا تولید شتاب‌نگاشت مصنوعی یکی از موضوعات مهم پژوهشی و کاربردی در این زمینه می‌باشد. این مقاله به ارائه روشی نوین برای تولید شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی منطبق با طیف ساختگاه سازه با استفاده از تحلیل سری‌های زمانی، شبکه‌های عصبی مصنوعی، تبدیل موجک و الگوریتم ژنتیک می‌پردازد. در روش پیشنهادی ابتدا تعدادی شتاب‌نگاشت ثبت شده در ایستگاه‌های شتاب‌نگاری و بر اساس نوع خاک انتخاب می‌شوند. این خاک‌ها با توجه به سرعت موج برشی ایستگاه‌های ثبت کننده به دو گروه خاک و سنگ تقسیم می‌شوند و سپس با استفاده از تبدیل موجک به تحلیل و پردازش آنها پرداخته می‌شود. در قدم بعدی از توانایی یادگیری شبکه‌های عصبی برای نگاشت معکوس از طیف پاسخ این شتاب‌نگاشت‌ها به ضرایب تبدیل ویولتی استفاده می‌گردد. به موازات استفاده از الگوریتم‌های آموزشی موجود برای شبکه‌های عصبی، از توانایی الگوریتم ژنتیک برای جستجو در یک فضای گسترده کمک گرفته می‌شود تا ماتریس‌های وزن و بایاس شبکه‌ها بهینه گردند و از محبوس شدن شبکه‌ها در نقاط بهینه محلی جلوگیری به عمل آید. در نهایت شتاب‌نگاشت‌های سازگار با طیف ساختگاه تولید می‌شود. در این مقاله با ارائه مثال‌هایی از شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده در ایران، به آزمایش الگوریتم پیشنهادی پرداخته شده و کارایی موثر آن نشان داده می‌شود. استفاده ترکیبی از شبکه عصبی مصنوعی، تبدیل موجک، الگوریتم ژنتیک و تحلیل سری‌های زمانی موجب ارتقاء توانایی روش از نظر سرعت و دقت در تولید شتاب‌نگاشت مصنوعی سازگار با طیف برای شرایط ساختگاهی مختلف می‌شود.

کلمات کلیدی: شتاب‌نگاشت مصنوعی سازگار با طیف ساختگاه، تحلیل سری‌های زمانی، الگوریتم ژنتیک، شبکه عصبی مصنوعی، تبدیل موجک.

\*نویسنده مسئول: محمد رضا فدوی امیری

پست الکترونیکی: fadavi@shomal.ac.ir

DOI: 10.22065/jsce.2017.72801.1046

شناسه دیجیتال

<http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2017.72801.1046>

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۲۳، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۲/۲۳

## ۱- مقدمه

کشور ایران با قرار گرفتن بر روی کمربند زلزله آلپ- هیمالیا همواره در معرض خطر زلزله‌های مخرب بوده است. علاوه بر آن، شرایط زمین ساختی خاص حاکم بر منطقه، ضرورت توجه ویژه به مسئله زلزله را دوچندان می‌کند. در حال حاضر برای طراحی یک سازه در یک ساختگاه مشخص، طیف طراحی لرزه‌ای بر اساس آئین‌نامه زلزله ایران- استاندارد ۲۸۰۰ استخراج می‌گردد [۱]. گرچه این طیف‌ها از کارایی و دقت مناسبی برخوردار هستند، ولی به منظور طراحی لرزه‌ای سازه‌ها مهم و حیاتی و همچنین در ساختگاه‌های با شرایط خاص لازم است تا پارامترهای زلزله احتمالی در ساختگاه مورد مطالعه بر اساس شتاب‌نگاشت زلزله‌های محتمل در منطقه، تخمین زده شود. شتاب‌نگاشت‌های مناسب برای تحلیل مذکور، شتاب‌نگاشت‌هایی هستند که دارای مشخصات مشابه با خصوصیات برآورد شده برای محل ساختگاه مورد نظر باشند؛ اما در برخی موارد با توجه به تعداد و تنوع کم‌نگاشت‌های ثبت شده، انتخاب شتاب‌نگاشت‌های متناسب با واقعیت، با مشکل جدی مواجه بوده و در برخی موارد غیرممکن می‌باشد. در چنین شرایطی استفاده از شتاب‌نگاشت‌های حاصل از زلزله‌های به وقوع پیوسته در مناطق مشابه دیگر، راه حل مناسبی می‌تواند باشد. ولی با توجه به تفاوت‌های موجود در خصوص مشخصات زمین‌شناسی و زمین‌ساختی، راه حل مناسب‌تر، استفاده از شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی که عموماً به روش‌های آماری و با توجه به ویژگی‌های مورد انتظار بدست می‌آید، می‌باشد. این شتاب‌نگاشت‌ها بایستی به نحوی ایجاد شوند که خصوصیات لرزه خیزی ساختگاه را در بر داشته و برای طراحی سازه مناسب باشند.

تا به حال روش‌های مختلفی جهت تولید شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی زلزله ارائه شده است که هر کدام برگرفته از یک الگوی خاص می‌باشند. استفاده از هر یک از الگوها در مطالعات مهندسی زلزله منوط به تعیین دقیق پارامترهای الگو و در نظر داشتن نقاط ضعف و قوت آن‌ها خواهد بود. هدف اصلی تعداد زیادی از روش‌ها، یافتن الگویی برای انتقال از فضای مربوط به طیف‌های پاسخ به شتاب‌نگاشت متناظر می‌باشد، چرا که امروزه می‌توان با داشتن خصوصیات ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی در یک منطقه، طیف طراحی مناسب برای آن پیشنهاد نمود. یک راه حل عملی جهت رسیدن به این هدف، تفکیک فرکانسی شتاب‌نگاشت‌های زلزله می‌باشد که برای این منظور می‌توان از تبدیل موجک استفاده کرد [۲].

همانطوریکه پیشتر اشاره شد، با توجه به این‌که شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده از زلزله‌ها به میزان قابل توجهی متأثر از مکانیزم گسل، ساختار زمین، شرایط خاک محل و عوامل دیگر می‌باشند، لذا انتخاب شتاب‌نگاشت‌های مناسب موجود با واقعیت در بسیاری از موارد با اشکال مواجه شده و حتی ناممکن بوده است. از طرفی شتاب‌نگاشت‌های حاصل از زلزله‌های به وقوع پیوسته در دیگر نقاط با توجه به تفاوت‌های موجود در خصوص مشخصات زمین و محل ساختمان اغلب قابل استفاده نمی‌باشد [۳ و ۴]. پژوهش‌های انجام شده نشان داده است که هر چند نمی‌توان به الگوی قطعی در شناسایی شکل شتاب‌نگاشت‌های زلزله حتی در یک منطقه مشخص دست یافت، اما طیف‌های پاسخ مرتبط با آنها عموماً در بعضی از موارد شباهت‌های زیادی به هم دارند، به طوری که می‌توان به یک الگوی نسبتاً قطعی برای طیف‌های مربوط به یک منطقه معین دست یافت [۵].

طیف پاسخ در واقع حداکثر بازتاب یک سیستم یک درجه آزادی، با دوره تناوب‌های طبیعی و نسبت میرایی‌های داخلی متفاوت، تحت اثر یک زلزله مشخص می‌باشد. در این حوزه، مفاهیمی چون طیف‌های پاسخ تغییر مکان، سرعت، شبه سرعت، شتاب و شبه شتاب مطرح می‌شوند که هر یک تعاریف مربوط به خود را دارند. جهت بدست آوردن این طیف‌ها بایستی برای فرکانس و نسبت میرایی خاص، حداکثر کمیت مورد نظر را در کل مدت تداوم زلزله بدست آورد و از ترسیم این بیشینه‌ها برحسب فرکانس (یا پیوند طبیعی سازه) به طیف مورد نظر رسید. معمولاً طیف‌ها در بازه فرکانسی ۰/۱ تا ۳۰ هرترتز، و با نسبت میرایی ۵٪، ترسیم می‌شوند. گرچه طیف‌های پاسخ اطلاعات مهمی را در اختیار می‌دهد، مهم‌ترین ایراد آن‌ها نداشتن اطلاعات زمانی پاسخ سازه (به خصوص در نواحی نزدیک پاسخ‌های حداکثر) می‌باشد؛ که این امر نشان دهنده هرچه بیشتر اهمیت تحلیل تاریخچه زمانی می‌باشد.

طیف‌های طراحی با میانگین‌گیری و صاف کردن طیف‌های پاسخ مربوط به یک منطقه معین که برای زلزله‌های مشخصی از آن منطقه رسم می‌شوند، بدست می‌آیند. امروزه این طیف‌ها، به طور گسترده در تحلیل استاتیکی سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳]. با

توجه به ارتباط طیف‌های طراحی تغییر مکان، سرعت و شتاب با یکدیگر (رابطه (۱))، این طیف‌ها در یک طیف طرح سه گانه ترسیم می‌شوند تا با داشتن فرکانس و درصد نسبت میرایی مربوط به یک سازه، بتوان به مجهولات مورد نظر مانند بیشینه جابجایی، بیشینه سرعت یا شتاب دسترسی پیدا کرد.

$$PSV = \omega \times S_D \quad PSA = \omega \times PSV = \omega^2 \times S_D \quad (1)$$

در رابطه (۱) PSV<sup>۱</sup> طیف پاسخ سرعت (شبه سرعت)، PSA<sup>۲</sup> طیف پاسخ شتاب (شبه شتاب)، S<sub>d</sub> طیف جابجایی و ω فرکانس زاویه‌ای می‌باشد. همانطور که ملاحظه شد محاسبه طیف پاسخ مربوط به یک یا چند شتاب‌نگاشت ساده است، اما تعیین شتاب‌نگاشت با توجه به طیف که در واقع معکوس مسأله بالا می‌باشد، کار چندان ساده‌ای نیست. بنابراین مسأله‌ای که مطرح است، یافتن الگویی برای انتقال از فضای مربوط به طیف‌های پاسخ به شتاب‌نگاشت متناظر می‌باشد؛ چرا که امروزه می‌توان با داشتن خصوصیات ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی یک منطقه، طیف ساختگاهی مناسب برای آن پیشنهاد نمود [۲].

جهت تولید شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی مدل‌های بسیاری توسط محققین ارائه شده‌اند. دو گروه عمده از این مدل‌ها، شامل مدل‌های ژئوفیزیکی و مدل‌های تصادفی می‌باشند. مدل‌های ژئوفیزیکی بر اساس داده‌های لرزه‌خیزی برای هر منطقه مشخص، شتاب‌نگاشت مصنوعی ایجاد می‌نمایند. این در حالی است که مدل‌های تصادفی بر اساس تئوری ارتعاشات تصادفی می‌باشند و لذا نسبت به مدل‌های ژئوفیزیکی از کارایی و دقت بهتری برخوردار می‌باشند. دلیل این ادعا این است که امواج زلزله با لغزش نامنظم در طول گسل‌ها شروع شده و از مسیر پیچیده‌ای در اعماق زمین عبور کرده و طی آن دچار شکست‌ها و بازتاب‌های متعدد تصادفی می‌شوند. بنابراین، مدل کردن آن‌ها به صورت تصادفی روش قابل قبولی می‌باشد. بر مبنای این مدل‌ها، الگوهای متنوعی نیز ارائه شده است که این الگوها بر اساس مطالعات آماری شتاب‌نگاشت‌های مختلف ثبت شده در مناطق مختلف بدست آمده‌اند. مهم‌ترین این الگوها نوفه سفید، الگوهای ایستا، الگوهای نایستا در دامنه، الگوهای نایستا در دامنه و فرکانس، همراه با الگوهای ایستا اصلاح شده می‌باشند [۶].

پاره‌ای دیگر از روش‌ها، با انتخاب مدل تصادفی و تلفیق آن با یک الگوی مناسب، به تولید شتاب‌نگاشت‌ها پرداخته‌اند که هر کدام مزایا و معایب خاص خود را دارد. این روش‌ها به سه دسته تقسیم می‌شوند [۶]:

- ترکیب تعدادی از امواج هارمونیک در دامنه و فرکانس‌های مختلف
- استفاده از طیف پاسخ به عنوان حرکت زمین
- توزیع تصادفی ضربه‌های مختلف در طول محور زمان

از سه روش فوق، روش اول بیش از دیگر روش‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش ترکیب موج‌های سینوسی در این دسته قرار دارد. الگوی مورد نظر نیز در این روش، الگوی تصادفی ایستای اصلاح شده می‌باشد. بعبارت دیگر در این روش، فرآیند تناوبی  $x(t)$  بصورت مجموعه‌ای از مولفه‌های سینوسی با دامنه و فازهای متفاوت منظور می‌شود. لذا می‌توان نوشت:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) \quad (2)$$

که در آن  $A_i$ ،  $\varphi_i$ ،  $\omega_i$  به ترتیب فرکانس، زاویه فاز و دامنه حرکت مولفه سینوسی  $\lambda_m$  و  $x(t)$  یک فرآیند تناوبی ایستا در دامنه و فرکانس می‌باشد. با استفاده از تابع چگالی طیفی توان می‌توان مقدار دامنه مربوط به هر فرکانس خاص را مطابق رابطه (۳) بدست آورد.

$$A_i^2 = 2\Delta\omega \cdot G(\omega_i) \quad (3)$$

1 Velocity and pseudo velocity response spectra

2 Acceleration and pseudo acceleration response spectra

زوایای فاز نیز بصورت تصادفی در فاصله  $0 < \varphi_i < 2\pi$  با توزیع یکنواخت انتخاب می‌شوند. پس از تولید  $x(t)$ ، شتاب‌نگاشت نایستا در دامنه حرکت را می‌توان از ضرب  $x(t)$  در یک تابع پوش مناسب  $I(t)$  مطابق رابطه (۴) بدست آورد:

$$z(t) = I(t) \cdot x(t) \quad (4)$$

فرآیند مورد نظر از جهت محتوای فرکانسی ایستا بوده و با روش مذکور دامنه حرکت نایستا تولید می‌گردد. با پردازش شتاب‌نگاشت‌های مختلف، توابع پوش متعددی برای شبیه‌سازی زلزله‌ها پیشنهاد شده است، که عمده‌ترین آنها شامل توابع دوزنقه‌ای، نمایی، چند جمله‌ای و مرکب می‌باشد [۶]. لازم به ذکر است که اساساً، شکل این تابع تأثیر چندانی در محتوای فرکانسی حرکت نخواهد داشت.

پس از تولید  $x(t)$ ، یک سری تصحیحات بر روی شتاب‌نگاشت مذکور که شامل تصحیح شتاب بیشینه حرکت و تصحیح خط پایه می‌باشد، انجام می‌شود. سپس طیف پاسخ مربوط به شتاب‌نگاشت تصحیح شده، محاسبه و با طیف هدف مقایسه می‌شود. در صورتی که دو طیف هدف و پاسخ انطباق مناسبی داشته باشند، هدف اصلی برآورده شده است؛ در غیر این صورت، بایستی شتاب‌نگاشت در حوزه فرکانسی تصحیح شود. برای این منظور می‌توان فرض کرد که بین تبدیل فوریه و طیف پاسخ رابطه خطی وجود دارد و می‌توان از ضرب «تبدیل فوریه شتاب‌نگاشت تصحیح شده» در «نسبت طیف هدف به طیف پاسخ»، به تبدیل فوریه شتاب‌نگاشت جدید دست یافت و از معکوس کردن این تبدیل، شتاب‌نگاشت دیگری را یافت که طیف آن انطباق بیشتری با طیف هدف داشته باشد. این مراحل تا رسیدن به یک طیف پاسخ نزدیک به طیف هدف می‌تواند تکرار شود [۷].

موضوع تولید شتاب‌نگاشت مصنوعی زلزله از دیرباز مورد توجه پژوهش‌گران حوزه‌های مختلف بوده است و در این خصوص مقالات متعددی به چاپ رسیده است. در این راستا کوشش‌های بسیاری برای پیشرفت روش‌های زمان-فرکانسی که نمایش زمانی از رفتار یک سیگنال را مجاز می‌دانند، انجام شده که یکی از قدیمی‌ترین الگوها، الگوی نوفه سفید ایستا می‌باشد که برای مدل کردن حرکات زمین لرزه‌ای مورد استفاده قرار گرفته است [۸]. تبدیل کوتاه زمانی فوریه نیز یکی از گسترده‌ترین انواع مورد استفاده می‌باشد. مهمترین مسئله در این روش تقسیم سیگنال به قطعات کوچک (پنجره) در پهنای یکسان برای استفاده از آنالیز فوریه در هر کدام از آنها برای بدست آوردن فرکانس‌های جدید در هر قطعه می‌باشد [۹].

آرفکن و وبر در [۱۰] ۱۹۹۵ بر اساس تبدیل گابور شکل جدیدی از روش تبدیل کوتاه زمانی فوریه را ارائه نمودند که این روش بهترین راه برای محاسبه تبدیل معکوس بود. در میان مدل‌های ایستا همچنان می‌توان به یکی از مقبول‌ترین مدل‌ها به نام مدل ایستا فیلتر شده کانای-تاجیمی اشاره نمود [۱۱]. بر اساس تحقیق کانایی، با توجه به محتوای فرکانسی رکوردهای مختلف زلزله، تاجیمی رابطه‌ای را برای تابع چگالی طیفی حرکات قوی با فرکانس‌های مهم جدا از هم پیشنهاد نمود. این تابع بر طبق یک تحریک نوفه سفید ایده‌آل که در سطح سنگ بستر ایجاد شده و از میان لایه‌های مختلف خاک رسوبی فیلتر شده است، قابل تعبیر و توصیف می‌باشد.

پس از روش‌های ایستا، روش‌های جدیدی بر اساس الگوهای وابسته به زمان غیرایستا نیز برای ساخت شتاب‌نگاشت مصنوعی زلزله ارائه گردید، که از آن جمله می‌توان به مدل غیرایستای تعمیم یافته کانای-تاجیمی اشاره نمود [۱۲]. در روش کانای-تاجیمی غیر ایستا، پروسه غیر ایستایی به کمک یک بازه زمانی متحرک با اندازه‌های مناسب و متغیر تقریباً ایستا در نظر گرفته می‌شود [۷]. مدل غیر ایستا تعمیم یافته کانای-تاجیمی برای بیان و شبیه‌سازی تاریخچه زمانی حرکات زمین در هر دو دامنه زمان و فرکانس غیرایستا به کار می‌رود. در این روش از پنجره‌های زمان متحرک برای محاسبه پارامترهای متغیر زمان مدل، با استفاده از رکوردهای زلزله واقعی استفاده می‌شود [۱۳ و ۱۴]. رثوفی و همکارانش [۱۵] از این روش برای بررسی ساخت شتاب‌نگاشت مصنوعی برای زلزله‌های ناغان، طبس و منجیل استفاده نموده‌اند. از طرفی بررسی‌های اخیر باعث پیشرفت و ارائه مدل‌هایی گردیده است که طیف غیرایستای محتوای فرکانسی شتاب‌نگاشت‌ها را نیز لحاظ می‌کنند.

3 SIFT=Short-Time Fourier Transform

4 ISTFT =Inverse Short-Time Fourier Transform

یکی از مدل‌های مشهور، که برای تولید شتاب‌نگاشت‌های لازم ارائه گردید، مدل الگوی میانگین متحرک اتورگرسیون (ARMA=Autoregressive Moving Average) است که یک الگوی عمومی خطی برای تجزیه و تحلیل سری‌های زمانی گسسته می‌باشد [۱۶]. مدل‌های اتورگرسیون (AR=Autoregressive) می‌توانند روندهای تصادفی گوناگون را بصورت تقریبی مدل‌سازی کنند و مدل‌های متوسط حرکت (MA=Moving Average) مقادیر جاری فرآیند را به مقادیر قبلی یک سری نوفه سفید وابسته کنند. با ترکیب بخش‌های AR و MA مدل ترکیبی ARMA به دست می‌آید که یک مدل خطی برای آنالیز سری‌های زمانی می‌باشد.

مبارک و همکارانش [۱۷] روش فوق را برای زلزله‌های ایران (طبس، منجیل و ناغان) در خاک سخت و زلزله مکزیکوسیتی در خاک نرم مورد بررسی قرار داده‌اند. مدل متغیر زمانی ARMA (2,1) می‌تواند طبیعت غیر ایستای دامنه و محتوای فرکانسی زلزله واقعی را دریافت کند. در این روش نیز برای دریافت توصیف پیوسته از پارامترهای متغیر زمانی در مدل از روش بازه زمانی متحرک استفاده شده است [۱۸ و ۱۹]. با توجه به آنکه حرکات زلزله به طور کلی غیرایستا با چگالی تغییرات زمانی و محتوای فرکانسی می‌باشد، مدل‌های تصادفی غیرایستای دیگری نیز بر اساس توابع زمان و فرکانس ساخته شد [۲۰].

از تحقیقات اولیه انجام گرفته شده در خصوص استفاده از شبکه عصبی مصنوعی برای تولید شتاب‌نگاشت مصنوعی سازگار با طیف پاسخ می‌توان به تحقیقات قابوسی و لین اشاره نمود [۲۱]. تحلیل ویولت شتاب‌نگاشت‌ها جهت استخراج ویژگی‌های شتاب‌نگاشت‌های ورودی جهت تولید شتاب‌نگاشت منطبق با طیف طرح از دیگر روش‌های تولید شتاب‌نگاشت مصنوعی زلزله بوده است. در این روش از خاصیت چند وضوحی ویولت جهت آموزش بهتر سیستم یادگیرنده این نگاشت بهره‌برداری شده است [۲۲ و ۲۳].

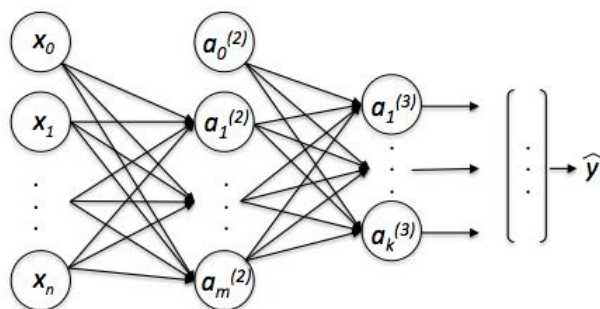
در مراجع [۲، ۲۴ و ۲۵] نیز روش‌های جدیدی ارائه شده است. ایده این روش‌ها استفاده از ضرایب ویولت و الگوهای مختلف فشرده‌سازی می‌باشد. در تحلیل ویولت می‌توان یک سیگنال را به دو سیگنال تقریب و جزئیات تجزیه نمود، هر کدام از این سیگنال‌های جزئی نیز یک بازه فرکانسی خاصی را پوشش می‌دهد. اگر سیگنال مورد نظر را به چندین تراز تجزیه نمائیم، عمده محتوای فرکانسی در ضرائب ویولت در یک تعداد تراز خاص مستتر است. لذا چنانچه بقیه ضرائب ویولت بطور تصادفی انتخاب شود با استفاده از معکوس تبدیل ویولت می‌توان به سیگنالی دست یافت که محتوایی شبیه به محتوای فرکانسی سیگنال اولیه داشته باشند. با بررسی مدل‌های مختلف ویولت و انتخاب یک ویولت مادر مناسب و انجام موارد فوق می‌توان به شتاب‌نگاشت مناسب منطقه مورد نظر دسترسی پیدا نمود. این روش به عنوان پایه‌ای برای پژوهش محققان بعدی قرار گرفته است.

در پژوهش‌های دیگر برگی و همکاران در سال ۲۰۱۱ با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی و ویولت‌ها جهت پوشش هر تراز خاص بسامدی به ارائه روشی جهت تولید شتاب‌نگاشت مصنوعی زلزله پرداختند [۲۶]. کرمی و شهریاری در سال ۲۰۱۵ روشی بر پایه تحلیل دینامیکی افزایشی برای رسیدن به سیگنال مصنوعی زلزله با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی آموزش یافته مبتنی بر الگوریتم پس انتشار خطا استفاده نمودند [۲۷]. با توجه به اهمیت موضوع در سال‌های اخیر پژوهش‌های متفاوتی در این خصوص انجام شده است که از روش‌های نوین در این خصوص بهره‌گیری از تئوری اطلاعات برای بدست آوردن شتاب‌نگاشت مصنوعی منطبق بر طیف پاسخ و سایر پارامترهای طراحی می‌باشد [۲۸-۳۱].

هر کدام از این پژوهش‌ها برگرفته از یک الگوی خاص بوده که تا حدودی توانسته پاسخی برای مسئله مطرح شده ارائه کند. اما سری‌های زمانی و ویولت‌ها امروزه به یک زبان مشترک برای محققان در علوم مختلف تبدیل شده‌اند که روش یکسانی را با نام‌های مختلف به کار می‌برند. موضوع تئوری موجک یا ویولت موضوع نسبتاً جدیدی می‌باشد، اما از آنجا که در این مسئله از میان پارامترهای موجود شتاب‌نگاشت‌های زلزله، تنها افزایش برخی پارامترها سبب افزایش خسارت می‌گردند و مابقی پارامترها دارای مقادیر ثابت و مشترک در میان خصوصیات زلزله می‌باشند، ترکیب این روش با تحلیل سری‌های زمانی می‌تواند نتایج بهتری را در این مسئله حاصل کند. به همین منظور در روش پیشنهادی در این مقاله، از سری زمانی برای بررسی تاثیر پارامترهای مختلف شتاب ورودی زلزله استفاده می‌گردد.

## ۲- شبکه عصبی مصنوعی

شبکه‌های عصبی مصنوعی از مباحثی می‌باشد که دانشمندان علوم کامپیوتر با ایده گرفتن از سیستم عصبی بدن انسان و با هدف شبیه‌سازی هرچه بیشتر کامپیوتر به انسان ارائه داده‌اند و تا به حال پیشرفت‌های قابل توجهی در این زمینه حاصل شده است. فعالیت‌های علمی و کاربردی آن در مسایل فنی مهندسی از قبیل سیستم‌های کنترلی، پردازش سیگنال، شناسایی الگو و مدل‌سازی گسترش یافته است. یک شبکه عصبی مصنوعی معمولی از چند لایه و هر لایه از تعدادی اجزاء کوچک داده‌پردازی بنام نرون، سلول، واحد یا گره تشکیل شده است. ساختار یک شبکه شامل لایه‌های مختلف به همراه تعداد نرون‌های مربوط می‌باشد. اولین لایه هر شبکه را لایه ورودی، لایه آخر را خروجی و لایه‌های میانی را اصطلاحاً لایه پنهان نام‌گذاری می‌کنند. بطور معمول نرون‌های هر لایه به کلیه نرون‌های لایه‌های مجاور از طریق یک رابطه جهت‌دار متصل می‌باشد. در شکل ۱ نمونه‌ای از ساختار فوق نشان داده شده است [۳۲].



شکل ۱: ساختار یک شبکه عصبی چندلایه

اطلاعات بین نرون‌ها از طریق این اتصالات منتقل می‌شود. هر یک از این اتصالات دارای مشخصه‌ای (وزن) مختص به خود هستند که در اطلاعات انتقال یافته از یک نرون به نرون دیگر ضرب می‌گردد. هر یک از نرون‌ها نیز برای محاسبه خروجی خود، یک تابع تحریک را که معمولاً غیرخطی است، به ورودی‌های آن (جمع اطلاعات وزن‌دار شده) اعمال می‌نماید. علاوه بر گره‌های ورودی یک گره اضافی به نام بایاس با مقدار واحد نیز به کلیه نرون‌های لایه بعد ارتباط داده می‌شود. وجود این نرون و وزنی که برای آن محاسبه می‌شود، حکم یک مقدار ثابت برای داده‌های ورودی را خواهد داشت و موجب جابجایی منحنی فضای ورودی می‌گردد. شبکه پیشرو، شبکه پرسپترون چند لایه‌ای است که شامل یک لایه ورودی از گره‌های منبع، یک یا چند لایه مخفی، با گره‌های محاسباتی (نرون‌ها) و یک لایه خروجی است. گره‌های منبع برای ورود اطلاعات بوده و گره‌های لایه‌های مخفی، شبیه آشکارسازهای ویژگی عمل می‌کند [۳۲]. با توجه به موارد فوق و بر با در نظر گرفتن قابلیت‌های یک شبکه عصبی مصنوعی (از جمله یادگیری، تعمیم، پردازش موازی و...)، در این مقاله از آموزش شبکه مصنوعی جهت رسیدن به پاسخ مناسب که همان شتاب‌نگاشت مصنوعی زلزله می‌باشد، استفاده شده است.

## ۳- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یکی از انواع الگوریتم‌های تکاملی می‌باشد که از علم زیست‌شناسی و مفاهیمی همچون وراثت، جهش، انتخاب ناگهانی، انتخاب طبیعی و ترکیب الهام گرفته است. این الگوریتم از تکامل ژنتیکی به عنوان یک الگوی حل مسئله استفاده می‌کند. در این الگوریتم راه حل‌ها مطابق یک الگوی کدگذاری شده با یک لیست از پارامترها نشان داده می‌شوند که به آنها کروموزوم یا ژنوم می‌گویند و برای ارزیابی هر پاسخ نیز از یک تابع تناسب استفاده می‌گردد. تکامل از یک مجموعه کاملاً تصادفی از موجودیت‌ها شروع می‌شود و در نسل‌های بعدی تکرار می‌شود. در هر نسل، مناسب‌ترین‌ها انتخاب می‌شوند که لزوماً بهترین‌ها نخواهند بود. به عبارتی در ابتدا چندین مشخصه به صورت تصادفی برای ایجاد نسل اول تولید می‌شوند و در طول هر نسل، هر مشخصه ارزیابی شده و ارزش تناسب توسط تابع هدف اندازه‌گیری می‌شود.

گام بعدی ایجاد دومین نسل از جامعه است که بر پایه فرآیندهایی همچون انتخاب، تولید از روی مشخصه‌های انتخاب شده با عملگرهای ژنتیکی همچون تقاطع و جهش، صورت می‌پذیرد. برای هر فرد، یک جفت والد انتخاب می‌شود. این انتخاب‌ها به گونه‌ایست که

مناسب‌ترین عناصر انتخاب شوند تا حتی ضعیف‌ترین عناصر هم شانس انتخاب داشته باشند. برای اجرای موارد ذکر شده، کاندیداهای مناسبی برای جواب، در نسل بعدی پیدا می‌شوند. مرحله بعدی، تولید فرزندان جدید است. فرایند توضیح داده شده، تا جایی تکرار می‌شود که به آخرین مرحله برسیم. از جمله شرایط خاتمه الگوریتم ژنتیک، رسیدن به تعداد ثابتی از نسل‌ها، اتمام بودجه اختصاص داده شده (زمان محاسبه/ هزینه)، حاصل شدن بیشترین درجه برازش فرزندان و یا عدم حصول نتایج بهتر می‌باشند [۳۳].

با توجه به اینکه در آموزش شبکه‌های عصبی مصنوعی تعیین وزن ورودی‌های شبکه در ارائه نتایج بهینه از سوی شبکه آموزش دیده بسیار اهمیت دارد، در این مقاله از الگوریتم تکاملی ژنتیک برای تعیین بردارهای وزن شبکه‌های عصبی مصنوعی در فرآیند آموزش بهره گرفته خواهد شد.

#### ۴- بکارگیری سری‌های زمانی در تحلیل شتاب‌نگاشت‌های زلزله

به مجموعه‌ای از داده‌های آماری که در فواصل زمانی مساوی و منظم جمع آوری شده‌اند، اصطلاحاً سری زمانی گفته می‌شود و به روش‌های آماری که این‌گونه داده‌ها را مورد بررسی قرار می‌دهند، روش‌های تحلیل سری‌های زمانی می‌گویند. روش‌های تجزیه و تحلیل سری‌های زمانی قسمت مهمی از علم آمار را تشکیل می‌دهد. تحلیل سری‌های زمانی به طور نظری و عملی بعد از سال ۱۹۷۰ برای پیش‌بینی فرآیندها و کنترل سیستم‌ها به سرعت توسعه پیدا کرده است [۳۴]. این تحلیل معمولاً به داده‌هایی مربوط می‌شود که مستقل نبوده و به طور متوالی به هم وابسته‌اند. لازم به یادآوری است که وابستگی بین مشاهدات متوالی، نقش بسیار مهمی در پیش‌بینی یک فرآیند تصادفی دارد. توابع سری‌های زمانی برای یک مجموعه از داده که به طور متوالی به دست آمده‌اند در رابطه (۵) نمایش داده می‌شود [۳۵].

$$y_t = \alpha_0 + \alpha_1 T^1 + \alpha_2 T^2 + \dots + \alpha_n T^n \quad (5)$$

ضرایب  $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_n$  را می‌توان از طریق تابع خود همبستگی (ACF: Auto Correlation Function) بدست آورد. برای آن که بتوان تأثیر یک سری زمانی را بر روی سری زمانی دیگر به دست آورد، باید از تابع همبستگی عرضی (CCF: Cross Correlation Function) استفاده نمود که در این حالت بازه زمانی مؤثر از رابطه (۶) بدست می‌آید.

$$-(10 + \sqrt{n}) \leq K \leq (10 + \sqrt{n}) \quad (6)$$

که در آن  $K$  تأخیر زمانی مؤثر در سری زمانی حاصل از داده‌های خروجی و  $n$  تعداد داده‌های مشاهده‌ای در سری‌های زمانی می‌باشد. سری‌های زمانی به دو دسته سری پیوسته، (که مشاهدات به طور پیوسته در زمان ایجاد می‌شوند حتی اگر مقادیر گسسته‌ای اختیار کنند) و سری گسسته، (که مشاهدات در زمان‌های معین و معمولاً در فاصله‌های مساوی رخ می‌دهند)، تقسیم می‌شوند. اهداف تجزیه و تحلیل سری‌های زمانی را می‌توان به توصیف، تشریح، پیش‌بینی، کنترل، افزایش طول سری زمانی کوتاه مدت به بلند مدت تقسیم بندی کرد [۳۴].

از میان پارامتر (ویژگی)های قابل استخراج در زلزله، تنها برخی پارامترها هستند که افزایش آنها در زلزله سبب افزایش خسارت می‌گردد و مابقی پارامترها دارای مقادیر ثابت و مشترک در میان خصوصیات زلزله می‌باشند. به همین منظور از سری‌های زمانی برای بررسی تأثیر پارامتر شتاب ورودی زلزله استفاده می‌نماییم. با استفاده از روش همبستگی عرضی سری‌های زمانی می‌توان تعداد و تأخیر زمانی مؤثر پارامترهای ورودی در شبکه عصبی را تعیین نمود، به طوریکه پارامترهای اضافی و غیر مؤثر حذف و مجموعه داده‌های مورد نیاز بهینه گردند [۳۵].

#### ۵- الگوی پیشنهادی

هدف این مقاله ارائه روشی جدید برای تولید شتاب‌نگاشت مصنوعی زلزله بر اساس طیف پاسخ شتاب‌نگاشت می‌باشد. بر این اساس، روشی برای مدل‌سازی این فرآیند با بهره‌گیری از قدرت یادگیری شبکه‌های عصبی مصنوعی و با تکیه بر تحلیل سری‌های زمانی، ارائه

می‌گردد. در این مقاله، شبکه عصبی مصنوعی وظیفه یادگیری مدلی معکوس (که هدف آن رسیدن از طیف پاسخ به شتاب‌نگاشت زلزله می‌باشد) را بر عهده دارد. برای افزایش قدرت یادگیری شبکه، نیاز به استخراج ویژگی‌های بیشتر شتاب‌نگاشت‌های زلزله می‌باشد که از روش‌های مختلف مانند تبدیل موجک و... برای این منظور بهره گرفته شده است.

هدف از تولید این شتاب‌نگاشت‌ها استفاده از آنها جهت تحلیل دینامیکی سازه‌ها می‌باشد. بدیهی است در چنین شرایطی انتخاب شتاب‌نگاشت‌هایی که در ردیف زلزله‌های خفیف به شمار می‌آیند، تحلیل مناسبی را ارائه نمی‌نماید، زیرا در آن صورت سازه واکنش در خور توجهی نسبت به آن نخواهد داشت. عموم شتاب‌نگاشت‌هایی که در ایران ثبت شده‌اند دارای چنین خصوصیات می‌باشند. در مرجع [۳۶] داده‌های پایه شبکه شتاب‌نگاری ایران ارائه شده است. اکثر این شتاب‌نگاشت‌ها دارای بزرگی کم و حداکثر شتاب پایین می‌باشند. لذا نمی‌توانند یک الگوی آموزشی مناسب به شمار آیند. در بین تمام این شتاب‌نگاشت‌ها تعداد محدودی از آنها از ویژگی‌های قابل قبولی برخوردارند، بطوریکه در محدوده زلزله‌های خفیف قرار نمی‌گیرند. نکته دیگر آنکه این سری از شتاب‌نگاشت‌ها مربوط به مناطق مختلف با ویژگی‌های متفاوت می‌باشند و مسلماً آموزش شبکه‌ای با این خصوصیات و با این تعداد امری پیچیده به نظر می‌رسد.

هدف از تولید شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی، تولید رکوردهایی است که به لحاظ تاریخیچه زمانی، شکلی مشابه زلزله‌های واقعی ثبت شده داشته و پارامترهای مهم مرتبط با آنها دارای دقت قابل قبولی باشند. مهم‌ترین این پارامترها شامل حداکثر شتاب، مدت زمان ارتعاش قوی و محتوای فرکانسی رکوردها هستند. دلیل دیگر در کنترل شتاب‌نگاشت‌های به کار گرفته شده، تضمین رعایت حداقل‌های مورد نیاز آنالیز طیفی استاتیکی، در آنالیزهای دینامیکی می‌باشد. در این مقاله با مد نظر قرار دادن موارد فوق، سعی می‌شود تعداد بیشتری از شتاب‌نگاشت‌های موجود جهت آموزش و تست شبکه انتخاب گردد.

با استفاده از تئوری ویولت‌ها می‌توان یک سری زمانی را به چندین تراز مجزا که عموماً به صورت متعامد انتخاب می‌شوند، تجزیه نمود. در واقع از شبکه‌های عصبی مصنوعی، ویولت‌ها و تحلیل سری‌های زمانی جهت رسیدن به شتاب‌نگاشت مصنوعی با طیف پاسخ همسان با طیف هدف استفاده می‌شود. در این روش ورودی شبکه طیف پاسخ سیگنال‌های زلزله و خروجی شبکه سیگنال‌های زلزله می‌باشد که آنالیزهای ویولت و سری‌های زمانی بر روی آنها انجام می‌پذیرد. بخاطر سهولت بیشتر در آموزش شبکه، در صورت امکان و صحت موضوع، یک سری از پارامترها در کلیه شتاب‌نگاشت‌ها یکسان فرض می‌شود. یکی از این پارامترهای مهم، مدت تداوم زلزله می‌باشد که با توجه به روش پیشنهادی می‌بایست به نحوی تعداد نقاط شتاب‌نگاشت‌های مختلف را یکسان در نظر گرفت. از آنجا که بین شتاب‌نگاشت و طیف پاسخ یک رابطه خطی موجود می‌باشد و همچنین طیف‌های هدف ارائه شده جهت استفاده از شبکه عموماً به صورت طیف طرح نرمالیزه شده برای یک پیشینه شتاب خاص می‌باشند، لذا می‌بایست این پیشینه شتاب به نحو بارزتری اعمال شود. برای این منظور کلیه شتاب‌نگاشت‌های مزبور به حداکثر شتاب خاصی (به طور مثال ۱g) مقیاس خواهند شد. بدین ترتیب کلیه شتاب‌نگاشت‌ها از جهت طول مدت تداوم و پیشینه شتاب زمین یکسان خواهند شد. همچنین با قرار دادن شتاب مؤثر مربوط به تمامی شتاب‌نگاشت‌ها در یک نقطه، اطلاعات سیگنال‌ها جهت آموزش شبکه با هم شبیه‌تر می‌گردند. با توجه به انتخاب N نقطه، یک راه بسیار مناسب آن است که شتاب‌نگاشت‌های مزبور را در راستای محور زمان بگونه‌ای انتقال داد، که شتاب‌های حداکثر همگی در یک نقطه قرار گیرند. این یکی از روش‌هایی است که به بهتر شدن الگوهای خروجی در جهت فراگیری آسان‌تر شبکه، کمک مناسبی می‌نماید. لذا شتاب‌نگاشت‌های حاصل بدین طریق مناسب‌ترین شتاب‌نگاشت‌ها در جهت استفاده در شبکه پیشنهادی خواهند بود.

پس از نرمال‌سازی، آنالیز ویولت برای هر سیگنال در نمونه پیاده‌سازی شده اولیه انجام می‌گیرد و برای هر تراز تجزیه ویولت یک شبکه عصبی طرح‌ریزی می‌گردد. در این مقاله با توجه به محدوده فرکانسی قابل کاربرد، شتاب‌نگاشت‌ها به ۸ تراز تجزیه گردیدند. ترازهای دیگر به دلیل داشتن فرکانس‌های خیلی بالا قابلیت استفاده ندارند. با توجه به طرح اولیه مطرح شده ورودی شبکه طیف پاسخ سرعت در نظر گرفته شد. مطابق جدول (۱) پیش‌بینی ۹ شبکه جهت تولید ضرائب ویولت سیگنال شده است و شتاب‌نگاشت نهایی از مجموع خروجی شبکه‌های مزبور حاصل خواهد شد. ورودی کلیه شبکه‌ها طیف پاسخ شبه سرعت می‌باشد. بدیهی است با توجه به یکسان شدن PGA کلیه شتاب‌نگاشت‌ها دارای طیف‌های حاصله مرتبط با شتاب پیشینه ۱g می‌باشند. طیف پاسخ هر شتاب‌نگاشت با استفاده از نرم افزار مربوط SeismoSignal با درصد میرایی ۰/۰۵ در ۱۰۰ نقطه فرکانسی محاسبه گردید.



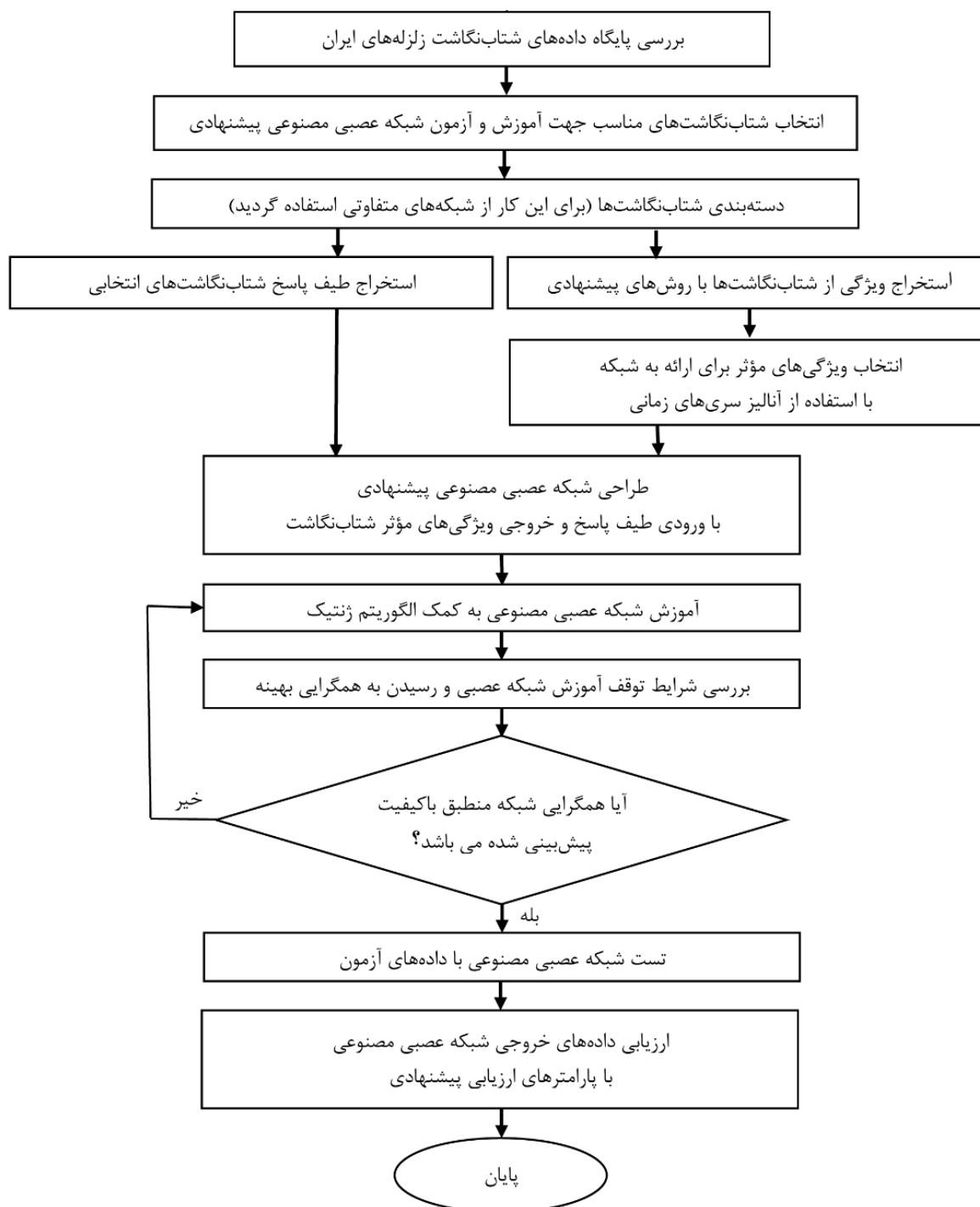
جدول ۱: مشخصات اولیه شبکه‌های عصبی

نام شبکه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
ورودی	طیف پاسخ با ۱۰۰ نقطه								
خروجی	ضریب تراز	ضریب تراز	ضریب تراز	ضریب تراز	ضریب تراز	ضریب تراز	ضریب تراز	ضریب تراز	مقیاس تراز
تعداد	۱۰۳۳	۵۲۶	۲۷۲	۱۴۵	۸۲	۵۰	۳۴	۳۴	۳۴

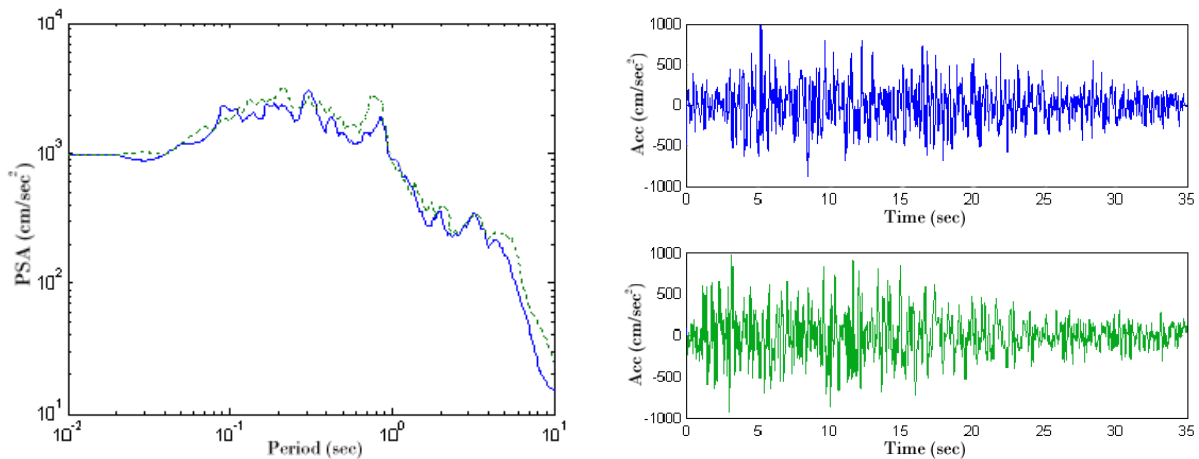
در آموزش شبکه با شرایط فوق امکان ایجاد مشکل تعداد زیاد گره‌های ورودی و خروجی وجود دارد. برای حل این مشکل در شبکه‌ها با استفاده از آنالیز سری‌های زمانی، سیگنال‌های خروجی را تقریب زده و نتایج حاصل از تحلیل سری‌های زمانی هر تراز در نظر گرفته می‌شود. لذا با توجه به شبکه پیشنهادی می‌توان آموزش شبکه برای داده‌های موجود را بهتر و با سرعت بالاتری انجام داد. در آموزش هر شبکه تعدادی از داده‌ها به عنوان نمونه آموزش و تعدادی دیگر بعنوان نمونه آزمون انتخاب گردیدند که در انتخاب شتاب‌نگاشت‌های آزمون به طور تصادفی عمل شده است. جهت بدست آوردن سیگنال مصنوعی تولید شده از محاسبه سیگنال با تحلیل سری‌های زمانی و همچنین عمل معکوس ویولت استفاده گردید. در شکل ۲ فرآیند کار در مدل پیشنهادی مقاله ارائه شده است.

در شکل‌های ۳ و ۴ نمونه نتایج تست به همراه طیف پاسخ تولید شده از آنها نشان داده شده است.

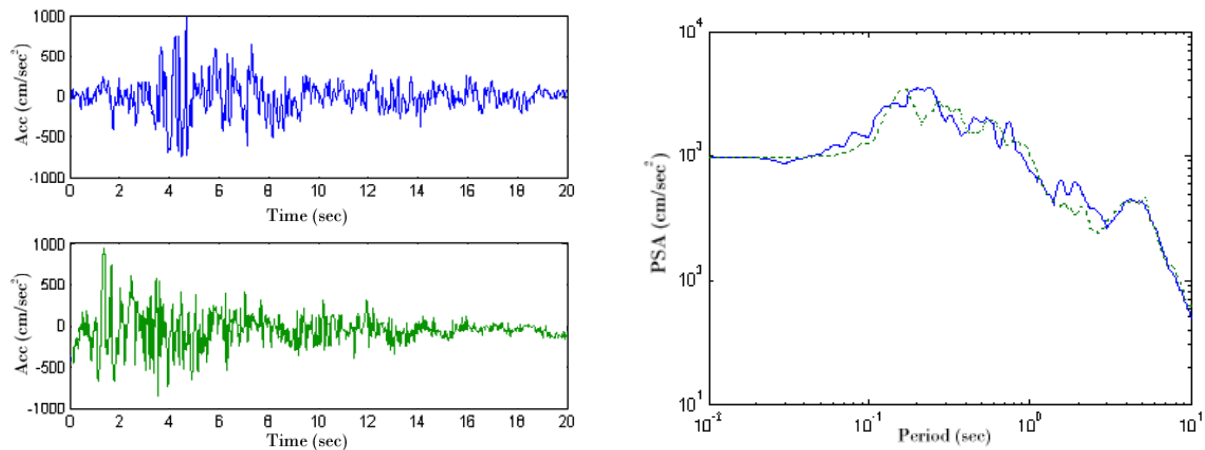
نتایج حاصل از کنترل شبکه‌های عصبی برای داده‌های گروه آموزشی و داده‌های خارج از این گروه بدست آمده است. نتایج حاصل از ارزیابی داده‌هایی که جزء مجموعه آموزشی بوده‌اند، نشان می‌دهد که شبکه به خوبی الگوی آموزشی خود را فراگرفته است و همان شتاب‌نگاشت ورودی را به عنوان پاسخ خود تولید کرده است. اما در کنترل شبکه‌های عصبی برای داده‌هایی که جزء گروه آموزشی نبوده‌اند و در واقع شبکه برای اولین بار با طیف پاسخ آنها مواجه شده، نتایج حاصل نشان می‌دهد که هر چند در برخی موارد شتاب‌نگاشت‌های تولیدی شباهت زیادی به رکوردهای ورودی ندارند، اما از الگوی مربوط تبعیت می‌نمایند. همانطور که در شکل‌های ۳ و ۴ ملاحظه می‌شود، شتاب‌نگاشت تولید شده علاوه بر این که شباهت قابل قبولی به شتاب‌نگاشت‌های واقعی دارد، طیف بدست آمده از آن انطباق قابل قبولی با طیف شتاب‌نگاشت ورودی دارد. مقایسه PGV و PGD شتاب‌نگاشت‌های تولیدی با شتاب‌نگاشت‌های اصلی نشان می‌دهد که در بیشتر آنها انطباق بسیار خوبی وجود دارد، اما در برخی موارد استثنائی PGV و PGD رکوردهای تولید شده حدود ۸۰ درصد PGD و PGV رکوردهای واقعی می‌باشند.



شکل ۲: فرآیند کار در مدل پیشنهادی.



شکل ۳: شتاب‌نگاشت اصلی (چپ بالا) و مصنوعی (چپ پایین) زلزله لاهیجان و طیف پاسخ اصلی (راست ممتد) و مصنوعی (راست خط چین).



شکل ۴: شتاب‌نگاشت اصلی (چپ بالا) و مصنوعی (چپ پایین) زلزله طبس و طیف پاسخ اصلی (راست ممتد) و مصنوعی (راست خط چین).

## ۶- بحث و نتیجه گیری

در این مقاله به ارائه روشی جدید با استفاده از تحلیل سری‌های زمانی، شبکه‌های عصبی مصنوعی، تبدیل موجک و الگوریتم ژنتیک برای تولید و شبیه‌سازی شتاب‌نگاشت مصنوعی منطبق با طیف برای شرایط ساخت‌گاهی مختلف پرداخته شد. این پژوهش تلاش نموده است تا با شناخت بهتر روش‌های ارائه شده در علم هوش مصنوعی، روش بهینه‌ای در زمان و دقت جهت رسیدن به شتاب‌نگاشت مصنوعی زلزله با اطلاعات موجود پیشنهاد نماید. در روش پیشنهادی ابتدا تعدادی شتاب‌نگاشت مربوط به یک ساختمان انتخاب می‌شود. بر اساس سرعت موج برشی خاک ایستگاه ثبت کننده رکورد، زمین ساختگاه به دو گروه خاک و سنگ تقسیم می‌گردند. سپس با استفاده از تبدیل موجک به تحلیل و پردازش شتاب‌نگاشت‌ها پرداخته می‌شود. در انتها از توانایی یادگیری شبکه‌های عصبی برای انتخاب معکوس از طیف پاسخ به ضرایب تبدیل ویولتی استفاده می‌شود. با استفاده از توانایی الگوریتم ژنتیک برای آموزش شبکه‌های عصبی در یک فضای گسترده، ماتریس‌های وزن و بایاس شبکه‌ها بهینه گردیده و از محبوس شدن شبکه‌ها در نقاط بهینه محلی جلوگیری به عمل می‌آید. بدین طریق شتاب‌نگاشت‌های منطبق با طیف ساختگاه تولید می‌شود. استفاده ترکیبی از شبکه عصبی مصنوعی، تبدیل موجک، الگوریتم ژنتیک و تحلیل سری‌های زمانی

موجب ارتقاء توانایی روش به لحاظ سرعت و دقت در تولید شتاب‌نگاشت مصنوعی سازگار با طیف برای شرایط ساختگاهی مختلف می‌شود. از ویژگی‌های مهم این پژوهش می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- ارائه شیوه‌ای مناسب و کاربردی جهت تولید شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی مناسب برای مناطق مختلف ایران با تعداد محدود شتاب‌نگاشت قابل ارائه به شبکه.
- ورود تحلیل سری‌های زمانی جهت بهبود انتخاب ویژگی‌های موثر از شتاب‌نگاشت‌ها در یادگیری شبکه عصبی مصنوعی.
- ارائه روشی بهینه در زمان، حجم اطلاعات ورودی به شبکه و دقت جهت رسیدن به شتاب‌نگاشت مصنوعی.
- بهبود فرآیند آموزش شبکه عصبی مصنوعی با بکارگیری الگوریتم ژنتیک.
- استفاده از ویولت‌ها برای شناسایی کامل و استخراج ویژگی‌های محتوای فرکانسی شتاب‌نگاشت زلزله.
- کاهش ماهیت تصادفی بودن شتاب‌نگاشت‌های خروجی و انطباق بیشتر آن با طیف سازگار با ساختگاه.

با توجه به حساسیت موضوع زلزله در کشور، پژوهش‌های زیادی در این زمینه در دست انجام بوده و می‌باشد، که نتایج این مقاله می‌تواند به عنوان یک الگوی پیشنهادی موثر مورد استفاده محققین این حوزه واقع شود.

## مراجع

- [1] *Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings*, Standard No. 2800 (4th Edition), Ministry of Roads and Urban Development, Iran, 2015.
- [2] Fadavi Amiri, M., Akbari, A. and Ghodrati Amiri, G. (2008), New Method for Generation of Artificial Earthquake Record, *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China, Oct. 12-17.
- [3] Priestley, M.B. (1967), "Power Spectral Analysis of Non-Stationary Random Processes", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 6, No. 1, 86-97.
- [4] Tajimi, H. (1960), "Statistical Method of Determining the Maximum Response of Building Structure during an Earthquake", *Proceedings of the 2nd World Conference on Earthquake Engineering*, 2, Tokyo and Kyoto, Japan, July 11-18.
- [5] Brune, J.N. (1970), "Tectonic Stress and Spectra of Seismic Shear Waves from Earthquakes", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 75, No. 26, 4997-5009.
- [6] Fereydouni, H. (1999), "Review and Production of Artificial Accelerograms and its Associated Parameters", MSc Thesis, University of Tehran, Faculty of Engineering.
- [7] Bagheri, A. (2005), "Production of Artificial Accelerograms using Kanay-Tajimi Pattern and Wavelet Analysis", MSc Thesis, Iran University of Science and Technology, School of Civil Engineering.
- [8] Housner, G.W. and Jennings, P.C. (1964), "Generation of Artificial Earthquakes", *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 90, Issue 1, 113-152.
- [9] Cohen, L. (1995), "Time-Frequency Analysis", Prentice Hall PTR. Englewood Cliffs, NJ.
- [10] Arfken G.B. and Weber H.J. (1995), "Mathematical Methods for Physicists", Academic Press, San Diego.
- [11] Kanai, K. (1957), "Semi-Empirical Formula for the Seismic Characteristics of the Ground Motion", *Bulletin of Earthquake Research Institute*, University of Tokyo, Vol. 35, No. 2, 309-325.
- [12] Fan, F.G. and Ahmadi, G. (1990), "Nonstationary Kanai-Tajimi Models for El Centro 1940 and Mexico City 1985 Earthquakes", *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol. 5, Issue 4, 171-181.
- [13] Ghodrati Amiri, G., Raeisi Dehkordi, M. and Bagheri, A. (2005), "Generation of Artificial Earthquake Records with a Nonstationary Kanai-Tajimi Model and Wavelet Transform", *Proceedings of the International Symposium on Innovation & Sustainability of Structures in Civil Engineering Including Seismic Engineering (ISISS'2005)*, Nanjing, China, November 20-22.
- [14] Fatemi, A.A., Bagheri, A., Ghodrati Amiri, G. and Ghafory-Ashtiany, M. (2012), "Generation of Uniform Hazard Earthquake Accelerograms and Near-Field Ground Motions." *Journal of Earthquake and Tsunami*, Vol. 6, No. 2, 12500013(17 pages).

- [15] Refooei, F.R., Mobarake, A. and Ahmadi, G. (2001), "Generation of Artificial Earthquake Records with a Nonstationary Kanai-Tajimi Model", *Engineering Structures*, Vol. 23, Issue 7, 827-837.
- [16] Olafsson, S. and Sigbjornsson, R. (1995), "Application of ARMA Models to Estimate Earthquake Ground Motion and Structural Response", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 24, Issue 7, 951-966.
- [17] Mobarakeh, A.A., Rofooei, F.R. and Ahmadi, G. (2002), "Simulation of Earthquake Records Using Time-Varying Arma (2, 1) Model", *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol. 17, No. 1, 15-34.
- [18] Aghababaei, M. (1998), "*Generation of Artificial Accelerograms using Kanai-Tajimi Model and Auto Regressive Moving Average Model (ARMA)*", MSc Thesis, Sharif University of Technology, School of Civil Engineering.
- [19] Zhang, C.R., Chen, H.Q. and Li, M. (2007), "Earthquake Accelerogram Simulation with Statistical Law of Evolutionary Power Spectrum", *Acta Seismologica Sinica*, Vol. 20, Issue 4, 435-446.
- [20] Ebeling, R.M. (1992), "*Introduction to the Computation of Response Spectrum for Earthquake Loading (No. WES-TR/ITL-92-4)*", Army Engineer Waterways Experiment Station Vicksburg MS Information Technology Lab.
- [21] Ghaboussi, J. and Lin, C.J. (1998), "New Method of Generation Spectrum Compatible Accelerograms using Neural Network", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 27, Issue 4, 377-396.
- [22] Amiri, G.G., Bagheri, A. and Seyed Razaghi, S.A. (2009), "Generation of Multiple Earthquake Accelerograms Compatible with Spectrum via the Wavelet Packet Transform and Stochastic Neural Networks", *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 13, No. 7, 899-915.
- [23] Mkrtychev, O.V. and Reshetov, A.A. (2013), "Using Wavelet Analysis to Obtain Characteristics of Accelerograms", *Vestnik MGSU, Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*, No. 7, 59-67.
- [24] Soleymani Eyvari, S.A., Fadavi Amiri, M. and Marvi, H. (2016), "New Method for Generation of Artificial Earthquake Record by New Model in Compression and Artificial Neural Networks", *Journal of Modeling in Engineering*, Vol. 14, No. 46, 77-90.
- [25] Asadi, A., Fadavi, M., Bagheri, A. and Ghodrati Amiri, G. (2011), "Application of Neural Networks and an Adapted Wavelet Packet for Generating Artificial Ground Motion", *International Journal of Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 37, No. 6, 575-592.
- [26] Bargi, K., Kaveh, A., Lux, C. and Rahami, H. (2011), "Generation of Artificial Accelerograms using a Combination of Neural Networks and Wavelets", *Sharif Civil Engineering Journal*, Vol. 2-28, No. 3. 79-88.
- [27] Karami, M. and Shahryari, H. (2015), "Production of Artificial Accelerograms to Estimate the Incremental Dynamic Analysis Parameters", *Modares Civil Engineering Journal*, Vol. 15, No. 2, 117-207.
- [28] Cacciola, P. and Zentner, I. (2012), "Generation of Response-Spectrum-Compatible Artificial Earthquake Accelerograms with Random Joint Time-Frequency Distributions", *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol. 28, 52-58.
- [29] Mitropoulou, C.C., Lagaros, N.D. and Papadrakakis, M. (2015), "Generation of Artificial Accelerograms for Efficient Life-Cycle Cost Analysis of Structures" *Engineering Structures*, Vol. 88, 138-153.
- [30] Batou, A. and Soize, C. (2013), "Generation of Accelerograms Compatible with Design Specifications uses Information Theory", *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 12, No. 2, 769-794.
- [31] Batou, A. and Soize, C. (2013), "Generation of Spectrum-Compatible Accelerograms using Information Theory", *Vienna Congress on Recent Advances in Earthquake Engineering and Structural Dynamics 2013 (VEESD 2013)*.
- [32] Gurney, K. (1997), "*An Introduction to Neural Networks*", CRC Press; First Edition.
- [33] Mitchell, M. (1995), "Genetic Algorithms: An Overview", *Complexity*, Vol. 1, No. 1, 31-39.
- [34] Niroomand, H. and Bozorgnia, A. (1995), "*Introduction to Time Series Analysis*", Ferdowsi University of Mashhad Publications.
- [35] Zarfam, P. and Nikou, M. (2010), "Use of Time Series in Evolutionary Artificial Neural Networks to Evaluate the Vulnerability of Concrete Moment Frame", *Journal of Civil Engineering, Islamic Azad University*, Vol. 3, Issue 3, 17-26.
- [36] Ramazi, H. (1997), "*Basic Accelerogram Data Record of Accelerograph Network of Iran*", Building and Housing Research Center, Publication, No. 256, Tehran.