

## ارائه روش پیشنهادی برای تولید ارتعاش (شتاب‌نگاشت) مصنوعی با استفاده از آشفتگی تقریبی و تحلیل اجزای اصلی برای تحلیل پویایی سازه‌های آبی

\*روح الله احمدی جزینی<sup>۱</sup>پیمان شادمان حیدری<sup>۲</sup>محمد خراسانی<sup>۳</sup>

### چکیده

اغلب پدیده‌های طبیعی اتفاقی از نظم خاصی پیروی نمی‌کنند. در علوم مهندسی، شناخت و بررسی این پدیده‌ها از جهات مختلف ضروری می‌باشد و از جایگاه خاصی برخوردار است. در بسیاری از حالات، طرح نهایی تسهیلات بحرانی یا سازه‌های مهم از قبیل نیروگاه‌های برق هسته‌ای، سدها، شبکه‌های انتقال نیرو و ساختمان‌های مرتفع بر اساس تحلیل کامل تاریخچه زمانی تهیه می‌شود. یکی از کاربردهای مطلوب تحلیل اجزای اصلی، استفاده از آن به عنوان ابزاری کمکی در آموزش شبکه‌های عصبی، عصبی فازی و ... است. تحلیل اجزای اصلی (PCA) یک شگرد سودمند آماری است. این تبدیل، تبدیلی بهینه در کارهای فشرده‌سازی و کاهش بعد است و خطای میانگین مربعات حاصل از فشرده‌سازی را کمینه می‌کند. این تبدیل وابسته به داده‌های ورودی می‌باشد. در این تحقیق با توجه به نیاز مهندسان سعی در ارائه روش‌های مؤثر و مفید جهت بررسی و تولید ارتعاش مصنوعی برپایه توانمندی تحلیل اجزای اصلی و آشفتگی تقریبی شده است. در روش پیشنهادی میزان نامنظمی نگاشته‌ها بررسی شده و با کاهش زمان اجرای الگوریتم، سعی در کاهش مدت زمان در تولید شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی شده است. با توجه به روش ارائه شده می‌توان در تحلیل و طراحی نیروگاه‌های برق آبی، سدها، شبکه‌های انتقال نیرو و ساختمان‌های بلند در برابر بارهای جانبی استفاده کرد.

### واژه‌های کلیدی

ارتعاش مصنوعی، شبکه عصبی، تحلیل اجزای اصلی، آشفتگی تقریبی.

۱. \* دکتر زلزله، عضو هیئت علمی گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شرق، تهران، ایران.

roohollahahmady@yahoo.co.uk

peyman\_shademan@yahoo.com

khorasani@iust.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۳/۴/۳

۲. عضو هیئت علمی گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شرق، تهران، ایران.

۳. دکتر زلزله، دانشگاه علم و صنعت.

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۱/۲۸

## مقدمه

دست داشتن شتاب‌نگاشت واقعی از مجموعه صافی‌های پایین‌گذر بسامد، با موفقیت به‌دست آورده شد. بالابردن طیف به‌وسیله برهم نهی کردن حرکت‌های سینوسی به‌دست می‌آید. با داشتن طیف، می‌توان با این روش شتاب‌نگاشتی به وجود آورد که طیف پاسخ آن تا حدود زیادی منطبق بر طیف طرح باشد.

اسکانلن و ساچس<sup>۱۱</sup> (۱۹۷۴) روشی بر پایه مفهوم رشدیافته توسط چینینگز،<sup>۱۲</sup> هاسنر<sup>۱۳</sup> و تسایی<sup>۱۴</sup> برای تولید چندین شتاب‌نگاشت متنوع و قابل قبول ارائه کردند؛ زیرا به نظر آنها تلاش برای تولید یک شتاب‌نگاشت قطعی خاص غیر منطقی است. در این روش، روندی اتخاذ شده که در آن طیف فوریه<sup>۱۴</sup> تاریخچه زمانی آزمایشی، به‌گونه‌ای اصلاح شده است که طیف پاسخ مطلوب به‌دست آید.

ساراگونی و هارت<sup>۱۵</sup> (۱۹۷۴) با تعمیم این پژوهش‌ها روشی را برای تولید شتاب‌نگاشت مصنوعی زلزله توسعه دادند. این روش از ترکیب تغییرات زمانی متوسط مربعات دامنه‌ها و محتوای بسامدی، روند تحلیل را به واقعیت نزدیک‌تر می‌کند. کاول<sup>۱۶</sup> (۱۹۷۸) یک روند جایگزین برای روش قبلی توسعه داد. در این روش برای به‌دست آوردن طیف پاسخ با اصلاحات مطلوب، طیف فوریه یک تاریخچه زمانی آزمایشی اصلاح می‌شود. ترتیب مراحل در این روش به این شکل است که از یک تاریخچه زمانی انتخاب‌شده به عنوان تقریب اولیه در قدم‌های پی‌درپی با تغییر و همگر کردن به‌صورت یکنواخت به طیف هدف، تاریخچه زمانی طراحی به‌دست می‌آید.

بعدها وانگ<sup>۱۷</sup> و تریفوناک<sup>۱۸</sup> (۱۹۷۹)، یک روش مهندسی برای تولید شتاب‌نگاشت مصنوعی ارائه کردند که دارای طیف دامنه فوریه سازگار با طیف محاسبه‌شده از شتاب‌نگاشت‌های ثبت‌شده با ویژگی‌های خاص، از جمله مقدار بزرگی زلزله  $M$ ، فاصله تا ایستگاه  $R$  و ضرایب اصلاح شده مرکالی (MMI)<sup>۱۹</sup> برای یک مکان احداث پروژه مشخص مشخص می‌باشد. هم‌چنین دارای مدت زمان رخداد زلزله که سازگار با

به جز نواحی ویژه‌ای از جهان که شتاب‌نگاشت‌های ثبت‌شده مناسبی دارند، در نقاط دیگر می‌توان از شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی برای انجام تحلیل استفاده نمود. برای تولید شتاب‌نگاشت مصنوعی از گذشته تاکنون روش‌های مختلفی ارائه شده است. (جوینر،<sup>۱</sup> بوور،<sup>۲</sup> ۱۹۹۷؛ بوت‌رایت،<sup>۳</sup> ۱۹۸۲) در روش‌های تصادفی، شتاب‌نگاشت زلزله به‌صورت اغتشاش تصادفی گاوسی<sup>۴</sup> با پهنای باند محدودشده برای منبع و فرایند انتشار در یک منطقه خاص، تولید می‌شود. (هنکس،<sup>۵</sup> ۱۹۸۱؛ مک‌گوایر،<sup>۶</sup> ۱۹۸۱)

در اواخر دهه ۵۰ و اوایل دهه ۶۰، پژوهشگرانی از جمله گودمن، روزنبلوس و نیومارک،<sup>۷</sup> شتاب‌نگاشت زلزله را به‌صورت موج سفید با فرایند تصادفی و روش‌های طیف سازگار الگو کردند. این روش‌ها به دو روش الگوی ایستا و الگوی غیر ایستا تقسیم‌بندی می‌شوند.

هاسنر<sup>۸</sup> نیز شتاب‌نگاشت زلزله را به‌صورت فرایند تصادفی الگو کرد. او شتاب‌نگاشت را به‌صورت قطار تپ‌های<sup>۹</sup> تصادفی با دامنه معین و فاصله‌های زمانی تصادفی شبیه‌سازی کرد. اخیراً، شتاب‌نگاشت با ترکیب یک تناوب کامل از موج‌های سینوسی به‌صورت بخش تصادفی در زمان با بسامد و دامنه سازگار با یک توزیع احتمالی محاسبه‌شده، به‌دست آمده است. (زرافی، ۱۳۸۷)

ماهیت تصادفی در شتاب‌نگاشت‌های ثبت‌شده گذشته و غیر پیش‌بینی بودن شتاب‌نگاشت اتفاقی آینده، ضرورت الگوی غیر ایستا را نشان می‌دهند. بنابراین، بیان حرکت زمین با فرایندهای تصادفی، لازم و ضروری می‌باشد. غیر ایستا بودن در این روش‌ها، با الگوهای مختلف قابل محاسبه است.

تسایی<sup>۱۰</sup> برای تطبیق طیف پاسخ شتاب‌نگاشت تولیدشده با طیف طرح، شتاب‌نگاشت سازگار با طیف را با استفاده از روش‌های بالاپایین بردن طیف تولید کرد. پایین‌بردن طیف با گذرانیدن شتاب‌نگاشت اختیاری انتخاب‌شده، با در

11. Scanlan and saches.

12. Chenings.

13. Hasner.

14. Fourier Transform.

15. Saragoni and hart.

16. Kaul.

17. Wong.

18. Trifunac.

19. The Modified Mercalls Intensity.

1. Joyner.

2. Boore.

3. Boat Wright.

4. Gaussian.

5. Hanks.

6. McGuire.

7. Goodman, Rosenblueth and Newmark.

8. Husner.

9. Pulse.

10. Tsai.

از تثبیت وردایی<sup>۷</sup>، الگوی آرما (ARMA)<sup>۸</sup> برای رشته‌های زمانی برآزش داده می‌شود و سپس بر روی الگوی به‌دست‌آمده تبدیل معکوس به کار گرفته می‌شود. سپس اسپانوس و میگنولت<sup>۹</sup> (۱۹۹۰) روشی را برای تعیین میانگین متحرک (MA) و الگوریتم میانگین متحرک کاهنده خودکار (ARMA) برای شبیه‌سازی پژوهش‌هایی از فرایند تصادفی چندمتغیره با آرایه<sup>۱۰</sup> طیف هدف و یا طیف خاص مشخص شده ارائه کردند، این روش‌ها به عنوان جایگزینی برای ARMA و الگوریتم‌های شبیه‌سازی دو مرحله‌ای شناخته می‌شود.

ونبرگ<sup>۱۱</sup> (۱۹۹۰) از توابع گرین<sup>۱۲</sup> تجربی برای مقید کردن مسیر انتشار و داده‌های مربوط به بازتاب ساختمانگاه استفاده کرد، اما در این روش اثرات تأخیر فاز قابل اعمال در چشمه لرزه‌ای نقطه‌ای فراهم نمی‌گردد و نگاشت‌های تولیدشده تطابق مناسبی با نگاشت‌های واقعی مشاهده شده ندارند. قدرتی و اشتري<sup>۱۳</sup> (۲۰۰۶) برای تولید شتاب‌نگاشت زلزله از موجک<sup>۱۴</sup> استفاده کرده‌اند. تبدیل موجک می‌تواند یک نگاشته<sup>۱۵</sup> را به دو مقدار نگاشته تقریب و جزئیات تجزیه کند. هر کدام از این نگاشته‌ها یک بازه بسامد خاصی را پوشش می‌دهند. اگر نگاشته موردنظر را به چندین تراز تجزیه کنیم، عمده محتوای بسامدی در ضرایب موجک در یک عده تراز خاص مستمر است، که در این پژوهش، تا سه مرحله تجزیه می‌شود؛ لذا، چنانچه دیگر ضرایب موجک به طور تصادفی انتخاب شود و با استفاده از معکوس تبدیل موجک می‌توان به نگاشته‌ای دست یافت که محتوایی شبیه محتوای بسامدی نگاشته اولیه داشته باشد.

قدرتی و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از الگوی کانای - تجیمی<sup>۱۶</sup> و تحلیل موجک، روشی را برای تولید شتاب‌نگاشت زلزله ارائه کردند. برای به‌دست آوردن مؤلفه‌های الگو، وجود حداقل یک نگاشته برای منطقه مورد مطالعه بایسته است که در این روش تحلیل موجک، می‌تواند یک مقدار ثبت‌شده را

مشاهدات و مقیاس کردن تجربی زمان براساس M و R و یا MMI می‌باشد. شایسته یادآوری است که خصوصیات‌گذرای زمانی کلی با ورود موج سازگار با ویژگی‌های پراکنشی موج‌بر در زیر ایستگاه ثبت زلزله می‌باشند.

اینگر و راو<sup>۱</sup> (۱۹۷۹) روشی را برای طراحی مهندسی ارائه کردند که در آن به بازنمایی سری فوریه<sup>۲</sup> پرداختند و بالابودن طیف پاسخ در مرحله بر طیف طرح در هر مرحله از محاسبات را تضمین کردند. این روش به همراه توابع مقیاس تجربی اخیر برای مشخص کردن دامنه و مدت زمان رخداد زلزله در ایستگاه ثبت زلزله، تکمیل می‌شود. مشخصه اصلی این رویکرد غیر ایستا بودن بسامد و دامنه در شتاب‌نگاشت‌های تولیدشده است که در توافق کامل با اصول شناخته شده پخش موج و دامنه فوریه و بسامد وابسته به زمان مقیاس‌شده منطبق بر شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده می‌باشد.

بعدها یک رویکرد ساده محاسباتی مؤثر توسط سیلوا<sup>۳</sup> (۱۹۹۱) پیشنهاد شد. این روش برای شبیه‌سازی هزاران شتاب‌نگاشت انتخاب شد که در محدوده گسترده‌ای از مؤلفه‌ها برای منبع، ساختمانگاه و مسیر موج متحرک بودند.

بور<sup>۴</sup> (۱۹۸۳) پیش‌بینی حرکت‌های لرزه‌ای را به‌صورت تابعی از قدرت منبع بیان کرد، که بیشتر به‌صورت الگوهای مقیاس‌شده دامنه و بسامد می‌باشند. الگوی شبیه‌سازی ارائه‌شده بور، از هر دو استفاده می‌کند و مجموعه‌ای از رشته‌های<sup>۵</sup> زمانی تصادفی پنجره‌بندی شده طوری محدود می‌شوند که طیف دامنه به‌طور متوسط با طیف هدف مساوی باشد.

کیمورا و ایزومی<sup>۶</sup> (۱۹۸۹) یک روش ساده مهندسی را برای کنترل مشخصات زلزله ارائه کردند تا زلزله را با بر هم نهی تابع ساده ترکیب کند. این نتایج ساده توسط ۵ عامل بیان می‌شود که شامل شدت، بسامد غالب، بسامد مربوط به هم‌پوشانی (پوش)، فاز اولیه که شکل هندسی را معین می‌کند و موقعیت مرکزی در نمودار زمانی با توجه به ارتعاشات می‌باشد.

رویکرد دیگری نیز برای صرفه‌جویی در نمایش رشته‌های زمانی شتاب‌نگاشت زلزله به‌دست آمد. در این روش ابتدا پس

7. Variance.  
8. Autoregressive - Moving-Average Model.  
9. Spanos and Mignolet.  
10. Matrix.  
11. Wennerberg.  
12. Green's Function.  
13. Ghodrati and Ashtari.  
14. Wavelet.  
15. Record.  
16. Kanai-Tajimi Model.

1. Iyengar and Rao.  
2. Fourier series.  
3. Silva.  
4. Boore.  
5. Series.  
6. Kimura and Izumi.

کردند، که فقط شامل اثرات پخش هندسی بود ولی تأثیرات الگوی تابش و تابع دریافت را شامل نمی شد. در این روند گسل به اجزای گسسته تقسیم می شود و حرکت این اجزا با تأخیرات متناظر جمع شده و انتشار ترک و گسیختگی در سطح گسل شبیه سازی می شود. هم چنین مؤلفه های تصادفی شامل سرعت لغزش گسل و انتشار گسیختگی برای شبیه سازی غیر یکنواختی در گسیختگی، پویایی<sup>۶</sup> می باشند. تغییرات زیاد در توزیع لغزش در گسل موجب بروز مشکلات فراوانی در برخورد با این قضیه می شود.

سمرویل<sup>۷</sup> و همکاران (۱۹۹۱) روندی را برای شبیه سازی تاریخچه زمانی شتاب برای زلزله های بزرگ ارائه کردند. در این روند، الگوی حرکت زمین برای زلزله های بزرگ، از مجموع همکاری اجزای کوچک گسل برای شبیه سازی انتشار گسیختگی در گسل به دست می آید. تابش از اجزای گسل به وسیله تابع تجربی منع که از پس لرزه ثبت شده یک زلزله به مقدار  $Mw = 7$  در فاصله کم گسل به دست آمده و هم چنین از تابع گرین برای شبیه سازی الگو کردن انتشار موج استفاده می شود. اگرچه روش های توسعه داده شده برای مناطق فعال لرزه ای در مناطق با داده های کمتر می تواند بکار برده شود اما روش های تجربی که برای ناحیه های فعال بکار برده شده اند، به طور کلی برای مناطق غیر فعال مناسب نیستند؛ چون تفاوت پایه ای زمین شناسی منجر به ایجاد زلزله هایی با سازوکار و مشخصات متفاوت می شود. پیش بینی حرکت واقعی زمین که شامل دامنه های قطعی و مستقل و هم چنین قطار امواج رسیده برای تعیین خطر زلزله ضروری می باشد.

هاتچینگز<sup>۸</sup> (۱۹۹۴) الگوی حرکتی رایانه ای را برای بهبود چنین پیش بینی هایی توسعه داد. او نشان داد که الگوهای حرکتی ساده زلزله استفاده شده از توابع تجربی گرین می تواند لرزه نگاشت های نزدیک به واقعیت را پیش بینی کند. بعدها روش ساده ای برای پیش بینی زلزله بزرگ در آینده و مخصوص منطقه خاص ارائه شد، که از جمع کردن مقادیر ثبت شده محدود شده کوچک مجاور استفاده می کند.

سبتا<sup>۹</sup> و پوگلیز<sup>۱۰</sup> (۱۹۹۶) از داده های زلزله مربوط به ایتالیا برای مطالعه روابط کاهندگی طیفی و تولید شتاب نگاشت

به دو مقدار ثبت شده تقریب و جزئیات تجزیه کند. هرکدام از این نگاشته های جزئیات نیز یک بازه بسامدی خاصی را پوشش می دهند. بدین ترتیب می توان از ایده شبیه سازی نگاشته های جزئیات برای شبیه سازی نگارش زلزله سود جست. در این روش برای شبیه سازی نگاشته های جزئیات از الگوی کانای - تجیمی استفاده شده است و پس از آنکه همه نگاشته های جزئی شبیه سازی شد با جمع کلیه نگاشته های جزئیات، نگاشته شبیه سازی شده به دست می آید.

رضایان<sup>۱</sup> و کیورقیان<sup>۲</sup> (۲۰۱۰) روشی ابداع کردند که در آن روش، برای تولید کردن تاریخچه زمانی (نگاشته) تصادفی جنبش زمین برای یک زلزله مشخص با مشخصات ساختگاهی معین، از یک الگوی تصادفی مؤلفه ای که بر پایه فرایند اغتشاش اختلال سفید<sup>۳</sup> است، استفاده کردند. در این روش مؤلفه های الگو شامل شدت، بسامد غالب و پهنای باند تاریخچه زمانی شتاب بر اساس تطابق بین داده های الگو با داده های شتاب نگاشت ثبت شده هدف، به دست می آیند.

شبیه سازی نظریه موج با رویکرد متفاوت و نگاه قطعی تر نسبت به روش های تصادفی به پیش بینی و تولید شتاب نگاشت مصنوعی می پردازد. هم چنین در روش های ترکیبی جنبه های شناخته شده و معلوم انتشار موج، به صورت قطعی در نظر گرفته می شود و جنبه های غیر معلوم، به صورت تصادفی الگو می شوند. پایه اولیه بسیاری از روش های ترکیبی، تابع تجربی گرین است که توسط هارتزل<sup>۴</sup> (۱۹۸۷) معرفی شد، که در آن الگوی تابش و انتشار گسیختگی به صورت قطعی مشخص می شود. تابش منبع و تأثیرات انتشار به صورت تجربی با فرض الگو کردن پس لرزه به صورت توابع گرین در نظر گرفته می شود. روش جمع توابع تجربی گرین به صورت مجموع نمودارهای لرزه ای از نقطه مؤثر آنی در منبع جابجا شده همراه با راه حل تحلیلی برای توابع لغزش از روش های معمول برای الگو کردن حرکت زمین از بین روش های دیگر است. در این روش، مقادیر ثبت شده برای زلزله های با مقدار بزرگی کمتر بعداً برای شبیه سازی گسیختگی یک زلزله بزرگ مورد استفاده قرار می گیرند.

هادلی<sup>۵</sup> و همکاران (۱۹۸۲) از توابع ساده شده گرین استفاده

6. Dynamic.  
7. Somerville.  
8. Hutchings.  
9. Sebta.  
10. Pugliese.

1. Rezaeian.  
2. Kiureghia.  
3. White noise.  
4. Hartzell.  
5. Hadley.

پاسخ مربوط به یک شتاب‌نگاشت به‌عنوان یک مسئله مستقیم توجه شود، تعیین شتاب‌نگاشت با توجه به طیف در واقع معکوس مسئله می‌باشد.

تحلیل اجزای اصلی (PCA)<sup>۳</sup> یک روش سودمند آماری است که برای شناسایی یک نمونه در داده‌های از بعد بالا مناسب است. این تبدیل افزون بر اینکه وابسته به داده‌های ورودی است، تبدیلی بهینه در کارهای فشرده‌سازی و کاهش ابعاد بوده و خطای میانگین مربعات حاصل از فشرده‌سازی را کمینه می‌کند. تحلیل اجزای اصلی یک روش اختیاری چندمتغیری است که قابلیت استفاده برای پیدا کردن امواج در اطلاعات اختلال آور را دارد.

یکی از کاربردهای مطلوب تحلیل اجزای اصلی، استفاده از آن به عنوان ابزاری کمکی، در آموزش شبکه‌های عصبی، عصبی فازی و ... می‌باشد. معمولاً قبل از آغاز آموزش این شبکه‌ها یک‌رشته پیش پردازش بر روی داده‌ها انجام می‌شود که باعث افزایش کارایی این شبکه‌ها خواهد شد. در برخی از وضعیت‌ها ابعاد بردار ورودی بسیار بزرگ بوده ولی اجزای بردارها همبستگی بالایی دارند که این وضعیت، بهتر است در ابعاد بردار ورودی کاهش داده شود. یک رویه مناسب برای این عمل استفاده از تحلیل اجزای اصلی است. متعامدسازی اجزای بردار ورودی - که در این صورت آنها هیچ وابستگی با یکدیگر ندارند - باعث مرتب‌سازی اجزای متعامد (اصلی) می‌شود، و در نتیجه می‌توان اجزایی که تغییرات کوچکتری در مجموعه داده‌ها ایجاد می‌کنند را حذف کرد.

حذف این اجزای اضافی سرعت آموزش این شبکه‌ها را افزایش می‌دهد و در صورتی که ابعاد مسئله خیلی بزرگ باشد کارایی شبکه را بهبود می‌بخشد، به خصوص زمانی که از الگوریتم‌های تکاملی مانند الگوریتم‌های ژنتیک، بهینه‌سازی انبوه ذرات و ... برای آموزش شبکه‌ها استفاده می‌شود.

این تبدیل که با اسامی دیگری چون هاستلینگ<sup>۴</sup>، کاره‌انن - لو (KLT)<sup>۵</sup> و بردارهای ویژه نیز شناخته می‌شود، تبدیل بهینه در کارهای فشرده‌سازی و کاهش بعد است و خطای میانگین مربعات حاصل از فشرده‌سازی را کمینه می‌کند. هر چند این تبدیل به علت وابسته بودن به داده ورودی، جای خود را در الگوریتم‌های کاربردی و عملی، به تبدیل گسسته

مصنوعی زلزله استفاده کردند که شتاب‌نگاشت تولیدشده تابعی از بزرگا، فاصله و زمین‌شناسی مربوط به منطقه بود. هم‌چنین شبیه‌سازی غیر ایستا حرکت زمین توسط روش‌های تجربی که در آن زمان و بسامد از خصوصیات زلزله است، به‌وسیله طیف فیزیکی بیان شده است که در نهایت نظریه گشتاور<sup>۱</sup> طیفی به مورد غیر ایستا مرتبط گردید.

روش پیشنهادی ارائه‌شده در این تحقیق برای اولین بار در دنیا ارائه شده است که بر اساس آشفتگی<sup>۲</sup> و تحلیل اجزای اصلی اقدام به بررسی ارتعاشات و تولید ارتعاشات (شتاب‌نگاشت) تصادفی استفاده می‌شود.

### روش‌های تولید شتاب‌نگاشت مصنوعی

برای تولید شتاب‌نگاشت مصنوعی از گذشته تاکنون روش‌های گوناگونی ارائه شده است که عبارتند از:

۱. روش‌های تصادفی؛

۲. روش‌های نظریه موج؛

۳. روش‌های ترکیبی.

در روش‌های تصادفی، شتاب‌نگاشت زلزله به‌صورت اغتشاش تصادفی گاوسی با پهنای باند محدودشده که شکل طیف متناظر، توسعه الگوی تجربی لرزه‌شناختی، برای منبع و فرآیند انتشار برای یک منطقه خاص به دست می‌آید، تولید می‌شود. سادگی و کم‌هزینه بودن از مزیت‌های مهم این روش محسوب می‌شود.

در روش نظریه موج، حرکت زمین به وسیله یک تابع تجربی برای منشأ زلزله و توابع گرین برای یک الگوی سازه‌ای پوسته‌ای مشخص، شبیه‌سازی می‌شود. امتیاز اصلی روش‌های پخش موج، قدرت پیش‌بینی این الگوها می‌باشد.

روش‌های ترکیبی، ترکیبی از روش‌های قبل است که در آن از نظریه ری برای پیش‌بینی اثرات انتشار موج به‌صورت قطعی استفاده می‌شود، اما در رفتار با فاز هر موج به‌صورت تصادفی عمل می‌کند.

### تحلیل اجزای اصلی

مهندسی معکوس فرایند اکتشاف فناوری‌های بکاررفته در یک دستگاه، شی و یا سامانه به روش تحلیل ساختار، عملکرد و وظیفه آن می‌باشد. معمولاً از این فرایند برای دستیابی به تحلیل جزئیات و شیوه عملکرد آن در نگهداری یا ساخت یک دستگاه یا برنامه مشابه استفاده می‌شود. اگر به محاسبه طیف

3. Principal Component Analysis.  
4. Hostelling Transform.  
5. Karhunen-Live Transform.

1. Moment.  
2. Entropy

نظر گرفته می‌شود. در حقیقت این روش مبتنی بر آشفتگی است که از توزیع تجربی برای الگوهای مختلف به دست می‌آید. دنباله‌ای که آشفتگی تقریبی آن بیشتر باشد دارای خاصیت تصادفی بودن بیشتری است و بی‌نظمی در آن بالاتر است، و برعکس آن، دنباله‌ای که آشفتگی تقریبی آن پایین‌تر بوده دارای نظم بیشتری است. یا دست کم از یک الگوی منظم پیروی می‌کند و غیر تصادفی‌تر است.

شبیه‌سازی نظریه موج با رویکرد متفاوت و نگاه قطعی‌تری نسبت به روش‌های تصادفی به پیش‌بینی و تولید شتاب‌نگاشت مصنوعی می‌پردازد. هم‌چنین در روش‌های ترکیبی جنبه‌های شناخته‌شده و معلوم انتشار موج، به صورت قطعی در نظر گرفته می‌شود و جنبه‌های غیر معلوم، به صورت تصادفی الگو می‌گردد. تابش منبع و تأثیرات انتشار به صورت تجربی با فرض الگو کردن پس لرزه به صورت توابع گرین در نظر گرفته می‌شود.

شتاب‌نگاشت‌های مناسب برای تحلیل تاریخچه زمانی، مقادیر ثبت‌شده زلزله هستند که دارای مشخصاتی مشابه با خصوصیات برآورد شده محل ساختگاه مورد نظر باشند، اما با توجه به تعداد و تنوع کم شتاب‌نگاشت‌های ثبت و پردازش شده، انتخاب نگاشت‌های متناسب با واقعیت برای طراحی، در برخی موارد با اشکال مواجه شده و حتی ناممکن می‌باشد. مقادیر ثبت‌شده به دست آمده از زلزله‌های به وقوع پیوسته در نواحی دیگر نیز با توجه به تفاوت‌های موجود در خصوص مشخصات زمین‌ساختی در اکثر مواقع معیارهای مورد نظر را اشباع نمی‌کنند. در چنین شرایطی استفاده از شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی که با توجه به ویژگی‌های مورد انتظار ساخته می‌شوند، می‌تواند راه حلی مناسب، برای تحلیل و طراحی سازه‌های مهم باشد.

در چند سال اخیر تحلیل آماری امواج زلزله برای تفکیک زمین‌لرزه‌ها و شناسایی خواص آنها اهمیت ویژه‌ای یافته است. در این قسمت از مقاله بر اساس آشفتگی تقریبی، اقدام به ارائه روشی در راستای تولید زلزله مصنوعی می‌شود که این زلزله مصنوعی ویژگی‌های زلزله واقعی را دارد و افزون بر این، طیف پاسخ این زلزله تولید شده می‌بایست تطابق خوبی با طیف زلزله اصلی داشته باشد. در این روش بدون دخالت مستقیم طیف پاسخ، اقدام به تولید نگاشت مصنوعی خواهد شد. در بعضی از وضعیت‌ها، ابعاد بردار ورودی بسیار بزرگ می‌باشد، اما اجزای بردارها همبستگی بالایی دارند که بسیار

کسینوسی (DCT)<sup>۱</sup> داده است، اما در صورت کافی بودن داده ورودی می‌تواند تبدیل بهینه را استخراج نماید. تحلیل اجزای اصلی یک روش اختیاری چندمتغیری است.

هدف تحلیل اجزای اصلی، به عنوان یک وسیله دسته‌کننده داده‌ها مورد توجه نیست بلکه هدف آن، خلاصه کردن داده‌هاست. از این روش در فشرده‌سازی آماری استفاده می‌شود.

### الگوریتم روش آشفتگی تقریبی

آشفتگی تقریبی (ApEn)<sup>۲</sup> یک روش آماری است که برای تعیین تصادفی بودن و یا غیرمنظم بودن یک دنباله از اعداد به کار می‌رود. روش‌های دیگری نیز برای تعیین تصادفی بودن یک دنباله وجود دارد ولی آزمون‌های دیگر برای این کار ضعیف‌ترند. اصولاً تعیین تصادفی بودن یک دنباله برای موتورهای تولیدکننده اعداد تصادفی و هم‌چنین کسانی که از این اعداد تولید شده استفاده می‌کنند، دارای اهمیت زیادی است. در علوم آماری داده‌های شبیه‌سازی شده، در صورتی که میزان تصادفی بودن در آنها خصوصاً داده‌هایی که از توزیع یکنواخت تولید می‌شود بیشتر باشد، دارای اعتبار زیادی خواهند بود.

ماهیت تصادفی در شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده گذشته و غیر پیش‌بینی بودن شتاب‌نگاشت اتفاقی آینده ضرورت الگوی غیر ایستا را نشان می‌دهند. بنابراین بیان حرکت زمین با فرایندهای تصادفی، لازم و ضروری به نظر می‌رسد. غیر ایستا بودن با الگوهای گوناگون زیر قابل اعمال است :

۱. با ضرب تابع هم‌پوشانی (پوش) غیر ایستا در سری زمانی تصادفی ایستا؛
۲. تغییر محتوای بسامدی در شتاب‌نگاشت زلزله به صورت تابعی از زمان؛
۳. اعمال تغییر فاز زمانی به منبع ساده زلزله، برای اینکه منبع ساده زلزله با موج S و تابش P به تنهایی الگو شود؛
۴. عبور دادن اغتشاش سفید گوسی از یک سامانه برای ایجاد حالت غیر ایستا در برخی از مراحل شبیه سازی؛
۵. ترکیب موج‌های سینوسی میرا شده.

مفهوم آشفتگی تقریبی توسط پینکاس<sup>۳</sup> (۱۹۹۱) در قالب مقالاتی معرفی گردید. در این روش یک آمار عددی را به عنوان معیاری برای تعیین تصادفی بودن دنباله‌ای از اعداد، در

1. Discrete Cosine Transform.  
2. Approximate Entropy.  
3. Pincus.

که مدت زمان وقوع آنها یکسان می‌باشد برای یک منطقه خاص وجود دارد که در زیر آرایه ورودی این مجموعه شتاب‌نگاشت‌ها نشان داده شده است.

$$\text{Input Acceleration Matrix} = \begin{bmatrix} a_1^1 & a_1^2 & a_1^3 & a_1^n \\ a_2^1 & a_2^2 & a_2^3 & a_2^n \\ a_3^1 & a_3^2 & a_3^3 & a_3^n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_r^1 & a_r^2 & a_r^3 & a_r^n \end{bmatrix} \quad (1) \text{ آرایه شتاب ورودی}$$

از تحلیل اجزای اصلی (PCA) آرایه شتاب‌نگاشت ورودی به آرایه کاهش یافته با  $r$  درایه برای هر نگاشت تبدیل می‌شود که در زیر آرایه خروجی حاصل از این تحلیل ارائه شده است.

$$\text{Output PCA Acceleration Matrix} = \begin{bmatrix} a_1^1 & a_1^2 & a_1^3 & a_1^n \\ a_2^1 & a_2^2 & a_2^3 & a_2^n \\ a_3^1 & a_3^2 & a_3^3 & a_3^n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_r^1 & a_r^2 & a_r^3 & a_r^n \end{bmatrix} \quad (2) \text{ آرایه شتاب خروجی بر اساس PCA}$$

مصنوعی تولید شود که خصوصیات شتاب‌نگاشت  $i$  را در بر داشته باشد و طیف پاسخ این شتاب‌نگاشت تولیدشده با طیف پاسخ شتاب‌نگاشت  $\dot{A}_m$  همخوانی داشته باشد. همان‌گونه که پیش‌تر توضیح داده شد، هر دنباله متشکل از یک رشته از اعداد، دارای یک بی‌نظمی می‌باشد که با استفاده از آشفتگی تقریبی میزان این بی‌نظمی به دست می‌آید که هر چه مقدار آشفتگی تقریبی ( $ApEn$ ) به صفر نزدیک‌تر باشد دنباله مورد بررسی منظم‌تر می‌باشد. حال فرض کنید که شتاب‌نگاشت  $\dot{A}_m$  در این مرحله همان دنباله مورد بررسی می‌باشد که دارای یک بی‌نظمی می‌باشد، فرض بر این است که با توجه به تعریف تحلیل PCA که درایه‌ها وابستگی به هم ندارند می‌توان برای شتاب‌نگاشت  $\dot{A}_m$  با استفاده از آشفتگی تقریبی حالت‌هایی را از بین تمامی جایگشت‌های ممکن برای این شتاب‌نگاشت به دست آورد که بی‌نظمی آنها در محدوده بی‌نظمی قابل قبول قرار گیرد که در شکل (۱) به صورت طرح کلی و نموداری نشان داده شده است.

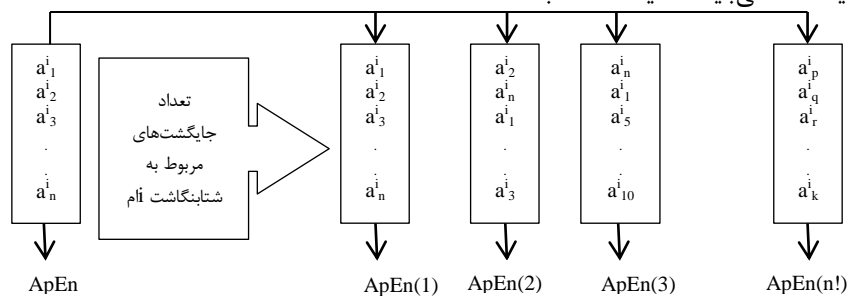
سودمند است. در این وضعیت نیز ابعاد بردار ورودی، کاهش داده شود. یک رویه مناسب برای این عمل استفاده از تحلیل اجزای اصلی است. فرض کنید که یک مجموعه شتاب‌نگاشت

همان‌طور که از آرایه ورودی مشخص است، آرایه ورودی دارای  $n$  شتاب‌نگاشت که هر شتاب‌نگاشت دارای  $R$  مؤلفه می‌باشد، هم‌چنین تمامی این شتاب‌نگاشت‌ها دارای مدت زمان یکسان می‌باشند. پس از انتخاب آرایه ورودی، با استفاده

آرایه شتاب کاهش‌یافته با استفاده از تحلیل PCA دارای ابعاد خیلی کمتری نسبت به آرایه واقعی شتاب می‌باشد به طوری که  $R > r$ .

این عمل سه تأثیر سودمند خواهد داشت که باعث متعامدسازی اجزای بردار ورودی - که در این صورت، آنها هیچ وابستگی با یکدیگر ندارند - و هم‌چنین مرتب‌سازی اجزای متعامد (اصلی) خواهد شد و مؤثرترین آنها را در اولین اولویت قرار می‌دهد و در نتیجه می‌توان اجزایی که تغییرات کوچکتری در مجموعه داده‌ها ایجاد می‌کنند را حذف کرد. در نتیجه یک آرایه شتاب کاهش‌یافته وجود خواهد داشت که اجزای آن وابستگی خاصی به هم ندارند.

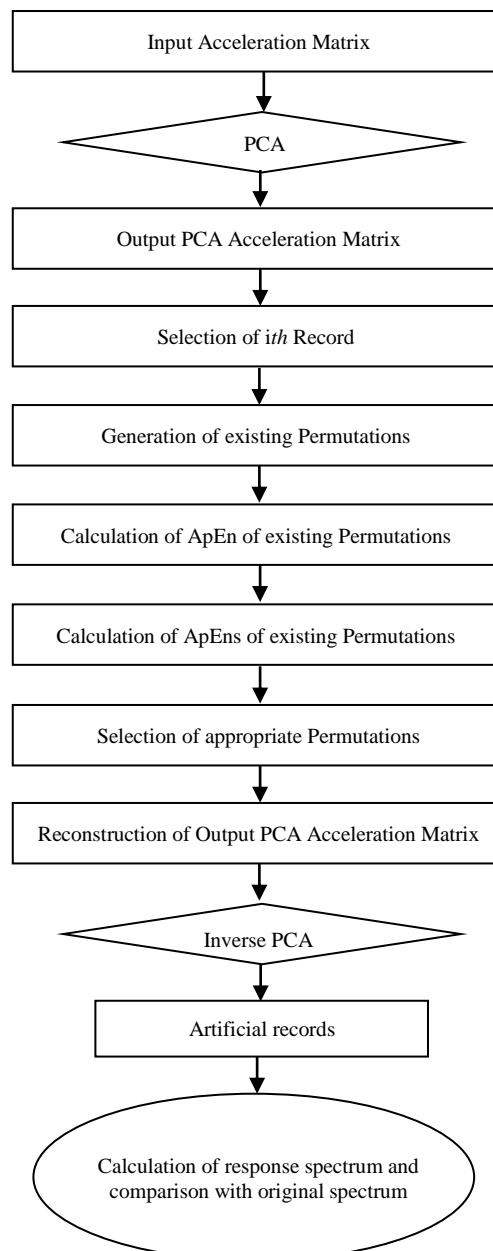
با فرض وجود فضایی از داده‌ها که این فضا دارای طیف پاسخ منحصر به فردی می‌باشد در صورتی که با تغییر در نحوه آرایش این فضا برای هر شتاب‌نگاشت می‌توان با تبدیل معکوس اجزای اصلی به یک شتاب‌نگاشت جدید دست یافت. فرض کنید که برای یک شتاب‌نگاشت  $i$  از  $n$  مجموعه شتاب‌نگاشت کاهش یافته، می‌بایست یک شتاب‌نگاشت



شکل (۱): شکل مربوط به تعداد جایگشت‌های تپ زلزله  $\dot{A}_m$

در نهایت بر اساس همخوانی بین آشفتگی تقریبی و تعداد جایگشت‌های تولیدشده با آشفتگی موج  $\lambda_m$ ، تعداد جایگشت‌هایی که محدوده آشفتگی آنها نزدیک آشفتگی شتاب‌نگاشت  $\lambda_m$  می‌باشد، به عنوان شتاب‌نگاشت کاهش یافته انتخاب شده و در نهایت به جای شتاب‌نگاشت  $\lambda_m$  در آرایه خروجی کاهش یافته قرار گرفته و با استفاده از معکوس تحلیل اجزای اصلی با حفظ خصوصیات شتاب‌نگاشت‌ها، اقدام

به تولید نگاشت‌های مصنوعی جدید می‌شود که طیف پاسخ آن تطابق خوبی با طیف پاسخ نگاشت  $\lambda_m$  دارد. در شکل (۲) الگوریتم کلی این روش ارائه شده است. مزیت روش پیشنهادی بدین صورت است که نیاز به جمع‌آوری زیاد نگاشته‌ها و تاریخچه‌های واقعی زلزله نمی‌باشد و با حداقل نگاشته‌ها می‌توان اقدام به تولید مقدار مورد ثبت مصنوعی کرد.



شکل (۲): الگوریتم کلی روش آشفتگی تقریبی



### – ریاضیات زمینه

برای آشفتگی تقریبی تعاریف متفاوتی وجود دارد، اما تعریف کلی آشفتگی تقریبی به صورت زیر است:  
 عدد مثبت  $N$  و  $m$  را در نظر بگیرید که  $m \leq N$  و  $r$  عددی حقیقی و مثبت است، فرض کنید دنباله‌ای از اعداد حقیقی  $x(i) = (u(i), u(i+1), \dots, u(i+m-1))$  که به صورت  $u := (u(1), u(2), \dots, u(N))$  به طوری که برای دو قطعه  $x(i)$  و  $x(j)$  که  $x(i) = (u(i), u(i+1), \dots, u(i+m-1))$  است، فاصله به شکل زیر بیان می‌شود:

$$d(x(i), x(j)) = \max_{p=1,2,\dots,m} |u(i+p-1) - u(j+p-1)| \quad (3)$$

$$C_{im}(r) = (\#(j = N - m + 1, d(x(i), x(j)) = r)) / (N - m + 1) \quad (4)$$

$$\Phi_m(r) = \frac{1}{N - M + 1} \sum_{i=1}^{N-m+1} \log C_i^m(r) \quad (5)$$

و همچنین:

$$ApEn(m, r, N)(u) = \Phi_m(r) - \Phi_{m+1}(r), m \geq 1 \quad (6)$$

$$ApEn(0, r, N)(u) = -\Phi_1(r) \quad (7)$$

می‌توان  $\frac{n!}{(n-2)! \times 2}$  هم‌وردایی<sup>۱</sup> متفاوت را محاسبه کرد. یک روش سودمند برای به دست آوردن هم‌وردایی بین همه ابعاد این است که آنها را محاسبه کرده و در یک آرایه قرار داد. بنا براین آرایه هم‌وردایی برای یک مجموعه از داده‌ها با  $n$  بعد به صورت زیر است:

$$C^{n \times n} = (c_{i,j}; c_{i,j} = \text{cov}(Dim_i, Dim_j)) \quad (10)$$

که  $C_{n \times n}$  یک آرایه با  $n$  سطر و  $n$  ستون و بعد  $X$  است. برای یک مجموعه اطلاعات  $n$  بعدی آرایه مربعی خواهد بود. و هر عنصر آرایه، نتیجه‌ای از محاسبه هم‌وردایی بین دو بعد جداست.

### تولید شتاب‌نگاشت مصنوعی با استفاده از تحلیل اجزای اصلی و آشفتگی تقریبی

در این بخش با استفاده از روش پیشنهادی که توضیح داده شده است، اقدام به تولید نگاشت مصنوعی خواهد شد. در این پژوهش از ۵ نگاشته زلزله با مدت زمان ۳۰ ثانیه که بر روی بستر سنگی ثبت شده‌اند، استفاده شده است. همه نگاشته‌ها در فاصله زمانی مجزا ۰/۰۲ ثانیه جمع‌آوری شده‌اند. که در شکل (۳) نمودار این شتاب‌نگاشت‌ها نشان داده شده است.

در گام اول، مقادیر شتاب برای نگاشته مورد نظر به صورت یک آرایه  $n \times 1$  ایجاد می‌گردد. در گام بعدی بر روی آرایه مورد نظر تحلیل PCA انجام می‌گردد. در گام بعدی بر روی نگاشته کاهش یافته آشفتگی تقریبی اعمال خواهد شد و با توجه به نتایج حاصل، تحلیل معکوس PCA بر روی نگاشته‌های کاهش یافته تقریبی انجام خواهد شد تا در نهایت به نگاشت مصنوعی مورد نظر حاصل گردد. پس از تولید شتاب‌نگاشت مصنوعی تولید شده طیف حاصل از آن با طیف نگاشت اصلی مقایسه خواهد شد.

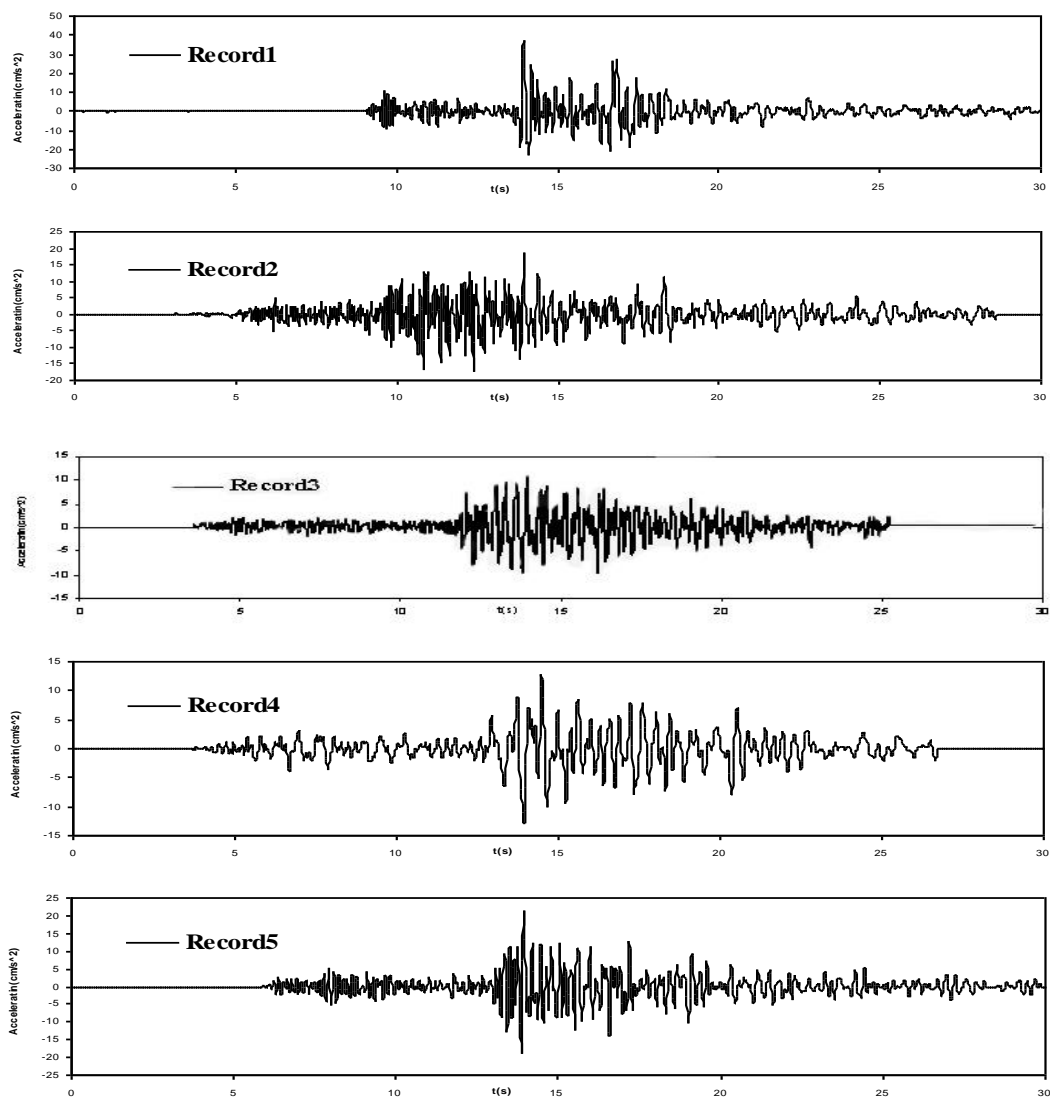
که در آن  $ApEn(m, r, N)(u)$ ، لگاریتم فراوانی نسبی برای قطعه‌های به اندازه  $m$  را اندازه‌گیری می‌کند که در این قطعه‌ها، روابط گفته شده در بالا برقرار است، قطعه‌های با  $ApEn$  بالا، دارای بی‌نظمی بیشتر (نوسان بیشتر) در دنباله هستند.

به عنوان مثال، مسئله چاپلین را در نظر بگیرید، در این مسئله دو دنباله به طول  $N = 20$  آورده شده است، که دنباله (A) با توجه به تکرار  $\{0, 1\}$ ، بیانگر نوعی الگو در دنباله است، اما دنباله (B) به نظر می‌رسد تصادفی باشد:

$$01010101010101010101 \quad (A) \quad (8)$$

$$01101100110111100010 \quad (B) \quad (9)$$

هر کدام از دنباله‌های (A) و (B) که پیشامدهایی با احتمال  $2^{-20}$  هستند را در نظر بگیرید و هم‌چنین فرض کنید  $m=2$ ، یعنی قطعه‌های دوتایی، برای دنباله (A) تقریباً  $ApEn(1, 20) = 0$  می‌باشد در حالی که برای دنباله (B)،  $ApEn(1, 20) = 0.6774$  عبارت  $ApEn(1, 20) = 0$  برای این مسئله نشان می‌دهد، قطعه‌های  $\{0, 0\}$  و  $\{1, 1\}$  در دنباله A وجود ندارد برای یک مجموعه اطلاعات  $n$  بعدی



شکل (۳): نگاشته‌های ورودی به تحلیل اجزای اصلی

پس از اعمال آرایه ورودی شتاب به الگوریتم پیشنهادی، داده که در جدول (۱) آرایه خروجی حاصل از تحلیل اجزای تحلیل اجزای اصلی تمامی شتاب‌ها را کاهش داده و ابعاد اصلی ارائه شده است. آرایه ورودی که ۱۵۰۱ در ۵ می‌باشد را به ۵ در ۵ کاهش

جدول (۱): آرایه خروجی حاصل از تحلیل اجزای اصلی

PCA-Acc1	PCA-Acc2	PCA-Acc3	PCA-Acc4	PCA-Acc5
-169.1157172	-33.01631683	-4.848468528	17.60000161	-40.17430326
-31.23791067	114.581679	-2.488178779	1.859231425	38.44604279
14.34954462	39.14132731	3.979032865	-24.0197544	-103.5755592
-11.71817275	-6.94680713	11.59181363	-85.73431703	16.07891709
-1.214556607	0.766799854	65.65302793	9.081405398	0.537652501

فرض کنید هدف تعیین نگارش مصنوعی برای زلزله ۱ می‌باشد، که در بین نگاشته‌های موجود در تحلیل اجزای اصلی است. با توجه به این نکته که تعداد درایه‌های موجود در شتاب‌نگاشت ۱ پس از کاهش به ۵ درایه تقلیل یافته است؛ لذا تعداد جایگشت‌های مورد نیاز برای این شتاب‌نگاشت برابر ۵! خواهد بود. در نتیجه با استفاده از

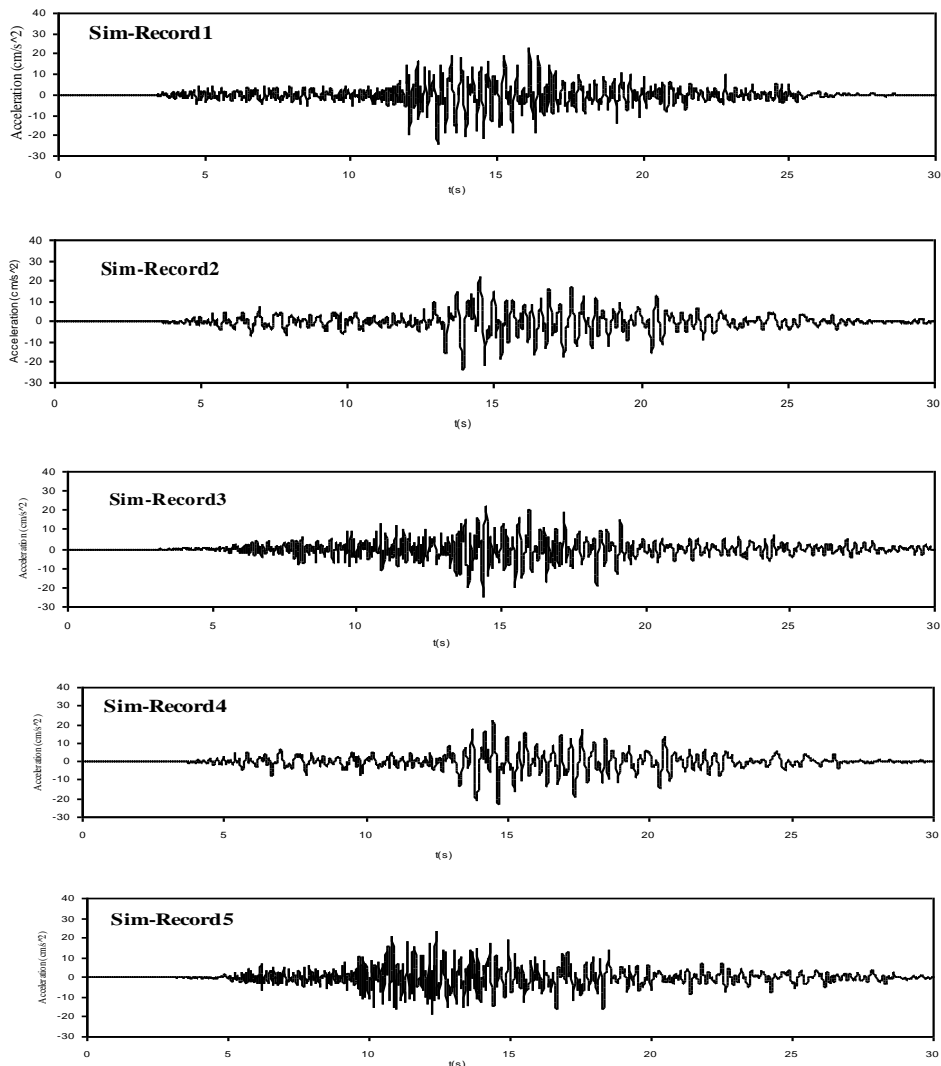
آشفتگی تقریبی برای تمامی این جایگشت‌ها مقدار آشفتگی محاسبه شده و برای مثال از بین این جایگشت‌ها جایگشتی انتخاب می‌شود که مقدار بی‌نظمی آن شبیه زلزله ۱ باشد. جایگشت‌های زیر به عنوان نمونه انتخاب شده‌اند که هر کدام

جدول (۲): جایگشت‌های مورد نظر به منظور تولید نگاشته مصنوعی

Perm1	Perm2	Perm3	Perm4	Perm5
-1.21456	-11.7182	-1.21456	-11.7182	-1.21456
-31.2379	14.34954	-31.2379	-169.116	-31.2379
-11.7182	-31.2379	-169.116	-31.2379	-11.7182
14.34954	-169.116	-11.7182	-1.21456	-169.116
-169.116	-1.21456	14.34954	14.34954	14.34954

در نتیجه پس از جایگذاری این جایگشت‌ها در آرایه خروجی به جای شتاب‌نگاشت ۱، تحلیل معکوس اجزای اصلی انجام شده و شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی متناسب با شتاب‌نگاشت

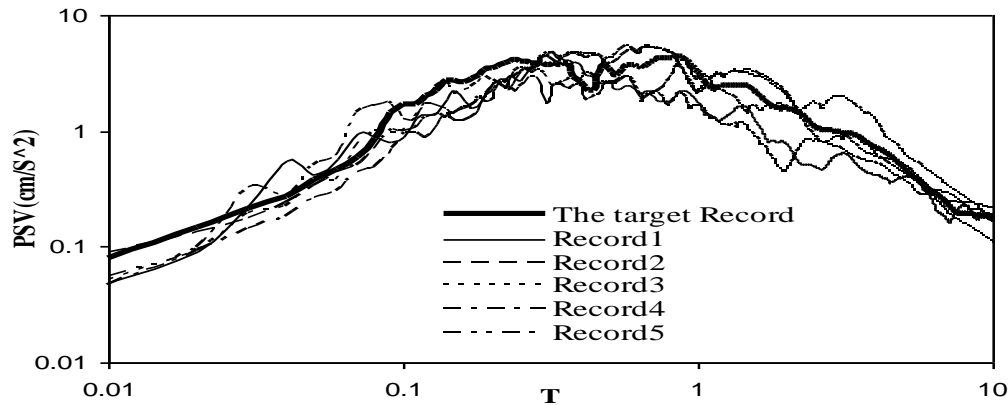
زلزله ۱ با حفظ خصوصیات آرایه تبدیل، تولید می‌شوند که در شکل (۴) زلزله‌های مصنوعی تولیدشده توسط این روش ارائه شده است.



شکل (۴): نگاشته‌های مصنوعی تولیدشده

شده است. همان طور که از شکل (۵) مشخص است طیف پاسخ زلزله‌های مصنوعی تولید شده با طیف پاسخ نگارش مورد نظر تطابق قابل قبول و مناسبی دارد.

هم‌چنین به منظور کنترل و صحت روش پیشنهادی، تمامی طیف‌های پاسخ زلزله‌های مصنوعی تولید شده با طیف پاسخ زلزله مورد نظر مقایسه شده‌اند که در شکل زیر نشان داده



شکل (۵): مقایسه بین طیف پاسخ نگاشته مورد نظر با طیف پاسخ نگاشته‌های مصنوعی

نتایج خوب و قابل قبولی را ارائه دهند. ناآگاهی کامل از مقدار تراز موجک، خود یک ضعف اساسی در استفاده از این روش‌ها می‌باشد و هم‌چنین از طرفی دیگر، مناسب بودن این تراز که برای آموزش شبکه‌ها استفاده شده است بایسته بررسی است. افزون بر این، نکته مهم دیگر اینکه، در روش شبکه‌های عصبی می‌بایست با تعداد لایه‌های پنهان، آزمون و خطا کرد تا تعداد مناسب لایه‌های پنهان مشخص شود که این خود باعث افزایش زمان در محاسبات می‌گردد.

در روش پیشنهادی هم میزان نامنظمی نگاشته‌ها بررسی شده و هم کاهش زمان اجرای الگوریتم، در مدت زمان کمتری برای تولید شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی حاصل شده است. هم‌چنین با توجه به مقایسه طیف پاسخ نگاشته اصلی با طیف‌های پاسخ حاصل از نگاشته‌های مصنوعی، مشخص است که این طیف‌ها تطابق کاملاً نزدیکی به هم دارند.

#### تشکر و قدردانی

پژوهش حاضر، از نتایج طرح پژوهشی مصوب دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شرق به‌دست آمده است که در اینجا بایسته است از حمایت‌های معاونت محترم پژوهشی آن واحد تشکر و قدردانی می‌شود.

#### مراجع

1. Boat Wright, J., 1982, 'A Dynamic Model for Far-field Accelerations', Bulletin of the Seismological Society of America, 72:3, 1049-1068.
2. Boore, D. M., 1983, "Stochastic simulation of

#### نتیجه‌گیری

در این پژوهش تلاش در ارائه روش‌های کارا و سودمند در راستای بررسی و تولید ارتعاش مصنوعی با توجه به نیاز مهندسان، برپایه توانمندی تحلیل اجزای اصلی و آشفتگی تقریبی اقدام شده است. در پژوهش‌های پیشین، آموزش شبکه‌ها بین نگاشته‌های زلزله و طیف پاسخ زلزله توسط پژوهشگران انجام می‌گرفته است. این روش‌ها زمان زیادی را برای آموزش شبکه‌ها به خود اختصاص می‌دهد و آموزش این نوع شبکه‌ها، وقت‌گیر و پرهزینه بوده است. روش‌های گذشته که مبتنی بر یادگیری با استفاده از شبکه‌های عصبی بوده است، طیف‌های پاسخ به عنوان مؤلفه‌های ورودی و نگارش‌های زلزله و یا ضرایب موجک مربوط به آن نگاشته‌ها به عنوان مؤلفه‌های خروجی بوده‌اند. در مواردی که مؤلفه‌های ورودی، طیف‌های پاسخ و مؤلفه‌های خروجی، نگارش‌های زلزله می‌باشند بایستی به منظور آموزش شبکه‌ها یک رشته ساده سازی، مانند تعیین تعداد لایه‌های پنهان و تجزیه امواج در حین آموزش انجام گیرد تا از سویی، شبکه‌های عصبی بتوانند خوب آموزش ببینند و از طرفی زمانی که مؤلفه‌های خروجی این شبکه‌ها، ضرایب موجک می‌باشند بایستی برای آموزش شبکه‌های عصبی نوع تراز که ضرایب موجک در آن تراز به‌دست می‌آیند نیز مشخص شود تا شبکه‌های عصبی برای آن تراز آموزش ببینند و این نکته مهم و ضروری می‌باشد که شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده تا چه تراز ویولتی باید تجزیه شوند تا شبکه‌های عصبی خوب آموزش ببینند و

- a Measure of System Complexity' Proc. Natl. Acad. Sci, 88: 2297-2301.
15. Pincus, S.M., and R. E. Kalman, 1997, 'Not All Possibly 'Random' Sequences Are Created Equal', Proceedings of the National Academy of Sciences USA, 94: 3513-3518.
  16. Rezaeian, S. and Der Kiureghian, A., 2010, 'Simulation of synthetic ground motions for specified earthquake and site characteristics', Earthquake Engineering and Structural Dynamics.39:1155-1180.
  17. Sabetta, F. and Pugliese, A., 1996, 'Estimation of Response Spectra and Simulation of Nonstationary Earthquake ground Motions', Bulletin of the Seismological Society of America, 86:2, 337-352.
  18. Saragoni. G.R. and G.C. Hart., 1974, 'Simulation of Artificial Earthquakes'. Earthquake Engineering and Structural Dynamics Journal. 2:249 - 268.
  19. Scanlan, R. H. and Sachs, K., 1974, 'Earthquake time Histories and Response Spectra', Engineering Mechanics Division, ASCE, 100:EM4, 635-655.
  20. Silva, W. J., 1991, 'Global characteristics and Site Geometry', proceeding: NSF/EPRI Workshop on Dynamic Soil Properties and Site Characterization. Electric Power Research Institute, EPRI NP-7337.
  21. Somerville, P. G., Sen, M. K. and Cohee, B. P., 1991, 'Simulation of Strong Ground Motions Recorded During the 1985 Michoacan. Mexico and Valparaiso, Chile Earthquakes', Bulletin of the Seismological Society of America, 81:1-27.
  22. Spanos, P. D. and Mignolet, M. P., 1990, 'Simulation of Stationary Random Processes: Two Stage MA to ARMA Approach', Engineering Mechanics Division, ASCE, 116:3, 620-641.
  23. Tsai, N. C., 1972, 'Spectrum-Compatible Motions for Design Purposes', Engineering Mechanics Division, ASCE, 98:EM2, 345-356.
  24. Wennerberg, L., 1990, 'Stochastic Simulation of empirical Green's functions', Bulletin of the Seismological Society of America, 80:1418-1432.
  25. Wong, H. L. and Trifunac, M. D., 1979, 'Generation of Artificial Strong Motion Accelerograms', Earthquake Engineering and Structural Dynamic, 7:6, 509-527.
  - high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra", Bulletin of the Seismological Society of America, 73:1865-1894.
  3. Ghodrati Amiri, G., Ashtari, P., Rahami, H., 2006, 'New Development of Artificial Record Generation by Wavelet Theory', Structural Engineering and Mechanics, 22:2,185-195.
  4. Ghodrati Amiri, G., Bagheri, A., Fadavi, M., 2007, 'New Method for Generation of Artificial Ground Motion by a Non stationary Kanai-Tajimi Model and Wavelet Transform', Structural Engineering and Mechanics, 26:6, 709 -723.
  5. Goodman, L,E, Rosenblueth E.,and N.M Neumark, 1955, "A seismic Design of Elastic Structures",Trans.ASCE,Vol. 120 ,P 782-792.
  6. Hadley, D.M., D.V. Helmberger, and J.A.Orcutt, 1982, 'Peak acceleration scaling studies', Bulletin of the Seismological Society of America, 72: 959-979.
  7. Hanks, T. C. and McGuire, R. K., 1981, 'The Character of High-Frequency Strong Ground Motion', Bulletin of the Seismological Society of America, 71:6, 2071-2095.
  8. Hartzell, S. H., 1998, 'Earthquake Aftershocks as Green's Functions', Geophys. res. Lett, 5:1-4.
  9. Huchings, L., 1994, 'Kinematic Earthquake Models and Synthesized Ground Motion Using Empirical Green's Function', Bulletin of the Seismological Society of America, 84:4, 1028-1050.
  10. Iyengar, R.N. and Rao, P.N., 1979, 'Generation of spectrum compatible accelerograms', Earthquake Engineering and Structural Dynamic, 7:253-263.
  11. Joyner, W. B. and Boore, D. M., 1981, 'Peak Horizontal Acceleration and Velocity from Strong Motion Records Including Records from the 1997 Imperial Valley, California, Earthquake', Bulletin of the Seismological Society of America, 71:6, 2011-2038.
  12. Kaul, M. K., 1978, 'Spectrum- Consistent Time- History Generation', Engineering Mechanics Division, ASCE, 104: EM4, 781-788.
  13. Kimura, M. and Izumi, M., 1989, 'A Method of Artificial Generation of Earthquake Ground Motion', Earthquake Engineering and Structural Dynamic, 18:867-874.
  14. Pincus S.M., 1991, 'Approximate Entropy as