

روشی نوین برای تولید شتاب‌نگاشت مصنوعی زلزله با استفاده از تبدیل ویولت پاکت و شبکه‌های عصبی رگرسیون تعمیم‌یافته

غلامرضا قدرتی‌امیری (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

آزینا اسعدی (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه یزد

عبداله باقری (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه پترزبورگ آمریکا

برای طرح سازه‌های مقاوم در مقابل زلزله، یکی از مسائل و موارد مهم تحلیل دینامیکی این سازه‌ها براساس طیف طرح یا روش تاریخچه زمانی است. با توجه به استفاده‌ی روزافزون از تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی برای محاسبه‌ی پاسخ سازه‌ها، تولید شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی مناسب به‌علت کمبود رکوردهای ثبت‌شده‌ی زلزله و نیز محدودیت و اشکالات موجود در آن‌ها، امروزه امری ضروری به نظر می‌رسد. در این نوشتار با استفاده از توانایی یادگیری شبکه‌ی عصبی و همچنین با استفاده از تحلیل ویولت به‌همراه الگوریتم بهترین پایه، روشی برای تولید شتاب‌نگاشت مصنوعی زلزله ارائه شده است. در روش پیشنهادی با استفاده از شبکه‌ی عصبی رگرسیون تعمیم‌یافته (GRNN) اقدام به ساخت شبکه‌ی شده که ورودی آن طیف پاسخ شبه سرعت، و خروجی آن ضرایب ویولت پاکت بهترین پایه‌ی شتاب‌نگاشت متناظر با آن است. در این مدل با آموزش شبکه‌ی شتاب‌نگاشت‌های ثبت‌شده در ایران و طیف پاسخ آن‌ها به کمک الگوریتم معرفی‌شده به روش معکوس با ارائه‌ی طیف پاسخ یا طیف طرح به شتاب‌نگاشت متناظر با آن دسترسی خواهیم یافت.

واژگان کلیدی: شتاب‌نگاشت مصنوعی، طیف هدف، تبدیل ویولت پاکت، الگوریتم بهترین پایه، شبکه‌ی GRNN.

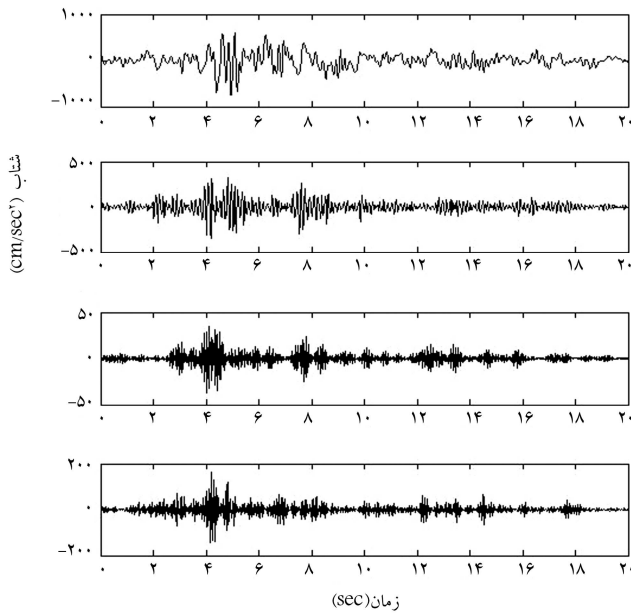
۱. مقدمه

رکوردی در مناطق دیگر بسیار اندک است، استفاده از چنین نگاشت‌هایی در مناطق مختلف مناسب نیست. با توجه به کمبود رکوردهای ثبت‌شده‌ی زلزله در مناطق مختلف ایران، و ضرورت متناسب بودن شتاب‌نگاشت انتخابی با شرایط ساختگاه از نظر محتوای فرکانسی و طیف پاسخ و مدت زمان زلزله، لازم است رکوردهای مصنوعی نیز از این طیف طرح ساختگاه تبعیت کنند.

با توجه به سازوکار پیچیده‌ی تولید امواج لرزه‌یی و نحوه‌ی توزیع آن قبل از رسیدن به ایستگاه مورد نظر، بررسی وابسته به زمان می‌تواند برای ساخت شتاب‌نگاشت مصنوعی مناسب باشد. تا به حال روش‌های مختلفی برای تولید رکوردهای مصنوعی زلزله ارائه شده که هرکدام برگرفته از الگویی خاص است. در این زمینه تبدیل فوری یکی از مهم‌ترین و گسترده‌ترین کاربردها را دارد. در سال‌های گذشته کوشش‌های بسیاری نیز برای استفاده از روش تحلیل ویولت (موجک ضربه‌یی) در مدل‌های مبتنی بر زمان و تبدیل هیلبرت - هوانگ انجام شده، و نیز پژوهش‌گران زیادی از شبکه‌ی عصبی مصنوعی در این مورد بهره‌گرفته‌اند. یادآور می‌شود که درخصوص استفاده از

یکی از اشکالات عمده‌ی روش طیف پاسخ برای تحلیل و طراحی سازه‌ها، ناتوانی آن از تأمین اطلاعات زمانی درمورد پاسخ و رفتار سازه است. در بسیاری از موارد، این‌نامه‌های طراحی تحلیل دینامیکی را در مواردی خاص -- همچون عدم تقارن در پلان، عدم توزیع یکنواخت جرم و سختی در ارتفاع و غیره -- برای سازه‌های خاص لازم دانسته‌اند. در طراحی سازه‌های مهم (از قبیل نیروگاه‌های برق هسته‌یی، سدها، سازه‌های بلند، پل‌های کابلی و غیره) معمولاً طرح نهایی براساس تحلیل کامل تاریخچه زمانی تهیه می‌شود. به همین دلیل، و به‌علت عدم وجود شتاب‌نگاشت‌های مناسب و کافی و کمبود اطلاعات از یک سو و مزایای استفاده از تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی از سوی دیگر، تهیه‌ی یک سری شتاب‌نگاشت مصنوعی در بسیاری از موارد ضروری است. همچنین باتوجه به این که شتاب‌نگاشت‌های ثبت‌شده در هر منطقه دربرگیرنده‌ی شرایط لرزه‌خیزی همان منطقه است و احتمال تکرار چنین

تاریخ: دریافت ۱۳۸۸/۴/۲۷، اصلاحیه ۱۳۸۸/۹/۲۹، پذیرش ۱۳۸۸/۱۲/۱۰.



شکل ۳. تجزیه‌ی شتاب‌نگاشت زلزله‌ی بم با استفاده از تبدیل ویولت پاکت.

ویولت پاکت سیگنال $x(t)$ از طریق ضرب داخلی سیگنال با هر تابع ویولت پاکت، مطابق عبارت ۷ به دست می‌آید:

$$c_j^i(k) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{j,k}^i(t) dt \quad (7)$$

که در آن $c_j^i(k)$ نشان‌دهنده‌ی i امین سری از ضرایب تجزیه ویولت پاکت در زمین پارامتر مقیاس و k امین پارامتر جابه‌جایی است. محتوی ویولت پاکت سیگنال $x_j^i(t)$ را می‌توان به وسیله‌ی یک ترکیب خطی از ضرایب تابع ویولت پاکت $\psi_{j,k}^i$ به صورت زیر نمایش داد:

$$x_j^i(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_j^i(k) \psi_{j,k}^i(t) \quad (8)$$

که پس از j بار تجزیه، سیگنال اصلی $x(t)$ به صورت عبارت ۹ قابل نمایش است:

$$x(t) = \sum_{i=1}^{2^j} x_j^i(t) \quad (9)$$

برای مثال در شکل ۳، تجزیه شتاب‌نگاشت زلزله‌ی بم با استفاده از تبدیل ویولت پاکت نشان داده شده است.

۲.۳. الگوریتم بهترین پایه

هر دو روش تحلیل فوریه و تحلیل ویولت دارای محدودیت‌هایی هستند. روش تحلیل فوریه نتایج خوبی برای سیگنال‌های متناوب روش‌مند دارد، و تحلیل ویولت برای سیگنال‌های غیرایستا که قله‌های ناگهانی و ناپیوسته به همراه دارد مناسب است. بررسی‌های دیگری نیز انجام شده است و الگوریتم‌های بسیاری با توابع تحلیلی تهیه شده است.^[۱۳] این روش‌ها شامل الگوریتم بهترین پایه و روش دنباله‌ی تطبیقی است. الگوریتم بررسی بهترین پایه از ویولت پاکت‌ها استفاده می‌کند.

برای مثال در آنالیز ویولت پاکت این امکان وجود دارد که سیگنال S مطابق عبارت زیر بازسازی شود.

$$S = A(1) + A(6) + D(6) + D(3) \quad (1)$$

این یکی از نمونه‌های تجزیه سیگنال با این روش می‌باشد که در روش ویولت معمول ممکن نیست.

انتخاب یکی از این اطلاعات کدگذاری شده مسئله‌ی جالب توجه در این روش است. در ویولت پاکت از فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر برای بازسازی کامل استفاده می‌شود. در حقیقت ویولت پاکت‌ها ترکیبات خطی ویژه یا انطباقی از ویولت‌ها هستند و این مدل‌ها همچون ویولت‌ها از خاصیت تعامد، همجواری و تمرکز برخوردارند. ضرایب در ترکیبات خطی با عامل یا الگوریتم بازگشتی محاسبه می‌شوند و در این روش پیچیدگی کم‌تری وجود دارد. تابع ویولت پاکت $(\psi_{j,k}^i(t))$ چنین تعریف می‌شود:

$$\psi_{j,k}^i(t) = 2^{-j/2} \psi^i(2^{-j}t - k) \quad (2)$$

که در آن j و k به ترتیب مقیاس و جابه‌جایی هستند. $i = 0, 1, \dots$ پارامترهای نوسان و $\psi^i(t)$ بدون زیرنویس به معنای $\psi_{j,k}^i(t)$ با $j = k = 0$ است. اولین دو تابع ویولت پاکت برای $(i = 0, 1, j = k = 0)$ نیز تابع مقیاس $\varphi(t)$ و تابع ویولت مادر $\psi(t)$ به شکل رابطه‌ی ۳ خوانده می‌شوند:

$$\psi^0(t) = \varphi(t), \quad \varphi^1(t) = \psi(t) \quad (3)$$

توابع دیگر ویولت پاکت برای مقیاس $i = 2, 3, \dots$ به صورت روابط ۴ تعریف می‌شوند:

$$\begin{aligned} \varphi^{2i}(t) &= \sum_k h(k) \psi_{j,k}^i(t), \\ \psi^{2i+1}(t) &= \sum_k (-1)^k h(-k+1) \psi_{j,k}^i(t) \end{aligned} \quad (4)$$

و بنابراین خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \varphi^{2i}(t) &= \sqrt{2} \sum_k h(k) \psi^i(2t - k), \\ \varphi^{2i+1}(t) &= \sqrt{2} \sum_k (-1)^k h(-k+1) \psi^i(2t - k) \end{aligned} \quad (5)$$

اگر

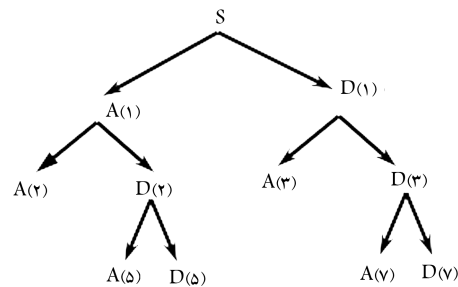
$$g(k) = \frac{1}{\sqrt{2}} \langle \psi(t), \psi(2t - k) \rangle = (-1)^k h(-k+1)$$

آنگاه عبارات فوق عبارت خواهند بود از:

$$\begin{aligned} \varphi^{2i}(t) &= \sqrt{2} \sum_k h(k) \psi^i(2t - k), \\ \varphi^{2i+1}(t) &= \sqrt{2} \sum_k g(k) \psi^i(2t - k) \end{aligned} \quad (6)$$

در این رابطه $h(k)$ فیلتر پایین‌گذر (مقیاس) و $g(k)$ فیلتر بالاگذر (ویولت) است. این دو فیلتر، $h(k)$ و $g(k)$ ، فیلترهای متعامد مزدوج خوانده می‌شوند.^[۱۳] ضرایب

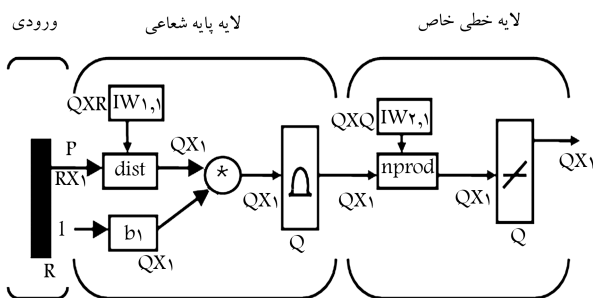
ناظر در آموزش‌اند. این شبکه‌ها معمولاً برای تقریب توابع به کار می‌روند، و حساسیت کم‌تری نسبت به مسائل با ورودی‌های غیرایستا دارند که به دلیل رفتار تابع با پایه‌ی شعاعی یکان پنهان آن است. این شبکه‌ها نیازی به آموزش مکرر ندارند. الگوریتم GRNN براساس نظریه‌ی رگرسیون غیر خطی بنا شده است. به‌جز روند آموزشی لایه‌ی دوم، بقیه‌ی نکات آن همچون روش RBF است. نمونه‌ی از ساختار شبکه‌ی GRNN در شکل ۵ به نمایش درآمده است.



شکل ۴. نمونه‌ی از یک درخت ویولت پاکت با روش بهترین پایه.

۵. روش پیشنهادی برای تولید شتاب‌نگاشت مصنوعی

با مروری بر پژوهش‌های انجام‌شده^[۱۲] که ایده‌ی اصلی روش عنوان‌شده در این پروژه نیز برگرفته از آن است، مشخص شده که روش مزبور را عمدتاً به‌علت عدم یک‌نواختی و پراکندگی در داده‌های مربوط به ایران، نمی‌توان برای این منطقی خاص به کار برد. اما از آنجا که چاره‌ی جز انتخاب این شتاب‌نگاشت‌ها نخواهیم داشت، باید به‌طریقی مسئله را حل کرد. از طرفی با توجه به موارد ذکرشده در قسمت‌های قبلی، تولید یک سری رکورد مصنوعی برای تحلیل دینامیکی سازه‌ها ضروری است. نکته‌ی قابل ذکر آن که در ایجاد این رکوردها هیچ‌گاه تضمینی بر صحت پیش‌بینی رکورد وجود ندارد، بلکه مهم آن است که این شتاب‌نگاشت‌ها اولاً به‌لحاظ شکلی ماهیتی شبیه به رکوردهای قبلی داشته باشند، ثانیاً در احتمال صحت نسبی چند پارامتر اساسی مرتبط با آن اطمینان بالایی داشته باشیم. این پارامترها، در واقع همان داده‌های اولیه‌ی تولید رکوردهای مصنوعی محسوب می‌شوند. مواردی چون شتاب بیشینه، مدت زمان تداوم و محتوای فرکانسی از مهم‌ترین این عوامل به شمار می‌آید. در این پژوهش روشی جدید برای ساخت شتاب‌نگاشت مصنوعی زلزله‌ها ارائه شده است که ترکیبی مناسب از شبکه‌ی عصبی و ویولت پاکت‌ها با الگوریتم بهترین پایه است. در این روش به‌جای استفاده از تبدیل فوری به سریع از تبدیل ویولت پاکت استفاده شده است. این بدان معناست که در حقیقت هر گره در تجزیه‌ی سیگنال مورد بررسی کیفی قرار گرفته و میزان اطلاعات موجود در آن بررسی می‌شود. با توجه به این که هدف این پژوهش طراحی شبکه‌ی به‌منظور تولید رکوردهای مورد نظر برای داده‌های مربوط به ایران است، مهم‌ترین مسئله‌ی موجود در این زمینه همان موردی است که عموم شبکه‌ها نسبت به آن حساس‌اند: کمبود رکوردهای مناسب آموزشی. از طرفی رکوردهای مختلفی از سال‌های گذشته در مراکز مختلف ایران ثبت و اصلاح شده‌اند. استفاده از این شتاب‌نگاشت‌ها به‌منظور آموزش امری مناسب نیست، چرا که رکوردهای انتخابی وابستگی ویژگی‌های یک زلزله‌ی نسبتاً قوی و قابل توجه را در خود داشته باشند. بدیهی است در چنین شرایطی، انتخاب رکوردهایی که در ردیف زلزله‌های خفیف به‌شمار می‌آیند، تحلیل مناسبی به دست نمی‌دهد، زیرا در آن صورت سازه واکنش درخور توجهی نسبت به آن نخواهد



شکل ۵. یک نمونه از ساختار شبکه‌ی GRNN.

در روش الگوریتم پایه، سیگنال به‌صورت یک ترکیب خطی از اتم‌های زمان - فرکانس نشان داده می‌شود. اتم‌ها به‌وسیله‌ی بسط توابع تحلیلی به دست می‌آیند و در مجموعه‌ی با عنوان «ویولت پاکت» مرتب می‌شوند. اتم‌های ویولت پاکت امواج دارای اندیس زمان، مقیاس و فرکانس هستند. برای هر تابع تحلیل متعامد این امکان وجود دارد که گروهی از مجموعه‌ی ویولت پاکت‌های پایه برای آن ساخته شود.

الگوریتم بهترین پایه^[۱۲] با استفاده از معیار کم‌ترین آنروپی، مختصرترین توضیح را برای سیگنال موجود در یک گروه ارائه می‌دهد. روش بهترین پایه در مجموعه‌ی ویولت پاکت‌ها مترادف «فیلترکننده‌ی بهینه» برای سیگنال است. عملکرد بررسی بهترین پایه در ساختار ویولت پاکت مترادف تصفیه‌ی بهینه‌ی یک سیگنال است. برای هر سیگنال، الگوریتم بهترین پایه تصمیم می‌گیرد که کدام پایه سیگنال آن را به‌طور مؤثرتر نمایش می‌دهد. چنین الگوریتمی این امکان را فراهم می‌کند که در الگوریتم ویولت پاکت از مشخصه‌ی «بهترین درخت»، که تجزیه را هم کلی و هم نسبت به هر گره بهینه می‌کند، استفاده شود. نمونه‌ی از یک درخت ویولت پاکت با روش بهترین پایه در شکل ۴ نشان داده شده است.

۴. شبکه‌های عصبی مصنوعی

شبکه‌های عصبی مصنوعی که برگرفته از ساختار مغز انسان هستند، در سال‌های اخیر چه در بعد توسعه‌ی ساختاری و چه در بعد پیاده‌سازی سخت‌افزاری، از نظر کیفی و کمی و توانایی در حال رشد و پیشرفت‌اند. در هر مسئله‌ی، چنانچه نیاز به یادگیری یک نگاشت خطی یا غیر خطی مابین دو فضای خاص باشد، شبکه‌های عصبی مصنوعی (یا به‌اختصار شبکه‌های عصبی) می‌توانند به‌خوبی این تبدیل را به انجام رسانند. امروزه در بین انواع مختلف شبکه‌ها، شبکه‌های عصبی پیشرو (MLFF) یکی از پرکارترین آن‌ها محسوب می‌شود. نوع دیگری از شبکه‌ها، که نگاشتی از فضای ورودی به خروجی ایجاد می‌کنند، تحت عنوان شبکه‌های تابع پایه‌ی شعاعی (RBF) نام‌گذاری شده‌اند. در این پژوهش از نوع خاصی از این شبکه تحت عنوان شبکه‌های عصبی با قابلیت بازگشت فراگیر یا فرابازگشتی (GRNN) استفاده شده است. شبکه‌های یادشده همگی از آموزش تحت سرپرستی به‌منظور تعلیم استفاده می‌کنند؛ چرا که در همگی آن‌ها خروجی‌ها مقادیر معینی هستند.^[۱۵،۱۴]

۱.۴. شبکه‌های عصبی رگرسیون تعمیم یافته (GRNN)

شبکه‌های GRNN که به‌وسیله‌ی اسپچ (Specht) بسط داده شد، روش توابع پایه را استخراج می‌کند. شبکه‌های GRNN از سری شبکه‌های پیشرو با استفاده از

۲۰۴۸ نقطه است که مبتنی بر تعداد نقاط ضرایب وولت (نقاط تفکیک فرکانسی) است. نکته‌ی مهم در آموزش یک شبکه آن است که شبکه قادر باشد به‌ازای یک بردار ورودی که با آن آموزش ندیده، خروجی مرتبط با آن را ارائه کند. لذا چنان که ذکر شد در پروژه‌ی مورد نظر ما شبکه‌ی GRNN که نوع خاصی از شبکه‌ی RBF است به کار گرفته شده و نتیجه‌ی آن نیز رضایت‌بخش است. مهم‌ترین دلیل برای پاسخ مناسب چنین شبکه‌ی RBF آن است که شبکه‌ی RBF با چند فرض اولیه، رفتار تابعی معادل یک استنتاج‌گر فازی خواهند داشت. این مفروضات در عموم شبکه‌های RBF به کار گرفته می‌شود. قابلیت فوق به‌کارگیری روش‌های طراحی استنتاج‌گر فازی را برای طراحی اولیه‌ی شبکه‌ی RBF و نیز روش‌های آموزش RBF را برای تکمیل استنتاج‌گر فازی ممکن می‌سازد. بنابراین در این پروژه از نوعی استنتاج‌گر فازی برای رسیدن به جواب استفاده شده است.

با توجه به آن که هدف این پژوهش ساخت مدلی برای ایجاد شتاب‌نگاشت مصنوعی منطبق با طیف پاسخ خاصی بود، پس از به دست آوردن نتایج ذکرشده شبکه‌ی عصبی مصنوعی‌ی ساخته شد که ورودی آن طیف پاسخ و خروجی ضرایب وولت پاکت با الگوریتم بهترین پایه‌ی شتاب‌نگاشت متناظر با آن بود. مدل ارائه‌شده به دو صورت در شکل‌های ۶ و ۷ به نمایش درآمده است. یادآور می‌شود که نکته‌ی مهم در آموزش شبکه آن است که شبکه قادر باشد به‌ازای یک بردار ورودی که با آن آموزش ندیده، خروجی مرتبط با آن را ارائه کند. روش فوق پس از معرفی، با رکوردهای مختلفی کنترل شده است، به‌گونه‌ی که می‌توان صحت آن را در نتایج ارائه‌شده مشاهده کرد.

۶. کاربرد عددی

برای کاربرد روش مورد نظر در مجموع ۴۰ رکورد زلزله با ویژگی‌های متمایز از مناطق مختلف ایران (جدول ۱ و ۲)، که با کمک مرکز تحقیقات مسکن و ساختمان تهیه شده، انتخاب شد.^[۱۸] از این گروه تعداد ۳۴ رکورد به‌عنوان سری آموزشی (جدول ۱) و ۶ رکورد به‌منظور کنترل (جدول ۲) به‌کار گرفته شد. این رکوردها همگی در فواصل زمانی ۰/۲ تا ۰/۵ ثانیه گسسته‌سازی شده‌اند. رکوردهای انتخابی به‌لحاظ بزرگی، طول مدت تداوم، بیشینه شتاب، نوع خاک محل خصوصیات متفاوتی دارند. اگر بتوانیم یک سری از پارامترهای مذکور را در کلیه‌ی رکوردها یکسان کنیم، سهولت بیشتری در آموزش شبکه ایجاد کرده‌ایم. یکی از موارد یادشده طول مدت تداوم زلزله است که با توجه به روش پیشنهادی مشخص است که باید به‌نحوی تعداد نقاط رکوردهای مختلف را یکسان کرد.

چنان‌که می‌دانیم هر رکورد تنها در محدوده‌ی مشخصی از طول خود مؤثر است، بنابراین می‌توان برای هر رکورد فاصله‌ی زمانی خاصی را، که بیشترین اثر را بر سازه اعمال می‌کند، مشخص کرد. بهترین شیوه برای این منظور محاسبه‌ی مدت تداوم قوی زلزله برای آن‌هاست. این محاسبه را می‌توان به‌روش‌های مختلف انجام داد. با توجه به تحقیقات صورت‌گرفته پیداست که برای تعیین مدت مزبور تعریف ارائه‌شده بر مبنای انرژی حرکت^[۱۸] مناسب‌تر از دو روش دیگر است.

برای یکسان‌کردن طول شتاب‌نگاشت‌ها تعدادی نقاط صفر به شتاب‌نگاشت‌ها اضافه شد تا طول همه یکسان شود. با توجه به فاصله‌ی زمانی ۰/۲ ثانیه، و تعداد نقاط در نظر گرفته‌شده برای شتاب‌نگاشت‌ها، مدت شتاب‌نگاشت‌ها معادل ۴۰/۹۶ ثانیه $(40.96 = 0.2 \times 2048)$ در نظر گرفته شد. با این روش، طول رکوردهای مزبور یکسان شده است. مشاهده می‌شود که کلیه‌ی شتاب‌نگاشت‌های

داشت. در اینجا فقط می‌توان گفت، سازه‌ی مورد نظر در مواجهه با یک زلزله‌ی خفیف، مقاوم به‌شمار می‌آید. بنابراین برای چنین تحلیل‌هایی عموماً از رکوردهای به‌اصطلاح قوی‌تری استفاده خواهد شد. حال اگر بخواهیم شبکه‌ی مورد نظر ما نیز قابلیت فوق را در ارائه‌ی پاسخ مناسب داشته باشد، می‌بایست در آموزش آن از داده‌های مربوط به زلزله‌های خفیف اجتناب کرد، چرا که شبکه در نهایت تأثیرپذیری خود را از تمام الگوهای آموزشی خواهد داشت. برای بررسی اثر نوع وولت مادر انتخابی در الگوریتم مورد نظر نیز از وولت‌های مختلفی چون وولت‌های کویفلت^۱ و وولت‌های سیملت^۲ و وولت‌های دوبیشز^۳ استفاده شد. از طرفی از آنجا که آنتروپی نیز باید به‌گونه‌ی انتخاب شود که نه آن‌قدر بزرگ باشد که به سیگنال اجازه‌ی تجزیه‌ی مناسب ندهد و نه آن‌قدر کوچک که اثر روش بهترین پایه و ارزش اطلاعات را منتفی سازد. با انتخاب آنتروپی‌های متفاوت^[۱۶] و مقایسه‌ی آن‌ها با هم، یک معیار پایه‌ی آنتروپی برای انتخاب بهترین تجزیه‌ی یک سیگنال و همچنین یک الگوریتم پالایش براساس مطالعات محققین^[۱۶] استفاده شده است. چنین الگوریتمی استفاده از مشخصه‌ی «بهترین درخت»، که تجزیه را هم به‌طور عام و هم نسبت به هر گره بهینه می‌کند و براساس بیشترین انرژی باقی‌مانده در سیگنال انتخاب می‌شود، در الگوریتم وولت پاکت ممکن می‌سازد. برای این هدف گام‌های زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد:

۱. تجزیه‌ی سیگنال: براساس یک وولت انتخابی، سیگنال x به‌کمک وولت پاکت به N سطح تجزیه می‌شود؛
۲. از الگوریتم بهترین درخت برای انتخاب یک آنتروپی مناسب استفاده می‌شود؛
۳. با انتخاب یک آستانه ضرایب وولت پاکت مناسب انتخاب می‌شود. این آستانه با کنترل انرژی باقی‌مانده به‌معنای حذف مقادیر کم‌تر از آستانه در روند محاسبه و معادل صفرگرفتن آن‌هاست؛
۴. بازسازی سیگنال و در صورت لزوم تصحیح آن.

برای مقایسه‌ی عملکرد روش وولت پاکت با استفاده از الگوریتم بهترین پایه نیز یک سری از شتاب‌نگاشت‌های واقعی به‌کمک این روش تجزیه و مجدداً بازسازی شد.^[۱۷]

پس از بررسی‌های ذکرشده، از آنجا که وولت انتخابی باید براساس دقت مورد نظر در به‌کارگیری در محدوده‌ی فرکانس یا زمان بهینه در نظر گرفته می‌شود، و نیز با توجه به نتایج حاصل از کاربرد وولت‌های گوناگون، وولت $db10$ به‌عنوان وولت مادر انتخاب شد. ضرایب وولت پاکت و معکوس آن به‌کمک الگوریتم بهترین پایه با انتخاب آنتروپی مناسب محاسبه و استفاده شد. شبکه به‌وسیله‌ی ورودی طیف پاسخ و خروجی ضرایب وولت پاکت بهترین پایه آموزش داده شد. با توجه به نتایج حاصله در این قسمت مشخص شد که در مقام مقایسه با دیگر روش‌های تحلیلی همچون تحلیل وولت با وولت‌های هارمونیک و تحلیل فوریه‌ی کلاسیک الگوریتم بهترین پایه رفتار بهتری دارد. پس از انتخاب نوع وولت و آنتروپی مناسب اقدام به ساخت شبکه‌ی شد که ورودی آن طیف پاسخ سرعت و خروجی شتاب‌نگاشت متناظر با آن باشد؛ چرا که معمولاً برای آموزش یک شبکه از سری‌هایی آموزشی استفاده می‌شود که هر سری شامل یک بردار ورودی و یک بردار خروجی متناظر است. تعداد نرون‌های لایه‌ی ورودی و خروجی به‌ترتیب برابر با بعد بردارهای ورودی و خروجی است. از آنجا که رابطه‌ی خاصی برای محاسبه‌ی تعداد لایه‌های پنهان و نرون‌های مربوطه موجود نیست، امتحان ساختارهای متفاوت تنها چاره است. بنابراین با توجه به آن که طیف پاسخ سرعت در 100 نقطه برای هر شتاب‌نگاشت محاسبه و استفاده شده است، تعداد نرون‌های ورودی 100 نقطه است. تعداد نرون‌های خروجی نیز

جدول ۱. داده‌های شتاب‌نگاشت‌های پایه‌ی انتخابی (سری آموزشی). [۱۸]

ردیف	تاریخ رویداد	نام جغرافیایی ایستگاه	بزرگی زمین لرزه m_s	حداکثر شتاب تصحیح شده (cm/s^2)	نوع زمین ساختگاه	زمان تداوم (ثانیه)
۱	۱۹۷۶/۱۱/۰۷	قائن	۶٫۴	۱۱۵		۱۹٫۵۴
۲	۱۹۷۷/۰۳/۲۱	بندر عباس-۲	۶٫۹	۹۰	IV-B	۴۵٫۲۲
۳	۱۹۷۷/۰۴/۰۶	ناغان-۱	۶٫۱	۷۰۰	I-A	۲۰٫۹۶
۴	۱۹۷۸/۰۹/۱۶	دیپوک	۶٫۷	۲۷۲	I-A	۵۸٫۳۸
۵	۱۹۷۸/۰۹/۱۶	طیس	۷٫۳	۸۳۲	II-A	۴۹
۶	۱۹۷۸/۰۹/۱۶	بجستان	۷٫۳	۷۸	III-B	۳۹٫۵۸
۷	۱۹۷۸/۱۱/۰۴	هشتیر	۶٫۲	۱۷۱		۱۸٫۹۶
۸	۱۹۷۹/۰۱/۱۶	خاف	۶٫۸	۶۹	III-B	۳۲٫۴۲
۹	۱۹۷۸/۰۹/۱۶	فردوس	۷٫۳	۷۶	IV-B	۵۳٫۰۲
۱۰	۱۹۷۹/۱۱/۲۷	کاشمر	۷٫۱	۷۰	III-C	۶۷٫۹۲
۱۱	۱۹۷۹/۱۱/۲۷	بجستان	۷٫۱	۱۰۴	III-B	۳۳٫۲۰
۱۲	۱۹۷۹/۱۱/۲۷	قائن	۷٫۱	۱۸۶		۳۰٫۱۶
۱۳	۱۹۷۹/۱۱/۲۷	تایباد	۷٫۱	۷۵	III-B	۶۰
۱۴	۱۹۷۹/۱۱/۲۷	گناباد	۷٫۱	۶۹	IV-B	۵۰٫۵۲
۱۵	۱۹۷۹/۱۱/۲۷	خاف	۷٫۱	۱۲۷	III-B	۵۸٫۰۴
۱۶	۱۹۸۱/۰۷/۲۸	گلباف	۷	۲۱۷	III-A	۵۹٫۳۲
۱۷	۱۹۸۴/۰۶/۰۱	شلمازار	۵	۲۹۹	III-C	۱۸٫۶۶
۱۸	۱۹۸۵/۰۲/۰۲	قیر	۵٫۳	۲۹۰	I-A	۱۵٫۳۴
۱۹	۱۹۸۸/۱۲/۰۶	نورآباد ممسنی	۵٫۶	۸۵	III-C	۱۷٫۲۸
۲۰	۱۹۹۰/۰۶/۲۰	ابهر	۷٫۷	۱۲۷		۲۹٫۴۸
۲۱	۱۹۹۰/۰۶/۲۰	رودسر	۷٫۷	۹۱	IV-A	۵۳٫۱۰
۲۲	۱۹۹۰/۰۶/۲۰	لاهیجان	۷٫۷	۱۱۱	IV-A	۶۰٫۵۴
۲۳	۱۹۹۰/۰۶/۲۰	تنکابن	۷٫۷	۱۳۰	IV-A	۳۵٫۹۴
۲۴	۱۹۹۰/۰۶/۲۰	گچسار	۷٫۷	۶۳		۴۹٫۴۸
۲۵	۱۹۹۰/۰۶/۲۰	زنجان	۷٫۷	۱۲۵	III-B	۵۹٫۷۸
۲۶	۱۹۹۰/۰۶/۲۰	رباط کریم	۷٫۷	۶۴	III-B	۱۲٫۵۸
۲۷	۱۹۹۰/۰۶/۲۰	اشتهارد	۷٫۷	۷۱		۴۵٫۷۸
۲۸	۱۹۹۱/۱۱/۲۸	رودبار-۱	۵٫۷	۲۶۸	I-A	۱۹٫۹۴
۲۹	۱۹۹۴/۰۶/۲۰	میمند	۶٫۱	۳۹۴		۲۷٫۱۴
۳۰	۱۹۹۴/۰۳/۲۰	زرت	۵٫۵	۱۹۶	I-A	۳۳٫۲۴
۳۱	۱۹۹۴/۰۶/۲۰	زرت	۵٫۹	۲۸۹	I-A	۴۳٫۵۰
۳۲	۱۹۹۴/۰۶/۲۰	فیروز آباد-۱	۵٫۹	۲۳۵	II-A	۳۸٫۳۶
۳۳	۱۹۹۴/۰۶/۲۰	زنجران	۵٫۹	۸۴۱	II-A	۶۳٫۹۸
۳۴	۱۹۹۴/۰۱/۲۴	فین	۴٫۹	۴۳۳		۳۱٫۹۶

جدول ۲. داده‌های شتاب‌نگاشت‌های پایه انتخابی (سری آزمایشی). [۱۸]

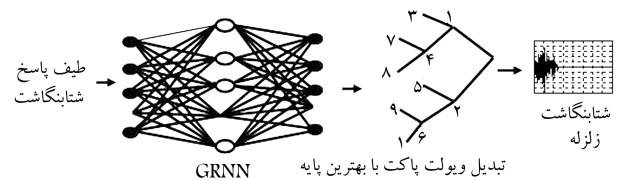
ردیف	تاریخ رویداد	نام جغرافیایی ایستگاه	بزرگی زمین لرزه m_s	حداکثر شتاب تصحیح‌شده (cm/s^2)	نوع زمین ساختگاه	زمان تداوم (ثانیه)
۱	۱۹۷۶/۱۱/۲۴	ماکو	۷٫۳	۸۶	I	۲۸٫۰۶
۲	۱۹۷۷/۰۳/۲۱	بندرعباس-۱	۶٫۹	۹۸	IV	۴۱٫۰۲
۳	۱۹۷۹/۱۱/۱۴	خاف	۶٫۸	۷۴	III	۳۹٫۲۰
۴	۱۹۸۰/۰۱/۱۲	طبس	۵٫۸	۱۵۰	II	۲۹٫۷۴
۵	۱۹۷۹/۱۱/۲۷	خضری	۷٫۱	۹۴	IV	۳۵٫۹۸
۶	۱۹۸۱/۰۷/۲۸	کرمان	۷	۹۸	IV	۳۸٫۰۴

مدت تداوم و بیشینه شتاب زمین یکسان شده‌اند. بدیهی است در مورد سایر پارامترها نمی‌توان این روش را اعمال کرد و بنابراین، رکوردهای حاصله مناسب‌ترین رکوردها برای استفاده در شبکه است. در گزینش داده‌ها، هیچ شیوهی خاصی برای انتخاب انجام نشده، بلکه این امر به صورت کاملاً تصادفی بوده است. در نهایت، حضور دست‌کم یک الگو در بین سری داده‌های آزمایش‌شونده از هر نوع خاک بررسی و کنترل شده است. علاوه بر این، با توجه به شکل رکورد سری‌های مزبور مشاهده می‌شود که هر یک از آن‌ها تابع پوش خاصی دارند تا بتوان حساسیت الگوریتم را نسبت به کلیه حالت‌ها سنجید.

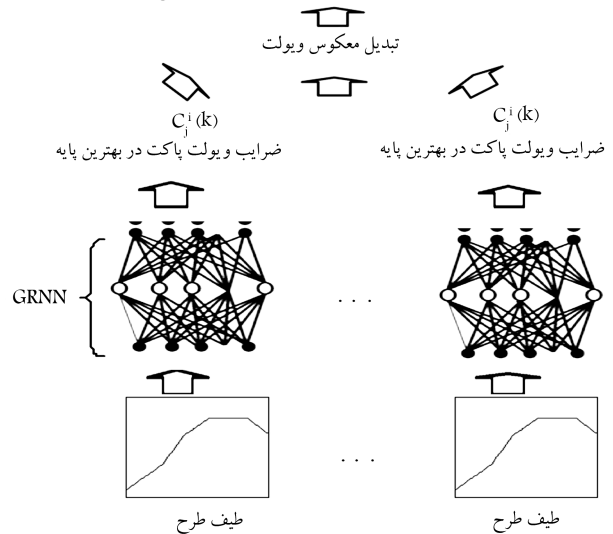
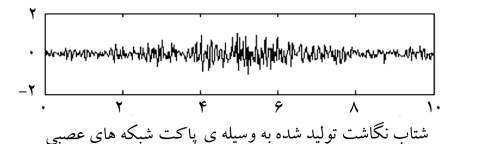
اینک با هدف معرفی شبکه‌یی که قابلیت این انتقال را داشته باشد، ورودی‌ها و خروجی‌ها به همراه سری‌های آموزشی مشخص خواهد شد. شبکه‌یی درست آموزش دیده که علاوه بر پاسخ صحیح در برابر داده‌های آموزشی، به‌ارزی یک بردار ورودی که با آن آموزش ندیده نیز بتواند پاسخی قابل قبول ارائه کند. این روش از امتیازهای عده‌ی بر خوردار است که عمده‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از: سرعت آموزش بالا به سبب نوع خاص شبکه و حذف مرحله‌ی فشرده‌سازی، قابلیت انعطاف‌پذیری حتی در تعداد کم داده‌های آموزشی، قابلیت اصلاح خروجی شبکه تا رسیدن به طیف مورد نظر، استفاده از ویولت‌ها به سبب شناسایی دقیق‌تر ویژگی‌های فرکانسی شتاب‌نگاشت‌های آموزشی.

علت اصلی عدم پاسخ‌گویی مناسب شبکه‌های پیشرو آن است که در این شبکه‌ها چون تمام الگوها به یک شیوه آموزش دیده می‌شود، ارائه‌ی خروجی نیز از کلیه‌ی الگوهای آموزشی تأثیر می‌پذیرد. اگر بتوان این تأثیرپذیری را به نحوی کاهش داد و آن را محدود به یک سری از الگوهای خاص کرد، مسلماً جواب بهتری خواهیم گرفت. یک روش مفید آن است که شبکه، تنها الگوی دارای ورودی شبیه به ورودی مورد نظر را در ارائه‌ی خروجی سهیم کند. این شبیه همان چیزی است که در روش تولید رکوردهای مصنوعی دنبال شد: انتخاب رکوردی با طیف شبیه به طیف هدف و انجام اصلاحات بر روی آن. شبکه‌هایی با قابلیت‌های بالا عموماً حساسیت بیشتری نسبت به خروجی‌ها دارند و به راحتی می‌توان خروجی وابسته به ورودی را متناظر یک یا چند خروجی آموزش دانست.

چنان‌که پیش‌تر اشاره شد، شبکه‌های با تابع پایه‌ی شعاعی چنین کاری را انجام می‌دهند و با انتخاب هر نرون برای هر سری آموزش در لایه‌ی مخفی، پاسخ را بر مبنای فاصله ورودی تا ورودی‌های آموزشی محاسبه می‌کنند. از قابلیت‌های بالای این نوع شبکه‌ها می‌توان به قدرت شناسایی الگوهای متفاوت در مدت زمان بسیار کم، و کارکرد بهتر آن‌ها در دسته‌بندی الگوها در مقایسه با شبکه‌های عصبی پیشرو



شکل ۶. شبکه‌ی طراحی شده برای ساخت شتاب‌نگاشت مصنوعی با ورودی شبیه سرعت.



شکل ۷. مدل ارائه‌شده برای تولید شتاب‌نگاشت مصنوعی زلزله.

مزبور بیشینه شتاب‌های متفاوتی دارند. با توجه به رابطه‌ی خطی بین شتاب‌نگاشت و طیف پاسخ، و نیز از آنجا که طیف‌های هدف ارائه‌شده برای استفاده از شبکه عموماً به صورت طیف طرح نرمالیزه برای بیشینه شتاب خاص‌اند، باید این بیشینه شتاب در شبکه به نحو بارزتری اعمال شود. برای این منظور کلیه‌ی رکوردهای مزبور با بیشینه شتاب خاصی در اینجا مقیاس شده‌اند. بدین ترتیب تمامی رکوردها به لحاظ طول

افزایش داد. از آنجا که در نهایت برای تولید رکورد مصنوعی از طیف طرح استفاده می‌شود، شبکه‌ی مورد نظر برای یک طیف طرح نیز آزمایش شده است. از مزایای قابل توجه این روش آن است که با وجود محدودیت الگو، قادر است پاسخ مناسبی ارائه کند. این روش برای تمامی الگوهای مورد آزمایش کنترل شده و نتایج مربوط در قالب اشکال مختلف آمده است.

در پژوهش حاضر برای بررسی توانایی‌های الگوریتم پیشنهادی از چندین برنامه که در محیط «مطلب» (MATLAB) نوشته شده^[۱۹] استفاده شده است. همچنین برای محاسبه‌ی طیف پاسخ شبه سرعت^[۲۰] به‌عنوان ورودی شبکه با استفاده از معادلات ۱۰ و ۱۱ و با در نظر گرفتن $\xi = 0.05$ استفاده شده است.

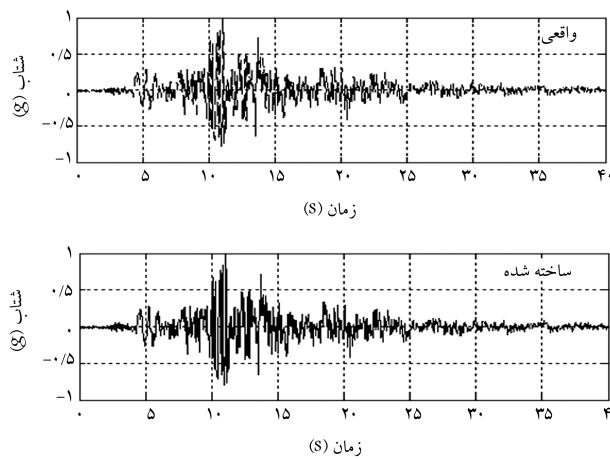
$$T_{vj} \leq T \leq T_{rj}, \quad PSV_j(\omega, \xi) = \frac{\sqrt{\pi}}{T} \max_t |x(t)| \quad (10)$$

$$\ddot{x}(t) + \xi \omega_t \dot{x}(t) + \omega_t^2 x(t) = -\ddot{x}_g(t) \quad (11)$$

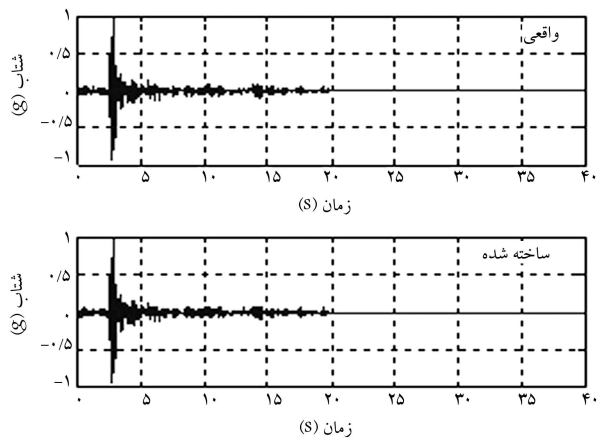
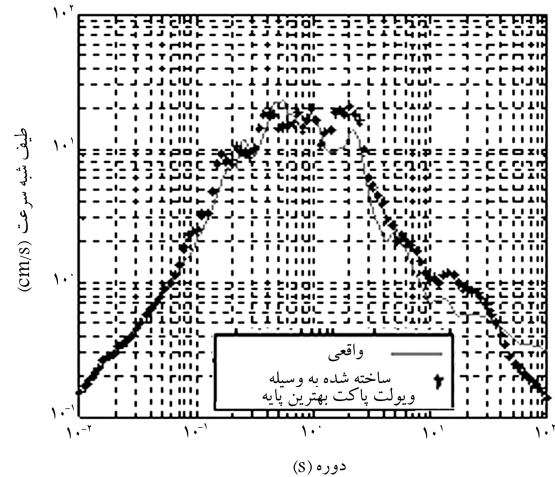
طیف پاسخ در ۱۰۰ نقطه‌ی فرکانسی نیز محاسبه شده است. برای ساخت شبکه‌ی عصبی براساس ضرایب ویولت پکت با الگوریتم بهترین پایه، از آنجا که تا مرحله‌ی سوم تجزیه انجام شده بود، باید هشت شبکه معرفی می‌شد که ضرایب ویولت پکت را ارائه می‌داد و از ترکیب آن‌ها شتاب‌نگاشت ساخته می‌شد. با توجه به نتایج حاصله در نمونه‌های آموزشی انطباق

(MLFF) اشاره کرد. شبکه‌ی یادشده، از آنجا که معادل استنتاج‌گر فازی عمل می‌کند، مسلماً در جواب‌گویی به مسئله‌ی مورد نظر کارایی بیشتری خواهد داشت. شبکه باید پاسخی مشابه با پاسخ‌های آموزشی ارائه کند به‌گونه‌ی که طیف آن به طیف هدف نزدیک باشد. این شبکه به‌سرعت نزدیک‌ترین الگو به الگوی ورودی را انتخاب می‌کند و در مواردی که الگوی آزمایش‌شونده شبیه به هیچ‌یک از سری‌های آموزشی نباشد، با ترکیبی مناسب خروجی قابل قبول را ارائه می‌کند. انتخاب این شبکه و نتایج حاصل از آزمون آن مؤید صحت مطالب یادشده است و به راحتی قابلیت شناسایی هر الگوی وابسته به هر تراز و ارتباط آن با طیف پاسخ را خواهد داشت. استفاده از رکوردهای مناسب برای ارائه‌ی خروجی از قابلیت‌های ویژه‌ی GRNN

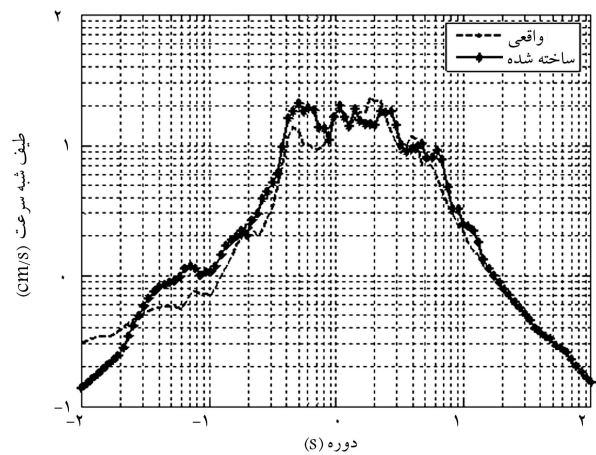
است. در اینجا که فاصله‌ی بین ورودی با یکی از الگوهای آموزشی بسیار کم تشخیص داده شده است صرفاً از این الگو برای ارائه‌ی پاسخ استفاده شده، اگرچه به منظور انطباق بین طیف‌های پاسخ و هدف تغییراتی جزئی در آن صورت گرفته است. با ملاحظه‌ی طیف‌های پاسخ مشاهده می‌شود که این طیف‌ها انطباق نسبتاً خوبی با طیف‌های هدف مربوطه دارند. این هدفی است که از ابتدا دنبال می‌شد، چرا که با توجه به تصادفی بودن زلزله و وجود شتاب‌نگاشت‌های مختلف با طیف‌های پاسخ یکسان، دسترسی به رکوردی که از لحاظ شکل با شتاب‌نگاشت آن انطباق داشته باشد پیش‌بینی نمی‌شد. این شباهت را می‌توان با اضافه‌کردن بر سری‌های آموزشی

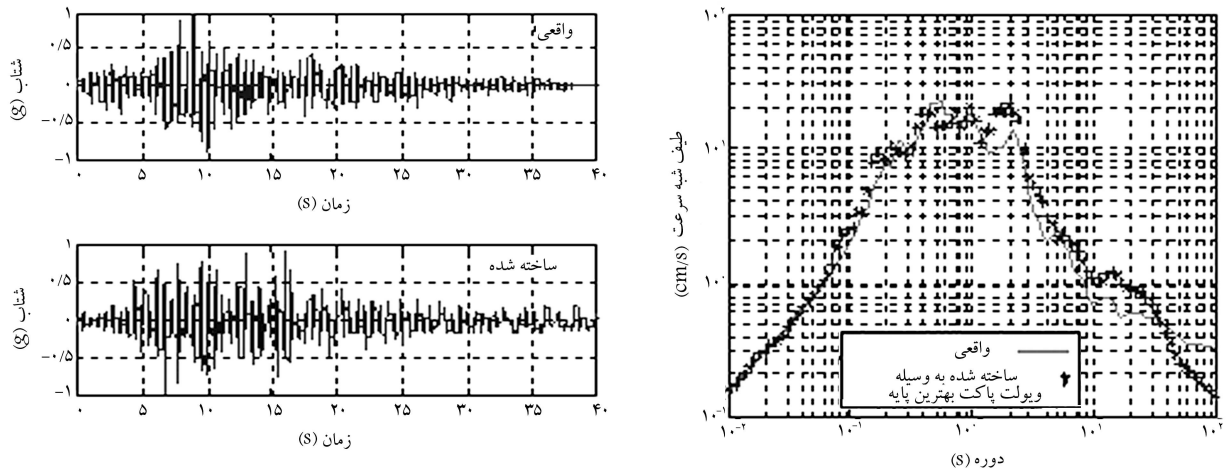


شکل ۸. مقایسه‌ی شتاب‌نگاشت واقعی و مصنوعی زلزله بندر عباس-۱ و طیف پاسخ شبه سرعت آن (از سری آزمایشی).

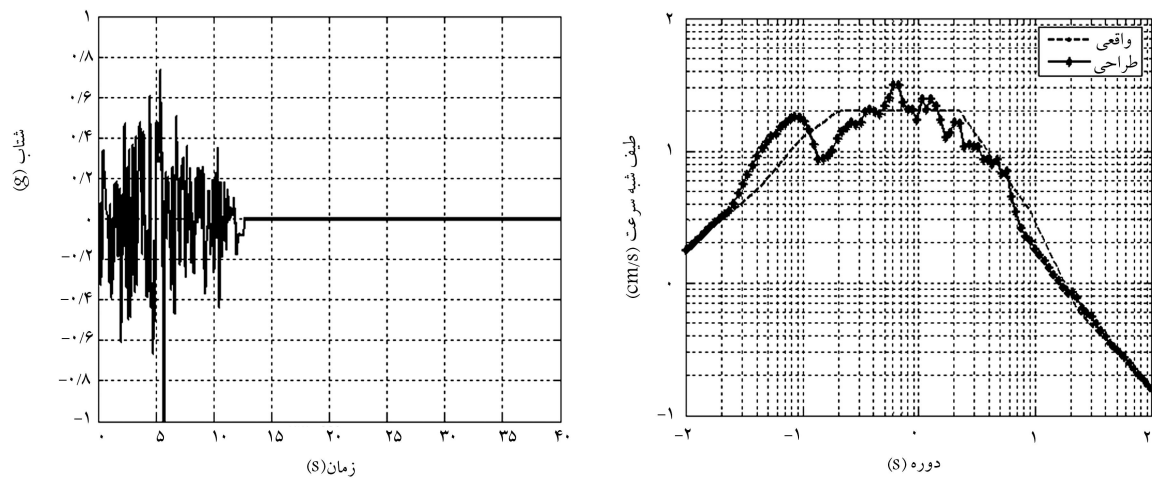


شکل ۹. مقایسه‌ی شتاب‌نگاشت واقعی و مصنوعی زلزله‌ی خاف و طیف پاسخ شبه سرعت آن (از سری آزمایشی).





شکل ۱۰. مقایسه‌ی شتاب‌نگاشت واقعی و مصنوعی زلزله‌ی کرمان و طیف پاسخ شبه سرعت آن (از سری آزمایشی).



شکل ۱۱. شتاب‌نگاشت تولیدشده منطبق بر طیف طرح و مقایسه‌ی طیف پاسخ شبه سرعت آن با طیف طرح.

استفاده می‌شود. نتایج حاصله با استفاده از شبکه‌ی آموزش داده شده در شکل ۱۱ آمده است. چنان‌که ملاحظه می‌شود طیف حاصله انطباق خوبی در بیشتر دوره‌ها دارد و شتاب‌نگاشت تولیدی را نیز می‌توان برگرفته از یک یا چند شتاب‌نگاشت آموزشی دانست.

۷. نتیجه‌گیری

در این نوشتار با استفاده از شبکه‌های GRNN و تبدیل ویولت پاکت همراه با الگوریتم بهترین پایه روشی جدید برای تولید رکوردهای مصنوعی سازگار با طیف هدف ارائه شد. در روش بیان‌شده با استفاده از تبدیل ویولت پاکت رکوردهای مورد نظر تجزیه شده و سپس با استفاده از شبکه‌های عصبی رگرسیون تعمیم‌یافته رابطه‌ی بین طیف پاسخ و ضرایب ویولت پاکت برای هر تراز تقریب زده شد. در نهایت با استفاده از تبدیل معکوس ویولت پاکت به شتاب‌نگاشت مورد نظر دست می‌یابیم. روش ارائه‌شده برای تمامی الگوهای آموزشی و آزمایش‌شونده کنترل شد و نتایج آن نسبتاً مطلوب برآورد شد.

نتایج واقعی و نتایج حاصل از شبکه قابل توجه بوده و حاکی از آموزش مناسب شبکه است. چنان‌که ملاحظه می‌شود، جواب حاصل -- چه به لحاظ شکل شتاب‌نگاشت و چه به لحاظ طیف پاسخ شبه سرعت -- منطبق بر شتاب‌نگاشت و طیف پاسخ اصلی است. برای تمامی سری‌های آموزشی نتایج به دست آمده قابل قبول است. اما شبکه‌ی کارا محسوب می‌شود که بتواند برای سری‌های آزمایش‌شونده جواب مناسبی ارائه کند، چه بیشتر شبکه‌ها از قابلیت حفظ‌کردن بالایی برخوردارند.

در شکل‌های ۸ تا ۱۰ نتایج حاصل به ترتیب برای شتاب‌نگاشت‌های زلزله‌ی بندرعباس-۱ و خاف و کرمان که در آموزش شبکه حضور نداشتند و از گروه آموزشی‌اند (جدول ۲) به همراه نتایج حاصل از روش پیشنهادی نشان داده شده است. با ملاحظه‌ی طیف‌های پاسخ سری آموزشی مشاهده می‌شود که انطباق نسبتاً خوبی با طیف‌های هدف مربوطه دارد. این هدفی است که از ابتدا دنبال می‌شد، چراکه با توجه به تصادفی بودن زلزله و وجود شتاب‌نگاشت‌های مختلف با طیف‌های پاسخ یکسان، دسترسی به رکوردی که از لحاظ شکل با شتاب‌نگاشت آن انطباق داشته باشد پیش‌بینی نمی‌شد.

در مرحله‌ی آخر از طیف طرح مورد نظر به منظور تولید شتاب‌نگاشت مصنوعی

۱. انعطاف‌پذیری زیاد؛ یعنی با تعداد محدودی الگو، قابلیت ارائه پاسخ مناسب به‌ازای ورودی مورد نظر را دارد.
 ۲. سرعت آموزش بالا، به‌طوری که تمامی شبکه‌ها مجموعاً در کم‌تر از چند دقیقه تربیت شده‌اند.
 ۳. استفاده از ویولت پاکت‌ها به‌لحاظ شناسایی کامل و استخراج ویژگی‌های فرکانسی هر رکورد.
 ۴. تصادفی نبودن ماهیت خروجی‌ها، به‌گونه‌ای که هر رکورد را می‌توان برگرفته از دو یا چند الگوی ورودی دانست.
 ۵. سرعت بالای این روش امکان انجام هر نوع تغییری را در داده‌های آن میسر می‌کند.
- از قابلیت‌های بارز این روش کاهش شدید مدت زمان آموزش آن در مقایسه با روش‌هایی است که در آن از RNN برای فشرده‌سازی اطلاعات استفاده شده است. از مزایای اصلی این روش می‌توان به سرعت آموزش بالا به‌سبب نوع خاص شبکه و حذف مرحله‌ی فشرده‌سازی، قابلیت انعطاف‌پذیری آن حتی در تعداد کم داده‌های آموزشی، قابلیت اصلاح خروجی شبکه تا رسیدن به طیف مورد نظر، استفاده از ویولت‌ها به‌سبب شناسایی دقیق‌تر ویژگی‌های فرکانسی شتاب‌نگاشت‌های آموزشی اشاره کرد. روش فوق برای تمامی الگوهای آزمایش‌شونده کنترل شد، که نتایج مربوط در قالب اشکال مختلف آمده است. یکی از مزایای قابل توجه این روش آن است که با وجود محدودیت الگو، قادر است پاسخ مناسبی ارائه کند. به‌طور خلاصه می‌توان مزایای روش مزبور را چنین برشمرد:

پانویس

1. Coifflet wavelets
2. Symlets wavelets
3. Daubishez wave

منابع

8. Mac Can, W.M. and Shah, H.C. "Determining strong-motion duration of earthquake", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **69**, pp. 1253-1265 (1979).
9. Newland, D.E., *Random Vibrations, Spectral and Wavelet Analysis*, 3rd Edition, Longman Singapore Publishers (1994).
10. Ghodrati Amiri, G.; Ashtari, P. and Rahami, H. "New development of artificial record generation by wavelet theory", *Structural Engineering and Mechanics*, **22**(2), pp. 185-195 (2006).
11. Daubechies, I., *Ten Lectures on Wavelets*, CBMS-NSF Conference Series in Applied Mathematics, Montpelier, Vermont (1992).
12. Wickerhauser, M.V., *Adapted Wavelet Analysis from Theory to Software*, Peters. A.K. Wellesley, M.A (1994).
13. Jaffard, S.; Meyer, Y. and Ryan, R.D., *Wavelets: Tools for Science & Technology*, Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia (2001).
۱۴. منهای، محمدباقر «هوش محاسباتی (جلد اول)، مبانی شبکه‌های عصبی» انتشارات مرکز نشر پروفیسور حسابی، (شهریور ۱۳۷۷)
۱۵. منهای، محمدباقر و سیفی‌پور، نوید «هوش محاسباتی (جلد دوم)، کاربرد هوش محاسباتی در کنترل»، انتشارات مرکز نشر پروفیسور حسابی (بهمن ۱۳۷۷)
16. Coifman, R.R., and Wickerhauser, M.V., "Entropy-based algorithms for best-basis selection," *IEEE Trans. on Inf. Theory*, 28 (2), 713-718 (1992).
17. Ghodrati Amiri, G. and Asadi, A. "Processing ground motion records by using an advanced method in wavelet packet", *International Journal of Engineering Science, Iran University of Science & Technology* (Submitted for review) (2009).
۱۸. رمضی، حمیدرضا، «داده‌های پایه شتاب‌نگاشت‌های شبکه شتاب‌نگاری کشور» مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، نشریه ۲۵۶ (۱۳۷۶).
19. MATLAB Reference Guide, the Math Works Inc (1999).
20. Naeim, F. "The Seismic Design Handbook", Van Nostrand (1999).
1. Ghaboussi, J. and Lin, C.J. "New method of generating spectrum compatible accelerograms using neural networks", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **27**, pp. 377-396 (1998).
2. Lin, C.J. and Ghaboussi, J. "Recent progress on neural network based methodology for generating artificial earthquake accelerograms", *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand, (29 Jan -5 Feb 2000).
3. Lee, S. and Han, S. "Neural-network-based models for generating artificial earthquakes and response spectra", *Computers and Structures*, **80**, pp. 1627-1638 (2002).
۴. رحامی، حسین «تولید شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی با استفاده از شبکه‌های عصبی و ویولت‌ها»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، (۱۳۷۹)
- Ghodrati Amiri, G. and Bagheri, A. "Application of wavelet multi-resolution analysis and artificial intelligence for generation of artificial earthquake accelerograms", *Structural Engineering and Mechanics*, **28**(2), pp. 153-166 (2008).
6. Ghodrati Amiri, G.; Bagheri, A. and Razaghi, A. "Generation of multiple earthquake accelerograms compatible with spectrum via the wavelet packet transform and stochastic neural networks", *Journal of Earthquake Engineering* **13**, Issue 7, pp.899-915 (2009).
7. Housner, G.W. and Jennings, P.C. "Generation of artificial earthquakes", *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, **90**, pp. 113-150 (1964).