

بہ نام یکتای بی ہمتا



دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات
رشته مهندسی کامپیوتر گرایش هوش مصنوعی

رساله دکتری

تولید شتابنگاشت مصنوعی به کمک آنالیز زمانی سیگنال‌های زلزله

نگارنده: محمدرضا فدوی امیری

استاد راهنما

دکتر سید علی سلیمانی ایوری

اساتید مشاور

دکتر حمید حسن‌پور

دکتر محمد شامخی امیری

شهریور ۱۳۹۶

تقدیم به:

خدایی که عشق را آفرید

و به کسانی که عشق‌شان را در وجودم دمید.

همسرم

به پاس قدردانی از قلب آکنده از عشق و معرفت او که با پشتیبانی بی‌منتش توانست مشکلات مسیر را برایم تسهیل کند.

و

پدر، مادر و خانواده مهربانم

به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان که از نگاهشان صلابت، رفتارشان محبت و از صبرشان ایستادگی را آموختم.

و

فرزند دلبندم

که آسایش او آرامش من است.

تشکر و قدردانی

سپاس بی‌کران پروردگار یکتا را که هستی‌مان بخشید و به طریق علم و دانش رهنمونمان شد و به هم‌نشینی رهروان علم و دانش مفتخرمان نمود و خوشه‌چینی از علم و معرفت را روزی‌مان ساخت. این جانب در اینجا لازم می‌دانم از همه کسانی که در طی دوره تحصیل، در فراگیری و آموزش این جانب نقش داشته‌اند، تقدیر و تشکر نمایم:

تشکر و سپاس از استادان عزیز دوره تحصیل دکتری
تشکر و سپاس از داوران و استادان ممتحن

و در آخر، صمیمانه‌ترین تشکرهای این جانب تقدیم باشد به محضر

استاد ارجمند محترم، جناب آقای دکتر سید علی سلیمانی ایوری

و اساتید مشاور محترم، جناب آقای پروفور حمید حسن پور

و جناب آقای دکتر محمد شامخی امیری

باشد تا لطف و عنایت ویژه خداوند همواره شامل حال این بزرگواران گردد.

چکیده

علت اصلی خرابی‌های وارد بر ساختمان‌ها در طول زلزله پاسخ آن‌ها نسبت به حرکات زمین و یا به عبارت دیگر نحوه مقابله ساختمان‌ها با نیروهای وارده از جانب زلزله می‌باشد. امروزه یکی از متداول‌ترین روش‌های تحلیل و طراحی سازه‌ها در برابر زلزله، آنالیز طیفی است. یک اشکال عمده روش آنالیز طیفی برای تحلیل و طراحی سازه‌ها، ناتوانی آن در تأمین اطلاعات زمانی در مورد پاسخ و رفتار سازه است؛ که ناشی از مبنای تهیه طیف‌های پاسخ طرح می‌باشد. از طرفی در اختیار داشتن سیگنال منطبق با طیف‌های طراحی یکی از مهم‌ترین مسائل در آنالیزهای تاریخچه زمانی غیرخطی می‌باشد. لذا به دلیل مزایای استفاده از آنالیزهای تاریخچه زمانی سیگنال زلزله و همچنین عدم وجود سیگنال مناسب در برخی از مناطق، ضروری است که در بسیاری از موارد تعدادی سیگنال مصنوعی در منطقه موردنظر تولید شود.

این رساله به ارائه روشی نوین برای تولید سیگنال‌های مصنوعی منطبق با طیف ساخت‌گاه سازه می‌پردازد. در روش پیشنهادی ابتدا تعدادی سیگنال ثبت‌شده در ایستگاه‌های شتاب‌نگاری بر اساس دسته‌بندی نوع خاک (بستر) انتخاب می‌شوند. این خاک‌ها با توجه ویژگی‌ها به دو گروه خاک و سنگ تقسیم می‌شوند و سپس با استفاده از تبدیل موجک و فوریه به تحلیل و پردازش آن‌ها پرداخته می‌شود. در قدم بعدی از توانایی یادگیری شبکه‌های عصبی برای نگاشت معکوس از طیف پاسخ این سیگنال‌ها به ضرایب تبدیل ویولتی و فوریه استفاده می‌گردد. به موازات استفاده از الگوریتم‌های آموزشی موجود برای شبکه‌های عصبی، از توانایی الگوریتم‌های تکاملی 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. برای فشرده سازی سیگنال‌ها نیز از روش‌هایی چون ضرائب پیشگویی خطی بهره می‌گیریم. در نهایت سیگنال‌های سازگار با طیف ساخت‌گاه تولید می‌شود.

در این رساله با ارائه مثال‌هایی از سیگنال‌های ثبت‌شده در ایران، به آزمایش روش‌های پیشنهادی پرداخته شده و کارایی آن‌ها نشان داده می‌شود. برای اجرای روش علاوه بر شبکه عصبی مصنوعی، تبدیل موجک و تبدیل فوریه، از الگوریتم‌های تکاملی و تحلیل سری‌های زمانی نیز استفاده گردید و نتایج حاصل از روش مذکور با یکدیگر مقایسه شد. نتایج حاصل مبین این است که استفاده ترکیبی از این روش‌ها به مراتب الگوی بهتری برای این مدل‌سازی، در مقایسه با سایر روش‌ها می‌باشد و نتایج بهتری را ارائه می‌دهد.

کلمات کلیدی: شتاب‌نگاشت مصنوعی سازگار با طیف ساخت‌گاه، تحلیل سری‌های زمانی، الگوریتم‌های تکاملی، شبکه عصبی مصنوعی، تبدیل موجک، تبدیل فوریه.

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

[1] 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.

[2] Fadavi Amiri, M. Soleymani Eyvari, S.A. Hasanpoor, H. Shamekhi Amiri M. (2017), "**Simulation of Artificial Earthquake Records Compatible with Site Specific Response Spectra Using Time Series Analysis**", *Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE)*, Articles in Press, Accepted Manuscript , Available Online from 13 May 2017.

[3] Fadavi Amiri, M. Soleymani Eyvari, S.A. Hasanpoor, H. Shamekhi Amiri M. (2017), "**Generation of Synthetic Earthquake Records by Artificial Intelligence Techniques**", *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, Vol. 8, No. 1, 15-28.

[۴] فدوی امیری م، سلیمانی ایوری ع، حسن پور ح، شامخی امیری م، "مدلی جدید در شبیه سازی سیگنال تاریخچه زمانی زلزله به کمک شبکه های عصبی مصنوعی و الگوریتم های تکاملی"، دهمین کنگره ملی مهندسی عمران، تهران.

[۵] فدوی امیری م، سلیمانی ایوری ع، حسن پور ح، شامخی امیری م، "بررسی عملکرد شبکه عصبی مصنوعی RBF در تحلیل و تولید سیگنال زلزله"، سومین کنفرانس ملی تکنولوژی مهندسی برق و کامپیوتر (E-Tech 2017)، ص ۳۱۱، تهران.

فهرست مطالب:

فصل اول: مقدمه	۱
۱-۱ کلیات	۲
۲-۱ ثبت رخداد زلزله در قالب سیگنال های زلزله	۴
۳-۱ شبکه های لرزه نگاری در ایران	۵
۴-۱ مشخصه های حرکت زمین بر اثر زلزله	۷
۵-۱ سیگنال مصنوعی زلزله	۸
۶-۱ ضرورت طرح مسئله	۱۱
۷-۱ ساختار تحقیق ۱۲	
فصل دوم: پیشینه تحقیق	۱۳
۱-۲ مروری بر پژوهش های گذشته	۱۴
۲-۲ روش های مختلف تولید سیگنال مصنوعی زلزله	۱۴
۱-۲-۲ روش های تصادفی	۱۵
۲-۲-۲ روش های تئوری موج و ترکیبی	۲۱
۳-۲-۲ روش های نوین	۲۶
۴-۲-۲ بررسی روش قابوسی و لین	۲۹
۳-۲ جمع بندی	۳۶
فصل سوم: مبانی نظری تحقیق	۳۹
۱-۳ تبدیل موجک	۴۰
۲-۳ مقایسه تبدیل فوریه و تبدیل ویولت	۴۰
۱-۲-۳ تبدیل فوریه پیوسته	۴۱
۲-۲-۳ تبدیل فوریه گسسته	۴۲
۳-۲-۳ تبدیل فوریه زمان کوتاه	۴۳
۴-۲-۳ حرکت از تبدیل فوریه به سمت تبدیل ویولت	۴۴
۳-۳ مفهوم کلی و روابط تئوریک تبدیل ویولت	۴۶
۱-۳-۳ مفاهیم بنیادین تبدیل ویولت گسسته	۴۶

۵۰	۲-۳-۳- مبانی تئوریک تجزیه ویولت گسسته.....
۵۳	۳-۳-۳- مفاهیم بنیادین بازسازی تبدیل ویولت.....
۵۶	۴-۳-۳- روابط تئوریک بازسازی تبدیل ویولت.....
۵۸	۴-۳- مفهوم کلی و روابط تئوریک تبدیل بسته ویولتی.....
۵۸	۳-۴-۱- مفاهیم بنیادین تبدیل بسته ویولتی.....
۵۹	۳-۴-۲- مبانی تئوریک تبدیل بسته ویولتی.....
۶۳	۴-۳- شبکه‌های عصبی مصنوعی.....
۶۴	۳-۴-۱- ساختار شبکه‌های عصبی مصنوعی.....
۶۵	۳-۴-۲- فرآیند تولید خروجی در شبکه‌های عصبی مصنوعی.....
۶۶	۳-۴-۳- ویژگی‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی.....
۶۷	۳-۴-۵- آموزش شبکه‌های عصبی مصنوعی.....
۶۸	۳-۴-۶- نحوه ارائه زوج‌های آموزشی به شبکه.....
۶۸	۳-۴-۷- مشکلات آموزش شبکه عصبی مصنوعی.....
۷۱	فصل چهارم: پارامترها و طیف‌های سیگنال زلزله.....
۷۲	۴-۱- مقدمه.....
۷۳	۴-۲- طیف فوریه.....
۷۵	۴-۳- طیف قدرت.....
۷۷	۴-۴- طیف پاسخ.....
۷۹	۴-۵- طیف‌های طراحی.....
۸۰	۴-۶- پارامترهای طیفی.....
۸۰	۴-۶-۱- پریود غالب.....
۸۱	۴-۶-۲- پهنای باند.....
۸۱	۴-۶-۳- فرکانس مرکزی.....
۸۲	۴-۶-۴- فاکتور شکل.....
۸۲	۴-۶-۵- پارامترهای کانای-تجیمی.....
۸۳	۴-۷- سایر پارامترهای زلزله.....

۸۳	۱-۷-۴ شدت آریاس
۸۴	۲-۷-۴ انرژی زلزله
۸۵	۳-۷-۴ شتاب ماکزیمم
۸۶	۴-۷-۴ سرعت ماکزیمم
۸۶	۵-۷-۴ جابجایی ماکزیمم
۸۷	۶-۷-۴ V_{max}/a_{max}
۸۸	۷-۷-۴ میانگین مربعات ریشه شتاب، سرعت و جابجایی (RMS)
۸۸	۸-۷-۴ شدت مشخصه
۸۹	۹-۷-۴ سرعت تجمعی مطلق
۸۹	۱۰-۷-۴ شدت طیف پاسخ
۹۰	۱۱-۷-۴ شدت طیف سرعت
۹۰	۱۲-۷-۴ شدت طیف شتاب
۹۰	۱۳-۷-۴ شتاب و سرعت حداکثر مؤثر (EPA)
۹۱	۱۴-۷-۴ مدت واحد
۹۱	۱۵-۷-۴ مدت مؤثر
۹۲	۸-۴ جمع بندی
۹۵	فصل پنجم: پیاده سازی و ارزیابی روش پیشنهادی
۹۶	۱-۵ مقدمه
۹۶	۲-۵ ویژگی سیگنال های مصنوعی
۱۰۰	۳-۵ بررسی فرضیات متفاوت جهت نگاشت طیف پاسخ به سیگنال زلزله
۱۰۳	۴-۵ جایگاه شبکه های عصبی در نگاشت طیف پاسخ به سیگنال زلزله
۱۰۴	۵-۵ معرفی الگوی پیشنهادی پایه
۱۰۸	۱-۵-۵ استفاده از ویولت در تجزیه سیگنال ها
۱۱۱	۲-۵-۵ ویژگی سیگنال های انتخاب شده
۱۱۱	۳-۵-۵ نرمال سازی داده ها
۱۱۲	۴-۵-۵ نحوه تولید سیگنال مصنوعی سازگار با طیف پاسخ

۱۱۷.....	۵-۵-۵ مدل تعمیم یافته اول
۱۱۷.....	۵-۵-۵-۱ آنالیز MFCC
۱۱۹.....	۵-۵-۵-۲ نحوه تولید سیگنال مصنوعی زلزله با مدل تعمیم یافته اول
۱۲۰.....	۵-۵-۶ مدل تعمیم یافته دوم
۱۲۳.....	۵-۵-۶ مدل تعمیم یافته سوم
۱۲۶.....	۵ - ۶ بررسی صحت نتایج حاصل
۱۲۸.....	۵-۷ بررسی پارامترهای شاخص نتایج
۱۳۰.....	۵ - ۷ جمع بندی
۱۳۳.....	فصل ششم: نتیجه گیری و محورهای مطالعه بیشتر
۱۳۴.....	۶-۱ نتیجه گیری
۱۳۷.....	۵-۲ پیشنهادها
۱۳۸.....	مراجع

فهرست اشکال

- شکل (۱-۱): شتاب‌نگار ساده جرم _ فنر _ میرا کننده [۱]..... ۴
- شکل (۲-۱): شبکه‌های لرزه‌نگاری مرکز لرزه‌نگاری کشوری..... ۶
- شکل (۱-۲): ساختار شبکه عصبی RNN جهت فشرده‌سازی اطلاعات [۱۹]..... ۳۱
- شکل (۲-۲): شبکه عصبی پیشرو *MLFF* با نام ساختار *AGNN* جهت تولید *Ar* و *Ai* [۱۹]..... ۳۳
- شکل (۳-۲): آزمون شبکه *AGNN* برای یک سیگنال آزمون‌شونده [۱۹]..... ۳۴
- شکل (۱-۳): تبدیل فوریه پیوسته (تجزیه سیگنال به پایه‌های سینوسی و کسینوسی با فرکانس‌های مختلف) [۶۷]. ۴۲
- شکل (۲-۳): تابع گوسی پیشنهادی گابور [۶۷]..... ۴۳
- شکل (۳-۳): روند کلی استفاده از پنجره زمانی در تبدیل گابور [۶۷]..... ۴۴
- شکل (۴-۳): مقایسه تبدیل فوریه، فوریه زمان کوتاه و تبدیل ویولت [۶۷]..... ۴۵
- شکل (۵-۳): نتایج آنالیز ویولت و تبدیل فوریه یک تابع سینوسی با یک نقطه ناپیوستگی [۶۷]..... ۴۵
- شکل (۶-۳): نتایج آنالیز ویولت یک تابع سینوسی نویزدار در تراز اول [۶۷]..... ۴۷
- شکل (۷-۳): مراحل انجام تبدیل ویولت پیوسته بر روی یک سیگنال مشخص [۶۷]..... ۴۸
- شکل (۸-۳): درخت تجزیه ویولت تا تراز ۳ برای یک سیگنال مشخص [۶۷]..... ۴۹
- شکل (۹-۳): توصیف کیفی زمان-فرکانس با استفاده از تبدیل ویولت [۶۷]..... ۵۰
- شکل (۱۰-۳): انتقال تابع ویولت (بالا)، اتساع تابع ویولت (پایین) [۶۷]..... ۵۱
- شکل (۱۱-۳): فرآیند معکوس تبدیل ویولت [۶۷]..... ۵۴
- شکل (۱۲-۳): مرحله افزایش تعداد نمونه در بازسازی سیگنال اصلی [۶۷]..... ۵۴
- شکل (۱۳-۳): مرحله عبور از فیلترهای مختلف در بازسازی سیگنال اصلی [۶۷]..... ۵۵
- شکل (۱۴-۳): بازسازی سیگنال ۱۰۰۰ نقطه‌ای تجزیه‌شده تا تراز ۱ [۶۷]..... ۵۵
- شکل (۱۵-۳): حالت‌های مختلف بازسازی سیگنال تجزیه‌شده تا تراز ۳ [۶۷]..... ۵۶
- شکل (۱۶-۳): تبدیل ویولت چندمرحله‌ای سیگنال و معکوس تبدیل ویولت جهت بازسازی سیگنال اولیه [۶۷]..... ۵۶
- شکل (۱۷-۳): نمونه‌ای از تجزیه یک سیگنال با استفاده از تبدیل بسته ویولتی و بازسازی سیگنال اولیه [۶۸]..... ۵۸
- شکل (۱۸-۳): تجزیه سیگنال زلزله ناغان تا تراز ۲ با استفاده از تبدیل بسته ویولتی [۶۹]..... ۶۱
- شکل (۱۹-۳): تجزیه سیگنال زلزله طیس تا تراز ۲ با استفاده از تبدیل بسته ویولتی [۶۹]..... ۶۱
- شکل (۲۰-۳): تجزیه سیگنال زلزله بم تا تراز ۲ با استفاده از تبدیل بسته ویولتی [۶۹]..... ۶۲
- شکل (۲۱-۳): ساختار کلی شبکه‌های عصبی استاندارد [۶۷]..... ۶۵
- شکل (۱-۴): نمودار (a) شتاب (b) سرعت (c) جابجایی مربوط به سیگنال زلزله بم..... ۷۲
- شکل (۲-۴): طیف فوریه مربوط به زلزله بم..... ۷۳
- شکل (۳-۴): طیف دامنه فوریه برای مؤلفه‌های E-W سیگنال حرکات نیرومند [۲]..... ۷۴
- شکل (۴-۴): طیف قدرت مربوط به زلزله بم..... ۷۵
- شکل (۵-۴): نمونه‌ای از طیف پاسخ با میرایی‌های متفاوت..... ۷۷
- شکل (۶-۴): دو طیف فرضی دامنه فوریه با پرید غالب یکسان اما محتوی فرکانسی کاملاً متفاوت [۱]..... ۸۱
- شکل (۷-۴): شکل تابع دانسیته قدرت طیفی [۱۱] و [۷۸]..... ۸۳
- شکل (۸-۴): درصد شدت آریاس برای زمان‌های مختلف مربوط به زلزله بم..... ۸۴
- شکل (۹-۴): نمودار انرژی مربوط به زلزله بم..... ۸۵

- شکل (۴-۱۰): نحوه تعیین شتاب حداکثر مؤثر و سرعت حداکثر مؤثر از روی طیف‌های پاسخ [۱]..... ۹۱
- شکل (۵-۱): الگوی تولید طیف پاسخ [۸۳]..... ۱۰۲
- شکل (۵-۲): روند ساخت سیگنال اصلی در روش LPC [۶۷]..... ۱۰۶
- شکل (۵-۳): نرمال‌سازی سیگنال‌ها (سمت چپ: قبل از نرمال‌سازی سمت راست: بعد از نرمال‌سازی)..... ۱۱۲
- شکل (۵-۴): شبکه‌های ایجاد شده برای بخش‌های حقیقی و موهومی..... ۱۱۳
- شکل (۵-۵): مراحل کار تولید سیگنال مصنوعی زلزله در مدل پایه پیشنهادی..... ۱۱۴
- شکل (۵-۶): سیگنال اصلی (چپ-بالا) و مصنوعی (چپ-پایین) زلزله زرنده (۲۰۰۳) و طیف پاسخ مربوطه (راست)..... ۱۱۶
- شکل (۵-۷): سیگنال اصلی (چپ-بالا) و مصنوعی (چپ-پایین) زلزله رودسر (۱۹۹۰) و طیف پاسخ مربوطه (راست)..... ۱۱۶
- شکل (۵-۸): سیگنال اصلی (چپ-بالا) و مصنوعی (چپ-پایین) زلزله میناب (۲۰۰۵) و طیف پاسخ مربوطه (راست)..... ۱۱۷
- شکل (۵-۹): روند اجرایی آنالیز MFCC..... ۱۱۸
- شکل (۵-۱۰): سیگنال اصلی (چپ بالا) و مصنوعی (چپ پایین) زلزله لاهیجان و طیف پاسخ اصلی (راست ممتد) و مصنوعی (راست خط‌چین)..... ۱۲۲
- شکل (۵-۱۱): سیگنال اصلی (چپ بالا) و مصنوعی (چپ پایین) زلزله طبس و طیف پاسخ اصلی (راست ممتد) و مصنوعی (راست خط‌چین)..... ۱۲۲
- شکل (۵-۱۲): فرآیند کار در مدل پیشنهادی دوم..... ۱۲۳
- شکل (۵-۱۳): فرآیند کار در مدل پیشنهادی سوم..... ۱۲۴
- شکل (۵-۱۴): سیگنال مصنوعی (چپ بالا) و اصلی (چپ پایین) زلزله طبس و طیف پاسخ اصلی و مصنوعی (راست)..... ۱۲۵
- شکل (۵-۱۵): سیگنال مصنوعی (چپ بالا) و اصلی (چپ پایین) زلزله منجیل و طیف پاسخ اصلی و مصنوعی (راست)..... ۱۲۶
- شکل (۵-۱۶): نمودار هیستوگرام سیگنال مصنوعی زلزله بم که توزیع نرمال را در سیگنال واقعی (سمت چپ) و مصنوعی (سمت راست) نشان می‌دهد..... ۱۲۷

فهرست جداول

- جدول (۱-۴): نسبت $V_{\max} / a_{\max}$ برای شرایط مختلف ساختگاه [۸۱]..... ۸۷
- جدول (۲-۴): خصوصیات حرکات زمین که قویاً در پارامترهای مختلف حرکت زمین منعکس می‌باشند [۱]..... ۹۲
- جدول (۱-۵): مشخصات شبکه‌های عصبی مصنوعی به کار گرفته شده..... ۱۱۹
- جدول (۲-۵): نتایج حاصل از آزمون آماری کولموگوروف اسمیرنوف بر روی سیگنال مصنوعی زلزله بم..... ۱۲۸
- جدول (۳-۵): جدول مقایسه پارامترهای سیگنال مصنوعی با سیگنال واقعی..... ۱۲۹
- جدول (۴-۵): جدول مقایسه سایر پارامترهای سیگنال مصنوعی با سیگنال واقعی..... ۱۳۰
- جدول (۱-۶): جدول تکنیک‌های مختلف بکار گرفته شده در مدل‌های پیشنهادی..... ۱۳۴

فصل اول: مقدمه

۱-۱- کلیات

زمین لرزه جنبش زمین می باشد که به علت آزاد شدن انرژی ناشی از گسیختگی سریع در گسل های پوسته زمین در مدتی کوتاه روی می دهد. محلی که منشأ زمین لرزه است و انرژی از آنجا خارج می شود را کانون ژرفی و نقطه بالای کانون در سطح زمین را مرکز سطحی زمین لرزه می گویند. پیش از وقوع زمین لرزه اصلی معمولاً زلزله های نسبتاً خفیف تری در منطقه روی می دهد که به پیش لرزه معروف می باشند. به لرزه های بعدی زمین لرزه نیز پس لرزه می گویند که با شدت کمتر و با فاصله زمانی گوناگون میان چند دقیقه تا چند ماه رخ می دهند [۱].

به عبارتی زمین لرزه نتیجه رهایی ناگهانی انرژی از داخل پوسته زمین است که امواج ارتعاشی را ایجاد می کند. زمین لرزه ها توسط دستگاه زلزله سنج یا لرزه نگار ثبت می شوند. مقدار بزرگی یک زلزله متناسب با انرژی آزاد شده زلزله است. زلزله های کوچک تر از بزرگی سه ریشتر اغلب غیر محسوس و بزرگ تر از شش ریشتر خسارت های جدی را به بار می آورند.

در نزدیکی سطح زمین، زلزله به صورت ارتعاش یا گاهی جابجایی زمین نمایان می شود. زمانی که مرکز زمین لرزه در داخل دریا باشد، در صورت تغییر شکل زیاد و سریع بستر دریا باعث ایجاد سونامی^۱ می شود که معمولاً در زلزله های بزرگ تر از هشت ریشتر اتفاق می افتد. در حالت کلی کلمه زمین لرزه هر نوع ارتعاشی را در بر می گیرد - چه ارتعاش طبیعی چه مصنوعی توسط انسان - که موجب ایجاد امواج ارتعاشی می شود. زمین لرزه ها می توانند نتیجه حرکت گسل ها، فعالیت های آتشفشانی، ریزش کوه ها، انفجار معدن ها و آزمایش های هسته ای باشد [۱].

برای طراحی سازه های مقاوم در برابر زلزله، شناخت جنبش و ارتعاشات شدید صفحه زمین ساختگاه که انتظار می رود در طول عمر مفید سازه رخ دهد، از اهمیت ویژه ای برخوردار است. بهترین راه برای شناخت ویژگی های جنبش شدید زمین بستر سازه، به دست آوردن نمودار حرکت زمین از جمله شدت

¹ Tsunami

و بزرگی شتاب زمین در هنگام رویداد زمین‌لرزه‌های متوسط تا بزرگ می‌باشد. این امر به وسیله دستگاه شتاب‌نگار موجود در محل و رخداد زمین‌لرزه در گستره نزدیک میسر می‌شود. برای طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله در مناطق لرزه‌خیز، نمی‌توان برای هر محل دستگاه شتاب‌نگار مجزی مستقر نمود و در انتظار رویداد زمین‌لرزه‌ای در حوزه نزدیک به آن باقی ماند تا نسبت به ثبت نمودار ارتعاشات و سیگنالی مناسب از انرژی جنبشی^۱ زمین اقدام نمود. به همین دلیل امروزه در مناطق لرزه‌خیز جهان نسبت به استقرار شبکه‌های شتاب‌نگار و لرزه‌نگاری اقدام می‌گردد تا پس از ثبت سیگنال ارتعاشات نیرومند زمین از تعداد زیادی زمین‌لرزه‌ها در گستره این شبکه‌ها بتوانند به تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی اقدام نمایند و بر پایه این نقشه‌ها بارگذاری طیف‌های زمین‌لرزه بر روی سازه‌های مذکور را تحلیل نمایند. پردازش سیگنال زلزله، مطالعه ایجاد، انتشار و نگاشته شدن موج‌های الاستیک^۲ در زمین و سایر سیاره‌ها و مطالعه چشمه ایجاد کننده این موج‌ها می‌باشد. در پدیده زلزله این سیگنال‌ها (شتاب‌نگاشت‌ها) که در واقع حرکات قوی زمین را نشان می‌دهند توسط دستگاه شتاب‌نگار اندازه‌گیری شده و به صورت شتاب‌نگاشت ارائه می‌گردد [۲].

همان‌طور که بیان شد لرزه‌نگارها جنبش زمین را به صورت تابع زمان ثبت می‌کنند. لرزه‌نگارها حاوی اطلاعاتی از "چشمه" و "میانه" هستند. از موج‌های لرزه‌ای می‌توان برای مطالعه طبیعت و موقعیت "چشمه" ایجاد کننده آن‌ها استفاده کرد. از سوی دیگر اگر "زمان مبنا" (زمانی که موج‌ها از چشمه گسیل می‌شوند) مشخص باشد، با محاسبه "زمان دریافت" در گیرنده می‌توان "زمان سیر" را که برای گذر از میانه صرف شده است، حساب نمود و بنابراین سرعت سیر موج‌ها را نیز تخمین زد. از سوی دیگر اگر دامنه موج‌ها در هنگام گسیل شدن از چشمه مشخص باشد، با دانستن دامنه آن‌ها در زمان رسیدن به گیرنده می‌توان اطلاعات بیشتری در مورد خواص فیزیکی میانه به دست آورد [۲].

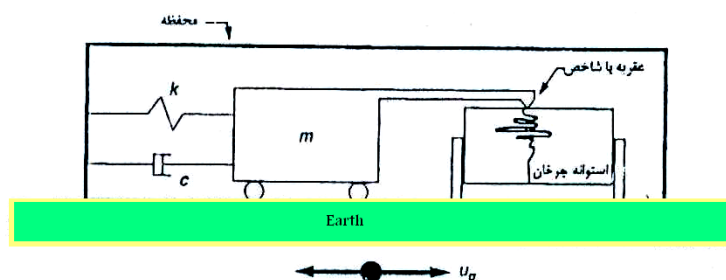
¹ Kinetics

² Elastic

۲-۱- ثبت رخداد زلزله در قالب سیگنال‌های زلزله

ثبت وقایع زلزله به سال ۷۸۰ قبل از میلاد برمی‌گردد، اما اولین اندازه‌گیری دقیق حرکات مخرب زمین مربوط به زلزله Long Beach کالیفرنیا در سال ۱۹۳۳ می‌باشد. از آن تاریخ تاکنون، اندازه‌گیری زلزله پیشرفت چشم‌گیری داشته است و دستگاه‌های مختلفی جهت اندازه‌گیری زلزله ساخته شده‌اند که به آن‌ها لرزه‌نگار می‌گویند. لرزه‌نگارها برای اندازه‌گیری زلزله‌های نسبتاً ضعیف به کار می‌روند و گزارش‌های حاصل از آن‌ها به لرزه‌نگاشت موسوم است [۱].

حرکات قوی زمین معمولاً توسط «شتاب‌نگار» اندازه‌گیری شده و به صورت «شتاب‌نگاشت» ارائه می‌شود. ساده‌ترین شتاب‌نگار را همان‌طور که در شکل (۱-۱) مشخص شده است می‌توان با یک سیستم یک درجه آزادی جرم، فنر و میرا کننده نمایش داد. یک استوانه چرخان به وسیله یک قلم متصل به یک وزنه به محفظه شتاب‌نگار اتصال دارد. وزنه دستگاه توسط یک فنر و میرا کننده به صورت موازی هم و به محفظه متصل بوده و محفظه به زمین اتصال دارد. از آنجایی که فنر و میرا کننده صلب نیستند، حرکت جرم و زمین در خلال زلزله یکسان نمی‌باشند و حرکات نسبی جرم و زمین توسط قلم بر روی استوانه چرخان دستگاه ثبت می‌گردد.



شکل (۱-۱): شتاب‌نگار ساده جرم _ فنر _ میرا کننده [۱]

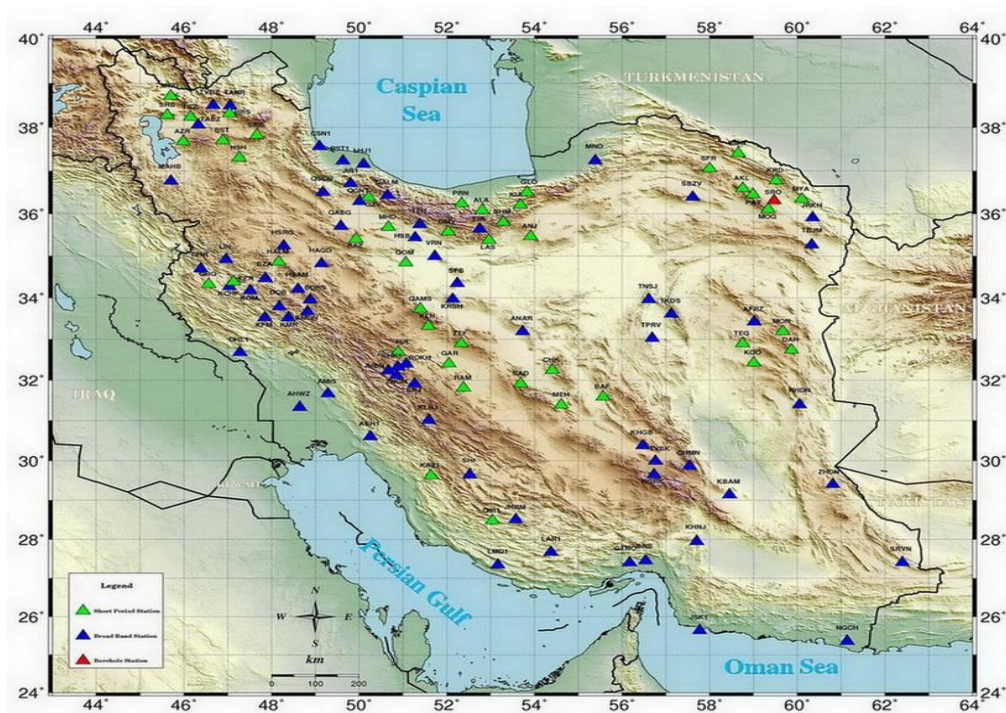
هر ایستگاه لرزه‌نگاری دارای سه لرزه‌نگار است: یکی حرکات را در جهت قائم و دو لرزه‌نگار دیگر حرکات را در دو جهت افقی عمود بر هم ثبت می‌نمایند.

۳-۱- شبکه‌های لرزه‌نگاری در ایران

مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، کار ثبت و تعیین محل زمین‌لرزه‌ها را از سال ۱۳۳۷ (۱۹۵۸ میلادی)، با احداث اولین ایستگاه لرزه‌نگاری در تهران آغاز کرد. در دهه ۱۹۶۰ میلادی ایستگاه‌های لرزه‌نگاری کشور به پنج ایستگاه آنالوگ نصب شده در شهرهای تهران، تبریز، مشهد، شیراز و کرمانشاه افزایش یافت. از این تعداد سه ایستگاه تبریز، مشهد و شیراز زیرمجموعه شبکه لرزه‌نگاری استاندارد جهانی^۱ (WWSSN) بودند. در سال ۱۳۵۴ (۱۹۷۵ میلادی) یک آرایه هفت ایستگاهی موسوم به آرایه بلند دوره ایران^۲ (ILPA) برای اهداف خاص و نیز فراهم آوردن اطلاعات لرزه‌ای مناسب جهت تحقیقات زلزله‌شناسی در جنوب غربی تهران نصب گردید. در سال‌های ابتدایی دهه ۱۳۶۰ هجری شمسی در چند نقطه دیگر کشور از جمله بروجن، مینودشت، سد مهاباد، قمصر کاشان و قلعه قاضی هرمزگان، توسط مؤسسه ژئوفیزیک ایستگاه‌های لرزه‌نگاری آنالوگ نصب و راه‌اندازی گردید. تا سال ۱۳۷۴، ثبت و گزارش زمین‌لرزه‌های رخ داده در کشور توسط این ایستگاه‌های لرزه‌نگاری آنالوگ صورت می‌گرفت. با تأمین تجهیزات لرزه‌نگاری جدید از نوع رقمی، نصب دستگاه‌های لرزه‌نگاری جدید در سال ۱۳۷۴ در شبکه‌های لرزه‌نگاری تهران و تبریز آغاز و در سال‌های بعد با نصب تجهیزات در شبکه‌های لرزه‌نگاری سمنان، قوچان، یزد، ساری، اصفهان، شیراز، مشهد، کرمانشاه، بیرجند و خرم‌آباد شبکه‌های لرزه‌نگاری توسعه یافتند. در سال ۱۳۸۹ نیز، شبکه‌های لرزه‌نگاری میناب، کرمان، شهرکرد و همدان نیز به صورت آزمایشی راه‌اندازی شده است. ایستگاه‌های لرزه‌نگاری این شبکه‌ها مجهز به لرزه‌نگارهای کوتاه دوره، باند متوسط، باند پهن و باند بسیار پهن سه مؤلفه‌ای هستند. این مرکز در حال حاضر با بهره‌گیری از ۱۰۸ ایستگاه لرزه‌نگاری رقمی، در قالب بیست شبکه لرزه‌نگاری محلی، چهار پایگاه لرزه‌نگاری تک ایستگاهی و یک ایستگاه درون‌چاهی فعالیت دارد، که بسیاری از مناطق لرزه‌خیز کشور را تحت پوشش قرار می‌دهد. در شکل (۲-۱) شبکه‌های لرزه‌نگاری مرکز لرزه‌نگاری کشوری نشان داده شده است [۳].

^۱ World-Wide Standardized Seismographic Network (WWSSN)

^۲ Iranian Long Period Array (ILPA)



شکل (۱-۲): شبکه‌های لرزه‌نگاری مرکز لرزه‌نگاری کشوری

شبکه‌های لرزه‌نگاری مطابق برنامه‌های کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت در نواحی مختلف کشور در حال توسعه و افزایش است. اطلاعات ثبت‌شده توسط ایستگاه‌های لرزه‌نگاری در سطح کشور، به‌طور پیوسته از طریق سیستم رادیویی به مراکز شبکه‌ها در استان‌ها مخابره شده و مراکز شبکه‌ها نیز به دو طریق VPN و ماهواره‌ای، به‌طور پیوسته با مرکز لرزه‌نگاری کشوری در تهران ارتباط دارند. ایستگاه‌های لرزه‌نگاری کوتاه‌مدت مجهز به لرزه‌نگار SS1 (با فرکانس ویژه یک هرتز) است. ایستگاه‌های لرزه‌نگاری با باند متوسط مجهز به لرزه‌نگارهای Trillium-40s و ایستگاه‌های لرزه‌نگاری باند پهن و بسیار پهن مجهز به لرزه‌نگارهای CMG3ESP-120s و CMG3T-360s و Trillium-240s هستند. [۱]

توسعه و راه‌اندازی مراکز حاکی از اهمیت موضوع ثبت سیگنال‌های زلزله می‌باشد. در سال‌های اخیر نیز نصب تجهیزات و بکارگیری استانداردهای نوین در دستور کار این مرکز قرار گرفته است.

۴-۱- مشخصه‌های حرکت زمین بر اثر زلزله

یکی از نکات مهم در انجام مطالعات سیگنال‌های زلزله که در حقیقت از گام‌های اصلی و اساسی آن می‌باشد، اندازه‌گیری تکان‌های ناشی از زلزله است. برای اندازه‌گیری نسبی تکان‌های شدید زمین از سه عامل دامنه نوسانات، فرکانس و مدت‌زمان نوسانات استفاده می‌شود. بزرگ بودن دامنه نوسانات اثرات تخریبی شدیدتری را موجب می‌شود که به‌وسیله سه ویژگی شتاب، سرعت و تغییر مکان در هر لحظه توصیف می‌گردد. فرکانس امواج زلزله از این نظر اهمیت دارد که در صورت همگامی با فرکانس طبیعی سازه ممکن است موجب تشدید و افزایش اثرات تخریبی گردد؛ البته پدیده تشدید بر سازه به‌ندرت و آن‌هم در مقیاس کوچک ممکن است رخ دهد و عملاً نیروها به مقادیر خیلی بزرگ نمی‌توانند برسند. مدت‌زمان نوسانات هم عامل مهم دیگری در کاهش مقاومت سازه و ویرانی آن در اثر تکرار نیروهای وارده می‌باشد.

به عبارت دیگر مشخصه‌هایی از حرکت زمین بر اثر زلزله که در کاربردهای مهندسی زلزله از اهمیت زیادی برخوردارند حرکت اوج زمین، مدت حرکات شدید و محتوای فرکانسی است. هر یک از این پارامترها بر پاسخ سازه تأثیر می‌گذارند. حرکت اوج زمین عمدتاً بر دامنه تأثیر می‌گذارد. حرکت اوج زمین با شتاب اوج متوسط و مدت طولانی ممکن است بیش از حرکتی با شتاب بزرگ‌تر و مدت کوتاه‌تر خسارت به بار آورد. مدت حرکت شدید اثر چشمگیری بر شدت لرزش دارد. محتوای فرکانسی و شکل طیف‌ها با فرکانس‌ها یا زمان‌های تناوب لرزش سازه رابطه دارند. در هر سازه، زمانی که محتوای فرکانسی حرکت و فرکانس لرزش سازه به یکدیگر نزدیک باشند، زلزله بیشتر تقویت می‌شود [۱].

۱-۵- سیگنال مصنوعی^۱ زلزله

سیگنال‌های مناسب برای تحلیل هر سازه، سیگنال‌هایی هستند که دارای مشخصاتی مشابه با خصوصیات برآورد شده برای محل ساخت‌گاه مورد نظر باشند؛ اما با توجه به تعداد و تنوع کم شتاب‌نگاشت‌های ثبت و پردازش شده، انتخاب سیگنال‌های متناسب با واقعیت برای طراحی، در برخی موارد با اشکال مواجه شده و در مواردی حتی ناممکن می‌باشد. سیگنال‌های حاصل از زلزله‌های به وقوع پیوسته در مناطق دیگر نیز با توجه تفاوت‌های موجود در خصوص مشخصات زمین‌شناسی و زمین‌ساختی در اکثر مواقع معیارهای مورد نظر را ارضاء نمی‌کنند. در چنین شرایطی استفاده از شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی که عموماً به روش‌های آماری، با توجه به ویژگی‌های مورد انتظار ساخته می‌شوند، می‌تواند یک راه حل مناسب برای آنالیز و طراحی سازه‌های مهم باشد. همچنین با توجه به اینکه سیگنال‌های ثبت‌شده در هر منطقه، شرایط لرزه‌خیزی همان منطقه را در برداشته و احتمال تکرار چنین سیگنالی در مناطق دیگر بسیار پایین می‌باشد، لذا استفاده از چنین شتاب‌نگاشت‌هایی در مناطق مختلف مناسب نمی‌باشد [۳].

بدین جهت بررسی زلزله‌های واقعی به جهت شناخت دقیق ویژگی‌های آن‌ها، جهت تولید سیگنال‌های مصنوعی که تا حد امکان شبیه نگاشت‌های واقعی زلزله باشد، حائز اهمیت است. این سیگنال‌ها ابتدا توسط دستگاه شتاب‌نگار ثبت‌شده، سپس طی یک فرآیند محاسباتی خطاهای وارد شده در ثبت آن‌ها تصحیح شده و اصطلاحاً سیگنال اصلاح شده به دست می‌آید.

با توجه به موارد فوق تولید سیگنال‌های مصنوعی مناسب، با توجه به کمبود سیگنال‌های ثبت‌شده زلزله و همچنین محدودیت و اشکالات موجود در آن‌ها از یک سو و استفاده روزافزون از آنالیز دینامیکی سیگنال تاریخچه زمانی جهت محاسبه پاسخ سیستم‌ها از طرف دیگر، امروزه امری ضروری به نظر

^۱ - Artificial Accelerogram

می‌رسد. این سیگنال‌ها بایستی به نحوی ایجاد شوند که خصوصیات لرزه‌خیزی مناطق گسترده‌ای را در بر داشته و برای طراحی سازه مناسب باشند.

تا به حال روش‌های مختلفی جهت تولید سیگنال‌های مزبور ارائه شده است که هر کدام برگرفته از یک الگوی خاص می‌باشد استفاده هر یک از الگوها در مطالعات مهندسی زلزله منوط به تعیین پارامترهای الگو به نحو مطلوب و در نظر داشتن نقاط ضعف آن به گونه‌ای شایسته است. در بیشتر الگوهای ارائه شده یک سری سیگنال مصنوعی بر اساس تئوری ارتعاشات تصادفی تولید شده و در نهایت به گونه‌ای اصلاح می‌شوند که طیف پاسخ آن شبیه به طیف هدف باشد.

از مجموعه طیف‌های سیگنال زلزله طیف پاسخ از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به‌طور خلاصه می‌توان گفت، طیف پاسخ طیفی است که اثر حرکت زمین را بر سازه‌ها با دوره زمانی طبیعی مختلف مشخص می‌کند. در فرمول محاسبه طیف پاسخ اگر به محاسبه طیف مربوط به یک سیگنال به‌عنوان یک مسئله مستقیم توجه شود، تعیین سیگنال با توجه به طیف درواقع معکوس مسئله می‌باشد. این عمل با توجه به عدم یک‌به‌یک بودن رابطه سیگنال و طیف پاسخ به لحاظ رابطه‌ای غیرممکن است، یعنی نمی‌توان رابطه‌ای برای این منظور ارائه نمود. لذا مسئله‌ای که با آن روبرو هستیم یافتن الگویی برای انتقال از فضای مربوط به طیف پاسخ به سیگنال متناظر می‌باشد.

شبکه‌های عصبی مصنوعی، می‌توانند به استخراج چنین الگوهایی کمک نمایند. این شبکه‌ها که به همراه منطق فازی و الگوریتم‌های تکاملی از مؤلفه‌های اساسی سیستم‌های هوشمند به شمار می‌آیند، اکنون با ساختارهای متنوع وسیعی در بیشتر علوم توسعه یافته‌اند. باوجود قابلیت‌هایی از جمله یادگیری، تعمیم، پردازش موازی و... که یک شبکه عصبی می‌تواند داشته باشد، در این مسئله از همین قابلیت‌های منحصربه‌فرد جهت رسیدن به پاسخ مناسب استفاده خواهد شد. یک شبکه همانند یک جعبه سیاه می‌باشد که قادر است با ارائه یک ورودی، خروجی متناظر با آن را پس از آموزش ارائه دهد؛ اما شاید یافتن این روابط ممکن نباشد. این درست مشابه رفتار مغز انسان می‌باشد، به‌گونه‌ای که اغلب نمی‌توانیم

کلیه مواردی را که در تصمیم‌گیری‌های خود از آن بهره می‌گیریم، ارائه نمائیم، اما می‌دانیم این تصمیم برگرفته از تجربیاتی است که ممکن است در مدت‌زمان طولانی کسب کرده باشیم. با این همانندسازی، شبکه‌ها برای آموزش عموماً نیاز به مدت‌زمان زیادی خواهند داشت، اما پس از یادگیری به سرعت می‌توانند پاسخگوی مسائل مربوطه باشند [۴].

اگر به ورودی و خروجی‌ها در این مسئله توجه شود، دیده می‌شود که اگرچه طیف‌ها عموماً از الگویی خاص تبعیت می‌کنند، اما به هیچ عنوان در سیگنال‌ها نمی‌توان چنین نظم‌ی را حتی برای چند مورد جزئی جستجو کرد. لذا بهتر است به نحوی خروجی‌ها را از جهاتی متناظر با یکدیگر نمائیم تا بتوان نسبت به آموزش صحیح شبکه امیدوار باشیم. یک‌راه برای انجام چنین عملی تفکیک فرکانسی سیگنال‌های زلزله می‌باشد که در این مسئله از آنالیز ویولت (موجک) و فوریه جهت انجام چنین تجزیه‌ای استفاده شده است.

به‌طور کلی ویولت‌ها قادرند تا یک سری زمانی را به چندین تراز مجزا تجزیه نمایند، به گونه‌ای که هر تراز یک حریم خاص فرکانسی را پوشش دهد. اگر تبدیل فوریه را به عنوان یک نگاشت در حوزه فرکانس - دامنه تلقی کنیم، ویولت‌ها تبدیلی در حوزه زمان-مقیاس محسوب می‌شوند که مقیاس را در اینجا متناظر با فرکانس در نظر می‌گیرند [۵].

این نظریه قادر است تا در فرآیندهای تصادفی نظیر زلزله بتواند جزئیات فرکانسی در هر لحظه زمانی خاص را به دست آورد و از ویژگی‌های بارز آن از دست ندادن زمان است. در نهایت با ترکیب موارد فوق روشی جهت تولید سیگنال‌های مصنوعی متناظر با طیف پاسخ ارائه خواهد شد.

با توجه به ماهیت تصادفی زلزله، امکان پیش‌بینی مشخصات دقیق رخداد یک زلزله در منطقه‌ای مشخص، بعید به نظر می‌رسد. لذا هدف از تولید سیگنال‌های مصنوعی، تولید رکوردهایی است که به لحاظ تاریخیچه زمانی، شکلی مشابه با زلزله‌های واقعی ثبت شده داشته باشند و همچنین در کنترل چند

پارامتر مهم پر کاربرد در مهندسی زلزله مرتبط با آن‌ها، به یک دقت قابل قبولی دست یابیم؛ بنابراین مهم‌ترین پارامترها کنترل‌کننده سیگنال مصنوعی زلزله عبارت‌اند از:

- داشتن ماهیت تصادفی

- شکل ظاهری مشابه با رکوردهای ثبت‌شده

- حداکثر حرکت زمین (PGA)^۱

- مدت‌زمان ارتعاش

- محتوای فرکانسی

در این رساله سعی خواهد شد در تولید سیگنال مصنوعی دارا بودن شرایط فوق لحاظ گردد.

۱-۶- ضرورت طرح مسئله

کشور ایران با قرار داشتن بر روی کمربند زلزله آلپ - هیمالیا همواره در معرض خطر زلزله‌های مخرب بوده است. شرایط زمین ساختی ایران ایجاب می‌کند که مسئله زلزله با حساسیتی ویژه مورد توجه قرار گیرد. خوشبختانه این امر در سال‌های اخیر توسط مسئولان ذی‌ربط با روندی فزاینده صورت گرفته است، به نحوی که اکنون لزوم طراحی سازه‌ها در برابر زلزله حتی برای عامه مردم نیز کاملاً پذیرفته شده است. همان‌طور که بیان شد علت اصلی خرابی‌های وارد بر ساختمان‌ها در طول زلزله پاسخ آن‌ها نسبت به حرکات زمین و یا به عبارت دیگر نحوه مقابله ساختمان‌ها با نیروهای وارده از جانب زلزله می‌باشد.

امروزه یکی از متداول‌ترین روش‌های تحلیل و طراحی سازه‌ها در برابر زلزله، آنالیز طیفی است که سال‌هاست مبنای محاسبه نیروی زلزله وارد بر سازه‌ها مخصوصاً ساختمان‌های معمولی می‌باشد. یک اشکال عمده روش آنالیز طیفی برای تحلیل و طراحی سازه‌ها، ناتوانی آن در تأمین اطلاعات زمانی در مورد پاسخ و رفتار سازه است؛ که ناشی از مبنای تهیه طیف‌های پاسخ طرح می‌باشد.

¹¹ Peak Ground Acceleration

بدین جهت از مهم‌ترین دلایل نیاز به تولید سیگنال مصنوعی زلزله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- از مهم‌ترین بخش‌های طراحی سازه‌ها در برابر زلزله نحوه محاسبه نیروی زلزله وارد بر آن‌ها باشد [۶].

- امروزه اکثر آئین‌نامه‌های معتبر دنیا دیدگاه خود را نسبت به طراحی سازه‌ها (به‌خصوص سازه‌های مهم از قبیل نیروگاه‌های برق، سدها، برج‌های بلندمرتبه، پل‌ها، تجهیزات حساس به ارتعاش، شریان‌های حیاتی و...) عوض کرده، توجه بیشتری نسبت به آنالیزهای تاریخچه زمانی (خطی و بخصوص غیرخطی) دارند. بعلاوه در اختیار داشتن سیگنال منطبق با طیف‌های طراحی یکی از مهم‌ترین مسائل در آنالیزهای تاریخچه زمانی غیرخطی می‌باشد.

- به علت عدم وجود سیگنال مناسب در بسیاری از مناطق (چه از نظر تعداد و چه از نظر ناقص و غیرقابل اطمینان بودن سیگنال‌های ثبت‌شده) و از طرف دیگر مزایای استفاده از آنالیز تاریخچه زمانی، ضروری است که در بسیاری از موارد تعدادی سیگنال مصنوعی در منطقه مورد نظر تولید شود.

۱-۷- ساختار تحقیق

نتایج این تحقیق در شش فصل ارائه می‌گردد:

فصل اول شامل کلیات، طرح مسئله و ضرورت پرداختن به این مسئله می‌باشد و در فصل دوم ضمن مطالعه روش‌های پیشین به ارائه گزارشی از آنها پرداخته خواهد شد. در فصل سوم به معرفی اصول و مبانی نظری ابزارهای به‌کار گرفته شده در این رساله پرداخته می‌شود و در فصل چهارم پارامترهای سیگنال زلزله و طیف‌های متفاوت حاصل از سیگنال تشریح خواهد شد. فصل پنجم به معرفی روش‌های جدید بر مبنای ارتقاء الگوهای معرفی شده در پژوهش‌های گذشته و روند انجام آن‌ها می‌پردازد. در این روش‌ها با استفاده از نظریه موجک، فوریه، الگوریتم‌های مختلف فشرده‌سازی، الگوریتم‌های تکاملی و شبکه‌های عصبی مصنوعی به تولید سیگنال مصنوعی پرداخته خواهد شد. فصل ششم نیز به جمع‌بندی موارد مطرح شده و ارائه پیشنهادهای جدید می‌پردازد.

فصل دوم: پیشینه تحقیق

۲-۱- مروری بر پژوهش‌های گذشته

موضوع تولید سیگنال مصنوعی زلزله از دیرباز مورد توجه پژوهش‌گران حوزه‌های مختلف بوده است و در این خصوص مقالات متعددی به چاپ رسیده است [۸-۲۵] به طوری که در سال‌های اخیر نیز چند پژوهش چاپ شده در نشریات معتبر در این زمینه ارائه و مورد مطالعه قرار گرفته است. مهندسین سازه اغلب از طیف پاسخ زلزله برای طراحی و ارزیابی رفتار لرزه‌ای سازه‌ها و ساختمان‌ها در برابر زلزله استفاده می‌کنند. یک اشکال عمده روش آنالیز طیفی برای تحلیل و طراحی سازه‌ها، ناتوانی آن در تأمین اطلاعات زمانی در مورد پاسخ و رفتار سازه است؛ که ناشی از مبنای تهیه طیف‌های پاسخ طرح می‌باشد. امروزه استفاده از تحلیل تاریخچه زمانی جهت تحلیل و طراحی سازه‌های مهم یکی از مراحل اجتناب‌ناپذیر در جریان طراحی آن‌ها می‌باشد. از سوی دیگر تغییر رویکرد آئین‌نامه به سمت طراحی بر اساس سطح عملکرد، نیاز به در اختیار داشتن سیگنال را بیش از پیش آشکار نموده است. همچنین مباحث نوینی مانند کنترل سازه^۱، تنها با استفاده از سیگنال امکان‌پذیر می‌باشد. بنابر همین احساس نیاز محققین فراوانی از اواخر دهه ۱۹۵۰ اقدام به مدل‌سازی حرکت‌های زمین و تولید سیگنال مصنوعی نموده‌اند. در این فصل سعی شده تا با توجه به تحقیقات انجام شده مروری کوتاه بر روی این تلاش‌ها داشته باشیم.

۲-۲- روش‌های مختلف تولید سیگنال مصنوعی زلزله

در تولید سیگنال مصنوعی باید به دو مطلب توجه خاص داشت:

- ۱- رفتار تاریخچه زمانی سیگنال تولید شده همانند و غیرقابل تشخیص از زلزله واقعی شود. به بیان دیگر شکل ظاهری سیگنال‌های تولید شده تفاوت قابل تشخیصی با زلزله‌های ثبت شده نداشته باشند.
- ۲- طیف پاسخ سیگنال تولید شده باید تا حدود زیادی منطبق بر طیف پاسخ طرح باشد تا حاوی خصوصیات منطقه خاص مورد نظر باشد.

^۱ Control of Structure

اگرچه طبیعت تصادفی زلزله برای مهندسان زلزله و زلزله شناسان مشخص است ولی اساساً از روش‌های مختلفی برای تخمین حرکت استفاده می‌شود. مهندسين به صورت عمیق به روش‌های تجربی که در آن‌ها زلزله از بیشینه بزرگا، محتوای فرکانسی و مدت زمان حرکت با اطلاعات موجود به وجود می‌آید، تکیه دارند.

روش‌های تولید سیگنال مصنوعی زلزله را به‌طور کلی به چهار دسته تقسیم می‌کنند:

۱- روش‌های تصادفی^۱

۲- روش‌های تئوری موج^۲

۳- روش‌های ترکیبی^۳

۴- روش‌های نوین

در ادامه به بررسی هریک از روش‌های فوق می‌پردازیم:

۲-۲-۱- روش‌های تصادفی

در روش‌های تصادفی، سیگنال به‌صورت نویز تصادفی گوسی^۴، با یک پهنای باند فیلتر شده لحاظ می‌گردد، به نحوی که شکل طیف متناظر با سیگنال، توسعه مدل تجربی لرزه شناختی، برای منبع و فرآیند انتشار برای یک منطقه خاص باشد. یکی از مهم‌ترین مزایای این روش‌ها سادگی و کم‌هزینه بودن آن‌هاست [۲۶].

اولین سیگنال‌های تولیدشده توسط این روش در اواخر دهه ۵۰ و اوایل دهه ۶۰، توسط محققین مختلفی از جمله گودمن، روزنبلوس و نیومارک^۵، تولید شد. آنان سیگنال زلزله را به‌صورت نویز سفید^۶

¹ Stochastic Methods

² Ray-Theory Methods

³ Hybrid Method

⁴ Gaussian Random Noise

⁵ Good man, Rosenbluth and Newmark

⁶ White Noise

با استفاده از فرآیند تصادفی و فن‌های مختلف جهت سازگاری با طیف پاسخ مدل کردند. پس از آن، این روش‌ها به دو روش الگوی ایستا و الگوی غیر ایستا^۱ تقسیم‌بندی شد [۲۷].

اولین بار هاسنر^۲ (۱۹۶۲-۶۴) سیگنال زلزله را به صورت فرآیند تصادفی مدل کرد. او سیگنال را به صورت دنباله پالس‌های تصادفی با دامنه معین و فواصل زمانی تصادفی شبیه‌سازی کرد. بعدها، سیگنال با ترکیب یک تناوب کامل از موج‌های سینوسی به صورت بخش تصادفی در زمان با فرکانس و دامنه سازگار با یک توزیع احتمالی محاسبه شده به دست آمد [۲۸].

سپس جنینگز، هاسنر و تسای^۳ (۱۹۶۸)، سیگنال زلزله سازگار با طیف طرح را به وسیله تابع تصادفی نوسانی و ضرب آن در یک تابع پوش به دست آوردند [۲۹].

ماهیت تصادفی بودن سیگنال‌های ثبت شده گذشته و غیرقابل پیش‌بینی بودن سیگنال اتفاقی آینده، ضرورت الگوی غیر ایستا را هرچه بیشتر نشان می‌دهد؛ بنابراین بیان حرکت زمین با فرآیندهای تصادفی لازم و ضروری به نظر می‌رسد. غیر ایستا بودن در این روش‌ها با فرآیندهای مختلفی می‌تواند ایجاد شود، از جمله:

- ۱- با ضرب تابع پوش غیر ایستا در یک سری اتفاقی ایستای زمانی
- ۲- با تغییر محتوای فرکانسی سیگنال زلزله به صورت تابعی از زمان
- ۳- با اعمال تغییر فاز زمانی به منبع ساده زلزله تا منبع ساده زلزله با موج S و تابش P به تنهایی مدل شود [۳۰].

- ۴- با عبور دادن نویز سفید گوسی از مدل ارائه شده برای ایجاد حالت غیر ایستا در مراحل شبیه‌سازی
- ۵- با ترکیب موج‌های سینوسی میرا شده [۳۱].

تسای (۱۹۷۲) جهت تطبیق هر چه بیشتر طیف پاسخ سیگنال تولید شده با طیف طرح، سیگنال مصنوعی را با استفاده از تکنیک‌های بالا و پایین بردن طیف پاسخ تولید کرد. در این روش پایین بردن

¹ Stationary and Non-Stationary

² Housner

³ Jennings, Housner, Tsai

طیف، عبارت است از گذراندن سیگنال اختیاری ثبت شده از مجموعه فیلترهای پایین گذر فرکانس و بالا بردن طیف از جمع آثار حرکت های سینوسی به دست آمده. با در اختیار داشتن طیف و با استفاده از این روش، می توان سیگنالی ایجاد کرد که طیف پاسخ آن تا حدود زیادی منطبق بر طیف طرح باشد [۳۲].

اسکانلن و ساچس^۱ (۱۹۷۴) روشی ارائه کردند که بر پایه روش چنینگز و هانسر و تسای برای تولید چندین سیگنال متنوع و قابل قبول که تمامی آن ها می توانست بر طیف پاسخ طرح منطبق باشد، قرار داشت. به نظر آن ها تولید تنها یک سیگنال قطعی خاص غیرمنطقی به نظر می رسید. در این روش آن ها طیف فوریه سیگنال انتخابی را به گونه ای اصلاح کردند که طیف پاسخ آن بر طیف طرح مورد نظر انطباق قابل قبولی داشته باشد [۳۳].

ساراگونی و هارت^۲ (۱۹۷۴) با تعمیم تحقیقات قبلی صورت گرفته، روش نوینی را برای تولید سیگنال مصنوعی زلزله ابداع کردند. در این روش، آن ها از ترکیب تغییرات زمانی متوسط مربعات دامنه ها و محتوای فرکانسی استفاده کردند تا روند آنالیز را به واقعیت نزدیک تر شود [۳۴].

لوی و ویلکینسون^۳ (۱۹۷۶) تعداد زیادی از نقاط فرکانسی نزدیک به هم را به گونه ای انتخاب کردند که در نقاط نصف توان، فرکانس های الحاقی باهم هم پوشانی داشته باشند تا تاریخچه زمانی هایی تولید شود که در تمام فرکانس های طیف حائز مقادیر قابل توجهی باشند. آن ها حرکت های سینوسی را بر هم منطبق کرده و نتیجه را در تابع پوشی ضرب کردند [۳۵].

کاول^۴ (۱۹۷۸) روش نوینی را بر مبنای اصلاح روش قبلی ارائه داد که در آن برای به دست آوردن طیف پاسخ با اصلاحات مطلوب، طیف فوریه یک تاریخچه زمانی آزمایشی اصلاح می شود. ترتیب مراحل در این روش بدین صورت است که از یک تاریخچه زمانی انتخاب شده به عنوان تقریب اولیه در قدم های

¹ Scanlan and Saches

² Saragoni and Hart

³ Levy and Wilkinson

⁴ Kaul

متوالی با تغییر و همگرا کردن به صورت یکنواخت به طیف هدف، تاریخچه زمانی طراحی به دست می‌آید [۳۶].

وانگ و تریفوناک^۱ (۱۹۷۹)، یک روش مهندسی برای تولید سیگنال مصنوعی ارائه کردند که سیگنال تولید شده با استفاده از این روش:

۱- دارای طیف دامنه فوری سازگار با طیف محاسبه شده از سیگنال‌های ثبت شده با ویژگی‌های خاص از جمله مقدار بزرگی زلزله (M)، فاصله تا ایستگاه (R) و ضرایب اصلاح شده مرکالی (MMI) برای یک سایت مشخص

۲- دارای مدت زمان رخداد زلزله که سازگار با مشاهدات و مقیاس کردن تجربی زمان بر اساس M ، R و یا MMI

۳- دارای خصوصیات گذرای زمانی کلی با ورود موج سازگار با ویژگی‌های پراکنشی موج بر^۲ در زیر ایستگاه ثبت زلزله می‌باشد [۳۷].

در همان سال اینگر و راو^۳ روشی را برای طراحی مهندسی ارائه کردند و در آن به بازسازی سری فوریه پرداختند و تضمین کردند که طیف پاسخ همواره بالای طیف طرح در هر مرحله از محاسبات باشد. روش آن‌ها از روند پیشنهادی توسط تریفوناک (۱۹۷۱) استفاده می‌کند، به همراه توابع مقیاس تجربی اخیر برای مشخص کردن دامنه و مدت زمان رخداد زلزله در ایستگاه ثبت زلزله، تکمیل شد. مشخصه اصلی این رویکرد غیر ایستا بودن فرکانس و دامنه در سیگنال‌های تولید شده است که در توافق کامل با اصول شناخته شده پخش موج و دامنه فوریه و فرکانس وابسته به زمان مقیاس شده منطبق بر سیگنال‌های ثبت شده می‌باشد [۳۱].

¹ Wong and Trifunac

² Wave Guide

³ Iyengar and Rao

بعدها یک روش ساده محاسباتی مؤثر توسط هنگ و مک گیور^۱ (۱۹۸۱) و روشی دیگر توسط بور^۲ و سیلوا^۳ پیشنهاد شد. این روش برای شبیه سازی هزاران سیگنال انتخاب شد که در محدوده وسیعی از پارامترها برای منبع، ساختگاه و مسیر موج متحرک بودند [۳۸].

نتایج این شبیه سازی بعدها برای ساخت یک مدل مهندسی استفاده شد. این مدل ساده و کم هزینه به عنوان مدل تصادفی حرکت زمین، از تئوری پارسوال^۴ برای پیش بینی جذر میانگین مربعات شتاب (ARMS) از طیف انتگرال مجذور شتاب استفاده می کند. نتایج حاصل از تئوری ارتعاشات تصادفی برای ایجاد ارتباط بین ARMS و ماکزیمم مقدار شتاب (a_{max}) مورد استفاده قرار گرفت. لحاظ کردن طیف w-squared با فرکانس قطع بالا (f_m) در کنار تضعیف غیر کشسان متداول کل مسیر و پارامتر ثابت تنش ($\Delta\sigma$) در کاربردهای روش شبیه سازی به عنوان عوامل مؤثر و موفق در پیش بینی ماکزیمم و جذر میانگین مربعات شتاب استفاده شده اند [۳۹].

بور^۵ (۱۹۸۳) بر خلاف روش های دیگر که پیش بینی حرکات لرزه ای زمین را به عنوان تابعی از مقاومت منبع لرزه ها با توابع مقیاس شده در حوزه فرکانس بیان می کند، حرکات قوی زمین را در هر دو حوزه فرکانس و زمان بیان می کند. در این روش مجموعه از سری های زمانی تصادفی پنجره بندی شده، فیلتر می شود به طوری که طیف دامنه به طور متوسط با طیف هدف مساوی باشد [۴۰].

بور و اتکینسون^۶ (۱۹۸۷) با استفاده از مدل تصادفی ارائه شده توسط هنکز و مک گیور مدل جدیدی را برای پیش بینی و تخمین طیف پاسخ بر روی سنگ بستر در شرق آمریکا ارائه کردند. در این روش قسمت بحرانی مدل، توسعه رابطه بین ممان لرزه ای و فرکانس گوشه^۷ بود.

¹ Hank and McGuire

² Boore

³ Silva

⁴ Parseval's Theorem

⁵ Boore

⁶ Boore and Atkinson

⁷ Corner Frequency

کیمورا و ایزومی^۱ (۱۹۸۹)، یک روش ساده مهندسی را برای کنترل مشخصات زلزله ارائه کردند که در آن زلزله با برهم‌نهی تابع ساده و ترکیب آن‌ها به وجود می‌آید. این روش بر پایه ۵ پارامتر لرزه‌ای شدت، فرکانس غالب، فرکانس مربوط به پوش، فاز اولیه (که شکل هندسی را معین می‌کند)، موقعیت مرکزی در نمودار زمانی با توجه به ارتعاش قرار داشت [۴۱].

اسپانوس و میگنولت^۲ (۱۹۹۰) روشی را جهت محاسبه میانگین متحرک (MA) و میانگین متحرک اتورگرسیون^۳ (ARMA) به منظور شبیه‌سازی فرآیندهای تصادفی چند متغیره با یک طیف هدف مشخص، ارائه دادند، در واقع روش ارائه شده در راستای رویکرد جدید به وجود آمده استفاده از مدل‌های اتورگرسیون در سری‌های زمانی سیگنال محسوب می‌شود [۴۲].

قدرتی و اشتیری و رحامی (۲۰۰۶) از تبدیل ویولت برای تولید سیگنال مصنوعی زلزله استفاده کرده‌اند. در این روش با استفاده از قابلیت ویولت در تفکیک سیگنال به دو بخش جزئیات و تقریب و اهمیت بخش تقریب سیگنال نسبت به جزئیات آن، سیگنال‌های مصنوعی تولید می‌شود. در تولید این سیگنال‌های مصنوعی، ضرایب جزئیات سیگنال‌های مختلف جایگزین هم شده و با ثابت نگه‌داشتن ضریب تقریب یک سیگنال خاص و با استفاده از معکوس تبدیل ویولت می‌توان به سیگنالی دست یافت که محتوایی شبیه به محتوای فرکانسی سیگنال اولیه داشته باشد [۴۳].

قدرتی، باقری و فدوی (۲۰۰۷) با استفاده از الگوی کانای-تجیمی و آنالیز ویولت، روشی را برای تولید سیگنال زلزله ارائه کردند، جهت به دست آوردن پارامترهای الگو، وجود حداقل یک سیگنال برای منطقه مورد مطالعه الزامی است.

آنالیز ویولت می‌تواند یک سیگنال را به دو جزء تقریب و جزئیات تجزیه کند، هرکدام از این سیگنال‌های جزئیات نیز یک بازه فرکانسی خاصی را پوشش می‌دهند. بدین ترتیب می‌توان از این ایده برای شبیه‌سازی سیگنال‌های زلزله سود جست، بدین‌صورت که سیگنال‌های جزئیات شبیه‌سازی می

¹ Kimura and Izuma

² Spanos and Mignolet

³ Auto Regressive Moving Average

شود. برای شبیه‌سازی سیگنال‌های جزئیات از الگوی کانای-تجیمی استفاده شده است و پس از تولید سیگنال‌های جزئی شبیه‌سازی شده، با جمع کلیه سیگنال‌های تقریب و اعمال تبدیل معکوس ویولت به سیگنال شبیه‌سازی شده دست می‌یابند [۴۴].

سوئی ران و همکاران^۱ (۲۰۰۷) با استفاده از الگوی تکاملی چگالی طیفی ناکایاما، برای یک بزرگا و فاصله مشخص، مدل تکاملی طیفی پیش‌بینی کردند. سیگنال‌های نا ایستا در زمان و فرکانس، منطبق بر طیف طرح بوده و بر اساس داده‌های ۸۰ سیگنال نزدیک گسل با بزرگای قوی و خاک سخت، به وجود آمدند [۴۵].

رضائیان و کیورقیان (۲۰۰۸)، روشی تصادفی برای حرکت‌های قوی زمین با استفاده از فیلتر کردن یک موج سفید ارائه کردند. در این روش، با مدل‌سازی شدت و تغییر مشخصات فیلتر در زمان، نا ایستا بودن سیگنال حاصل می‌شود [۴۶].

همان‌طور که ملاحظه می‌شود روش‌های ذکر شده بر پایه یک یا چند یک از اعمال زیر استوار است:

- ۱- با اعمال تغییر محتوای فرکانسی متغیر در زمان
- ۲- با استفاده از ترکیب موج‌های سینوسی میرا شده
- ۳- با ضرب یک تابع پوش غیر ایستا در یک سری زمانی تصادفی ایستا
- ۴- با عبور یک نویز تصادفی (سفید) گوسی در برخی از مراحل شبیه‌سازی
- ۵- با اعمال تغییر فاز به صورت تابعی از زمان به منبع لرزه‌زا جهت جداسازی موج‌های طولی و عرضی

۲-۲-۲- روش‌های تئوری موج و ترکیبی

روش‌های تئوری موج (به بیان دیگر روش‌های قطعی) با رویکرد متفاوت و نگاه قطعی‌تری نسبت به روش‌های تصادفی به پیش‌بینی و تولید سیگنال مصنوعی می‌پردازد. در این روش‌ها با استفاده از تئوری

^۱ Cui-ran et al

حرکت امواج، حرکت زمین به صورت یک تابع تجربی برای منشأ لرزه‌زا و یک سری توابع گرین^۱ برای یک مدل سازی پوسته‌ای مشخص، شبیه سازی می شود. روش های قطعی قابلیت پیش بینی مدل ها را به خوبی دارا بوده و لذا از مزایای این روش ها محسوب می شود. به طور کلی، این روش ها بر پیش بینی حرکت یک گسل با ابعاد مشخص و ویژگی های لغزش و سرعت گسیختگی معین تمرکز دارند که یا به صورت تصادفی، این مشخصات بر سطح گسل تغییر می کنند [۴۷] و یا از برهم نهی تصادفی میدان تشعشعی دایره ای نظری از چندین نقطه گسیختگی در روی گسل در یک نقطه خاص به دست می آیند [۴۸].

همچنین روش های ترکیبی، ترکیبی از روش های تصادفی و قطعی هستند که در آن ها انتشار امواج به صورت قطعی با یکی از روش های قطعی و رفتار آن به صورت تصادفی با یکی از روش های تصادفی مدل می شود. از دیدگاه دیگر می توان گفت که در روش های ترکیبی، از یک طرف با استفاده از تئوری امواج، پیش بینی اثرات انتشار موج به صورت قطعی انجام می شود و از طرف دیگر فاز هر موج به صورت تصادفی رفتار موج را به وجود می آورد.

پایه و اصول بنیادین بسیاری از روش های ترکیبی، تابع تجربی گرین می باشد که اولین بار توسط هارتزل^۲ (۱۹۷۸) معرفی شد. در این روش، الگوی تابش و انتشار گسیختگی به صورت قطعی مشخص می شود، تابش منبع و تأثیرات انتشار به صورت تجربی با فرض مدل 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 مدل کردن حرکت زمین از بین روش های دیگر است. در این روش، رکوردهای ثبت شده برای زلزله ها با مقدار بزرگی کمتر جمع شده، بعداً برای شبیه سازی گسیختگی یک زلزله بزرگ مورد استفاده قرار می گیرد [۴۹].

¹ Green

² Hartzell

در ادامه مهم‌ترین تحقیقات انجام شده در زمینه تولید سیگنال مصنوعی با استفاده از این روش‌ها را شرح می‌دهیم.

هادلی و هلنبرگر^۱ (۱۹۸۰)، حرکت‌های قوی زمین را در فواصل ۱۰ تا ۲۵ کیلومتری از مرکز زلزله با بزرگای بیشتر از ۶/۵ ریشتر، با استفاده از برون‌یابی مجموعه‌ای از سیگنال‌های ضعیف موجود، انجام دادند. در این روش زلزله‌های ضعیف به عنوان توابع گرین برای مدل کردن اجزاء گسل‌های بزرگ، مورد استفاده قرار گرفتند [۵۰].

اولسان و همکاران^۲ (۱۹۸۰) با استفاده از تابع فوریه-بسل به تجزیه مؤلفه‌های افقی زلزله‌های موجود پرداخته و سپس روشی ارائه کردند تا سیگنال مصنوعی بر طیف پاسخ الاستیک فضاهاى نیمه محدود ناهمگن منطبق شود. همچنین این روش قابلیت پیش‌بینی مؤلفه‌های قائم زلزله را نیز داشت [۵۱].

هلنبرگر و اورکوت^۳ (۱۹۸۲) با استفاده از توابع ساده‌شده گرین، که تنها شامل اثرات پخش هندسی بود و تأثیرات الگوی تابش و تابع دریافت^۴ را شامل نمی‌شد به تولید زلزله مصنوعی پرداختند. در این روش گسل به المان‌های گسسته تقسیم شده و حرکت هریک از المان‌ها با تاخیرات متناظر جمع شده و انتشار ترک و گسیختگی در سطح گسل شبیه‌سازی می‌شود. مؤلفه‌های تصادفی شامل سرعت لغزش گسل و انتشار گسیختگی برای شبیه‌سازی غیریکنواختی در گسیختگی دینامیکی می‌باشد. تغییرات زیاد در توزیع لغزش در گسل موجب بروز مشکلات فراوانی در برخورد با این قضیه می‌شود [۳۱].

سامرویل، سن و کوهی^۵ (۱۹۹۱) روشی را برای شبیه‌سازی سیگنال برای زلزله‌های بزرگ در مناطق متعدد تکتونیکی ارائه کردند. مدل حرکت زمین برای زلزله‌های بزرگ از مجموع و همکاری المان‌های کوچک گسل برای شبیه‌سازی انتشار گسیختگی در گسل ایجاد می‌شدند [۵۲].

¹ Hadley and Helmberger

² Olson et al

³ Helmberger and Orcutt

⁴ Receiver Function

⁵ Somerville, Sen, Cohee

انتشار از اجزاء گسل به وسیله تابع تجربی منبع که از پس لرزه ثبت شده یک زلزله به مقدار $M_w=7$ در فاصله نزدیک گسل به دست آمده و همچنین تابع گرین برای مدل کردن انتشار موج شبیه سازی می شود.

در این روش پیش بینی حرکت واقعی زمین که شامل دامنه های قطعی و مستقل و قطار امواج رسیده است برای تعیین خطر زلزله ضروری می باشد [۴۲].

هاچینگ^۱ (۱۹۹۴) مدل سینماتیکی کامپیوتری را برای اصلاح مدل های شبیه سازی زلزله ارائه کرد. این روش در سه مرحله انجام می شود:

۱- بررسی تأثیر مدل های گسیختگی سینماتیکی و پارامترهای گسیختگی بر روی سیگنال های مصنوعی

۲- ایجاد ارتباط بین مدل گسیختگی و سیگنال های مصنوعی

۳- تشریح این مطلب که مدل های ساده سینماتیکی زلزله استفاده شده در توابع تجربی گرین، آیا می توانند برای تولید سیگنال مصنوعی بکار روند و یا خیر.

او نشان داد که مدل های سینماتیکی ساده زلزله استفاده شده از توابع تجربی گرین می تواند لرزه-نگاشت های نزدیک به واقعیت را پیش بینی کند [۵۳].

سابتا و پاگلیز^۲ (۱۹۹۶) از ۹۵ سیگنال، ۱۷ زلزله مربوط به ایتالیا برای مطالعه روابط کاهندگی طیفی و تولید سیگنال مصنوعی زلزله استفاده کردند. سیگنال تولید شده توسط این روش تابعی از بزرگا، فاصله و زمین شناسی مربوط به منطقه بود. شبیه سازی غیر ایستا حرکت زمین توسط روش های تجربی که در آن، زمان و فرکانس از خصوصیات زلزله است، به وسیله طیف فیزیکی بیان شده است که در نهایت تئوری ممان طیفی به مورد غیر ایستا مرتبط گردید [۵۴].

¹ Hutching

² Sabetta and Pugliese

پیتارکا و همکاران^۱ (۲۰۰۰)، روشی بر مبنای توابع گرین مرکب برای بهره‌گیری از مزایای هر دو روش قطعی و تصادفی به منظور شبیه‌سازی دامنه وسیعی از زلزله‌ها، در مناطقی که سیگنال‌های قوی وجود ندارد، ارائه کردند. یک مدل ساده برای معرفی تأثیر الگوی پخش توابع تصادفی گرین در فرکانس‌های ۱-۳ هرتز ارائه شد و توانایی الگوی پیشنهادی با زلزله کوبه ژاپن مقایسه شد. همچنین توانایی این روش در مقایسه با روش‌های گذشته، مخصوصاً در مورد زلزله‌های نزدیک گسل نشان داده شده است [۵۵].

مینگ کوئی و همکاران^۲ (۲۰۰۵)، با استفاده از روش‌های جزئی تصادفی روشی ارائه کردند که در آن سیگنال زلزله‌های قوی، در ترکیب با توابع تجربی گرین حاصل می‌شوند. این روش در سه مرحله زیر انجام می‌شود:

- ۱- تقسیم زلزله‌های بزرگ به مجموعه‌ای از زلزله‌های کوچک‌تر
 - ۲- استفاده از سیگنال‌های زلزله‌های ثبت‌شده با سایز مناسب و با یک توزیع فضائی به عنوان سیگنال زلزله‌های کوچک و به مثابه توابع تجربی گرین.
 - ۳- با جمع این زلزله‌های کوچک به یک سیگنال واحد برای زلزله قوی می‌رسیم [۵۶].
- با بررسی روش‌های ارائه شده متوجه می‌شویم که اکثر روش‌های قطعی و ترکیبی، از توابع گرین (شامل: توابع تجربی گرین، توابع جزئی گرین و یا توابع مصنوعی گرین) استفاده می‌کنند. در این روش‌ها، پارامترهای لرزه‌ای ساخت گاهی، مشخصات و خصوصیات سیگنال‌های زلزله‌های موجود در تولید سیگنال مصنوعی زلزله نقش دارند. این روش‌ها، این قابلیت را دارند که نسبت به روش‌های تصادفی پاسخ مطلوب‌تری را ایجاد کنند.

^۱ Pitarka et al

^۲ Meng-qiu et al

۲-۳- روش‌های نوین

در اکثر روش‌های نوین با استفاده از تجزیه و تحلیل سیگنال‌های ثبت‌شده و الگوریتم‌های مختلف یادگیری که عموماً از الگوهای طبیعی الهام گرفته‌اند، به تولید سیگنال‌های سازگار با طیف طرح می‌پردازند. روش‌های نوین تولید سیگنال مصنوعی در دهه اخیر مورد استفاده مهندسين زلزله و زلزله‌شناسان قرار گرفته و یکی از بخش‌های تولید سیگنال مصنوعی شده‌اند. در ادامه به مهم‌ترین تحقیقات صورت گرفته پرداخته خواهد شد:

قابوسی و لین^۱ (۱۹۹۸)، با استفاده از توانایی شبکه‌های عصبی در یادگیری، توانستند از طیف پاسخ جهت تولید سیگنال مصنوعی استفاده کنند. آن‌ها دو شبکه عصبی را برای این منظور آموزش دادند: شبکه اول که یک شبکه عصبی تکرار شونده^۲ بود، برای فشردن داده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این شبکه قادر است که طیف فوریه سیگنال‌های واقعی را به بردارهایی با بعد کوچک‌تر منتقل کند. شبکه دوم که یک شبکه عصبی چندلایه پیشرو^۳ بود، ارتباط بین طیف پاسخ و طیف فوریه فشردن شده را برقرار می‌کند. در نهایت با اعمال طیف طرح به عنوان ورودی شبکه دوم و با اعمال یک نگاشت معکوس به سیگنال مصنوعی می‌رسیم. ایراد اساسی این روش این بود که تنها قادر به تولید تنها یک سیگنال بود [۱۹].

قابوسی و لین (۲۰۰۱)، روشی را ارائه کردند که بر مبنای روش قبلی خود بوده و تنها نقاط ضعف آن را برطرف می‌کرد. در این روش به جای شبکه عصبی چندلایه پیشرو از یک شبکه عصبی تصادفی استفاده شد تا به کمک آن بتوان به چندین سیگنال مصنوعی منطبق با طیف طرح دست یافت. جهت آموزش شبکه‌ها از ۱۰۰ سیگنال ثبت‌شده که به دسته‌های زمانی کوتاه (۲۰ ثانیه)، متوسط (۴۰ ثانیه) و بلند (۸۰ ثانیه) تقسیم شده بودند، استفاده شده است [۵۷] و [۵۸].

¹ Ghaboussi and Lin

² Replicator Neural Network

³ Multi-Layer Feed Forward

لی و هان^۱ (۲۰۰۲) با رویکردی متفاوت روش نوینی مبتنی بر شبکه‌های عصبی برای تولید سیگنال مصنوعی و طیف پاسخ ارائه کردند. در این روش از پنج شبکه عصبی به جهت وارد کردن اثر پارامترهای متعدد مانند فاصله، بزرگا، چگالی طیفی توان، طیف فوریه و سایر مشخصات ساخت گاهی، استفاده شده است. شبکه اول (ANN-I) جایگزین روند تعیین پارامترهای مدل تجربی برای تولید طیف دامنه فوریه شده است. ANN-II و ANN-III برای به دست آوردن پارامترهای چگالی طیف توان و تابع شدت مورد استفاده قرار گرفت. ANN-IV مستقیماً با در اختیار داشتن اطلاعاتی از قبیل بزرگا، فاصله کانونی، ویژگی‌های ساخت گاهی و عمق کانونی، طیف پاسخ را تولید می‌کند. نهایتاً ANN-V سیگنال مصنوعی سازگار با طیف طرح را تولید می‌کند [۵۹].

موخرجی و گوپتا^۲ (۲۰۰۲)، با استفاده از ضرایب ویولت به تولید سیگنال مصنوعی پرداختند. آن‌ها در این روش ابتدا ضرایب ویولت را اصلاح کردند تا توابع ویولت بر طیف فوریه منطبق شود. سپس با تفکیک ضرایب ویولت در بازه‌های فرکانسی متناظر و ضرب آن‌ها در نسبت مساحت منحنی هدف مربوط به منحنی متناظر با طیف سیگنال، این ضرایب را دوباره اصلاح کردند و با اعمال معکوس ویولت به سیگنال مورد نظر دست یافتند [۶۰].

راجاسکاران و همکاران (۲۰۰۶) با استفاده از مدل لی و هان (۲۰۰۲) و با اعمال آنالیز محتوای اصلی، روشی را ارائه کردند که از روش لی و هان سریع‌تر و دقیق‌تر می‌باشد. روش آن‌ها عیناً مانند روش لی و هان بود و تنها با اعمال PCA و فشرده‌سازی اطلاعات در سه گام آخر، سرعت روش را افزایش داده بودند [۶۱].

قدرتی و باقری (۲۰۰۸) با استفاده از شبکه‌های عصبی RBF اقدام به تولید سیگنال مصنوعی کردند. در این روش آن‌ها پس از تجزیه سیگنال‌های موجود با استفاده از طیف پاسخ سرعت شبکه‌های مجزا

¹ Lee and Han

² Mukherjee and Gupta

را آموزش دادند. پس آموزش شبکه‌ها با اعمال طیف طرح به عنوان ورودی شبکه‌ها می‌توان به سیگنال مورد نظر رسید [۶۲].

قدرتی و رزاقی (۲۰۰۸)، با به کارگیری شبکه‌های عصبی تصادفی، روش نوینی را جهت تولید سیگنال مصنوعی ارائه کردند. در این روش با استفاده از شبکه‌های عصبی تصادفی که ورودی آن‌ها طیف پاسخ شبه سرعت می‌باشند، اقدام به تولید سیگنال مصنوعی شده است [۳۱].

قدرتی و اسعدی (۲۰۱۰)، با کمک روشی نوین از تحلیل ویولت به نام تحلیل ویولت بسته‌ای^۱ به همراه الگوریتم بهترین پایه، مدلی جهت ساخت سیگنال مصنوعی ارائه کردند. در مدل پیشنهادی با استفاده از شبکه عصبی رگرسیون تعمیم‌یافته (GRNN) اقدام به ساخت شبکه‌ای گردیده است که ورودی آن طیف پاسخ شبه شتاب یا شبه سرعت و خروجی آن ضرایب ویولت بسته‌ای سیگنال متناظر با آن می‌باشد و سپس با روش تبدیل معکوس به سیگنال دسترسی خواهیم داشت. در حقیقت با آموزش شبکه با سیگنال‌های واقعی و طیف پاسخ آن‌ها به کمک الگوریتم معرفی شده به روش معکوس با ارائه طیف یک پاسخ دلخواه، به سیگنال متناظر با آن دسترسی خواهیم یافت [۶۳].

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 سیگنال مصنوعی زلزله پرداختند [۶۴].

کرمی و شهریاری در سال ۲۰۱۵ روشی بر پایه تحلیل دینامیکی افزایشی برای رسیدن به سیگنال مصنوعی زلزله با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی آموزش‌یافته مبتنی بر الگوریتم پس انتشار خطا استفاده نمودند [۶۵].

^۱ Wavelet Packet

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 به دست آوردن سیگنال مصنوعی منطبق بر طیف پاسخ و سایر پارامترهای طراحی می‌باشد [۲۵-۲۲].

۲-۲-۴- بررسی روش قابوسی و لین

این روش برای اولین بار در سال ۱۹۹۷ توسط قابوسی و لین^۱ جهت تولید سیگنال‌های مصنوعی بکار گرفته شد. در اینجا خلاصه‌ای از روش بکار گرفته شده ارائه خواهد شد.

هدف اصلی آموزش شبکه‌ای با ورودی طیف و خروجی سیگنال است و برای یکسان شدن فضای ورودی و خروجی از تبدیل فوریه سیگنال که شامل دو جزء حقیقی و موهومی می‌باشد به عنوان خروجی استفاده شده است؛ اما مشکلی که در اینجا وجود دارد آن است که معمولاً تعداد سیگنال‌هایی که بتوان با آن به آموزش شبکه پرداخت عموماً محدود می‌باشد. حال آنکه ما ناگزیریم برای تولید یک سیگنال به طول نمونه‌های آن از سلول خروجی استفاده نمائیم. لازم به ذکر است منظور از نقاط که از این پس به کار خواهد رفت، تعداد نقاط گسسته سازی یک سیگنال می‌باشد که عموماً تعداد آن‌ها تا رسیدن به توانی از دو افزایش خواهد یافت.

فرض کنید که طول سیگنال‌های موجود جهت آموزش شبکه تا $2^{12} = 4096$ نقطه افزایش یابد. بدیهی است قسمت‌های حقیقی و موهومی تبدیل آن نیز شامل همین تعداد نقطه خواهد بود که اگر از تقارن مستقیم و معکوس مربوط به این دو جزء استفاده نمائیم، می‌توان هر کدام از دو جزء را شامل ۲۰۴۹ نقطه (یکی بیشتر از نصف) در نظر گرفت. به این ترتیب با تعریف تبدیل فوریه به صورت:

$$F(\omega) = F_R(\omega) + iF_I(\omega) = \int \exp(-i\omega t) \ddot{X}_g(t) dt = \sum_{i=0}^{N-1} \exp(-2\pi i \omega t / N) \ddot{X}_g(t) \Delta t \quad (۱-۲)$$

اجزاء حقیقی و موهومی آن را به صورت زیر در نظر می‌گیریم:

$$F_r = \{F_r(\omega), j = 1: 2049\}, F_i = \{F_i(\omega_j), j = 1: 2049\} \quad (۲-۲)$$

^۱ Ghaboussi, Lin

که $\ddot{x}_g(t)$ معرف سیگنال و N تعداد نقاط آن می‌باشد. (منظور از آن است که $j=1:2049$ شامل مقادیر ۱ تا ۲۰۴۹ خواهد بود) با توجه به آنکه سیگنال‌های مختلف از ماهیت متفاوتی برخوردارند، الگوی مربوط به تبدیل فوریه آن‌ها که بیانگر محتوای فرکانسی حرکت می‌باشد نیز متفاوت است. به همین دلیل هیچ‌یک از دو جزء حقیقی و موهومی آن‌ها از یک غالب مشخص تبعیت نخواهد کرد.

تعلیم چنین شبکه‌هایی با تعداد خروجی زیاد و سری آموزشی کم در صورتی که نظم مشخصی در خروجی‌ها مشاهده نشود، امری مشکل است. لذا می‌بایست به نحوی از تعداد گره‌های خروجی کاسته شود، برای این منظور در این روش یک شبکه $MLFF^1$ با ورودی و خروجی یکسان تحت عنوان RNN^2 جهت فشرده‌سازی اطلاعات استفاده شده است. ساختار چنین شبکه‌ای در شکل (۲-۱) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است دو شبکه مجزا هر یک اقدام به فشرده‌سازی یک بخش از تبدیل فوریه می‌نمایند.

ساختار چنین شبکه‌ای متقارن بوده و به فرم زیر قابل ارائه می‌باشد:

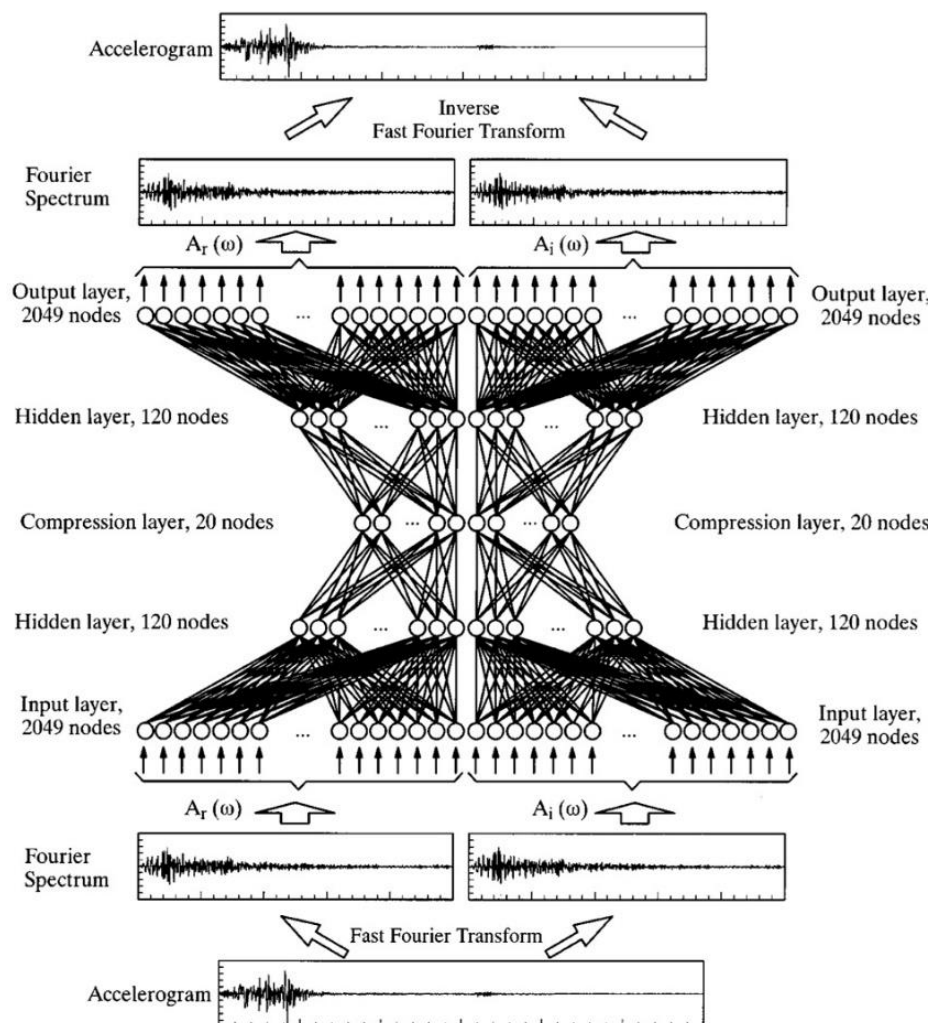
$$A_r = NN_r(A_r : 2049, 120, 20.120, 2049) \quad (2-3)$$

$$A_l = NN_l(A_l : 2049, 120, 20.120, 2049) \quad (2-4)$$

که در آن NN معرف خروجی شبکه و اعداد به کار گرفته شده تعداد نرون‌های موجود در لایه‌های ورودی، پنهان و خروجی می‌باشند. همان‌گونه که مشخص است اکنون با دو سری خروجی که شامل اجزاء حقیقی و موهومی به تبدیل فوریه سیگنال هستند روبرو هستیم که تعداد آن‌ها از ۲۰۴۹ به ۲۰ کاهش یافته است؛ بنابراین در خروجی شبکه اصلی از فشرده شدن اجزاء تبدیل فوریه استفاده خواهیم کرد و به این ترتیب تعلیم شبکه با سهولت بیشتر و در مدت‌زمان کمتری امکان‌پذیر خواهد بود. در نهایت با محاسبه پاسخ شبکه به ازای هر ورودی خاص و با بکار بردن یک قسمت از RNN (مثلاً قسمت بالایی) می‌توان به سیگنال مربوطه دست یافت.

¹ Multi-layer feed-forward

² Replicator N. N. (R. N. N)



شکل (۲-۱): ساختار شبکه عصبی RNN جهت فشرده‌سازی اطلاعات [۱۹]

در مطالعه فوق، از ۳۰ سری سیگنال با خصوصیات متفاوت استفاده شده است. یکی از معایب *RNN* در این مورد مدت‌زمان طولانی تعلیم آن می‌باشد. به‌عنوان نمونه شبکه مورد نظر در مدت‌زمان نزدیک یک هفته آموزش یافته است. پس از تعلیم شبکه برای داده‌های آموزشی (Tr) و داده‌های آزمون‌شونده (Ts)، کنترل شده است. از ویژگی‌های بارز شبکه‌ها آن است که اگرچه مدت‌زمان آموزش آن‌ها ممکن است طولانی باشد، اما به‌سرعت قادرند تا خروجی متناظر با ورودی مورد نظر را ارائه نمایند.

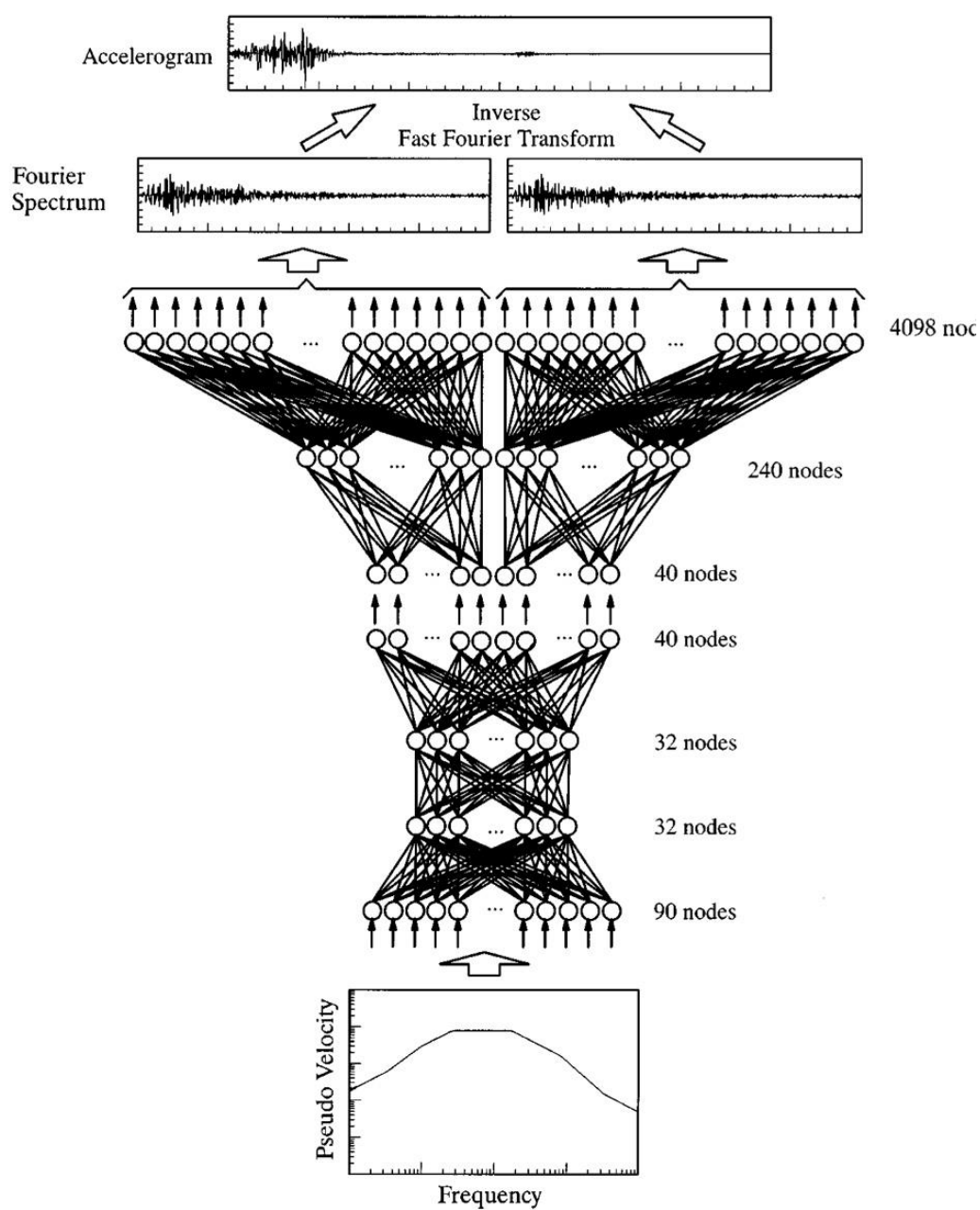
سپس جهت تولید A_i و A_r از یک شبکه پیشرو $MLFF^1$ با نام ساختار $AGNN^2$ با ساختار نمایش داده شده در شکل (۲-۲) استفاده شده است. ورودی این شبکه طیف پاسخ سیگنال‌های آموزشی می‌باشد که در ۹۰ نقطه فرکانسی (در مقیاس لگاریتمی) محاسبه شده‌اند و خروجی نیز قسمت میانی RNN می‌باشد. ساختار این شبکه نیز به صورت زیر قابل ارائه می‌باشد:

$$\{A_r, A_i\} = NN_{AGNN}(SV : 90.32.32., 40.240, 4098) \quad (۲-۵)$$

که سه عدد آخر مربوط به ترکیب دو شبکه RNN می‌باشد؛ یعنی $AGNN$ با محاسبه پاسخ یک شبکه با ۲ لایه مخفی و ۴۰ خروجی و ورودی آن در قسمت بالایی A_i, A_r, RNN را ارائه می‌نماید که از این دو می‌توان به یک سیگنال دست یافت.

جهت کنترل سیگنال تولیدی، طیف پاسخ آن با طیف ورودی مقایسه می‌شود. نتیجه حاصل از این کار برای داده‌های آموزشی خطای بسیار ناچیزی را نشان خواهد داد و در مورد داده‌های آزمون نیز هر چند سیگنال تولیدی با سیگنال اصلی تفاوت محسوسی خواهد داشت، اما طیف مربوط به آن دو از انطباق نسبتاً خوبی برخوردار می‌باشند.

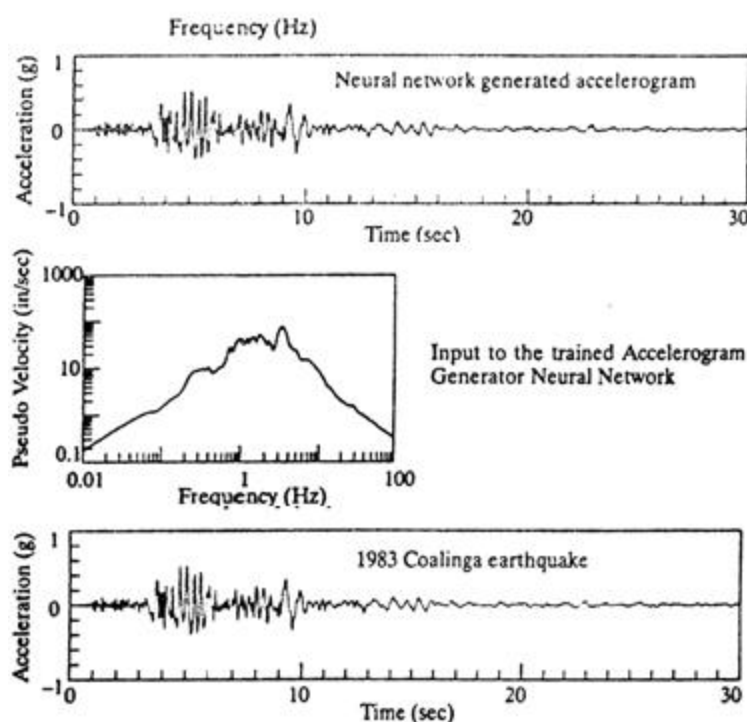
¹ Multi-Layer Feed-Forward neural networks
² Accelerogram Generator N. N. (AGNN)



شکل (۲-۲): شبکه عصبی پیشرو *MLFF* با نام ساختار *AGNN* جهت تولید *Ar* و *Ai* [۱۹]

در مورد سری داده‌های آزمون دو حالت موجود است. اول اینکه این داده‌ها نزدیکی زیادی با یکی از طیف‌های آموزشی دارد که در این صورت سیگنال حاصله نیز شباهت زیادی به سیگنال آموزشی مربوط خواهد داشت، در غیر این صورت شبکه فوق با یک ترکیب صحیح از سری‌های آموزشی، سیگنالی را

تولید خواهد کرد که به هیچ عنوان شبیه هیچ یک از مجموعه داده‌های تعلیم یافته نمی‌باشد و طیف آن نیز تا حد قابل قبولی به طیف هدف نزدیک می‌باشد. شکل (۳-۲) یک نمونه از سیگنال تولیدی توسط این شبکه را همراه با مقایسه طیف پاسخ و هدف نشان می‌دهد.



شکل (۳-۲): آزمون شبکه AGNN برای یک سیگنال آزمون‌شونده [۱۹]

در سال ۲۰۰۰ در مقاله‌ای که توسط این دو نویسنده در دوازدهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی زلزله در کشور نیوزیلند در همین زمینه ارائه شد، سری‌های آموزشی را برحسب مدت تداوم آن‌ها به سه دسته، LD^1 ، MD^2 ، HD^3 که به ترتیب معرف مدت تداوم کم، متوسط، زیاد می‌باشد، تقسیم‌بندی کردند [۶۶]. در آنجا تنها از یک شبکه جهت فشردسازی توأم $A_r(\omega)$ و $A_l(\omega)$ برای هر دسته از سیگنال‌ها استفاده شده است. مدت‌زمان آموزش چنین شبکه‌ای حدود چندین ساعت است که بسیار کمتر از روش قبلی می‌باشد. معماری این شبکه‌ها به صورت زیر می‌باشد:

¹ Low Duration
² Medium Duration
³ High Duration

$$(A_r + A_i)_{LD} = NN_{LD}((A_r + A_i)_{LD} : 4096, 210.40, 210.4096) \quad (۶-۲)$$

$$(A_r + A_i)_{MD} = NN_{MD}((A_r + A_i)_{MD} : 2048, 180.40, 180.2048) \quad (۷-۲)$$

$$(A_r + A_i)_{SD} = NN_{SD}((A_r + A_i)_{SD} : 1024, 100.40, 100.102) \quad (۸-۲)$$

به گونه‌ای که مشخص می‌شود، فشرده کردن هر دسته تنها در ۴۰ نقطه تحت عنوان A_C خلاصه شده است. آنگاه همانند قبل از یک MAGNN^۱ برای تعلیم شبکه‌ای با ورودی طیف و خروجی A_C استفاده شده است. در این مقاله از یک روش خاص جهت آموزش MLFF استفاده شده است. در این نوع آموزش، شبکه قادر است تا خروجی‌های متفاوتی با خطاهای قابل قبول به ازای یک ورودی ارائه دهد. فرمت این شبکه به صورت زیر است:

$$\{A_r, A_i\} = NN_{SV}(SV : 50, 45, 45, 40) \quad (۹-۲)$$

این مجموعه برای یک صد سری داده آموزشی که در سه نقطه LD و SD و MD طبقه‌بندی شده و همگی مربوط به تیپ خاک S_4 می‌باشند، تعلیم یافته است و سپس برای ۲۰ سیگنال دیگر آزمون شده است.

این شبکه‌ها قادرند برای یک طیف مشخص یک سری سیگنال مختلف ارائه دهند. این سیگنال‌ها اگرچه به خوبی طیف پاسخ مثبت نیستند، اما همگی در حریم مشخصی از طیف هدف قرار گرفته‌اند. آنچه به عنوان مزایای روش دوم قابل طرح است قابلیت تولید سیگنال‌های متنوع و مدت زمان آموزش کمتر شبکه RNN مربوط می‌باشد؛ اما نکته قابل توجه در دسترس بودن یک صد سری متنوع از سیگنال‌های واقعی زلزله است که همگی مربوط به یک تیپ خاک می‌باشند. لذا بدیهی است طیف‌های مربوطه نزدیکی بسیار زیادی به یکدیگر خواهند داشت و مسلماً آموزش این شبکه با سهولت بیشتری امکان‌پذیر است. به علاوه طیف‌های حاصله از سیگنال‌های واقعی تنها قادرند حریم مشخصی از طیف پاسخ را بپوشانند.

^۱ Multiple Accerlerograms Generator N.N.(MAGNN)

اگر به الگوهای آموزشی روش $AGNN$ دقت شود، خواهیم دید سیگنال‌های مزبور مربوط به چند منطقه خاص می‌باشد که توسط ایستگاه‌های مختلفی به ثبت رسیده است؛ مثلاً در این سری تنها بانه سیگنال مربوط به زلزله دره امپریال^۱ و هفت سیگنال پس‌لرزه‌های کولینگا^۲ روبرو خواهیم بود. بدیهی است در چنین حالتی سیگنال‌ها و طیف‌های یک زلزله که توسط شتاب‌نگارهای مختلف ارائه گردیده، از محتوای فرکانسی نسبتاً یکسانی برخوردارند، لذا آموزش شبکه مورد نظر نایستی چندان مشکل باشد. بعلاوه آنکه آزمون آن حتی برای سری‌های آزمون‌شونده نیز مطمئناً جواب قابل قبولی خواهد داشت، چراکه معادل آن در الگوهای آموزشی بکار رفته است. در الگوریتم $MAGNN$ نیز همان‌طور که عنوان شد کلیه الگوها از یک تیپ خاک انتخاب شده است؛ بنابراین در اینجا نیز نوعی همانند الگو در آن‌ها مشاهده می‌شود، هر چند لیست سیگنال‌های بکار رفته در مقاله نیامده است.

در سال ۲۰۰۱ نیز آقای قابوسی و لین مقاله جدیدی را در همین زمینه در مجله *Earthquake Engineering And Structureal Dynamics* به چاپ رسانده‌اند. از ویژگی مهم این پژوهش نسبت به حالت‌های گذشته امکان تولید سیگنال‌های احتمالاتی^۳ می‌باشد. به‌طوری‌که در این روش سیگنال‌های متفاوتی را با احتمالات متفاوت تولید می‌کند.

۳-۲- جمع‌بندی

هر کدام از تحقیقات فوق بر گرفته از یک روش خاص بوده که تا حدودی توانسته پاسخی برای مسئله مطرح‌شده ارائه کند؛ اما سری‌های زمانی و ویولت‌ها امروزه به یک زبان مشترک برای افراد در علوم مختلف تبدیل شده‌اند که روش یکسانی را با نام‌های مختلف به کار می‌برند. این مسئله باعث انقلابی در حوزه آنالیز زمان-فرکانس گردیده است. موضوع شبکه‌های ویولت موضوع نسبتاً جدیدی بوده، اما ترکیب آن با آنالیز سری‌های زمانی به دلیل اینکه از میان پارامترهای موجود سیگنال‌های زلزله تنها

¹ Imperial Vally

² Coalinga aftershock

³ Stochastic

برخی پارامترها وجود دارند که افزایش آن‌ها در زلزله سبب افزایش خسارت می‌گردند و مابقی پارامترها دارای مقادیر ثابت و مشترک در میان خصوصیات زلزله می‌باشند و به همین منظور از سری زمانی برای بررسی تأثیر پارامترهای مختلف شتاب ورودی زلزله استفاده می‌نماییم. جای این کار در میان کارهای انجام شده در این خصوص خالی است و به نظر می‌رسد اگرچه در سال‌های اخیر محققین زیادی به‌طور جداگانه در خصوص پایه‌ریزی مفاهیم پایه و کاربرد آن در رشته‌های گوناگون کوشش کرده‌اند اما باز هم پتانسیل بسیاری برای کاربردهای جدید و توسعه آن وجود دارد.

در این رساله با توجه به محدودیت‌هایی که به آن اشاره خواهد شد که عمده آن‌ها تعدد سیگنال‌ها با ویژگی‌های متمایز در ایران است، روشی جدید برای تولید چنین سیگنال‌هایی پیشنهاد شده است که از مزایای آن سرعت آموزش بالا به سبب نوع خاص شبکه و حذف مرحله فشرده‌سازی، قابلیت انعطاف‌پذیری آن 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 سیگنال‌های آموزشی و در نهایت تولید سیگنال‌های متعدد سازگار با طیف هدف می‌باشد.

فصل سوم: مبانی نظری تحقیق

۳-۱- تبدیل موجک

تبدیل ویولت یا موجک تبدیلی است از حوزه زمان^۱ به فرکانس که مشخصات فرکانسی یک سیگنال را در یک بازه کوتاه بیرون کشیده و بیان می‌کند که این اجزاء فرکانسی با گذشت زمان، چگونه تغییر می‌کنند. در این تبدیل یک سری بردارهای پایه ایجاد می‌شوند که تصویر سیگنال بر این پایه‌ها معادل با جزء فرکانسی سیگنال می‌باشد. از آنجا که برای هر تراز فرکانسی این بردارهای پایه تغییر می‌کنند، اجزاء فرکانسی در وضوح‌های^۲ مختلف به دست می‌آیند.

امروزه تبدیل ویولت در رشته‌های مختلف علوم مورد استفاده قرار گرفته‌اند. یکی از مهم‌ترین کاربردهای آن استفاده از آن در تجزیه و تحلیل سیگنال‌های مختلف می‌باشد.

مهم‌ترین مزیت تبدیل ویولت نسبت به روش‌های فوریه سنتی در تحلیل سیگنال‌های حاوی ناپیوستگی و ضربه‌های تیز می‌باشد. تئوری ویولت به ما این امکان را می‌دهد که در فرآیندهای غیر ایستا بتوانیم از جزئیات فرکانسی در هر لحظه، اطلاعاتی به دست آوریم. همچنین آنالیز ویولت، در مقایسه با آنالیز فوریه، این امکان را فراهم می‌کند که از رفتار محلی سیگنال مطلع شویم در صورتی که آنالیز فوریه رفتار کلی را ارائه می‌نماید.

در این فصل مبانی تئوری تبدیل ویولت و معکوس آن در مقایسه با تبدیل‌های فرکانسی سنتی فوریه و همچنین مفاهیم اصلی در خصوص شبکه‌های عصبی مصنوعی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۳-۲- مقایسه تبدیل فوریه و تبدیل ویولت

تئوری تبدیل ویولت را می‌توان توسعه‌یافته تئوری تبدیل فوریه دانست. یکی از مشکلات عمده تبدیل فوریه، ناتوانی آن در نشان دادن خصوصیات محلی سیگنال، بخصوص سیگنال‌های نا ایستا می‌باشد.

¹ Time Domain

² Resolutions

هرچند بعدها روش‌های مختلفی جهت اصلاح تبدیل فوریه ارائه شد، ولی هیچ‌یک قادر به پوشاندن نقاط ضعف این تبدیل نبودند و یکی از دلایل مهم گسترش استفاده از تبدیل ویولت می‌باشد.

۳-۲-۱- تبدیل فوریه پیوسته

تبدیل فوریه پیوسته^۱ تابع انتگرال‌پذیر $f(t)$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \exp(-i\omega t) dt \quad (۱-۳)$$

و معکوس تبدیل فوریه به صورت زیر تعریف می‌شود:

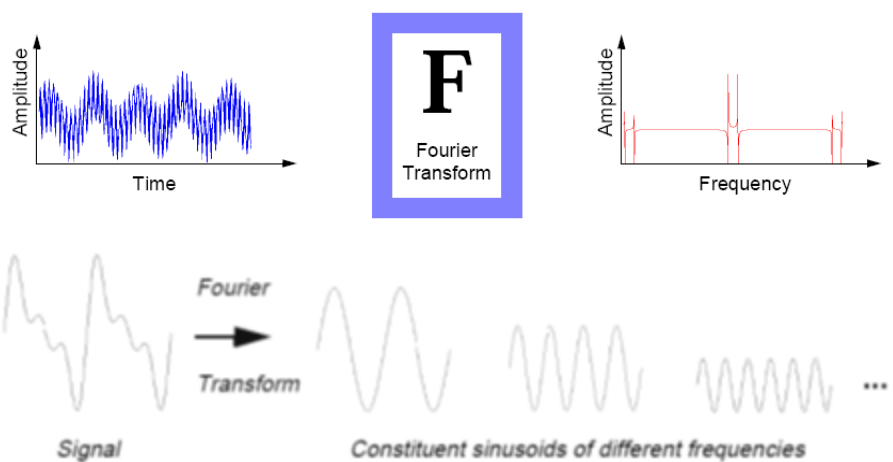
$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) \exp(i\omega t) d\omega \quad (۲-۳)$$

$$e^{i\omega t} = \cos(\omega t) + i \sin(\omega t) \quad (۳-۳)$$

به بیان دیگر تبدیل فوریه را می‌توان یک تکنیک ریاضی برای تبدیل نمایش یک سیگنال از حوزه زمان به حوزه فرکانس دانست. ضرایب این تبدیل از حاصل ضرب داخلی سیگنال با توابع پایه موج سینوسی و کسینوسی که دارای دوام نامحدود می‌باشند، به دست می‌آید؛ بنابراین تبدیل فوریه برای تجزیه سیگنال‌هایی مناسب می‌باشد که از هر هم نهی تعداد محدودی از مؤلفه‌های ایستا مثل امواج با پایه سینوسی حاصل شده باشند. وجود هرگونه تغییر ناگهانی سیگنال در زمان، باعث می‌شود که سیگنال غیر ایستای $f(t)$ ، در تمام محور فرکانس در $F(\omega)$ گسترده شود. به بیان دیگر تبدیل فوریه نقاط ضعف و محدودیت‌هایی به همراه دارد. به عنوان مثال در تبدیل از حوزه زمان به حوزه فرکانس، اطلاعات زمانی سیگنال از بین می‌رود و با مشاهده تبدیل فوریه یک سیگنال، نمی‌توان گفت که یک اتفاق جزئی در چه لحظه‌ای اتفاق افتاده است. علت آن نیز در تعریف تبدیل نهفته است؛ از آنجا که انتگرال‌گیری از $(-\infty, +\infty)$ انجام می‌گیرد، قادر به استخراج اطلاعات مربوط به محتوای فرکانسی در یک زمان مشخص نیست. در نتیجه اگر سیگنال در طول زمان تغییرات چندانی نداشته باشد (سیگنال ایستا) این محدودیت چندان مهم نیست اما همان‌طور که در بالا ذکر شد این آنالیز برای سیگنال‌های غیر ایستا و زودگذر

^۱ Continuous Fourier Transform (CFT)

مانند سیگنال‌های زلزله چندان مناسب نمی‌باشد.



شکل (۳-۱): تبدیل فوریه پیوسته (تجزیه سیگنال به پایه‌های سینوسی و کسینوسی با فرکانس‌های مختلف) [۶۷]

۳-۲-۲- تبدیل فوریه گسسته

در تبدیل فوریه گسسته، یک سیگنال پریودیک به صورت جمع سینوس‌ها و کسینوس‌های ضریب‌دار بیان می‌شود. ضرایب سینوس‌ها و کسینوس‌ها از تصویر^۱ کردن سیگنال روی سینوس‌ها و کسینوس‌ها به دست می‌آید. به طور دقیق تصویر روی سینوس‌ها و کسینوس‌ها یک تصویر متعامد می‌باشد. بنابراین تصویر یکتا است و توابع $\{ \sin(k,i), \cos(k,i) \}$ یک پایه متعامد یکه هستند.

سیگنال دوره‌ای^۲ با دوره تناوب T را می‌توان به صورت زیر به جمع $\sin$ و $\cos$ تجزیه کرد:

$$f(t) = \sum_k a_k \sin(k,i) + b_k \cos(k,i) \quad (۱-۳)$$

$$a_k = 2 \int_0^T f(t) \sin(2\pi kt) dt \quad ; \quad b_k = 2 \int_0^T f(t) \cos(2\pi kt) dt \quad (۲-۳)$$

و چون توابع $\{ \sin(k,i), \cos(k,i) \}$ پایه‌های متعامد یکه می‌باشند:

$$\int_0^1 \sin(m2\pi x) \sin(n2\pi x) dx = 0 \quad , \quad m \neq n \quad (۳-۳)$$

^۱ Projection

^۲ Periodic

$$\int_0^1 \cos(m2\pi x) \cos(n2\pi x) dx = 0 \quad , \quad m \neq n \quad (۴-۳)$$

$$\int_0^1 \sin(m2\pi x) \cos(n2\pi x) dx = 0 \quad , \quad m \neq n \quad (۵-۳)$$

در بعضی موارد، با تعداد محدودی از ضرایب می توان به تقریب خوبی از سیگنال دست یافت.

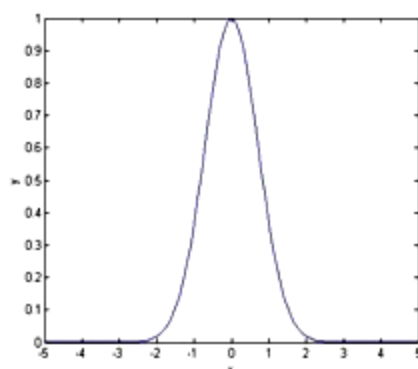
۳-۲-۳- تبدیل فوریه زمان کوتاه

فعالیت های زیادی جهت غلبه بر نواقص و ضعف های تبدیل فوریه انجام گرفت. بر این مبنا روش های مختلفی ابداع گردید که اجازه می دهد که سیگنال را به صورت محلی تجزیه و تحلیل نمایم؛ روش کلاسیک «تبدیل فوریه زمان کوتاه»^۱ که تبدیل گابور^۲ (۱۹۴۶) هم نامیده می شود جزو این تبدیل ها می باشد. تبدیل فوریه زمان کوتاه به وسیله ضرب سیگنال در تابع پنجره $G(t-\omega)$ و سپس انجام تبدیل فوریه سیگنال تعیین می شود:

$$SF(\omega, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} G^*(t-\tau) f(t) \exp(-i\omega t) d\tau \quad (۶-۳)$$

تابع پنجره استفاده شده به وسیله گابور، پنجره گوسی است که رابطه آن بر اساس رابطه ۳-۷ بوده و نمونه ای از آن را در شکل (۳-۲) مشاهده می کنید:

$$G(t) = a \exp(-bt^2) \quad (۷-۳)$$



شکل (۳-۲): تابع گوسی پیشنهادی گابور [۶۷]

¹ Short Time Fourier Transform (STFT)

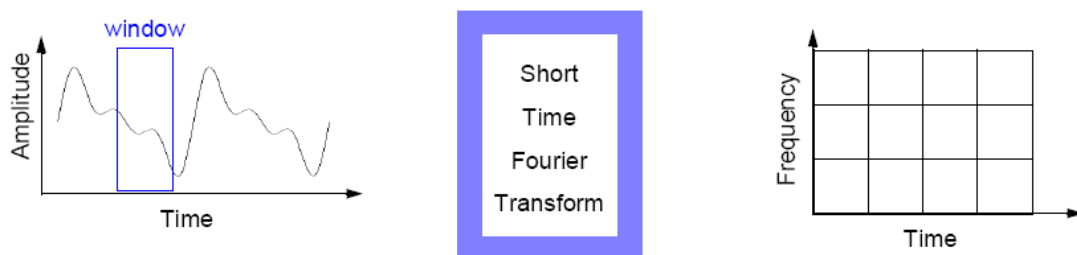
² Gabor

نتایج تبدیل، به زمان t ، فرکانس ω و پارامتر b که عرض گستردگی در زمان را کنترل می‌کند، وابسته است؛ بنابراین تبدیل فوریه تابع پنجره طبق رابطه زیر است:

$$G(\omega) = a \left(\frac{\pi}{b} \right)^{1/2} \times \exp \left(- \frac{(\omega - \omega_0)^2}{4b} \right) \quad (۸-۳)$$

توجه شود که در تبدیل گابور، از یک پنجره زمانی با عرض ثابت استفاده شده است؛ به عبارت دیگر گستردگی تابع $G(t)$ برای همه انتقال‌ها یکسان است. عموماً این گستردگی برابر نصف عرض تابع $G(\omega)$ مستقل از فرکانس مرکزی (ω_0) می‌باشد.

نحوه انجام تبدیل فوریه زمان کوتاه را در شکل (۳-۳) مشاهده می‌کنید:



شکل (۳-۳): روند کلی استفاده از پنجره زمانی در تبدیل گابور [۶۷]

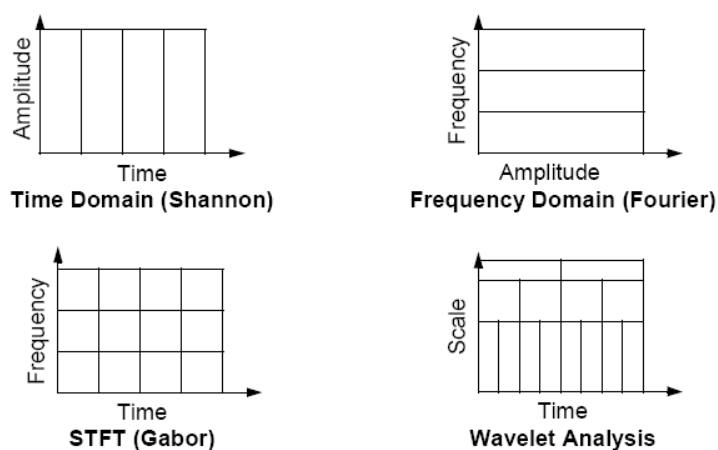
همان‌طور که قبلاً نیز ذکر شد در انجام آنالیز زمان-فرکانس، سیگنال باید بر روی یک سری توابع پنجره‌ای تصویر شود. حال جهت بازسازی کامل از تصویر نیاز به تعداد زیادی پنجره دارد. بازسازی کامل سیگنال نیاز به تعدادی عملگر برابر با $(N^2 \log_2 N)$ برای یک سیگنال با تعداد اجزاء N می‌باشد.

۳-۲-۴- حرکت از تبدیل فوریه به سمت تبدیل ویولت

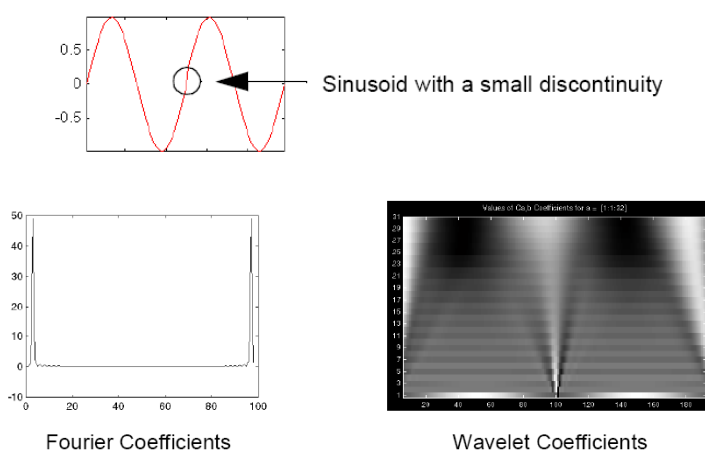
ایده اصلی آنالیز ویولت که بر پایه تبدیل فوریه زمان کوتاه قرار دارد، تجزیه یک سیگنال به توابع پایه انتقال و اتساع یافته که تابع ویولت مادر نامیده می‌شود، می‌باشد. تفاوت اصلی بین تبدیل ویولت و تبدیل گابور آن است که پنجره زمان-فرکانس تبدیل گابور مستقل از موقعیت و اتساع پنجره است، درحالی‌که برای تبدیل ویولت، پنجره زمان-فرکانس به ضرایب اتساع ویولت وابسته است. در فرکانس‌های پایین، پنجره زمان بسیار بزرگ‌تر از فرکانس‌های بالاتر می‌باشد. این قابلیت، سبب ایجاد یک

رزولوشن خوب زمانی در نقاط تیز با فرکانس بالا (به دلیل پنجره‌های زمانی کوچک و نزدیک به هم) شده که با کاهش فرکانس از این رزولوشن کاسته می‌شود.

تفاوت‌های موجود بین تبدیل‌های فوریه و ویولت را در شکل ۳-۴ مشاهده می‌کنید. همچنین نتایج حاصل از آنالیزهای ویولت و فوریه اعمال شده بر روی یک موج سینوسی نویز دار، در شکل ۳-۵ نشان داده شده است. با توجه به شکل می‌توان به قابلیت تحلیل محلی سیگنال‌های تیز و ناپیوسته با تبدیل ویولت پی برد.



شکل (۳-۴): مقایسه تبدیل فوریه، فوریه زمان کوتاه و تبدیل ویولت [۶۷]



شکل (۳-۵): نتایج آنالیز ویولت و تبدیل فوریه یک تابع سینوسی با یک نقطه ناپیوستگی [۶۷]

۳-۳- مفهومی کلی و روابط تئوریک تبدیل ویولت

۳-۳-۱- مفاهیم بنیادین تبدیل ویولت گسسته

از آنجا که سیگنال‌های استفاده شده در این رساله از داده‌های گسسته تشکیل شده است و به تبع آن نیز از تبدیل ویولت گسسته^۱ استفاده شده است، تنها بر روی تبدیل ویولت گسسته بحث کرده و به مفاهیم تبدیل ویولت پیوسته نمی‌پردازیم.

به‌طور کلی سیگنال‌ها، طیف وسیعی از فرکانس را در بر می‌گیرند. برای هر سیگنال، مولفه فرکانس‌های پائین بخش سیگنال مورد علاقه است، چراکه با استفاده از آن می‌توان کل سیگنال را تقریب زد. برای درک مفهوم خوبی از مؤلفه‌های فرکانس بالا و پائین، صدای انسان را در نظر می‌گیریم. برای اینکه درک کنیم چه گفته شده مؤلفه‌های فرکانس پائین لازم است. مؤلفه‌های فرکانس بالا نیز نکات ظریف و جزئی صدا را می‌سازند. با حذف مؤلفه‌های فرکانس بالا صدا متفاوت می‌شود اما از آنچه که باقی‌مانده است نیز می‌توان به چیزی که گفته شده است، دست یافت.

تبدیل ویولت گسسته، با اعمال دو نوع فیلتر به سیگنال انجام می‌شود. این فیلترها عبارت‌اند از: فیلتر بالاگذر^۲ که انحرافات یا جزئیات^۳ سیگنال را تسخیر می‌کند که به "فیلتر ویولت" و یا "تابع ویولت"^۴ معروف است؛ و فیلتر پایین‌گذر^۵ که تقریب^۶ سیگنال را در بر می‌گیرد و به "فیلتر مقیاس" و یا "تابع مقیاس"^۷ معروف است.

در شکل ۳-۶ می‌توانید نحوه تبدیل ویولت یک تابع نویز دار با ۱۰۰۰ داده اولیه را که در تراز اول صورت گرفته است، مشاهده کنید. هر یک از ضرایب جزئیات و تقریب که با عبور سیگنال از فیلترهای پایین‌گذر و بالاگذر به دست می‌آید تقریباً حاوی ۵۰۰ داده می‌باشند. این کاهش تعداد داده که از

¹ Discrete Wavelet Transform (DWT)

² High-Pass Filter

³ Detail Coefficient

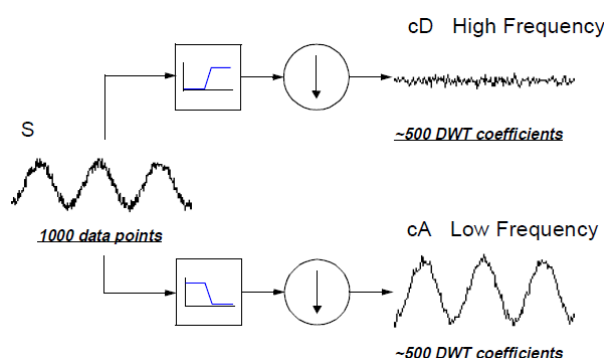
⁴ Wavelet Function

⁵ Low-Pass quadrature mirror Filter

⁶ Approximation Coefficient

⁷ Scaling Function

میانگین گیری متوالی از دو مقدار سیگنال اصلی حاصل شده و به کاهش نرخ نمونه برداری معروف است، یکی از ویژگی های اصلی تبدیل ویولت می باشد. با توجه به شکل فیلتر شده سیگنال می توان دریافت که s^1 که از ضرایب تقریب حاصل شده، کاملاً شبیه سیگنال اول است که کاهش نویز داده شده است و d^1 که شامل ضرایب جزئیات می باشد، در برگیرنده نویزهای فرکانس بالا است. توجه شود که عدد ۱ در بالای پارامترها بیانگر ضرایب تجزیه در تراز اول می باشد.



شکل (۳-۶): نتایج آنالیز ویولت یک تابع سیونسی نویزدار در تراز اول [۶۷]

به طور خلاصه می توان مراحل محاسبه ضرایب ویولت پیوسته را به صورت زیر در نظر گرفت:

- ۱- انتخاب ویولت مادر و مقایسه آن با اولین بخش از سیگنال مورد مطالعه
- ۲- محاسبه ضریب شباهت C به عنوان ضریب ویولت؛ این ضریب بیانگر میزان انطباق بخش مشخصی از سیگنال، با تابع ویولت مادر می باشد. بزرگ تر بودن C نشان دهنده نزدیکی بیشتر بخش مورد مطالعه سیگنال، با تابع ویولت مادر انتخاب شده است. در واقع اگر انرژی سیگنال در آن بخش با انرژی تابع ویولت مادر برابر باشد، ضریب ویولت را می توان ضریب همبستگی در نظر گرفت
- ۳- انتقال تابع 1 ویولت مادر در کل طول سیگنال و تکرار مراحل ۱ و ۲ تا تمام طول سیگنال را سپری کرده باشیم

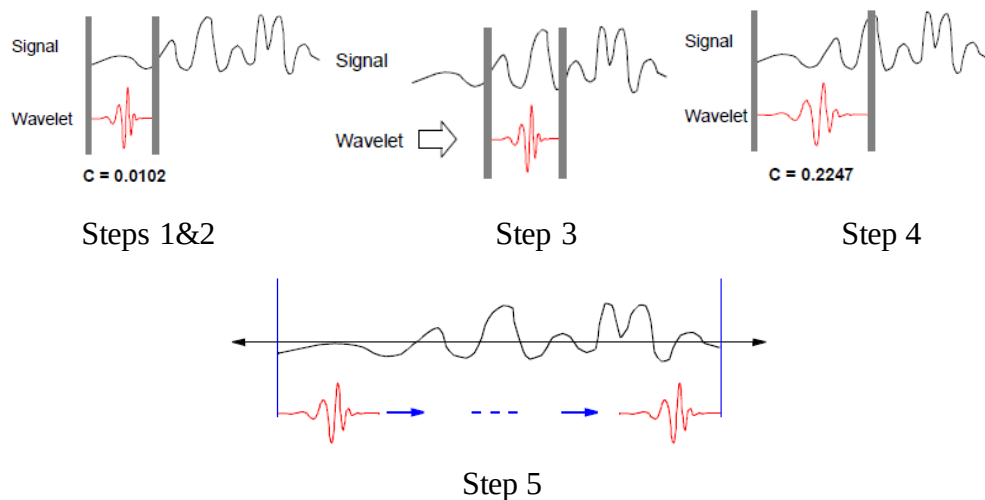
¹ Shifting

۴- مقیاس کردن (اتساع)^۱ تابع ویولت مادر و تکرار مراحل ۱ تا ۳

۵- تکرار مراحل ۱ تا ۴ برای تمامی مقیاس‌های مورد نظر [۴۰]

با انجام ۵ مرحله بالا بر روی یک سیگنال مشخص، تعبیر دیگری از سیگنال به لحاظ تفکیک سیگنال بین ضرایب تقریب و جزئیات در هر تراز^۲ به دست می‌آید.

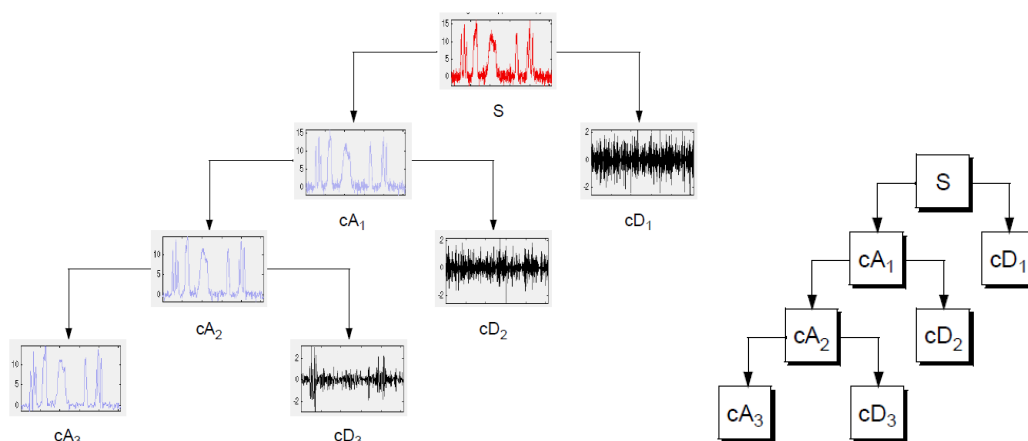
در شکل ۳-۷ مراحل انجام آنالیز ویولت نشان داده شده است:



شکل (۳-۷): مراحل انجام تبدیل ویولت پیوسته بر روی یک سیگنال مشخص [۶۷]

با انجام مراحل فوق به درخت تجزیه ویولت می‌رسیم. رفتار فرکانس پائین با رفتن به انتهای درخت به دست می‌آید. در تراز بالا، سیگنال اصلی را می‌توان پیدا کرد که شامل فرکانس بالا و پائین می‌باشد. با رفتن به تراز پائین‌تر، سیگنال اصلی به سری شبیه سیگنال اصلی s^1 و سری جزئیات d^1 تجزیه می‌شود و به وسیله این تجزیه تراز ۱ انجام می‌شود. با تکرار گام‌های مشابه، از سیگنال s^1 ، s^2 و d^1 را به دست می‌آوریم یا تجزیه تراز ۲ انجام می‌شود. تعداد تراز در تجزیه ویولت به طبیعت سیگنال وابسته است. نمونه‌ای از درخت ویولت را که تبدیل ویولت را تا تراز ۳ نشان می‌دهد را در شکل ۳-۸ مشاهده می‌کنید:

¹ Scaling
² Level

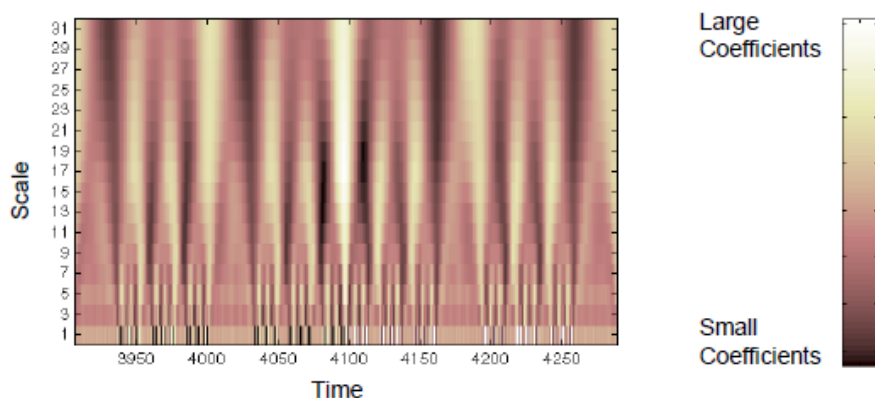


شکل (۳-۸): درخت تجزیه ویولت تا تراز ۳ برای یک سیگنال مشخص [۶۷]

در تبدیل ویولت گسسته نیز، مراحل فوق عیناً انجام می‌شود، با این تفاوت که انتقال پنجره‌ها، تابعی از فاصله زمانی سیگنال ورودی بوده و گستره محدودی از اتساع‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

توجه شود که برای انجام یک تبدیل ویولت مؤثر می‌بایست که هم انتقال تابع ویولت مادر انجام شود و هم اتساع آن. انتقال دادن تضمین می‌کند که تمام اجزای سیگنال تسخیر شده‌اند و اتساع کردن هم تضمین می‌کند که تمام رفتار سیگنال (فرکانس بالا و پائین) تسخیر شده است. اتساع بیشتر ویولت یا تابع مقیاس، رفتار فرکانس پائین سیگنال را تسخیر می‌کند [۶۷].

یکی از بهترین روش‌های نشان دادن تبدیل ویولت یک سیگنال مشخص، استفاده از نمودار دو بعدی است که محور افقی آن زمان (در طول سیگنال) و محور قائم آن مقیاس می‌باشد. در این نمودار میزان شدت رنگ در هر نقطه با x, y مشخص بیانگر مقدار ضریب ویولت (C) خواهد بود. بدین ترتیب که هرچه نزدیکی سیگنال به تابع ویولت مادر بیشتر باشد، نمودار روشن‌تر و هرچه از هم فاصله داشته باشند، نمودار تیره‌تر است. نمونه‌ای از این نوع نمایش را در شکل ۳-۹ مشاهده می‌کنید:



شکل (۳-۹): توصیف کیفی زمان-فرکانس با استفاده از تبدیل ویولت [۶۷]

۳-۳-۲- مبانی تئوریک تجزیه ویولت گسسته

تاکنون، ایده اصلی تبدیل ویولت گسسته تعریف کردیم. اگرچه ایده اصلی ممکن است آسان به نظر بیاید، ولی روش بر اساس چهارچوب ریاضی می‌باشد که در این زیر بخش توضیح داده خواهد شد. خانواده توابع ویولت به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\psi_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \times \psi\left(\frac{t - 2^j(k-1)}{2^j}\right), \quad j=1,2,\dots,J \text{ \& } k=1,2,\dots,K \quad \left| \begin{array}{l} J \leq \log_2^N \\ K = \frac{N}{2^j} \end{array} \right. \quad (۹-۳)$$

و خانواده مقایسه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\phi_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \times \phi\left(\frac{t - 2^j(k-1)}{2^j}\right), \quad j=1,2,\dots,J \text{ \& } k=1,2,\dots,K \quad \left| \begin{array}{l} J \leq \log_2^N \\ K = \frac{N}{2^j} \end{array} \right. \quad (۱۰-۳)$$

در روابط فوق هر جزء $\psi_{j,k}(t)$ و $\phi_{j,k}(t)$ ، به ترتیب از انتقال و اتساع تابع مقیاس و ویولت مادر به دست می‌آیند. در شکل ۳-۱۰ نحوه انتقال و اتساع کردن تابع ویولت را مشاهده می‌کنید.

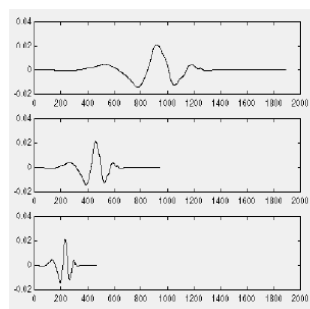
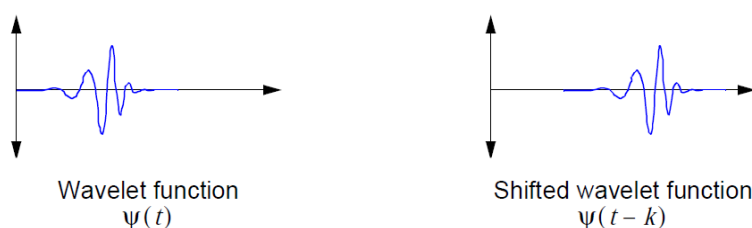
بعلاوه مقدار N برابر است با تعداد اجزاء سیگنال اصلی. وظیفه عبارت $2^j \times (k-1)$ در هر دو رابطه انتقال توابع ویولت و مقیاس و وظیفه عبارت 2^j نیز اتساع این توابع می‌باشد. $(k-1)$ دلالت بر این موضوع دارد که اولین ویولت و یا تابع مقیاس متعلق به تراز j ، نمی‌بایستی انتقال داده شوند. همچنین

ضریب $\frac{1}{\sqrt{2^j}}$ برای تضمین نرمال کردن رابطه‌ها اعمال شده است. گام‌های اتساع از تراز به تراز دیگر

بر مبنای توان ۲ انجام می‌گیرد.

با این توضیحات، $\psi_{j,k}(t)$ بیانگر k امین تابع ویولت، از توابع ویولت تراز j می‌باشد و به‌طور مشابه

$\phi_{j,k}(t)$ بیانگر k امین تابع مقیاس، از توابع مقیاس تراز j می‌باشد.



$$f(t) = \psi(t) \quad ; \quad a = 1$$

$$f(t) = \psi(2t) \quad ; \quad a = \frac{1}{2}$$

$$f(t) = \psi(4t) \quad ; \quad a = \frac{1}{4}$$

شکل (۳-۱۰): انتقال تابع ویولت (بالا)، اتساع تابع ویولت (پایین) [۶۷]

توابع ویولت مادر و توابع مقیاس می‌بایست محدودیت‌های زیر را تأمین کنند:

$$\int \psi(x) dx = 0 \quad (۳-۱۱)$$

$$\int \phi(x) dx = 1 \quad (۳-۱۲)$$

نام ویولت نیز از این محدودیت حاصل می‌شود، یعنی این توابع می‌بایست حول محور x نوسان داشته

باشند.

خصوصیت مهم دیگر توابع ویولت و مقیاس متعامد بودن آن‌هاست. مجموعه انتقال و اتساع یافته

ویولت‌ها از $\psi(t)$ و مجموعه انتقال و اتساع یافته تابع مقیاس از $\phi(t)$ حاصل می‌شوند. همچنین، شکل

یک پایه متعامد در $L^2(\mathfrak{R})$ می باشد. بدین معنی که هر جزء در $L^2(\mathfrak{R})$ را می توان به صورت ترکیب خطی از این توابع پایه بیان کرد.

بر این مبنا می توان روابط زیر را با توجه به خصوصیت متعامد بودن توابع در نظر گرفت:

$$\int \psi_{j,k}(t) \times \psi_{j,k'}(t) dt = 0, \quad k \neq k' \quad (13-3)$$

$$\int \phi_{j,k}(t) \times \phi_{j,k'}(t) dt = 0, \quad k \neq k' \quad (14-3)$$

$$\int \psi_{j,k}(t) \times \phi_{j,k'}(t) dt = 0, \quad \forall k, k' \quad (15-3)$$

توجه داشته باشید که عبارت $\frac{1}{\sqrt{2^j}}$ در روابط ۳-۹ و ۳-۱۰، مانع از متعامد شدن پایه ها در $L^2(\mathfrak{R})$ می شود. در صورت برقراری روابط ۳-۱۶ و ۳-۱۷ شرایط متعامد یکه در $L^2(\mathfrak{R})$ ایجاد می شود. به این بردارهای پایه متعامد که نرمال شده اند، متعامد یکی می گویند.

$$\int \psi_{j,k}(t) \cdot \psi_{j,k}(t) dt = 1 \quad (16-3)$$

$$\int \phi_{j,k}(t) \cdot \phi_{j,k}(t) dt = 1 \quad (17-3)$$

حال می توانیم ضرایب مقیاس $s_{j,k}$ که تقریب از سیگنال اصلی $f(t)$ را حاصل می کند و ضرایب ویولت $d_{j,k}$ که جزئیات سیگنال را بیان می کند را تعریف کنیم:

$$s_{j,k} = \int f(t) \times \phi_{j,k}(t) dt, \quad j = 1, 2, \dots, J \text{ \& } k = 1, 2, \dots, K \mid J \leq \log_2^N \text{ \& } K = \frac{N}{2^j} \quad (18-3)$$

$$d_{j,k} = \int f(t) \times \psi_{j,k}(t) dt, \quad j = 1, 2, \dots, J \text{ \& } k = 1, 2, \dots, K \mid J \leq \log_2^N \text{ \& } K = \frac{N}{2^j} \quad (19-3)$$

بدین ترتیب، $s_{j,k}$ بیانگر k امین ضریب مقیاس، از مجموعه ضرایب مقیاس تراز j می باشد. همچنین $d_{j,k}$ بیانگر k امین ضریب ویولت، از مجموعه ضرایب ویولت تراز j می باشد؛ بنابراین هر تراز به تعداد $K = \frac{N}{2^j}$ ضریب مقیاس و به همین تعداد ضریب ویولت دارد.

بردار ضرایب مقیاس تراز j که با اندیس s^j ، نمایش داده می‌شود، به وسیله ضرب اسکالر تابع مقیاس همان تراز در سیگنال اصلی حاصل می‌شود. همین تعریف نیز در مورد ضرایب ویولت صادق است. با فرض سطری بودن تابع مقیاس، ویولت و سیگنال داریم:

$$\forall t: s^j = \left(f(t) \cdot \Phi_{j,1}^T, f(t) \cdot \Phi_{j,2}^T, f(t) \cdot \Phi_{j,3}^T, \dots, f(t) \cdot \Phi_{j, \frac{N}{2^j}}^T \right) \quad (3-20)$$

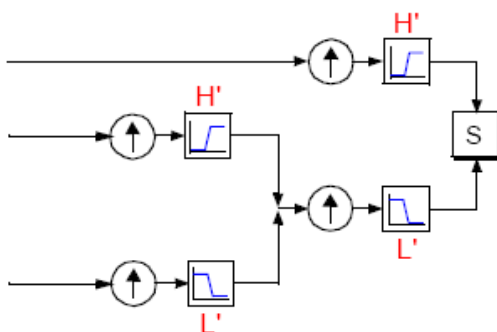
$$\forall t: d^j = \left(f(t) \cdot \Psi_{j,1}^T, f(t) \cdot \Psi_{j,2}^T, f(t) \cdot \Psi_{j,3}^T, \dots, f(t) \cdot \Psi_{j, \frac{N}{2^j}}^T \right) \quad (3-21)$$

علامت T ، در عبارت فوق به معنای ترانهاد می‌باشد. با توجه به روابط بالا می‌توان دریافت که سری ضرایب تقریب یا ویولت از ضرب اسکالر تابع مقیاس یا ویولت در سیگنال و برای یک تراز مشخص انجام می‌شود. بدین ترتیب سیگنال $f(t)$ به دو دسته کلی یعنی ضرایب تقریب و جزئیات تجزیه می‌شود که طول کلی هر دسته تقریباً نصف طول سیگنال می‌باشد. تجزیه به ضرایب تقریب و جزئیات روی ضریب تقریب حاصله از مرحله قبل انجام می‌شود تا دسته ضرایب ترازهای بعدی حاصل شود. بدین ترتیب اگر سیگنال 2^j عضو داشته باشد، می‌تواند به J تراز تجزیه شود؛ به طوری که هریک از بردارهای d^j و s^j یک بردار به طول $\frac{N}{2^j}$ می‌باشد. به عنوان مثال یک سیگنال با ۳۲ داده اولیه را می‌توان به ۵ تراز ($\log_2^{32} = 5$) تجزیه نمود.

۳-۳-۳- مفاهیم بنیادین بازسازی تبدیل ویولت

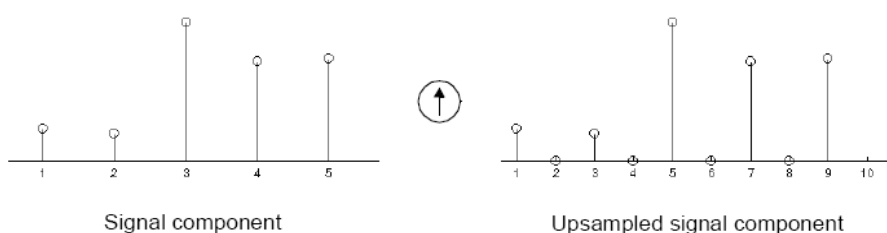
در دو زیر بخش قبلی در مورد آنالیز و تجزیه یک سیگنال توسط تبدیل ویولت گسسته صحبت کردیم. در دو زیر بخش بعدی می‌خواهیم در مورد نحوه بازسازی یک سیگنال مشخص از روی ضرایب ویولت آن صحبت کنیم. ابتدا تئوری موضوع را شرح داده و سپس به توضیح روابط ریاضی می‌پردازیم.

همان‌طور که قبلاً نیز اشاره کردیم، ضرایب تقریب و جزئیات را می‌توان جهت رسیدن به سیگنال اصلی، به‌طوری که هیچ‌گونه اطلاعات خاصی را از دست ندهد، باهم ادغام نمود. فرآیند بازسازی یا سنتز^۱ تحت عنوان معکوس تبدیل ویولت^۲ بیان می‌گردد. این فرآیند را در شکل ۳-۱۱ مشاهده می‌کنید.



شکل (۳-۱۱): فرآیند معکوس تبدیل ویولت [۶۷]

فرآیند معکوس تبدیل ویولت مشتمل از دو زیر فرآیند افزایش تعداد نمونه^۳ و عبور از فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر^۴ است. در مرحله افزایش تعداد نمونه، با اضافه کردن صفر مابین نمونه‌های کاهش یافته حاصل از تجزیه ویولت، طول سیگنال افزایش می‌یابد. این مرحله در شکل ۳-۱۲ نشان داده شده است. سپس با عبور نمونه‌های افزایش طول داده شده از داخل فیلترهای بازسازی، می‌توانیم به سیگنال اصلی برسیم.



شکل (۳-۱۲): مرحله افزایش تعداد نمونه در بازسازی سیگنال اصلی [۶۷]

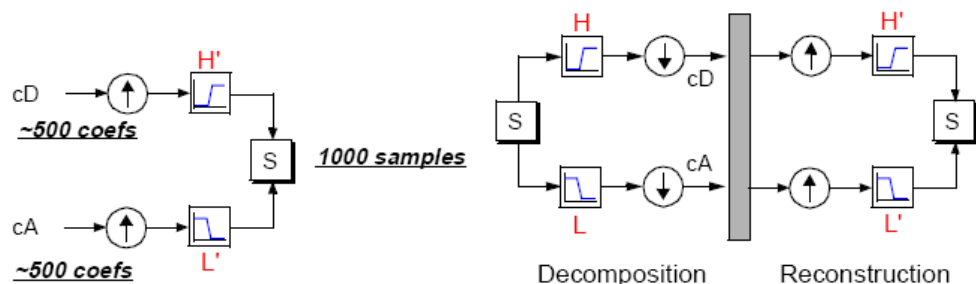
^۱ Syntheses

^۲ Inverse Discrete Wavelet Transform (IDWT)

^۳ Upsampling

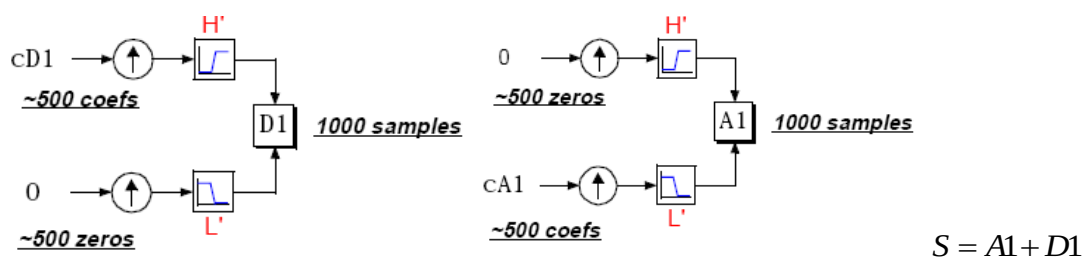
^۴ Filtering

نکته مهم در تبدیل ویولت گسسته انتخاب فیلترهای مناسب تجزیه و بازسازی به گونه‌ای است که هیچ اطلاعاتی از بین نرود. توجه شود که فیلترهای تجزیه و بازسازی با هم متفاوت می‌باشند. فرآیند عبور از فیلتر و بازسازی سیگنال اصلی را در شکل ۳-۱۳ مشاهده می‌کنید.



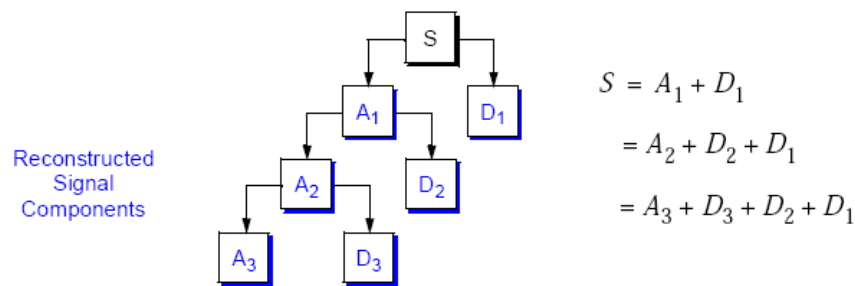
شکل (۳-۱۳): مرحله عبور از فیلترهای مختلف در بازسازی سیگنال اصلی [۶۷]

فرآیند بازسازی سیگنال تجزیه‌شده در تراز اول را می‌توان بدین صورت نیز در نظر گرفت: افزایش طول ضرایب تقریب و جزئیات همراه با عبور از فیلترهای بالاگذر و پایین گذر جهت رسیدن به ضرایب $D1$ و $A1$ و سپس جمع این دو ضریب؛ این فرآیند را در شکل ۳-۱۴ مشاهده می‌کنید.



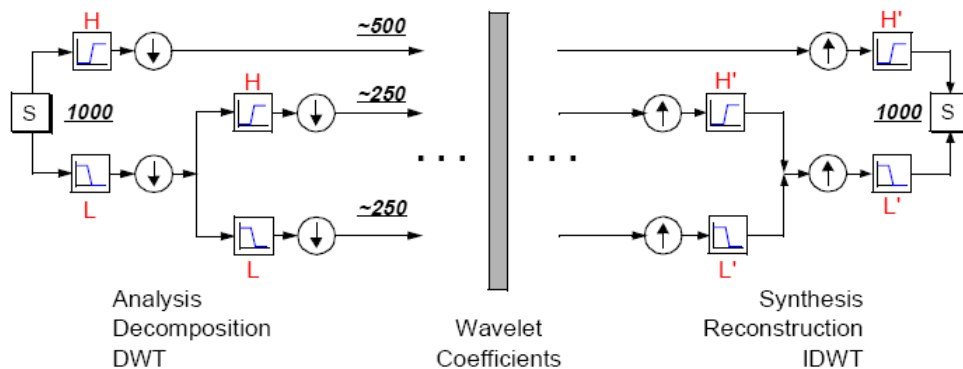
شکل (۳-۱۴): بازسازی سیگنال ۱۰۰۰ نقطه‌ای تجزیه‌شده تا تراز ۱ [۶۷]

با توسعه این بحث به سیگنال تجزیه‌شده به ترازهای مختلف، می‌توان دریافت که سیگنال اصلی را می‌توان با تعابیر مختلف بازسازی و بیان نمود. شکل ۳-۱۵ حالت‌های مختلف بازسازی یک سیگنال پس از تجزیه آن به ۳ تراز را نشان می‌دهد. در حالت کلی پس از تجزیه یک سیگنال به n تراز می‌توان $n+1$ دسته ضریب حاصل می‌شود و سیگنال به n حالت قابل بازسازی است.



شکل (۳-۱۵): حالت‌های مختلف بازسازی سیگنال تجزیه‌شده تا تراز ۳ [۶۷]

در شکل ۳-۱۶، بازسازی سیگنالی با ۱۰۰۰ نقطه داده اولیه که با تبدیل ویولت چندمرحله‌ای تجزیه‌شده است را مشاهده می‌کنید. نمادهای $\downarrow$ و $\uparrow$ بیانگر مراحل کاهش نرخ نمونه‌برداری و افزایش تعداد نمونه می‌باشد. اندیس‌های H و L بیانگر فیلترهای تجزیه بالاگذر و پایین‌گذر است که به ترتیب ضرایب جزئیات و تقریب سیگنال را حاصل می‌کنند. به‌طور مشابه اندیس‌های H' و L' بیانگر فیلترهای بازساخت بالاگذر و پایین‌گذر است که به ترتیب بر روی ضرایب جزئیات و تقریب اعمال شده و سیگنال را بازسازی می‌کنند.



شکل (۳-۱۶): تبدیل ویولت چندمرحله‌ای سیگنال و معکوس تبدیل ویولت جهت بازسازی سیگنال اولیه [۶۷]

۳-۳-۴- روابط تئوریک بازسازی تبدیل ویولت

همان‌طور که قبلاً نیز نشان داده شد، جهت بازسازی یک سیگنال می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد:

$$f(t) = A^1 + D^1 \quad (۳-۲۲)$$

که در آن A^1 تقریب تراز ۱ سیگنال اصلی است و D^1 جزئیات تراز ۱ سیگنال اصلی بوده و از روابط زیر به دست می‌آیند [۶۷].

$$A^1 = \left(s_{1,1} \Phi_{1,1} + s_{1,1} \Phi_{1,2} + \dots + s_{1, \frac{N}{2^1}} \Phi_{1, \frac{N}{2^1}} \right) \quad (23-3)$$

$$D^1 = \left(d_{1,1} \Psi_{1,1} + d_{1,1} \Psi_{1,2} + \dots + d_{1, \frac{N}{2^1}} \Psi_{1, \frac{N}{2^1}} \right) \quad (24-3)$$

در روابط فوق، $s_{1,i}$ بیانگر i امین ضریب در بردار ضریب تقریب تراز ۱ می‌باشد؛ و به‌طور مشابه $d_{1,i}$ بیانگر i امین ضریب در بردار ضریب جزئیات تراز ۱ می‌باشد.

اگر سیگنال را به ۲ تراز تجزیه کنیم، می‌توان سیگنال اصلی را به‌صورت $f(t) = A^2 + D^2 + D^1$ بازسازی کرد. به‌طور مشابه با تجزیه سیگنال به ۳ تراز، سیگنال اصلی را می‌توان به‌صورت $f(t) = A^3 + D^3 + D^2 + D^1$ بازسازی نمود؛ و در حالت کلی در صورت تجزیه سیگنال به J تراز می‌توان آن را با استفاده از رابطه زیر بازسازی نمود [۶۷].

$$f(t) = A^J + D^J + D^{J-1} + D^{J-2} + \dots + D^3 + D^2 + D^1 \quad (25-3)$$

در اینجا سیگنال اصلی از سیگنالی با رزولوشن پائین A^J و اضافه نمودن سیگنال‌های جزئیات $D^J, D^{J-1}, \dots, D^2, D^1$ به آن ساخته می‌شود.

در نهایت با لحاظ ضرایب تقریب و جزئیات در رابطه ۲۵-۳ و تعمیم روابط ۲۳-۳ و ۲۴-۳، رابطه ۳-۲۶ را می‌توان به‌عنوان یک رابطه مورد پذیرش که در مراجع مختلف نیز عمومیت دارد در نظر گرفت:

$$f(t) \cong \underbrace{\sum_{k=1}^K s_{J,k} \Phi_{J,k}}_{A^J} + \underbrace{\sum_{k=1}^K d_{J,k} \Psi_{J,k}}_{D^J} + \underbrace{\sum_{k=1}^K d_{J-1,k} \Psi_{J-1,k}}_{D^{J-1}} + \dots + \underbrace{\sum_{k=1}^K d_{1,k} \Psi_{1,k}}_{D^1} \quad (26-3)$$

$$J \leq \log_2^N \text{ \& } K = \frac{N}{2^J} \text{ \& } k = 1, 2, 3, \dots$$

هریک از ترازهای تجزیه ویولت، محدوده خاصی از فرکانس را پوشش می‌دهند که متناسب با مقیاس (اتساع) تابع ویولت و تابع مقیاس می‌باشد. محدوده فرکانسی D^j را می‌توان به‌صورت زیر نشان داد:

$$j \text{ محدوده فرکانس ترانز } j = [F_{1j}, F_{2j}] \quad (27-3)$$

$$j \text{ محدوده پریود ترانز } j = [T_{1j}, T_{2j}] \quad (28-3)$$

مقادیر F_{1j} و F_{2j} و T_{1j} و T_{2j} به صورت زیر تعریف می شود:

$$F_{1j} = \frac{1}{2^{(j+1)} \times \Delta t}, \quad F_{2j} = \frac{1}{2^j \times \Delta t} \quad (29-3)$$

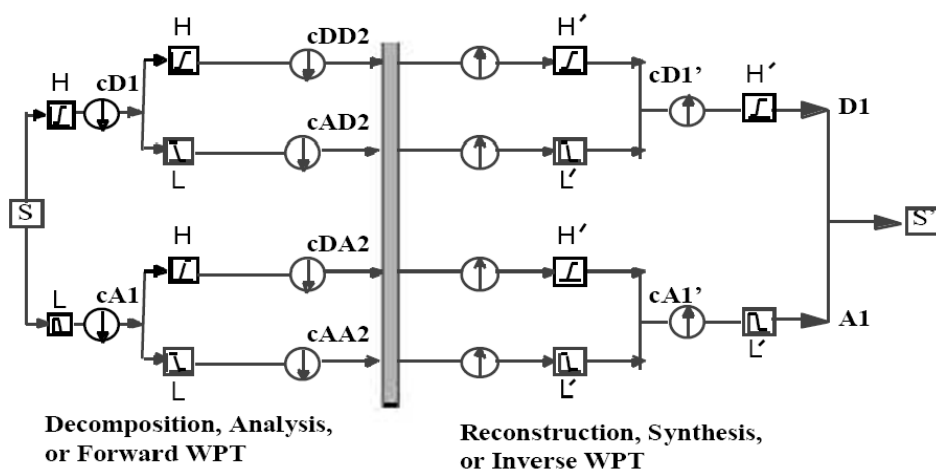
$$T_{1j} = 2^j \times \Delta t, \quad T_{2j} = 2^{j+1} \times \Delta t \quad (30-3)$$

که در آن Δt فاصله زمانی داده های سیگنال گسسته اصلی $f(t)$ می باشد.

۳-۴- مفهوم کلی و روابط تئوریک تبدیل بسته ویولتی

۳-۴-۱- مفاهیم بنیادین تبدیل بسته ویولتی

در تبدیل های ویولت معمولی ما ابتدا اجزاء سیگنال را به دو قسمت که عبارت اند از جزئیات و تقریب تقسیم می کنیم. سپس برای به دست آوردن ضرایب در ترازهای بالاتر قسمت تقریب سیگنال را مورد تجزیه قرار می دهیم. در تبدیل بسته ویولتی زیر شاخه ای از تبدیل های ویولت معمولی می باشد، علاوه بر تجزیه قسمت تقریب، قسمت جزئیات تراز قبلی نیز مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرد [۶۶]. با این توضیح، بسته ویولتی می تواند با دقت بیشتری به تجزیه فرکانسی - زمانی سیگنال بپردازد. شکل ۳-۱۷ نحوه تجزیه یک سیگنال را تا تراز ۲ و نحوه بازسازی مجدد سیگنال را نشان می دهد.



شکل (۳-۱۷): نمونه ای از تجزیه یک سیگنال با استفاده از تبدیل بسته ویولتی و بازسازی سیگنال اولیه [۶۸]

کلیه توضیحات ارائه شده پیرامون فیلترهای بالاگذر و پایین گذر در تجزیه و بازسازی، مفاهیم مقیاس و تقریب و... برای تبدیل ویولت معمولی، برای تبدیل بسته ویولتی نیز صادق می باشد و تنها تفاوت همان تجزیه متوالی قسمت های تقریب و جزئیات سیگنال در تبدیل بسته ویولتی می باشد. تنک بودن (پراکندگی)^۱ ماتریس ضرایب بسته ویولتی، کارایی محاسباتی بالا و از همه مهم تر خاصیت تفکیک چندگانه^۲ (قابلیت تجزیه، تحلیل و تفکیک زیاد سیگنال) بسته ویولتی، باعث شده است که این تبدیل به یکی از پرکاربردترین تبدیل ها در آنالیز سیگنال در علوم مختلف تبدیل شود. با استفاده از بررسی انرژی هر بسته که بیانگر انرژی سیگنال در طول زمان و در محدوده فرکانسی خاصی است، می توان به طبقه بندی اطلاعات پرداخت. بدین ترتیب می توان ویژگی هایی از سیگنال را به دست آورد که هم تمام فضا را پوشش دهد و هم کمترین همبستگی را نسبت به هم داشته باشند [۳۱].

۳-۴-۲- مبانی تئوریک تبدیل بسته ویولتی

بسته های ویولتی مجموعه ای از توابع بسته ویولتی هستند که به صورت زیر تعریف می شود:

$$W_n^{j,k}(t) = \left\{ 2^{-j/2} W_n(2^{-j}t - k), n \in N, j, k \in Z \right\}, \quad (3-31)$$

که در آن N مجموعه ای از متغیرهای مثبت، Z مجموعه ای از متغیرها، n پارامتر نوسانگر و j و k عبارت اند از پارامترهای مقیاس و انتقال.

بنابراین بسته های ویولت از توابع متوالی زیر به دست می آیند:

$$W_{2n}(2^{p-1}x - l) = \sqrt{2^{1-p}} \sum_m h(m - 2l) \sqrt{2^p} W_n(2^p x - m) \quad (3-32)$$

$$W_{2n+1}(2^{p-1}x - l) = \sqrt{2^{1-p}} \sum_m g(m - 2l) \sqrt{2^p} W_n(2^p x - m) \quad (3-33)$$

که در آن p شاخص مقیاس، l شاخص جابجایی، h فیلتر پایین گذر و g فیلتر بالا گذر با رابطه زیر می باشد:

¹ Sparsity

² Multi Resolution

$$g(k) = (-1)^k h(1-k) \quad (34-3)$$

ضرایب W_P در مقیاس و جابجایی دلخواه را می توان با استفاده از روابط ۳-۳۵ تا ۳-۳۷ برای سیگنال

گسترده زمانی f به دست آورد:

$$C_{n,k}^p = \sqrt{2^p} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} f(m).W_n(2^p m - k) \quad (35-3)$$

$$C_{2n,l}^{p-1} = \sum_m h(m-2l).C_{n,m}^p \quad (36-3)$$

$$C_{2n+1,l}^{p-1} = \sum_m g(m-2l).C_{n,m}^p \quad (37-3)$$

بنابراین برای سیگنال گسسته $(x(t))$ ضرایب بسته ویولتی از جاسازی اجزاء سیگنال در داخل توابع

بسته ویولتی به دست می آید.

$$c_j^i(k) = \sum_l x(t)W_{j,k}^n(t) \quad (38-3)$$

که $c_j^i(k)$ به i امین امینب تجزیه بسته ویولتی حاصل از i امین امینامتر مقیاس و k امین امینامتر

انتقال اشاره دارد.

اجزاء بسته ویولتی سیگنال $(x_j^i(t))$ را می توان با یک ترکیب خطی از توابع بسته ویولتی نشان داد:

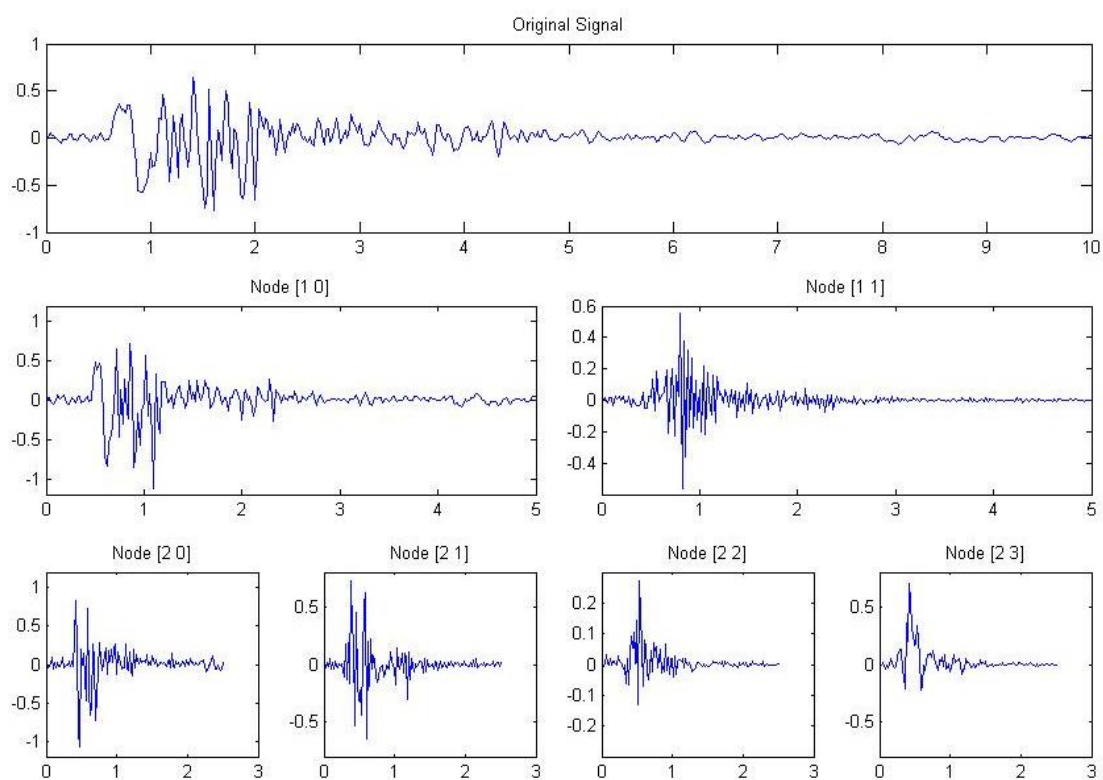
$$x_j^i(t) = \sum_l c_j^i(k)W_{j,k}^n(t). \quad (39-3)$$

بنابراین برای بازسازی سیگنالی که به j تراز تجزیه شده است می توان از رابطه زیر استفاده کرد.

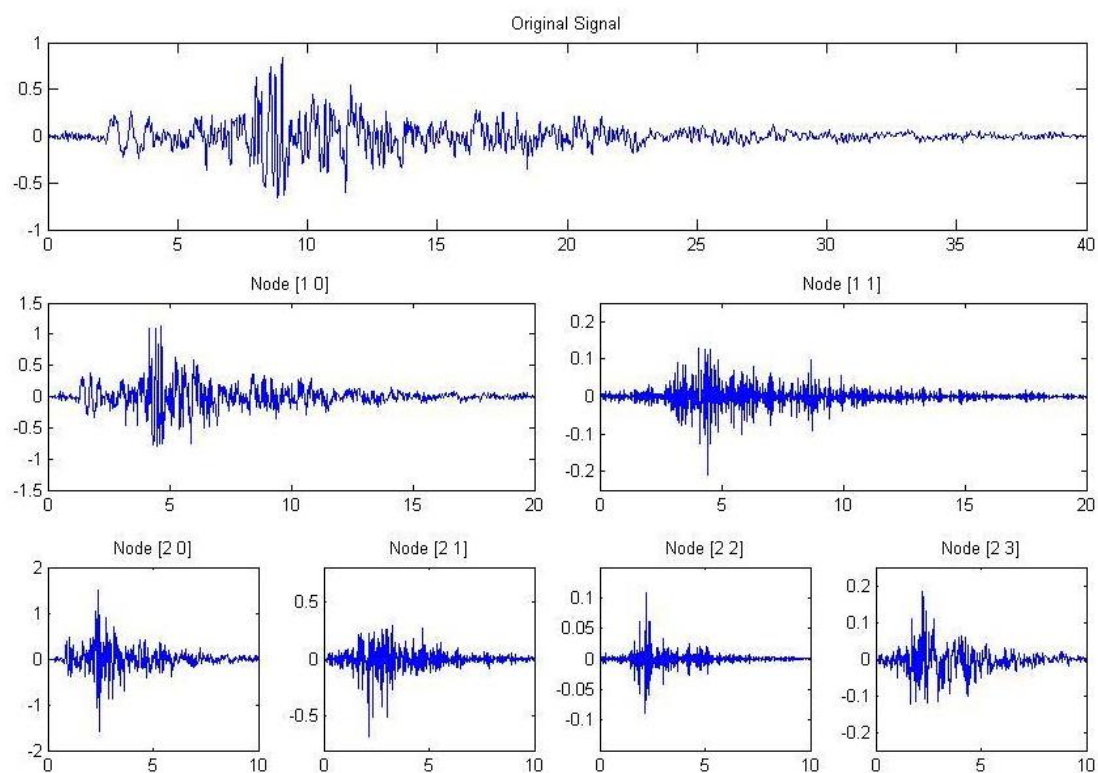
$$x(t) = \sum_{i=1}^{2^j} x_i^j(t). \quad (40-3)$$

به عنوان مثال درخت تجزیه سیگنال زلزله های ناغان، طبس و بم تا تراز ۲ در تصاویر زیر نشان داده

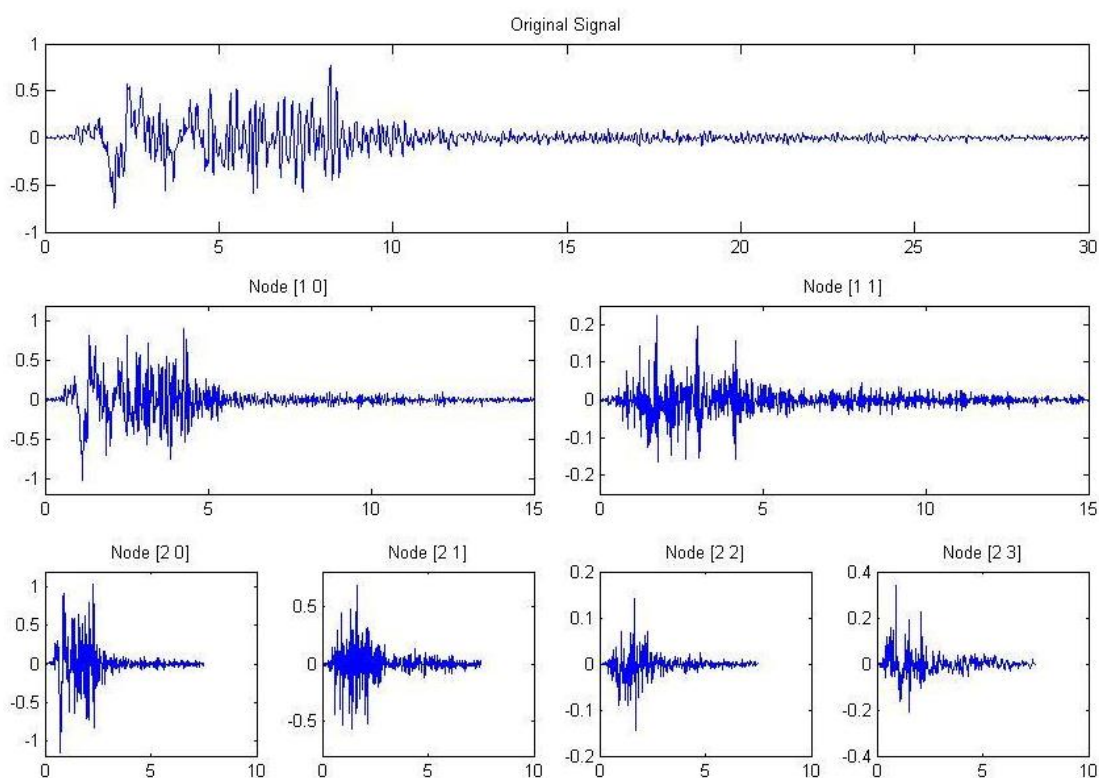
شده است.



شکل (۳-۱۸): تجزیه سیگنال زلزله ناغان تا تراز ۲ با استفاده از تبدیل بسته ویولتی [۶۹]



شکل (۳-۱۹): تجزیه سیگنال زلزله طبس تا تراز ۲ با استفاده از تبدیل بسته ویولتی [۶۹]



شکل (۳-۲۰): تجزیه سیگنال زلزله بم تا تراز ۲ با استفاده از تبدیل بسته ویولتی [۶۹]

با استفاده از تبدیل بسته ویولتی می‌توان انرژی قسمتی از سیگنال را بررسی کرد، زیرا که این انرژی با ضرایب ویولت همان قسمت از سیگنال متناظر می‌باشد.

$$Energy_n = \frac{1}{N^2} \sum_{k=1}^n |C_{n,k}^p|^2 \quad (۳-۴۱)$$

رابطه ۳-۴۱ بیانگر انرژی سیگنال در هر گره از تبدیل ویولت بسته‌ای می‌باشد و با توجه به اینکه هر گره محدوده خاصی از فرکانس را پوشش می‌دهد، این رابطه در واقع بیانگر انرژی محدوده خاصی از فرکانس سیگنال در طول زمان می‌باشد. این قابلیت طبقه‌بندی، یکی از مزایای تبدیل بسته ویولتی می‌باشد که به کمک آن می‌توان با ارائه کمترین وابستگی کل فضا را پوشش داد.

یکی از معیارهای بررسی مقدار و نرخ تولید اطلاعات در یک سیستم نوع بی‌نظمی (آنتروپی)^۱ آن می‌باشد. یکی از متداول‌ترین آنتروپی‌های مورد استفاده در آنالیز سیگنال‌ها، آنتروپی شانون^۲ می‌باشد.

^۱ Entropy

^۲ Shannon

$$El_s = -\sum_{k=1}^n s_i^2 \cdot \log(s_i^2) \quad (42-3)$$

آنتروپی شانون مربوط به ضرایب ویولت یکی از معیارهای قابلیت پیش‌بینی سیگنال می‌باشد و طبق رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$Entropy_n = -\sum_{k=1}^n |C_{n,k}^p|^2 \log |C_{n,k}^p|^2 \quad (43-3)$$

بنابراین با استفاده از این رابطه می‌توان به معیاری از ارتعاشات نامنظم سیگنال‌ها دست یافت.

۳-۴- شبکه‌های عصبی مصنوعی

در عصر حاضر اگرچه قدرت کامپیوترها در ذخیره، بازیابی اطلاعات، اتوماسیون اداری و... غیرقابل انکار بوده است، اما همچنان مسائلی وجود دارد که راه‌حلی برای آن‌ها وجود ندارد و یا کشف این راه‌حل بسیار سخت است. با توجه به این امر، علاقه فزاینده‌ای در توسعه تئوریک سیستم‌های دینامیکی هوشمند که مبتنی بر داده‌های تجربی هستند، ایجاد شده است. شبکه‌های عصبی مصنوعی جزء این دسته از سیستم‌های دینامیکی قرار دارند که با پردازش روی داده‌های تجربی، دانش و یا قانون نهفته در ماورای داده‌ها را به ساختار شبکه منتقل می‌کنند. به همین خاطر به این سیستم‌ها، سیستم‌های هوشمند نیز می‌گویند، چراکه بر اساس محاسبات روی داده‌های عددی یا مثال‌ها، قوانینی کلی را استخراج کرده و یاد گرفته‌اند.

شبکه‌های عصبی را می‌توان با اغماض زیاد، مدل‌های الکترونیکی از ساختار عصبی مغز انسان دانست. مکانیزم فراگیری و آموزش مغز اساساً بر تجربه و بررسی مسائل قبلی است و بر این مبنا قادر است مسائل جدید را تجزیه و تحلیل نماید. شبکه‌های عصبی نیز با مثال یاد می‌گیرند و پس از آموزش قادرند بر مبنای اطلاعاتی که به ازای آن‌ها آموزش دیده‌اند؛ جواب‌های قابل قبول ارائه دهند و نیز می‌توان از آن‌ها به‌طور نامحدود در ارائه جواب به اطلاعاتی که قبلاً با آن‌ها مواجه نبودند، استفاده نمود.

یکی از مهم‌ترین کاربردهای شبکه‌های عصبی، در جاهایی است که نیاز به ارتباط بین دو فضای متفاوت (هرچند به لحاظ فیزیکی نامربوط باشند) باشد. یکی دیگر از قابلیت‌های کلیدی شبکه‌های عصبی که دقیقاً با عملکرد مغز انسان تطابق دارد، قابلیت تحمل خطا^۱ می‌باشد. این بدین معناست که حتی در زمانی که اشتباهات محدودی در ورودی‌های شبکه وجود داشته باشد، برخلاف برنامه‌های معمولی کامپیوتری که جواب اشتباهی می‌دهند، شبکه‌ها قادرند پاسخ‌های مناسبی را ارائه دهند[۴].

۳-۴-۱ ساختار شبکه‌های عصبی مصنوعی

همان‌گونه که گفته شد شبکه عصبی یک سیستم مصنوعی پردازش اطلاعاتی است که از ساختار مغز انسان الهام گرفته شده است. ساختار هر شبکه شامل لایه‌های مختلف متشکل از نرون‌های متعدد می‌باشد. اولین لایه هر شبکه را لایه ورودی، لایه آخر را لایه خروجی و لایه‌های میانی را لایه‌های پنهان نام دارند.

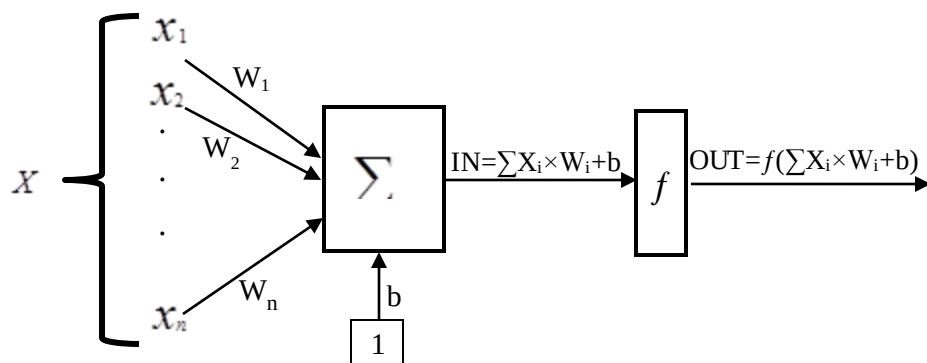
در این سیستم مشابه با کار مغز انسان، قوانین و عملیات زیر حاکم است:

۱- پردازش اطلاعات در تعدادی واحد که گره نامیده می‌شوند، انجام می‌گیرد. همچنین این واحدها به عنوان نرون نیز نامیده می‌شوند.

۲- اطلاعات یا سیگنال‌ها به وسیله اتصالات بین گرهی انتقال می‌یابد. به هر اتصالی یک وزن اختصاص داده می‌شود که قدرت آن اتصال را نشان می‌دهد.

۳- در گره‌ها (نرون‌ها)، از یک تابع فعال‌ساز برای تبدیل ورودی به خروجی استفاده می‌شود. با این اصول می‌توان ساختار استاندارد شبکه عصبی را ترسیم کرد که از یک سری نرون‌ها که به وسیله آرایش خاصی در کنار هم قرار گرفته و اتصالاتی بین نرون‌های ورودی و خروجی که در لایه‌های مختلف قرار گرفته‌اند، تشکیل شده است. شکل ۳-۲۱ ساختار کلی شبکه عصبی استاندارد را نشان می‌دهد[۴].

^۱ Noise



شکل (۳-۲۱): ساختار کلی شبکه‌های عصبی استاندارد [۶۷]

۳-۴-۲ فرآیند تولید خروجی در شبکه‌های عصبی مصنوعی

علی‌رغم تنوع در الگوهای شبکه، تقریباً همه آن‌ها بر اساس این ساختار بنا شده‌اند. با توجه به شکل ۲-۴، ابتدا دسته‌ای از ورودی‌ها که به صورت $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ نشان داده شده‌اند، به سلول عصبی اعمال می‌شوند. این ورودی‌ها که جمعاً به عنوان یک بردار در نظر گرفته می‌شوند، مشابه علائمی هستند که به سیناپس‌های سلول عصبی بیولوژیکی فرستاده می‌شوند. هر سیگنال قبل از اینکه به واحد جمع که با علامت $\sum$ نشان داده شده است اعمال شود، در یک وزن مربوط به خود $(w_1, w_2, \dots, w_n)$ ضرب می‌گردد، که هر وزن مشابه با قدرت یک اتصال سیناپس بیولوژیکی منفرد است. واحد جمع که شباهت خیلی کمی به جسم سلول بیولوژیکی دارد، همه ورودی‌های وزن‌دار را به همراه نرون بایاس به صورت جبری جمع کرده (IN) و خروجی را پس از اعمال این ورودی به تابع تحریک تولید می‌کند (OUT). توضیح ارائه شده بیانگر نحوه فعالیت یک شبکه عصبی ساده تک لایه است. با متصل نمودن چندین شبکه عصبی ساده می‌توان به شبکه عصبی چندلایه رسید. توجه شود که شبکه‌های چندلایه فقط در صورتی قدرت محاسباتی بالاتری نسبت به شبکه‌های تک لایه دارند که در حداقل یک لایه از آن‌ها یک تابع تحریک غیرخطی استفاده شود [۴].

۳-۴-۳ ویژگی‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی

به‌طور کلی شبکه‌های عصبی به منظور برقراری ارتباط و ایجاد نگاشت خطی و یا غیرخطی بین فضاهای مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. برخی از ویژگی‌های شبکه‌های عصبی که دلیل استفاده از شبکه‌های عصبی در علوم و صنایع مختلف است، به شرح ذیل می‌باشد [۴].

- **قابلیت تعمیم و یادگیری:** به معنای توانایی تنظیم پارامترهای شبکه، در برخورد با محیط‌های جدید و ورودی‌هایی است که در آموزش شبکه استفاده نشده است؛ به عبارت دیگر شبکه‌های عصبی با قابلیت جالب توجهی که در استنتاج معانی از داده‌های پیچیده یا مبهم دارند، می‌توانند برای استخراج الگوها و شناسایی روش‌هایی که آگاهی از آن‌ها برای انسان و دیگر تکنیک‌ها کامپیوتری بسیار پیچیده و دشوار است به کار گرفته شوند. خصوصیت دیگر آن که بسیار مورد توجه محققین می‌باشد استفاده از شبکه‌های عصبی در مسائل کشف رابطه بین گروهی از داده ورودی- خروجی که رابطه آن‌ها با یکدیگر مشخص نیست و یا محاسبه آن تقریباً غیرممکن است (مهندسی معکوس).

- **پردازش موازی:** نرون‌های هر لایه می‌تواند به‌طور مجزا و همزمان به ورودی‌های آن لایه پاسخ دهند؛ به عبارت دیگر سرعت پردازش در شبکه‌های عصبی البته بعد از یادگیری بسیار سریع‌تر از برنامه‌های معمولی کامپیوتری است. به‌عنوان مثال برنامه نوشته شده برای تشخیص چهره یک فرد را با ساختار رایانه‌ها و نرم‌افزارهای موجود را در نظر بگیرید. به‌طور یقین برنامه شامل حلقه‌هایی است که ده‌ها بار باید به‌طور زنجیره و پی‌درپی تکرار شود. در هر تکرار خصوصیت خاصی از صورت را ذخیره نموده و با الگو مقایسه نماید. بعد از آزمون کلیه خصوصیات، چهره را تشخیص دهد. سلسله عملیات مزبور، بارها تکرار شده و مدت‌ها وقت دستگاه را می‌گیرد. در سیستم مغز، در آن واحد ده‌ها واحد پردازش (که به نرون موسوم است)

در عصب بینایی به طور موازی بکار می افتد و به دلیل پردازش موازی (و نه پی در پی) در زمان بسیار کوتاه چهره تشخیص داده می شود.

- **مقاوم بودن شبکه های عصبی در برابر خطاهای ورودی:** از آنجا که هر سلول

شبکه عصبی مستقل عمل می کند، رفتار کلی شبکه برآیندی از رفتارهای محلی نرون های متعدد است؛ لذا خطاهای محلی در خروجی کمتر اثرگذار بوده و باعث افزایش تحمل شبکه در پذیرش خطاها می شود؛ به عبارت دیگر، نرون ها در یک روند همکاری، خطاهای محلی یکدیگر را تصحیح می کنند. به عنوان مثال، بروز اشتباه در فرمت و علائم برنامه نویسی منجر به اتلاف ساعت ها وقت در ردیابی، شناسایی و اصلاح برنامه می گردد. همچنین رخداد اشتباه در منطق برنامه اعم از آنکه یک زیر برنامه یا قسمتی از آن درست کار نکند، منجر به آن خواهد شد که نتیجه حاصله کاملاً نادرست گردد. درحالی که عدم عملکرد صحیح قسمتی از نرون ها منجر به از کارافتادگی کامل مغز نمی گردد و امکان اتخاذ تصمیم صحیح در این حالت نیز وجود دارد.

۳-۴-۵ آموزش شبکه های عصبی مصنوعی

شبکه های عصبی به گونه ای آموزش داده می شوند که با اعمال یک دسته از ورودی ها، دسته خروجی های دلخواه تولید شود. هر کدام از این دسته های ورودی و یا خروجی را می توان به صورت یک بردار در نظر گرفت. آموزش با به کار بردن متوالی بردارهای ورودی و تنظیم وزن های شبکه، مطابق با یک روش از پیش تعیین شده (الگوریتم آموزشی) انجام می گردد. طی آموزش شبکه وزن های شبکه به تدریج به مقادیری همگرا می شوند که به ازای آن ها با اعمال بردار ورودی، بردار خروجی دلخواه تولید شود [۴].

به طور کلی آموزش شبکه های عصبی به دو طریق انجام می شود:

۱- آموزش نظارت شده^۱ (با ناظر)

^۱ Supervised Learning

۳-۴-۶ نحوه ارائه زوج‌های آموزشی به شبکه

در آموزش شبکه‌های عصبی بهتر است که زوج‌های آموزشی را به‌طور تصادفی به شبکه ارائه کنیم. اگر اطلاعات مشابه در فایل ورودی در کنار یکدیگر گروه‌بندی شوند و به ترتیب^۲ به شبکه ارائه شوند، در این صورت شبکه ممکن است آنچه را که یاد گرفته است بعداً از یاد ببرد. به عبارت دیگر، در شروع آموزش که اطلاعات ابتدایی در فایل ورودی به شبکه ارائه می‌شود، شبکه دسته‌ای از رابطه‌های بین ورودی‌ها و خروجی‌ها را فرا می‌گیرد، اما زمانی که به طرف انتهای فایل اطلاعاتی پیش می‌رود، با دسته متفاوتی از رابطه‌های بین ورودی و خروجی‌ها مواجه می‌شود و آنچه را که قبلاً یاد گرفته بود ممکن است فراموش کند. برای اجتناب از این مشکل بهتر است اطلاعات ورودی را به‌طور تصادفی به شبکه ارائه نماییم و یا اگر در برنامه‌ای امکان ارائه اطلاعات به‌طور تصادفی به شبکه وجود ندارد بهتر است هر چند دوره یک بار ترتیب اطلاعات را در فایل ورودی عوض کنیم. ارائه اطلاعات به‌طور تصادفی به شبکه را می‌توان یکی از راه‌های فرار از کمینه محلی نیز در نظر گرفت [۷۰].

۳-۴-۷ مشکلات آموزش شبکه عصبی مصنوعی

طولانی بودن و غیرقطعی بودن فرآیند آموزش از مهم‌ترین مشکلات الگوریتم‌های بازگشتی شناخته شده است. برای مسائل پیچیده ممکن است مدت زیادی برای آموزش شبکه نیاز باشد و اصولاً ممکن است شبکه به درستی تربیت نشود؛ طولانی بودن زمان آموزش شبکه می‌تواند به علت غیر بهینه بودن اندازه گام باشد. به‌طور کلی در روش انتشار برگشتی، دو چیز باعث شکست آموزشی^۳ می‌شود: ناتوانی شبکه^۴ و کمینه محلی^۵. این دو عامل خود متأثر از دو پارامتر اندازه گام^۶ و ناپایداری موقت می‌باشند.

¹ Unsupervised Learning

¹ Training Failure

² Network Paralysis

³ Local Minima

⁶ Step Size

• **اندازه گام:** در اثبات همگرایی که توسط ویلیامز، هینتون و راملهارت در سال ۱۹۸۴ ارائه شد، تنظیم وزن ها (ΔW) بی نهایت کوچک در نظر گرفته شده است. این فرض کاملاً غیره عملی است، زیرا که تنظیم وزن بی نهایت کوچک به زمان آموزش نامحدود نیاز خواهد داشت. بنابراین لازم است که یک مقدار مناسب محدود برای اندازه گام انتخاب شود. ضمناً هیچ توصیه خاصی در این زمینه وجود ندارد و فقط از طریق آزمایش و تجربه می تواند یک اندازه گام بهینه را انتخاب نمود. در صورتی که اندازه گام خیلی کوچک باشد، سرعت همگرایی می تواند خیلی کند باشد و در صورتی که خیلی بزرگ باشد، باعث ناتوانی و ناپایداری مستمر شبکه می شود [۶۹].

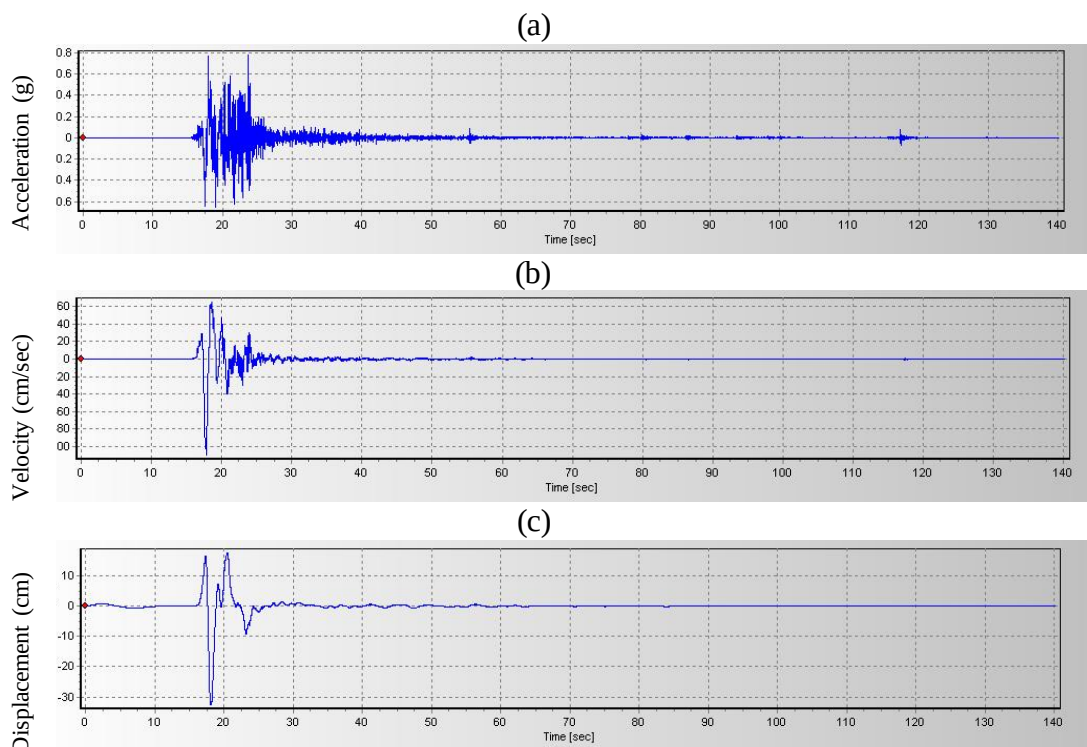
• **ناپایداری موقت:** اگر شبکه با محیطی که دائماً در حال تغییر است روبرو شود به طوری که یک بردار ورودی یکسان را هرگز ممکن نباشد دو بار تجربه کند، در این حالت، فرآیند آموزش شبکه ممکن است هیچ وقت همگرا نشود و این امکان وجود دارد که بی هدف و سرگردان شود و یا به طور گسترده نوسان کند در این حالت است که انتشار برگشتی در تقلید از سیستم بیولوژیکی شکست می خورد.

در این رساله سعی شده است که با استفاده از توانایی الگوریتم های تکاملی در بهینه یابی و روش های آموزشی معمول شبکه های عصبی بر ناتوانی و مشکلات شبکه های عصبی چیره گردیم.

فصل چهارم: پارامترها و طیف‌های سیگنال زلزله

۴-۱ مقدمه

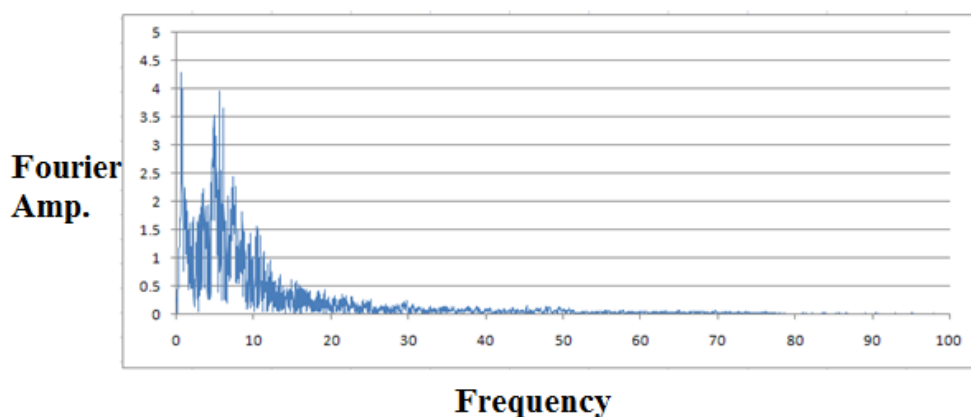
متداول ترین روش تشریح حرکات زمین بهره گیری از سیگنال زلزله می باشد، که در آن پارامترهای حرکت شامل شتاب، سرعت، جابجایی و یا هر سه می باشند و در شکل (۴-۱) به آن اشاره شده است. معمولاً یکی از این پارامترها به صورت مستقیم اندازه گیری می شود و دیگر پارامترها با انتگرال گیری یا دیفرانسیل گیری محاسبه می شوند. تفاوت فرکانس های غالب در شتاب، سرعت و جابجایی سیگنال، قابل ملاحظه می باشد. سیگنال شتاب، فرکانس نسبتاً بالایی را نشان می دهد. انتگرال گیری، یک اثر هموار شدن و یا فیلتر شدن ایجاد می نماید (در حوزه فرکانس، $\tilde{V}(\omega) = \tilde{a}(\omega)/\omega$ و $\tilde{u}(\omega) = \tilde{V}(\omega)/\omega$ که $\tilde{a}, \tilde{V}, \tilde{u}$ به ترتیب تغییر مکان، سرعت و شتاب تبدیل شده می باشند). بنابراین تاریخچه زمانی سرعت، فرکانس های بالای کمتری را نسبت به سیگنال شتاب نشان می دهد. سیگنال جابجایی با انتگرال گیری مجدد به دست می آید که حرکات با فرکانس پایین را نشان می دهد [۷۱].



شکل (۴-۱): نمودار (a) شتاب (b) سرعت (c) جابجایی مربوط به سیگنال زلزله بم

۴-۲ طیف فوریه^۱

رسم تغییرات دامنه فوریه در مقابل فرکانس (C_n برحسب ω_n) به «طیف دامنه فوریه» که فرکانس‌های غالب یک زلزله را پیدا می‌کند و رسم تغییرات زاویه فاز فوریه در مقابل فرکانس (ϕ_n) برحسب ω_n به «طیف فاز فوریه» معروف می‌باشد. طیف دامنه فوریه زمین، نحوه توزیع دامنه را با فرکانس (یا پریود) نشان داده و محتوی فرکانسی سیگنال را بسیار واضح ترسیم می‌نماید. (شکل ۴-۲)



شکل (۴-۲): طیف فوریه مربوط به زلزله بم

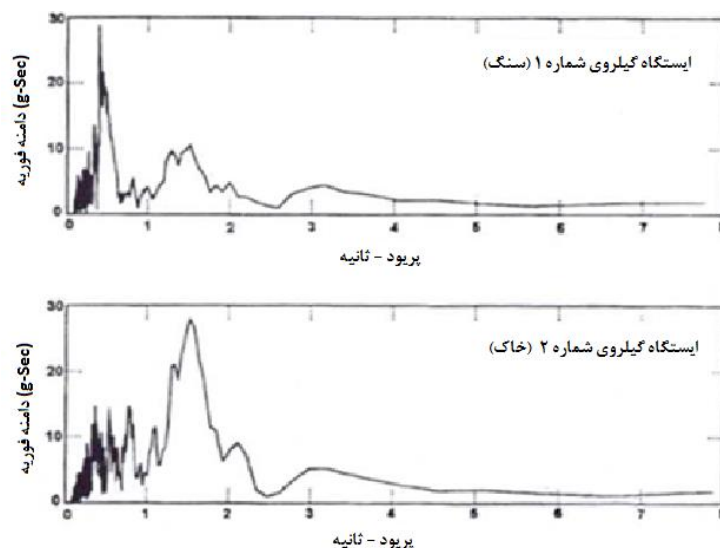
طیف دامنه فوریه ممکن است باریک یا پهن باشد. یک طیف باریک نشان می‌دهد که سیگنال دارای یک فرکانس (پریود) غالب است که می‌توان یک تاریخچه زمانی (شتاب‌نگاشت) تقریباً سینوسی و هموار^۲ را ایجاد نماید. یک طیف پهن متناظر با سیگنالی است که شامل فرکانس‌های مختلف بوده و تاریخچه زمانی نامنظم و ناهموارتری ایجاد می‌نماید. طیف دامنه فوریه برای مؤلفه‌های حرکت $E-W$ گیلروی^۳ شماره ۱ (سنگ) و گیلروی شماره ۲ (خاک) در شکل (۴-۳) نشان داده شده است. شکل ناهموار طیف از نوعی است که برای حرکات منفرد زمین قابل مشاهده می‌باشد. شکل طیف‌ها کاملاً متفاوت می‌باشند، به‌عنوان نمونه طیف گیلروی شماره ۱ (سنگ) در پریودهای کوتاه (با فرکانس‌های بالا) قوی‌تر می‌باشد، درحالی‌که رکورد گیلروی شماره ۲ (خاک) برعکس می‌باشد. با بررسی دقیق در حوزه زمان می‌توان به

^۱ Fourier Spectra

^۲ Smooth

^۳ Gilroy

اختلاف محتوی فرکانسی نیز پی برد، اما در طیف دامنه فوریه این اختلاف کاملاً مشهود است. هنگامی که طیف دامنه فوریه یک زلزله واقعی هموارشده و در مقیاس لگاریتمی رسم شود، خصوصیات شکل مشهودتر است.



شکل (۳-۴): طیف دامنه فوریه برای مؤلفه‌های E-W سیگنال حرکات نیرومند [۲]

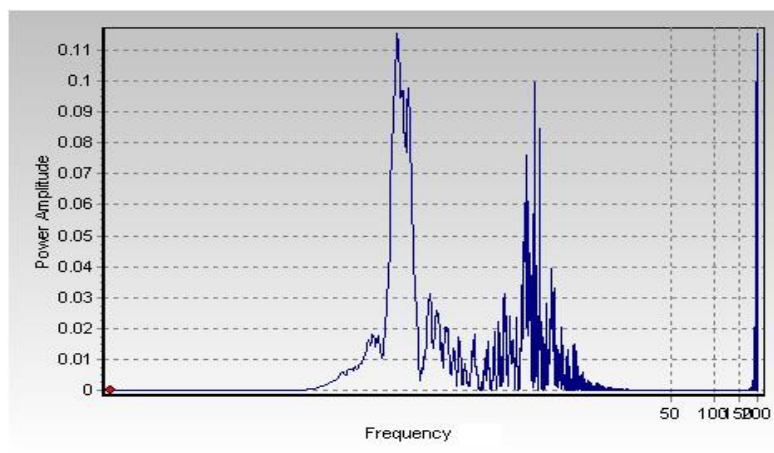
دامنه‌های شتاب فوریه که در محدوده متوسطی از فرکانس‌ها که بین دو مقدار فرکانس گوشه، f_c (در قسمت پایینی) و فرکانس قطع، f_{max} (در قسمت بالایی) محصور هستند، بیشترین مقدار را خواهند داشت.

به صورت تئوریک می‌توان نشان داد که فرکانس گوشه، تناسب معکوس با ریشه سوم گشتاور لرزه‌ای دارد [۷۲-۷۳]. این نتیجه نشان می‌دهد که زلزله‌های بزرگ، حرکات بزرگ‌تری با فرکانس پایین نسبت به زلزله‌های کوچک ایجاد می‌نمایند. فرکانس قطع به خوبی شناخته نشده است. این فرکانس هم به عنوان یک اثر نزدیک ساختگاه [۲۶] و هم اثر منبع [۷۴] تعریف شده و معمولاً برای یک محدوده جغرافیایی، ثابت در نظر گرفته می‌شود.

از آنجایی که زوایای فاز، زمان وقوع بیشینه‌های حرکت هارمونیک را کنترل می‌نمایند، طیف فاز فوریه بر تغییرات حرکت زمین (زلزله) با زمان، تأثیر می‌گذارد. در مقایسه با طیف‌های دامنه فوریه، طیف‌های فاز فوریه حاصل از رکوردهای زلزله واقعی، خصوصیات شکل‌ها را نشان نمی‌دهند.

۳-۴ طیف قدرت^۱

محتوای فرکانسی حرکت زمین را همچنین می‌توان با یک طیف قدرت یا تابع دانسیته طیفی تشریح نمود. تابع دانسیته طیفی قدرت را می‌توان جهت تعیین خصوصیات آماری حرکت زمین و محاسبه احتمالی پاسخ با بهره‌گیری از روش‌های ارتعاش تصادفی نیز بکار برد (شکل ۴-۴).



شکل (۴-۴): طیف قدرت مربوط به زلزله بم

شدت کل یک حرکت زمین در مدت T_d ، با سطح زیر منحنی سیگنال مربع شتاب در حوزه زمان به شرح ذیل به دست می‌آید:

$$I_o = \int_0^{T_d} [a(t)]^2 dt \quad (۱-۴)$$

با بهره‌گیری از تئوری پارسوال^۲ شدت کل را همچنین می‌توان در حوزه فرکانس به شرح ذیل بیان

نمود:

^۱ Power Spectra

^۲ Parseval

$$I_o = \frac{1}{\pi} \int_0^{\omega_N} C_n^2 d\omega \quad (2-4)$$

که در این رابطه $\omega_N = \frac{\pi}{\Delta t}$ «فرکانس نایو کوئیست^۱» (بزرگ‌ترین فرکانس در سری فوریه) می‌باشد.

شدت متوسط λ_o از تقسیم معادله (۱-۴) و (۲-۴) بر زمان به دست می‌آید.

$$\lambda_o = \frac{1}{T_d} \int_0^{T_d} [a(t)]^2 dt = \frac{1}{\pi T_d} \int_0^{\omega_N} C_n^2 d\omega \quad (3-4)$$

توجه داشته باشید که شدت متوسط با مربع متوسط شتاب برابر است. دانسیته طیفی قدرت، به‌گونه‌ای تعریف می‌شود که:

$$\lambda_o = \int_0^{\omega_N} G(\omega) d\omega \quad (4-4)$$

از آن به‌سادگی با مقایسه معادله (۳-۴) و (۴-۴) می‌توان دید که:

$$G(\omega) = \frac{1}{\pi T_d} C_n^2 \quad (5-4)$$

از معادله (۵-۴) رابطه نزدیک میان تابع دانسیته طیفی قدرت و طیف دامنه فوریه مشهود است. دانسیته طیفی قدرت اغلب با تقسیم مقادیر آن بر مساحت زیر آن نرمالیزه می‌شود.

$$G^n(\omega) = \frac{1}{\lambda_o} G(\omega) \quad (6-4)$$

که در آن λ_o مانند قبل مربع متوسط شتاب می‌باشد.

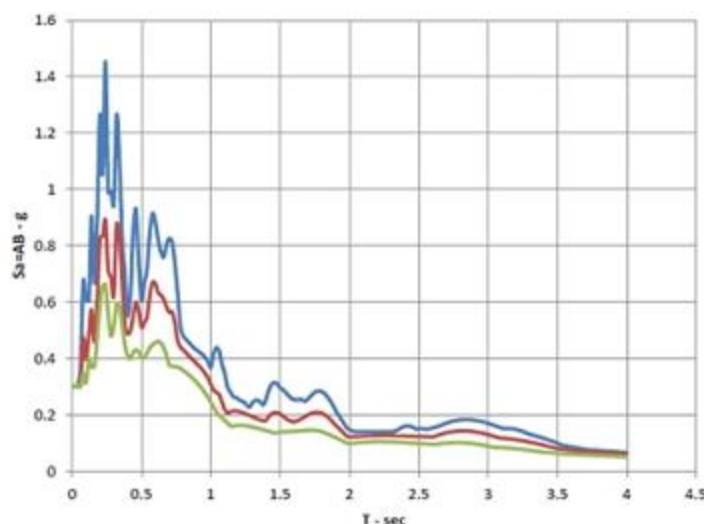
تابع دانسیته طیفی قدرت در مشخص کردن خصوصیات زلزله به‌عنوان یک فرآیند تصادفی مفید است. تابع دانسیته طیفی قدرت می‌تواند یک فرآیند تصادفی ایستگاهی را تشریح نماید (یعنی فرآیندی که پارامترهای آماری آن با زمان تغییر نکند). سیگنال حرکت نیرومند واقعی، اغلب نشان می‌دهد که شدت در بخش‌های اول حرکت تا یک مقدار ماکزیمم انباشته‌شده، سپس در یک دوره زمانی، تقریباً ثابت مانده و سرانجام در نزدیکی آخر حرکت کاهش می‌یابد. چنین فرآیند تصادفی غیرایستگاهی غالباً

^۱ Nyquist

به وسیله ضرب یک سیگنال ایستگاهی در یک تابع شدت معین مدل می شود. تغییر در محتوای فرکانسی
حین حرکت با استفاده از دیدگاه طیف قدرت تکاملی توصیف شده است [۷۶-۷۵].

۴-۴ طیف پاسخ^۱

طیف پاسخ سومین طیفی است که در پروژه های مهندسی زلزله کاربرد وسیعی دارد. «طیف پاسخ»
پاسخ پیشینه سیستمی با یک درجه آزادی^۲ در مقابل یک حرکت ورودی خاص به صورت تابعی از
فرکانس طبیعی (یا پریود طبیعی) و ضریب میرایی سیستم *S.D.O.F.* را تشریح می کند. در شکل
(۴-۵) نمونه ای از طیف پاسخ ارائه شده است.



شکل (۴-۵) نمونه ای از طیف پاسخ با میرایی های متفاوت

طیف های پاسخ ممکن است با مقیاس های حسابی به صورت منفرد رسم شده و یا با استفاده از
خاصیت روابط فوق به صورت منحنی های سه جانبه ترسیم گردند. منحنی های سه جانبه، سرعت طیفی
را روی محور قائم، فرکانس طبیعی (یا پریود طبیعی) را روی محور افقی و شتاب تغییر مکان را روی
محورهای مایل نشان می دهند. هنگامی که مقادیر طیفی به جای فرکانس طبیعی، برحسب پریود طبیعی
ترسیم شوند، محورهای شتاب و تغییر مکان معکوس می گردند. اشکال طیف های پاسخ نمونه نشان

¹ Response Spectra

² Single Degree Of Freedom (S.D.O.F.)

می‌دهند که مقادیر شتاب، سرعت و جابجایی ماکزیمم به فرکانس‌های (پریودهای) مختلف وابسته می‌باشند. در فرکانس‌های پایین، متوسط جابجایی طیفی تقریباً ثابت می‌باشد، درحالی‌که در فرکانس‌های بالا متوسط شتاب طیفی نسبتاً ثابت است و در محدوده بین این فرکانس‌ها سرعت طیفی تقریباً ثابت می‌ماند. این رفتار سبب می‌شود که اغلب طیف‌های پاسخ به بخش‌های «شتاب کنترل شده» (در فرکانس‌های بالا)، «سرعت کنترل شده» (در فرکانس‌های متوسط) و «جابجایی کنترل شده» (در فرکانس‌های پایین) تقسیم شوند.

در طیف‌های پاسخ الاستیک رفتار نیرو-جابجایی سازه خطی فرض می‌شود. اما بسیاری از سازه‌های واقعی در اثر حرکات لرزه‌ای زمین رفتار غیر الاستیک خواهند داشت. یک طیف پاسخ غیر الاستیک (یعنی طیف متناظر با رابطه غیرخطی نیرو-جابجایی) را می‌توان برای به حساب آوردن اثرات رفتار غیر الاستیک بکار برد. بایستی یک طیف غیر الاستیک جداگانه جهت نمایش جابجایی کل (جمع الاستیک و پلاستیک) ترسیم گردد. با افزایش تغییر شکل‌پذیری، شتاب‌های طیفی کاهش و جابجایی‌ها افزایش می‌یابند.

طیف‌های پاسخ، خصوصیات حرکات نیرومند زمین را به صورت غیرمستقیم منعکس می‌کنند زیرا این حرکات با پاسخ یک سازه S.D.O.F. فیلتر می‌شوند.

دامنه، محتوای فرکانسی با شدت کمتر، مدت حرکت ورودی، همگی بر مقادیر طیفی تأثیر می‌گذارند. یادآوری این نکته حائز اهمیت است که طیف پاسخ تنها حداکثر پاسخ سازه‌های مختلف را نشان می‌دهد، اما پاسخ سازه‌ها از اهمیت ویژه‌ای در مهندسی زلزله برخوردار است و طیف پاسخ از مفیدترین و پراهمیت‌ترین ابزار شناخت خصوصیات حرکات نیرومند زمین است. [۷۱]

به‌طور کلی عوامل مؤثر در شکل طیف‌های پاسخ را به پنج دسته کلی تقسیم می‌کنند:

- مشخصات زمین‌شناختی منطقه، مانند: نوع خاک و تغییرات لایه‌بندی خاک از بستر سنگی تا

زیر پی سازه

- بزرگای زلزله، زلزله‌های با بزرگای بزرگ‌تر، بیشتر بر روی شکل و دامنه طیف تأثیر می‌گذارند.
- فاصله کانونی (فاصله افقی منبع لرزه‌زا تا ایستگاه ثبت رکورد زلزله)، از جمله تأثیرات این پارامتر می‌توان به شکل طیف‌های پاسخ زلزله‌های نزدیک گسل اشاره کرد.
- مشخصات منبع لرزه‌زا (مکانیزم گسلش)
- مدت زلزله، زلزله‌های با مدت‌زمان بیشتر بر روی محدوده‌های فرکانسی پایین و متوسط طیف تأثیر می‌گذارند.

۴-۵ طیف‌های طراحی

لازمه طراحی سازه‌های جدید در برابر زلزله و ارزیابی ایمنی سازه‌های موجود، تحلیل پاسخ آن‌ها در مقابل لرزش‌های زلزله می‌باشد. جهت ارزیابی خطرات ژئوتکنیکی، از قبیل روانگرایی و گسیختگی شیب‌ها نیز نیاز به تحلیل در برابر سطوح مختلف لرزش می‌باشد. سطحی از لرزش که در آن عملکرد رضایت بخشی مورد انتظار است غالباً به سطح لرزش طراحی مشهور است و با حرکت طرح زمین توصیف می‌شود. حرکات طرح زمین می‌توانند برحسب نحوه بکار رفتن، به طرق مختلف مشخص شوند. در بسیاری از تحلیل‌های پاسخ خاک و سازه نیاز به یک سیگنال (تاریخچه زمانی) کامل زلزله می‌باشد، اما بقیه تنها باوجود یک یا چند پارامتر از پارامترهای حرکت زمین قابل انجام می‌باشند. پارامترهای معمول جهت تعیین خصوصیات حرکات زمین عبارت از شتاب افقی ماکزیمم، سرعت افقی ماکزیمم، پریود غالب، مدت و طول طیف پاسخ می‌باشد.

طیف‌های طراحی اغلب به‌عنوان بارگذاری زلزله در تحلیل‌های دینامیکی سازه‌ها بکار می‌روند، لذا حرکات طرح زمین اغلب برحسب طیف‌های طراحی بیان می‌شوند. طیف‌های طراحی و طیف‌های پاسخ زلزله‌های واقعی، یکسان نیستند. طیف‌های پاسخ زلزله‌ها بسیار بی‌قاعده هستند. اشکال آن‌ها جزئیات محتوای فرکانسی و فاز مشخص آن‌ها را منعکس می‌نماید. به عبارت دیگر، طیف‌های طراحی کاملاً

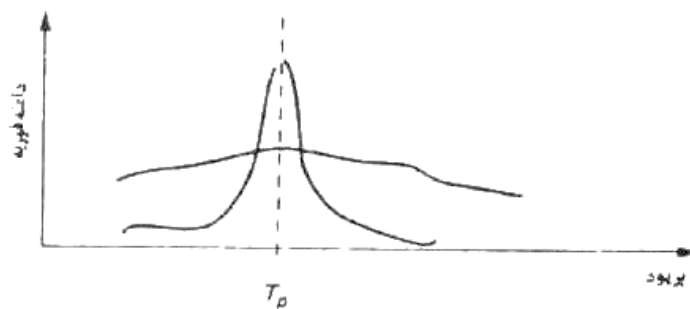
هموار بوده و معمولاً از هموار کردن، متوسط‌گیری یا پوش طیف‌های پاسخ حرکات چندگانه به دست می‌آیند. بهره‌گیری از طیف‌های پاسخ طراحی هموار، تلویحاً عدم قطعیتی را در نظر می‌گیرد که با آن خواص خاک و سازه به‌وسیله جلوگیری از نوسانات شدید در شتاب‌های طیفی با تغییرات کوچک در پریود سازه‌ای، شناخته می‌شوند. [۷۱]

۴-۶ پارامترهای طیفی

در بخش قبل انواع مختلف طیف که می‌توان از آن‌ها جهت تعریف خصوصیات سیگنال زلزله بهره گرفت تشریح شد. ترکیب طیف دامنه فوری و تراکم طیفی قدرت با طیف فاز قادر به توصیف سیگنال زلزله به‌صورت کامل می‌باشند. طیف پاسخ نمی‌تواند حرکت واقعی زمین را تشریح کند اما اطلاعات اضافی ارزشمندی در جهت پتانسیل تأثیر حرکات بر سازه‌ها را در اختیار قرار می‌دهد. هر یک از این طیف‌ها یک تابع پیچیده‌ای بوده و مشابه تاریخچه زمانی (شتاب‌نگاشت) نیاز به داده‌های بسیاری جهت تشریح آن‌ها می‌باشد. تعدادی از پارامترهای طیفی جهت برداشت بخش‌های مهمی از این اطلاعات از هر طیف ارائه شده است.

۴-۶-۱ پریود غالب

یکی از پارامترهای مستقل که گرچه مقداری خام می‌باشد، ولی نمایانگر محتوای فرکانسی حرکت زمین است، پریود غالب، T_p می‌باشد. پریود غالب عبارت از پریود ارتعاش متناظر با مقدار ماکزیمم دامنه طیف فوری می‌باشد. برای پرهیز از اثرات نامطلوب تک قله‌های طیف دامنه فوری، غالباً پریود غالب از روی طیف هموارشده فوری به دست می‌آید. با آنکه پریود غالب اطلاعاتی در خصوص محتوی فرکانسی در اختیار می‌گذارد، اما به‌وضوح در شکل (۴-۶) دیده می‌شود که حرکات با محتوی فرکانسی کاملاً متفاوت، دارای پریود غالب یکسانی هستند.



شکل (۴-۶): دو طیف فرضی دامنه فوریه با پریود غالب یکسان اما محتوی فرکانسی کاملاً متفاوت [۱]

۴-۶-۲ پهنای باند

از پریود غالب می‌توان موقعیت ماکزیمم طیف دامنه فوریه را به دست آورد، اما این موضوع هیچ‌گونه اطلاعاتی در مورد نحوه پراکندگی دامنه‌های طیفی حول پریود غالب به دست نمی‌دهد. پهنای باند طیف دامنه فوریه، محدوده فرکانسی است که در فرکانس‌های بالاتر از آن دامنه فوریه افزایش می‌یابد. پهنای باند معمولاً در ترازى که قدرت طیف نیم می‌باشد و دارای ماکزیمم مقدار است، اندازه‌گیری می‌شود که متناظر با $\frac{1}{\sqrt{2}}$ برابر دامنه فوریه ماکزیمم می‌باشد. شکل نامنظم طیف‌های دامنه فوریه منفرد غالباً ارزیابی پهنای باند را با مشکل مواجه می‌سازد. تعیین پهنای باند برای طیف‌های هموار شده بسیار ساده‌تر خواهد بود [۷۱].

۴-۶-۳ فرکانس مرکزی

از تابع دانسیته قدرت طیفی جهت تخمین خواص آماری سیگنال زلزله می‌توان استفاده نمود. فرکانس مرکزی Ω [۷۷] به شرح ذیل تعریف می‌شود:

$$\Omega = \sqrt{\frac{\lambda_2}{\lambda_0}} \quad (۴-۸)$$

فرکانس مرکزی پارامتری از فرکانس در محلی است که دانسیته قدرت طیفی متمرکز می‌باشد. این پارامتر را می‌توان به همراه شدت متوسط مدت، جهت تعیین شتاب ماکزیمم متوسط تئوری بکار برد.

۴-۶-۴ فاکتور شکل

فاکتور شکل [۷۷] پراکندگی تابع دانسیته قدرت طیفی را حول فرکانس مرکزی نشان می‌دهد:

$$\delta = \sqrt{1 - \frac{\lambda_1^2}{\lambda_o \lambda_2}} \quad (۱۰-۴)$$

فاکتور شکل همیشه بین صفر تا ۱ است و مقادیر زیادتر آن متناظر با پهنای باند بزرگ‌تر می‌باشند.

۴-۶-۵ پارامترهای کانای-تجیمی^۱

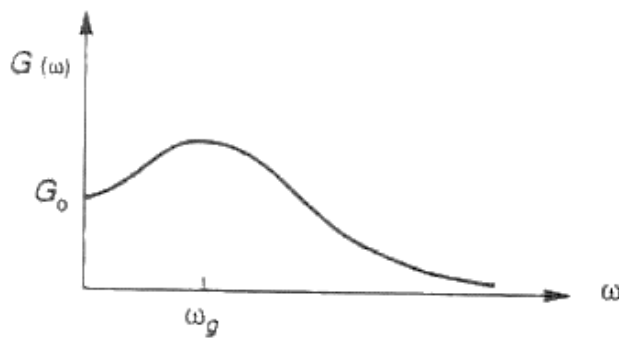
گرچه توابع دانسیته قدرت طیفی منفرد ممکن است اشکال کاملاً نامنظمی داشته باشند، لیکن با معدل‌گیری از تعدادی توابع دانسیته قدرت طیفی نرمال شده برای حرکات نیرومند مشابه، می‌توان به شکلی با خصوصیات هموار رسید. از تعداد محدودی رکورد حرکات نیرومند زمین به منظور پیشنهاد یک مدل سه پارامتری برای دانسیته قدرت طیفی استفاده کردند [۱۱] و [۷۸].

$$G(\omega) = G_o \frac{1 + [2\xi_g(\omega/\omega_g)]^2}{[1 - (\omega/\omega_g)^2]^2 + [2\xi_g(\omega/\omega_g)]} \quad (۱۱-۴)$$

در فرمول فوق پارامترهای G_o , ξ_g , ω_g که به ترتیب فرکانس زمین، میرایی و شتاب صفر می‌باشند، شکل تابع را تعیین می‌نمایند (شکل ۴-۷).

پاسخ جابجایی یک سیستم $S.D.O.F$ با فرکانس طیفی ω_g و ضریب میرایی ξ_g درم قابل حرکت پایه به‌وسیله تابع دانسیته قدرت طیفی توصیف می‌شود. بر این اساس مؤلفه‌های فرکانس بالای حرکت ورودی مستهلک‌شده و مؤلفه‌های فرکانس نزدیک ω_g تشدید خواهند شد.

^۱ Kanai-Tajimi



شکل (۷-۴): شکل تابع دانسیته قدرت طیفی [۱۱] و [۷۸]

پنزن و کلو^۱ تصحیحی برای تابع دانسیته قدرت طیفی پیشنهاد کردند تا از تغییر مکان و سرعت‌های مفرط در فرکانس‌های خیلی کوچک جلوگیری شود تابع دانسیته قدرت طیفی اصلاح شده کانای-تجیمی به دو پارامتر اضافی جهت توصیف دانسیته قدرت طیفی نیاز دارد.

۷-۴ سایر پارامترهای زلزله

پارامترهای مطرح شده در مباحث گذشته بر پایه دامنه، محتوای فرکانسی و یا مدت زلزله استوار می‌باشند. از آنجایی که این خصوصیات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشند، لذا پارامترهایی که بیش از یک مشخصه را منعکس می‌نمایند، بسیار مفید هستند. در عبارات ذیل برخی پارامترهایی که دو یا سه مشخصه زمین را منعکس می‌نمایند مورد بحث قرار می‌گیرند.

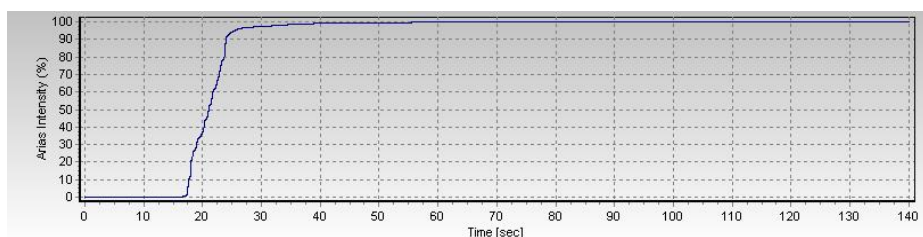
۷-۴-۱ شدت آریاس^۲

شدت آریاس دارای واحد سرعت می‌باشد و معمولاً بر حسب متر بر ثانیه تعریف می‌شود شکل (۷-۴-۸). چون این پارامتر از انتگرال گیری روی کل مدت به دست می‌آید نه روی مدت حرکات نیرومند، لذا مقدار آن مستقل از روش تعریف مدت حرکات نیرومند است [۷۱]. شدت مشخصه به شرح ذیل تعریف می‌شود:

$$I_a = \frac{\pi}{2g} \int_0^{\infty} [a(t)]^2 dt \quad (۷-۴-۱۲)$$

^۱ Penzien, Clough

^۲ Arias



شکل (۴-۸): درصد شدت آریاس برای زمان‌های مختلف مربوط به زلزله بم

۴-۷-۲ انرژی زلزله

انرژی کل آزاد شده حین یک زلزله اغلب از رابطه ذیل (گوتنبرگ - ریشتر) تعیین می‌گردد.

$$\text{Log } E = 11.8 + 1.5 M_s \quad (۴-۱۳)$$

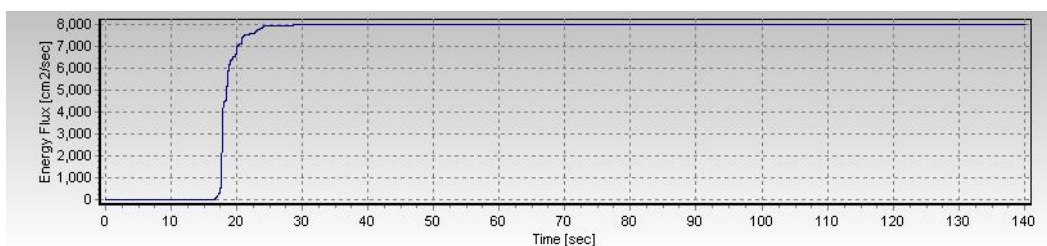
M_I بر مبنای امواج درونی زمین^۱، M_s بر مبنای امواج سطحی زمین، M_w بر مبنای امواج چرخشی زمین است.

$$M_w > 7 \quad 5 < M_s < 7 \quad \text{دقت: } 2.5 < M_I < 5$$

که در این رابطه E بر حسب ارگ (یک ارگ = $10^8 \times 7.5$ فوت - پوند) می‌باشد. بعدها نشان داده شد که این رابطه را می‌توان برای بزرگای گشتاور نیز بکار برد. از این رابطه چنین برداشت می‌شود که افزایش بزرگا به اندازه یک واحد مطابق با $10^{1.5}$ یا ۳۲ برابر افزایش در انرژی زلزله است. بنابراین یک زلزله با بزرگای ۵ تنها انرژی به میزان ۰,۰۰۱ زلزله‌ای با بزرگای ۷ ایجاد می‌نماید، که نشان دهنده بی‌اثر بودن زلزله‌ای کوچک در آزادسازی انرژی کرنشی ذخیره شده که عامل اصلی وقوع زلزله‌های بسیار بزرگ است، می‌باشد [۷۱].

اغلب تصور و درک عظمت مقدار انرژی آزاد شده در یک زلزله با آنکه یک ارگ واحد کوچکی است بسیار مشکل است، اما به عنوان مثال انرژی آزاد شده ناشی از یک بمب اتمی مشابه آنچه که در فاجعه هیروشیما استفاده شده معادل ۲۰۰۰۰ تن TNT) متناظر با یک زلزله با بزرگای ۶ است. بر این پایه زلزله ۱۹۶۰ شیلی انرژی معادل ۱۷۸۰۰۰ برابر چنین بمب اتمی آزاد کرد.

^۱ Local



Specific Energy Density of Bam: 8018.88563637cm2/sec

شکل (۴-۹): نمودار انرژی مربوط به زلزله بم

۴-۷-۳ شتاب ماکزیمم^۱

شتاب‌های افقی معمولاً به علت رابطه طبیعی آن‌ها با نیروهای اینرسی جهت تشریح حرکات زمین استفاده می‌شوند. متداول‌ترین معیار دامنه در یک حرکت زمین شتاب افقی ماکزیمم^۲ است. PGA برای یک مؤلفه حرکت، بزرگ‌ترین مقدار (قدر مطلق) شتاب افقی به دست آمده از آن مؤلفه سیگنال است. با جمع برداری دو مؤلفه عمود برهم برآیند ماکزیمم PGA (که جهت آن معمولاً بر جهت مؤلفه‌های اندازه‌گیری شده منطبق نیست) به دست خواهد آمد. در واقع بزرگ‌ترین نیروهای دینامیک حاصل، در انواع سازه‌های اصلی (یعنی سازه‌های خیلی صلب) رابطه نزدیکی با PGA دارند. PGA همچنین با شدت زلزله رابطه دارد [۷۹].

$$PGA = \max|a(t)| \quad (۴-۱۴)$$

در مهندسی زلزله به شتاب‌های قائم توجه کمتری نسبت به شتاب‌های افقی می‌گردد، زیرا وزن سازه‌ها (سازه‌های ساخته شده) در مقابل نیروهای دینامیکی ناشی از شتاب‌های قائم حاشیه اطمینان مناسبی ایجاد می‌کند. شتاب‌های ماکزیمم خیلی بزرگ که برای فاصله بسیار کوتاهی از زمان ادامه می‌یابند، خرابی کمتری در انواع مختلف سازه‌ها ایجاد می‌کنند. تاکنون تعداد زیادی زلزله با شتاب ماکزیمم بیش از $0.5g$ به وقوع پیوسته، اما خرابی مهمی در سازه‌ها به وجود نیامده است، زیرا شتاب ماکزیمم با فرکانس بسیار بزرگ رخ داده و مدت زلزله طولانی نبوده است. اگرچه شتاب ماکزیمم پارامتر

^۱ Maximum Acceleration

^۲ Peak Ground Acceleration(PGA or PHA)

بسیار مفیدی است، اما هیچ اطلاعاتی در خصوص محتوی فرکانسی یا مدت حرکت به دست نمی‌دهد. لذا جهت ارائه خصوصیات دقیق حرکت زمین به داده‌های بیشتری نیاز است. شتاب ماکزیمم به دست آمده حاصل از سیگنال‌های زلزله بم در زمان $t=23.73\text{sec}$ به میزان $0.77749179g$ می‌باشد.

۴-۷-۴ سرعت ماکزیمم^۱

سرعت افقی ماکزیمم^۲ یکی دیگر از پارامترهای مهم در تشریح دامنه حرکات زمین است. از آنجایی که سرعت، حساسیت کمتری به مؤلفه‌های فرکانس-بالا تر حرکات زمین دارد. لذا PGV در فرکانس‌های متوسط جهت تشریح دقیق دامنه حرکات زمین مناسب‌تر از PGA می‌باشد. برای سازه یا تأسیساتی که به بارگذاری در این محدوده متوسط فرکانس حساس هستند (مانند سازه‌های بلند یا شکل‌پذیر، پل‌ها و غیره) PGV مشخصه دقیق‌تری جهت ارزیابی خرابی نسبت به PGA به دست می‌دهد. PGV با شدت زلزله نیز رابطه دارد [۷۹].

$$PGV = \max |v(t)| \quad (۴-۱۵)$$

سرعت ماکزیمم به دست آمده حاصل از سیگنال‌های زلزله بم در زمان $t=17.84\text{sec}$ به مقدار $109.54408635\text{cm/sec}$ می‌باشد.

۴-۷-۵ جابجایی ماکزیمم^۳

جابجایی‌های ماکزیمم (PGD) عموماً با مؤلفه‌های حرکات یک زلزله در فرکانس‌های پایین‌تر همراه است. به علت خطاهای پردازش علائم در فیلتر کردن و انتگرال‌گیری شتاب‌نگارها و نیز خطاهای صوتی با پیوند بزرگ، اغلب تعیین دقیق آن‌ها مشکل است. لذا جابجایی ماکزیمم نسبت به شتاب ماکزیمم و سرعت ماکزیمم در اندازه‌گیری حرکات زمین کمتر متداول است [۷۹-۸۰].

$$PGD = \max |d(t)| \quad (۴-۱۶)$$

^۱Maximum Velocity

^۲Peak Ground Velocity (PGV or PHV)

^۳Maximum Displacement

جابجایی ماکزیمم به دست آمده حاصل از سیگنال‌های زلزله بم در زمان $t=18.13\text{sec}$ به میزان 32.56195097cm می‌باشد.

۴-۷-۶ $V_{\max}/a_{\max}$

از آنجایی که معمولاً سرعت‌ها و شتاب‌های ماکزیمم به حرکات با فرکانس‌های مختلف وابسته هستند، بنابراین نسبت $V_{\max}/a_{\max}$ به محتوی فرکانسی حرکت بستگی خواهد داشت. به عنوان نمونه در یک حرکت هارمونیک ساده با پریود T ، $V_{\max}/a_{\max} = T/2\pi$ می‌باشد [۷۱].

$$\frac{v_{\max}}{a_{\max}} = \frac{\max|v(t)|}{\max|a(t)|} \quad (۴-۱۷)$$

برای حرکات زلزله‌ای که شامل فرکانس‌های زیادی باشند، مقدار $2\pi(V_{\max}/a_{\max})$ به عنوان پریود معادل موج هم‌نوا تعریف می‌شود. لذا شاخصی خواهد بود که معرف پریودهای مربوط به مهم‌ترین حرکت زمین می‌باشد [۸۱]. مقادیر متوسط جدول (۴-۱) را برای شرایط مختلف ساختگاه تا حداکثر فاصله ۵۰ کیلومتری پیشنهاد نمودند:

جدول (۴-۱): نسبت $V_{\max}/a_{\max}$ برای شرایط مختلف ساختگاه [۸۱]

$V_{\max}/a_{\max}$	شرایط ساختگاه
55 cm/sec/g=0.056 sec	سنگ
110 cm/sec/g=0.112 sec	خاک‌های سخت (<200 ft)
135 cm/sec/g=0.138 sec	خاک‌های سخت عمیق (>200 ft)

پریودهای متناظر موج‌های هم‌نوا برای شرایط ساخت گاهی سنگ، خاک سخت و خاک سخت عمیق به ترتیب ۰/۳۵ ثانیه، ۰/۷۰ ثانیه و ۰/۸۷ ثانیه می‌باشند، که یک انتقال به سمت حرکات با پریودهای بلندتر (فرکانس‌های پایین‌تر) را در خاک‌های نرم‌تر نشان می‌دهد.

$V_{\max}/a_{\max}$ به دست آمده حاصل از سیگنال‌های زلزله بم به میزان 0.11276sec می‌باشد.

^۱ Peak velocity and acceleration ratio

۷-۷-۴ میانگین مربعات ریشه شتاب، سرعت و جابجایی (RMS)^۱

پارامتر منفردی که اثرات دامنه و محتوی فرکانسی رکورد یک حرکت نیرومند را در بر می گیرد، شتاب rms می باشد و به عبارتی میانگین کل شتاب را در اختیار قرار می دهد و به صورت ذیل تعریف می شود:

$$a_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T_d} \int_0^{T_d} [a(t)]^2 dt} = \sqrt{\lambda_o} \quad (18-4)$$

که در رابطه فوق T_d مدت حرکت نیرومند و λ_o شدت متوسط (یا متوسط مربعات شتاب) می باشد. از آنجایی که انتگرال در معادله (۱۸) تحت تأثیر زیاد شتابهای بزرگ با فرکانس بالا نمی باشد (که فقط روی یک پریود کوتاه رخ می دهد) و چون مدت حرکت بر آن مؤثر می باشد، شتاب rms در کاربردهای مهندسی بسیار مفید است، اما مقدار آن به روش معرفی مدت حرکات نیرومند بستگی دارد. این پارامتر برای سرعت و جابجایی نیز مطابق رابطه (۱۹-۴) قابل محاسبه است [۷۱].

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{1}{t_x} \int_0^t [v(t)]^2 dt} \quad ; \quad d_{rms} = \sqrt{\frac{1}{t_x} \int_0^t [d(t)]^2 dt} \quad (19-4)$$

شتاب، سرعت و جابجایی به دست آمده حاصل از سیگنالهای زلزله بم به ترتیب 0.06083103g، 2.67123835cm/sec، 7.56145853cm می باشند.

۷-۷-۸ شدت مشخصه^۲

شدت مشخصه که به شرح ذیل تعریف می شود:

$$I_c = a_{rms}^{1.5} T_d^{0.5} \quad (20-4)$$

که در رابطه فوق T_d مدت حرکت نیرومند می باشد و a_{rms} شتاب موثر می باشد. با شاخص خرابی سازه ناشی از ماکزیمم تغییر شکل ها و انرژی هیستریک جذب شده رابطه خطی دارد [۷۱]. شدت مشخصه به دست آمده حاصل از سیگنالهای زلزله بم 0.17768025 می باشد.

¹ Root mean square of acceleration, velocity and displacement

² Characteristic Intensity

۴-۷-۹ سرعت تجمعی مطلق

سرعت یعنی انرژی و انرژی در یک زلزله یعنی تخریب. پس مجموع قدر مطلق سرعت به سادگی برابر سطح زیر منحنی قدر مطلق سیگنال خواهد بود [۷۱]:

$$CAV = \int_0^{T_d} |v(t)| dt \quad (۴-۲۱)$$

مجموع قدر مطلق سرعت به خوبی با پتانسیل خسارات سازه‌ای رابطه دارد. سرعت تجمعی مطلق به دست آمده حاصل از سیگنال‌های زلزله بم $2.42013483 \text{ cm/sec}$ می‌باشد.

۴-۷-۱۰ شدت طیف پاسخ

از آنجائیکه سازه‌های بسیاری دارای پرپود اساسی بین 0.1 و $2/5$ ثانیه می‌باشند، آرایش طیف پاسخ در این محدوده از پرپود بایستی شاخصی از پاسخ پتانسیل این قبیل سازه‌ها فراهم سازد. بنابراین شدت طیف پاسخ چنین تعریف می‌شود [۸]:

$$SI(\xi) = \int_{0.1}^{2.5} PSV(\xi, T) dt \quad (۴-۲۲)$$

(یعنی مساحت زیر منحنی طیف پاسخ شبه سرعت بین پرپودهای 0.1 و $2/5$ ثانیه). شدت طیف پاسخ، که طبق رابطه (۲۲) تعریف شد، برای هر ضریب میرایی سازه‌ای قابل محاسبه می‌باشد. این عامل مفاهیم مهمی از محتوای دامنه و فرکانس را در یک پارامتر منفرد در بر می‌گیرد (در محدوده اهمیت اولیه برای سازه).

۴-۷-۱۱ شدت طیف سرعت^۱

شدت طیف پاسخ برای ۵ درصد میرایی را شدت طیف سرعت نامیدند. شدت طیف سرعت به دلیل اینکه برای ارزیابی پاسخ سدهای خاکی و سنگریزه‌ای، که معمولاً پریود اساسی بین ۰/۶ و ۲ ثانیه دارند، مفید می‌باشد، پیشنهاد شده است [۸۲].

$$VSI = \int_{0.1}^{2.5} S_v(\xi = 0.05, T) dT \quad (23-4)$$

شدت طیف سرعت به دست آمده حاصل از سیگنال‌های زلزله بم 399.67967207 cm/sec می‌باشد.

۴-۷-۱۲ شدت طیف شتاب^۲

برای مشخص نمودن حرکت نیرومند زمین جهت تحلیل سدهای بتنی، که معمولاً دارای پریودهای اساسی کمتر از ۰/۵ ثانیه می‌باشند، شدت طیف شتاب را به صورت زیر تعریف نمودند [۸۲]:

$$ASI = \int_{0.1}^{0.5} S_a(\xi = 0.05, T) dt \quad (24-4)$$

(یعنی مساحت زیر طیف پاسخ شتاب بین پریودهای ۰/۱ تا ۰/۵ ثانیه). شدت طیف شتاب به دست آمده حاصل از سیگنال‌های زلزله بم 0.64680011g می‌باشد.

۴-۷-۱۳ شتاب و سرعت حداکثر مؤثر (EPA)^۳

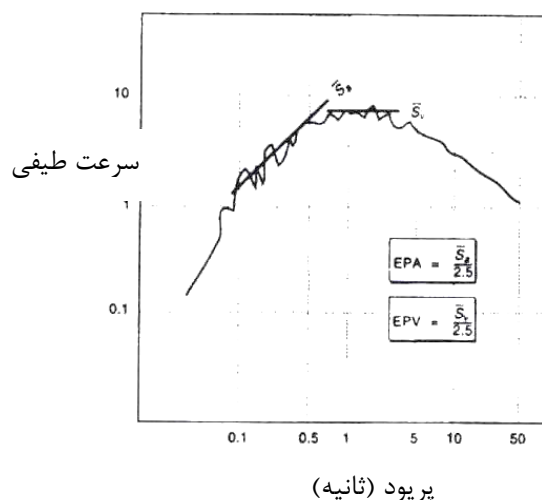
شورای فناوری کاربردی در سال ۱۹۷۸، دو فاکتور را تعریف کرد که به وسیله آن‌ها طیف پاسخ استاندارد قابل نرمالیزه کردن خواهد بود. شتاب حداکثر مؤثر به صورت شتاب طیفی متوسط در محدوده پریودهای ۰/۱ و ۰/۵ ثانیه، تقسیم بر ۲/۵ (فاکتور تشدید استاندارد برای ۵ درصد طیف میرایی) تعریف شده است. سرعت حداکثر (EPV)^۴ هم به صورت سرعت طیفی متوسط در پریود ۱ ثانیه تقسیم بر ۲/۵ تعریف شده است. در شکل (۴-۱۰) نحوه تعیین EPA, EPV به صورت ترسیمی نشان داده شده است [۲].

¹ Velocity Spectrum Intensity

² Acceleration Spectrum Intensity

³ Effective Peak Acceleration

⁴ Effective Peak Velocity



شکل (۴-۱۰): نحوه تعیین شتاب حداکثر مؤثر و سرعت حداکثر مؤثر از روی طیف‌های پاسخ [۱]

فرآیند متوسط‌گیری از طیف سرعت‌ها و شتاب‌ها در یک محدوده پریود، اثر بیرون‌زدگی‌های موضعی در طیف پاسخ روی EPV, EPA را به حداقل می‌رساند. در EPV, EPA در مشخص نمودن طیف‌های پاسخ هموار شده طراحی، در آئین‌نامه‌های ساختمانی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. شتاب و سرعت حداکثر مؤثر حاصل از سیگنال‌های زلزله بم به ترتیب $0.65299956g$ و $62.24799813cm/sec$ می‌باشد.

۴-۷-۱۴ مدت واحد^۱

مجموع زمانی می‌باشد که شتاب از یک حد خاص تعیین شده بیشتر است به‌عنوان مثال برای زلزله بم این مقدار $11.98sec$ می‌باشد [۲].

۴-۷-۱۵ مدت مؤثر^۲

فاصله زمانی که در طی آن یک زلزله بیشترین تخریب را داراست. به‌طور مثال برای زلزله بم $8.03sec$ می‌باشد [۲].

^۱ Uniform Duration

^۲ Effective Duration

۴-۸ جمع‌بندی

پارامترهای متعددی برای تعیین مشخصه حرکات زمین ارائه شده‌اند که برخی از آن‌ها دامنه و برخی دیگر محتوی فرکانسی یا مدت را تشریح می‌نمایند. بعضی از این پارامترها ممکن است تحت تأثیر دو و یا حتی سه خصوصیت مهم حرکات زمین باشند. جدول (۴-۲) نشان می‌دهد که کدامیک از خصوصیات حرکات زمین تأثیر زیادی بر پارامترهای حرکات زمین دارد.

جدول (۴-۲): خصوصیات حرکات زمین که قویاً در پارامترهای مختلف حرکت زمین منعکس می‌باشند [۱]

خصوصیات حرکات زمین			پارامترهای حرکات زمین
مدت	محتوای فرکانس	دامنه	
		×	شتاب ماکزیمم PHA و PHV
		×	سرعت ماکزیمم PHV
		×	ماکزیمم شتاب ماندگار SMA
		×	شتاب مؤثر طراحی EDA
	×		پیروود غالب T_p
	×		پهنای باند
	×		فرکانس مرکزی Ω
	×		ضریب شکل δ
×	×	×	شدت طیف قدرت G_0
	×		فرکانس زمین ω_g
	×		میرایی زمین ξ_g
	×		V_{max}/a_{max}
×			مدت T_d
	×	×	شتاب rms (arms)
×	×	×	شدت مشخصه I_c
×	×	×	شدت I_a , Arias
×	×	×	سرعت تجمعی مطلق CAV
	×	×	شدت طیف پاسخ (ξ) SI
	×	×	شدت طیف سرعت VSI
	×	×	شدت طیف شتاب ASI
	×	×	شتاب ماکزیمم مؤثر EPA
	×	×	سرعت ماکزیمم مؤثر EPV

اعتبار تحلیل‌های برآورد خطرات زلزله و نحوه گسترش حرکات زمین که مبنای طراحی می‌باشند، شدیداً بستگی به مشخصات خصوصیات حرکات زمین که از پارامترهای مربوطه به دست آمده‌اند، دارند. مشخص نمودن حرکت زمین تنها با یک پارامتر، به‌ندرت از یک کیفیت مطلوب برخوردار است، لذا معمولاً بهره‌گیری از پارامترهای متعدد جهت تشریح دقیق خصوصیات مهم حرکات زمین امری الزامی است.

با توجه به اینکه مسائل و کاربردهای گوناگون مهندسی تحت تأثیر خصوصیات مختلف حرکات زمین می‌باشند، تشخیص و شناسایی نوع پارامتر بستگی به نوع مسئله و کاربرد خاص آن دارد.

فصل پنجم: پیاده‌سازی و ارزیابی روش پیشنهادی

۵-۱ مقدمه

این فصل به معرفی روش‌های جدیدی جهت تولید سیگنال مصنوعی زلزله می‌پردازد. هدف اصلی آن است که بتوان به نحوی اقدام به تولید سیگنال‌های مصنوعی برای مناطق مختلف ایران نمود. روش‌های پیشنهادی پس از معرفی با سیگنال‌های مختلف آزمون خواهند شد، به گونه‌ای که بتوان صحت آن را در نتایج ارائه شده مشاهده نمود.

برای توضیح روش‌های پیشنهادی پاره‌ای از ویژگی‌های سیگنال‌های مصنوعی بررسی می‌شود. پس از آن به معرفی جایگاه شبکه‌های عصبی و کمکی که این شبکه‌ها برای رسیدن به هدف اصلی می‌نمایند، می‌پردازیم. سپس روش پایه مطرح شده برای مسئله به‌طور کامل مورد بررسی قرار خواهد گرفت و روش‌های تعمیم یافته از این الگوی پایه و نتایج آن توضیح داده می‌شوند. در انتها نتایج عددی مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

۵-۲ ویژگی سیگنال‌های مصنوعی

نیاز به استفاده از آنالیزهای دینامیکی، منجر به تحقیقات فراوان جهت تولید سیگنال‌های مصنوعی شده است. بدیهی است که امکان پیش‌بینی مشخصات دقیق رخداد یک زلزله در منطقه‌ای مشخص، غیرممکن است. از طرفی استفاده از سیگنال‌های ثبت‌شده در مناطق دیگر و حتی با مشخصات ژئوتکنیکی مشابه، در آنالیزهای دینامیکی نامعقول به نظر می‌رسند. چراکه امکان رخداد دو زلزله در یک منطقه خاص که به جز در چند پارامتر، هیچ شباهتی با هم ندارند (تصادفی هستند) وجود ندارد؛ بنابراین نیاز به تولید سیگنال مصنوعی از پیش احساس می‌شود.

تصادفی بودن ماهیت زلزله باعث می‌شود تا نتوانیم به صراحت زلزله‌ای را که احتمال رخ دادن در یک منطقه خاص دارد، به خوبی شناسایی کنیم. عمده تحقیقات صورت گرفته در نهایت منجر به شناسایی یک سری پارامترهای مرتبط با زلزله از جمله بزرگی، حداکثر شتاب زلزله، طول مدت تداوم و

چند پارامتر محدود دیگر خواهد شد. نکته اینجاست که در بررسی این پارامترها نیز عموماً با احتمال روبرو هستیم و هیچ کدام را نمی توان به دقت پیش بینی کرد. اگر در مواردی علاوه بر پارامترهای فوق، بتوانیم محتوای فرکانسی سیگنال را از قبل شناسایی نمائیم، به جرأت می توان گفت به مطالب نسبتاً زیادی در پیش بینی زلزله ای که احتمالاً در منطقه ای خاص رخ داده دست یافته ایم. علاوه بر موارد فوق زمان و مکان رخ دادن یک زلزله قابل پیش بینی نیست.

هدف از تولید سیگنال های مصنوعی، تولید سیگنال هایی است که به لحاظ تاریخچه زمانی، شکلی مشابه زلزله های واقعی ثبت شده داشته باشند و همچنین زمانی که چند پارامتر مهم مرتبط با آن ها را کنترل می کنیم، به یک دقت قابل قبول دست یابیم. مهم ترین این پارامترها عبارت اند از حرکت حداکثر، مدت زمان ارتعاش و محتوای فرکانسی سیگنال ها. در این رساله، از طیف پاسخ به عنوان معیار کنترل زلزله های مصنوعی تولید شده، استفاده شده است. طیف های پاسخ هرچند الگوی قطعی درباره شکل سیگنال های زلزله های احتمالی در منطقه را بیان نمی کنند، اما با توجه به اینکه به نوعی مشخصات ساخت گاهی منطقه را در خود دارا می باشند، می توانند یک معیار کنترلی مناسب باشند. دلیل دیگر در کنترل سیگنال های تولید شده با طیف پاسخ طرح، تضمین رعایت حداقل های مورد نیاز آنالیز طیفی استاتیکی، در آنالیزهای دینامیکی می باشد؛ به عبارت دیگر می خواهیم مطمئن شویم که سیگنال های مصنوعی مورد استفاده در آنالیزهای دینامیکی، جوابگوی تحلیل استاتیکی طیفی بوده و طیف پاسخ این سیگنال ها با طیف پاسخ طرح همان منطقه سازگار است. لازم به ذکر است که انطباق طیف پاسخ زلزله های مصنوعی تولید شده با طیف پاسخ طرح، دلیل قاطعی بر صحت سیگنال های تولید شده نمی باشد. بلکه فقط می توان امیدوار بود که زلزله های تولید شده، زلزله هایی نرمال به یک مقیاس خاص و با مدت زمان لرزش معین هستند که محتوای فرکانسی آن با شرایط ساخت گاهی منطقه سازگاری دارد.

حال که تا حدودی ضعف دانش بشری در مطالعه بعضی پارامترهای مرتبط با چنین فرآیند طبیعی را دریافتیم، بدیهی است که امکان پیش‌بینی شکل و ویژگی‌های زلزله‌ای که احتمالاً در منطقه‌ای خاص رخ خواهد داد، امری بسیار بعید می‌باشد. این کار اگرچه غیرممکن می‌نماید، اما تا به حال تحقیقات بسیار زیادی در این زمینه صورت گرفته است. در واقع نیاز به آنالیز دینامیکی در بسیاری موارد چاره‌ای جز انجام چنین کاری را نمی‌طلبد.

در پاره‌ای از موارد ترجیح داده می‌شود به جای این امر از یک سیگنال ثبت شده در منطقه‌ای که تا حدودی شرایط و ویژگی‌های نزدیک به محل مورد مطالعه را دارد استفاده نمایند. عدم دقت در چنین امری به وضوح مشخص است، بخصوص آنکه بدانیم امکان رخ دادن دو زلزله‌ای که به جز نزدیکی چند پارامتر، هیچ شباهت دیگری به یکدیگر ندارند، در یک محل مشخص وجود دارد. این عوامل نیاز به تولید یک سری سیگنال مصنوعی را ایجاب می‌نمایند.

نکته قابل ذکر آنکه در ایجاد این سیگنال‌ها هیچ‌گاه تضمینی بر صحت پیش‌بینی سیگنال وجود ندارد، بلکه مهم آن است که این سیگنال‌ها اولاً به لحاظ شکلی ماهیتی شبیه به سیگنال‌های قبلی را داشته باشد، ثانیاً در احتمال صحت نسبی چند پارامتر اساسی مرتبط با آن اطمینان بالایی داشته باشیم. این پارامترها، در واقع همان داده‌های اولیه تولید سیگنال‌های مصنوعی محسوب می‌شوند. مواردی چون شتاب حداکثر، مدت زمان تداوم و محتوای فرکانسی از مهم‌ترین این عوامل به شمار می‌آیند. در فصل چهارم مفاهیم فوق همراه با تعاریفی چون طیف فوریه، انرژی، توان و پاسخ به اختصار بیان شد. از بین این موارد طیف پاسخ از جایگاهی خاص در مهندسی زلزله و بخصوص در بحث آنالیز استاتیکی و شبه دینامیکی یک سازه برخوردار است.

بررسی چنین طیف‌هایی نشان داده است که هر چند نمی‌توان به الگویی قطعی در شناسایی شکل سیگنال‌های زلزله، حتی در یک محدوده معین دست یافت، اما طیف‌های پاسخ مرتبط با آن‌ها عموماً در پاره‌ای از موارد شباهت‌های زیادی به یکدیگر دارند؛ می‌توان به یک الگوی نسبتاً قطعی برای طیف‌های

مربوط به یک منطقه مشخص دست یافت. به همین دلیل محققان توانسته‌اند با صاف کردن چنین طیف‌هایی به طیف طرح دست یابند. این مطالعات ادامه یافته است تا جایی که آن‌ها قادرند تا برای هر منطقه خاص به لحاظ مشکلات ژئوفیزیکی و ژئوتکنیکی، طیف طرح مربوط را ارائه نمایند [۷۱].

حال که چنین عملی امکان‌پذیر است ممکن است تصور شود رسیدن به سیگنال متناظر نیز نمی‌بایست کار دشواری باشد. همان‌گونه که خواهیم دید، چنین طیف‌هایی عموماً جهت کنترل صحت سیگنال‌های مصنوعی تولید شده بکار می‌روند. در اینجا هدف آن است که طیف پاسخ به سیگنال شبیه‌سازی شده با طیف طرح ارائه شده نزدیکی نسبتاً خوبی داشته باشد. به طیف طرح‌هایی که جهت چنین کنترلی بکار می‌روند، اصطلاحاً طیف هدف اطلاق می‌شود. نکته اینجاست که انطباق طیف پاسخ و طیف هدف دلیل صحت کامل سیگنال‌های تولید شده نمی‌باشد، چراکه ممکن است نگاشت‌های مختلفی با طیف‌های پاسخ یکسان وجود داشته باشند.

اگر محاسبه طیف پاسخ مربوط به یک سیگنال به‌عنوان یک مسئله مستقیم توجه شود، یافتن سیگنال با توجه به طیف مربوطه در واقع معکوس مسئله بالا خواهد بود؛ اما مشکل آن است که برخلاف ارتباط بین یک سیگنال و تبدیل فوریه آن که یک ارتباط یک‌به‌یک و لذا وارون‌پذیر است، با داشتن یک طیف پاسخ نمی‌توان صرفاً به یک سیگنال خاص دسترسی پیدا کرد. چراکه کلیه اطلاعات معنی‌دار مربوط به یک سیگنال به‌طور کامل در تبدیل فوریه منعکس می‌شود، حال آنکه در محاسبه طیف پاسخ عموماً یک سری از ویژگی‌ها حذف می‌شوند؛ بنابراین نگاشت‌هایی با ویژگی‌های مختلف ممکن است طیف‌های پاسخ یکسانی داشته باشند. لذا اگرچه محاسبه طیف از روی یک سیگنال نیاز به یک سری عملیات محاسباتی مشخص دارد، عکس این عمل را نمی‌توان به‌صورت محاسباتی و در قالب یک فرمول‌بندی مشخص مدل نمود. یک معادل‌سازی از عدم امکان انجام این کار را می‌توان در مسئله انتگرال‌گیری معین جستجو کرد. اگرچه محاسبه انتگرال معین یک تابع مسئله‌ای حل شده است، اما نمی‌توان با داشتن عدد مربوطه، تابع مورد نظر را در یک بازه خاص (به‌صورت یک‌به‌یک) محاسبه نمود.

اگر در روش‌های مختلف محاسبه طیف پاسخ دقت کنیم، متوجه خواهیم شد که در آنجا نیز با چیزی شبیه به همین مسئله روبرو هستیم، به‌خصوص که در آنجا با یک تابع مشتق‌پذیر سروکار نداریم، بلکه تابع در واقع از چند نقطه تشکیل شده است و انتگرال‌گیری از آن صرفاً به‌صورت عددی امکان‌پذیر است، لذا ناگزیریم در اینجا از یک سری روش‌های آماری توأم با سعی و خطا سودجوییم. این روش‌ها ما را به یک سری الگوی خاص هدایت خواهد کرد که چندین سال مورد توجه پژوهش‌گران مختلف قرار گرفته است.

همان‌گونه که مشخص شد، از آنجا که نمی‌توان به یک فرمول‌بندی مشخص برای ارتباط از طیف به سیگنال دست یافت، لذا بایستی به روشی غیر از روش‌های کلاسیک این مسئله را بررسی کرد و در نهایت با کنترل همپوشی طیف مربوطه با طیف هدف، به یک سیگنال مصنوعی سازگار با طیف هدف دست یافت. در واقع علت کنترل آخر بدین جهت است که اگر قرار بود به روش استاتیکی سازه را تحلیل نمائیم از طیف استفاده می‌کردیم؛ حال که هدف بررسی دینامیکی مسئله است، لااقل سیگنالی به کار گرفته می‌شود که علاوه بر دقت محاسبات دینامیکی، جواب حالت استاتیکی را نیز داده باشد، چراکه طیف مربوط به منطقه خاصی می‌باشد، بایستی سیگنال‌هایی را به‌عنوان سیگنال‌های مصنوعی قابل قبول آن محدوده بپذیریم که دارای طیف پاسخ نزدیک به طیف هدف باشد.

۵-۳ بررسی فرضیات متفاوت جهت نگاشت طیف پاسخ به سیگنال زلزله

جهت تولید سیگنال زلزله با استفاده از طیف پاسخ اولین روشی که مورد بررسی قرار گرفت رابطه بین طیف فوریه و طیف پاسخ می‌باشد. بدین منظور ابتدا به طیف تبدیل فوریه و طیف فوریه (دامنه فوریه) و سپس به بررسی رابطه طیف پاسخ و طیف فوریه می‌پردازیم. برای اینکه بتوانیم از روی طیف فوریه سیگنال اصلی را به دست آوریم باید ابتدا طیف تبدیل فوریه که به‌راحتی برگشت‌پذیر است را

تولید کنیم و سپس با استفاده از برگشت فوریه سیگنال اصلی را به دست آوریم. طبق تعریف، تبدیل متناهی فوریه $F(\omega)$ یک سیگنال $a(t)$ به صورت زیر به دست می آید:

$$F(\omega) = \int_0^T a(t) e^{-i\omega t} dt \quad (۱-۵)$$

که در آن T مدت زمان حرکت شدید زلزله است. طیف دامنه فوریه، ریشه دوم مربعات بخش های حقیقی و موهومی $F(\omega)$ ، تعریف می شود:

$$FS(\omega) = \left\{ \left[\int_0^T a(t) \sin(\omega t) dt \right]^2 + \left[\int_0^T a(t) \cos(\omega t) dt \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (۲-۵)$$

چنانچه بخش حقیقی را با a و بخش موهومی را با b نشان دهیم طیف دامنه فوریه به صورت زیر خواهد بود:

$$|FS(\omega)| = (a(\omega)^2 + b(\omega)^2)^{1/2} \quad (۳-۵)$$

با توجه به اینکه برای ساخت سیگنال مصنوعی تنها طیف پاسخ سیگنال در دست می باشد این فرضیه مطرح شد که بخواهیم از روی طیف پاسخ به طیف فوریه برسیم. با استفاده از طیف پاسخ و از رابطه زیر می توان به طیف فوریه (دامنه) رسید:

$$A_{int}(\omega) = \left(\frac{\beta}{1+\alpha h} + \gamma \right) \omega S(\omega, 0.05) \quad (۴-۵)$$

همچنین طیف تبدیل فوریه از روی طیف فوریه از رابطه (۵-۵) حاصل می گردد:

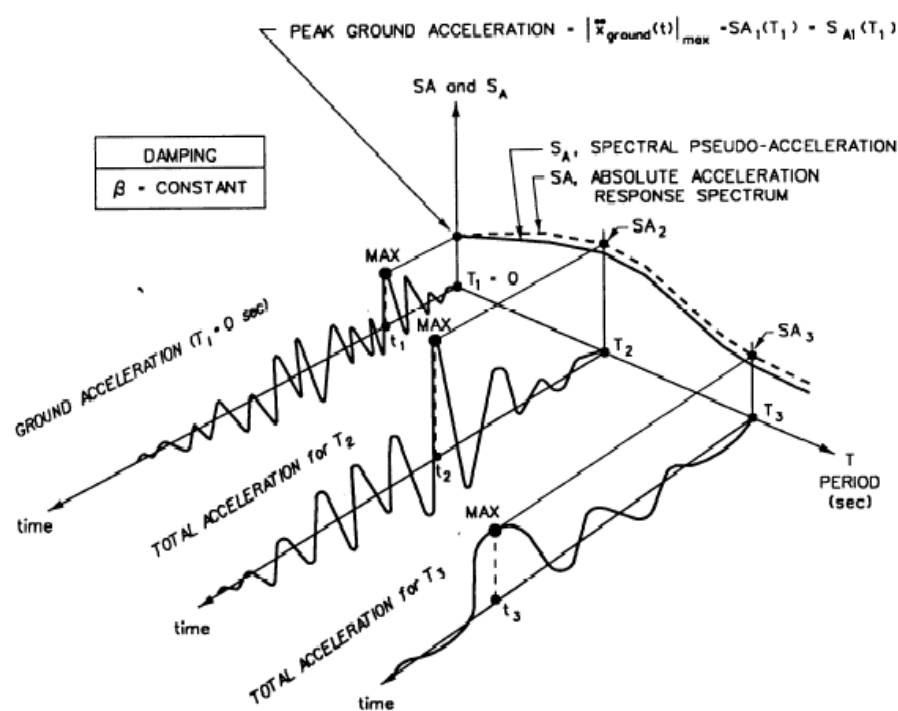
$$F(\omega) = |FS(\omega)| \exp(j\phi(\omega)) \quad (۵-۵)$$

همان طور که قبلاً بیان شد برای رسیدن به سیگنال اصلی باید طیف تبدیل فوریه را داشت تا با استفاده از معکوس فوریه به سیگنال اصلی رسید. پس با داشتن طیف دامنه فوریه که از رابطه (۴-۵) حاصل می شود، می توان با استفاده از رابطه (۵-۵) برای رسیدن به طیف تبدیل فوریه اقدام کرد. باین حال داشتن مقدار فاز $(\phi(\omega))$ ضروری می باشد. در اینجا این فرضیه مطرح شد که فاز را صفر قرار دهیم؛ اما نتایج تولید شده به شدت با تغییر فاز تأثیرپذیرند. حتی برای واقعی تر شدن نظریه این مسئله

نیز بررسی شد که فاز نداشته را از فاز سیگنال‌های هم‌رده منطقه به دست آوریم که باز نیز این مسئله نشان داد که سیگنال‌ها به شدت تحت تأثیر فاز خود می‌باشند.

مسئله بعدی که مطرح شد به وجود آوردن سیگنال مصنوعی با استفاده از PGA سیگنال که در طیف پاسخ شتاب در دسترس است و تولید اتفاقی سایر داده‌ها می‌باشد. بدین منظور مراحل ساخت طیف پاسخ از روی سیگنال اصلی مورد بررسی قرار گرفت تا اهمیت سایر مقادیر سیگنال اصلی در ساخت طیف پاسخ مشخص شود.

برای سادگی امر با استفاده از شکل (۵-۱) نشان می‌دهیم که محاسبه طیف پاسخ در هر پریود T به تمامی داده‌های اصلی در آن بازه فرکانسی مرتبط می‌باشد.



شکل (۵-۱): الگوی تولید طیف پاسخ [۸۳]

این شکل نمایی سه‌بعدی از سیگنال در پریودهای T_1, T_2, T_3 را نمایش می‌دهد. در $T=0$ طیف پاسخ شتاب از ماکزیمم شتاب سیگنال اصلی به دست می‌آید و در T های بعدی از $x_{\text{total}}(t)$ به دست می‌آید.

$$SA = |x_{ground}(t)|_{max} \quad T=0 \quad (۶-۵)$$

$$SA = |x_{total}(t)| \quad T \neq 0 \quad (۷-۵)$$

$$x_{total}(t) = |x_{ground}(t) + x(t)|_{max} \quad (۸-۵)$$

که $x(t)$ شتاب محاسبه شده در سیستم $SDOF$ می باشد.

همان طور که ملاحظه می شود در پریودهای بعدی مقدار پاسخ شتاب برابر ماکزیمم حاصل جمع سیگنال اصلی و شتاب محاسبه شده در سیستم $SDOF$ می باشد. با توجه به این روابط می توان نتیجه گرفت که مقادیر همه ی داده های سیگنال در ساخت طیف پاسخ مؤثر می باشند. (منظور از همه داده ها، همه ی داده ها در بازه مؤثر $effective\ duration$ می باشند).

۵-۴ جایگاه شبکه های عصبی در نگاشت طیف پاسخ به سیگنال زلزله

حال که مشخص شد با یک مسئله تبدیل معکوس روبرو هستیم، بدیهی است که می تواند انگیزه استفاده از شبکه های عصبی به عنوان یک راه حل مناسب در ذهن تداعی گردد.

در فصل سوم مبانی شبکه های عصبی مصنوعی به همراه جایگاه کاربردی آن ها تا اندازه ای مورد بررسی قرار گرفت. به طور اجمالی می توان شبکه ها را در حکم یک جعبه سیاه برای یافتن ارتباط داده های مربوط به دو فضای متناهی مجزا در نظر گرفت. هر چند که آن ها قادر به ارائه چگونگی این ارتباط نیستند، اما به راحتی می توانند با ورود هر سری داده مربوط به فضای ورودی، خروجی مرتبط با آن را در فضای دیگر منعکس نمایند. اگر در مسئله مربوط به تولید سیگنال های مصنوعی قادر نیستیم راه حلی برای چگونگی ارتباط طیف پاسخ و سیگنال بیابیم، می توانیم یک شبکه را برای یادگیری چنین ارتباطی طرح ریزی نماییم.

یکی از مزایای استفاده از شبکه های عصبی در این زمینه آن است که از آنجا که شبکه ها از قابلیت درون یابی بالایی برخوردار هستند، در مرحله تولید خروجی وابسته به یک ورودی، خروجی های

آموزش دیده، تبعیت خواهد کرد و این تا حدودی ماهیت تصادفی بودن آن را کاهش می‌دهد. در بخش‌های بعد این موضوع با جزئیات بیشتری دنبال خواهد شد.

بدیهی است در شبکه مورد نظر ورودی را طیف پاسخ و خروجی را سیگنال نظیر آن طیف تشکیل خواهد داد. پس از آموزش شبکه، با اعمال هر شکل از طیف پاسخ؛ می‌توان به یک سیگنال متناظر با آن دست یافت. در این رساله نیز هدف بالا با یک سری روش‌های خاص دنبال خواهد شد.

۵-۵ معرفی الگوی پیشنهادی پایه

آنچه در بخش اول ارائه شد، می‌تواند به عنوان پایه روشی جدید جهت تولید سیگنال‌های مصنوعی سازگار با طیف پاسخ برای یک منطقه خاص به کار رود. بدیهی است برای انجام چنین عملی می‌بایست شبکه مورد نظر برای داده‌های آن محدوده آموزش ببیند تا قادر به ارائه پاسخ متناسب برای ورودی‌های همان منطقه باشد. در این رساله هدف آن است تا شبکه‌ای جهت تولید سیگنال‌های مورد نظر برای داده‌های مربوط به ایران طرح‌ریزی شود. مهم‌ترین مشکلی که در این زمینه وجود دارد، همان موردی است که عموم شبکه‌ها نسبت به آن حساس می‌باشند، یعنی کمبود سیگنال‌های مناسب آموزشی.

سیگنال‌های مختلفی از سال‌های گذشته در مراکز مختلف ایران ثبت و اصلاح شده‌اند؛ اما اولاً امکان دسترسی به کلیه سیگنال‌های مذکور موجود نمی‌باشد و مراکز مختلف ثبت‌کننده این سیگنال‌ها عموماً به راحتی داده‌های مربوطه را در اختیار دیگران قرار نمی‌دهند، ثانیاً استفاده از همه این سیگنال‌ها جهت آموزش امری مناسب نمی‌باشد، چراکه سیگنال‌های انتخابی بایستی ویژگی‌های یک زلزله نسبتاً مخرب و قابل توجه را در خود داشته باشند.

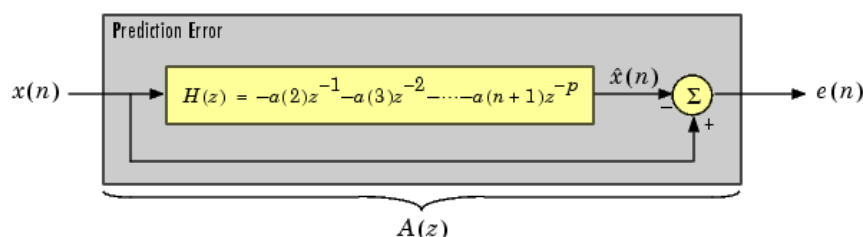
همان گونه که می‌دانیم هدف از تولید این سیگنال‌ها استفاده از آن‌ها جهت آنالیز دینامیکی سازه‌ها می‌باشد، بدیهی است در چنین شرایطی انتخاب سیگنال‌هایی که در ردیف زلزله‌های خفیف به شمار می‌آیند، تحلیل مناسبی را ارائه نمی‌نمایند، زیرا در آن صورت سازه واکنش درخور توجهی نسبت به آن نخواهد داشت. در اینجا می‌توان گفت، سازه مورد نظر در مواجهه با یک زلزله خفیف، مقاوم بشمار

می‌آید. لذا جهت چنین تحلیل‌هایی عموماً از سیگنال‌های به اصطلاح قوی‌تری استفاده خواهد شد. حال اگر بخواهیم شبکه مورد نظر ما نیز قابلیت فوق را در ارائه پاسخ مناسب داشته باشد، می‌بایست در آموزش آن از داده‌های مربوط به زلزله‌های خفیف اجتناب کنیم، چراکه شبکه عصبی در نهایت تأثیرپذیری خود را از تمام الگوهای آموزشی خواهد داشت. عموم سیگنال‌هایی که در ایران ثبت شده‌اند دارای خصوصیات این‌چنینی می‌باشند.

داده‌های پایه شبکه شتاب‌نگاری ایران توسط آقای رمضی ارائه شده است [۸۴]. اکثر این سیگنال‌ها دارای بزرگی کم و حداکثر شتاب پایین می‌باشند. لذا نمی‌توانند یک الگوی آموزشی مناسب به شمار آیند. در بین جمیع این سیگنال‌ها کمتر از ۲۰ سیگنال از ویژگی‌های قابل قبولی برخوردارند و نکته دیگر آنکه این سری از سیگنال‌ها مربوط به مناطق مختلف با ویژگی‌های مختلف می‌باشند و مسلماً آموزش شبکه‌ای با این خصوصیات و با این تعداد امری پیچیده به نظر می‌رسد. با کمی اغماض در نهایت می‌توان ۶۰ سیگنال جهت تعلیم و آزمون شبکه انتخاب نمود. همان‌گونه که ملاحظه خواهد شد سیگنال‌های فوق از ویژگی‌های بسیار پراکنده‌ای برخوردارند، بانضمام آنکه تنها یک سیگنال ثبت شده توسط دو ایستگاه مختلف در بین آن‌ها مشاهده می‌شود؛ موردی که در داده‌های اشاره شده در بخش قبل به‌وفور دیده می‌شد.

چنانچه طیف فوریه سیگنال‌های مورد مطالعه محاسبه گردد؛ دیده می‌شود که هیچ نظم و الگویی مشخص در آن‌ها وجود ندارد. این موضوع مسلماً آموزش شبکه به طریق معمول را با مشکل مواجه خواهد کرد؛ یعنی استفاده از RNN در این مورد نتیجه مناسبی نخواهد داد. آموزش چنین شبکه‌ای انجام شده است که حاصل آن همان‌گونه که پیش‌بینی می‌شد نتیجه خوبی ارائه نداده است؛ یعنی در آزمون RNN ، به ازای هر ورودی غیر آموزشی پاسخ شبکه با مقدار ورودی آن اختلاف بسیار زیادی خواهد داشت. در صورتی که در آموزش این شبکه از ورودی و خروجی یکسان استفاده می‌شود.

با توجه به آنچه عنوان شد می‌توان نتیجه گرفت که فشرده‌سازی اطلاعات به روش قابوسی و لین نمی‌تواند کارایی لازم را داشته باشد. استخراج ویژگی‌های اساسی و فشرده‌سازی سیگنال‌ها از مواردی است که در بحث پردازش سیگنال‌ها به آن پرداخته شده است. همچنین اگر هدف فشرده‌سازی اطلاعات در یک فضای محدود باشد، می‌توان از روش LPC^۱ استفاده نمود. روند ساخت سیگنال اصلی در این روش در شکل (۲-۵) آمده است.



شکل (۲-۵): روند ساخت سیگنال اصلی در روش LPC [۶۷]

روش فوق قادر است تا ویژگی‌های اساسی مربوط به یک بردار را استخراج نماید. این کار چیزی جز محاسبه مقادیر ویژه یک بردار طی یک فرآیند محاسباتی ساده نیست.

$$\hat{x}(n) = -a(2)x(n-1) - a(3)x(n-2) - \dots - a(p+1)x(n-p) \quad (۹-۵)$$

البته می‌توان با افزایش تعداد ضرایب در روش فوق به سیگنال بهتری (خطای کمتر) رسید. در این رساله نیز از این روش جهت فشرده‌سازی اطلاعات استفاده می‌شود.

همچنین می‌توان نوعی از شبکه‌های عصبی بدون ناظر را جهت فشرده‌سازی اطلاعات ورودی به کار برد. چنین شبکه‌هایی تحت عنوان شبکه‌های خود سامانده^۲ (SOM) خود قادرند تا بدون دسترسی به خروجی مورد نظر با ارائه یک ورودی، خروجی تطبیق یافته‌ای را در هر بعد مورد نظر محاسبه نمایند. این شبکه‌ها جهت فشرده‌سازی یک تصویر (فضای دو بعدی) نیز از قابلیت بالایی برخوردارند.

^۱ - Linier Prediction Coefficient (LPC)

^۲ Self Organization Map

در بحث ویولت‌ها که در فصل سوم به آن پرداخته شد، نیز روش‌های مختلفی جهت فشردن‌سازی اطلاعات وجود دارد، زیرا آن‌گونه که اشاره شده ویولت‌ها در نهایت یک تقریب و یک جزء را از سیگنال ارائه خواهند داد.

همه روش‌های فوق قادرند تا ویژگی‌های زائد یک سیگنال را حذف نموده، خصوصیات بارز آن را ارائه نمایند؛ اما نکته قابل‌توجه در این مورد آن است که اگر سیگنال‌ها به‌عنوان ورودی شبکه محسوب می‌شدند، با انجام روش‌های فوق می‌توانستیم با کاهش ابعاد بردار ورودی، تعداد سلول‌های ورودی به شبکه را کاهش دهیم، اما از آنجا که هدف تولید سیگنال‌های مصنوعی است که در خروجی به دست می‌آیند، ما در نهایت می‌توانیم شبکه‌ای را آموزش دهیم تا از روی طیف، سیگنال فشردن را ارائه نماید. بدین ترتیب ابعاد خروجی را کاهش داده‌ایم. حال کار اصلی در اینجا تولید سیگنال واقعی با استفاده از سیگنال خروجی فشردن می‌باشد که به سهولت امکان‌پذیر نمی‌باشد. لذا در چنین مواردی شبکه‌ای همچون RNN کارایی قابل قبولی نخواهد داشت. علت اصلی این امر نیز بی‌نظمی محتوای فرکانسی سیگنال‌های آموزشی می‌باشد. به همین منظور اگر به طریقی بتوان از بی‌نظمی موجود در قسمت‌های حقیقی و موهومی سیگنال‌ها کاست، می‌توان از خود آن‌ها جهت آموزش استفاده نمود؛ یعنی در اینجا به دنبال یک نظم و الگوی مشخص در خروجی‌های شبکه هستیم، چراکه نظم در الگوهای آموزشی شبکه‌ها، قابلیت فراگیری را بالا می‌برد.

همان‌گونه که در فصل سوم اشاره شد، ویولت‌ها قادرند تا هر سری زمانی را به چندین تراز مجزا که عموماً متعامد انتخاب می‌شوند، تجزیه نمایند. چنانچه این کار برای سیگنال‌های مورد مطالعه انجام گرفته و در نهایت تبدیل فوریه هر تراز محاسبه گردد، مشاهده خواهد شد که تبدیل فوق در هر تراز صرفاً محدوده‌ای مشخص را خواهد پوشاند. این از ویژگی‌های بارز ویولت‌ها می‌باشد؛ یعنی با مشاهده تبدیلات فوریه یک تراز خاص با کلیه سیگنال‌ها، می‌توان یک الگوی صوری در ذهن برای آن در نظر گرفت؛ یعنی هر تراز ویولت در واقع از الگوی مناسب در فرم تبدیلات فرکانسی برخوردار است. حال با آموزش

چندین شبکه که ورودی همه آنها طیف پاسخ و خروجی آن تبدیل فوریه ترازوی خاصی از ویولت می‌باشد. در واقع توانسته‌ایم به هر طریقی اقدام به محاسبه ترازهای مختلف یک سیگنال نمائیم. بدیهی است جمع خروجی شبکه‌های فوق، سیگنال مورد نظر را ارائه خواهند داد.

این در واقع پایه روشی است که در این رساله به آن پرداخته شده است. در واقع در اینجا از ترکیب شبکه‌های عصبی و ویولت‌ها جهت رسیدن به سیگنال مصنوعی با طیف پاسخ همسان با طیف هدف استفاده شده است.

۵-۵-۱ استفاده از ویولت در تجزیه سیگنال‌ها

نظریه ویولت‌ها و موارد کاربرد آن در فصل سوم بیان شده است. به‌طور خلاصه آنچه ما به دنبال آن هستیم تجزیه یک سیگنال به ترازهای مختلف آن می‌باشد. به گونه‌ای که هر تراز یک محدوده خاص فرکانسی را پوشش دهد یا لااقل نظم مشخصی داشته باشد. با استفاده از الگوریتم DWT به سهولت می‌توان هر سیگنال را به سری‌های متعامد مورد نظر با استفاده از یک تابع پایه مشخص تجزیه نمود. در اینجا ارتباط یکی از پارامترهای بسیار مهم هر سیگنال، با ترازهای مختلف آن بررسی می‌شود. ویژگی مورد نظر انرژی سیگنال می‌باشد که به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم با سایر پارامترهای زلزله مرتبط می‌باشد. همانند طیف پاسخ یک سیگنال که به‌طور غیرمستقیم به طیف انرژی آن وابسته است. همان‌گونه که ذکر شد مهم‌ترین دسته ویولت‌ها شامل ویولت‌های متعامد می‌باشند. خاصیت تعامد ترازهای مختلف ویولت باعث می‌شود تا بتوان انرژی مربوط به سیگنال را برابر مجموع انرژی ترازهای مختلف آن دانست، زیرا همان‌گونه که می‌دانیم انرژی یک سیگنال با توان دوم آن نسبت مستقیم دارد. اگر فرض کنیم $a(t)$ دارای 2^n نقطه باشد، می‌توان نوشت:

$$a(t) = \sum_{i=1}^{n-1} w_i(t) \quad (5-10)$$

که در آن l بیانگر ترازهای ویولت سیگنال $a(t)$ می‌باشد. انرژی سیگنال را می‌توان با رابطه زیر به دست آورد:

$$I = \int_{-\infty}^{\infty} a^2(t)dt = \sum_{l=-1}^{n-1} \int_{-\infty}^{\infty} w_l^2(t)dt + \sum_{m \neq n} \int_{-\infty}^{\infty} w_m(t)w_n(t)dt \quad (۱۱-۵)$$

با توجه تعامد w دومین جمله سمت راست رابطه بالا صفر خواهد شد، لذا می توان نوشت:

$$I = \sum_{i=-1}^{n-1} \int_{-\infty}^{\infty} w_i^2(t)dt \quad (۱۲-۵)$$

با توجه به تعریف انرژی هر تراز به صورت:

$$I = \int_{-\infty}^{\infty} W_1^2(t)dt \quad (۱۳-۵)$$

و در نهایت خواهیم داشت:

$$I = \sum_{i=-1}^{n-1} I_1 \quad (۱۴-۵)$$

همچنین با استفاده از اتحاد پارسوال رابطه (۱۲-۵) را می توان به صورت زیر نوشت:

$$I_1 = 2 \int |FW_1(\omega)|^2 d\omega \quad (۱۵-۵)$$

که در آن $FW_1(\omega)$ معرف تبدیل فوری ω_1 می باشد.

با توجه دو رابطه (۱۴-۵) و (۱۵-۵) می توان چنین نتیجه گیری کرد که تبدیل فوری هر تراز ویولت بخشی از تبدیل سیگنال اولیه را پوشش می دهد. محدوده فرکانسی هر تراز را نیز می توان به سهولت مشخص نمود. در مرجع [۸۵] این کار دنبال شده است و توسط همین روش اقدام به تولید سیگنال های مصنوعی سازگار با طیف فوری نموده است.

با توجه به ارتباط غیرمستقیم طیف پاسخ و طیف انرژی و یا با روشی مشابه می توان نتیجه گیری کرد که ترازهای مختلف، هر یک بخشی از طیف پاسخ را نیز خواهند پوشاند. هر چند در پاره ای از موارد ممکن است اندکی تقریب در این مورد وجود داشته باشد، اما با تغییر توابع پایه می توان دقت مسئله را بالا برد.

موارد اشاره شده در بالا در واقع تأییدی است بر روشی که دنبال خواهد شد؛ اما انتخاب تابع پایه تأثیری در محاسبات نخواهد داشت، چراکه یادگیری هر الگو به یک شبکه واگذار خواهد شد، لذا اینکه ما از تبدیلات ترازهای مختلف ویولت استفاده می‌نمائیم صرفاً کمکی است که به شبکه برای سهولت آموزش بهتر و قابلیت فراگیری بیشتر داده‌ایم.

تابع پایه به کار گرفته شده در این پروژه ویولت db10 می‌باشد که دارای ساده‌ترین شکل تابع مقیاس می‌باشد و همان‌گونه که اشاره شد این سادگی از دقت کار نخواهد کاست، زیرا هدفی که در اینجا دنبال می‌شود، دست یافتن به یک الگوی نسبتاً ثابت در خروجی هر شبکه می‌باشد و اینکه شکل این الگو به چه طریق باشد، چندان مهم نیست. البته این موضوعی است که با انتخاب ویولت‌های دیگر نیز آزمون شده و این امر تأثیر چندانی بر پاسخ‌های ارائه شده نداشته است و انتخاب توابع پایه مختلف تنها به محدود کردن تبدیل فوریه هر تراز می‌انجامد.

با فرض $N = 2^{11} = 2048$ به دوازده تراز ویولت برای هر سیگنال خواهیم رسید که در اینجا با توجه به ارزش اطلاعات در هر تراز به ۸ تراز بسنده می‌کنیم. با تبدیل در حوزه فرکانس، هر تراز به دو قسمت حقیقی و موهومی تجزیه خواهد شد. برای انجام چنین عملی از تبدیل فوریه با الگوریتم FFT استفاده شده است؛ اما از آنجا که در الگوریتم FFT، با دو جزء حقیقی متقارن و موهومی نامتقارن روبرو هستیم، می‌توان با نصف کردن هر جزء حجم شبکه را که شامل ماتریس‌های وزن می‌باشد کاهش و سرعت آموزش آن را افزایش داد.

بدین ترتیب اگر فرض کنیم $FW(l)$ بیانگر تبدیل فوریه تراز l ام می‌باشد خواهیم داشت:

$$FW(l) = FW_r(l) + iFW_i(l) \quad l=1:8 \quad (۵ - ۱۶)$$

که در آن $FW_r(l)$ و $FW_i(l)$ به ترتیب معرف اجزاء حقیقی و موهومی تبدیل فوریه تراز l ام می‌باشند. لازم به ذکر است که عمده محتوای فرکانسی یک سیگنال که در آنالیز سازه‌ها کاربرد دارد در

محدوده ترازهای میانی آن پخش شده است. این موضوعی است که بعداً جهت تولید سری سیگنال‌های سازگار با طیف هدف به کار گرفته می‌شود.

بدین ترتیب با در نظر گرفتن ۸ تراز که هر تراز خود دارای دو جزء می‌باشد و به همراه یک بخش مقیاس که آن نیز به دو جزء تقسیم می‌شود، یک سیگنال به ۱۸ بخش تقسیم شده است و هدف آن است که برای هر یک شبکه‌ای مجزا در نظر گرفته شود.

در اینجا ممکن است زمان زیادی برای آموزش مجموعه شبکه‌های فوق در نظر گرفته شود، چراکه در اینجا تعداد شبکه‌ها افزایش قابل ملاحظه‌ای یافته است، اما در ادامه خواهیم دید که می‌توان آموزش آن‌ها را با انتخاب شبکه مناسب در مدت زمان کمی به انجام رساند.

قبل از وارد شدن به این مطلب، حال که چگونگی تجزیه سیگنال‌ها به ترازهای مختلف آن مشخص شد، بهتر است در مورد خصوصیات سیگنال‌های مورد مطالعه و تقسیم‌بندی آن‌ها توضیحاتی ارائه شود.

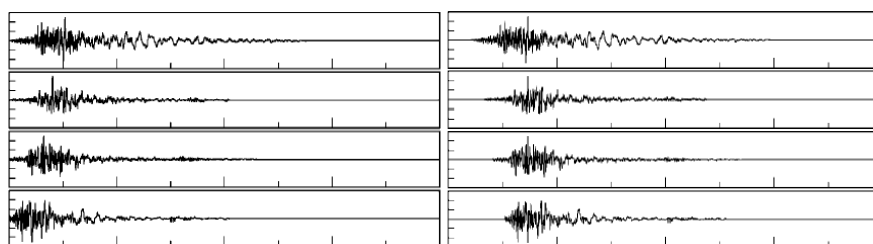
۵-۵-۲ ویژگی سیگنال‌های انتخاب شده

همان‌گونه که اشاره شد، برای آموزش شبکه‌های مورد نظر ۶۰ سیگنال زلزله با ویژگی‌های متمایز از مناطق مختلف ایران انتخاب شده‌اند. سیگنال‌های فوق همگی در فواصل ۰/۰۲ ثانیه گسسته‌سازی شده‌اند. با دقت به خصوصیات این سیگنال‌ها به خوبی می‌توان خصوصیات متفاوت سیگنال‌ها را از جهت بزرگی، طول مدت تداوم، ماکزیمم شتاب مشاهده نمود.

۵-۵-۳ نرمال‌سازی داده‌ها

اگر بتوانیم یک سری پارامترهای موجود را در کلیه سیگنال‌ها یکسان کنیم، در واقع سهولت بیشتری در آموزش شبکه نموده‌ایم. یکی از موارد فوق‌الذکر مدت تداوم زلزله می‌باشد که با توجه به روش در پیش گرفته مشخص است که می‌بایست به نحوی تعداد نقاط سیگنال‌های مختلف را یکسان کرد. بدین

ترتیب سیگنال‌های مزبور دارای طول یکسان شده‌اند. مشاهده می‌شود که کلیه سیگنال‌های مزبور دارای حداکثر شتاب‌های متفاوتی هستند. از آنجا که بین سیگنال و طیف پاسخ یک رابطه خطی موجود می‌باشد، همچنین طیف‌های هدف ارائه شده جهت استفاده از شبکه عموماً به صورت طیف طرح نرمالیزه شده برای یک ماکزیمم شتاب خاص می‌باشند، لذا می‌بایست این ماکزیمم شتاب در شکل به نحو بارزتری اعمال شود. برای این منظور کلیه سیگنال‌های مزبور به حداکثر شتاب خاصی (در اینجا ۱g) مقیاس شده‌اند. بدین ترتیب کلیه سیگنال‌ها از جهت طول مدت تداوم و ماکزیمم شتاب زمین یکسان شده‌اند. همچنین با قرار دادن شتاب مؤثر مربوط به تمامی سیگنال‌ها در یک نقطه همانند شکل (۴-۵) اطلاعات سیگنال‌ها را جهت آموزش شبکه با هم شبیه‌تر نموده‌ایم. اگر تصمیم را بر انتخاب $N = 2^{12}$ بنا کنیم، یک راه بسیار مناسب آن است که سیگنال‌های مزبور را در راستای محور زمان به گونه‌ای انتقال دهیم 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 سیگنال‌های حاصله بدین طریق مناسب‌ترین سیگنال‌ها در جهت استفاده در شبکه می‌باشند. نرمال‌سازی داده‌ها در شکل (۳-۵) نشان داده شده است.



شکل (۳-۵): نرمال‌سازی سیگنال‌ها (سمت چپ: قبل از نرمال‌سازی سمت راست: بعد از نرمال‌سازی)

۵-۴-۵ نحوه تولید سیگنال مصنوعی سازگار با طیف پاسخ

در این بخش شبکه عصبی به کار گرفته شده در این رساله معرفی خواهد شد. با توجه به تجزیه ویولت سیگنال‌ها در ۸ سطح و همچنین آنالیز فوریه سطوح مختلف ویولت، در اینجا با ۱۸ شبکه مجزا

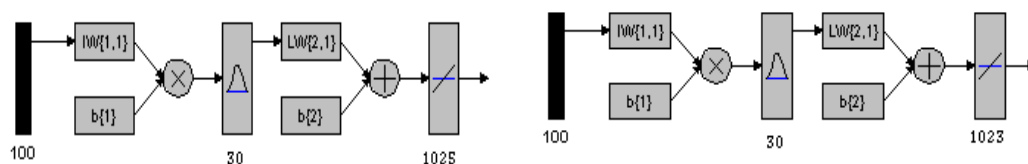
روبرو خواهیم بود که شامل بخش‌های حقیقی و موهومی هشت سطح جزئیات (d1-d8) و سطح هشتم مقیاس (a8) می‌باشد و سیگنال نهایی از مجموع خروجی شبکه‌های مزبور حاصل خواهد شد. ورودی کلیه شبکه‌ها طیف پاسخ شبه سرعت می‌باشد. بدیهی است با توجه به یکسان شدن PGA کلیه سیگنال‌ها طیف‌های حاصله همگی مرتبط با شتاب ماکزیمم ۱g می‌باشند. طیف پاسخ هر سیگنال با استفاده از نرم‌افزار Seismosignal با درصد میرایی ۰/۰۵ در ۱۰۰ نقطه فرکانسی (در مقیاس لگاریتمی) محاسبه شده است. در لایه ورودی شبکه‌ها از ۱۰۰ سلول استفاده خواهد شد. این ورودی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$SV = \{S_v(j, \omega_h)_{\zeta}, h=1:100, j=1:50\} \quad (\zeta = 0.05) \quad (5-17)$$

$$S_v(j, \omega_h) = \omega \max_t |a_j(t)| \quad (5-18)$$

$$\ddot{a}(t) + 2\zeta\omega\dot{a}(t) + \omega^2 a(t) = -\ddot{a}_g(t) \quad (5-19)$$

که در آن h بیانگر اندیس فرکانسی و j شماره سیگنال مورد نظر می‌باشد. خروجی هر شبکه را نیز قسمت حقیقی و موهومی تبدیل فوریه هر تراز ویولت تشکیل می‌دهد. همان‌گونه که در بخش نرمال‌سازی اشاره شد اکنون کلیه سیگنال‌ها دارای طول یکسان می‌باشند، لذا اجزاء حقیقی و موهومی تبدیل آن‌ها نیز شامل ۲۰۴۸ نقطه می‌باشد. با استفاده از خاصیت تقارن و پاد تقارن مربوط به این اجزاء خروجی شبکه‌های حقیقی و موهومی به ترتیب شامل ۱۰۲۵ و ۱۰۲۳ سلول انتخاب می‌شود، این عمل بدون آنکه خللی در مسئله به وجود آورد، حجم محاسبات را کاهش خواهد داد. در شکل (۴-۵) شبکه‌های ایجاد شده برای بخش‌های حقیقی و موهومی ارائه شده است.

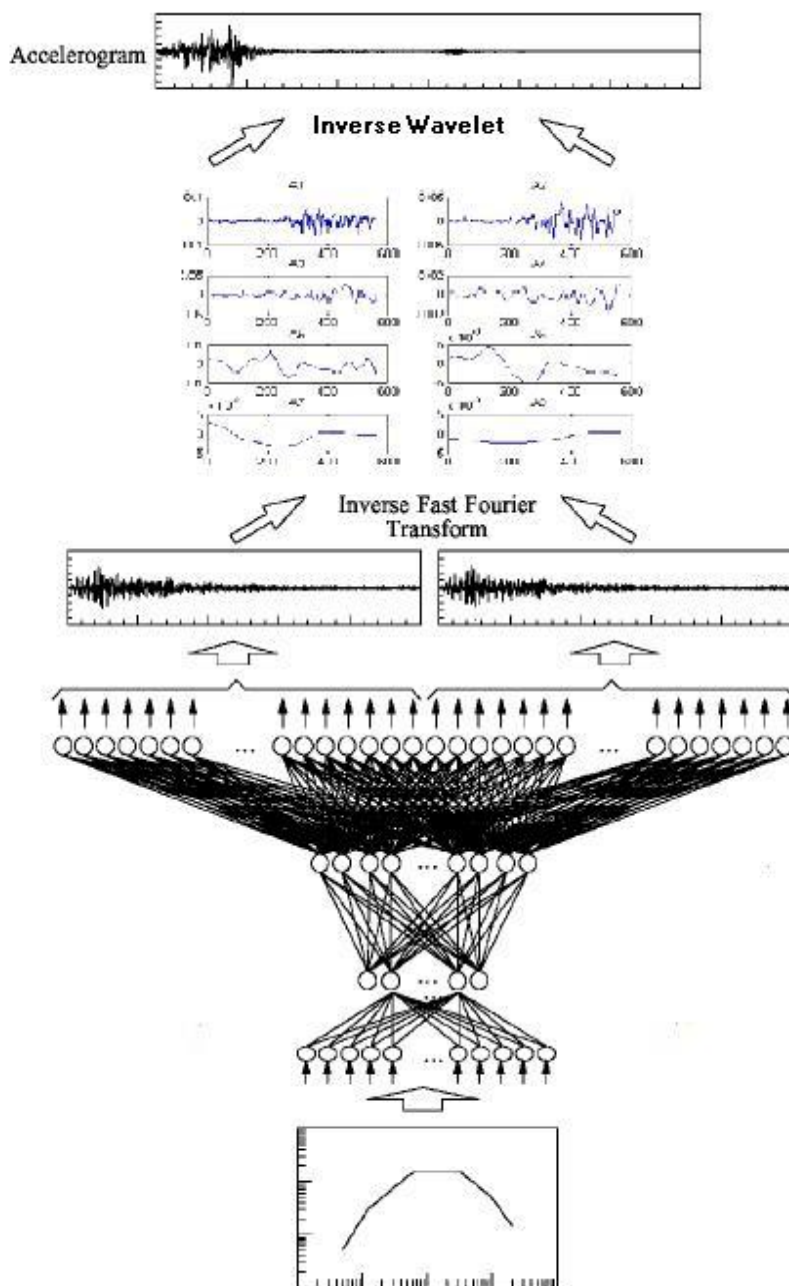


شکل (۴-۵): شبکه‌های ایجاد شده برای بخش‌های حقیقی و موهومی

علت انتخاب ۱۰۲۳ نقطه برای جزء موهومی آن است که در دو طرف این محدوده دو صفر موجود می‌باشد که می‌توان آن را از شبکه حذف نمود. لذا خروجی‌های مذکور را می‌توان به صورت زیر ارائه نمود:

$$W_r(l) = FW_r(l, 1:1025) \quad W_i(l) = FW_i(l, 2:1023) \quad (۵-۲۰)$$

که FW_r و FW_i را در رابطه‌های قبل معرفی شده‌اند. در شکل (۵-۵) فرآیند کلی کار ارائه شده است.



شکل (۵-۵): مراحل کار تولید سیگنال مصنوعی زلزله در مدل پایه پیشنهادی

البته با توجه به اینکه شبکه با تعداد نقاط کمتر نتایج بهتری را تولید می کند، می توان با استفاده از آنالیز LPC همه سطوح را فشرده سازی نمود.

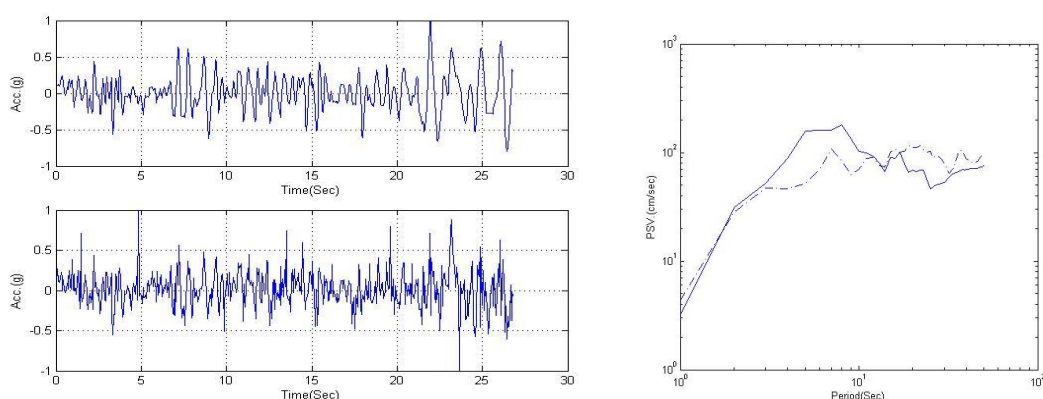
با توجه به اینکه در آموزش هر شبکه یک سری داده ها به عنوان سری آموزشی (T_r) و تعدادی به عنوان سری آزمون شونده (T_s) انتخاب می شوند، در این مدل با توجه به تعداد محدود الگوهای موجود (به هر زوج سیگنال - طیف یک الگو اطلاق می شود)، تعداد ۵۰ الگو برای آموزش و مابقی جهت آزمون انتخاب شده اند.

در گزینش داده های آزمون شونده، هیچ انتخاب خاصی صورت نپذیرفته و این امر به صورت تصادفی انجام شده است. در نهایت کنترل شده است که در بین سری های آزمون شونده از هر تیپ خاک لااقل یک الگو وجود داشته باشد.

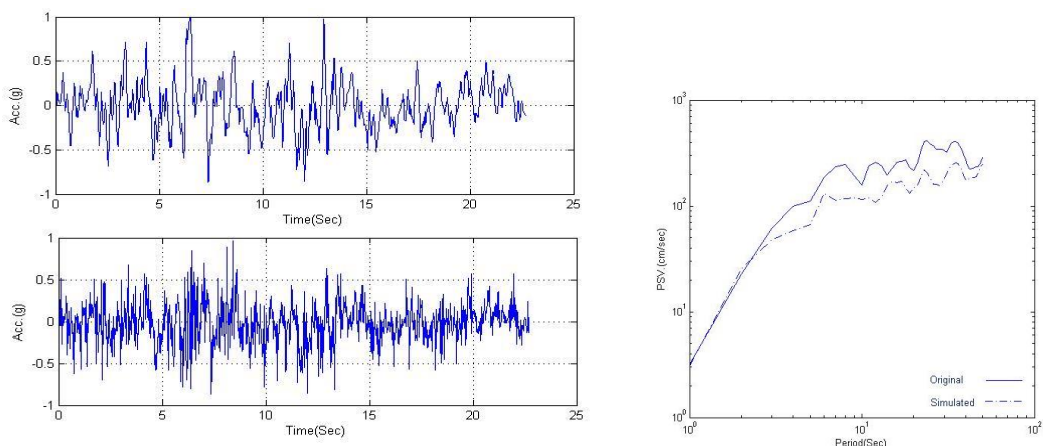
حال که ورودی ها و خروجی ها به همراه سری های آموزشی مشخص شد، هدف معرفی شبکه ای است که قابلیت این انتقال را داشته باشد. همان طور که در فصل سوم اشاره شد، شبکه های با تابع پایه شعاعی (RBF) چنین کاری را انجام می دهند و با انتخاب هر نرون برای هر سری آموزشی در لایه مخفی پاسخ را بر مبنای فاصله ورودی تا ورودی های آموزشی محاسبه می نمایند. از قابلیت های بالای این نوع شبکه ها آن است که قادر به شناسایی الگوهای متفاوت در مدت زمان بسیار کم می باشند و در دسته بندی الگوها بهتر از MLFF کار می کنند. شبکه فوق از آنجا که معادل استنتاج گر فازی عمل می کند. مسلماً در جواب گویی به مسئله مورد نظر کارایی بیشتری خواهد داشت. پس از آموزش این شبکه و آزمون آن بر کلیه الگوها، نتایج حاصل از دقت نسبتاً خوبی برخوردار است و طیف حاصل از آن ها تا حدودی در برگیرنده طیف هدف می باشد.

همان طور که در فصل سوم ذکر شد یک نوع از این شبکه ها، شبکه عصبی با قابلیت بازگشت فراگیر یا فرا بازگشتی ($GRNN$) می باشند که از خصوصیات بارز آن سهم بیشتر خروجی ها در آموزش شبکه، نسبت به سایرین می باشد. این عمل باعث می شود تا بتوانیم سریع تر به آنچه می خواهیم برسیم؛ یعنی

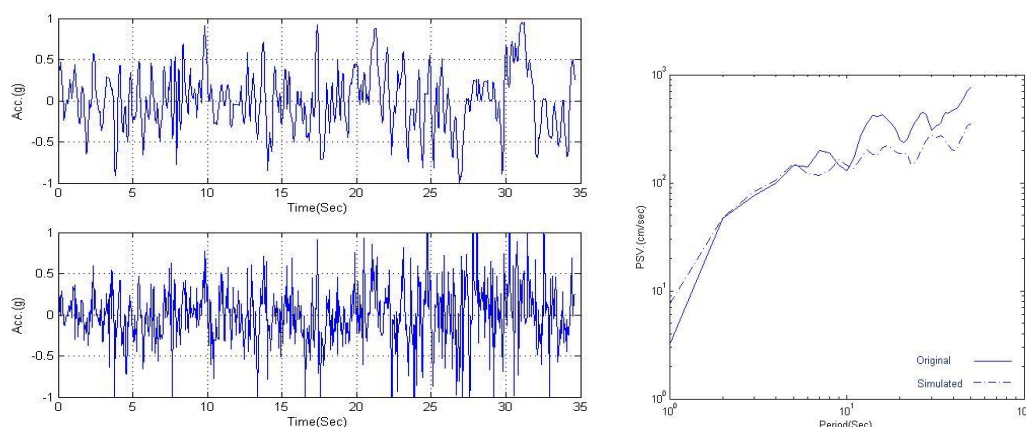
شبکه پاسخی مشابه با پاسخ‌های آموزشی ارائه نماید به گونه‌ای که طیف آن به طیف هدف نزدیک باشد. این شبکه به سرعت نزدیک‌ترین الگو به الگوی ورودی را انتخاب می‌نماید و در مواردی که الگوی آزمون‌شونده شبیه به هیچ‌یک از سری‌های آموزشی نباشد، با یک ترکیب مناسب خروجی قابل قبولی را ارائه می‌نماید. انتخاب این شبکه و نتایج حاصل از آزمون آن صحت مطالب مذکور را تأیید می‌نماید. شبکه GRNN به راحتی قابلیت شناسایی هر الگوی وابسته به هر تراز و ارتباط آن با طیف پاسخ را خواهد داشت. پس از آموزش ۱۸ شبکه مزبور، از هر جفت خروجی متناظر حقیقی و موهومی، تبدیل فوریه تراز مربوطه محاسبه شده با استفاده از الگوریتم IFFT تراز مورد نظر به دست می‌آید. جمع کلیه ترازها، منجر به تولید یک سیگنال متناظر با طیف ورودی خواهد شد. با توجه به اهمیت سری‌های آزمون‌شونده در اشکال ذیل نتیجه شبکه برای برخی سری‌های مزبور ارائه شده است.



شکل (۵-۶): سیگنال اصلی (چپ-بالا) و مصنوعی (چپ-پایین) زلزله زرد (۲۰۰۳) و طیف پاسخ مربوطه (راست)



شکل (۵-۷): سیگنال اصلی (چپ-بالا) و مصنوعی (چپ-پایین) زلزله رودسر (۱۹۹۰) و طیف پاسخ مربوطه (راست)



شکل (۵-۸): سیگنال اصلی (چپ-بالا) و مصنوعی (چپ-پایین) زلزله میناب (۲۰۰۵) و طیف پاسخ مربوطه (راست)

۵-۵-۵ مدل تعمیم یافته اول

در این روش با استفاده از شبکه‌های عصبی، ویولت‌ها و با استفاده از روش فشرده‌سازی MFCC و ترکیب آن‌ها، اقدام به تولید سیگنال‌های سازگار با طیف پاسخ شده است. از مهم‌ترین ویژگی‌های این مدل استفاده از آنالیز MFCC در فشرده‌سازی سیگنال‌هاست.

۵-۵-۵-۱ آنالیز MFCC

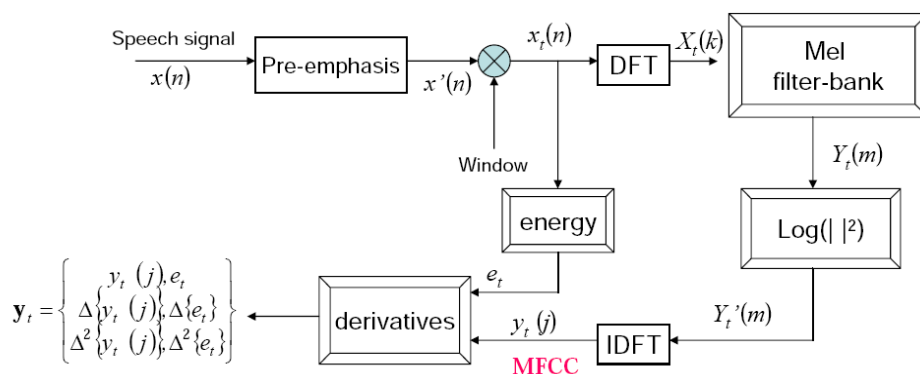
در یک تعریف علمی می‌توان آنالیز MFCC را به این شکل بیان نمود: در فرآیندهای پردازش سیگنال (به‌خصوص سیگنال‌های صوتی)، MFCC می‌تواند یک نماینده از طیف قدرت سیگنال صوت در کوتاه‌مدت بر اساس کسینوس خطی تبدیل از طیف قدرت ورودی به سیستم در مقیاس مل غیرخطی فرکانس باشد؛ اما در یک تعریف ساده می‌توان گفت این ضرایب نوع بهبودیافته از ضریب Cepstral می‌باشند. این روش نوعی فشرده‌سازی سیگنال‌ها را انجام می‌دهد که بتوان بیان مناسبی از سیگنال اصلی را داشته و تا حد ممکن سیگنال بازیافتی به سیگنال اصلی نزدیک باشد.

مراحل کار برای تولید این ضرایب به این صورت است که پس از پنجره‌بندی و ایجاد فریم‌ها از سیگنال ورودی تبدیل فوریه گسسته بر روی هر یک از این فریم‌ها اعمال شده و حاصل به بانک فیلتر داده می‌شود. این فیلتر بر روی دامنه فرکانس‌ها اعمال شده و آن را یکنواخت می‌سازد. یک راه برای

تولید Mel-Frequency درون‌یابی بر روی فرکانس گسسته اصلی می‌باشد. پس از اعمال فیلتر و سپس تبدیل کسینوسی گسسته MFCC (DCT) به دست آمده است. مقیاس مورد استفاده در فرکانس Mel به صورت رابطه (۵-۲۱) محاسبه می‌شود.

$$\text{Mel}(f) = 2595 \log(1 + f/700) \quad (۵ - ۲۱)$$

یکی از دلایل کارایی چشم‌گیر این ضریب در درجه وضوح بالای آن می‌باشد. به این معنی که تغییرات جزئی با استفاده از این مقیاس اثر خود را به خوبی نشان می‌دهند. همان‌طور که می‌دانید تغییرات جزئی در سیگنال‌های زلزله از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و می‌تواند در یادگیری بهتر شبکه‌های عصبی بسیار مؤثر باشند. نقطه قوت دیگر این روش در استفاده از DCT می‌باشد که علاوه بر اینکه ساختار طیفی خوب^۱ را حذف می‌کند، باعث خلاصه‌سازی داده‌ها می‌شود. همبستگی بین ویژگی‌ها را از بین برده و عملیات طبقه‌بندی را بهبود می‌بخشد. MFCC در کنار سایر ویژگی‌ها می‌تواند به صورت یک بردار پیوسته از ویژگی‌ها بیان شود. به عنوان یکی از ویژگی‌های مورد استفاده در کنار MFCC می‌توان به مرکز ثقل طیف اشاره کرد. ویژگی دیگر قابل بررسی درباره طیف پهنای باند آن می‌باشد. به عنوان ویژگی‌های دیگر به خصوص درباره صداها می‌توان به بی‌نظمی طیفی اشاره کرد که در واقع انحراف از دامنه‌های موزون طیف می‌باشد. در شکل (۵-۹) به طور شماتیک روند اجرایی آنالیز MFCC بیان شده است [۸۶].



شکل (۵-۹): روند اجرایی آنالیز MFCC

^۱ Spectral Fine Structure

۵-۵-۲ نحوه تولید سیگنال مصنوعی زلزله با مدل تعمیم یافته اول

آنچه در بخش مقدمه ارائه شد، می تواند به عنوان پایه روشی جدید جهت تولید سیگنال های مصنوعی سازگار با طیف هدف برای یک منطقه خاص به کار رود. در این روش ورودی شبکه طیف پاسخ سیگنال های زلزله و خروجی شبکه سیگنال های زلزله می باشد که آنالیزهای ویولت و MFCC بر روی آن ها انجام شده است.

همانند روش پایه نرمال سازی سیگنال ها در ابتدا انجام می گردد. پس از نرمال سازی، آنالیز ویولت را برای هر سیگنال انجام می دهیم. برای هر تراز تجزیه ویولت یک شبکه عصبی MLFF طرح ریزی می نماییم، در اینجا ما با توجه به محدوده فرکانسی قابل کاربرد، سیگنال ها را به ۸ تراز تجزیه نموده ایم. ترازهای دیگر به دلیل داشتن فرکانس های خیلی بالا برای ما قابل استفاده نیستند. به همین ترتیب ورودی شبکه را طیف پاسخ سرعت در نظر می گیریم. در اینجا ۹ شبکه جهت تولید ضرایب ویولت سیگنال خواهیم داشت و سیگنال نهایی از مجموع خروجی شبکه های مزبور حاصل خواهد شد. ورودی کلیه شبکه ها طیف پاسخ شبه سرعت می باشد. بدیهی است با توجه به یکسان شدن PGA کلیه سیگنال ها طیف های حاصله همگی مرتبط با شتاب ماکزیمم $1g$ می باشند. طیف پاسخ هر سیگنال نیز همانند مدل پایه به شبکه اعمال می شود. در جدول (۵-۱) مشخصات شبکه ها ارائه شده است.

جدول (۵-۱): مشخصات شبکه های عصبی مصنوعی به کار گرفته شده

نام شبکه	شبکه اول	شبکه دوم	شبکه سوم	شبکه چهارم	شبکه پنجم	شبکه ششم	شبکه هفتم	شبکه هشتم	شبکه نهم
ورودی شبکه	طیف پاسخ ۱۰۰ نود								
خروجی شبکه	ضریب تراز ۱ ویولت	ضریب تراز ۲ ویولت	ضریب تراز ۳ ویولت	ضریب تراز ۴ ویولت	ضریب تراز ۵ ویولت	ضریب تراز ۶ ویولت	ضریب تراز ۷ ویولت	ضریب تراز ۸ ویولت	مقیاس تراز ۸ ویولت
تعداد نودهای	۱۰۳۳	۵۲۶	۲۷۲	۱۴۵	۸۲	۵۰	۳۴	۳۴	۳۴

در آموزش شبکه با شرایط فوق مشکل تعداد زیاد نودهای ورودی و خروجی وجود دارد. برای حل این مشکل در شبکه ها با استفاده از آنالیز MFCC سیگنال های خروجی را تقریب زده و نودهای خروجی را ضرایب MFCC هر تراز در نظر گرفتیم. حال با توجه به شبکه فوق می توان آموزش شبکه را برای داده های موجود انجام داد، لازم به ذکر است که در آموزش هر شبکه یک سری داده ها به عنوان سری

آموزش و تعدادی به عنوان سری آزمون شونده انتخاب می شود. در اینجا هم ما از ۳۴ سیگنال برای آموزش و از ۶ سیگنال برای آزمون شبکه استفاده نموده ایم. در انتخاب سیگنال های آزمون شونده هم به طور تصادفی عمل نموده ایم. برای به دست آوردن سیگنال مصنوعی تولید شده نیز از محاسبه سیگنال با ضرایب MFCC و همچنین عمل معکوس ویولت استفاده شده است.

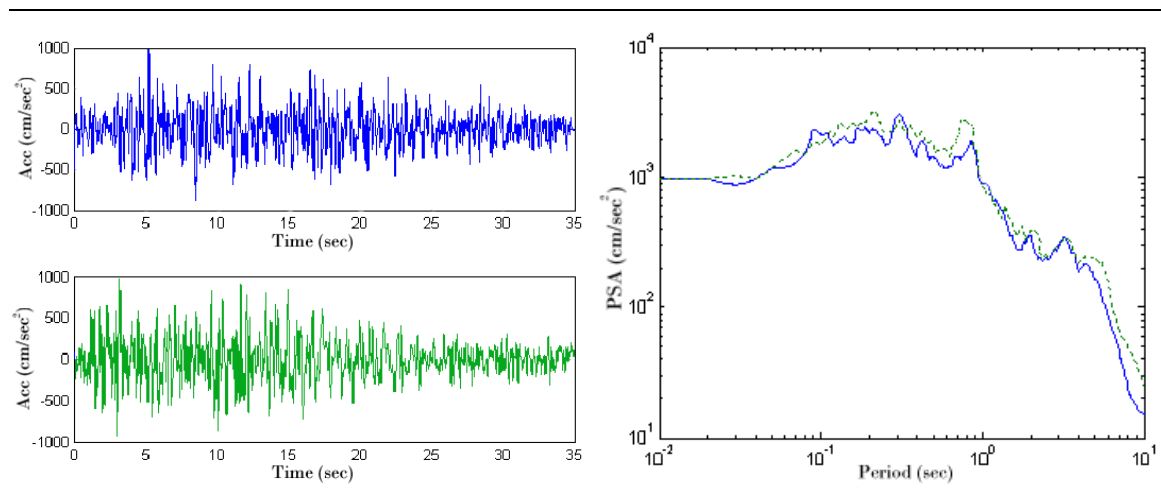
۵-۵-۶ مدل تعمیم یافته دوم

در این روش برای تولید سیگنال های مصنوعی منطبق با طیف ساختگاه سازه با استفاده از تحلیل سری های زمانی، شبکه های عصبی مصنوعی، تبدیل موجک و الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. در روش پیشنهادی ابتدا تعدادی سیگنال ثبت شده در ایستگاه های شتاب نگاری و بر اساس نوع خاک انتخاب می شوند. این خاک ها با توجه به سرعت موج برشی ایستگاه های ثبت کننده به دو گروه خاک و سنگ تقسیم می شوند و سپس با استفاده از تبدیل موجک به تحلیل و پردازش آن ها پرداخته می شود. در قدم بعدی از توانایی یادگیری شبکه های عصبی برای نگاشت معکوس از طیف پاسخ این سیگنال ها به ضرایب تبدیل ویولتی استفاده می گردد. به موازات استفاده از الگوریتم های آموزشی موجود برای شبکه های عصبی، از توانایی الگوریتم ژنتیک برای جستجو در یک فضای گسترده کمک گرفته می شود تا ماتریس های وزن و بایاس شبکه ها بهینه گردند و از محبوس شدن شبکه ها در نقاط بهینه محلی جلوگیری به عمل آید. در نهایت سیگنال های سازگار با طیف ساختگاه تولید می شود. در این روش با ارائه مثال هایی از سیگنال های ثبت شده در ایران، به آزمایش الگوریتم پیشنهادی پرداخته شده و کارایی مؤثر آن نشان داده می شود. استفاده ترکیبی از شبکه عصبی مصنوعی، تبدیل موجک، الگوریتم ژنتیک و تحلیل سری های زمانی موجب ارتقاء توانایی روش از نظر سرعت و دقت در تولید سیگنال مصنوعی سازگار با طیف برای شرایط ساخت گاهی مختلف می شود.

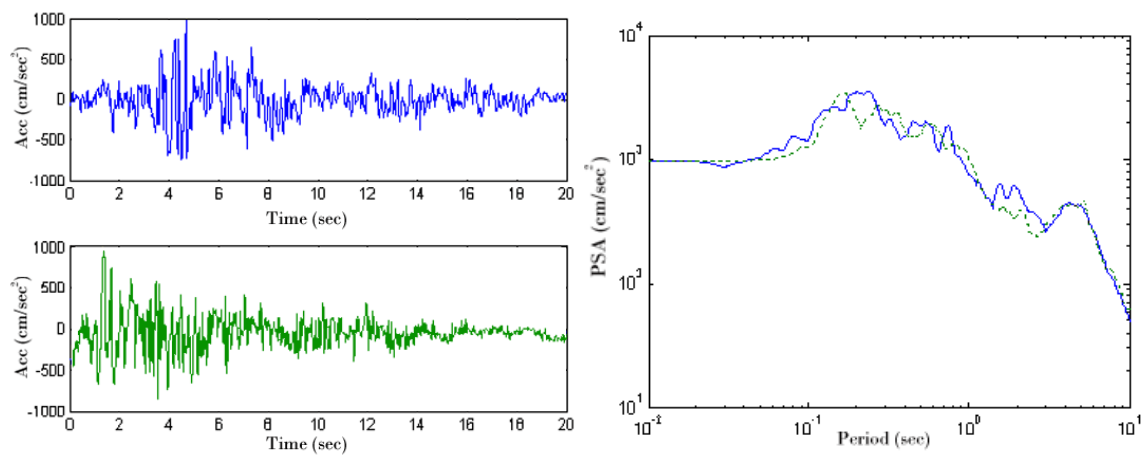
از میان پارامترهای قابل استخراج در زلزله، تنها برخی پارامترها هستند که افزایش آن ها در زلزله سبب افزایش خسارت می گردد و مابقی پارامترها دارای مقادیر ثابت و مشترک در میان خصوصیات زلزله

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، به‌طوری‌که پارامترهای اضافی و غیر مؤثر حذف و مجموعه داده‌های موردنیاز بهینه گردند. در آموزش شبکه با شرایط مدل پایه 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.

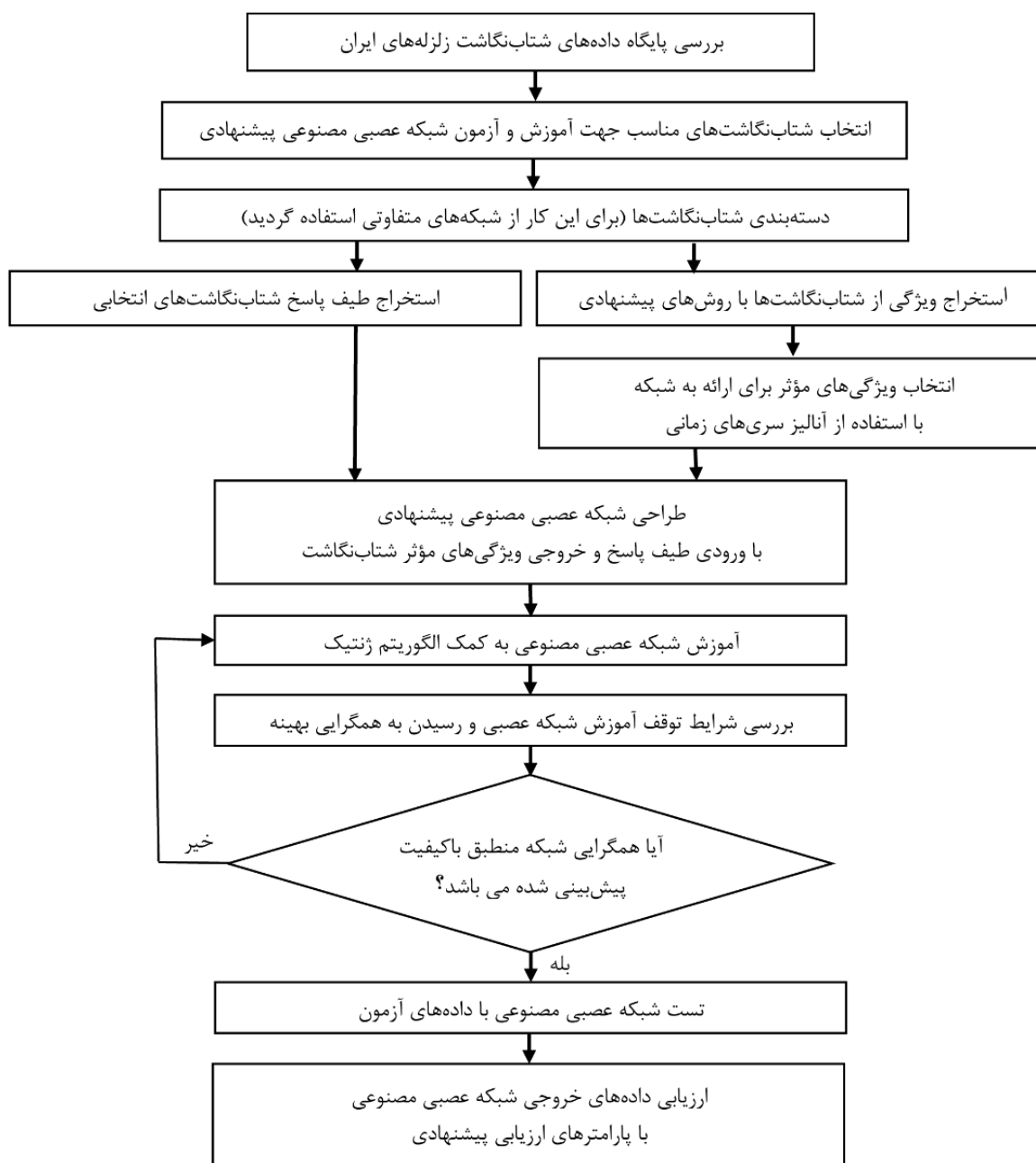
نتایج حاصل از کنترل شبکه‌های عصبی برای داده‌های گروه آموزشی و داده‌های خارج از این گروه به دست آمده است. نتایج حاصل از ارزیابی داده‌هایی که جزء مجموعه آموزشی بوده‌اند، نشان می‌دهد که شبکه به خوبی الگوی آموزشی خود را فراگرفته است و همان سیگنال ورودی را به‌عنوان پاسخ خود تولید کرده است؛ اما در کنترل شبکه‌های 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 سیگنال‌های تولیدی شباهت زیادی به سیگنال‌های ورودی ندارند، اما از الگوی مربوط تبعیت می‌نمایند. همان‌طور که در شکل‌های (۵-۱۰) و (۵-۱۱) ملاحظه می‌شود، سیگنال تولید شده علاوه بر این‌که شباهت قابل قبولی به سیگنال‌های واقعی دارد، طیف به دست آمده از آن انطباق قابل قبولی با طیف سیگنال ورودی دارد. مقایسه PGV و PGD سیگنال‌های تولیدی با سیگنال‌های اصلی نشان می‌دهد که در بیشتر آن‌ها انطباق بسیار خوبی وجود دارد، اما در برخی موارد استثنائی PGV و PGD سیگنال‌های تولید شده حدود ۸۰ درصد PGV و PGD سیگنال‌های واقعی می‌باشند. در شکل ۵-۱۲ فرآیند مدل پیشنهادی ارائه شده است.



شکل (۵-۱۰): سیگنال اصلی (چپ بالا) و مصنوعی (چپ پایین) زلزله لاهیجان و طیف پاسخ اصلی (راست ممتد) و مصنوعی (راست خط چین)



شکل (۵-۱۱): سیگنال اصلی (چپ بالا) و مصنوعی (چپ پایین) زلزله طبس و طیف پاسخ اصلی (راست ممتد) و مصنوعی (راست خط چین)

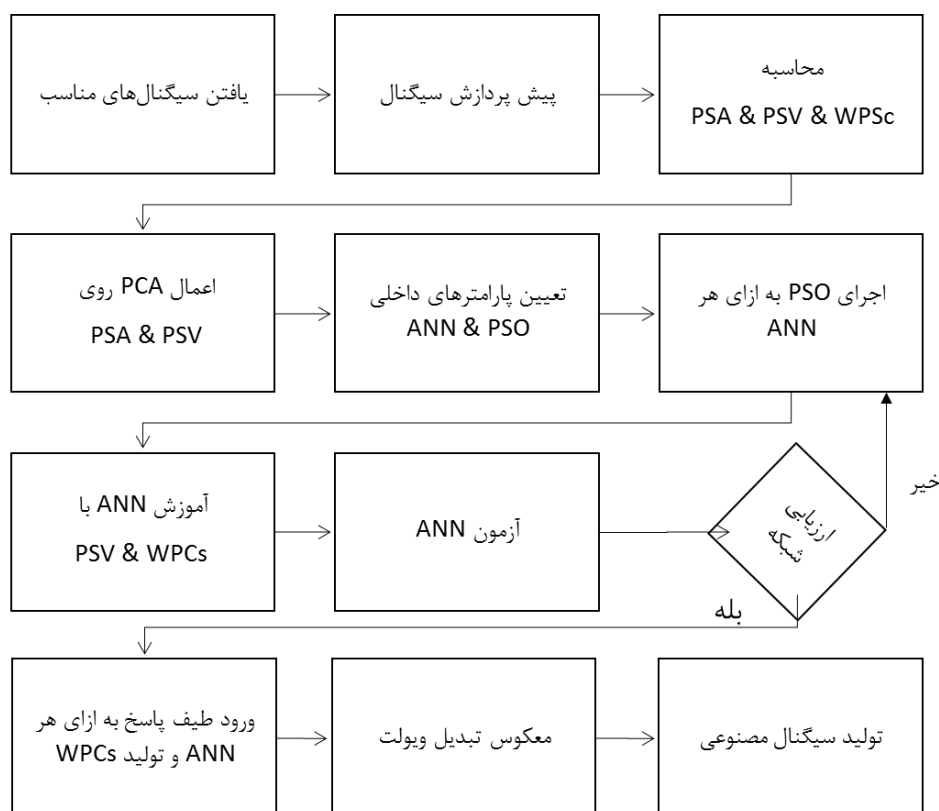


شکل (۵-۱۲): فرآیند کار در مدل پیشنهادی دوم

۵-۵-۶ مدل تعمیم‌یافته سوم

در این روش از توانایی یادگیری شبکه‌های عصبی مصنوعی برای نگاشت معکوس از طیف پاسخ به ضرایب تبدیل ویولت استفاده می‌شود، به موازات استفاده از الگوریتم‌های آموزشی موجود برای شبکه‌های

عصبی مصنوعی از توانایی الگوریتم تکاملی PSO^1 برای جستجو در یک فضای گسترده استفاده شده تا ماتریس‌های وزن و بایاس شبکه‌ها بهینه شوند و از همگرا شدن شبکه‌ها در نقاط بهینه محلی جلوگیری گردد. در روش پیشنهادی از الگوی LPC جهت فشردسازی اطلاعات سیگنال‌های زلزله، استفاده شده است. فرآیند کار در روش پیشنهادی در شکل ۵-۱۳ نمایش داده شده است.



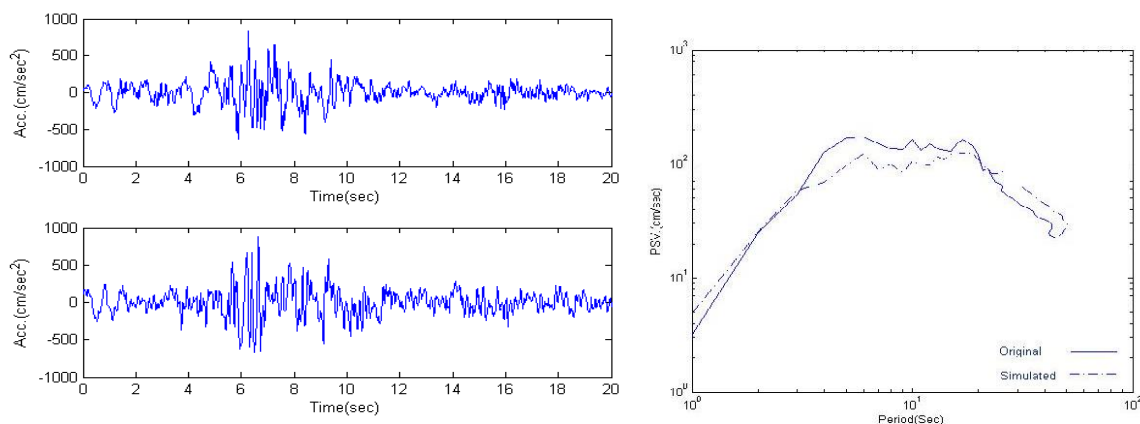
شکل (۵-۱۳): فرآیند کار در مدل پیشنهادی سوم

برای آموزش شبکه‌های مورد نظر ۸۰ سیگنال زلزله با ویژگی‌های متمایز از جهت بزرگی، طول مدت تداوم، ماکزیمم شتاب، از مناطق مختلف ایران انتخاب شده‌اند. سیگنال‌های فوق همگی در فواصل ۰.۲/ ثانیه گسسته سازی و پس از آن نرمال سازی شده‌اند. در آموزش هر شبکه ۶۰ سیگنال به‌عنوان سری آموزشی (Tr) و ۲۰ سیگنال به‌عنوان سری آزمون‌شونده (Ts) انتخاب شدند. در گزینش داده‌های

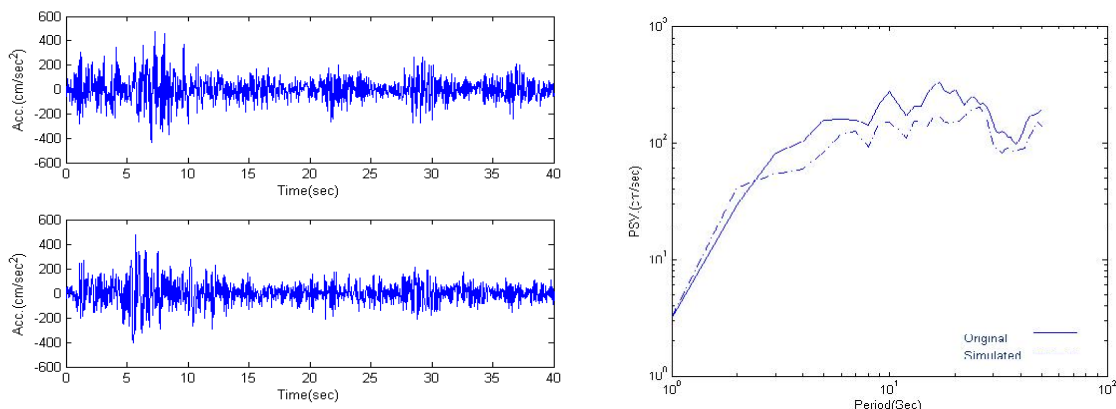
¹ Particle Swarm Optimization

آزمون شونده، هیچ انتخاب خاصی صورت نپذیرفته و این امر به صورت تصادفی انجام شده است. تنها در نهایت کنترل شده است که در بین سری‌های آزمون شونده از هر تیپ خاک لااقل یک الگو وجود داشته باشد.

در این روش، در مرحله آموزش شبکه‌ها با الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات با توجه به دقت مورد نیاز استفاده شده است. بعد از بهینه‌سازی شبکه‌ها با الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات، به منظور رسیدن به ماتریس‌های وزن و بایاس دقیق از الگوریتم کاهش گرادیان جهت آموزش شبکه استفاده شده است. در آموزش شبکه‌های عصبی مصنوعی پیشنهادی به کمک الگوریتم PSO هر شبکه را یک ذره محسوب کرده و در این پیاده‌سازی آموزش شبکه‌های عصبی مصنوعی به صورت همزمان صورت گرفته و به ازای هر ورودی از مجموعه داده‌ها تمام وزن‌ها تغییر می‌کند. در این روش هر ذره یک ساختار بوده و آرایه‌ای از این ساختارها، مجموعه‌ای از تمام نقاط می‌باشد. مقدار هر ذره بر اساس معادلات این روش به صورت تکراری بروز می‌گردد تا به حالت پایدار (بهینه) برسد. این کار سبب می‌شود که نه تنها شبکه‌ها درگیر اکستریم‌های محلی نگردند، بلکه زمان آموزش شبکه‌ها نیز به شدت کاهش می‌یابد، به طوری که مدت زمان لازم جهت آموزش هریک از شبکه‌ها، با توجه به دقت مورد انتظار از الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات، حداکثر ۷ دقیقه به طول می‌انجامد. در شکل‌های زیر نمونه نتایج آزمون شده توسط روش پیشنهادی نشان داده شده است.



شکل (۵-۱۴): سیگنال مصنوعی (چپ بالا) و اصلی (چپ پایین) زلزله طبرس و طیف پاسخ اصلی و مصنوعی (راست)



شکل (۵-۱۵): سیگنال مصنوعی (چپ بالا) و اصلی (چپ پایین) زلزله منجیل و طیف پاسخ اصلی و مصنوعی (راست)

۵ - ۶ بررسی صحت نتایج حاصل

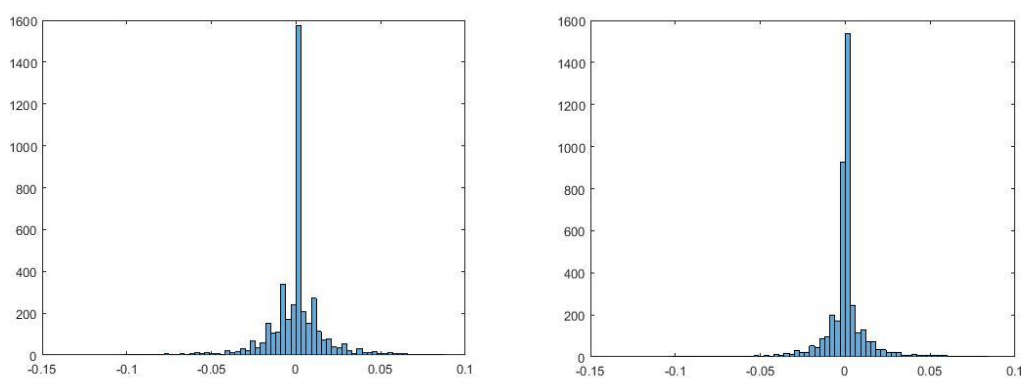
با توجه به ماهیت تصادفی زلزله، امکان پیش بینی مشخصات دقیق رخداد یک زلزله در منطقه‌ای مشخص، بعید به نظر می‌رسد. لذا هدف از تولید سیگنال‌های مصنوعی، تولید رکوردهایی است که به لحاظ تاریخیچه زمانی، شکلی مشابه با زلزله‌های واقعی ثبت شده داشته باشند و همچنین در کنترل چند پارامتر مهم پرکاربرد در مهندسی زلزله مرتبط با آنها، به یک دقت قابل قبولی دست یابیم. در بحث شناسایی سیگنال‌های زلزله از غیر آن روش‌های مختلفی ارائه شده است. در اغلب مقالات زمین‌شناسی کار جداسازی سیگنال‌های لرزه‌ای بر پایه مدل‌های پارامتری آماری انجام گرفته است. استخراج یا تخمین پارامترهای مدل به یک تحلیل‌گر فعال نیاز دارد که از جهت هزینه زمانی قابل قبول نیست.

تبعیت داده‌های زلزله از توزیع نرمال را می‌توان با آزمون آماری کولموگوروف اسمیرنوف^۱ بررسی کرد. این آزمون به عنوان یک آزمون تطابق توزیع برای داده‌های کمی است. فرض کنید محقق نمونه‌ای از اندازه‌های کمی در اختیار دارد و می‌خواهد تعیین کند که آیا این نمونه از جامعه‌ای با توزیع نرمال به دست آمده است یا خیر؟ آزمون نرمال بودن یک توزیع یکی از شایع‌ترین آزمون‌ها برای نمونه‌های کوچک است که محقق به نرمال بودن آن شک دارد. برای این هدف آزمون K-S، آزمون مناسبی است.

^۱ Kolmogorov-Smirnov

در نرم‌افزار SPSS از این آزمون برای تطابق چهار توزیع مختلف نرمال، پواسن، نمایی و یکنواخت استفاده شده است. اساس این روش بر اختلاف بین فراوانی تجمعی نسبی مشاهدات با مقدار مورد انتظار تحت فرض صفر است. فرض صفر می‌گوید که نمونه انتخاب شده دارای توزیع نرمال، (پواسن، نمایی یا یکنواخت) است. آزمون کلموگروف - اسمیرنوف برای تطابق توزیع، احتمال‌های تجمعی مقادیر در مجموعه داده‌ها را با احتمال‌های تجمعی همان مقادیر در یک توزیع نظری خاص مقایسه می‌کند. اگر اختلاف آن به قدر کافی بزرگ باشد، این آزمون نشان خواهد داد که داده‌های موجود با یکی از توزیع‌های نظری موردنظر تطابق ندارد. در این آزمون اگر معیار تصمیم (P-Value) کمتر از ۵٪ باشد فرض صفر رد می‌شود یعنی داده‌ها نمی‌توانند از یک توزیع خاص مانند نرمال، پواسن، نمایی یا یکنواخت باشند. برای بررسی صحت سیگنال‌های مصنوعی تولید شده از این آزمون بهره گرفته شده است.

در شکل (۵-۱۶) و جدول (۵-۲) نتایج حاصل از انجام آزمون آماری کولموگوروف اسمیرنوف بر روی سیگنال‌های واقعی و مصنوعی زلزله بم ارائه شده است که نشان می‌دهد هر دو سیگنال دارای توزیع آماری نرمالی بوده که یکی از دلایل صحت نتایج تولید شده می‌باشد. این آزمون بر روی سایر سیگنال‌های مصنوعی تولید شده نیز نتایج مثبت را ارائه نموده است.



شکل (۵-۱۶): نمودار هیستوگرام سیگنال مصنوعی زلزله بم که توزیع نرمال را در سیگنال واقعی (سمت چپ) و مصنوعی (سمت راست) نشان می‌دهد.

جدول (۵-۲): نتایج حاصل از آزمون آماری کولموگوروف اسمیرنوف بر روی سیگنال مصنوعی زلزله بم

Descriptive Statistics						
	N	Mean	Std. Deviation	Minimum	Maximum	Percentiles / 25th
IQ1	4096	.000001960395770	.017756360615931	-.0843980172430420	.10000000000000000	.000000000000
One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test						
Normal Parameters ^{a,b}	N	4096	a. Test distribution is Normal. b. Calculated from data. c. Lilliefors Significance Correction.			
	Mean	.000001960395770				
	Std. Deviation	.017756360615931				
Most Extreme Differences	Absolute	.000				
	Positive	.000				
	Negative	.000				
	Test Statistic	.000				
	Asymp. Sig. (2-tailed)	.000 ^c				

۵-۷ بررسی پارامترهای شاخص نتایج

معیار انتخاب ویژگی‌ها توانایی آن در بازسازی سیگنال از روی این ویژگی‌هاست و هر چه به سیگنال واقعی نزدیک‌تر باشد ویژگی مطلوبی محسوب خواهد شد. برای بررسی میزان نزدیکی سیگنال بازسازی شده از روی ویژگی‌های استخراج شده با سیگنال اصلی از پارامترهای ارائه شده در فصل چهارم استفاده نموده‌ایم.

در این بخش با محاسبه پارامترهای شاخص مطرح شده در فصل چهارم به ازای سیگنال‌های مصنوعی تولید شده با مدل پایه به مقایسه نسبت عددی این پارامترها با پارامترهای سیگنال اصلی پرداخته می‌شود. همان‌طور که در جداول ۵-۲ و ۵-۳ مشاهده می‌شود، نسبت عددی مناسبی بین سیگنال‌های مصنوعی و اصلی وجود دارد که نشان دهنده کارایی روش در تولید سیگنال‌های مصنوعی با محتوای داده‌ای همسان با سیگنال اصلی می‌باشد.

تأیید پاسخ روش‌های مختلفی که در خصوص این مسئله مطرح شده است، بیشتر به صورت ارزیابی ظاهری شتاب‌نگاشت مصنوعی تولیدی بوده است و به طور خاص الگوهای آماری در ارزیابی پاسخ تولید شده ارائه نشده است. به همین دلیل در روش پیشنهادی این رساله ویژگی‌های مطرح شده در سیگنال‌های مصنوعی تولیدی از این روش محاسبه شده و با ویژگی‌های استخراج شده از سیگنال اصلی مقایسه پارامتریک صورت گرفته است.

جدول (۳-۵): جدول مقایسه پارامترهای سیگنال مصنوعی با سیگنال واقعی

نام جغرافیایی ایستگاه	Duration (Sec)	PGA (g)	%	PGV (cm/sec)	%	PGD (cm)	%	Vmax / Amax (sec)	%	RMS (g)	%
ایهر	۲۹,۴۸	۱,۳۰	%۷۳	۲۱۸,۰۱	%۷۸	۱۰۹۰,۴۷	%۹۴	۱۶۸,۱۹	%۷۸	۰,۳۸۳	%۶۹
ایرق	۵۸,۸۸	۱,۷۱	%۸۲	۵۹,۹۵	%۷۸	۵۰۰,۳۶	%۸۹	۳۵,۰۴	%۷۰	۰,۱۹۴	%۷۵
اراک	۴۹,۹۲	۰,۱۴	%۵۹	۲۳,۰۱	%۶۲	۳۰۴,۵۳	%۶۲	۱۶۶,۶۰	%۵۹	۰,۰۱۸	%۷۴
بافق	۵۳,۷۶	۰,۱۱	%۶۷	۱۴,۲۹	%۱۷۳	۴۱,۵۴	%۸۰	۱۲۹,۰۰	%۷۶	۰,۰۲۶	%۷۳
بافت	۳۴,۵۶	۰,۱۴	%۱۰۰	۳۷,۰۹	%۹۴	۳۵۷,۷۲	%۹۱	۲۶۷,۵۹	%۸۰	۰,۰۲۵	%۶۸
بم	۵۵	۷,۹۹	%۹۳	۱۰۱۵,۲۱	%۸۹	۱۳۸۲۵,۲۵	%۶۷	۱۲۷,۰۵	%۶۷	۰,۸۸۵	%۶۹
بندرعباس	۴۵,۲۲	۰,۲۲	%۶۷	۳۲,۷۷	%۶۲	۴۹۹,۳۴	%۱۷۸	۱۴۷,۷۲	%۷۷	۰,۰۳۷	%۵۶
اشتهارد	۱۲,۵۸	۰,۷۱	%۷۸	۱۹۲,۶۲	%۸۰	۱۹۶۵,۲۸	%۵۷	۲۷۲,۸۷	%۵۴	۰,۱۲۵	%۷۶
فین	۳۱,۹۶	۰,۲۱	%۹۸	۵۹۳۹,۹۶	%۱۹۱	۱۸۹۷۴۲,۹۸	%۸۸	۲۸۹۵۰,۲۹	%۷۸	۰,۰۹۸	%۸۳
فیروزآباد	۳۸,۳۶	۲,۴۹	%۵۹	۸۹,۵۲	%۱۶۷	۳۵,۵۵	%۱۷۶	۳۵,۹۵	%۷۲	۰,۲۵۶	%۸۹
گچسر	۴۹,۴۸	۰,۷۲	%۷۸	۳۲۱,۷۳	%۷۰	۵۷۶۳,۰۷	%۸۹	۴۴۶,۱۲	%۷۷	۰,۱۱۳	%۶۹
گلباف	۵۹,۳۲	۰,۳۱	%۷۹	۲۰,۵۶	%۸۹	۲۰,۶۱	%۸۷	۶۶,۸۱	%۸۶	۰,۰۴۶	%۹۹
جیرفت	۵۵,۰۴	۰,۴۰	%۹۵	۵۶,۷۸	%۸۹	۵۱۷,۰۸	%۷۶	۱۴۰,۷۸	%۸۹	۰,۰۶۰	%۹۵
کهک	۵۷,۶	۱,۰۱	%۷۸	۳۱,۱۱	%۸۰	۲۰۴,۳۳	%۹۱	۳۰,۷۰	%۸۲	۰,۰۷۸	%۴۶
کرمان	۵۵,۰۴	۰,۱۹	%۵۷	۳۴,۹۰	%۶۵	۲۱,۱۶	%۵۹	۱۸۶,۰۶	%۷۳	۰,۰۴۰	%۷۶
لاهیجان	۶۰,۵۴	۱,۱۲	%۸۸	۳۴۰,۵۷	%۷۸	۱۷۳۷,۴۴	%۷۸	۳۰۳,۸۳	%۸۳	۰,۲۲۰	%۸۷
میمند	۲۷,۱۴	۴,۴۲	%۷۶	۴۶۸,۳۸	%۷۶	۴۰۲۵,۶۵	%۷۹	۱۰۶,۰۸	%۷۰	۰,۵۵۰	%۶۷
میناب	۵۱,۲	۰,۱۵	%۸۹	۱۰,۳۷	%۸۹	۸۰,۹۹	%۹۵	۷۰,۷۳	%۷۷	۰,۰۲۴	%۷۸
قشم	۷۲,۹۶	۰,۲۲	%۸۷	۳۳,۶۵	%۸۲	۲۴۵,۸۴	%۱۷۸	۱۵۳,۹۳	%۸۳	۰,۰۳۹	%۷۳
رفسنجان	۹۴,۷۲	۰,۲۴	%۱۷۶	۴۹,۱۳	%۷۳	۳۲۵,۶۸	%۱۵۷	۲۰۸,۲۵	%۹۱	۰,۰۴۵	%۹۳
رباط کریم	۱۲,۵۸	۰,۶۴	%۹۱	۱۰۲,۰۷	%۸۳	۱۸۹,۲۶	%۸۸	۱۶۰,۴۱	%۶۵	۰,۱۵۱	%۹۲
رودسر	۵۳,۱	۰,۳۹	%۶۵	۱۱۴,۴۶	%۱۷۰	۳۸۸,۶۵	%۷۶	۲۹۳,۸۶	%۷۸	۰,۱۰۶	%۶۹
تفرش	۴۷,۳۶	۰,۱۴	%۷۸	۵,۷۸	%۷۷	۵۹,۹۹	%۴۵	۴۰,۶۲	%۷۹	۰,۰۱۳	%۷۵
تهران	۴۷,۳۶	۰,۱۲	%۷۹	۶,۷۸	%۸۳	۱۸,۱۶	%۸۳	۵۸,۱۴	%۷۸	۰,۰۱۱	%۷۴
تنکابن	۳۵,۹۴	۱,۳۳	%۷۸	۷۵۳,۳۴	%۸۲	۹۲۱۴,۱۳	%۷۴	۵۶۸,۲۴	%۱۷۸	۰,۲۹۱	%۶۹
زنجان	۲۳,۵	۱,۳۲	%۷۸	۳۲۶۱,۳۸	%۸۱	۴۰۴۰۶,۳۹	%۸۷	۲۴۶۱,۶۱	%۱۵۷	۰,۱۹۷	%۶۸
زنجیران	۶۳,۹۸	۱۰,۰۶	%۶۹	۳۴۲,۹۰	%۷۴	۱۲۸۶,۰۴	%۹۹	۳۴,۰۸	%۸۸	۰,۸۰۴	%۷۹
زرنند	۴۲,۲۴	۰,۱۲	%۹۳	۲۹,۹۰	%۸۷	۱۰۷,۰۰۶	%۸۹	۲۴۴,۸۳	%۷۶	۰,۰۲۹	%۹۱
زرات	۴۳,۵	۳,۱۲	%۹۹	۱۱۰,۵۲	%۹۹	۲۸,۶۳	%۳۴	۳۵,۳۹	%۴۵	۰,۳۴۴	%۵۹
اندوهجرد	۴۰	۰,۳۲	%۹۵	۳۳,۱۸	%۸۹	۱۷۸,۲۶	%۶۹	۱۰۳,۵۲	%۶۹	۰,۰۵۲	%۶۹

%: Percentage of compliance

جدول (۴-۵): جدول مقایسه سایر پارامترهای سیگنال مصنوعی با سیگنال واقعی

نام جغرافیایی ایستگاه	Arias Intensity (m/sec)	%	Characteristi c Intensity (Ic)	%	Specific Energy Density (cm2/sec)	%	Cumulative Absolute Velocity (CAV) (cm/sec)	%	Mean Period TM (sec)	%
ایهر	۶۶,۸۱	%۱۱۱	۱,۲۸۹	%۹۱	۲۲۱۱۷۵,۹۰	%۵۹	۸,۸۳	%۸۳	۰,۷۱۳	%۱۷۶
ایرق	۳۴,۱۶	%۸۹	۰,۶۵۶	%۵۹	۸۴۲۹,۸۰	%۷۶	۵,۹۱	%۷۰	۰,۱۱۶	%۹۱
اراک	۰,۲۵	%۸۶	۰,۰۱۷	%۷۸	۲۶۴۹,۱۲	%۸۰	۰,۵۲	%۷۷	۰,۳۹۶	%۶۵
بافق	۰,۵۶	%۸۵	۰,۰۳۱	%۷۹	۵۴۹,۷۹	%۶۷	۰,۹۷	%۸۳	۰,۴۴۵	%۷۸
بافت	۰,۳۵	%۴۶	۰,۰۲۴	%۹۵	۸۵۶۰,۰۰	%۷۷	۰,۵۷	%۹۱	۰,۵۶۸	%۷۹
بم	۸۰۳,۳۳	%۱۲۹	۶,۷۹۳	%۱۷۸	۳۹۷۸۲۷۵,۶۳	%۵۴	۲۲,۹۵	%۱۶۵	۰,۴۹۵	%۷۸
بندرعباس	۱,۴۳	%۲۰۱	۰,۰۵۹	%۱۵۷	۹۵۵۵,۷۰	%۷۸	۱,۶۱	%۷۸	۰,۴۹۲	%۷۸
اشتهارد	۱۲,۸۶	%۷۸	۰,۳۳۶	%۸۹	۴۵۸۳۸۰,۷۶	%۷۲	۴,۲۸	%۷۹	۰,۵۴۳	%۶۹
فین	۹,۴۳	%۹۹	۰,۲۴۵	%۶۲	۷۵۱۳۲۰,۰۰	%۷۷	۶,۰۶	%۱۷۸	۰,۴۷۹	%۹۳
فیروزآباد	۲۸,۷۳	%۱۰۲	۰,۸۰۲	%۸۰	۴۳۱۹,۹۶	%۱۱۱	۴,۵۸	%۱۷۸	۰,۲۱۸	%۹۹
گچسر	۹,۷۷	%۷۸	۰,۲۶۸	%۱۹۱	۹۹۱۵۱۸,۳۳	%۱۲۳	۳,۸۹	%۱۵۷	۰,۳۳۳	%۹۵
گلیاف	۲,۰۵	%۶۷	۰,۰۷۸	%۱۶۷	۱۶۰۱,۰۷	%۹۹	۱,۸۳	%۹۹	۰,۴۶۳	%۷۸
جیرفت	۳,۱۰	%۷۵	۰,۱۱۰	%۷۰	۱۴۷۶۰,۶۸	%۱۰۰	۱,۹۹	%۱۱۱	۰,۵۳۳	%۱۰۲
کهک	۵,۴۶	%۷۸	۰,۱۶۷	%۸۹	۱۲۶۲,۲۵	%۸۸	۱,۹۱	%۱۰۹	۰,۱۵۷	%۱۷۶
کرمان	۱,۳۳	%۷۹	۰,۰۵۸	%۶۷	۲۸۲۳,۴۴	%۱۳۴	۱,۵۱	%۱۰۱	۰,۹۱۱	%۹۹
لاهیجان	۴۵,۳۵	%۴۹	۰,۸۰۵	%۷۸	۷۰۰۲۱۴,۱۴	%۱۲۱	۹,۲۸	%۸۹	۰,۳۸۶	%۱۰۰
میمند	۱۲۶,۷۵	%۱۱۱	۲,۱۲۷	%۹۸	۹۹۹۵۵۲,۸۴	%۹۸	۷,۱۸	%۶۷	۰,۴۶۴	%۸۲
میناب	۰,۴۵	%۱۰۷	۰,۰۲۷	%۵۹	۳۳۲,۶۰	%۱۰۲	۰,۸۶	%۱۳۵	۰,۳۳۲	%۹۸
قشم	۱,۶۸	%۱۹۰	۰,۰۶۵	%۷۸	۴۰۷۶,۴۷	%۱۰۶	۱,۷۸	%۹۰	۰,۵۶۹	%۱۳۲
رفسنجان	۲,۹۲	%۹۸	۰,۰۹۲	%۷۹	۲۲۲۶۳,۷۲	%۷۸	۳,۰۲	%۷۹	۱,۴۶۷	%۳۴
رباط کریم	۴,۴۵	%۱۲۳	۰,۲۰۹	%۱۱۱	۱۹۰۱۵,۵۰	%۵۶	۱,۴۶	%۱۰۸	۰,۶۶۱	%۹۸
رودسر	۳,۱۴	%۸۹	۰,۱۴۷	%۱۲۳	۵۶۹۳۱,۴۸	%۶۱	۱,۴۷	%۸۲	۰,۷۴۹	%۹۹
تفرش	۰,۱۲	%۸۷	۰,۰۱۰	%۶۹	۱۳۳,۰۹	%۷۴	۰,۳۳	%۹۹	۰,۱۹۲	%۵۸
تهران	۰,۰۸	%۶۹	۰,۰۰۷	%۸۸	۳۴,۸۳	%۸۷	۰,۲۵	%۵۶	۰,۳۷۴	%۵۴
تنکابن	۴۶,۸۵	%۹۹	۰,۹۴۰	%۹۸	۳۲۷۱۶۳۳,۱۳	%۹۹	۷,۴۶	%۱۰۲	۰,۹۱۵	%۱۴۱
زنجان	۱۴,۲۴	%۷۳	۰,۴۲۷	%۹۷	۹۷۴۲۱۰۰۰,۰۰	%۸۹	۳,۳۳	%۱۵۶	۰,۵۹۷	%۹۹
زنجیران	۶۳۶,۸۶	%۸۲	۵,۷۶۳	%۶۷	۷۵۵۰۸,۹۹	%۱۳۴	۱۶,۵۰	%۸۹	۰,۱۵۹	%۷۶
زرنند	۰,۵۵	%۱۰۲	۰,۰۳۲	%۱۴۵	۲۸۶۸,۷۳	%۶۹	۰,۸۹	%۹۰	۱,۳۷۸	%۹۹
زرات	۷۹,۴۸	%۲۰۱	۱,۲۳۲	%۲۱۹	۱۰۸۵۵,۷۲	%۸۹	۶,۸۱	%۷۳	۰,۲۳۲	%۱۰۰
اندوهجود	۱,۸۹	%۱۱	۰,۰۸۰	%۷۶	۳۲۴۴,۵۶	%۱۰۰	۱,۴۵	%۸۵	۰,۳۰۵	%۷۳

%; Percentage of compliance

۵ - ۷ جمع بندی

همان طور که در این فصل بیان شد، با به کارگیری شبکه های عصبی مصنوعی جهت نگاشت طیف پاسخ به سیگنال زلزله، توانستیم الگوی جدیدی را برای تولید سیگنال مصنوعی زلزله تولید کنیم. از مقایسه شکل سیگنال های مصنوعی با شکل سیگنال واقعی نتیجه می گیریم که الگوی مورد نظر تا حدی توانسته است شکل سیگنال ها را شبیه سازی نماید. همچنین با مقایسه طیف های پاسخ ملاحظه می کنیم

که طیف پاسخ سیگنال‌های تولید شده انطباق خوبی با طیف سیگنال واقعی دارد. بدین ترتیب می‌توان ملاحظه نمود که الگوی ارائه شده از لحاظ محتوای فرکانسی و دامنه می‌تواند سیگنال‌های زلزله را شبیه‌سازی نماید.

همچنین در این مدل‌ها با به‌کارگیری روش‌های متفاوت جهت آنالیز و تجزیه سیگنال‌ها و به‌کارگیری آن‌ها در شبکه‌های مختلف جهت تولید یک سیگنال، یادگیری شبکه را با آموزش خصوصیات سیگنال به‌طور جزء هموارتر نموده‌ایم.

فصل ششم: نتیجه‌گیری و محورهای مطالعه بیشتر

۱-۶ نتیجه گیری

در این رساله به ارائه روشی برای تولید و شبیه سازی سیگنال مصنوعی زلزله پرداخته شده است. با ملاحظه در طیف های پاسخ به دست آمده مشاهده می شود که انطباق نسبتاً خوبی با طیف های هدف مربوطه دارند. این هدفی است که از ابتدا دنبال می شد، چراکه با توجه به تصادفی بودن زلزله و اینکه سیگنال های مختلفی با طیف های پاسخ یکسان وجود دارند، توقع آنکه بتوان به سیگنالی رسید که از لحاظ شکل با سیگنال آن انطباق داشته باشد، نخواهد بود. این شباهت را می توان با اضافه نمودن بر سری های آموزشی افزایش داد. حال که شکل مورد نظر با سیگنال اولیه یکسان نیست، این انگیزه در ذهن ایجاد می شود که چگونه می توان سیگنال های متنوع با طیف های پاسخ یکسان ایجاد نمود، به گونه ای که لااقل بتوان مجموعه سیگنال های تولیدی را جهت آنالیز دینامیکی بکار برد تا بدین وسیله بر اطمینان آنالیز افزود.

در این رساله روش های مختلفی با بهره گیری از تکنیک های مختلف علم هوش مصنوعی برای رسیدن به این هدف مورد استفاده قرار گرفته است. در جدول ۱-۶ به طور اجمالی به روش های مختلف به کار رفته اشاره شده است.

جدول (۱-۶): جدول تکنیک های مختلف بکار گرفته شده در مدل های پیشنهادی

Method	ANN	Wavelet Transform	Fourier Transform	Time Series	Optimization	Compression	Extra Technique
1	✓	✓	×	×	×	MFCC	×
2	✓	✓	×	✓	PSO	MFCC	×
3	✓	✓	×	✓	GA	×	×
4	✓	✓	×	✓	PSO	PCA	×
5	×	✓	×	×	×	×	Kanai-Tajime
6	✓	✓	✓	✓	PSO	LPC	×

همان‌طور که در این جدول ۶-۱ ملاحظه می‌شود با کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی، ویولت‌ها، آنالیز فوریه، الگوریتم‌های تکاملی در بهینه‌سازی فرآیند آموزش شبکه‌های عصبی و جلوگیری از درگیر شدن در بهینه‌های محلی در تعیین وزن شبکه‌ها و با استفاده از الگوریتم‌های مختلف فشرده‌سازی، جهت کاهش اطلاعات شبکه، مطابق آنچه به تفصیل بیان شد، روشی جدید برای تولید سیگنال‌های مصنوعی سازگار با طیف پاسخ ارائه و قابلیت‌های آن با آزمون شبکه برای طیف‌های پاسخ نشان داده شده است.

از قابلیت‌های بارز این روش کاهش شدید مدت‌زمان آموزش می‌باشد. هر چند در این روش با تعداد زیادی شبکه روبرو خواهیم بود، اما در نهایت مدت‌زمان بسیار کمتری صرف آموزش مجموعه خواهد شد. در بعضی موارد ممکن است بین طیف پاسخ حاصل از سیگنال تولید شده و طیف ورودی انطباق مناسب وجود نداشته باشد، علت این موضوع آن است که شبکه الگویی متناظر با آن را در چند تراز خاص در الگوهای آموزشی نیافته است. به همین دلیل در محدوده‌ای از فرکانس‌ها می‌توان همپوشانی نسبتاً خوبی را مشاهده نمود و این بدان علت است که در تجزیه ویولت، این محدوده‌ها در چند الگوی آموزشی قابلیت قانونمند شدن را دارا می‌باشند و در حریم خاصی نیز که عموماً مربوط به فرکانس‌های پائین می‌باشد، قادر به استخراج الگویی خاص در شبکه مربوط به تراز مورد نظر نمی‌باشد، یا به عبارتی معادلی برای آن در این تراز وجود ندارد. در کنترل سری‌های آزمون‌شونده در این رساله مشاهده شد که این اختلاف چندان زیاد نمی‌باشد.

از مقایسه نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که سیگنال‌های تولید شده عمده محتوای فرکانسی سیگنال واقعی را در بر می‌گیرد و طیف پاسخ سیگنال‌های مصنوعی با سیگنال واقعی در اکثر فرکانس‌ها انطباق خوبی دارد. از مقایسه شکل سیگنال‌های مصنوعی با شکل سیگنال واقعی نتیجه می‌گیریم که الگوی مورد نظر تا حدی توانسته است شکل سیگنال‌ها را شبیه‌سازی نماید. همچنین با مقایسه طیف‌های پاسخ ملاحظه می‌کنیم که میانگین طیف پاسخ سیگنال‌های تولید شده انطباق خوبی

با طیف سیگنال واقعی دارد. بدین ترتیب می‌توان ملاحظه نمود که الگوی ارائه شده از لحاظ محتوای فرکانسی و دامنه می‌تواند سیگنال‌های زلزله را شبیه‌سازی نماید.

از ویژگی‌های مهم این پژوهش می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- ارائه شیوه‌ای مناسب و کاربردی جهت تولید سیگنال‌های مصنوعی مناسب برای مناطق مختلف ایران با تعداد محدود سیگنال قابل ارائه به شبکه.

- ارائه روشی بهینه در زمان و حجم اطلاعات ورودی به شبکه و دقت جهت رسیدن به سیگنال مصنوعی.

- بهبود فرآیند آموزش شبکه عصبی مصنوعی با به‌کارگیری الگوریتم‌های تکاملی.

- استفاده از ویولت‌ها برای شناسایی کامل و استخراج ویژگی‌های محتوای فرکانسی سیگنال زلزله.

- ورود تحلیل سری‌های زمانی جهت بهبود انتخاب ویژگی‌های مؤثر از سیگنال‌ها در یادگیری شبکه عصبی مصنوعی.

- کاهش ماهیت تصادفی بودن سیگنال‌های خروجی و انطباق بیشتر آن با طیف سازگار با ساخت‌گاه.

همچنین در این رساله، از طیف پاسخ به‌عنوان معیار کنترل زلزله‌های مصنوعی تولید شده، استفاده شده است، زیرا:

- طیف‌های پاسخ به‌نوعی دربردارنده مشخصات ساخت‌گاهی منطقه می‌باشند
- رعایت حداقل‌های مورد نیاز آنالیز طیفی استاتیکی، در آنالیزهای دینامیکی را تضمین می‌کنند.
- طبق ضوابط آیین‌نامه‌ها، جهت انجام آنالیز تاریخچه زمانی نیاز به سیگنال‌هایی منطبق با طیف طرح آن آیین‌نامه می‌باشد.

از مهم‌ترین چالش‌ها در روش پیشنهادی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- معرفی رویه‌های تضمین کیفیت نتایج حاصل از این پژوهش.
- انتخاب سیگنال‌ها بر اساس شناخت شرایط لرزه‌خیزی مناطق مختلف ایران نیازمند تخصص لازم است.
- شناسایی ویژگی‌های اصلی در آموزش شبکه‌های عصبی مصنوعی.
- عدم دسترسی به داده‌های آماری و نتایج کارهای مشابه جهت مقایسه و ارزیابی نتیجه این پژوهش با سایر پژوهش‌های مشابه.

۲-۵ پیشنهادها

با توجه به مطالعات انجام شده می‌توان موارد ذیل را جهت گسترش و بهینه‌سازی تولید سیگنال مصنوعی با این روش بکار برد:

- اعمال نمودن مشخصات ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی دیگر مانند نحوه گسلش، عمق و فاصله کانونی، بزرگا و روابط کاهندگی منطقه در الگو.
- تولید زلزله‌های مصنوعی نزدیک گسل.
- تولید مؤلفه قائم سیگنال‌های زلزله.
- استفاده از الگوریتم‌های دیگر در بخش فشرده‌سازی، تجزیه، آموزش (تعیین بهینه وزن‌ها) در فرآیند تولید سیگنال مصنوعی.

مراجع

- [۱] میرحسینی، مجدالدین و عارف پور، بابک، "مهندسی ژئوتکنیک لرزه ای"، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، چاپ اول، بهار ۱۳۷۸.
- [۲] باقری عبدالله، (۱۳۸۴) "تولید شتابنگاشت مصنوعی با استفاده از الگوی کانای-تجیمی و آنالیز ویولت"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.
- [۳] آقابابائی مبارک، (۱۳۷۷) "تولید شتابنگاشت مصنوعی با استفاده از الگوی کانای-تجیمی و الگوی ARMA"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شریف.
- [۴] منهج محمدباقر. هوش محاسباتی: شبکه‌های عصبی، جلد اول. انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۷۷.
- [5] D. E. Newland, "Random Vibrations, Spectral and Wavelet Analysis", Longman Singapore Publishers, Third Edition, 1994.
- [۶] فریدونی حمیدرضا، (۱۳۷۸) "بررسی و تولید شتابنگاشت‌های مصنوعی و مطالعه پارامترهای مؤثر در آن"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران.
- [7] S.Suzuki, K.Hada, K.Asano, "Simulation of Strong Ground Motions Based on Recorded Accelerograms and The Stochastic Methods", Soil Dyn. Earthquake Eng., 1998, 17, 551-556.
- [8] Housner, G.W. and Jennings, P.C. (1964), "Generation of artificial earthquakes", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 90, pp. 113–152.
- [9] Cohen, L. (1995), "Time-frequency analysis", *Prentice Hall PTR. Englewood Cliffs, NJ*.
- [10] Arfken G. B. & 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 Earthquake Research Institute University of Tokyo*, Vol. 35, pp.309–325.
- [12] Ahmadi, G. and Fan, F.G. (1990), "Nonstationary Kanai-Tajimi models for E1 Centro 1940 and Mexico City 1985 earthquake", *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol. 5, pp.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., A. Bagheri, G. Ghodrati Amiri, and M. Ghafory-Ashtiany. (2012) "Generation of uniform hazard earthquake accelerograms and near-field ground motions." *Journal of Earthquake and Tsunami* 6, no. 02.
- [15] Refoeei, F.R., Mobarake, A. and Ahmadi, G. (2001), "Generation of artificial earthquake records with a nonstationary Kanai-Tajimi model", *Engineering Structures*, Vol. 23, pp. 827-837.

- [16] Olafsson, S. and Ragnar, S. (1995), "Application of ARMA models to estimate earthquake ground motion and structural response", *Earthquake Engineering & Structure Dynamics*, Vol. 24, pp. 951-956.
- [17] Mobarakeh, A. A., Rofooei, F. R., & Ahmadi, G. (2002). "Simulation of earthquake records using time-varying Arma (2, 1) model", *Probabilistic Engineering Mechanics*, 17(1), 15-34.
- [18] Zhang, C. R., Chen, H. Q., & Li, M. (2007). "Earthquake accelerogram simulation with statistical law of evolutionary power spectrum", *Acta Seismologica Sinica*, 20, 435-446.
- [19] Ghaboussi, J. and Lin, C.J. (1998), "New method of generation spectrum compatible accelerograms using neural network", *Earthquake Engineering & Structure Dynamics*, Vol. 27, pp. 377-396.
- [20] Amiri, G. G., Bagheri, A., & 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*, 13(7), 899-915.
- [21] Mkrtychev O., Reshetov A., (2013). "Using wavelet analysis to obtain characteristics of accelerograms", *Vestnik MGSU*, Iss 7, 59-67.
- [22] Cacciola, P., & Zentner, I. (2012). "Generation of response-spectrum-compatible artificial earthquake accelerograms with random joint time–frequency distributions", *Probabilistic Engineering Mechanics*, 28, 52-58.
- [23] Mitropoulou, C. C., Lagaros, N. D., & Papadrakakis, M. (2015). "Generation of artificial accelerograms for efficient life-cycle cost analysis of structures" *Engineering Structures*, 88, 138-153.
- [24] Batou, A., & Soize, C. (2013). "Generation of accelerograms compatible with design specifications uses information theory", *Bulletin of earthquake engineering*, 12(2), 769-794.
- [25] Batou, A., & Soize, C. (2013). "Generation of spectrum-compatible accelerograms using information theory", In *Vienna Congress on Recent Advances in Earthquake Engineering and Structural Dynamics 2013 (VEESD 2013)*.
- [26] Hanks, T. C. and McGuire, R. K. (1981), "the Character of High-Frequency Strong Ground Motion", *Bull. Seismol. Soc. Am.*, No. 71, pp 2071-2095
- [۲۷] شاهجویی، ع. (۱۳۸۷)، "تولید زلزله‌های مصنوعی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت
- [28] Naeim F. (2001), "The Seismic Design Handbook", 2nd Edition, Kluwer Academic Publishers, Boston, MA
- [29] Jennings, P.C., Housner, G.W., Tsai N.C. (1968), "Simulated earthquake motions", Technical Report: CaltechEERL; 1968.EERL.1968.001, California Institute of Technology

[30] Wong, H. L. and Trifunac, M. D. (1979), "Generation of Artificial Strong Motion Accelerograms", Earthquake Engng. Struct. Dyn., No. 7, pp. 509-527

[۳۱] رزاقی، ع. (۱۳۸۷)، "تولید چندین شتاب‌نگاشت سازگار با طیف با استفاده از تبدیل بسته ویولتی و شبکه‌های عصبی تصادفی مصنوعی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت

[32] Tsai, N. C. (1972), "Spectrum-Compatible Motions for Design Purposes", Engineering Mechanics Division, ASCE, No. 98(EM2), pp. 345-356

[33] Scanlan, R. H. and Sachs, K. (1974), "Earthquake time Histories and Response Spectra", Engineering Mechanics Division, ASCE, No. 100(EM4), pp. 635-655

[34] Saragoni, GR, Hart, FC (1974), "Simulation of artificial earthquakes", Earthquake Eng. Structural Dyn., Vol. 2, No. 9, pp. 249-267

[35] Levit S, Wilkinson JPD (1976), "Generating of artificial time histories, rich in all frequencies, from given response spectra", Nuclear Eng. And Design, Vol. 38, Issue 2, pp. 241-251

[36] Kaul, M. K. (1978), "Spectrum-Consistent Time-History Generation", Engineering Mechanics Division, ASCE, No. 104(EM4), pp. 781-788

[37] Trifunac, M. D. (1979), "Preliminary empirical model for scaling Fourier amplitude spectra of strong motion acceleration in terms of modified Mercalli intensity and geologic site conditions", Earthqu. Eng. Struct. Dyn, 7, pp. 63-74

[38] 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

[39] Hanks, T. C. and McGuire, R. K. (1981), "the Character of High-Frequency Strong Ground Motion", Bull. Seismol. Soc. Am., No. 71, pp. 2071-2095

[40] Boore, D.M. (1983), "Stochastic Simulation of High-Frequency Groun Motions based on Seismological Models of Radiated Spectra", Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 73, No. 6, pp. 1865-1894

[41] Kimura, M. and Izumi, M. (1989), "A Method of Artificial Generation of Earthquake Ground Motion", Earthquake Engng. Struct., No. 18, pp.867-874

[42] Spanos, P. D. and Mignolet, M. P. (1990), "Simulation of Stationary Random Processes: Two Stage MA to ARMA Approach", Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 3, No. 116, pp. 620-641

[43] Ghodrati Amiri, G., Ashtari, P., Rahami, H. (2006), "New Development of Artificial Record Generation by Wavelet Theory", Structural Engineering and Mechanics, Vol. 2, No. 22, pp. 185-195

[44] Ghodrati Amiri, G., Bagheri, A., Fadavi, M. (2007), "New Method for Generation of Artificial Ground Motion by a Nonstationary Kanai-Tajimi Model and Wavelet Transform. Structural Engineering and Mechanics, Vol. 6, No. 26, pp. 709 -723

[45] Cui-ran,Z., Hou-qun, C., Min, L. (2007), "Earthquake accelerogram simulation with statistical law of evolutionary power spectra", Journal of ACTA Seismologica Sinica, Vol. 20, No. 4, pp. 435-446

[46] Rezaeian, S., Kiureghian, A.D. (2008), "A stochastic ground motion model with separable temporal and spectral nonstationarities", Earthq. Eng. Struct. Dyn, Vol. 37, No.13, pp. 1565-1584

- [47] Joyner, W.b., Boore, D.M. (1981), "Peak Horizontal Acceleration and Velocity from Strong Motion Records Including Records from the 1997 Imperial Valley, California, Earthquake", *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol. 6, No. 71, pp. 2011-2038
- [48] Boat Wright, J. (1982), "A dynamic Model for Far-field Accelerations", *Bulletin of Seismological Society of America*, No. 72, pp. 1049-1068
- [49] Hartzell, S. H. (1998), "Earthquake Aftershocks as Green's Functions", *Geophys.res.Lett.*, No. 5, pp. 1-4
- [50] Hadely, D.M., Helmberger, D.V. (1980), "Simulation of strong ground motions", *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol. 72, No. 3, pp. 959-979
- [51] Olson, A.H., Orcutt, J.A., Frazier, G.A. (1980), "The discrete wave number/finite element method for synthesis seismograms", *Geophysical Journal International*, Vol. 77, Issue 2, pp.421-460
- [52] 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", *Bull. Seismol. Soc. AM.*, No.81, pp. 1-27
- [53] Huching, L. (1994), "Kinematic Earthquake Models and Synthesized Ground Motion Using Empirical Green's Function", *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol. 4, No. 84, pp. 1028-1050
- [54] Sabetta, F. and Pugliese, A. (1996), "Estimation of Response Spectra and Simulation of Nonstationary Earthquake ground Motions", *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol. 2, No. 86, pp.337-352
- [55] Pitarka, A., Somerville, P., Fukushima, Y., Uteka T., Irikura, K. (2000), "Simulation of Near-field Strong-Ground Motion Using Hybrid Green's Functions", *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol. 90, No. 3, pp. 566-586
- [56] Meng-qiu, G., Bin, W., Zhao-Yong, X. (2005), "Study on simulating ground motion by fractal stochastic method", *Journal of ACTA Seismologica Sinica*, Vol. 18, No. 4, pp. 490-495
- [57] Ghaboussi, J. Garret Jr. and X. Wu, (1991), "Knowledge-based modeling of material behavior with neural networks", *J. Engng. Mech.Div. ASCE* 117(1), pp.132-153
- [58] Lin, C. C. J. and Ghaboussi, J. (2001), "Generation Multiple Spectrum Compatible Accelerograms Using Stochastic Neural Networks", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. No. 30, pp. 1021-1024
- [59] Lee, S. C., Han, S. W. (2002), "Neural-Network-Based Models for Generating Artificial Earthquakes and Response Spectra", *Computer and Structures*, No. 80, pp. 1627-1638
- [60] Mukherjee, S., Gupta, V.K. (2002a), "Wavelet-based characterization of design ground motions", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, Vol. 31, No. 5, pp. 1173-1190
- [61] Rajasekaran, S., Latha, V., Lee, S. C. (2006), "Generation of artificial earthquake motion records using wavelets and principal component analysis", *J. Earthq. Eng.*, Vol. 10, No.5, pp. 665-691
- [62] Ghodrati Amiri, G. Bagheri, A. (2008), "Application of Wavelet Multiresolution Analysis and Artificial Intelligence for Generation of Artificial Earthquake Accelerograms", *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 2, No. 28, pp. 153-166

[۶۳] اسعدی، آ. (۱۳۸۷)، "تولید شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی با استفاده از ویولت پاکت با الگوریتم بهترین پایه و شبکه عصبی"، رساله دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت

- [64] 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.

- [65] 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.
- [66] C. J. Lin, J. Ghaboussi, "Recent Progress on Neural Network Based Methodology for Generating Artificial Earthquake Accelerograms", *Proceeding of 12 WCEE*, 2000, No. 0497.
- [67] MATLAB Reference Guide, The Math Works, Inc., 2016
- [68] Fugal D. Lee (2009), *Conceptual Wavelets in Digital Signal Processing*, Space & Signals Technologies LLC.
- [۶۹] نمیرانیان پژمان، (۱۳۸۹) "تولید شتاب‌نگاشت مصنوعی با استفاده از تبدیل ویولت، شبکه‌های عصبی مصنوعی و الگوریتم کلونی مورچه‌ها"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.
- [۷۰] کاوه، ع.، ایرانمنش، ع. (۱۳۷۸)، "شبکه عصبی مصنوعی در بهینه‌سازی سازه‌ها"، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، شماره نشریه: ک-۳۱۰، تهران، ایران
- [71] Kramer S.L. "Geotechnical Earthquake Engineering", *Prentice-Hall*, 1996.
- [72] Brune, J.N(1970), "Tectonic stress and spectra of seismic shear waves from earthquakes" *Journal of Geophysical research*, Vol.75, pp 4997-5009.
- [73] Brune, J.N(1971), "Correction", *journal of Geophysical research*, Vol. 76. Pp 5002.
- [74] Aki. K. (1993). "Local site effects on strong ground motion", *Proceeding of Earthquake Engineering and soil Dynamic II-Recent in ground motion evaluation*, ASCE, Geotechnical Special No.20, pp. 103-155.
- [75] Priestley M.B. (1965), "Evolutionary spectra and non-stationary processes", *Journal of royal statistical society*, series B, Vol.27, pp. 204-237.
- [76] Priestley M.B. (1967), "Power spectra analysis of non-stationary random processes", *Journal of sound and vibration*, vol. 6, No.1, pp. 86-97.
- [77] Vanmarcke E.H. & Lai S.P.(1977), "Strong motion duration of Earthquake", Report R77-16 Massachusetts institute of technology, Cambridge, Massachusetts.
- [78] Tajimi, H.A. (1960), "Statistical method of determining the maximum response of a building structure during an earthquake", *Proceeding 2nd World Conference Earthquake Engineering Tokyo: Science Council of Japan*, Vol. II, pp. 781-798.
- [79] Chang, F.K. and Krinitzsky, E.L., "Duration spectral content and predominant period of strong", U.S. Army engineer waterways experiment station, Miscellaneous paper S-73-1, Vickburg, MS, 1977.
- [80] Trifunac M.D. & Brady A.G., (1975), "On the correlation of seismic intensity with peak of recorded strong ground motion", *Bulletin of the seismological society of America*, Vol.65, pp. 139-162.
- [81] Seed, H.B. & Idriea I.M. (1982), "Ground motion and soil liquefaction during earthquake", *Earthquake engineering*, Vol.2, pp. 2829-2838.
- [82] Von Thun J.L. & Rochim L.H. & Scott G.A. & Wilson J.A., (1988), "Earthquake ground motions for design and analysis of dams", *Earthquake engineering and soil dynamics special publication 20*, ASCE, Newyork, pp. 463-481.
- [83] Robert M. Ebling. "Introduction to the computation of response spectrum for earthquake loading" *Technical Report of US Army Corps of Engineers*, 1992.
- [۸۴] رمضی، ح. (۱۳۷۶)، "داده‌های پایه شتاب‌نگاشت‌های شبکه شتاب‌نگاری کشور"، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، نشریه شماره ۲۵۶، تهران، ایران
- [85] Iyama, J. and Kuwamura, H. (1999), "Application of wavelet to analysis and simulation of earthquake motions", *Earthquake Engineering & Structure Dynamics*, Vol. 28, pp. 255-272.

- [86] A. Biem and S. Katagiri, “Cepstrum-based filter-bank design using discriminative feature extraction training at various levels,” in Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1997, pp. 1503–1506.

Abstract:

The main cause of the damage in buildings during the earthquake is their response to earth movements, or, in other words, how the buildings deal with the earthquake forces. Today, one of the most common methods for analyzing and designing structures against earthquakes is spectral analysis, which for many years has been the basis for calculating earthquake forces on structures. One major drawback of the spectral analysis method for the analysis and design of structures is its inability to provide timely information on the response and structure behavior, which is the basis for the preparation of the response spectrum. On the other hand, possessing a signal corresponding to the design spectrum is one of the most important issues in nonlinear time histories analysis. Therefore, due to the advantages of using the time history analysis of the earthquake signal, and the lack of suitable signal in many areas, it is necessary in many cases to produce a number of artificial signals in some areas.

In the proposed method, first, some recorded accelerograms are selected based on the soil condition at the recording station. The soils in these stations are divided into two groups of soil and rock according to their measured shear wave velocity. These accelerograms are then analyzed using wavelet transform. Next, artificial neural networks ability to produce reverse signal from response spectra is used to produce wavelet coefficients. Furthermore, some evolutionary computing algorithm is employed to optimize the network weight and bias matrices by searching in a wide range of values and prevent neural network convergence on local optima. At the end site specific accelerograms are produced.

In this dissertation a number of recorded accelerograms in Iran are employed to test the neural network performances and to demonstrate the effectiveness of the method. It is shown that using synthetic time series analysis, evolutionary computing algorithm, neural network and wavelet transform will increase the capabilities of the algorithm and improve its speed and accuracy in generating accelerograms compatible with site specific response spectra for different site conditions.

Keywords:

Spectrum Compatible Records, Time Series Analysis, Evolutionary Computing Algorithm, Artificial Neural Network, Wavelet Transform, Fourier Transform



Shahrood University of Technology
Faculty of Computer & IT Engineering

PhD Dissertation in Computer Engineering – Artificial Intelligence

Generation of artificial accelerograms using time series analysis of earthquake signals

By: Mohammadreza Fadavi Amiri

Supervisor:
Dr. Sayed Ali Soleymani Eyvari

Advisors:
Dr. Hamid Hasanpour
Dr. Mohammad Shamekhi Amiri

July 2017