



تحلیل طیفی سازه ها با استفاده از تئوری موجک و مدت زمان حرکت قوی زمین

نوراله مجیدی^{۱*}، علی حیدری^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شهرکرد
^۲ دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شهرکرد

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۱۰-۲۱
بازنگری: ۱۳۹۸-۰۱-۰۹
پذیرش: ۱۳۹۸-۰۳-۱۳
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۳-۲۱

کلمات کلیدی:

تحلیل طیفی
تحلیل دینامیکی
موجک گسسته
زلزله
مدت زمان حرکت نیرومند زمین

خلاصه: در این مقاله برای اولین بار به بررسی همزمان تبدیل موجک و مفهوم زمان حرکت قوی زمین در تحلیل طیفی سازه ها استفاده شده است. هدف از این پژوهش بهینه سازی محاسبات مربوط به طیف زلزله ی اصلی می باشد. بر این اساس زلزله ی مورد نظر تا ۵ مرحله فیلتر می شود. در هر مرحله از فیلتر دو موج تقریبات و جزئیات حاصل می شود. به دلیل این که موج تقریبات به زلزله ی اصلی نزدیک تر است از این موج برای محاسبات استفاده می شود. به همین دلیل در هر مرحله از فیلتر تعداد رکوردهای زلزله نصف مرحله ی قبل می شود. پس از آن بر اساس مفهوم مدت زمان حرکت قوی زمین در موج زلزله ی اصلی و موج های به دست آمده از فیلتر موجکی، قسمتی از زلزله که دارای جنبش قوی است جدا می شود. پس در این مرحله نیز یک تقلیل در رکوردهای زلزله انجام گرفت. پس از آن طیف هریک از موج های حاصل شده رسم می شود. در انتها یک سازه ی دوبعدی ۱۰ طبقه و یک سازه ی سه بعدی ۵ طبقه با هریک از طیف های به دست آمده از دو مفهوم تبدیل موجکی گسسته و مدت زمان جنبش نیرومند زمین تحلیل می شود. نتایج نشان می دهد که با تقلیل محاسبات مربوط به طیف به اندازه ی بیش از ۹۳ درصد می توان سازه را با خطایی کمتر از ۴ درصد تحلیل نمود. می توان گفت که تکنیک ارائه شده یکی از بهترین تکنیک های ارائه شده در بهینه سازی محاسبات مربوط به تحلیل طیفی سازه ها است.

۱- مقدمه

تشریح شده می شود. محققین برای آنالیز سازه ها در برابر این نیرو

روش ها مختلفی ارائه داده اند [۱].

در روش های تحلیل دینامیکی نیروی جانبی زلزله با استفاده از بازتاب دینامیکی که سازه بر اثر حرکت زمین ناشی از زلزله، از خود نشان می دهد، بدست می آید. این روش ها شامل روش "تحلیل طیفی" و روش "تحلیل تاریخچه زمانی" است. حرکت زمین، که از آن در تحلیل های دینامیکی استفاده می گردد باید حداقل، شرایط زلزله طرح را داشته باشد. آثار حرکت زمین به یکی از دو صورت "طیف بازتاب شتاب" و یا "تاریخچه زمانی شتاب" تعیین می گردد [۳].

امروزه با توجه به مزایای تحلیل تاریخچه ی زمانی شاهد استفاده ی روز افزون از این نوع تحلیل در جامعه ی مهندسی می باشیم. یک گام مهم برای انجام تحلیل تاریخچه ی زمانی انتخاب و مقیاس شتاب نگاشت های متناسب با پارامترهای لرزه ای ساختگاه

بارهای وارد بر سازه ها در حالت هایی مانند زلزله باد نسبت به زمان تغییر دارند. از این رو برای بررسی پاسخ سازه نیاز به تحلیل دینامیکی سازه ها می باشد. در رشته مهندسی عمران اکثر سازه ها (ابنیه) تحت اثر نیروهای دینامیکی هستند. نیروهایی که مقدار (شدت) جهت و احتمالاً نقطه اثر آنها با زمان تغییر می کنند و البته نرخ تغییرات فوق به حدی است که پدیده ارتعاش که مشخصه اصلی رفتار دینامیکی است در سازه بوجود می آید. رخداد زلزله به عنوان یک پدیده طبیعی و درعین حال علت و معلولی، طی قرون گذشته چهره های نازیبا، مخرب و مهلک از خود به جای گذاشته است. شناخت و بصیرت علمی بر روابط علت و معلولی این پدیده که در نظام قانونمند طبیعت جای گرفته، از طریق طرح مباحث مختلف علمی و مرتبط با آن، تبیین و

* نویسنده عهده دار مکاتبات: noorollahmajidi1373@gmail.com



توانایی روش های استاتیکی برای در نظر گرفتن اثر این پارامتر بوده باشد. در روشهای دینامیکی چون خود شتابنگاشت زلزله از پایه به سازه اعمال شده و سازه تحلیل می شود، اثر تمامی خصوصیات زلزله را میتوان مورد بررسی قرار داد. [۵]

اگرچه تبدیل موجکی دارای قدمت ۲۳ ساله است [۶]، اما تاریخچه استفاده از آن در تحلیل دینامیکی سازه ها به حدود ۱۶ سال پیش برمی گردد [۷]. از نقطه نظر ریاضی تبدیل در یک موج اطلاعات بیشتری از موج خام را در اختیار می گذارد. موج زلزله یک موج ناپایا است زیرا که فرکانس های تشکیل دهنده آن در کل زمان وقوع موج، حادث نشده اند و در لحظات مختلف دارای فرکانس های متفاوتی است. در مرجع [۷] با استفاده از تبدیل گسسته موجکی که با روش تبدیل سریع فوریه ترکیب شده بود، پاسخ دینامیکی سازه ها محاسبه گردید. نتایج نشان داده که زمان مورد نیاز در این روش نصف زمان در تحلیل های متداول بوده و خطای آن کمتر از ۲ درصد بوده است. بهترین روش برای تجزیه و تحلیل موج زلزله تبدیل موجکی است. تبدیل موجکی به دو دسته پیوسته و گسسته تقسیم می شود. با توجه به ماهیت شتاب نگاشت زلزله، تبدیل گسسته موجکی مناسب تر است در تحقیق [۸] از دو روش Mallat و Shensa در تئوری موجکی برای تحلیل دینامیکی سازه استفاده شد. نتایج نشان داد که زمان تحلیل حدود ۹۰ درصد کاهش یافت در حالی که خطای حاصل حدود ۸ درصد بود. در مرجع [۹] سازه ها با استفاده از شبکه عصبی موجکی در برابر زلزله بهینه شدند. برای بهینه سازی از روش ژنتیک اصلاح شده که با روش بازسخت فلزات ترکیب شده بود استفاده گردید. برای کاهش محاسبات دینامیکی از تبدیل گسسته موجکی استفاده شد. برای این منظور پس از جداسازی فرکانسهای بالا و پایین زلزله، تعداد نقاط شتاب نگاشت کاهش داده شد. سپس از تابع مادر موجکی به عنوان تابع تحریک در شبکه عصبی استفاده گردید. زمان تحلیل در این روش حدود ۱۰ درصد زمان استفاده از شبکه عصبی متداول بود در حالی که خطای آن کمتر از ۸ درصد بود. در مرجع [۱۰] از روش بازسخت فلزات و فیلتر بانک موجکی برای بهینه سازی استفاده گردید. برای تحلیل دینامیکی از فیلتر بانک موجکی استفاده گردید. نتایج نشان داد که زمان تحلیل ۱۰ درصد روشهای متداول بوده و خطای آن حدود ۷ درصد بود. در مرجع [۱۱] با استفاده از روش ترکیبی ژنتیک و SA و تبدیل گسسته موجکی بهینه سازی انجام

مورد نظر می باشد. روش تحلیل دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی با اثر دادن شتاب زمین به صورت تابعی از زمان در تراز پایه‌ی ساختمان، واقعی‌ترین رفتار را از وقوع زلزله شبیه سازی می کند. در این روش شتاب نگاشت زلزله مقیاس شده اصلاح شده به سازه وارد شده و سازه تحلیل شده و پاسخ دینامیکی آن محاسبه می گردد [۲]. با توجه به این که حجم محاسبات در روش تحلیل تاریخچه‌ی زمانی زیاد است از روش تحلیل طیفی به جای آن استفاده می شود. اگر به جای تحلیل تاریخچه زمانی در جهت ساده شدن تحلیل فقط مقادیر بیشینه‌ی مودهای مختلف یک سازه در نظر گرفته شود. تحلیل دینامیکی طیفی انجام گرفته است. از این رو در این مقاله به بررسی تحلیل طیفی سازه ها پرداخته شده است. [۳]

به دلیل دقت بالای دستگاه های لرزه نگار حرکت ضعیف زمین نیز ثبت می شوند. موج های زلزله دارای نویزهایی می باشند که می توان با استفاده از فیلترهای متعدد آن ها را حذف کرد. این حذف در محتوای فرکانسی موج تأثیر نمی گذارد. از طرف دیگر حذف نویزها در موج زلزله باعث کاهش محاسبات می شود. هنگامی که یک پارامتر حرکت قوی برای توصیف حرکات زمین انتخاب می شود، لازم است روابط بین مقادیر این پارامتر و ویژگی های منبع زلزله، مسیر منبع تا سایت، و طبیعت سایت گسترش یابد. ماهیت روابط پیش بینی برای مدت زمان زلزله تا حد زیادی بستگی به تعریف به کار گرفته شده برای مدت زمان دارد با توجه به وابستگی زیاد خصوصیات لرزش به ویژگی های منبع لرزه که امکان پیش بینی این ویژگی ها برای زمین لرزه های آینده وجود ندارد حتی برای یک تعریف جدید و قوی مدت زمان، ارائه روابط تخمینی قابل اطمینان، دشوار است. در میان متون علمی حدود ۴۰ تعریف متفاوت مدت زمان پایه برای محاسبه مدت زمان از شتاب نگاشت های زلزله پیشنهاد شده است [۴]. که از میان آن ها بیشترین کاربرد مربوط به تعاریف می باشد که هر کدام ممکن است به صورت مطلق و یا نسبی توصیف گردند. این مدت زمان ها باید برای حدود مدت زمان عمده و زمان یکنواخت تعیین شده توسط کاربر محاسبه شوند که این موضوع اغلب مقایسه مستقیم بین نتایج بدست آمده را دشوار می کند. شرح مربوط به این سه نوع تعریف مدت زمان زلزله در بخش های بعدی ارائه خواهد شد. از میان خصوصیات و ویژگی های زلزله مدت زمان حرکات شدید می باشد که در گذشته کمتر به آن پرداخته شده است. از دلایل این کم توجهی شاید عدم

سپس مدت زمان حرکت قوی زمین بر اساس روش های مختلف به دست می آید. در مرحله ی بعد قسمتی از موج تقریبات که مربوط به مدت زمان جنبش نیرومند زمین است جدا می شود. در مرحله ی بعد طیف شتاب نگاشت براساس مدت زمان جنبش نیرومند رسم می شود. در انتها نیز با استفاده از طیف به دست آمده سازه تحلیل می شود.

۲- بررسی زلزله سرپل ذهاب

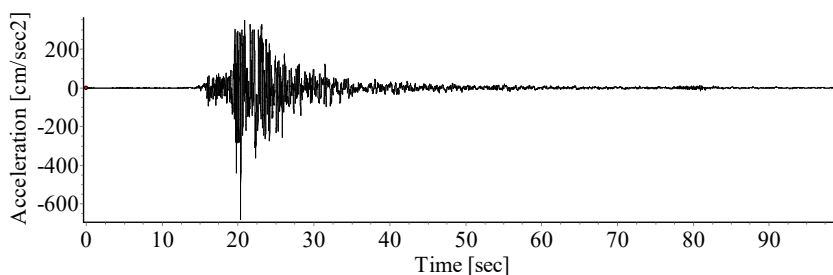
در این قسمت نتایج بررسی مؤلفه L زلزله کرمانشاه که در سرپل ذهاب ثبت شده بررسی می شود. بزرگای زلزله $M_n 7/3$ (موسسه ژئوفیزیک) و $M_w 7/3$ (مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی) می باشد. از روش باندگذر با محدوده فرکانسی صفر تا ۳۰ هرتز برای اصلاح رکورد ثبت شده استفاده شده است. بیشینه شتاب در رکورد اصلاح نشده $684/42$ و در رکورد اصلاح شده $681/45$ سانتی متر بر مجذور ثانیه است. در شکل ۱ منحنی اصلاح شده شتاب نگاشت اصلاح شده نشان داده شده است. حداکثر شتاب اصلاح شده مؤلفه های L، $0/43$ درصد با مقدار ثبت شده اولیه اختلاف دارد. شتاب نگاشت این زلزله از سایت راه و مسکن و شهرسازی گرفته شده است. دلیل انتخاب زلزله ی سرپل ذهاب برای اجرای تکنیک ارائه شده یکی تعداد رکوردهای بالای این زلزله است (۱۹۸۹۰) و دیگری زمان طولانی این زلزله است (۹۹/۴۵ ثانیه). به همین دلیل استفاده از تکنیک ارائه شده در این زلزله می تواند به کاهش محاسبات کمک زیادی نماید.

۳- طیف زلزله ی اصلی

طیف پاسخ عبارت است از نمودار حداکثر یک پاسخ انتخابی (نظیر تغییر مکان، سرعت و یا شتاب) در مقابل زمان تناوب طبیعی ارتعاش

شد. زمان مورد نیاز در این حالت ۳۵ درصد زمانی بود که از تبدیل موجکی استفاده نشده بود و خطای حاصل حدود ۱۵ درصد بود. در مرجع [۱۲] با استفاده از شبکه عصبی موجکی تحلیل دینامیکی سازه انجام شد. خطای این روش ناچیز بود در حالی که زمان تحلیل ۹۰ درصد کاهش یافت. در مرجع [۱۳] پاسخ دینامیکی سازه تا ۵ مرحله با استفاده از تجزیه موجکی تخمین زده شد. نتایج نشان داد که با افزایش هر مرحله، زمان تحلیل نصف و خطای آن دوبرابر می شد. در مرجع [۱۴] از تبدیل موجکی برای تعیین زمان وقوع فرکانس های شتاب نگاشت زلزله استفاده شد. با استفاده از این روش منحنی سه بعدی زمان-فرکانس-انتقال به دست می آمد که به کمک آن می شد زمان وقوع فرکانس های مختلف زلزله را به دست آورد. در مرجع [۱۵] از تئوری موجک و روش ژنتیک برای بهینه سازی سازه در برابر زلزله استفاده شد. خطای این روش حدود ۲ درصد و زمان مورد نیاز برای بهینه سازی ۱۵ درصد زمانی بود که از موجک استفاده نشده بود. سپس پارامترهای جنبش نیرومند زمین با استفاده از تبدیل موجکی و تجزیه شتاب نگاشت زلزله محاسبه گردید. نتایج نشان داد که با استفاده از تبدیل موجکی می توان پارامترهای جنبش نیرومند زمین را با خطای ناچیز تخمین زد [۱۶] همچنین با استفاده از تجزیه شتاب نگاشت زلزله و سپس استفاده از تحلیل دینامیکی، سازه به روش ژنتیک در برابر زلزله بهینه شد. نتایج به خوبی بیانگر توانایی روش برای کاهش زمان بهینه سازی بود [۱۷].

در این مقاله برای اولین بار برای به دست آوردن طیف یک شتاب نگاشت مشخص از ترکیب دو مفهوم مدت زمان جنبش نیرومند زمین و تبدیل موجکی گسسته استفاده شده است. در این راستا ابتدا شتاب نگاشت زلزله ی مورد نظر تا ۵ مرحله فیلتر می شود که در هر مرحله از فیلتر دوموج تقریبات و جزئیات حاصل می شود.



شکل ۱. شتاب نگاشت اصلاح شده زلزله ی سرپل ذهاب

Fig. 1. Modified acceleration of the Sarpolzahab earthquake

نتیجه تبدیل موجک یک ماتریس است که ستون‌های آن جابجایی در زمان را نشان می‌دهد و سطرهای آن مقیاس موردبررسی را نشان می‌دهد. به بیان دیگر ضرایب تبدیل موجک بیانگر میزان نزدیکی سیگنال به موجک در مقیاس موردنظر هست. در تبدیل موجک گسسته، سیگنال از یک سری فیلترهای بالاگذر برای آنالیز فرکانس‌های بالا و از یک سری فیلترهای پایین گذر برای آنالیز فرکانس‌های پایین، عبور داده می‌شود. سیگنال به دو بخش تقسیم می‌شود: بخش حاصل از عبور سیگنال از فیلتر بالاگذر که شامل اطلاعات فرکانس بالا (از جمله نویز) می‌باشد و جزئیات نام دارد، و بخش حاصل از عبور سیگنال از فیلتر پایین گذر که شامل اطلاعات فرکانس پایین و در برگیرنده مشخصات هویتی سیگنال است و تقریبات نامیده می‌شود [۱۵].

در تبدیل موجکی توابع مادر و مقیاس متفاوتی وجود دارند [۱۶]. از توابع مادر، در تبدیل پیوسته و گسسته موجکی استفاده شده، و از توابع مقیاس در تبدیل سریع موجکی برای جداسازی فرکانس‌های مختلف استفاده می‌شود. توابع مادر و مقیاس موجکی با ψ و ϕ نشان داده می‌شوند. بعضی از توابع مادر دارای رابطه‌ی صریح ریاضی بوده و بعضی از آن‌ها عبارت صریح ریاضی ندارند. در این تحقیق از تابع موجک مادر هار که در شکل ۳ نشان داده شده استفاده شده است [۱۹]. در مرجع [۱۰] نشان داده شده است که این روش از کارایی خوبی در تحلیل‌های دینامیکی برخوردار است.

تابع مادر موجک هار دارای رابطه‌ی ۱-الف

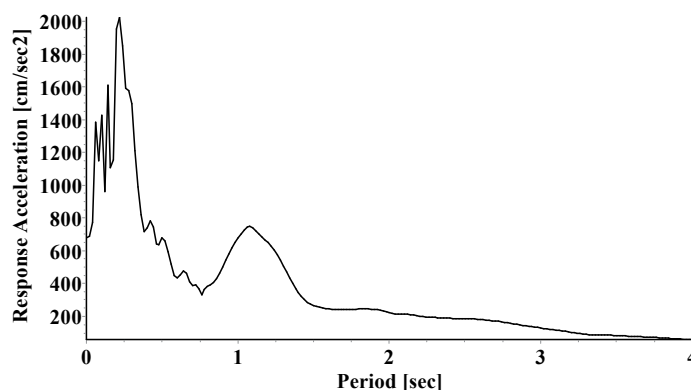
$$\psi(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t < 0.5 \\ -1 & 0.5 \leq t < 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (\text{الف-۱})$$

سیستم (ویا کمیت‌های وابسته نظیر فرکانس دوره ای). طیف پاسخ با چنین مفهومی، کاربرد بسیار وسیعی در مهندسی زلزله و مهندسی سازه دارد. طیف طرح از انجام محاسبات آماری بر روی مجموعه‌ای از طیف‌های پاسخ مربوط به داده‌های ثبت شده با خصوصیات مشترک، بدست می‌آید [۱۸]. در شکل ۲ طیف زلزله‌ی اصلی سرپل ذهاب نشان داده شده است.

۴- تبدیل موجکی

سیگنال غیرایستا، سیگنالی است که مشخصات آن در طول زمان (مکان) تغییر می‌کند. ابزار کلاسیک آنالیز سیگنال، تبدیل فوریه است. این تبدیل در مواجهه با سیگنال‌های غیرایستا ضعیف عمل می‌کند. در مقابل آن تبدیل موجک به خوبی نقاط ضعف این تبدیل را پوشش می‌دهد. تبدیل موجک به‌عنوان یک رویکرد کاربردی و برای حل مشکل تفکیک‌پذیری به وجود آمد.

در تبدیل موجکی برخلاف تبدیل فوریه به‌طور مستقیم پارامتر فرکانس را نداریم، در عوض پارامتر مقیاس را داریم که به‌طور معکوس با فرکانس در ارتباط است. مقیاس کردن همان‌طور که از معنی آن برمی‌آید به‌عنوان یک عملگر ریاضی سیگنال را منبسط و منقبض می‌کند مانند مفهوم مقیاس در نقشه، مقیاس‌های بالا متناظر با دید کلی و فارغ از جزئیات به سیگنال است (متناظر با فرکانس‌های پایین) و مقیاس‌های کوچک متناظر با نگاه به جزئیات سیگنال است و لذا در تناظر با فرکانس‌های بالا خواهد بود. در حقیقت تبدیل موجک یک شباهت سنجی بین سیگنال و توابع پایه (موجک‌ها) است و منظور از شباهت سنجی در این بحث شباهت بین محتوای فرکانسی است [۱۴].



شکل ۲. طیف زلزله‌ی سرپل ذهاب
Fig. 2. Spectrum of Sarpolzahab earthquake

و تابع مقیاس آن دارای رابطه ۱-ب است.

$$\phi(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t \leq 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1-b)$$

همانطور که گفته شد. در تبدیل موجکی دو پارامتر مقیاس و انتقال وجود دارد. در تبدیل موجکی پیوسته، پارامترهای انتقال و مقیاس به صورت پیوسته تغییر می‌کنند. به عبارت دیگر میزان تغییرات در کامپیوتر هر مرحله بسیار کوچک (پیوسته) است. این موضوع باعث افزایش محاسبات کامپیوتری می‌شود [۲۰]. در صورتی که در تبدیل موجکی، انتقال و مقیاس به صورت گسسته در نظر گرفته شوند، نوع دیگری از تبدیل موجکی بنام تبدیل گسسته ی موجکی (DWT) حاصل می‌شود [۲۱]. در مقیاس های بالا (فرکانس های پایین)، نرخ نمونه برداری از نقاط منحنی زمان را می‌توان مطابق قاعده نایکوسیت کاهش داد و حجم محاسبات را کم کرد. نمونه برداری نایکوسیت حداقل نرخ نمونه برداری مجاز از موج پیوسته است که قابل بازسازی است. اگر نرخ نمونه برداری از صفحه زمان-مقیاس، در مقیاس a_1 برابر N_1 باشد، این صفحه را می‌توان با نرخ نمونه گیری N_2 در مقیاس e_2 که $e_2 < e_1$ است ساده کرد، این حالت که متناظر با $f_1 > f_2$ (f) نشان دهنده فرکانس است) و $N_2 < N_1$ است. نسبت واقعی بین N_1 و N_2 از روابط زیر به دست می‌آید [۲۱].

$$N_2 = \frac{e_1}{e_2} N_1 \quad (2)$$

$$N_2 = \frac{f_1}{f_2} N_1 \quad (3)$$

برای موج گسسته ی S با تعداد نقاط N، با استفاده از فیلترهای پایین‌گذر می‌توان فرکانس های بالا را حذف کرد و تقریبی از موج

اصلی را به دست آورد. با استفاده از فیلتر بالاگذر نیز می‌توان فرکانس های پائین را حذف کرد و جزئیات موج را به دست آورد. با تأثیر همزمان این دو فیلتر بر موج، می‌توان آن را به دو قسمت با فرکانس های بالا و پایین تجزیه کرد. تقریبات و جزئیات موج در هر مرحله با A_j و D_j نشان داده می‌شوند. اما مسئله این است که در هر مرحله، با استفاده از فیلترها، از موج اصلی دو موج با تعداد نقاطی برابر با موج اصلی به دست می‌آید که باعث افزایش تعداد نقاط موج به دو برابر می‌شود. برای غلبه بر این مشکل از کاهش نمونه برداری استفاده می‌شود [۲۲]. در کاهش نمونه برداری از هر دو نقطه ی متوالی یکی حفظ شده و دیگری حذف می‌شود. بنابراین تعداد نقاط هر موج تقریباً نصف تعداد نقاط موج اصلی می‌شود. پس از این مرحله باز هم می‌توان تعداد نقاط موج را کاهش داد. با توجه به این که بیشترین انرژی موج در تقریبات آن است و شکل این قسمت از موج به موج اصلی شبیه تر است، بنابراین عمل فیلترگذاری برای این قسمت از موج انجام شده و موج A_1 به دو موج A_2 و D_2 تبدیل می‌شود. تعداد نقاط هر کدام از این موج ها نیز تقریباً نصف تعداد نقاط A_1 است. اگرچه از نقطه نظر تئوری این کار را می‌توان به تعداد \log_2^N مرتبه انجام داد ولیکن در تحلیل های دینامیکی موجی که شباهت بیشتری به موج اولیه داشته و تعداد نقاط آن نیز به حد کافی کم باشد مورد نیاز است. در حقیقت تبدیل سریع موجکی همانند یک بانک فیلتر عمل می‌کند [۲۳]. در این زمینه روش های متعددی وجود دارد. در این تحقیق از روش ملات^۲ [۲۳] استفاده شده که در ذیل بیان می‌شوند.

در این روش امواج تقریبی A_j و جزئی D_j از روابط زیر به دست می‌آیند .

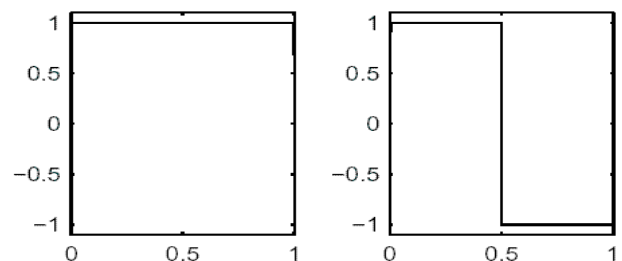
$$A_j = ap_{j,k} = \sum_n s(n) h_j^*(n - 2^j k) \quad (4)$$

$$D_j = de_{j,k} = \sum_n s(n) g_j^*(n - 2^j k) \quad (5)$$

که h_j فیلتر پایین‌گذر و g_j فیلتر بالاگذر نامیده می‌شود. مقادیر h و g از یک مرحله به مرحله ی بعد با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شوند.

$$g_1(n) = g(n) \quad (6)$$

$$h_1(n) = h(n) \quad (7)$$



شکل ۳-الف: تابع مادر شکل ۳-ب: تابع مقیاس
Fig. 3. Figure 3A: Mother function Figure 3B: Scale function

احتمال وقوع روانگرایی وجود نداشته باشد و ثانیاً بتوان از پایداری سازه پس از زلزله اطمینان حاصل نمود. لازم به ذکر است مدت زمانی که از شتاب‌نگاشت زلزله انتخاب می‌شود باید حجم عمده ای از انرژی زلزله را دارا باشد. با در نظر گرفتن موارد فوق ۴ روش برای تعیین مدت زمان زلزله وجود دارد که این چهار روش؛ مدت زمان یکنواخت، مدت زمان انتخابی، مدت زمان مؤثر و مدت زمان مهم می باشد. [۲۷].

مجموع مدت زمان‌های بین شتاب آریاس که معمولاً بین ۵ تا ۹۵ درصد شدت آریاس است را مدت زمان مهم می نامند. مدت زمان مؤثر معمولاً ۹۰ درصد انرژی کل زلزله بوده و عبارت است از مدت زمانی از زلزله است که در آن بیش از ۹۰ درصد انرژی زلزله وجود دارد. این زمان در محدوده بین ۵ تا ۹۵ درصد شدت آریاس مقیاس شده زلزله است. مدت زمان یکنواخت عبارت است از مجموع مدت زمان‌هایی که شتاب حرکت زمین از یک مقدار مشخص بیشتر شود. معمولاً این مقدار مشخص ۵ درصد شتاب بیشینه زلزله است. مدت زمان بین اولین و آخرین باری که شتاب حرکت زمین از یک مقدار بیشتر شود را مدت زمان انتخابی می نامند. معمولاً مقدار ۵ درصد شتاب بیشینه ملاک عمل است [۲۷-۲۸]. در ادامه زلزله ی اصلی با استفاده از تبدیل موجکی هار تا ۵ مرحله فیلتر شده است. تعداد رکوردهای زلزله ی اصلی ۱۹۸۹۰ می باشد که این تعداد در هر مرحله از فیلتر موجکی به نصف مرحله ی قبل کاهش می یابد. این بدان معنا است که تعداد رکوردهای موج تقریبات A_1 تا A_5 در کل زمان زلزله (۹۹/۴۵ ثانیه) به ترتیب ۹۹۴۵، ۴۹۷۲، ۲۴۸۶، ۱۲۴۳ و ۶۲۲ می باشد. هم چنین برای همگرا شدن پاسخ ها باید موج تقریبات به شتاب بیشینه ی زلزله ی اصلی (۶۸۱/۴۵ سانتی متر بر مجذور ثانیه) هم پایه گردد. در شکل ۴ مؤلفه ی اصلی زلزله ی سرپل ذهاب و موج های تقریبات هم پایه شده ی A_1 تا A_5 نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود شتاب بیشینه ی همه ی موج ها با روش هم پایه کردن یکسان شده است.

در جدول ۱ مدت زمان شروع و پایان جنبش نیرومند زمین بر اساس روش های مختلف برای زلزله ی اصلی و موج های تقریبات هم پایه شده نشان داده شده است.

همانطور که از نتایج جدول ۱ مشاهده می شود زمان ابتدا و انتهای حرکت قوی براساس مدت زمان انتخابی با زمان ابتدا و انتهای مدت زمان یکنواخت یکی است. لذا برای محاسبات تحلیل سازه از یکی از آن ها

$$g_{j+1}(n) = \sum_k g_j(k)g(n-2k) \quad (8)$$

$$h_{j+1}(n) = \sum_k h_j(k)g(n-2k) \quad (9)$$

این روابط نشان می‌دهند که این روش شبیه تئوری فیلترها بوده و تبدیل سریع موجکی متناظر با تجزیه ی بانک فیلتری است. معکوس آن نیز متناظر با ترکیب بانک فیلتری است. فیلترهایی که در تبدیل معکوس موجکی استفاده می‌شوند با \tilde{h} و \tilde{g} نشان داده شده و از روابط زیر به دست می‌آیند.

$$\tilde{h}_j(n-2^j k) = 2^{-0.5j} \tilde{\psi}(2^{-j}(t-2^j k)) \quad (10)$$

$$\tilde{g}_j(n-2^j k) = 2^{-0.5j} \tilde{\varphi}(2^{-j}(t-2^j k)) \quad (11)$$

مقادیر ψ و ϕ تابع مادر و تابع مقیاس هستند. با داشتن مقادیر \tilde{h} و \tilde{g} موج اصلی را می‌توان با استفاده از رابطه ی ۱۲ بازسازی کرد.

$$s(n) = \sum_{j=1}^l \sum_k a_{j,k} \tilde{h}_j(n-2^j k) + \sum_{j=1}^l \sum_k d_{j,k} \tilde{g}_j(n-2^j k) \quad (12)$$

۵- مدت زمان حرکت قوی زمین

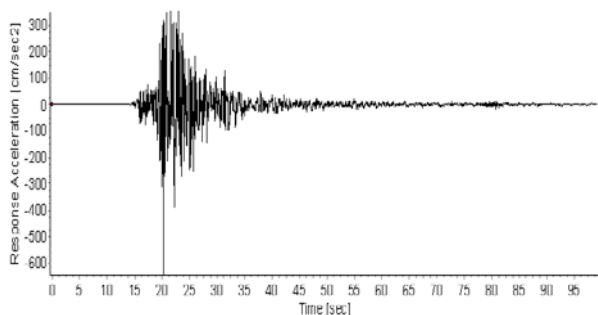
مدت دوام زلزله یکی از پارامترهای لرزه ای است، به کل مدتی که در طی آن زلزله رخ داده اطلاق می شود. مطالعات اولیه بر روی مدت زمان جنبش نیرومند زمین وابستگی این پارامتر را به بزرگای زلزله و فاصله ی کانونی نشان می دهد [۲۴]. مدت زمان حرکت قوی زمین پارامتری است که در آن زمان غالب انرژی زمین لرزه برای ارتعاش یک سازه وجود دارد. این پارامتر در تحلیل های غیر خطی نیز از اهمیت زیادی برخوردار است. اولین تعریف که برای این پارامتر مطرح شد تحت عنوان مدت زمان انتخابی بود که مدت زمان بین اولین و آخرین باری است که شتاب بیشتر از $g/0.5$ باشد [۲۵]. بریدی و تریفونس رابطه ای ارائه کردن که با داشتن هریک از توابع شتاب، سرعت و یا جابجایی می توان مدت زمان حرکت قوی زمین را استخراج کرد [۲۶]. در نظر گرفتن کل زمان وقوع زلزله سبب افزایش قابل توجه زمان تحلیل دینامیکی می شود، لذا در برخی موارد با توجه به تأثیر ناچیز بخش های ابتدا و انتهای شتاب نگاشت، بر رفتار دینامیکی سازه می توان این بخش ها را حذف و بارگذاری لرزه ای را در مدت کوتاه تری نسبت به مدت کل انجام داد، به شرطی که اولاً

در مدت زمان مهم و یکنواخت زلزله نشان داده شده است. برای به دست آوردن طیف پاسخ تعداد رکوردهای زلزله ی اصلی ۱۹۸۹۰ می باشد که همانطور که گفته شد این تعداد در هر مرحله از فیلتر موجکی به نصف مرحله ی قبل کاهش می یابد. پس مطابق مطلب گفته شده در قبل تعداد رکوردهای موج تقریبات هم پایه شده ی A^۱ تا A^۵ در کل زمان زلزله (۹۹/۴۵ ثانیه) به ترتیب ۹۹۴۵، ۴۹۷۲، ۲۴۸۶، ۱۲۴۳ و ۶۲۲ می باشد. از طرف دیگر با توجه به مفهوم مدت زمان مهم و یکنواخت حرکت قوی زمین برای کاهش محاسبات برای به دست آوردن طیف پاسخ از رکوردهایی که در بازه ی زمانی مهم و

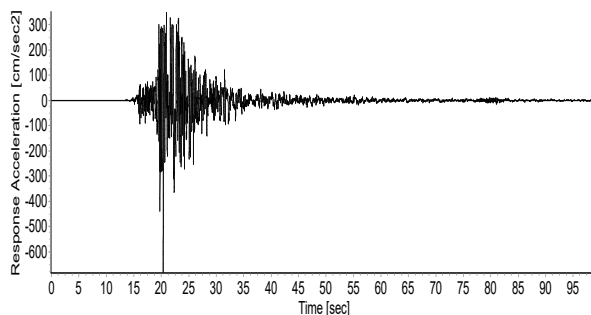
استفاده می شود. و همچنین با توجه به جدول ۱ مشاهده می شود زمان ابتدا و انتهای حرکت قوی براساس مدت زمان موثر با زمان ابتدا و انتهای مدت زمان مهم یکی است. لذا برای محاسبات تحلیل سازه از یکی از آن ها استفاده می شود. در شکل ۵ منحنی شتاب نگاشت زلزله ی اصلی و فیلترهای موجکی در مدت زمان مهم و یکنواخت نشان داده شده است.

۶- طیف زلزله اصلی و فیلترهای موجکی در مدت زمان مهم و یکنواخت زلزله

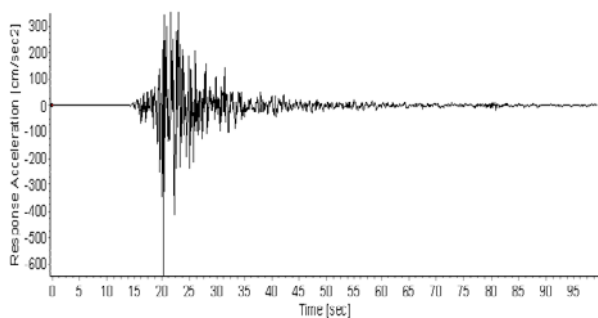
در شکل ۴ طیف زلزله ی اصلی و فیلترهای موجکی A^۱ تا A^۵



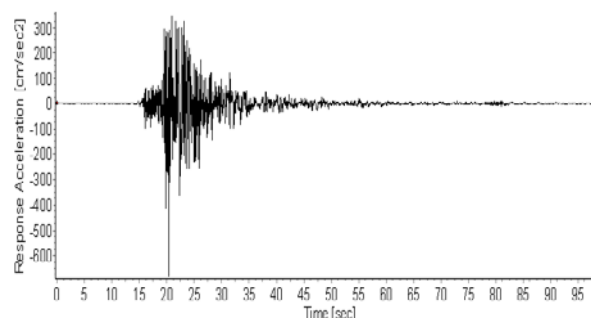
شکل ۴-۴. منحنی تقریبات A^۳
Fig. 4-4. Approximation curve A3



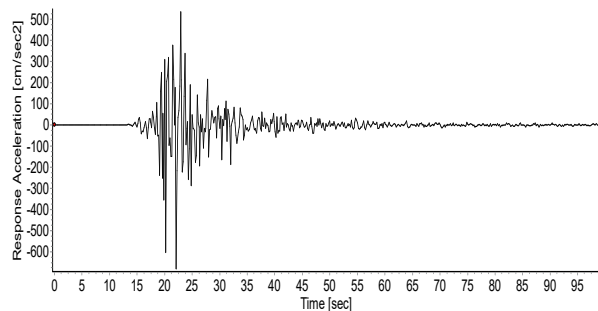
شکل ۴-۱. شتاب نگاشت زلزله ی سرپل ذهاب
Fig. 4-1. Approximation curve A-1A5



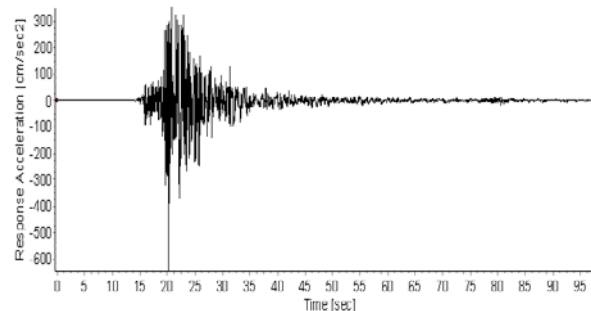
شکل ۴-۵. منحنی تقریبات A^۴
Fig. 4-5. Approximation curve A4



شکل ۴-۲. منحنی تقریبات A^۱
Fig. 4-2. Approximation curve A1



شکل ۴-۶. منحنی تقریبات A^۵
Fig. 4-6. Approximation curve A5



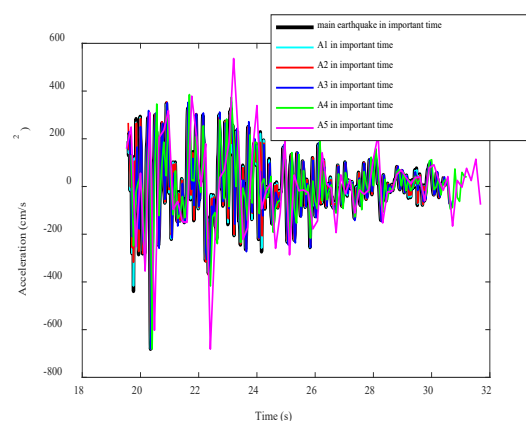
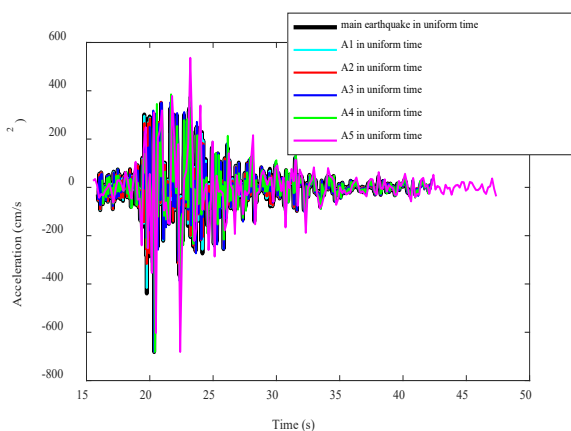
شکل ۴-۳. منحنی تقریبات A^۲
Fig. 4-3. Approximation curve A2

تا مرحله ی سوم (A^3) می توان گفت با تقریبی خوب عمل کرده است. ولی از فیلتر سوم به بعد دیگر منحنی طیف واگرا شده است. لذا از این قسمت می توان نتیجه گرفت برای انجام محاسبات مربوط به تحلیل سازه از منحنی های موج اصلی و موج اصلی در زمان جنبش نیرومند زمین و فیلتر اول تا سوم در زمان جنبش نیرومند استفاده می شود. در واقع همانطور که گفته شد برای رسم منحنی طیف با استفاده از زلزله ی اصلی از ۱۹۸۹۰ رکورد استفاده شده در حالی که برای رسم منحنی طیف در تبدیل موجکی A^3 برای مدت زمان مهم و یکنواخت به ترتیب از ۲۷۸ و ۶۶۰ رکورد استفاده شده است که همانطور که گفته شد بسیار محاسبات را کاهش

یکنواخت هستند استفاده می شود. به همین دلیل تعداد رکوردهای مورد استفاده برای برای به دست آوردن طیف پاسخ با استفاده از مدت زمان مهم برای زلزله ی اصلی و موج تقریبات A^1 تا A^5 به ترتیب ۲۱۶۸، ۱۰۹۸، ۵۵۱، ۲۷۸، ۱۴۴ و ۷۶ می باشد و تعداد رکوردهای مورد استفاده برای به دست آوردن طیف پاسخ با استفاده از مدت زمان یکنواخت برای زلزله ی اصلی و موج تقریبات A^1 تا A^5 به ترتیب ۴۹۳۰، ۲۶۳۸، ۱۳۲۰، ۶۶۰، ۳۲۵ و ۱۹۹ می باشد. در شکل ۴ طیف پاسخ به دست آمده در هر دو روش نشان داده شده است. در شکل ۶ منحنی طیف به دست آمده از همه ی روش ها نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۵ مشخص است فیلتر موجکی

جدول ۱. مدت زمان جنبش نیرومند زمین
Table 1. Duration of strong earth movement

مدت زمان انتخابی		مدت زمان یکنواخت		مدت زمان موثر		مدت زمان مهم		
پایان	شروع	پایان	شروع	پایان	شروع	پایان	شروع	
40/54	15/89	40/54	15/89	30/41	19/58	30/41	19/58	موج اصلی
42/28	15/89	42/27	15/89	30/56	19/58	30/56	19/58	A1
42/30	15/88	42/28	15/88	30/60	19/58	30/60	19/58	A2
42/32	15/88	42/28	15/88	30/72	19/60	30/72	19/60	A3
42/32	16/24	42/24	16/24	31/20	19/68	31/20	19/68	A4
47/52	15/52	47/36	15/52	31/68	19/52	31/68	19/52	A5



شکل ۵-۲. مقایسه منحنی شتاب نگاشت زلزله ی اصلی و موجهای A^1 تا A^5 در مدت زمان مهم

Fig. 5-2. Comparison of the main earthquake acceleration curve and A1 to A5 waves in a critical time

شکل ۵-۱. مقایسه منحنی شتاب نگاشت زلزله ی اصلی و موجهای A^1 تا A^5 در مدت زمان مهم

Fig. 5-1. Comparison of the main earthquake acceleration curve and A1 to A5 waves in a critical time

$$M\ddot{y} + C\dot{y} + Ky = F(t) \quad (13)$$

در ادامه با تغییر متغیر $y = AZ$ و انجام عملیات ریاضی رابطه ی ۱۳ به صورت رابطه ی ۱۴ به دست می آید. که در این رابطه a_i بردار مودی مربوط به مود i ام است. برای حل معادله ی ۱۴ ابتدا باید ضریب تحریک برای زلزله با استفاده از رابطه ۱۵ به دست آورده می شود. که در این رابطه L_i ضریب تحریک هر مود و m_j جرم هر طبقه است. در ادامه وزن مودی هر طبقه از رابطه ی ۱۶ به دست می آید. که در این رابطه M_i جرم مودی است که از رابطه ی ۱۷ به دست می آید.

$$a_i^T M a_i \ddot{Z} + a_i^T C a_i \dot{Z} + a_i^T K a_i Z = a_i^T F(t) \quad (14)$$

$$L_i = A_{ij} m_j \quad (15)$$

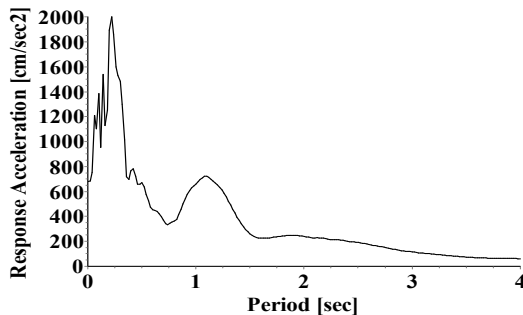
$$W_i = \frac{L_i^2}{M_i} \cdot g \quad (16)$$

$$M_i = a_i^T [M] a_i \quad (17)$$

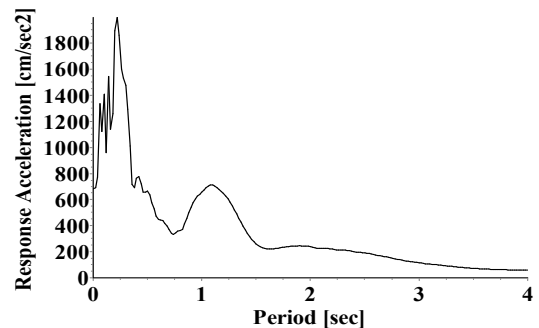
داده است. به عبارت دیگر از ۳ درصد رکوردها استفاده شده است. در ادامه با حل دو سازه ی دوبعدی و سه بعدی کارآمد بودن تکنیک ارائه شده بررسی می شود. در شکل ۷ مقایسه ی طیف موج های مختلف در مدت زمان مهم و یکنواخت نشان داده شده است. در شکل ۸ الگوریتم طی شده تا این مرحله از تحقیق نشان داده شده است.

۷- روش تحلیل طیفی سازه

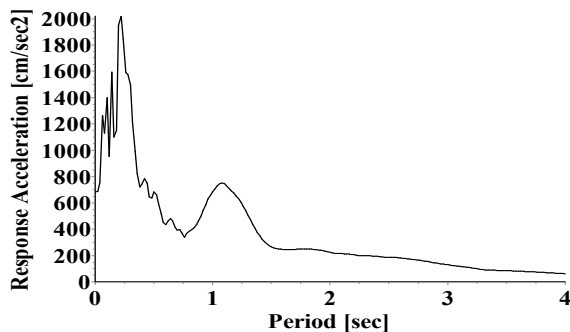
در رابطه ی ۱۳ معادله ی ارتعاش یک سیستم نشان داده شده است که در این رابطه M, C, K و $F(t)$ به ترتیب ماتریس جرم، میرایی، سختی و نیروی سازه هستند. در این راستا هر سازه با استفاده از روش مودال با توجه به تعداد مودهای سازه تحلیل مودی می شود. تعداد مودها در سازه ی یک بعدی به تعداد طبقات و در سازه ی سه بعدی ۳ برابر تعداد طبقات در نظر گرفته شده است. برای تحلیل مودال پس از بدست آوردن فرکانس های مودی یعنی ω_i به دنبال آن ماتریس مودال سیستم یعنی ماتریس $[A]$ حاصل می شود.



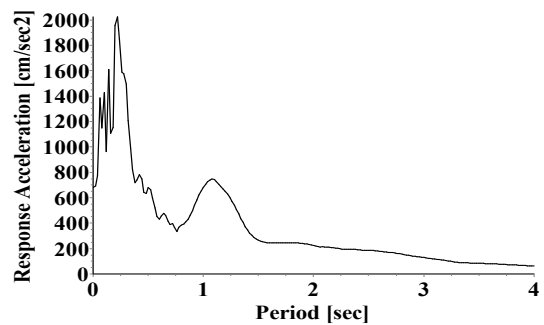
شکل ۳-۶. طیف پاسخ A_1 براساس مدت زمان مهم
Fig. 6-3. A_1 earthquake response spectrum based on significant duration



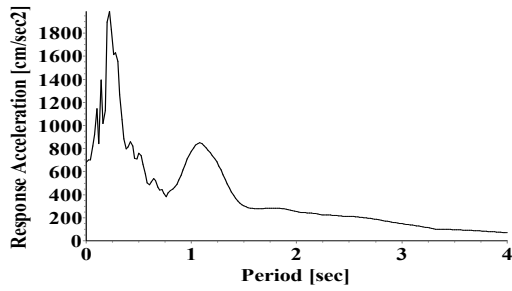
شکل ۱-۶. طیف پاسخ زلزله ی اصلی براساس مدت زمان مهم
Fig. 6-1. Main earthquake response spectrum based on significant duration



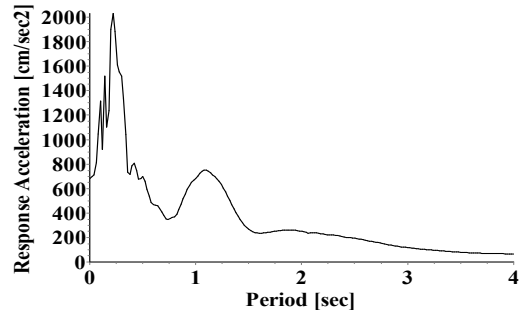
شکل ۴-۶. طیف پاسخ A_1 براساس مدت زمان یکنواخت
Fig. 6-4. A_1 earthquake response spectrum is based on a uniform duration



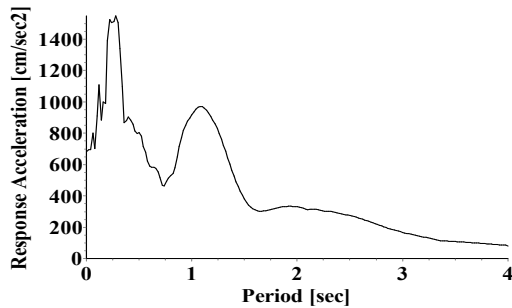
شکل ۲-۶. طیف پاسخ زلزله ی اصلی براساس مدت زمان یکنواخت
Fig. 6-2. The main earthquake response spectrum is based on a uniform duration



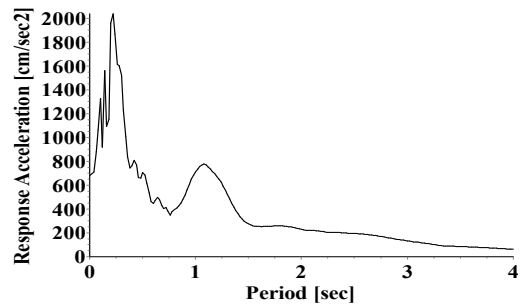
شکل ۶-۸. طیف پاسخ A^۳ براساس مدت زمان یکنواخت
Fig. 6-8. A3 earthquake response spectrum is based on a uniform duration



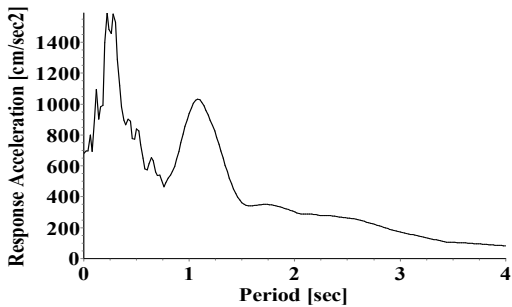
شکل ۶-۵. طیف پاسخ A^۲ براساس مدت زمان مهم
Fig. 6-5. A2 main earthquake response spectrum based on significant duration



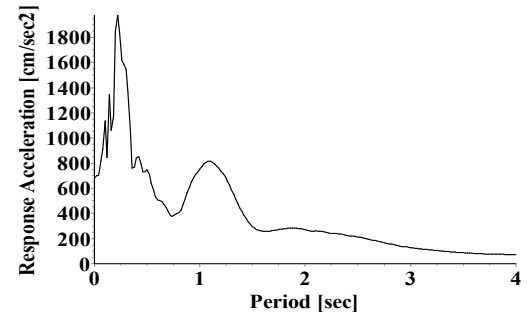
شکل ۶-۹. طیف پاسخ A^۴ براساس مدت زمان مهم
Fig. 6-9. A4 main earthquake response spectrum based on significant duration



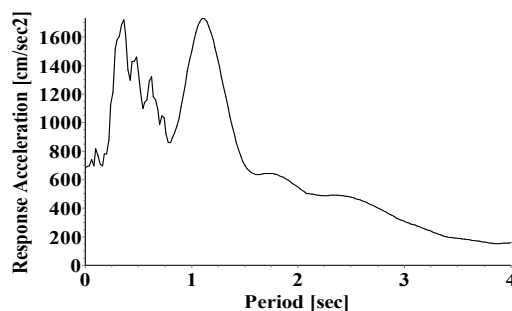
شکل ۶-۶. طیف پاسخ A^۲ براساس مدت زمان یکنواخت
Fig. 6-6. A2 earthquake response spectrum is based on a uniform duration



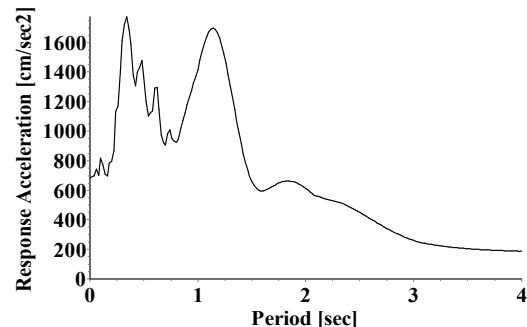
شکل ۶-۱۰. طیف پاسخ A^۴ براساس مدت زمان یکنواخت
Fig. 6-10. A4 earthquake response spectrum is based on a uniform duration



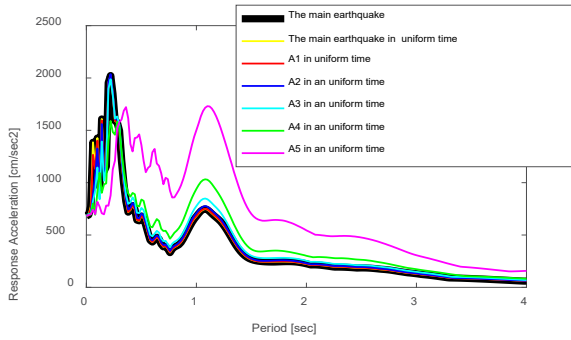
شکل ۶-۷. طیف پاسخ A^۳ براساس مدت زمان مهم
Fig. 6-7. A3 main earthquake response spectrum based on significant duration



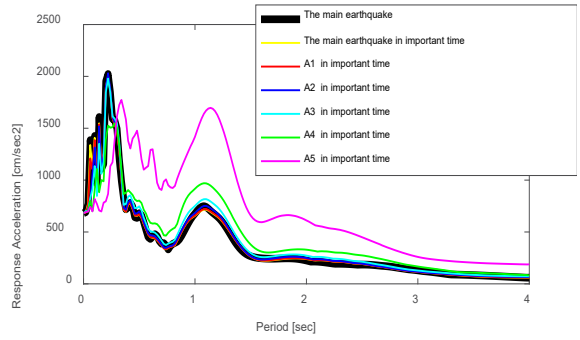
شکل ۶-۱۲. طیف پاسخ A^۵ براساس مدت زمان یکنواخت
Fig. 6-12. A5 earthquake response spectrum is based on a uniform duration



شکل ۶-۱۱. طیف پاسخ A^۵ براساس مدت زمان مهم
Fig. 6-11. A5 main earthquake response spectrum based on significant duration



شکل ۷-۲. مقایسه طیف پاسخ براساس مدت زمان یکنواخت
Fig. 7. Comparison of response spectra based on uniform duration



شکل ۷-۱. مقایسه طیف پاسخ براساس مدت زمان مهم
Fig. 7. Compare response spectra based on important duration



شکل ۸. الگوریتم پژوهش
Fig. 8. Research algorithm

طبقات ۳/۲۰ متر و طول هر دهانه ۶ متر است. مقاطع تیرها و ستون‌های آن به ترتیب IPE۲۲۰ و IPE۳۰۰ است. در این مثال وزن مخصوص، مدول الاستیسیته و تنش جاری شدن فولاد به ترتیب 7850 Kg/m^3 ، $2.04 \times 10^{10} \text{ Kg/m}^2$ و 3500 Kg/cm^2 می‌باشد. قاب مورد نظر تحت طیف زلزله اصلی، زلزله‌ی اصلی در مدت زمان مهم و یکنواخت و موج تقریبات مقیاس شده در مدت زمان مهم و یکنواخت تحلیل می‌شود. در انتهای هر تحلیل جابجایی گره‌ی مرجع که با نام Ref node مشخص شده به دست آورده می‌شود.

در جدول ۲ پاسخ نقطه‌ی مرجع تحت طیف‌های مختلف برای مدت زمان مهم نشان داده شده است.

در جدول ۳ پاسخ نقطه‌ی مرجع تحت طیف‌های مختلف برای مدت زمان یکنواخت نشان داده شده است.

با توجه به نتایج جداول ۲ و ۳ مشاهده می‌شود که بهترین موج را می‌توان موج A۲ نامید. زیرا خطای آن در مدت زمان مهم و یکنواخت به ترتیب ۴ و ۳ درصد است. که با توجه به این که برای رسم منحنی طیف این زلزله برای زمان مهم از ۵۵۱ و برای زمان یکنواخت از ۱۳۲۰ رکورد استفاده شده است خطا قابل چشم‌پوشی

در ادامه از روابط ۱۸ و ۱۹ به ترتیب جابجایی و شتاب طبقات به ازای مود i ام به دست می‌آید. که در این رابطه Sa_i و T_i شتاب طیفی و پریود مربوط به هر مود است. شتاب طیفی با توجه به پریود هر مود از نمودار طیف مربوطه استخراج می‌شود.

$$X_i = a_i \frac{L_i}{M_i} \cdot \frac{T_i^2}{4\pi^2} Sa_i \quad (18)$$

$$\ddot{X}_i = a_i \frac{L_i}{M_i} Sa_i \quad (19)$$

در ادامه‌ی این تحقیق به بررسی پاسخ چند سازه‌ی مختلف تحت طیف اصلی زلزله و طیف حاصل از فیلترهای موجکی پرداخته می‌شود. دقت شود که در این تحقیق خطای نقطه‌ی مرجع در هر طیف پاسخ از مقایسه با پاسخ نقطه‌ی مرجع در طیف اصلی زلزله به دست می‌آید.

۸- بررسی روش برای سازه دوبعدی ۱۰ طبقه با سیستم قاب خمشی

در این قسمت به تحلیل یک سازه دوبعدی ۱۰ طبقه با سیستم قاب خمشی با استفاده از نرم افزار SAP پرداخته می‌شود. ارتفاع

جدول ۲. پاسخ سازه مورد نظر در مدت زمان مهم
Table 2. Response of the desired structure in an important time

طیف مورد نظر	جابجایی cm	درصد خطا
زلزله‌ی اصلی	5/756	-
زلزله‌ی اصلی در مدت زمان مهم	5/738	0/31
A1 در مدت زمان مهم	5/810	0/93
A2 در مدت زمان مهم	6/010	4/41
A3 در مدت زمان مهم	6/310	9/62
A4 در مدت زمان مهم	6/990	21/43
A5 در مدت زمان مهم	10/505	82/50

جدول ۳. پاسخ سازه مورد نظر در مدت زمان یکنواخت
Table 3. The response of the desired structure in a uniform time

طیف مورد نظر	جابجایی cm	درصد خطا
زلزله‌ی اصلی	5/756	-
زلزله‌ی اصلی در مدت زمان مهم	5/756	0/00
A1 در مدت زمان مهم	5/757	0/017
A2 در مدت زمان مهم	5/940	3/19
A3 در مدت زمان مهم	6/403	11/24
A4 در مدت زمان مهم	7/759	34/79
A5 در مدت زمان مهم	11/543	100/53

و تنش جاری شدن فولاد به ترتیب $2.04 \times 10^{10} \text{ Kg/m}^2$ ، 7850 Kg/m^3 و 3500 Kg/cm^2 می باشد. قاب مورد نظر تحت طیف زلزله اصلی، زلزله‌ی اصلی در مدت زمان مهم و یکنواخت و موج تقریبات مقیاس شده در مدت زمان مهم و یکنواخت تحلیل می شود. در انتهای هر تحلیل جابجایی گره‌ی مرجع که با نام Ref مشخص شده به دست آورده می شود.

در جدول ۴ پاسخ نقطه‌ی مرجع تحت طیف‌های مختلف برای مدت زمان مهم نشان داده شده است.

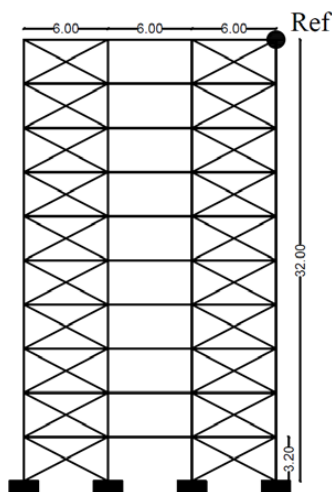
در جدول ۵ پاسخ نقطه‌ی مرجع تحت طیف‌های مختلف برای مدت زمان یکنواخت نشان داده شده است.

با توجه به نتایج جداول ۴ و ۵ مشاهده می شود که بهترین موج برای حالتی که از تکنیک در مدت زمان مهم استفاده شود، طیف حاصل از موج A^۲ است و بهترین موج برای حالتی که از تکنیک در مدت زمان یکنواخت استفاده شود، طیف حاصل از موج A^۳ است.

است. این بدان معنی است که تنها از ۷ درصد رکوردها در زمان یکنواخت استفاده شده است. از طرف دیگر استفاده از موج A^۳ در مدت زمان مهم نیز دارای خطایی کمتر از ۱۰ درصد است که این خطا در مقایسه با این که تنها از ۱/۴ درصد رکوردهای زلزله استفاده کرده است، منطقی به نظر می رسد. بهتر است برای خطای کمتر طیف موج A^۲ در مدت زمان یکنواخت در نظر گرفته شود.

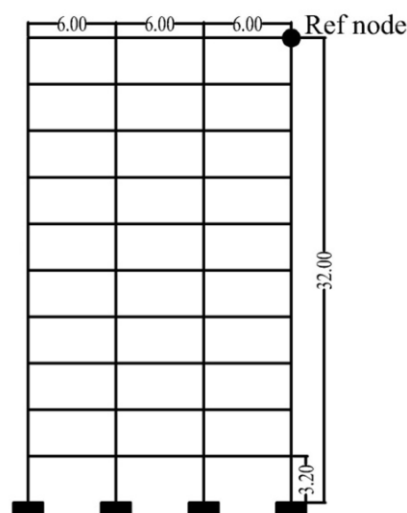
۹- بررسی روش برای سازه دوبعدی ۱۰ طبقه با سیستم قاب خمشی و مهاربند همگرا

در این قسمت به تحلیل یک سازه دوبعدی ۱۰ طبقه با سیستم قاب خمشی و مهاربند همگرا، با استفاده از نرم افزار SAP پرداخته می شود. ارتفاع طبقات ۳/۲۰ متر و طول هر دهانه ۶ متر است. مقاطع تیرها، ستون‌ها و مهاربندهای آن به ترتیب IPE^{۳۰۰}، IPE^{۵۵۰} و UNP^{۳۰۰} است. در این مثال وزن مخصوص، مدول الاستیسیته



شکل ۱۰. ساختمان دویعدی ۱۰ طبقه با سیستم قاب خمشی و مهاربند همگرا

Fig. -10. 10storey two-dimensional building with convergent bending frame and bracing system



شکل ۹. ساختمان دویعدی ۱۰ طبقه با سیستم قاب خمشی

Fig. 9. Two-dimensional -10storey building with a bending frame system

جدول ۴. پاسخ سازه موردنظر در مدت زمان مهم

Table 4. Response of the desired structure in an important time

درصد خطا	جابجایی cm	طیف مورد نظر
-	3/125	زلزله‌ی اصلی
2/91	3/034	زلزله‌ی اصلی در مدت زمان مهم
4/41	2/987	A1 در مدت زمان مهم
4/35	2/989	A2 در مدت زمان مهم
13/18	2/713	A3 در مدت زمان مهم
31/32	2/146	A4 در مدت زمان مهم
43/77	1/575	A5 در مدت زمان مهم

۳/۲۰ متر و طول هر دهانه ۶ متر است. مقاطع تیرها و ستون‌های آن به ترتیب IPE۲۲۰ و IPE۳۰۰ است. در این مثال وزن مخصوص، مدول الاستیسیته و تنش جاری شدن فولاد به ترتیب $7850 \text{ Kg} / \text{m}^3$ ، $2.04 \times 10^{10} \text{ Kg} / \text{m}^2$ و $3500 \text{ Kg} / \text{cm}^2$ می باشد. قاب مورد نظر تحت طیف زلزله اصلی، زلزله ی اصلی در مدت زمان مهم و یکنواخت و موج تقریبات مقیاس شده در مدت زمان مهم و یکنواخت تحلیل می شود. در انتهای هر تحلیل جابجایی گره ی مرجع که با نام Ref مشخص شده به دست آورده می شود.

در جدول ۶ پاسخ نقطه ی مرجع تحت طیف های مختلف برای مدت زمان مهم نشان داده شده است.

در جدول ۷ پاسخ نقطه ی مرجع تحت طیف های مختلف برای مدت زمان یکنواخت نشان داده شده است.

با توجه به این که برای رسم منحنی طیف این زلزله برای زمان مهم از ۵۵۱ رکورد و برای زمان یکنواخت از ۶۶۰ رکورد استفاده شده است خطا قابل چشم پوشی است. این بدان معنی است که تنها از ۳ درصد رکوردها در زمان یکنواخت استفاده شده است. همچنین برای داشتن یک حالت کلی می توان گفت که طیف حاصل از موج A۲ برای هر دو روش کارآمد است. زیرا خطای آن در هر دو حالت کمتر از ۵ درصد است.

۱۰- بررسی روش برای سازه دویعدی ۳ طبقه با سیستم قاب خمشی

در این قسمت به تحلیل یک سازه دویعدی ۳ طبقه با سیستم قاب خمشی، با استفاده از نرم افزار SAP پرداخته می شود. ارتفاع طبقات

جدول ۵. پاسخ سازه مورد نظر در مدت زمان یکنواخت

Table 5. The response of the desired structure in a uniform time

درصد خطا	جابجایی cm	طیف مورد نظر
-	3/125	زلزله‌ی اصلی
0/00	3/125	زلزله‌ی اصلی در مدت زمان مهم
0/16	3/120	A1 در مدت زمان مهم
0/48	3/140	A2 در مدت زمان مهم
2/59	3/044	A3 در مدت زمان مهم
26/30	2/303	A4 در مدت زمان مهم
58/97	1/282	A5 در مدت زمان مهم

جدول ۶. پاسخ سازه مورد نظر در مدت زمان مهم

Table 6. Response of the desired structure in an important time

درصد خطا	جابجایی cm	طیف مورد نظر
-	1/539	زلزله‌ی اصلی
5/91	1/630	زلزله‌ی اصلی در مدت زمان مهم
3/83	1/598	A1 در مدت زمان مهم
2/33	1/575	A2 در مدت زمان مهم
2/85	1/495	A3 در مدت زمان مهم
15/20	1/305	A4 در مدت زمان مهم
29/82	1/080	A5 در مدت زمان مهم

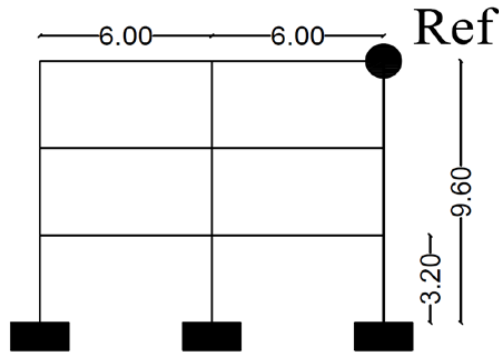
جدول ۷. پاسخ سازه مورد نظر در مدت زمان یکنواخت

Table 7. The response of the desired structure in a uniform time

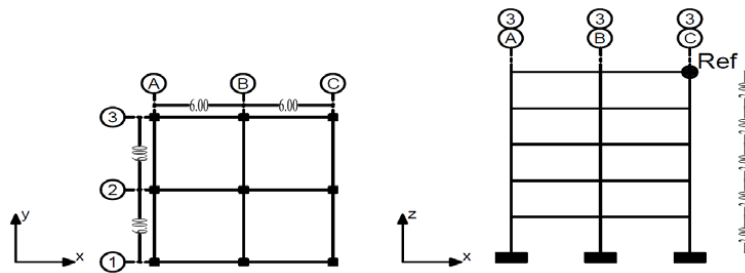
درصد خطا	جابجایی cm	طیف مورد نظر
-	1/539	زلزله‌ی اصلی
0/00	1/539	زلزله‌ی اصلی در مدت زمان مهم
0/06	1/538	A1 در مدت زمان مهم
0/00	1/539	A2 در مدت زمان مهم
2/53	1/500	A3 در مدت زمان مهم
18/90	1/248	A4 در مدت زمان مهم
41/71	0/897	A5 در مدت زمان مهم

جدول ۸. پاسخ سازه مورد نظر در مدت زمان مهم

درصد خطا	جابجایی cm	طیف مورد نظر
-	5/050	زلزله‌ی اصلی
5/52	5/329	زلزله‌ی اصلی در مدت زمان مهم
6/63	5/385	A1 در مدت زمان مهم
10/17	5/564	A2 در مدت زمان مهم
22/11	6/167	A3 در مدت زمان مهم
39/42	7/041	A4 در مدت زمان مهم
130/69	11/65	A5 در مدت زمان مهم



شکل ۱۱. ساختمان دوبعدی ۲ طبقه با سیستم قاب خمشی
Fig. 11. 2-storey building with flexural frame system



شکل ۱۲. قاب سه بعدی ۵ طبقه با سیستم قاب خمشی
Fig. 12. 5-story 3D frame with bending frame system

جدول ۹. پاسخ سازه مورد نظر در مدت زمان یکنواخت

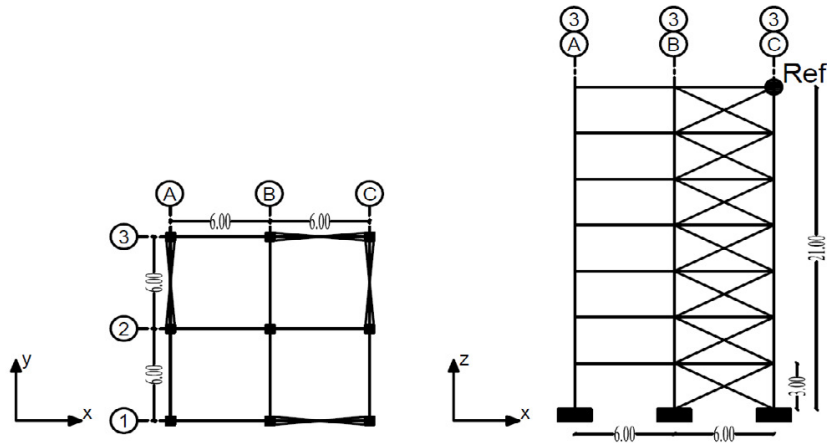
Table 9. The response of the desired structure in a uniform time

درصد خطا	جابجایی cm	طیف مورد نظر
-	5/050	زلزله‌ی اصلی
0/03	5/052	زلزله‌ی اصلی در مدت زمان مهم
0/13	5/057	در مدت زمان مهم A1
3/18	5/211	در مدت زمان مهم A2
11/60	5/636	در مدت زمان مهم A3
27/44	6/436	در مدت زمان مهم A4
144/67	12/356	در مدت زمان مهم A5

جدول ۱۰. پاسخ سازه مورد نظر در مدت زمان مهم

Table 10. Response of the desired structure in an important time

درصد خطا	جابجایی cm	طیف مورد نظر
-	2/860	زلزله‌ی اصلی
1/67	2/812	زلزله‌ی اصلی در مدت زمان مهم
1/57	2/851	در مدت زمان مهم A1
2/90	2/943	در مدت زمان مهم A2
11/22	3/181	در مدت زمان مهم A3
23/91	3/544	در مدت زمان مهم A4
108/04	5/950	در مدت زمان مهم A5



شکل ۱۳. قاب سه بعدی ۵ طبقه با سیستم قاب خمشی و مهاربند همگرا
Fig. 13. 5-story 3D frame with convergent bending frame and bracing system

در جدول ۹ پاسخ نقطه ی مرجع تحت طیف های مختلف برای مدت زمان یکنواخت نشان داده شده است.

با توجه به نتایج جداول ۸ و ۹ مشاهده می شود که بهترین موج را می توان موج A^2 نامید. زیرا خطای آن در مدت زمان مهم و یکنواخت به ترتیب ۱۰ و ۳ درصد است. که برای رسم منحنی طیف این زلزله برای زمان مهم از ۵۵۱ و برای زمان یکنواخت از ۱۳۲۰ رکورد استفاده شده است. این بدان معنی است که تنها از ۷ درصد رکوردها رکوردها در زمان یکنواخت استفاده شده است و خطایی قابل چشم پوشی حاصل شده است. از طرف دیگر همانطور که مشاهده می شود استفاده از موج A^2 و A^3 در مدت زمان مهم نیز به ترتیب دارای خطای ۱۷/۱۰ و ۲۲ درصد است که این خطا قابل چشم پوشی نمی باشد. با در نظر گرفتن طیف موج A^2 به عنوان موج مبنا به جای طیف موج اصلی بهتر است برای خطای کمتر از طیف این موج در مدت زمان یکنواخت استفاده شود. به طور کلی می توان گفت که طیف حاصل شده از مدت زمان مهم در این سازه کارآمد نمی باشد و تنها طیف حاصل از موج ها در مدت زمان یکنواخت کارآمد است و می توان از طیف A^2 به جای طیف زلزله ی اصلی استفاده کرد.

۱۲- مثال قاب سه بعدی ۷ طبقه با سیستم قاب خمشی و مهاربند همگرا

در این مثال برای تحلیل سازه مطابق مثال قبل از طیف زلزله اصلی، زلزله ی اصلی در مدت زمان مهم و یکنواخت و موج تقریبات در مدت زمان مهم و یکنواخت استفاده شده است. در این مثال یک

با توجه به نتایج جداول ۶ و ۷ مشاهده می شود که بهترین موج برای هر دو حالتی که از مدت زمان مهم و از مدت زمان یکنواخت استفاده شود، طیف حاصل از موج A^3 است. با توجه به این که برای رسم منحنی طیف این زلزله در صورتی که از موج A^3 استفاده شود، برای زمان مهم از ۲۷۸ و برای زمان یکنواخت از ۶۶۰ رکورد استفاده شده است، خطا قابل چشم پوشی است. این بدان معنی است که تنها از ۳ درصد رکوردها در زمان یکنواخت استفاده شده است.

۱۱- مثال قاب سه بعدی ۵ طبقه با سیستم قاب خمشی

در این مثال برای تحلیل سازه مطابق مثال قبل از طیف زلزله اصلی، زلزله ی اصلی در مدت زمان مهم و یکنواخت و موج تقریبات در مدت زمان مهم و یکنواخت استفاده شده است. در این مثال یک قاب فولادی ۳ بعدی، ۵ طبقه (مطابق شکل ۱۲) و اتصالات خمشی و سقف صلب به ضخامت ۲۵ سانتی متر با استفاده از نرم افزار SAP تحلیل شده است. ارتفاع همه طبقات ۳ متر و طول همه دهانه ها ۶ متر است. مقاطع ستون ها $IPE550$ و مقاطع تیرها $IPE270$ است. در این مثال وزن مخصوص، مدول الاستیسیته و تنش جاری شدن فولاد به ترتیب $7850 Kg/m^3$ ، $2.1 \times 10^{10} Kg/m^2$ و $3500 Kg/cm^2$ است. همچنین وزن مخصوص، مدول الاستیسیته و مقاومت ۲۸ روزه ی بتن به ترتیب $2400 Kg/m^3$ ، $2.53 \times 10^9 Kg/m^2$ و $28 MPa$ است. توجه شود که طیف شتاب زلزله ی مورد نظر در جهت X وارد شده است.

در جدول ۸ پاسخ نقطه ی مرجع تحت طیف های مختلف در مدت زمان مهم نشان داده شده است.

جدول ۱۱. پاسخ سازه مورد نظر در مدت زمان یکنواخت
Table 11. The response of the desired structure in a uniform time

طیف مورد نظر	جابجایی cm	درصد خطا
زلزله‌ی اصلی	2/860	-
زلزله‌ی اصلی در مدت زمان مهم	2/862	0/06
A1 در مدت زمان مهم	2/872	0/41
A2 در مدت زمان مهم	2/959	3/46
A3 در مدت زمان مهم	3/168	10/76
A4 در مدت زمان مهم	3/525	23/25
A5 در مدت زمان مهم	6/173	115/83

از ادغام دو مفهوم تبدیل موجکی گسسته و زمان جنبش نیرومند زمین پرداخته شد. در این راستا ابتدا زلزله‌ی سرپل ذهاب با استفاده از روش بانگذر با محدوده فرکانسی صفر تا ۳۰ هرترز اصلاح گردید. پس از آن موج شتاب نگاشت اصلاح شده با استفاده از تبدیل موجکی گسسته تا ۵ مرحله فیلتر شد. در هر مرحله از فیلتر دو موج تقریبات و جزئیات حاصل می شود که برای کاهش محاسبات در این تحقیق از موج تقریبات به دلیل نزدیک بودن محتوای فرکانسی آن به زلزله‌ی اصلی استفاده شده است. به همین دلیل در هر مرحله از فیلتر تعداد رکوردهای مرحله‌ی قبل به نصف کاهش می یابد. پس در نتیجه همانطور که گفته شد تعداد رکوردهای استفاده شده در زلزله‌ی اصلی و فیلترهای موجکی A^۱ تا A^۵ به ترتیب ۱۹۸۹۰، ۹۹۴۵، ۴۹۷۲، ۲۴۸۶، ۱۲۴۳ و ۶۲۲ می باشد. برای همگرا شدن طیف حاصل از هر یک از موج ها از تکنیک هم پایه کردن استفاده می شود. برای این منظور مقادیر منحنی موج تقریبی با ضرب کردن در شتاب حداکثر زلزله اصلی به مقدار شتاب حداکثر موجود در موج تقریبی به دست آمده، هم پایه می گردد. با این کار شتاب بیشینه همه‌ی موج های تقریبات برابر با شتاب بیشینه‌ی زلزله‌ی اصلی می شود. پس از آن از روش های مختلف زمان جنبش نیرومند زمین به دست می آید. همانطور که گفته شد در این زلزله زمان جنبش نیرومند زمین در روش مهم و مؤثر باهم برابر شد و همچنین زمان جنبش نیرومند زمین در روش انتخابی و یکنواخت نیز باهم برابر شد. پس نتیجه گرفته می شود که برای انجام محاسبات بعدی از یکی از

قاب فولادی ۳ بعدی، ۷ طبقه (مطابق شکل ۱۳) و اتصالات خمشی و سقف صلب به ضخامت ۲۵ سانتی متر با استفاده از نرم افزار SAP تحلیل شده است. ارتفاع همه طبقات ۳ متر و طول همه دهانه ها ۶ متر است. مقاطع ستون ها ۵۵۱×H۴۰۰، مقاطع تیرها IPE۳۰۰ و مقاطع مهاربندها UNP۳۰۰ است. در این مثال وزن مخصوص، مدول الاستیسیته و تنش جاری شدن فولاد به ترتیب $7850 \text{ Kg} / \text{m}^3$ ، $2.1 \times 10^{10} \text{ Kg} / \text{m}^2$ و $3500 \text{ Kg} / \text{cm}^2$ است. همچنین وزن مخصوص، مدول الاستیسیته و مقاومت ۲۸ روزه‌ی بتن به ترتیب $2400 \text{ Kg} / \text{m}^3$ ، $2.53 \times 10^9 \text{ Kg} / \text{m}^2$ و 28 MPa است. توجه شود که طیف شتاب زلزله‌ی مورد نظر در جهت X وارد شده است.

در جدول ۱۰ پاسخ نقطه‌ی مر---جع تحت طیف های مختلف در مدت زمان مهم نشان داده شده است. در جدول ۱۱ پاسخ نقطه‌ی مرجع تحت طیف های مختلف برای مدت زمان یکنواخت نشان داده شده است. با توجه به نتایج جداول ۱۰ و ۱۱ مشاهده می شود که بهترین موج را می توان موج A^۲ نامید. زیرا خطای آن در مدت زمان مهم و یکنواخت به ترتیب ۲/۹۰ و ۳/۴۶ درصد است. که برای رسم منحنی طیف این زلزله برای زمان مهم از ۵۵۱ و برای زمان یکنواخت از ۱۳۲۰ رکورد استفاده شده است. این بدان معنی است که تنها از ۷ درصد رکوردها رکوردها در زمان یکنواخت استفاده شده است و خطایی قابل چشم پوشی حاصل شده است.

۱۳- نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی طیف پاسخ زلزله‌ی سرپل ذهاب با استفاده

۴- با توجه به تحلیل سازه های دوبعدی می توان دریافت که طیف موج A^2 در مدت زمان مهم و یکنواخت با خطایی کمتر از ۴/۵ درصد در حالی که در هر دو حالت تعداد رکوردهای زلزله را به اندازه ی بیش از ۹۳ درصد کاهش می دهد بهترین موج است.

۵- با توجه به تحلیل سازه های سه بعدی می توان دریافت که طیف موج A^2 در مدت زمان یکنواخت با خطایی کمتر از ۳/۵ درصد در حالی که تعداد رکوردهای زلزله را به اندازه ی بیش از ۹۳ درصد کاهش می دهد بهترین موج است.

۶- با توجه به نتایج درون این مقاله و نتایج تحقیقات گذشته (مراجع ۷ تا ۱۷) در مورد تقلیل رکوردهای زلزله می توان دریافت که موج A^2 موجی قابل اعتماد به عنوان جایگزین موج اصلی زلزله در جهت کاهش محاسبات است. دلیل این امر این است که محتوای فرکانسی موج تا دو مرحله از فیلتر تغییر چندان نسبت به زلزله ی اصلی تغییر نمی کند. همچنین با توجه به تحلیل طیفی سازه های ۲بعدی و ۳بعدی می توان دریافت موج A^2 در زمان یکنواخت از اطمینان بیشتری برخوردار است. پس موج A^2 در مدت زمان یکنواخت با استفاده از تنها ۶ درصد رکوردها بهترین موج است.

۹- مراجع

- [1] A.K. Gupta, Response spectrum method in seismic analysis and design of structures, Routledge, 2017.
- [2] F. Yu, F. Zhou, L. Ye, Dynamic performance analysis of a seismically isolated bridge under braking force, Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 11(1) (2012) 35-42.
- [3] M. Krawczuk, M. Palacz, W. Ostachowicz, The dynamic analysis of a cracked Timoshenko beam by the spectral element method, Journal of Sound and Vibration, 264(5) (2003) 1139-1153.
- [4] J.J. Bommer, A. Martinez-Pereira, The effective duration of earthquake strong motion, Journal of earthquake engineering, 3(02) (1999) 127-172.
- [5] D. Vamvatsikos, C. Allin Cornell, Direct estimation of the seismic demand and capacity of oscillators with multi-linear static pushovers through IDA, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 35(9) (2006) 1097-1117
- [6] J. Morlet, Sampling theory and wave propagation: 51st

آن ها استفاده شود که در این مقاله از زمان مهم و یکنواخت برای به بدست آوردن طیف استفاده شده است. پس در این راستا باید با استفاده از مفاهیم مدت زمان مهم و یکنواخت طیف آن قسمت از موج که مربوط به حرکت قوی زمین است رسم شود. پس همانطور که گفته شد با استفاده از این تکنیک محاسبات مربوط به رسم طیف در دو مرحله تقلیل داده می شوند که این دو مرحله شامل تقلیل رکوردها به نصف در هر مرحله از تبدیل موجکی و تقلیل رکوردها از کل زمان شتاب نگاشت به زمان جنبش نیرومند زمین می شود. با رسم طیف موج های مختلف مشاهده شد که در هر دو زمان، طیف پاسخ از فیلتر موجکی A^3 به بعد به سمت واگرایی میل کرد. که از آن می توان نتیجه گرفت که تنها طیف پاسخ حاصل از سه مرحله فیلتر موجکی کاربردی است. پس از آن به بررسی کارایی تکنیک ارائه شده در تحلیل سازه ها پرداخته شد. با بررسی انجام شده از تحلیل سازه های دوبعدی می توان نتیجه گرفت که بهترین طیف جایگزین زلزله ی اصلی طیف A^2 می باشد. که در هر دو زمان مهم و یکنواخت کارآمد است. همچنین با بررسی تحلیل سازه های سه بعدی می توان نتیجه گرفت که در این سازه نیز بهترین طیف جایگزین زلزله ی اصلی طیف A^2 می باشد. پس اگر به جای استفاده از طیف زلزله ی اصلی از طیف موج A^2 در زمان یکنواخت استفاده شود تعداد رکورد مورد استفاده از ۱۹۸۹۰ به ۱۳۲۰ کاهش یافته است. این در صورتی است که خطا تنها ۳ درصد است. از این مطلب نتیجه می شود که تکنیک ارائه شده تکنیکی کاربردی در تحلیل سازه ها در جهت بهینه سازی محاسبات در یافتن طیف پاسخ زلزله ی مورد نظر است. به صورت اجمالی می توان نتایج زیر را از این مقاله گرفت:

- ۱- موج های مربوط به فیلتر ها موجکی، زمان شروع جنبش نیرومند زمین را در همه ی حالات با خطایی نزدیک به ۰/۵ درصد بیان می کند.
- ۲- موج های مربوط به فیلتر های موجکی زمان پایان جنبش نیرومند زمین را در بدترین حالت که مربوط به موج A^5 است در مدت زمان مهم و یکنواخت به ترتیب با خطای نزدیک به ۴ و ۱۷ درصد بیان می کند که نشان دهنده ی ناکارآمدی این موج در تخمین مدت زمان یکنواخت است.
- ۳- با توجه به شکل ۷ که در آن طیف موج ها در مدت زمان مهم و یکنواخت نشان شده است می توان دریافت که نتایج در طیف موج A^5 واگرا شده است و انطباق با طیف موج اصلی زلزله ندارد.

- [17] A. Heidari, J. Raeisi, Optimum Design of Structures Against earthquake by Simulated Annealing Using Wavelet Transform, *Soft Computing in Civil Engineering*, (2018) 23-33.
- [18] R. Varghese, A. Boominathan, S. Banerjee, Numerical Analysis of Seismic Response of a Piled Raft Foundation System, in: *Soil Dynamics and Earthquake Geotechnical Engineering*, Springer, 2019, pp. 227-235.
- [19] J.S. Owen, A power spectral approach to the analysis of the dynamic response of cable stayed bridges to spatially varying excitation, University of Bristol, 1994.
- [20] M. Misiti, Y. Misiti, G. Oppenheim, J.-M. Poggi, Wavelet toolbox, *Matlab User's Guide*, 64 (1997).
- [21] O. Rioul, P. Duhamel, Fast algorithms for discrete and continuous wavelet transforms, *IEEE transactions on information theory*, 38(2) (1992) 569-586.
- [22] G. Strang, T. Nguyen, *Wavelets and filter banks*, SIAM, 1996.
- [23] S.G. Mallat, A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation, *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 11(7) (1989) 674-693..
- [24] G.W. Housner, Intensity of earthquake ground shaking near the causative fault, in: *Proc. of 3rd World Conference on Earthquake Engineering*, 1965, pp. 94-115.
- [25] B.A. Bolt, Duration of strong ground motion, in: *Proceedings of the 5th world conference on earthquake engineering*, 1973, pp. 1304-1313.
- [26] M.D. Trifunac, A.G. Brady, A study on the duration of strong earthquake ground motion, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 65(3) (1975) 581-626.
- [27] J.J. Bommer, A. Martinez-Pereira, The effective duration of earthquake strong motion, *Journal of earthquake engineering*, 3(02) (1999) 127-172
- [28] S.L. Kramer, *Geotechnical earthquake engineering*. In prentice-Hall international series in civil engineering and engineering mechanics, Prentice-Hall, New Jersey, (1996).
- Ann, *Internat. Mtg, Soc. of Expl. Geophys.*, Session S, 15 (1981).
- [7] E. Salajegheh, A. Heidari, Dynamic analysis of structures against earthquake by combined wavelet transform and fast Fourier transform, *AJCE*, 3(4)(2002) 75-87.
- [8] E. Salajegheh, A. Heidari, Time history dynamic analysis of structures using filter banks and wavelet transforms, *Computers & structures*, 83(1) (2005) 53-68.
- [9] E. Salajegheh, A. Heidari, Optimum design of structures against earthquake by adaptive genetic algorithm using wavelet networks, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 28(4) (2004) 277-285
- [10] E. Salajegheh, A. Heidari, Optimum design of structures against earthquake by wavelet neural network and filter banks, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 34(1) (2005) 67-82.
- [11] E. Salajegheh, A. Heidari, S. Saryazdi, Optimum design of structures against earthquake by discrete wavelet transform, *International journal for numerical methods in engineering*, 62(15) (2005) 2178-2192.
- [12] A. Heidari, E. Salajegheh, Time history analysis of structures for earthquake loading by wavelet networks, *Asian Journal of Structural Engineering*, 7 (2006) 155-168.
- [13] A. HEYDARI, E. Salajegheh, Approximate dynamic analysis of structures for earthquake loading using FWT, *Int J Eng. (I.R.I)* 20(1) (2007) 37-47.
- [14] A. Heidari, E. Salajegheh, Wavelet analysis for processing of earthquake records, *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*, 9(5) (2008) 513-524.
- [15] A. Heidari, Optimum design of structures for earthquake induced loading by genetic algorithm using wavelet transform, *ADVANCES IN APPLIED MATHEMATICS AND MECHANICS*, 2(1) (2010) 107-117.
- [16] A. Heidari, J. Raeisi, R. Kamgar, APPLICATION OF WAVELET THEORY IN DETERMINING OF STRONG GROUND MOTION PARAMETERS, *Int. J. Optim. Civil Eng*, 8(1) (2018) 103-115.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

N. Majidi, A. Heidari, *Spectral analysis of structures using wavelet theory and concept of time of strong ground motion*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(7) (2020) 1685-1704.

DOI: 10.22060/ceej.2019.15626.5973*



