



تحلیل پاسخ لرزه ای حوضه رسوبی قم با استفاده از روش اجزای طیفی در حوزه زمان و

فرکانس

شهرام مقامی*^۱، عبدالله سهرابی بیدار^۲، نیلوفر باباآدم^۳

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۱/۲۵ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۹/۲۲

چکیده

در دهه‌های گذشته، اهمیت ویژگی‌های زمین‌شناختی ساختگاه بر شدت و وسعت خرابی‌ها در بسیاری از رخدادهای لرزه‌ای آشکار گردیده است. چگونگی ارتباط این ویژگی‌ها با دامنه و محتوای فرکانسی جنبش‌ها، تحت عنوان پاسخ لرزه‌ای ساختگاه مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در پژوهش حاضر، پاسخ لرزه‌ای یک مقطع دو بعدی از رسوبات واقع در بخش شرقی ساختگاه رسوبی شهر قم مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور از مدلسازی عددی اجزای طیفی در حوزه زمان بهره گرفته شده و نتایج با اعمال تبدیل فوریه، در فضای فرکانس نیز بررسی و ارائه شده است. نتایج حوزه زمان نشان می‌دهد که بزرگترین دامنه جنبش‌ها، با فاکتور بزرگنمایی ۱۰، در بخش‌های جنوب شرقی محدوده شهری مشاهده می‌شود. همچنین دلیل اصلی افزایش مدت زمان جنبش‌ها در حوضه، امواج سطحی منشأ گرفته از لبه‌های حوضه می‌باشد. نتایج در حوزه فرکانس بیان می‌دارد که اساسی‌ترین محدوده‌ی فرکانس بزرگنمایی در حوضه، با بیشینه نسبت‌های بزرگنمایی در حدود ۲۰، از حدود فرکانس ۰/۸ هرتز برای بخش‌های جنوبی پروفیل مورد بررسی تا حدود ۲ هرتز برای بخش‌های شمالی تغییر می‌کند که این محدوده‌ی بزرگنمایی نیز با مشاهدات پیشین همخوانی دارد.

کلیدواژه‌ها: پاسخ لرزه‌ای، روش اجزای طیفی، مدلسازی عددی، اثر ساختگاه

^۱ زمین شناسی مهندسی، دانشگاه تهران

^۲ دانشیار، پردیس علوم، دانشکده زمین شناسی، دانشگاه تهران

^۳ دانشجوی دکترای زمین شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

بزرگای گشتاوری ۸/۱، در شهر مکزیکوسیتی با فاصله بیش از ۳۰۰ کیلومتر از کانون زمین‌لرزه، بیشینه شتابی تقریباً برابر با مقدار آن بر روی رخنمون سنگی واقع در کانون سطحی زلزله مشاهده شد. در نتیجه، سازه‌های ۸ تا ۱۶ طبقه به‌طورکلی آسیب‌دیده و تخریب شدند (Anderson et al., 1986). حوضه‌های رسوبی در بزرگنمایی امواج لرزه‌ای با پریود بلند نقش اساسی دارند. این مساله از آنجایی اهمیت قابل‌توجهی می‌یابد که سازه‌های بلندمرتبه را به‌شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین مدت‌زمان لرزش‌ها نیز در امواج پریود بلند در بسترهای آبرفتی به‌طور قابل‌توجهی بیش از زمان لرزش در فرکانس‌های بالاتر است.

به‌طورکلی، به دلیل پیچیدگی زیاد، معمولاً برای تحلیل‌های دینامیکی محیط‌های چندبعدی از جمله حوضه‌های رسوبی از روش‌های عددی کمک گرفته می‌شود. در بین روش‌های عددی به دلیل عدم شناخت کافی و نبود ابزار مناسب تحلیل، بیشتر آیین‌نامه‌ها و روش‌های برآورد خطر همچنان به تحلیل‌های یک‌بعدی بسنده نموده‌اند. در این روش‌ها امواج مهاجم را قائم و لایه‌های خاک را افقی فرض می‌کنند. گسترش فناوری و امکان انجام حجم وسیع محاسبات در زمان اندک، راه را برای انجام تحلیل‌های دقیق‌تر در محیط‌های چندبعدی هموار ساخته است.

روش‌های عددی مرسوم در تحلیل‌های دینامیکی عموماً شامل روش‌های حجمی مانند اجزای محدود و اجزای طیفی، روش‌های مرزی مانند اجزای مرزی و روش‌های مرکب هستند. در این میان مطالعات گسترده، کارایی روش اجزای طیفی در تحلیل محیط‌های پیچیده را مشخص ساخته است. پس از معرفی فرمول‌بندی اجزای طیفی با هدف تحلیل لرزه-ای محیط‌های ناهمگن پیچیده توسط کوماتیچ و ویلوت (Komatitsch and Vilotte, 1998) و نیز اعتبار سنجی (Komatitsch and Tromp, 2002) و به‌کارگیری آن برای تحلیل پاسخ لرزه‌ای حوضه رسوبی لس‌آنجلس، (Komatitsch et al., 2004) این روش در حل مسائل پاسخ لرزه‌ای مورد توجه بسیاری قرار گرفت. از جمله دلاوود و

پاسخ لرزه‌ای ساختگاه، ارتباط زمین‌شناسی سطحی با پارامتر-های موج لرزه‌ای، از جمله دامنه و محتوای فرکانسی موج دریافت شده در محل را بیان می‌کند. در دهه‌های اخیر، تجربیات به‌دست‌آمده از زلزله‌های بزرگ، تأثیر شرایط ساختگاه و توپوگرافی سطحی بر شدت، وسعت و توزیع مکانی خرابی سازه‌ها را آشکار ساخته است. مشاهده‌ی دامنه شدید جنبش در مناطق ناهموار نزدیک به قله‌ها یا کاهش خسارات ناشی از حرکت نیرومند زمین در دره‌ها، همچنین پاسخ لرزه‌ای متفاوت در ساختگاه‌هایی با لیتولوژی متفاوت، منجر به انجام رشته‌ای از پژوهش‌ها در رابطه با تأثیر ویژگی-های ساختگاه بر جنبش نیرومند زمین شده است. اولین مشاهدات اثرات ساختگاهی و تلاش‌ها برای شناسایی این اثرات به اوایل دهه ۳۰ میلادی و مطالعات سزاوا و ایشیموتو مربوط می‌شود. (Kawase and Aki, 1989) اگرچه تا مدت‌ها پس‌از آن نیز این تأثیرات چندان موردتوجه پژوهشگران قرار نگرفت. یکی از ساده‌ترین روش‌ها برای بیان اثرات ساختگاهی، رابطه نوع خاک و بزرگنمایی است که در اولین آیین‌نامه ساختمانی کشور ژاپن در سال ۱۹۵۰ از این روش برای بیان برخی اثرات ساختگاهی در خاک‌های شناخته‌شده، استفاده شد. اگرچه این روش امروزه نیز همچنان در برخی آیین‌نامه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، لیکن آکی (Aki, 1988)، نشان داد که فاکتور بزرگنمایی در ساختگاه‌های مختلف بسیار متنوع بوده و وابسته به مجموعه شرایط محلی است؛ و تنها بیان نوع خاک به‌هیچ‌عنوان نمی‌تواند مقادیری نزدیک به واقعیت را ارائه نماید.

از میان عوامل تأثیرگذار بر پاسخ لرزه‌ای، به دام افتادن امواج در حوضه‌های رسوبی پدیده‌ای بسیار حائز اهمیت است؛ چراکه مخصوصاً در مناطق فعال زمین‌شناسی، بیشتر شهرها به‌طور عمومی بر روی حوضه‌های رسوبی واقع شده‌اند. احتمالاً شناخته‌شده‌ترین نمونه از پاسخ ساختگاه روی حوضه رسوبی که خرابی قابل‌توجهی را همراه داشته، ساختگاه شهر مکزیکوسیتی است. در زلزله ۱۹۸۵ میچوکان مکزیک با

شهر قم به وقوع پیوسته است. همچنین توسعه ساخت و سازها در سال‌های اخیر، به‌خصوص در بخش‌های شرقی محدوده‌ی شهری لزوم ارزیابی اثرات ساختگاهی در این محدوده را بیش از پیش حائز اهمیت ساخته است. با این وجود تاکنون سازوکار پاسخ لرزه‌ای رسوبات در محدوده‌ی شهری قم با در نظر گرفتن ساختار چندبعدی و ناهمگنی رسوبات پیش‌تر مورد توجه قرار نگرفته است. ساختار زیرسطحی محدوده شهری قم، پیش‌تر توسط مقامی و همکاران (Maghami et al., 2021) مورد مطالعه قرار گرفته و ارائه شده است. بدین منظور با تکیه بر برداشت‌های ژئوفیزیکی و ژئوتکنیکی گسترده انجام شده در حوضه‌ی رسوبی و بر مبنای وارون سازی نسبت‌های طیفی بزرگنمایی خردلرزه، پس از مقایسه کارایی روش‌های مرسوم در وارون سازی (سهرابی بیدار و همکاران، ۱۳۹۹)، با تکیه بر الگوریتم هراک (Herak, 2008) ساختار سه‌بعدی و دو بعدی حوضه رسوبی را ارائه داده‌اند. در این مطالعه به کاهش عمق آبرفت در بخش‌های شرقی محدوده شهری و افزایش حضور رسوبات کم سرعت اشاره شده است. این مساله می‌تواند سبب بزرگنمایی قابل توجه در دامنه موج در صورت وقوع رخداد‌های لرزه‌ای شود. گزارش مطالعات لرزه‌خیزی انجام شده توسط پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله نیز، بیشترین مقادیر بزرگنمایی طیفی را مربوط به بخش‌های شرقی و جنوب شرقی محدوده‌ی شهری قم می‌داند (پژوهشگاه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، ۱۳۸۴). از این روی، تعیین مقادیر و محدوده‌ی فرکانس‌های اساسی بزرگنمایی در این بخش از محدوده‌ی شهری قم اهمیت بسیاری دارد.

در ادامه ابتدا محدوده مورد مطالعه معرفی شده، و سپس روش تحقیق مورد اشاره قرار گرفته است. پس از آن، الگوریتم عددی اعتبار سنجی شده و مراحل مدلسازی محدوده مطالعاتی بیان شده است. در ادامه پاسخ‌های لرزه‌ای در امتداد سطح حوضه مورد بحث و بررسی قرار گرفته و در نهایت نتیجه‌گیری مطالب آمده است.

همکاران از این الگوریتم برای تحلیل پاسخ لرزه‌ای حوضه رسوبی کاراکاس استفاده نمودند (Delavaud et al., 2006). لی و همکاران (Lee et al., 2009) نیز از روش اجزای طیفی برای بررسی اثرات توپوگرافی بر پاسخ لرزه‌ای در تایوان استفاده نمودند. پیلز و همکاران با استفاده از روش اجزای طیفی پاسخ لرزه‌ای حوضه رسوبی سانتیاگو در شیلی را مورد تحلیل قرار داده و شرایط پیچیده گسلش، توپوگرافی و زمین‌شناسی محلی را عامل اصلی شدت حرکات نیرومند زمین در این منطقه عنوان نمودند (Pilz et al., 2011). چلجوب و همکاران (Chaljub et al., 2015) در تحلیل پاسخ لرزه‌ای حوضه مقدونیه در یونان، به ارزیابی دقت و مقایسه نتایج حاصل از چند روش عددی از جمله روش اجزای طیفی پرداختند. لیو و همکاران (Liu et al., 2015)، شکل‌گیری امواج سطحی در یک حوضه رسوبی کشیده و باریک را با استفاده از روش اجزای طیفی مورد بررسی قرار دادند و به ارتباط ابعاد حوضه و طول موج غالب بزرگنمایی رسوبات اشاره نموده‌اند. دی گولیو و همکاران (Di Giulio et al., 2016) حوضه‌ای در ایتالیا را مورد بررسی قرار داده و با تکیه بر مطالعات خردلرزه و نیز تحلیل‌های عددی اجزای طیفی، به تأثیر حضور رسوبات مخروط افکنه‌ای در تغییرات قابل توجه و تنوع نسبت‌های طیفی موج پاسخ، علیرغم فواصل کم اشاره نمودند. همچنین خان و همکاران (Khan et al., 2019) با استفاده از مدلسازی عددی اجزای طیفی، چگونگی پاسخ لرزه‌ای عوارض توپوگرافی محلی در زلزله کشمیر ۲۰۰۵ را مورد مطالعه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که ۹۸ درصد نقاط با شدت خرابی‌های بالا، تحت تأثیر بزرگنمایی حاصل از توپوگرافی بوده‌اند.

هدف اصلی پژوهش حاضر، ارزیابی پاسخ لرزه‌ای حوضه رسوبی در محدوده‌ی شهری قم، واقع بر حوضه رسوبی قم مورد می‌باشد. از جمله دلایل اهمیت این موضوع، می‌توان به لرزه‌خیزی بالای محدوده‌ی شهری اشاره نمود. به‌گونه‌ای که در ۱۰۰ سال گذشته بیش از ۲۰۰ رخداد لرزه‌ای با بزرگای گشتاوری بیشتر از ۲ در فاصله کمتر از ۵۰ کیلومتری مرکز

۲. محدوده‌ی مورد مطالعه

محدوده‌ی مورد مطالعه در این پژوهش بخشی از حوضه رسوبی قم، واقع در شرق محدوده‌ی شهری قم را در بر می‌گیرد. شهر قم در ۱۲۰ کیلومتری جنوب تهران و در بخش شمالی زون ساختاری ایران مرکزی قرار دارد. این شهر مساحتی در حدود ۱۸۰ کیلومتری مربع را در بر گرفته است. شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی ساده‌شده ساختگاه شهر قم را نشان می‌دهد. حوضه رسوبی قم بخشی از زون ساختاری ایران مرکزی به حساب می‌آید. این زون اساساً از دشت‌ها و تپه‌های تقریباً موازی با روند شمال غرب جنوب شرقی زاگرس تشکیل شده است. از جمله عوارض ژئومورفولوژیکی می‌توان به ارتفاعات در بخش‌های جنوبی و غربی شهر اشاره نمود که با کاهش ارتفاع در جهت شمال و شرق به دشت‌های هموار و پست می‌رسند. رسوبات جوان بریده‌شده تحت تأثیر گسلش در کنار داده‌های لرزه‌ای ثبت‌شده، تأییدی بر فعال بودن این منطقه از نظر تکتونیکی و لرزه‌ای است. تأثیرات کوهزایی پاسادنین به اشکال مختلف در منطقه مشاهده می‌شود که بیانگر تأثیرات گسل‌های عمیق پی‌سنگی است. در منطقه مورد مطالعه تنها رخنمون‌های سنگی دوران سوم (ائوسن تا پلیوسن) و کواترنر دیده می‌شوند. قسمت اعظم منطقه، شامل محدوده شهری قم، به صورت دشت و بدون رخنمون سنگی است (کمالیان و همکاران ۱۳۸۶، n.d.). سازندهای رخنمون یافته در منطقه، به ترتیب قدیم به جدید، عبارت‌اند از: آذرآواری‌های ائوسن، سازند قرمز پائینی، سازند قم، سازند قرمز بالایی و سازند هزار دره.

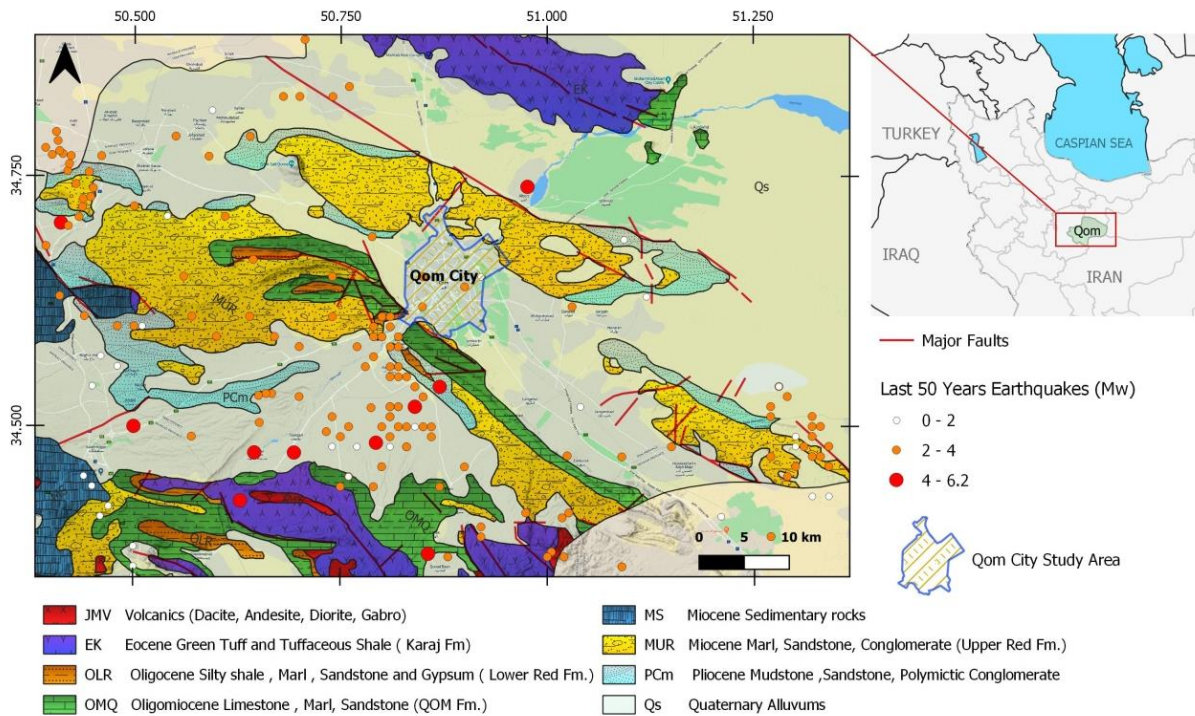
با توجه به نقشه‌ی گسل‌های فعال ایران چندین گسل فعال در شعاع کمتر از ۳۰ کیلومتری مرکز شهر قرار دارند. بررسی تاریخچه لرزه‌ای شهر قم، وقوع بیش از ۸۰ رخداد لرزه‌ای با بزرگای بیش از ۳ را بعد از سال ۲۰۰۰ میلادی نشان می‌دهد (شکل ۱) که در این میان، زمین‌لرزه ۲۰۰۷ با بزرگای ۵/۶ در ۱۵ کیلومتری جنوب قم بزرگ‌ترین رخداد ثبت‌شده است. همچنین زلزله‌های ۱۹۸۰ میلادی با بزرگای ۵/۸ و ۶/۲ نیز از رخدادهای لرزه‌ای حائز اهمیت در این پهنه به شمار می‌روند.

پیشینه لرزه‌خیزی، نشان‌دهنده‌ی وقوع چند رخداد تاریخی تأثیرگذار بر این منطقه است که لزوم بررسی رخدادهای لرزه‌ای حوزه دور را آشکار می‌سازد.

مطالعات تحلیل خطر زمین‌لرزه انجام شده در محدوده‌ی مورد مطالعه، خطر بالای لرزه‌ای در این شهر را نشان داده است (رمضی ۱۳۸۱). حداکثر شتاب افقی زمین برای پی‌سنگ، بدون در نظر گرفتن نوع خاک و بر مبنای شرایط تکتونیکی منطقه محاسبه شده و بیان شده است که لرزه‌خیزی شهر قم نه تنها می‌تواند ناشی از گسل‌های شناخته‌شده حذفاصل تهران و کاشان باشد، بلکه گسل‌های فعال یا دارای پتانسیل فعالیت در بستر خود شهر نیز می‌توانند عامل وقوع زمین‌لرزه‌های قابل توجه باشد. پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، مطالعات گسترده‌ای در زمینه ریز پهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای شهر قم، شامل لرزه‌زمین‌ساخت و لرزه‌خیزی سنگ کف، اثرات ساختگاهی و خطرات ژئوتکنیک لرزه‌ای انجام داده است (پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، ۱۳۸۴). نتایج حاصل از این مطالعات، اثرات ساختگاهی را در قالب سه محور شامل پیشینه شتاب سطح زمین، پتانسیل تشدید ساختگاه و مخاطرات ژئوتکنیک لرزه‌ای جمع‌بندی کرده است. پیشینه شتاب سطح زمین در صورت وقوع زلزله‌ای با دوره بازگشت ۴۷۵ سال، در محدوده ۰/۳ تا ۰/۶ شتاب گرانش گزارش شده است. در این گزارش، به طور خاص اشاره شده است که، اغلب مناطق شرقی و جنوب شرقی شهر، به اضافه محدوده‌هایی در مرکز شهر، در بازه پریودیک ۰/۴ تا ۰/۸ ثانیه پتانسیل تشدید دارند و منطقه جنوب شرقی شهر قم بیشترین پتانسیل تشدید را در این بازه پریودیک دارا است. همچنین بر اساس عدم تطابق پریودهای ارزیابی شده توسط داده‌های خردلرزه با پریودهای حاصل از تحلیل عمیق‌ترین لایه‌ها با حداکثر سرعت ۸۰۰ متر بر ثانیه، اشاره شده است که اگرچه این تحلیل‌ها برای سازه‌های با ارتفاع کم کافی به نظر می‌رسد، برای بررسی تأثیر پریود تشدید بر سازه‌های مرتفع، در نظر گرفتن رسوبات تحکیم

یافته عمیق با سرعت‌های بالا و قرار گرفته بر سنگ‌بستر لازم است که این مساله محور اصلی پژوهش حاضر است

Qom Province General Geology And Seismicity



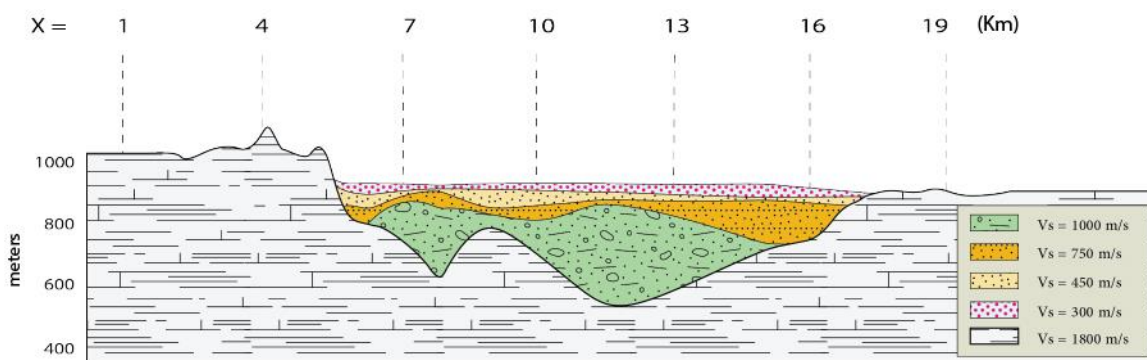
شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی ساده‌شده قم، برگرفته از نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰,۰۰۰ استان قم، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی

شرکت آب منطقه‌ای قم به‌منظور بررسی ویژگی‌های زمین‌شناسی و زمین‌ساختی، تفکیک مرز بین آب‌های شور و شیرین زیرزمینی، تفکیک و برآورد ضخامت لایه‌ها و تعیین موقعیت بی‌هنجاری‌ها در محدوده دشت قم، مطالعات ژئوفیزیکی گسترده‌ای را با استفاده از روش مقاومت سنجی الکتریکی (ژئوالکتریک) انجام داده است (سازمان آب منطقه‌ای قم، ۱۳۸۷). مقامی و همکاران (Maghami et al., 2021) بر اساس نتایج برداشت‌های پیشین انجام شده در محدوده‌ی شهری قم و با تکیه بر وارون سازی نسبت‌های طیفی خردلرزه، ساختار عمومی دو بعدی و سه‌بعدی حوضه رسوبی قم را مورد بررسی قرار داده و برای محدوده‌ی شرقی محدوده شهری قم، پروفیل سرعت موج برشی را مطابق شکل ۲ ارائه نموده‌اند. در این پژوهش به کاهش عمق کلی حوضه و افزایش حضور رسوبات کم سرعت در بخش‌های شرقی محدوده‌ی شهری اشاره شده است که این مساله می‌تواند

کمالیان و همکاران، در مطالعات ریز پهنه‌بندی لرزه‌ای شهر قم، به ناسازگاری موجود بین نتایج تجربی و عددی در مطالعات خردلرزه‌ها در ساختگاه قم اشاره نموده و اثر آبرفت‌های عمیق و یا اثرات شکل دوبعدی حوضه بر انتشار موج را به‌عنوان عوامل این ناسازگاری پیشنهاد نمودند (Kamalian et al., 2008). همچنین سهرابی بیدار و جاسم پور با بررسی مقدماتی این موضوع، به بررسی اثر آبرفت‌های عمیق بر پاسخ لرزه‌ای یک‌بعدی در شهر قم پرداخته‌اند (سهرابی بیدار و جاسم پور، ۱۳۹۲). در این بررسی شرایط زیرسطحی و ویژگی‌های آبرفت‌های عمیق با استفاده از مطالعات ژئوفیزیکی برداشت‌شده و در مدل‌سازی یک‌بعدی مورد استفاده قرار گرفته است. در این پژوهش به وجود یک بزرگنمایی شاخص ناشی از رسوبات عمیق در فرکانس‌های حدود یک هرتز اشاره شده است که با مدل‌سازی‌های عددی یک بعدی سازگاری ندارد.

بستر هوازده مارنی قابل مشاهده است. در قسمت‌های میانی این مقطع برآمدگی سنگ‌بستر شاخص است. با توجه به تأکید مطالعات پیشین بر ناسازگاری بزرگنمایی‌های طیفی با مدل-سازی‌های یک بعدی، لزوم انجام بررسی‌های چندبعدی پاسخ لرزه‌ای، که موضوع این پژوهش است بیش از پیش آشکار می‌شود.

سبب افزایش بزرگنمایی موج لرزه‌ای در این قسمت‌ها شود. بخش عمده بافت شهری در این بخش، شهرک‌های نوساز احداث شده یا در دست احداث شامل سازه‌های نسبتاً مرتفع را شامل می‌شود که می‌توانند به شدت متأثر از بخش‌های پایینی محدوده‌ی فرکانسی باشند. بخش جنوبی این پروفیل منتهی به کوه خضر بوده و در بخش شمالی آن رخنمون‌هایی از سنگ-



شکل ۲. مقطع دو بعدی ساختار لایه‌های تشکیل دهنده حوضه رسوب قم بر اساس سرعت موج برشی و توپوگرافی پیرامون در امتداد پروفیل شرقی محدوده شهری قم (Maghami et al., 2021)

مرزی، ویژگی‌های موج مهاجم، برخی پارامترهای عمومی از قبیل تعداد نقاط گوسی، مدت زمان کل تحلیل، تعریف خروجی‌های موردنظر و در نهایت ویژگی‌های مهندسی محیط (سرعت امواج طولی و برشی و دانسیته جرمی محیط) می‌شود که در ادامه به هریک از این موارد پرداخته خواهد شد. مختصات گره‌ها و المان‌ها بر اساس مدل اولیه ایجاد شده و مش بندی شده در نرم افزار آباکوس تعریف شده است. مرزهای پایینی و دیواره‌های مدل به صورت مرزهای جاذب در نظر گرفته شده (Stacey, 1988) و سطح زمین به صورت مرز آزاد تعریف شده است. موج مهاجم در این پژوهش از نوع موجک ریکر در نظر گرفته شده که به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود.

$$f(t) = [1 - 2 \cdot (\pi \cdot f_p \cdot (t - t_0))^2] e^{-\pi \cdot f_p \cdot (t - t_0)^2} \quad (1)$$

که در این رابطه، f_p بیانگر فرکانس غالب موج مهاجم و t_0 مقدار شیفت زمانی است. امواج مورد استفاده در تحلیل

۳. روش تحقیق

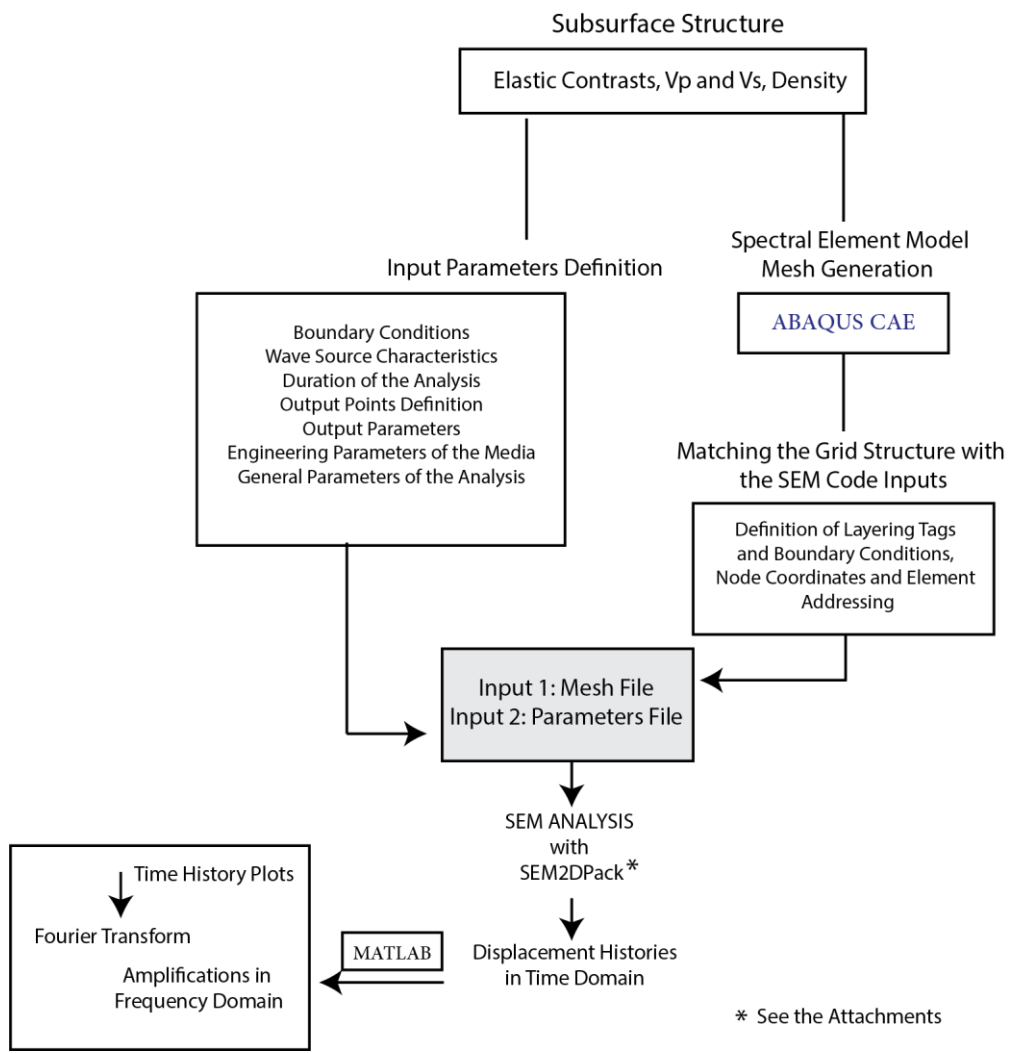
همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، هدف از پژوهش حاضر تحلیل پاسخ لرزه‌ای دو بعدی بخشی از حوضه رسوبی قم، واقع در بخش شرقی محدوده‌ی شهری بوده است. بدین منظور از مدل‌سازی عددی دو بعدی با استفاده از روش اجزای طیفی در حوزه زمان بهره گرفته شده و نتایج با اعمال تبدیل فوریه، در فضای فرکانس نیز بررسی و ارائه شده است. تحلیل عددی بر مبنای الگوریتم اجزای طیفی ارائه شده توسط آمپوئرو و همکاران (Ampuero, 2008)، تحت عنوان SEM2DPack انجام شده است. به طور کلی، فرآیند مدل‌سازی عددی، شامل سه بخش اصلی تهیه مدل اجزای طیفی، تعریف ورودی‌های مدل و تحلیل عددی می‌شود.

به منظور تهیه مدل اجزای طیفی، از نرم افزار آباکوس (Abaqus) بهره گرفته شده است. ورودی‌های کد اجزای طیفی، شامل مختصات گرهی، آدرس‌دهی المان‌ها، شرایط

$$CFL = dt \frac{Vs}{dx} \quad (۲)$$

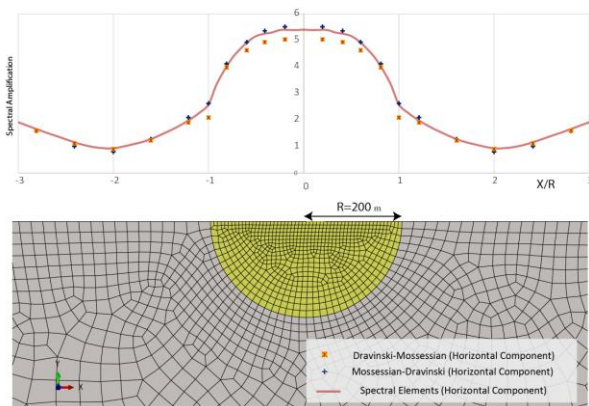
در این رابطه dt بیانگر طول گام زمانی، Vs سرعت موج برشی و dx فاصله نقاط گوسی بر روی المان است. تعداد نقاط گوسی به ازای هر بعد از المان برابر با ۶ نقطه در نظر گرفته شده است. مراحل کلی انجام تهیه ورودی‌ها و تحلیل عددی در شکل ۳ آمده است.

حوضه رسوبی قم از نوع امواج SH می‌باشند. این امواج به صورت جبهه موج قائم در گره‌های کف بلوک مورد مطالعه اعمال می‌شود. برای تعیین محدوده بهینه نسبت طول گام زمانی به ابعاد المان در کد عددی از پارامتر تجربی عدد کورانت (CFL) براساس رابطه ۲ استفاده می‌شود. مطالعات پیشین مقدار بهینه پارامتر عدد کورانت را برای الگوریتم اجزای طیفی مورد استفاده کوچک‌تر از ۰/۵ پیشنهاد نموده‌اند (Ampuero, 2008; Oral et al., 2017).



شکل ۳- فلوجارت تهیه ورودی‌های اولیه، مدل‌سازی عددی و تهیه خروجی‌ها.

و موسسین (Dravinski and Mossessian, 1987) برای محیط‌هایی با خاصیت غیر الاستیک ضعیف و توسط موسسین و دراوینسکی (Mossessian and Dravinski, 1987) برای محیط‌های کاملاً الاستیک، به صورت تحلیلی مورد مطالعه قرار گرفته است. در این تحلیل دانسیته و سرعت موج برشی نیم-فضا به ترتیب $2/4$ تن بر مترمکعب و 1600 متر بر ثانیه لحاظ شده است. شعاع دره‌ی مورد بررسی 200 متر و دانسیته و سرعت رسوبات به ترتیب دوسوم و نصف مقادیر نیم فضا در نظر گرفته شده است. نسبت پواسون هر دو محیط برابر با $0/33$ است. هندسه محیط مورد بررسی و مقایسه بزرگنمایی-هایی طیفی برای مولفه افقی حرکت در شکل ۴ آمده است. آشکار است که همبستگی کاملی بین نتایج ارائه شده در ادبیات فنی و مقادیر به دست آمده در پژوهش حاضر وجود دارد.



شکل ۴. مدل اجزای طیفی دره آبرفتی نیم دایره‌ای و مقایسه بزرگنمایی‌های طیفی در امتداد سطح با مقادیر ارائه شده در

ادبیات فنی (Dravinski and Mossessian, 1987; Mossessian and Dravinski, 1987).

b: تحلیل پاسخ لرزه‌ای حوضه رسوبی

ساختار رسوبات تشکیل‌دهنده‌ی حوضه رسوبی در بخش‌های شرقی محدوده‌ی شهری قم توسط (Maghami et al., 2021) ، بر اساس شکل ۲ ارائه شد. به طور عمومی، ۴ لایه رسوبی در ساختار ارائه شده قابل تفکیک است. این ۴ لایه رسوبات به ترتیب با افزایش عمق، سرعت‌های موج برشی 300 متر بر

پیش از تحلیل پاسخ لرزه‌ای حوضه رسوبی، با هدف ارزیابی کارایی و دقت الگوریتم اجزای طیفی، پاسخ لرزه‌ای یک دره نیم‌دایره‌ای آبرفتی، واقع شده بر روی یک نیم فضای همگن ارزیابی و پاسخ‌ها اعتبار سنجی شده است. ویژگی‌ها محیطی برای تحلیل مذکور در بخش بعدی آمده است. پس از اعتبار سنجی الگوریتم مورد استفاده، پاسخ لرزه‌ای یک پروفیل دو بعدی در امتداد حوضه رسوبی شهر قم مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. ویژگی‌های مربوط به این تحلیل نیز در بخش مربوطه اشاره خواهد شد. در تحلیل حوضه رسوبی، دو موج مهاجم با فرکانس‌های غالب برابر با 1 هرتز و 3 هرتز اعمال شده است. با استفاده از تبدیل فوریه، در حوزه فرکانس مشخص می‌شود که با در نظر گرفتن فرکانس‌هایی با دامنه‌ی حداقل 10 درصد دامنه موج در فرکانس غالب، فرکانس‌های معتبر در هر تحلیل از حدود یک‌دوم فرکانس غالب تا حداقل دو برابر آن را شامل می‌شود. لذا با ترکیب نتایج حاصل این دو تحلیل، نتایج حوزه‌ی فرکانس برای محدوده پیوسته‌ای از $0/5$ هرتز تا بیش از 6 هرتز در دسترس خواهد بود. این فرکانس‌ها محدوده‌ی حائز اهمیت در بیشتر مطالعات مهندسی را در بر گرفته و نیز با محتوای فرکانسی تأثیرگذار در بیشتر رخداد‌های لرزه‌ای سازگار است. نتایج به صورت دامنه موج دریافتی در سطح در حوزه زمان و بزرگنمایی طیفی در حوزه فرکانس آمده است.

۴. تحلیل پاسخ لرزه‌ای دو بعدی

a: اعتبار سنجی

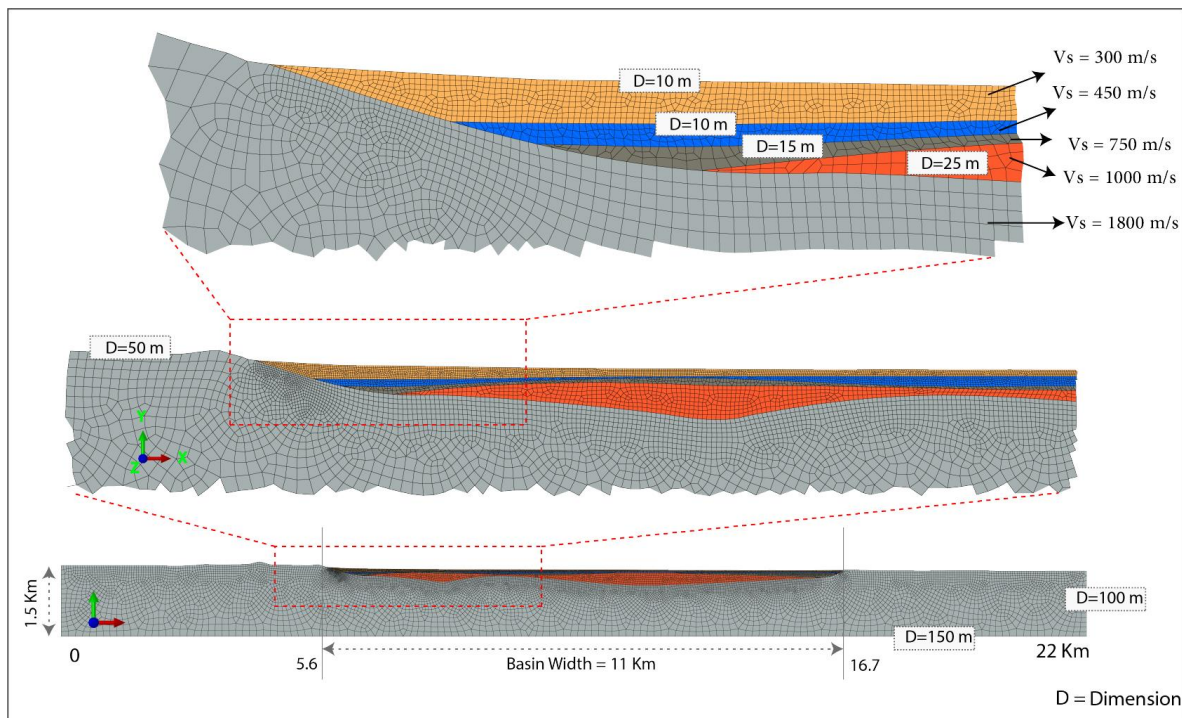
کارایی الگوریتم اجزای طیفی مورد استفاده، پیش‌تر در تحلیل لرزه‌ای حوضه‌های رسوبی و سایر محیط‌های پیچیده به اثبات رسیده است (Boaga et al., 2012; Majidinejad et al., 2017; Oral et al., 2019) ، با این حال به منظور اثبات دقت و توانایی الگوریتم مذکور، پاسخ‌های دریافت شده بر سطح یک دره آبرفتی واقع شده بر یک نیم‌فضا بررسی شده است. مساله مشابهی پیش‌تر به صورت بدون بعد توسط دراوینسکی

عمیق‌ترین لایه دارای سرعت موج برشی ۱۰۰۰ متر بر ثانیه ابعاد المان برابر با ۲۵ متر را دارا می‌باشد. برای سرعت موج برشی ۷۵۰ متر بر ثانیه ابعاد المان از ۲۵ متر در کف تا ۱۵ متر در سطح لایه به طور تدریجی تغییر می‌کند. در لایه با سرعت موج برشی ۴۵۰ متر بر ثانیه، از ۱۵ متر در کف به ۱۰ متر در سطح لایه می‌رسد و برای سطحی‌ترین لایه با سرعت موج برشی ۳۰۰ متر بر ثانیه، ابعاد المان برابر با ۱۰ متر تعریف شده است. ابعاد المان‌ها به گونه‌ای در نظر گرفته شده‌اند که در هر محیط حداقل ۲ المان یا بیشتر به ازای طول موج کمینه تعریف شده باشد. محیط با استفاده از المان‌های چهاروجهی (Quadrilateral) چهارگره‌ی (خطی) مش‌بندی شده است که در مجموع ۲۱۴۴۰ گره و ۲۰۶۸۷ المان را شامل می‌شود. شکل ۵، محیط المان‌بندی شده، ابعاد المان‌ها در هر بخش و محدوده‌ی حوضه رسوبی را نشان می‌دهد.

ثانیه، ۴۵۰ متر بر ثانیه، ۷۵۰ متر بر ثانیه و ۱۰۰۰ متر بر ثانیه دارند. سرعت موج برشی در سنگ بستر نیز ۱۸۰۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. این ساختار مبنای مدلسازی عددی قرار گرفته است. چگونگی تعریف محیط و مش‌بندی آن در ادامه خواهد آمد.

۴-۲-۱. تعریف مدل

مختصات مدل عددی در نرم افزار آباکوس وارد و برای هر لایه بلوک‌های مجزا تعریف شده است. لایه‌ها با یکدیگر ترکیب شده و پس از تعریف ابعاد مورد نظر برای المان‌های هر بخش، فرآیند مش‌بندی انجام شده است. ابعاد المان‌ها در محیط نیم‌فضا، معرف سنگ بستر و محیط پیرامون، از ۱۵۰ متر در کف مدل، تا ۱۰۰ متر برای دیواره‌ها، ۵۰ متر برای سطح میدان آزاد و ۲۵ متر برای محدوده‌ی حوضه رسوبی متغیر در نظر گرفته شده است. به بیان دیگر، به طور کلی از عمق به سطح ابعاد المان‌ها برای محیط سنگ بستر از ۱۵۰ متر تا ۲۵ متر به طور تدریجی کاهش می‌یابد. در محیط حوضه،



شکل ۵. مش‌بندی مدل اجزای طیفی حوضه‌ی رسوبی و محیط پیرامون

این پژوهش با استفاده از یک رایانه رومیزی (Desktop) با پردازنده Intel چهار هسته‌ای، با فرکانس پردازش ۲/۷ گیگاهرتز و ۱۲ گیگابایت فضای Ram در مدت ۳۵۳ دقیقه به انجام رسیده است.

a: نتایج تحلیل عددی

تاریخچه زمانی جابجایی‌ها در سطح، به عنوان خروجی تحلیل عددی در حوزه زمان به دست آمده و با اعمال تبدیل فوریه، بزرگنمایی‌های طیفی، به عنوان نتایج تحلیل در حوزه فرکانس نیز استخراج شده است. اعمال تبدیل فوریه با بهره‌گیری از کد نویسی در محیط متلب ۲۰۱۸ انجام شده است. نتایج این تحلیل‌ها در ادامه مورد اشاره قرار گرفته است.

۴-۳-۱. پاسخ لرزه‌ای در حوزه زمان

شکل ۶، پاسخ‌های حوزه‌ی زمان در امتداد سطح را برای دو فرکانس غالب موج مهاجم ۱ و ۳ هرتز نشان می‌دهد. پیش از هر چیز، تأثیر حوضه رسوبی در بزرگنمایی پاسخ‌ها در هر دو فرکانس غالب موج مهاجم قابل توجه است. همچنین آشکار است که اصلی‌ترین فازهای متأخر موج را امواج منشأ گرفته از دو لبه‌ی حوضه رسوبی تشکیل می‌دهند. این امواج که غالباً امواج سطحی هستند و می‌توانند فرکانس و سرعت‌های متفاوتی داشته باشند، بسیار متأثر از لایه‌های کم سرعت سطحی می‌باشند و تعیین‌کننده‌ی اصلی مدت زمان لرزش‌ها در حوضه رسوبی هستند.

در هر دو فرکانس غالب موج مهاجم، لبه جنوبی حوضه، در مجاورت ارتفاعات (کوه خضر) دامنه‌های بزرگ‌تری را نشان می‌دهد. دلیل این امر افزایش ضخامت دو لایه اول با سرعت‌های کمتر از ۴۵۰ متر بر ثانیه و نیز افزایش شیب حوضه است. افزایش بزرگنمایی‌ها در این پروفیل، مخصوصاً در قسمت‌های جنوبی که در واقع نمایان‌گر وضعیت در بخش‌های جنوب شرقی شهر است در توافق کامل با گزارش پژوهشگاه است که بیشترین پتانسیل تشدید در محدوده حوضه رسوبی را مربوط به بخش‌های جنوب شرقی می‌داند. در هر دو فرکانس، به هم رسیدن امواج منتشر شده از طرفین

۴-۲-۲. پارامترهای ورودی

پس از المان‌بندی محیط، مختصات گره‌ها و آدرس‌دهی المان‌ها استخراج شده و پس از اعمال تغییرات مورد نیاز، مطابق با ساختار قابل فهم توسط کد عددی بازآرایی شده است. همچنین سرعت امواج برشی و تراکمی و چگالی محیط برای هرلایه مورد نیاز است که پارامترهای مذکور بر اساس (Maghami et al., 2021) طبق جدول ۱ تعریف شده است.

رفتار مصالح در محیط، با فرض رخدادهای لرزه‌ای حوضه دور، خطی در نظر گرفته شده است. همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد، مرزهای پایینی و کناری به عنوان مرزهای جاذب تعریف شده و سطح زمین مرز آزاد در نظر گرفته شده است. تاریخچه زمانی جابجایی‌ها در امتداد سطح، به عنوان خروجی مورد نظر تعریف شده است.

جدول ۱. پارامترهای در نظر گرفته شده برای لایه‌بندی در کد

عددی اجزای طیفی			
Density (gr/cm ³)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Parameter
1.6	600	300	1 st layer (ground surface)
1.8	900	450	2 nd layer
2	1500	750	3 rd layer
2.2	2000	1000	4 th layer
2.4	3600	1800	Half space (bed rock)

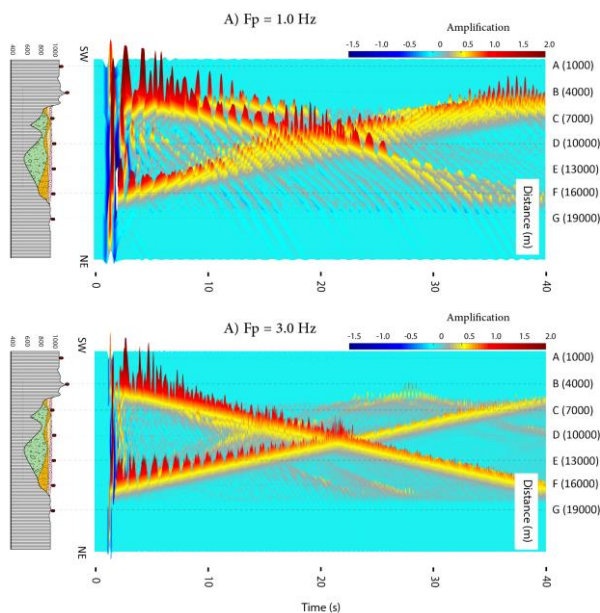
۴-۲-۳. تحلیل عددی

تحلیل عددی بر مبنای روش اجزای طیفی و با استفاده از کد عددی SEM2DPack تحت خط فرمان سیستم عامل Linux انجام شده است. لازم به ذکر است که به دلیل برخی ابهامات احتمالی در راه اندازی و استفاده از کد SEM2DPack، جزئیات فنی آن در ضمیمه آمده است. برای تحلیل عددی ۴۰ ثانیه از گسترش موج لرزه‌ای ۴۵۶۷۷۳ گام زمانی به طول $10^{-5} \times 8/75$ ثانیه مدلسازی شده است. کد عددی مذکور توانایی اجرا بدون نیاز به منابع سخت‌افزاری سنگین را دارا می‌باشد. به گونه‌ای که تحلیل عددی محیط مورد بررسی در

در فرکانس غالب ۱ هرتز، دامنه پاسخها حدود ۵ برابر موج مهاجم یا ۲/۵ برابر پاسخ میدان آزاد است. از سوی دیگر پاسخها در فرکانس غالب ۳ هرتز، اساساً چشمگیرتر بوده و دامنه آنها به بیش از ۲ برابر پاسخهای پیشین و ۱۰ برابر بیشینه دامنه موج مهاجم می‌رسد. در شکل ۷، برای نقطه C تداخل امواج حاصل از گوشه‌ها با پیک اصلی موج سبب جنبش پیوسته‌ای در حدود ۱۲ ثانیه می‌شود. به طور کلی پاسخها در این بخش از پروفیل از نظر دامنه موج دریافت شده و مدت زمان لرزشها کاملاً چشمگیر می‌باشند. به عنوان مثال نقطه C در مجاورت لبه جنوبی حوضه، در مقایسه با نقطه F در مجاورت لبه شمالی حوضه، برای فرکانس غالب موج مهاجم ۱ هرتز، جنبش بسیار چشمگیرتری را نشان می‌دهد. در نقطه F امواج حاصل از گوشه، با پیک اصلی موج درهم‌آمیخته و جنبشی در حدود ۵ ثانیه را ایجاد می‌کند. در ادامه، امواج حاصل از لبه جنوبی حوضه که در حدود ثانیه ۳۲ تا ۴۰ با دامنه‌هایی اساساً میرا شده به این نقطه می‌رسد تنها جنبش‌های قابل توجه در این نقطه را تشکیل می‌دهد. در نقطه D نزدیک به میانه حوضه رسوبی، تأثیر امواج حاصل از دو لبه حوضه رسوبی را می‌توان مشاهده نمود که در ثانیه حدود ۱۵ تا ۲۵ به طور تقریباً هم‌زمان دریافت می‌شوند. این فازهای متأخر در نقطه E به خوبی تفکیک شده و با تأخیر بیشتری بین ثانیه‌های ۱۰ تا ۱۵ و ۲۵ تا ۳۰ با دامنه‌هایی در حدود ۰/۲ متر دریافت می‌شوند. شکل ۸، پاسخهای دریافت شده برای نقاط A تا G واقع بر سطح در فرکانس غالب موج مهاجم ۳ هرتز را نشان می‌دهد، دامنه‌هایی بیش از ۰/۱۰ متر قابل مشاهده است.

در نقطه C، موج ناشی از لبه جنوبی حوضه، نسبت به نقطه مشابه در فرکانس غالب ۱ هرتز، به‌خوبی پس از ثانیه پنجم قابل تفکیک است. مساله مشابهی در سایر نقاط نیز قابل تعقیب است. در نقطه D فازهای متأخر موج که در حدود ثانیه‌های ۱۵، ۱۷ و ۲۷ دریافت می‌شوند، بیشینه دامنه‌هایی تا ۰/۰۶ متر نشان می‌دهند.

حوضه در حدود ثانیه ۲۰، موجب تداخل سازنده امواج و تقویت دامنه‌ها می‌شود.

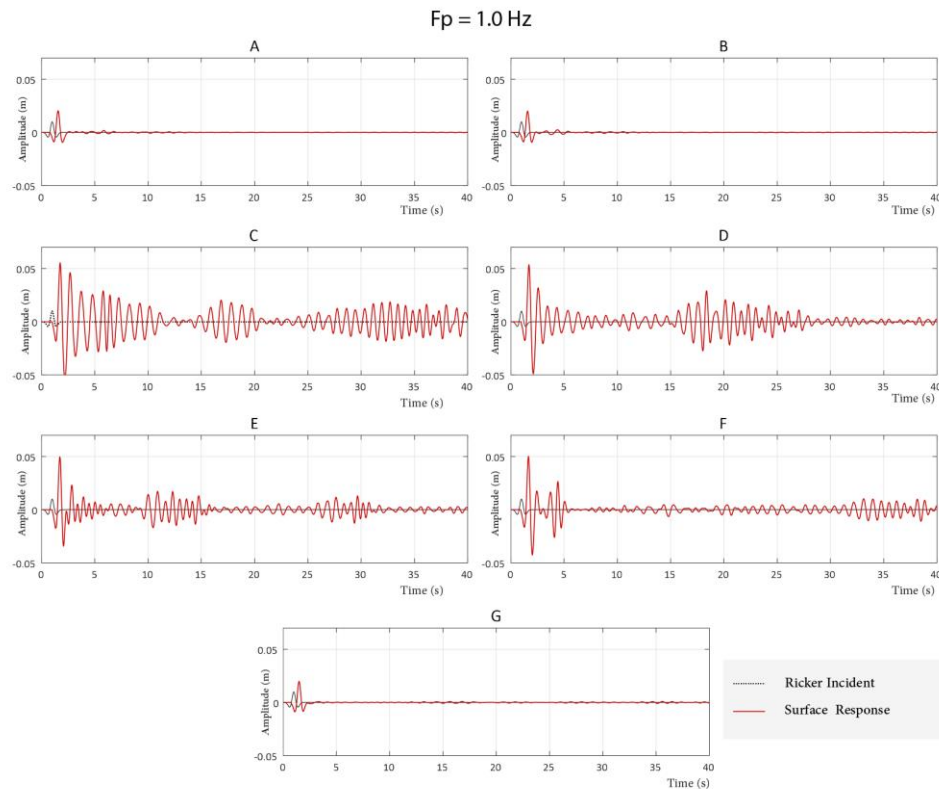


شکل ۶. دامنه‌ی جابجایی‌ها نسبت به میدان آزاد در امتداد سطح پروفیل مورد مطالعه.

به‌طورکلی با گذر زمان، انرژی امواج مستهلک‌شده و دامنه آنها رو به کاهش می‌گذارد. اگرچه، با وارد شدن موج به محیطی با سرعت یا چگالی پایین‌تر، دامنه‌ها می‌توانند تقویت شوند. به عنوان مثال، امواج حاصل از لبه شمالی حوضه، در فرکانس غالب موج مهاجم ۱ هرتز، پس از حدود ۳۵ ثانیه به لبه جنوبی رسیده و با افزایش ضخامت رسوبات سست، دامنه آنها افزایش می‌یابد. با این حال با رسیدن امواج منتشرشده از لبه جنوبی حوضه به قسمت‌های شمالی، پس از حدود ۳۰ ثانیه در فرکانس غالب ۱ هرتز، دامنه جنبشها کاهش می‌یابد. شکل‌های ۷ و ۸، پاسخهای دریافتی در ۷ نقطه A تا G واقع بر رسوبات به ترتیب برای دو فرکانس غالب ۱ و ۳ هرتز را نشان می‌دهد. آشکار است که نقاط واقع شده بر روی سنگ یعنی A، B و G برای هر دو فرکانس غالب، دامنه‌های برابر با پاسخ میدان آزاد یعنی دو برابر دامنه موج مهاجم نشان می‌دهند؛ اما دامنه امواج در نقاط واقع بر روی رسوبات به‌طور چشمگیری بزرگ‌تر است.

ناشی از لبه شمالی تقریباً بلافاصله بعد از پیک اصلی، با دامنه-ای در حدود ۰/۰۶۵ متر دریافت می‌شود. درحالی‌که پاسخ حاصل از لبه جنوبی حوضه در حدود ثانیه ۴۰ به این نقطه می‌رسد.

در نقطه E این امواج، حاصل از دو لبه حوضه، در حدود ثانیه ۱۵ و نیز بین ثانیه‌های ۲۵ تا ۳۰ با بیشینه دامنه‌ای در حدود ۰/۰۴ متر دریافت می‌شوند. در نقطه F، نزدیک به لبه شمال حوضه، همان‌طور که در شکل ۷ نیز مشخص است، موج



شکل ۷. نمودارهای جابجایی زمان برای ۷ نقطه در امتداد پروفیل مورد بررسی برای فرکانس غالب موج مهاجم ۱ هرتز در کنار موج مهاجم

۲-۳-۴. پاسخ لرزه‌ای در حوزه فرکانس

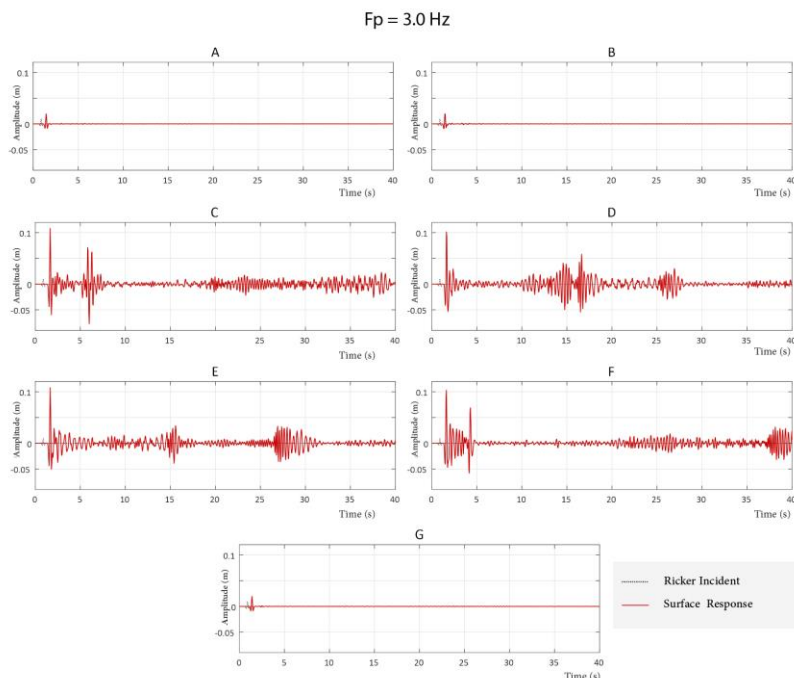
شکل ۹، نتایج تحلیل پاسخ لرزه‌ای پروفیل شرقی محدوده شهری قم را در حوزه فرکانس نشان می‌دهد. این شکل با ترکیب نتایج حاصل از تبدیل فوریه پاسخ‌های حوزه زمان برای دو فرکانس غالب موج مهاجم مورد بررسی در این پژوهش به دست آمده است. بیشترین فرکانس معنادار برای هر تحلیل، دو برابر فرکانس غالب موج مهاجم در نظر گرفته شده است.

اصلی‌ترین و اولین محدود بزرگنمایی در حوزه فرکانس در بخش‌های مختلف در امتداد سطح، در محدود ۰/۸ هرتز تا ۲

مشاهده دامنه‌های چشمگیر در پاسخ‌ها را می‌توان با حضور رسوبات کم سرعت با ضخامت قابل توجه نسبت به عمق کلی حوضه مرتبط دانست. مشخص است که امواج حاصل از گوشه‌ها تأثیر قابل توجهی در پاسخ کلی حوضه رسوبی دارند. این امواج توسط مدلسازی‌های یک‌بعدی قابل بیان نیستند و در نتیجه، مخصوصاً در گوشه‌های حوضه که تأثیر ساختار دو بعدی بسیار غالب می‌شود، ضروری است که از تکیه بر نتایج مدلسازی‌های یک بعدی اجتناب شود.

در شکل ۱۰، روند تغییرات بزرگنمایی نسبت به فرکانس، برای ۷ نقطه واقع بر سطح در امتداد پروفیل شرقی حوضه رسوبی قم آمده است. نقاط A، B و G واقع بر سنگ بزرگنمایی قابل توجهی را نشان نمی دهند. اگرچه وجود ارتفاعات جنوبی، همان طور که در نمودار حاصل از پاسخ نقطه B مشخص است، می تواند سبب افزایش نسبت بزرگنمایی در فرکانس های خاصی شود، این بزرگنمایی ها در مقایسه با تأثیرات حاصل از رسوبات قابل توجه نیستند. نسبت های بزرگنمایی در برخی فرکانس ها مقادیری بیش از ۲۰ (نسبت به موج مهاجم) می یابد که نشان دهنده تأثیر بسیار چشمگیر رسوبات کم سرعت سطحی در پاسخ های لرزه ای است. برای نقطه C، اصلی ترین پیک بزرگنمایی برای فرکانس های بین ۰/۶ تا ۰/۸ هرتز با نسبت های بزرگنمایی در حدود ۲۰ دیده می شود. در سایر فرکانس ها نیز نوسانی از نسبت های بزرگنمایی ها با مقادیری بین ۵ تا ۱۰ قابل مشاهده است.

هرتز متغیر است. اگرچه در فرکانس های بالاتر، تناوب پیچیده ای از محدوده های بزرگنمایی فرکانسی را می توان مشاهده نمود. حضور این فرکانس های بزرگنمایی ترکیبی از اثرات ساختار کلی حوضه و رسوبات سطحی است. به گونه ای که به دشواری می توان با اطمینان، عامل مستقیمی، از جمله عمق حوضه یا ضخامت لایه های سطحی را برای حضور یا عدم حضور یک محدوده فرکانس بزرگنمایی معرفی نمود. با این حال وجود رابطه بین کاهش عمق رسوبات و افزایش فرکانس بزرگنمایی در برخی بخش های حوضه قابل تعقیب است. به عنوان مثال در مختصات حدود ۸ کیلومتر، کاهش ضخامت رسوبات سطحی سبب ایجاد یک محدوده بزرگنمایی در حدود ۱/۵ هرتز شده یا در مختصات حدود ۱۰ کیلومتر، برآمدگی سنگ بستر، سبب افزایش محدوده بزرگنمایی تا حدود ۲ هرتز می شود. همان طور که در تحلیل های حوزه زمان اشاره شد، در بخش های جنوبی پروفیل (جنوب شرق شهر قم) بیشترین پتانسیل بزرگنمایی در فرکانس های کمتر یا حدود ۱ هرتز (پریودهای بالاتر از ۱ ثانیه) مشاهده می شود.



شکل ۷. نمودارهای جابجایی زمان برای ۷ نقطه در امتداد پروفیل مورد بررسی برای فرکانس غالب موج مهاجم ۳ هرتز در کنار موج مهاجم

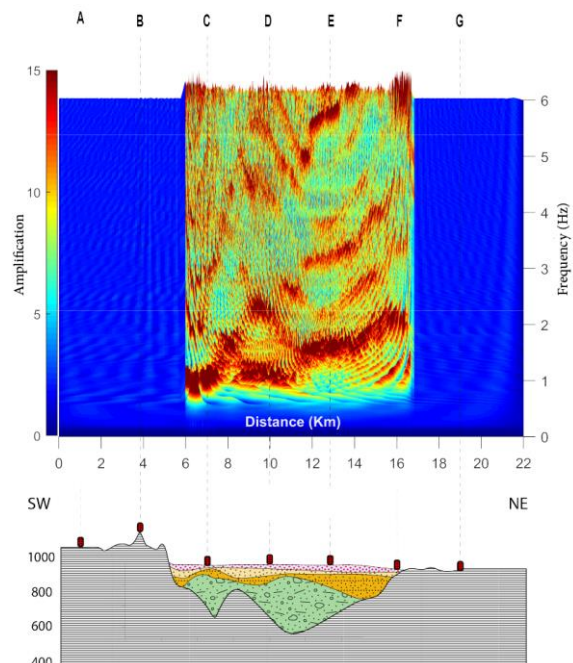
دامنه‌های موج پاسخ در مقطع مورد بررسی برای موج مهاجم با فرکانس غالب ۳ هرتز، به حدود ۱۰ برابر دامنه موج مهاجم می‌رسد. اصلی‌ترین عامل مشاهده این مقادیر بزرگنمایی، حضور رسوبات کم سرعت سطحی است. مشخصاً با در نظر گرفتن لایه‌بندی معادل رسوبات، مقادیر بزرگنمایی طیفی کمتری قابل انتظار است. به عنوان مثال تحلیل‌های پاسخ لرزه-ای حوضه رسوبی کاراکاس در ونزوئلا (Delavaud et al., 2006) بیشینه نسبت‌های بزرگنمایی را در حدود ۶ برای محدوده فرکانسی ۱/۵ هرتز در بخش‌های مرکزی حوضه با عمق بیش از ۳۵۰ متر نشان می‌دهد. در این تحلیل‌ها ساختار سه‌بعدی رسوبات با سرعت معادل ۸۵۰ متر بر ثانیه برای کل ساختار رسوبات در نظر گرفته شده است که بیانگر رسوبات کاملاً تحکیم یافته بوده است. مطالعات انجام شده در حوضه رسوبی تسالونیک در یونان (Makra et al., 2005) نیز بیشینه مقادیر بزرگنمایی طیفی را برای ساختاری از رسوبات با بیشینه عمق حدود ۲۵۰ متر در محدوده فرکانس‌های کمتر از ۱ هرتز و در حدود ۱۰ برآورد می‌نماید. لازم به ذکر است در مطالعه انجام شده در این منطقه حضور رسوبات سطحی اساساً مقادیر بزرگنمایی را در فرکانس‌های بالاتر از ۱ هرتز متأثر می‌سازد. مطالعات عددی سه‌بعدی در حوضه رسوبی تایپه (Miksat et al., 2010)، با بیشینه عمق ۱۲۰ متر، بر مبنای تحلیل یک رخداد لرزه‌ای با بزرگای گشتاوری ۳/۴، مقادیر بزرگنمایی طیفی را حداکثر در حدود ۶ و در فرکانس‌های حدود ۰/۵ تا ۱ هرتز ارائه داده است.

لذا در مقایسه با مطالعات انجام شده در سایر حوضه‌های رسوبی آشکار است که مقادیر بزرگنمایی‌های به دست آمده در حوضه رسوبی قم، مقادیر چشمگیری را نشان می‌دهد. این مساله لزوم توجه به اثرات ساختمانی در صورت وقوع رخداد-های لرزه‌ای را بیش از پیش آشکار می‌سازد.

نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر پاسخ لرزه‌ای رسوبات در محدوده شهری حوضه رسوبی قم مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور

در نقطه D نیز محدوده‌های اصلی بزرگنمایی در فرکانس‌های ۰/۸، ۲ و ۴ هرتز قرار دارند. باین‌حال در سایر نقاط نیز مقادیر نسبت بزرگنمایی در حدود ۵ تا ۱۰ در نوسان هستند. در نقطه E در فرکانس ۱/۲ هرتز و ۵/۵ هرتز دو محدوده شاخص بزرگنمایی با مقادیر به ترتیب ۲۲ و ۲۰ مشاهده می‌شوند. لازم به ذکر است، بیشترین مقادیر این نسبت در کل حوضه رسوبی، در لبه جنوبی حوضه (مختصات ۶ تا ۷ کیلومتر در شکل ۹) با مقادیری در حدود ۳۰ مشاهده می‌شود. در نقطه F نیز نزدیک به لبه شمالی حوضه، فرکانس اصلی بزرگنمایی در حدود ۲ هرتز مشاهده می‌شود. اگرچه در کل محدوده فرکانسی مورد بررسی نسبت‌های بزرگنمایی در محدوده ۳ تا ۱۰ نوسان نشان می‌دهند.



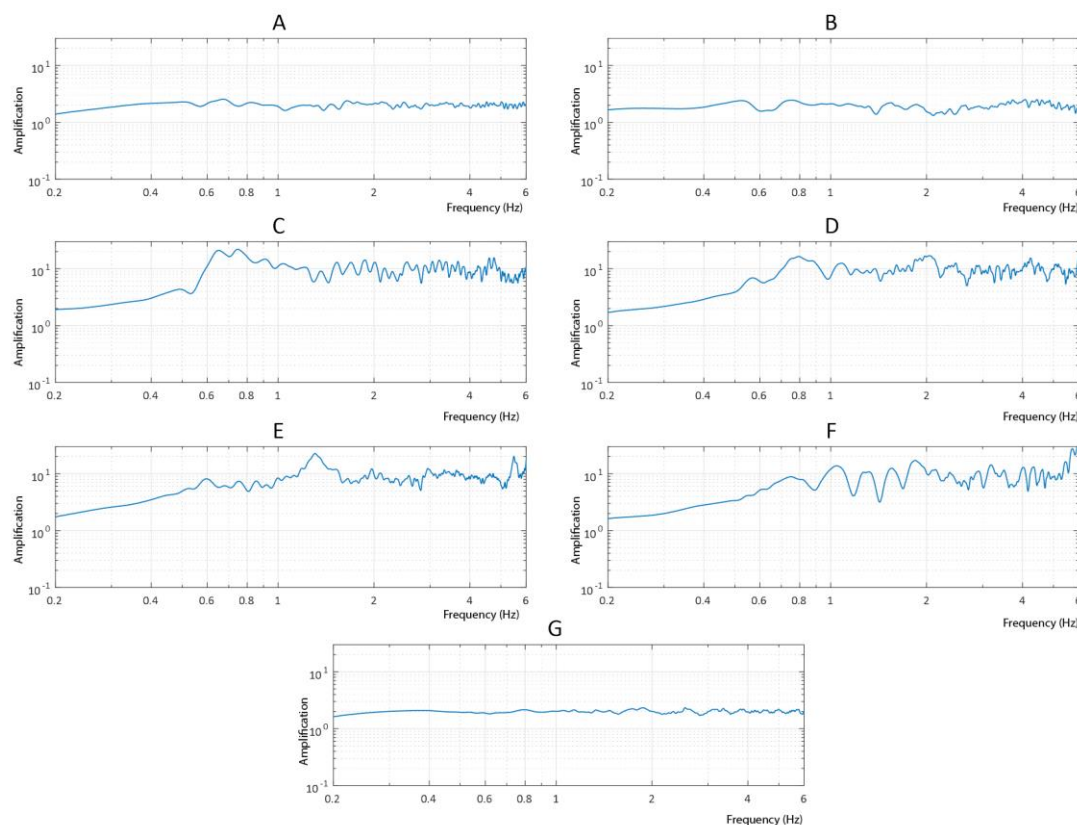
شکل ۹. پاسخ‌های حوزه فرکانس در امتداد پروفیل شرقی حوضه رسوبی شهر قم.

۵. بحث

در پژوهش حاضر بیشینه نسبت‌های بزرگنمایی فرکانسی در حدود ۲۰ برای فرکانس‌های حدود ۱ هرتز در قسمت‌های جنوب شرقی محدوده شهری به دست آمد. همچنین مقادیر

چشمگیری در بخش‌های میانی حوضه می‌شود. در حوزه‌ی فرکانس، اساسی‌ترین محدوده‌ی فرکانس‌های بزرگنمایی از حدود ۰/۸ هرتز در بخش‌های جنوبی تا ۲ هرتز در قسمت‌های شمالی متغیر است. نتایج این تحلیل می‌تواند بخشی از ناهماهنگی‌های گزارش شده‌ی پیشین در بزرگنمایی‌های خردلرزه و نتایج مدلسازی‌های عددی یک بعدی را توضیح دهد. بیشینه مقادیر بزرگنمایی‌های طیفی در شرایط مورد بررسی در این پژوهش، به حدود ۲۰ می‌رسد. ذکر این نکته ضروری است که اگرچه فرکانس اساسی بزرگنمایی رسوبات حوضه آشکارا در محدود فرکانس‌های ۰/۸ تا ۲ هرتز قرار دارد، اما از بزرگنمایی‌هایی فرکانسی در محدوده‌ی فرکانس‌های بالاتر که حاصل ساختار پیچیده‌ی رسوبات و لایه‌بندی است نباید چشم‌پوشی شود.

ساختار زیرسطحی رسوبات با استفاده از روش عددی اجزای طیفی تحلیل شده و موج پاسخ در امتداد سطح در حوزه زمان و همچنین با اعمال تبدیل فوریه، در حوزه فرکانس بررسی و ارائه شد. در حوزه‌ی زمان، شکل‌گیری و گسترش امواج حاصل از لبه‌های حوضه اصلی‌ترین عامل افزایش مدت زمان لرزش‌ها در حوضه می‌باشد. حضور رسوبات کم سرعت سطحی دامنه پاسخ‌ها در هر دو فرکانس غالب موج مهاجم را متأثر می‌سازد، با این حال، مقادیر بزرگنمایی‌های سطحی در فرکانس غالب ۳ هرتز تا ۱۰ برابر دامنه موج مهاجم می‌رسد که دو برابر مقادیر آن در فرکانس غالب ۱ هرتز است. در لبه جنوبی مقطع مورد بررسی، افزایش ضخامت رسوبات کم سرعت و افزایش شیب لبه‌ی حوضه، سبب تشدید دامنه بزرگنمایی‌ها و طول مدت جنبش‌ها می‌شود. تأثیر اندرکنش سازنده امواج شکل گرفته در گوشه‌ها سبب جنبش‌های



شکل ۱۰. نمودارهای حوزه فرکانس برای ۷ نقطه واقع بر سطح حوضه رسوبی در امتداد پروفیل شرقی

مراجع

- رمضی، ح.ر.، ۱۳۸۱. "لرزه زمین ساخت، لرزه خیزی و برآورد خطر نسبی زمین لرزه استان قم"، سازمان مسکن و شهرسازی استان قم.
- سهرابی بیدار، ع.، مقامی، ش.، زارعان، ا.، اصغری کلجاهی، ا. (۱۳۹۹). "بررسی همگرایی مدل‌های ساختار سرعت موج برشی حاصل از تحلیل منحنی بیضیواری امواج سطحی ارتعاشات محیطی"، نشریه انجمن زمین شناسی مهندسی ایران.
- سهرابی بیدار، ع.، جاسم پور، ل.، ۱۳۹۲. "بررسی اثر آبرفت‌های عمیق بر پاسخ لرزه‌ای یک‌بعدی در شهر قم"، مجله فیزیک زمین و فضا، دوره ۳۹، شماره ۳، صفحه ۱۵-۳۱.
- شرکت آب منطقه ای قم، ۱۳۸۷. "گزارش ژئوالکترونیک دشت قم"، وزارت نیرو.
- پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، ۱۳۸۴. "گزارش نهایی مطالعات لرزه‌خیزی و ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای قم"، شهرداری قم.
- زمانی پدرام، م.، حسینی، ح.، "نقشه زمین شناسی ۱/۱۰۰،۰۰۰ منطقه قم"، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

- Aki, K., 1988. Local site effects on ground motion. *Earthquake Engineering and Soil Dynamics II-Recent Advances in Ground Motion Evaluation, Geotechnical Special Publication 20*, 103–155.
- Ampuero, J.P., 2008. SEM2DPACK: A Spectral Element Method tool for 2D wave propagation and earthquake source dynamics User's Guide.
- Anderson, J.G., Bodin, P., Brune, J.N., Prince, J., Singh, S.K., Quaas, R., Onate, M., 1986. Strong Ground Motion from the Michoacan, Mexico, Earthquake. *Science (80-)*. 233, 1043–1049.
- Boaga, J., Renzi, S., Vignoli, G., Deiana, R., Cassiani, G., 2012. From surface wave inversion to seismic site response prediction: Beyond the 1D approach. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*.
- Chaljub, E., Maufroy, E., Moczo, P., Kristek, J., Hollender, F., Bard, P.Y., Priolo, E., Klin, P., De Martin, F., Zhang, Z., Zhang, W., Chen, X., 2015. 3-D numerical simulations of earthquake ground motion in sedimentary basins: Testing accuracy through stringent models. *Geophysical Journal International*. 201, 90–111.
- Delavaud, E., Cupillard, P., Festa, G., Vilotte, J.P., 2006. 3D spectral element method simulations of the seismic response in the Caracas basin. *Proc. of the Third International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion 1*, 512–522.
- Di Giulio, G., de Nardis, R., Boncio, P., Milana, G., Rosatelli, G., Stoppa, F., Lavecchia, G., 2016. Seismic response of a deep continental basin including velocity inversion: The Sulmona intramontane basin (Central Apennines, Italy). *Geophysical Journal International*.
- Dravinski, M., Mossessian, T.K., 1987. Scattering of Plane Harmonic P, Sv, and Rayleigh Waves By Dipping Layers of Arbitrary Shape. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 77, 212–235.
- Herak, M. (2008). ModelHVSAR-A Matlab® tool to model horizontal-to-vertical spectral ratio of ambient noise. *Computers and Geosciences*, 34(11), 1514–1526
- Kamalian, M., Kazem, M., Reza, M., 2008. Site effect microzonation of Qom, Iran. *Engineering geology*. 97, 63–79.
- Kawase, H., Aki, K., 1989. A study on the response of a soft basin for incident S, P, and Rayleigh waves with special reference to the long duration observed in Mexico City. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 79, 1361–1382.
- Khan, S., van der Meijde, M., van der Werff, H., Shafique, M., 2019. The impact of topography on seismic amplification during the 2005 Kashmir Earthquake. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 1–18.
- Komatitsch, D., Liu, Q., Tromp, J., Süß, P., Stidham, C., Shaw, J.H., 2004. Simulations of ground motion in the Los Angeles basin based upon the spectral-element method. *Bulletin of the Seismological Society of America*.
- Komatitsch, D., Tromp, J., 2002. Spectral-element simulations of global seismic wave propagation - I. Validation. *Geophysical Journal International*.
- Komatitsch, D., Vilotte, J.P., 1998. The Spectral Element Method: An Efficient Tool to Simulate the Seismic Response of 2D and 3D Geological Structures. *Bulletin of the Seismological Society of America*.
- Lee, S.J., Chan, Y.C., Komatitsch, D., Huang, B.S., Tromp, J., 2009. Effects of realistic surface topography on seismic ground motion in the Yangminshan region of Taiwan based upon the spectral-element method

- and LiDAR DTM. Bulletin of the Seismological Society of America. 99, 681–693.
- Liu, Q., Yu, Y., Zhang, X., 2015. Three-dimensional simulations of strong ground motion in the Shidian basin based upon the spectral-element method. Earthquake Engineering and Engineering Vibrations.
- Maghami, S., Sohrabi-Bidar, A., Bignardi, S., Zarean, A., Kamalian, M., 2021. Extracting the shear wave velocity structure of deep alluviums of “Qom” Basin (Iran) employing HVSR inversion of microtremor recordings. Journal of Applied Geophysics.
- Majidinejad, A., Zafarani, H., Vahdani, S., 2017. Dynamic simulation of ground motions from scenario earthquakes on the North Tehran Fault. Geophysical Journal International.
- Makra, K., Chávez-García, F.J., Raptakis, D., Pitilakis, K., 2005. Parametric analysis of the seismic response of a 2D sedimentary valley: Implications for code implementations of complex site effects. Soil Dynamic and Earthquake Engineering. 25, 303–315.
- Miksat, J., Wen, K.L., Wenzel, F., Sokolov, V., Chen, C.T., 2010. Numerical modelling of ground motion in the Taipei Basin: Basin and source effects. Geophysical Journal International.
- Mossessian, T.K., Dravinski, M., 1987. Application of a hybrid method for scattering of P, SV, and Rayleigh waves by near-surface irregularities. Bulletin of the Seismological Society of America. 77, 1784–1803.
- Oral, E., Gélis, C., Bonilla, L.F., 2019. 2D P-SV and SH spectral element modelling of seismic wave propagation in nonlinear media with pore-pressure effects. Geophysical Journal International. 1–52.
- Oral, E., Gélis, C., Bonilla, L.F., Delavaud, E., 2017. Spectral element modelling of seismic wave propagation in visco-elastoplastic media including excess-pore pressure development. Geophysical Journal International. 211, 1494–1508.
- Pilz, M., Parolai, S., Stupazzini, M., Paolucci, R., Zschau, J., 2011. Modelling basin effects on earthquake ground motion in the Santiago de Chile basin by a spectral element code. Geophysical Journal International.
- Stacey, R., 1988. Improved transparent boundary formulations for the elastic -wave equation. Bulletin of the Seismological Society of America.

ضمیمه

۱۹

مراحل فنی نصب و راه اندازی کد عددی SEM2DPack

- ۱- کد عددی مذکور نیاز به دسترسی یا نصب یک سیستم عامل مبتنی بر Linux دارد که پیشنهاد می شود از Ubuntu 18.04 استفاده شود. (نسخه 20.04 به دلیل عدم پشتیبانی gfortran 4.8 برای بهره گیری از این کمپایلر با مشکل مواجه خواهد شد).
- برای کمپایل کردن کد میتوان از کمپایلرهای مختلفی استفاده نمود. کد به طور پیش فرض با کمپایلر ایتل فرترن یا ifort تنظیم شده است که تجاری بوده و خدمات رایگان آن کشور ایران را شامل نمیشود. از این روی نیاز است که تنظیمات پیش فرض بر اساس کمپایلر gfortran تغییر کند. نسخه فعلی SEM2DPack با ورژن ۴٫۸ این کمپایلر سازگار است.
- ۲- در محیط ترمینال لینوکس دستورات زیر به طور کامل کپی و اجرا شود.

```
sudo apt-get update -y
sudo apt-get install -y build-essential
sudo apt-get install -y gfortran-4.8
sudo apt-get install -y gcc-4.8
sudo apt-get install -y make
```

۳- کد از آدرس زیر دریافت شود و پس از خارج کردن از حالت فشرده در Home قرار داده شود.

<https://sourceforge.net/projects/sem2d>

۴- فولدری تحت عنوان bin در Home ساخته شود.

۵- در پوشه SEM2DPACK_2.3.8/SRC فایل makefile خطوط ۴۵ تا ۵۹ دقیقا به ترتیب زیر تنظیم شده و ذخیره شود.

```
# GNU
#F90 = g95
#OPT =
F90 = gfortran-4.8
#OPT = -O3 -Wall
OPT = -O3

#-- Intel Fortran --
#F90 = ifort
#OPT = -O3 -ip -ipo -unroll
#-no-inline-factor
#OPT = -O3
#OPT = -O0 -warn all -C
#OPT = -O0 -g
```

۶- در پوشه SRC در ترمینال، دستور make وارد شود. پس از اتمام نصب، در فولدر bin ساخته شده در قبل، فایل اجرایی

sem2dsolve کمپایل می شود. می توان این فولدر را در PATH لینوکس تعریف نمود یا برای هر مدلسازی فایل اجرایی را در

فولدر مساله مورد بررسی قرار داد. برای شروع تحلیل، پس از قرار دادن فایل های ورودی مورد نیاز یعنی فایل مش بندی،

فایل پارامترها، یا در صورت نیاز فایل های مرتبط با منبع موج و گیرنده ها و ...، در محیط ترمینال در محل پوشه مورد

بررسی دستور sem2dsolve اجرا شود.