

مجله انجمن زمین شناسی مهندسی ایران بهار ۱۴۰۱، جلد پانزدهم، شماره ۱ صفحه ۷۱ تا ۸۸

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

چکیدہ

در دهههای گذشته، اهمیت ویژگیهای زمین شناختی 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 می دهد که بزرگترین دامنه جنبشها، با فاکتور بزرگنمایی ۱۰، در بخشهای جنوب شرقی محدوده شهری مشاهده می شود. همچنین دلیل اصلی افزایش مدت زمان جنبشها در حوضه، امواج سطحی منشأ گرفته از لبههای حوضه می باشد. نتایج در حوزه فرکانس بیان می-دارد که اساسی ترین محدوده ی فرکانس بزرگنمایی در حوضه، امواج سطحی منشأ گرفته از لبههای حوضه می باشد. نتایج در حوزه فرکانس بیان می-مراد که اساسی ترین محدوده ی فرکانس بزرگنمایی در حوضه، امواج سطحی منشأ گرفته از لبههای حوضه می باشد. نتایج در حوزه فرکانس بیان می-دارد که اساسی ترین محدوده ی فرکانس بزرگنمایی در حوضه، با بیشینه نسبتهای بزرگنمایی در حدوده برگامی این برای میخشهای جنوبی پروفیل مورد بررسی تا حدود ۲ هرتز برای بخشهای شمالی تغییر می کند که این محدوده بزرگنمایی نیز با مشاهدات پیشین همخوانی دارد.

كليدواژه ها: پاسخ لرزمای، روش اجزای طیفی، مدلسازی عددی، اثر ساختگاه

^۳ دانشجوی دکترای زمین شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

ا زمین شناسی مهندسی، دانشگاه تهران

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

^{*} مسئول مكاتبات

بهار ۱۴۰۱، جلد پانزدهم، شماره ۱

۷۲ / مجله علمی- پژوهشی انجمن زمین شناسی مهندسی ایران

۱. مقدمه

پاسخ لرزهای ساختگاه، ارتباط زمین شناسی سطحی با پارامتر-های موج لرزهای، ازجمله دامنه و محتوای فرکانسی موج دریافت شده در محل را بیان میکند. در دهههای اخیر، تجربیات بهدست آمده از زلزله های 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 می شود.(Kawase and Aki, 1989)) اگرچه تا مدت ها پسازآن 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 آیین نامه 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 آيين نامه ها مورداستفاده قرار مي گيرد، ليكن أكى (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 به هیچ عنوان نمی تواند مقادیری نزدیک به واقعيت را ارائه نمايد.

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

بزرگای گشتاوری ۸/۱، در شهر مکزیکوسیتی با فاصله بیش از ۲۰۰ 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) با پریود بلند آسیبدیده و تخریب شدند (مواج لرزهای با پریود بلند حوضههای رسوبی در بزرگنمایی امواج لرزهای با پریود بلند نقش اساسی دارند. این مساله از آنجایی اهمیت قابل توجهی می یابد که سازههای بلندمرتبه را به شدت تحت تأثیر قرار می دهد. همچنین مدتزمان لرزش ها نیز در امواج پریود بلند در بسترهای آبرفتی به طور قابل توجهی بیش از زمان لرزش در فرکانس های بالاتر است.

بهطورکلی، به دلیل پیچیدگی زیاد، معمولاً برای تحلیلهای دینامیکی محیطهای چندبعدی ازجمله 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 تحلیل های یکبعدی بسنده نمودهاند. در این روشها امواج مهاجم را قائم و لایههای خاک را افقی فرض میکنند. گسترش فنّاوری و امکان انجام حجم وسیع محاسبات در زمان اندک، راه را برای انجام تحلیلهای دقیقتر در محیطهای چندبعدی هموار ساخته است.

روش های عددی مرسوم در تحلیل های دینامیکی عموماً شامل روش های حجمی مانند اجزای محدود و اجزای طیفی، روش های مرزی مانند اجزای مرزی و روش های مرکب هستند. در این میان مطالعات گسترده، کارایی روش اجزای طیفی در تحلیل محیط های پیچیده را مشخص ساخته است. پس از معرفی فرمول بندی اجزای طیفی با هدف تحلیل لرزه-ای محیط های ناهمگن پیچیده توسط کوماتیچ و ویلوت ای محیط های ناهمگن پیچیده توسط کوماتیچ و ویلوت (Komatitsch and Vilotte, 1998) زیرای های در حل مسائل پاسخ تحلیل پاسخ لرزه ی حوضه رسوبی لس آنجلس، لرزه ی مورد توجه بسیاری قرار گرفت. از جمله دلاوود و

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

ν۳ /

شهر قم به وقوع پیوسته است. همچنین توسعه ساختوسازها 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، پیش تر 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 می تواند سبب بزرگنمایی قابل توجه در دامنه موج در صورت وقوع رخدادهای لرزهای شود. گزارش مطالعات لرزهخيزي انجام شده توسط پژوهشگاه بينالمللي زلزلهشناسی و مهندسی زلزله نیز، بیشترین مقادیر بزرگنمایی طیفی را مربوط به بخشهای شرقی و جنوب شرقی محدوده-ی شهری قم میداند (پژوهشگاه زلزلهشناسی و مهندسی زلزله، ۱۳۸۴). از این روی، تعیین مقادیر و محدودهی فرکانس های 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 نتیجه گیری مطالب آمده است.

همكاران از این الگوریتم برای تحلیل پاسخ لرزهای حوضه رسوبي كاراكاس استفاده نمودند (Delavaud et al., 2006). لى و همكاران (Lee et al., 2009) نيز از روش اجزاى طيفي برای بررسی اثرات توپوگرافی بر پاسخ لرزهای در تایوان استفاده نمودند. پیلز و همکاران با استفاده از روش اجزای طیفی پاسخ لرزهای حوضه رسویی سانتیاگو در شیلی را مورد تحلیل قرار داده و شرایط پیچیده گسلش، توپوگرافی و زمین شناسی محلی را عامل اصلی شدت حرکات نیرومند زمين در اين 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. ليو و همكاران (Liu et al., 2015)، شكل گيرى 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 خرابی های بالا، تحت تأثیر بزرگنمایی حاصل از توپوگرافي بودهاند.

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

بهار ۱۴۰۱، جلد پانزدهم، شماره ۱

۷۴ / مجله علمی- پژوهشی انجمن زمین شناسی مهندسی ایران

۲. محدودهی مورد مطالعه

محدودهی مورد مطالعه در این پژوهش بخشی از حوضه رسوبی قم، واقع در شرق محدودهی شهری قم را در بر می گیرد. 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 برگرفته است. شکل ۱ نقشه زمین شناسی ساده شده ساختگاه شهر قم را نشان میدهد. حوضه رسوبی قم بخشی از زون ساختاری ایران مرکزی بهحساب میآید. این زون اساساً از دشتها و تپههای تقریباً موازی با روند شمال غرب جنوب شرقی زاگرس تشکیل شده است. ازجمله عوارض ژئومورفولوژیکی می توان 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 ازنظر تکتونیکی و لرزمای است. تأثیرات کوهزایی یاسادنین به اشکال مختلف در منطقه مشاهده میشود که بیانگر تأثیرات گسلهای عمیق پیسنگی است. در منطقه موردمطالعه تنها رخنمونهای سنگی دوران سوم (ائوسن تا پليوسن) و كواترنر ديده مي شوند. 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، زمین لرزه ۲۰۰۷ با بزرگای ۵/۶ در ۵۱ کیلومتری جنوب قم بزرگترین رخداد ثبت شده است. همچنین زلزلههای ۱۹۸۰ میلادی با بزرگای ۸/۸ و ۶/۲ نیز از رخدادهای لرزهای حائز اهمیت در این پهنه به شمار می روند.

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

مطالعات تحليل خطر زمينلرزه انجام شده در محدودهي 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 نهتنها می تواند ناشی از گسل های شناخته شده حدفاصل تهران و کاشان باشد، بلکه گسلهای فعال یا دارای پتانسیل فعالیت در بستر خود شهر نیز می توانند عامل وقوع زمین لرزههای 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 بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، ۱۳۸۴). نتایج حاصل از این مطالعات، اثرات ساختگاهی را در قالب سه محور شامل بیشینه شتاب سطح زمین، پتانسیل تشدید ساختگاه و مخاطرات ژئوتکنیک لرزهای جمعبندی کرده است. بیشینه شتاب سطح زمین در صورت وقوع زلزلهای با دوره بازگشت ۴۷۵ سال، در محدوده ۲/۰ تا ۶/۰ شتاب گرانش گزارش شده است. در این گزارش، به طور خاص اشاره شده است که، اغلب مناطق شرقی و جنوب شرقی شهر، بهاضافه محدودههایی در مرکز شهر، در بازه پريوديک ۲/۴ تا ۸/۰ ثانيه پتانسيل تشديد 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 عمیق ترین لایه ها 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

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

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

شرکت آب منطقهای قم به منظور بررسی ویژگی های زمین شناسی و زمین ساختی، تفکیک مرز بین آب های شور و شیرین زیرزمینی، تفکیک و بر آورد ضخامت لایه ها و تعیین موقعیت بی هنجاری ها در محدوده دشت قم، مطالعات ژئوفیزیکی گسترده ای را با استفاده از روش مقاومت سنجی ژئوفیزیکی (ژئوالکتریک) انجام داده است (سازمان آب منطقه-الکتریکی (ژئوالکتریک) انجام داده است (سازمان آب منطقه-ای قم، ۱۳۸۷). مقامی و همکاران (2021, Maghami et al. ای قم، ۱۳۸۷). مقامی و همکاران (Maghami et al. 2021) بر اساس نتایج برداشت های پیشین انجام شده در محدوده بر اساس نتایج برداشت های پیشین انجام شده در محدوده فهری قم و با تکیه بر وارون سازی نسبت های طیفی خردلرزه، ساختار عمومی دو بعدی و سه بعدی حوضه رسوبی قم را مورد بررسی قرار داده و برای محدودهی شرقی محدوده نمودهاند. در این پژوهش به کاهش عمق کلی حوضه و افزایش حضور رسوبات کم سرعت در بخش های شرقی محدودهی شهری اشاره شده است که این مساله می تواند

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 (Ramalian 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 مطالعات ژئوفیزیکی برداشت شده و در مدلسازی یکبعدی مورداستفاده قرار گرفته است. در این پژوهش به وجود یک مرداستای شاخص ناشی از رسوبات عمیق در فرکانسهای حدود یک هرتز اشاره شده است که با مدلسازیهای عددی یک بعدی سازگاری ندارد.

شکل ۱. نقشه زمینشناسی سادهشده قم، برگرفته از نقشه زمینشناسی ۱/۱۰۰٬۰۰ استان قم، سازمان زمینشناسی و اکتشافات معدنی

۷۶ / مجله علمی- پژوهشی انجمن زمین شناسی مهندسی ایران

بهار ۱۴۰۱، جلد پانزدهم، شماره ۱

بستر هوازده مارنی قابل مشاهده است. در قسمتهای میانی این مقطع بر آمدگی سنگ بستر شاخص است. با توجه به تأکید مطالعات پیشین بر ناسازگاری بزرگنمایی های طیفی با مدل-سازی های یک بعدی، لزوم انجام بررسی های چند بعدی پاسخ لرزهای، که موضوع این پژوهش است بیش از پیش آشکار می شود. سبب افزایش بزرگنمایی موج لرزمای در این قسمتها شود. بخش عمده بافت شهری در این بخش، شهرکهای نوساز احداثشده یا در دست احداث شامل سازههای نسبتا مرتفع را شامل می شود که می توانند 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)

۳. روش تحقيق

همان طور که پیش تر 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 عددی، شامل سه بخش اصلی تهیه مدل اجزای طیفی، تعریف ورودی های مدل و تحلیل عددی می شود.

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

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 مرزهای پایینی و دیوارههای مدل به صورت مرزهای جاذب 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.

 $f(t) = \begin{bmatrix} 1 - \tau \cdot (\pi \cdot f_p \cdot (t - t_{.}))^r \end{bmatrix} e^{-(\pi \cdot f_p \cdot (t - t_{.}))^r}$ (1) $t. \quad t_p \quad$

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

VV /

حوضه رسوبی قم از نوع امواج SH میباشند. این امواج به صورت جبهه موج قائم در گرههای کف بلوک مورد مطالعه اعمال می شود.

برای تعیین محدوده بهینه نسبت طول گام زمانی به ابعاد المان در کد عددی از پارامتر تجربی عدد کورانت (CFL) براساس رابطه ۲ استفاده می شود. مطالعات پیشین مقدار بهینه پارامتر عدد کورانت را برای الگوریتم اجزای طیفی مورد استفاده کوچکتر از ۵/۰ پیشنهاد نمودهاند (;Ampuero, 2008). (Oral et al., 2017).



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

بهار ۱۴۰۱، جلد پانزدهم، شماره ۱

و موسسین (Dravinski and Mossessian, 1987) برای محیط هایی با خاصیت غیر الاستیک ضعیف و توسط موسسین و دراوینسکی (Mossessian and Dravinski, 1987) برای محیط های کاملاً الاستیک، به صورت تحلیلی مور دمطالعه قرار گرفته است. در این تحلیل دانسیته و سرعت موج برشی نیم-فضا به ترتیب ۲/۴ تن بر متر مکعب و ۱۶۰۰ متر بر ثانیه لحاظ شده است. شعاع درهی مور دبررسی ۲۰۰ 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 سرعت رسی 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 بزرگنمایی های طیفی درامتداد سطح با مقادیر ارائه شده در ادبیات فنی (,Mossessian and Dravinski, 1987).

b: تحلیل پاسخ لرزهای حوضه رسوبی

ساختار رسوبات تشکیل دهنده ی حوضه رسوبی در بخش های شرقی محدوده ی 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 ۳۰۰ متر بر ۷۸ / مجله علمی- پژوهشی انجمن زمین شناسی مهندسی ایران

پیش از تحلیل پاسخ لرزهای حوضه رسوبی، با هدف ارزیابی کارایی و دقت الگوریتم اجزای طیفی، پاسخ لرزهای یک دره نیمدایرهای آبرفتی، واقع شده برروی یک نیم فضای همگن ارزیابی و پاسخها اعتبار سنجی شده است. ویژگیها محیطی برای تحلیل مذکور در بخش بعدی آمده است. پس از اعتبار سنجى الگوريتم مورد استفاده، پاسخ لرزهاى يک پروفيل 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 تحليل حوضه رسوبي، دو موج مهاجم با فرکانس،های غالب برابر با ۱ هرتز و ۳ هرتز اعمال شده است. با استفاده از تبدیل فوریه، در حوزه فرکانس مشخص میشود که با در نظر گرفتن فرکانس هایی با دامنهی حداقل ۱۰ درصد دامنه موج در فرکانس غالب، فرکانسهای معتبر در هر تحليل از حدود يکدوم فرکانس غالب تا حداقل دو برابر آن را شامل می شود. لذا با ترکیب نتایج حاصل این دو تحلیل، نتایج حوزهی فرکانس برای محدوده پیوستهای از ۰/۵ هرتز تا بیش از ۶ هرتز در دسترس خواهد بود. این فركانس ها محدوده حائز اهميت در بيشتر مطالعات مهندسي را در برگرفته 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.

۲. 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 Roaga et al., 2012; Majidinejad et al., 2013 رسیده است (2017; Oral et al., 2019 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

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

ثانیه، ۴۵۰ متر بر ثانیه، ۷۵۰ متر بر ثانیه و ۱۰۰۰ متر برثانیه 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 مشربندی آن در ادامه خواهد آمد.

۲−۱-۴. تعريف 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 مش بندی انجام شده است. ابعاد المانها در محیط نیم فضا، 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،

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) مش بندی شده است که در مجموع ۲۱۴۴۰ گره و ۲۰۶۸۷ المان را شامل می شود. شکل۵ محیط المانبندی شده، ابعاد المانها در هر بخش و محدودهی حوضه رسوبی را نشان می دهد.

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

بهار ۱۴۰۱، جلد پانزدهم، شماره ۱

۸۰ / مجله علمی- پژوهشی انجمن زمین شناسی مهندسی ایران

۲–۲–۴. پارامترهای ورودی

پس از المانبندی محیط، مختصات گرهها و آدرس دهی المان-ها 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 نظرگرفته 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

طيفي	اي	اج: ا	ىددى ا
	0	·	0

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)

۳-۲-۴. تحلیل عددی

تحلیل عددی بر مبنای روش اجزای طیفی و با استفاده از کد عددی SEM2DPack تحت خط فرمان سیستمعامل Linux انجام شده است. لازم به ذکر است که به دلیل برخی ابهامات SEM2DPack در راه اندازی و استفاده از کد SEM2DPack جزییات فنی آن در ضمیمه آمده است. برای تحلیل عددی ۴۰ ثانیه از گسترش موج لرزهای ۴۵۶۷۷۳ گام زمانی به طول مانیه از گسترش 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

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 بهره-گیری از کد نویسی در محیط متلب ۲۰۱۸ انجام شده است. نتایج این تحلیلها در ادامه مورد اشاره قرار گرفته است.

۱-۳-۴. 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 اصلی ترین 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 می باشند و تعیین کننده ی اصلی مدت زمان لرزش ها 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 سرعت-های 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 بخش-های 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

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

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 پایین تر، دامنه ها می توانند 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 جنوبي رسيده و با افزايش ضخامت رسوبات سست، دامنه آنها افزایش میباید. بااینحال 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.

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 می شود. به طور کلی پاسخها در این بخش از پروفیل از نظر دامنه موج دریافت شده و مدت زمان لرزش ها کاملاً چشمگیر می باشند. 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 می رسد 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 می شوند. 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 ۰/۰۲ متر دریافت میشوند. شکل۸، 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 می شوند، بیشینه دامنههایی تا ۰/۰۶ متر نشان می دهند.

بهار ۱۴۰۱، جلد پانزدهم، شماره ۱

۸۲ / مجله علمی- پژوهشی انجمن زمین شناسی مهندسی ایران

ناشی از لبه شمالی تقریباً بلافاصله بعد از پیک اصلی، با دامنه-ای در حدود ۰/۰۶۵ متر دریافت می شود. درحالی که پاسخ حاصل از لبه جنوبی حوضه در حدود ثانیه ۴۰ به این نقطه می رسد. 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 ۱۰/۰۴ متر دریافت می شوند. در نقطه F، نزدیک به لبه شمال حوضه، همان طور 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

مشاهده دامنههای چشمگیر در پاسخها را می توان 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 یک بعدی قابل بیان نیستند و در نتیجه، مخصوصاً در گوشههای حوضه که تأثیر ساختار دو بعدی بسیار غالب می شود، ضروری است که از تکیه بر نتایج مدلسازیهای یک بعدی اجتناب شود.

۲-۳-۴. پاسخ لرزهای در حوزه فرکانس

شکل ۹، نتایج تحلیل پاسخ لرزهای پروفیل شرقی محدودهی 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.

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

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

هرتز متغیر است. اگرچه در فرکانس های بالاتر، تناوب ییچیدهای از محدودههای بزرگنمایی فرکانسی را می توان مشاهده نمود. حضور این فرکانس های بزرگنمایی ترکیبی از اثرات ساختار کلی حوضه و رسوبات سطحی است. به گونهای که بهدشواری می توان با اطمینان، عامل مستقیمی، ازجمله عمق حوضه یا ضخامت لایههای سطحی را برای حضور یا عدم حضور یک محدوده فرکانس بزرگنمایی معرفی نمود. بااين حال وجود رابطه بين كاهش عمق رسوبات و افزايش فرکانس بزرگنمایی در برخی بخش های حوضه قابل تعقیب است. به عنوان مثال در مختصات حدود ۸ کیلومتر، کاهش ضخامت رسوبات سطحي سبب ايجاد يک محدودهي بزرگنمایی در حدود ۱/۵ هرتز شده یا در مختصات حدود ۱۰ کیلومتر، برآمدگی سنگبستر، سبب افزایش محدودهی بزرگنمایی تا حدود ۲ هرتز می شود. همان طور که در تحلیل-های حوزه زمان اشاره شد، در بخشهای جنوبی پروفیل (جنوب شرق شهر قم) بیشترین پتانسیل بزرگنمایی در فرکانس های کمتر یا حدود ۱ هرتز (پریودهای بالاتر از ۱ ثانيه) مشاهده مي 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، مي تواند سبب افزايش نسبت بزرگنمایی در فرکانسهای خاصی شود، این بزرگنماییها در مقايسه با تأثيرات حاصل از رسوبات قابل توجه نيستند. نسبتهای بزرگنمایی در برخی فرکانس ها مقادیری بیش از ۲۰ (نسبت به موج مهاجم) می یابد که نشان دهنده تأثیر بسیار چشمگیر رسوبات کمسرعت سطحی در پاسخهای لرزهای 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 نسبتهای بزرگنماییها با مقادیری بین ۵ تا ۱۰ قابل مشاهده است.

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

مهاجم

بهار ۱۴۰۱، جلد پانزدهم، شماره ۱

دامنه های موج پاسخ در مقطع مورد بررسی برای موج مهاجم با فرکانس غالب ۳ هرتز، به حدود ۱۰ برابر دامنه موج مهاجم مىرسد. اصلى ترين عامل مشاهده اين مقادير بزرگنمايي، حضور رسوبات کم سرعت سطحی است. مشخصا با در نظر گرفتن لايهبندي معادل رسوبات، مقادير بزرگنمايي طيفي كمترى قابل انتظار است. به عنوان مثال تحليل هاى 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 تحلیل ها ساختار سهبعدی رسوبات با سرعت معادل ۸۵۰ متر بر ثانیه برای کل ساختار رسوبات در نظر گرفته شده است که بیانگر رسوبات كاملاً تحكيم يافته بوده است. مطالعات انجام شده در حوضه رسوبی تسالونیکی در یونان (Makra et al., 2005) نیز بیشینه مقادیر بزرگنمایی طیفی را برای ساختاری از رسوبات با بیشینه عمق حدود ۲۵۰ متر در محدوده فرکانس های 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 می سازد. مطالعات عددی سهبعدی در حوضه رسوبی تاييه (Miksat et al., 2010) ، با بيشينه عمق ۱۲۰ متر، بر مبنای تحلیل یک رخداد لرزهای با بزرگای گشتاوری ۳/۴، مقادیر بزرگنمایی طیفی را حداکثر در حدود ۶ و در فرکانس های حدود ۵/۰ تا ۱ هر تز 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 می دهد. این مساله لزوم توجه به اثرات ساختگاهی در صورت وقوع رخداد-های لرزه-ای را بیش از پیش آشکار می سازد.

نتيجه گيري

در مطالعه حاضر پاسخ لرزهای رسوبات در محدودهی شهری حوضه رسوبی قم مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور در نقطه D نیز محدوده های اصلی بزرگنمایی در فرکانس های ۸/۰، ۲ و ۴ هرتز قرار دارند. بااین حال 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 می-شوند . 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 می شود. در نقطه F نیز نزدیک به لبه شمالی حوضه، فرکانس اصلی بزرگنمایی در حدود ۲ هرتز مشاهده می شود. اگرچه در کل محدوده فرکانسی موردبررسی نسبتهای بزرگنمایی در محدوده ۳ تا ۱۰ نوسان نشان می دهند.

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 محدودهی شهری به دست آمد. همچنین مقادیر

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

چشمگیری در بخشهای میانی حوضه می شود. در حوزه ی فرکانس، اساسی ترین محدوده ی فرکانس های بزرگنمایی از حدود ۸/۰ هر تز در بخش های جنوبی تا ۲ هر تز در قسمت های شمالی متغیر است. نتایج این تحلیل می تواند بخشی از ناهماهنگی های گزارش شده ی پیشین در بزرگنمایی های خردلرزه و نتایج مدلسازی های عددی یک بعدی را توضیح دهد. بیشینه مقادیر بزرگنمایی های طیفی در شرایط مورد بررسی در این پژوهش، به حدود ۲۰ می رسد. ذکر این نکته ضروری است که اگرچه فرکانس اساسی بزرگنمایی رسوبات حوضه آشکارا در محدود فرکانس های ۸/۰ تا ۲ هر تز قرار دارد، اما از بزرگنمایی هایی فرکانسی در محدوده ی فرکانس های بالاتر که حاصل ساختار پیچیده ی رسوبات و لایه بندی است نباید چشم پوشی 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 اصلی ترین عامل افزایش مدت زمان لرزش ها در حوضه می باشد. حضور رسوبات کم سرعت مطحی دامنه پاسخها در هر دو فرکانس غالب موج مهاجم را متأثر می سازد، با این حال، مقادیر بزرگنمایی های سطحی در فرکانس غالب ۳ هرتز تا ۱۰ برابر دامنه موج مهاجم می رسد که جنوبی مقطع مورد بررسی، افزایش ضخامت رسوبات کم سرعت و افزایش شیب لبهی حوضه، سبب تشدید دامنه بررگنمایی ها و طول مدت جنبش ها می شود. تأثیر اندرکنش سازنده امواج شکل گرفته در گوشهها سبب جنبش های

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

بهار ۱۴۰۱، جلد پانزدهم، شماره ۱

مراجع

- 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). Geophysal 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). ModelHVSR-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. Geophysal 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

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

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. Geophysal 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. Geophysal 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. Geophysal 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. Geophysal 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. Geophysal Journal International.
- Stacey, R., 1988. Improved transparent boundary formulations for the elastic -wave equation. Bulletin of the Seismological Society of America.

ضميمه 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 کمیایل کردن کد میتوان از کمیایلرهای مختلفی استفاده نمود. کد به طور پیش فرض با کمیایلر اینتل 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 کیی 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

Archive of SID.ir

 $\Lambda V/$

بهار ۱۴۰۱، جلد پانزدهم، شماره ۱

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 = -03 -Wall
OPT = -03
#-- Intel Fortran -#F90 = ifort
#OPT = -03 -ip -ipo -unroll
#-no-inline-factor
#OPT = -03
#OPT = -00 -warn all -C
#OPT = -00 -g

۶- در پوشهی SRC در ترمینال، دستور make وارد شود. پس از اتمام نصب، در فولدر bin ساخته شده در قبل، فایل اجرایی SRC کمپایل می شود. می توان این فولدر را در PATH لینو کس 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.