

مطالعه‌ی عددی پاسخ لرزه‌ی یک بعدی و دو بعدی دره‌های رسوبی (مطالعه‌ی موردی پل خلیج فارس)

مریم رحیمی (کارشناس ارشد)

حمید علی‌اللهی* (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۳۹۸ (۲ - ۳۵، شماره ۲، ص. ۹۷-۱۰۹)

تجربیات به‌دست آمده از زلزله‌های اخیر، نمایانگر تأثیر شرایط محلی ساختگاه در کلیه‌ی خصوصیات مهم حرکت نیرومند زمین، نظیر: دامنه، محتوای بسامدی، و مدت زمان است. در نوشتار حاضر، به بررسی تأثیر پارامترهای مذکور در پاسخ لرزه‌ی ساختگاه دره‌ی پل خلیج فارس با استفاده از مدل‌سازی ستون معادل یک بعدی (برای هر پایه) و دو بعدی (تأثیر توپوگرافی ساختگاه) با کمک نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC ۲D، به روش خطی و بر مبنای مدل رفتاری ویسکو-کشسان پرداخته شده است. نتایج به‌دست آمده حاکی از تفاوت پاسخ‌های لرزه‌ی در محل پایه‌های پل در نتایج حاصل از تحلیل‌های ستون معادل یک بعدی و دو بعدی، نظیر: مقدار بزرگ‌نمایی لرزه‌ی، دوره‌ی تناوب مشخصه و مقدار PGA در ساختگاه موردنظر است. همچنین نتایج نشان از اثر بزرگ‌نمایی دو بعدی ساختگاه در محدوده‌ی دوره‌ی تناوب ۵/۰ تا ۱ ثانیه نسبت به مدل ستون معادل یک بعدی در یک پروفیل مشخص دارد. در پایان، طیف‌های پاسخ به‌دست آمده از پژوهش حاضر با طیف طرح استاندارد آیین‌نامه‌ی آشتو مقایسه شده‌اند.

واژگان کلیدی: آثار ساختگاه، عوارض توپوگرافی، رسوب‌های آبرفتی، تحلیل یک بعدی و دو بعدی، بزرگ‌نمایی لرزه‌ی.

rahimmashaie.maryam@yahoo.com
h.alielahi@iauz.ac.ir

۱. مقدمه

بخش‌های مرکزی دره و آثار رفتار دو بعدی به شدت در کناره‌ها قابل‌توجه است. همچنین در سال ۲۰۱۲،^[۴] در پژوهش دیگری طی یک آنالیز دو بعدی غیرخطی، که بر روی دره‌های آبرفتی دوزنقه‌ی شکل با انتشار امواج SV به کمک نرم‌افزار آباکوس انجام شد، حساسیت دره‌ی آبرفتی به غیرکشسان بودن رفتار خاک و ضرورت تحلیل چند بعدی برای پاسخ‌های غیرکشسان را نشان دادند. برخی پژوهشگران (۲۰۱۴)،^[۱] نیز در پژوهش خود دریافتند که تابع بزرگ‌نمایی در دره‌های رسوبی به رفتار مصالح تشکیل‌دهنده‌ی آبرفت و موج ورودی وابسته است. همچنین در یک مطالعه‌ی تحلیلی (۲۰۱۶)،^[۵] بر روی یک پل معلق در ترکیه نتیجه‌گیری شد که هر مؤلفه از تغییر مکان‌های سطح زمین در دره‌های آبرفتی می‌تواند اثر مهمی در رفتار دینامیکی پل داشته باشد و موجب بروز پاسخ‌های بزرگ‌تری نسبت به شرایط خاک همگن شود. در ادامه در سال ۲۰۱۵،^[۶] در یک مطالعه‌ی موردی با استفاده از روش عددی، به مقایسه‌ی رفتار لرزه‌ی یک بعدی و دو بعدی دره‌ی رسوبی فوژو^۳ پرداخته شد و نتایج آن نشان داد که اثر بزرگ‌نمایی لرزه‌ی ساختگاه در نتایج حاصل از تحلیل‌های دو بعدی، آشکارتر از نتایج حاصل از تحلیل‌های یک بعدی است. همچنین دوره‌ی تناوب طبیعی (دوره‌ی تناوب مشخصه)^۴ دره‌ی آبرفتی فوژو حاصل از تحلیل‌های غیرخطی دو بعدی، بزرگ‌تر از مقادیر حاصل از مدل یک بعدی

الگوی خرابی شمار بسیاری از زلزله‌ها در سال‌های اخیر، به‌وضوح نقش قابل‌ملاحظه‌ی شرایط ساختگاهی در تفاوت حرکات القا شده از سوی زمین را در اثر ناهمواری‌های سطح زمین نشان می‌دهد. به‌طور کلی عوارض توپوگرافی‌های سطحی چه به‌صورت محدب (کوه‌ها، تپه‌ها) و چه به‌صورت مقعر (حوضچه‌ها، دره‌ها)، می‌توانند موجب تغییرات مختلفی در حرکت زمین، نظیر بزرگ‌نمایی و یا کوچک‌نمایی در هنگام وقوع زلزله شوند. از طرفی، از آنجا که بسیاری از مناطق شهری و شریان‌های حیاتی بر روی دره‌های رسوبی^۱ قرار دارند، مطالعات گسترده‌ی در این زمینه توسط پژوهشگران مختلف با استفاده از روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی انجام شده است. از جمله مهم‌ترین مطالعات انجام شده در این مورد می‌توان به بررسی پاسخ لرزه‌ی دره‌ی رسوبی تایپه^۲ در سال ۲۰۰۰ اشاره کرد،^[۱] که نتایج آن نشان داد بسامد بزرگ‌نمایی (تشدید اصلی) دره، تحت تأثیر خصوصیات مصالح، ساختار پیچیده‌ی نهشته‌ها، پیکربندی و شکل هندسی دره‌های رسوبی است. در سال ۲۰۱۰،^[۲] نیز اعلام شد که در تحریک‌های لرزه‌ی با بسامدهای بالا، بزرگ‌نمایی یک بعدی خاک در

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۳/۷، اصلاحیه ۱۳۹۶/۵/۱۶، پذیرش ۱۳۹۶/۷/۲۲.

DOI:10.24200/J30.2018.2211.2137

است. به‌طور کلی مروری بر مطالعات انجام شده در این زمینه نشان می‌دهد که الگوی بزرگ‌نمایی دره‌های آبرفتی تحت تأثیر دو پدیده‌ی ویژگی‌های آبرفت^[۷-۱۱] و شکل عوارض توپوگرافی ساختگاه موردنظر هستند.^[۱۳-۱۱] لذا در پژوهش حاضر به بررسی و مقایسه‌ی رفتار لرزه‌ی یک بعدی و دو بعدی دره‌ی رسوبی پل خلیج فارس به‌عنوان مطالعه‌ی موردی، با استفاده از نرم‌افزار دو بعدی FLAC^۵ پرداخته شده است که نتایج به‌دست آمده از آن می‌تواند کمک شایانی در طراحی دقیق تر پل‌های واقع بر دره‌ی رسوبی داشته باشد.

۲. معرفی پروژه‌ی پل خلیج فارس

۲.۱. موقعیت جغرافیایی

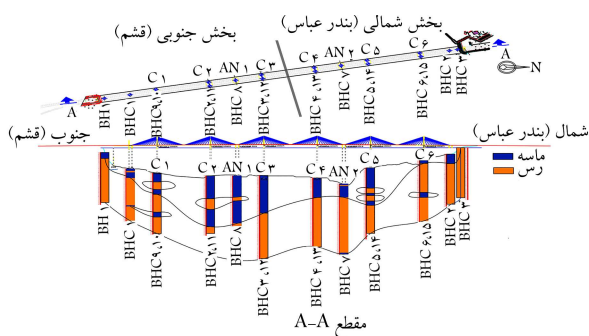
پروژه‌ی پل خلیج فارس در واقع بخشی از پروژه‌ی شبکه‌ی جامع ارتباطی خلیج فارس است که از طریق آن امکان ارتباط ریلی و جاده‌ی برای تردد انواع وسائط نقلیه‌ی سبک، سنگین و قطار بین جزیره‌ی بزرگ قشم و سرزمین اصلی میسر خواهد شد. این پل بزرگ از نوع کابلی و به طول کلی در حدود ۳۴۲۰ متر و شامل ۶ پایه‌ی اصلی (C۱ تا C۶) به فواصل ۳۶۰ متری و دو پایه‌ی مهار پل (AN)^۶ است، به‌طوری که طول خالص پل در دریا حدود ۲۵۰۰ متر است. پل خلیج فارس با مشخصات منحصر به فردش در منطقه‌ی بی‌نظیر است و از پروژه‌های ملی کشور محسوب می‌شود. پل مذکور نیز همانند پل‌های مشابه، بخش‌هایی در خشکی به نام پل دسترسی و بخشی دیگر در دریا دارد که عمق متوسط آب در آن ناحیه در حدود ۳۰ متر است. شالوده‌ی پایه‌های پل از نوع کیسونی^۷ به ابعاد ۳۵ × ۴۵ متر و به ارتفاع ۱۱ متر است. در شکل ۱، محل اجرای پروژه که در حد فاصل بندر لافت در جزیره‌ی قشم و بندر پهل از توابع بندرعباس است، مشاهده می‌شود.^[۱۴] لازم به ذکر است که پل یادشده در حال اجراست.

۲.۲. ویژگی‌های ژئوتکنیکی محل پل

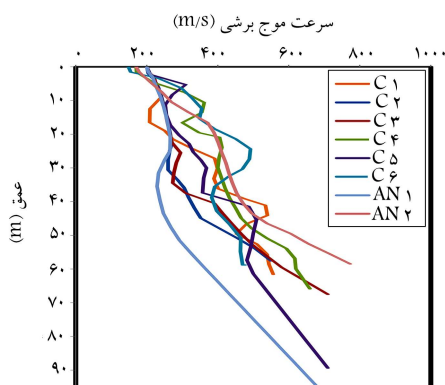
به‌منظور شناسایی ویژگی‌های رسوب‌ها در محل پایه‌های پل، مطالعات ژئوتکنیک جامع در دو فاز مطالعات ژئوفیزیک و حفرگمانه در محل پایه‌های پل انجام شده است. در فاز اولیه، در مسیر پل مطالعات ژئوفیزیک سطحی انجام شده است. مطالعات در ناحیه‌ی به ابعاد ۵۰۰ × ۲۵۰۰ متر در طول مسیر پل با الگوی شبکه‌ی به فواصل ۵۰ متر و با استفاده از سیستم انعکاس صوت برای شناسایی رسوب‌های کف دریا انجام شده است. در این راستا، از نتایج مطالعات ژئوفیزیک در تعیین محل گمانه‌های شناسایی، تفسیر و تکمیل مطالعات ژئوتکنیک استفاده شده است. همچنین برای

تعیین لایه‌بندی خاک، ساختگاه پل از لحاظ ژئوتکنیکی به دو ناحیه‌ی شمالی (سمت بندرعباس) و جنوبی (سمت جزیره‌ی قشم) تقسیم‌بندی و در محل قرارگیری هر پایه‌ی پل (در زیر هر کیسون) دو گمانه با اعماق متغیر ۴۰ تا ۱۰۰ متر حفاری شده است در مجموع به‌منظور انجام مطالعات زیرسطحی، از ۱۵ گمانه به همراه انجام آزمایش نفوذ مخروط با اندازه‌گیری فشار آب منفذی (CPTu) در داخل دریا (فراساحلی) و ۶ گمانه به همراه آزمایش نفوذ استاندارد (SPT) در نزدیکی ساحل استفاده شده است. بر روی نمونه‌های اخذ شده از گمانه‌ها، مجموعه‌ی کاملی از آزمایش‌های آزمایشگاهی (آزمایش برش پری آزمایشگاهی، آزمایش سه‌محوری CU و UU، آزمایش‌های طبقه‌بندی خاک، آزمایش تعیین درصد رطوبت، تراکم، آزمایش شیمیایی، آزمایش‌های تحکیم، آزمایش برش مستقیم و غیره) جهت ارائه‌ی پارامترهای طراحی در گمانه‌های واقع در زیر هر کیسون انجام شده است.^[۱۵] در این راستا، بر مبنای اطلاعات حاصل از مطالعات ژئوتکنیک و با استفاده از قضاوت مهندسی، پروفیل نماینده‌ی لایه‌بندی خاک در زیر هر کیسون تعیین شده است.^[۱۴] شکل ۲، محل قرارگیری گمانه‌ها و پروفیل نماینده‌ی لایه‌بندی خاک در زیر هر کیسون را نشان می‌دهد.

در این راستا، یکی از مشخصات اصلی لایه‌های خاک که مستقیماً در تحلیل‌های پاسخ ساختگاهی دخالت دارد، سرعت موج برشی در هر لایه‌ی خاک است. از آنجا که در پروژه‌های دریایی و به‌خصوص در پروژه‌های فراساحلی، انجام آزمایش‌های تعیین مستقیم سرعت موج برشی در محل، با توجه به امکانات محدود برای انجام آن کار دشواری است، لذا با استفاده از روابط همبستگی مابین سرعت موج برشی و نتایج آزمایش‌های CPTu،^[۱۶] در گمانه‌های حفر شده، متوسط مقادیر سرعت موج برشی محاسبه و در شکل ۳ ارائه شده است. همچنین در جدول ۱، به‌طور خلاصه لایه‌بندی خاک و ویژگی‌های لازم برای انجام تحلیل‌های لرزه‌ی بر مبنای مدل خطی ذکر شده است.



شکل ۲. محل قرارگیری گمانه‌ها و پروفیل ژئوتکنیکی در محل پایه‌های پل.



شکل ۳. نمودار تغییرات متوسط سرعت موج برشی با عمق در محل پایه‌های پل.



شکل ۱. موقعیت و جانمایی پل خلیج فارس.

جدول ۱. لایه بندی خاک و پارامترهای مورد نیاز در تحلیل ها.

پایه های پل	لایه	نوع خاک	ضخامت لایه (m)	سرعت موج برشی متوسط ($\frac{m}{s}$)	وزن مخصوص اشباع ($\frac{g}{cm^3}$)	حد خمیری
C۱	۱	ماسه	۹	۲۲۵٫۳	۱٫۸۹۳	N.P
	۲	رس	۷٫۵	۲۰۸٫۵	۱٫۹۲۹	۲۰
	۳	ماسه	۵	۲۶۲٫۵	۱٫۸۷۵	N.P
	۴	رس	۱۷٫۷	۳۹۸٫۴	۲٫۱۰۲	۱۵
	۵	ماسه	۴٫۵	۵۳۷٫۷	۲٫۰۱۷	N.P
	۶	رس	۱۷٫۵	۵۱۴٫۶	۲٫۱۱۴	۱۲
C۲	۱	ماسه	۲۳	۲۴۷٫۲	۱٫۹۷۲	N.P
	۲	رس	۱۰٫۶	۲۶۸٫۴	۲٫۰۱۴	۱۵
	۳	ماسه	۱۷٫۳	۳۶۳٫۸	۲٫۰۷۵	N.P
	۴	رس	۶٫۷	۵۲۹٫۴	۲٫۱۸	۱۱
C۳	۱	ماسه	۳۷٫۵	۲۶۲٫۷	۲٫۰۶۹	N.P
	۲	رس	۳۰	۵۳۱٫۳	۲٫۱۳۱	۲۰
C۴	۱	ماسه	۱۹٫۶	۳۰۲٫۹	۲٫۱۱	N.P
	۲	رس	۴۶٫۳	۵۰۱٫۲	۲٫۱۴	۱۸
C۵	۱	ماسه	۲۰٫۳	۲۶۳٫۹۲	۲٫۰۶	N.P
	۲	رس	۵	۳۸۹٫۸۶	۲٫۱۴	۱۰
	۳	ماسه	۲٫۴	۳۵۳	۲٫۱۳	N.P
	۴	رس	۵٫۳	۳۶۳٫۴۳	۲٫۱۵	۱۴
	۵	ماسه	۴٫۴	۳۵۷	۲٫۰۶۵	N.P
	۶	رس	۲۸	۴۹۹٫۷۲	۲٫۰۹۵	۲۱
C۶	۱	ماسه	۳٫۲	۱۹۴	۲٫۱	N.P
	۲	رس	۲۸٫۸	۴۰۹	۲٫۰۲۵	۱۸
	۳	ماسه	۵٫۲	۳۸۷	۲٫۰۴	N.P
	۴	رس	۲۳٫۳	۴۵۳	۲٫۰۵۵	۱۶
AN۱	۱	ماسه	۲۱	۲۴۳٫۷	۲٫۰۱۵	N.P
	۲	رس	۴	۲۶۵	۲	۱۴
	۳	ماسه	۲۲٫۵	۲۴۳٫۵	۲٫۰۶۵	N.P
	۴	رس	۴۸	۴۸۸٫۲	۲٫۰۵	۱۴
AN۲	۱	ماسه	۱۳٫۵	۲۴۳٫۷	۲٫۰۴	N.P
	۲	رس	۴۵	۲۴۳٫۵	۲٫۱۳	۱۷

N.P: خاک فاقد حالت خمیری

۳.۲. ویژگی های لرزه خیزی منطقه

محل پروژه، بخشی از کمربند چین خوردگی زاگرس است که جزء مناطق زلزله خیز فلات ایران است. زمین لرزه های به وقوع پیوسته در منطقه مذکور، بزرگای سطحی حدود ۴٫۴ تا ۷٫۶ و عمق کانونی ۶ تا ۳۳ کیلومتر دارند. در قرن اخیر، بیش از ۱۰ زلزله ی ویرانگر با بزرگای بیش از ۶ در ناحیه ی ذکر شده به وقوع پیوسته است. بر این اساس، در ناحیه ی مورد نظر مطالعات ویژه ی تحلیل خطر لرزه یی بر

مبنای گسل های موجود در منطقه به روش احتمالاتی برای دوره ی بازگشت ۹۷۵ ساله انجام شده است.^[۱۴] با توجه به مطالعات لرزه خیزی انجام شده، تاریخچه های زمانی شتاب با توجه به ویژگی های تکنیکی منطقه، بزرگای زلزله، فاصله از گسل و شرایط ساختگاه انتخاب شده اند. برای این منظور از پایگاه های داده های زلزله ها نظیر مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن ایران،^[۱۷] و PEER^[۱۸] استفاده شده است. در بین شتاب نگاشت های مذکور، علاوه بر چند زلزله ی میدان نزدیک، از ۲ رکورد ثبت شده ی بندرعباس و قشم در نزدیکی محل پروژه نیز استفاده شده است.

جدول ۲. تاریخچه‌های زمانی شتاب‌های منتخب برای انجام تحلیل‌های لرزه‌ی پاسخ ساختگاه پل.

ایستگاه	شماره‌ی رکورد	بزرگای سطحی	بزرگای حجمی	فاصله‌ی رومرکزی (Km)	دوره‌ی تناوب مشخص (ثانیه)	نوع خاک (آیین‌نامه‌ی آشتو)
طیس	۱۰۸۴-۱	۷٫۳	۶٫۷	۲۸	۰٫۲۴	B
ناغان	۱۰۵۴-۱	۶٫۱	۵٫۴	۵	۰٫۱۶	B
قشم	۱۰۵۲	۶٫۹	۶٫۲	۷۱	۱٫۰۲	B
قاین	۱۱۳۹	۷٫۱	۶٫۱	۵۴	۰٫۲۸	B
قاین	۱۰۴۳	۶٫۴	۵٫۸	۱۱	۰٫۱۲	B
آب بر	۱۳۶۲-۱	۷٫۷	۶٫۴	۴۳	۰٫۱۲	B
دایهوک	۱۰۸۲-۱	۶٫۷	۶٫۵	-	۰٫۲	B
زنجیران	۱۵۰۲-۹	۵٫۹	۵٫۹	۱۲	۰٫۱۶	B
بندرعباس	۱۰۵۰-۱	۶٫۹	۶٫۲	۴۶	۰٫۱۸	B
بندرعباس	۱۰۰۶-۱	۶٫۱	۹	۳۳	۰٫۱۸	B
کیپ (Cape)	زلزله مندوسینو	۷٫۱	-	۲٫۵	مؤلفه‌ی طولی: ۰٫۲۶ مؤلفه‌ی عرضی: ۰٫۰۸	B
لاسرن (۲۴Lucerne)	زلزله لندرز	۷٫۴	-	۱٫۱	مؤلفه‌ی طولی: ۰٫۰۸ مؤلفه‌ی عرضی: ۰٫۰۸	B
گیلوری (۱ Gilroy Array)	زلزله لوماپریتا	۷٫۱	-	۱۰٫۵	مؤلفه‌ی طولی: ۰٫۲ مؤلفه‌ی عرضی: ۰٫۳۸	B
بم	زلزله‌ی بم	۶٫۶	-	۲	مؤلفه‌ی طولی: ۰٫۱۴ مؤلفه‌ی عرضی: ۱٫۲۴	B

مرزهای جانبی در آن، پاسخ لرزه‌ی دره‌ی رسوبی موردنظر در محل پایه‌های پل به ازاء تحریک‌های متفاوت به‌دست آمده است. به جهت جلوگیری از خطاهای عددی و دقت در شرایط انتقال موج در محیط، ابعاد المان‌های مدل (ΔL) بنا به توصیه‌ی کولیمر و لیسمر^[۱۰، ۱۲] طوری انتخاب شده است که رابطه‌ی ۱ در آن‌ها اقناع شود:^[۱۹ و ۲۰]

$$\Delta L \leq \frac{\lambda}{\lambda_{to10}} = \frac{V_{S\min}}{(\lambda_{to10})f} \quad (1)$$

که در آن، $V_{S\min}$ سرعت موج برشی کمینه در محیط و f بسامد موج لرزه‌ی است. شرایط اولیه در مدل با توزیع خطی تانسور تنش در هر زون و اعمال فشار آب حفره‌ی و فشار سربار ناشی از آب به مرز بالایی تعریف می‌شود. در این راستا، برای تعیین شرایط مرزی در مرحله‌ی استاتیکی، سطوح جانبی در جهت افقی (x) و سطح تحتانی در دو جهت افقی و قائم (x, y) مقید و در مرحله‌ی تحلیل دینامیکی، مرز تحتانی به‌صورت مرز آرام^{۱۱} و مرزهای جانبی به‌صورت مرز میدان آزاد^{۱۲} در نظر گرفته شده است. بارگذاری لرزه‌ی برای مرزهای آرام باید به‌صورت امواج تنش برشی یا تنش فشاری با استفاده از روابط ۲ و ۳ به مدل اعمال

همچنین برای در نظر گرفتن آثار جهت‌پذیری^۸ از هر دو مؤلفه‌ی افقی زلزله‌های میدان نزدیک، نظیر: بم، کیپ، لندرز و لوماپریتا برای انجام آنالیزها استفاده شده است. در جدول ۲، اطلاعات مربوط به هر رکورد، از قبیل: نام ایستگاه، بزرگای فاصله‌ی رومرکزی و نوع خاک محل ثبت رکوردها بر مبنای طبقه‌بندی آیین‌نامه‌ی آشتو ارائه شده است.

۳. مدل‌سازی عددی ساختگاه پل

استفاده از مدل‌سازی عددی می‌تواند ابزار مفیدی برای درک بهتر نقش پارامترهای مؤثر در پاسخ لرزه‌ی ساختگاه‌ها به‌خصوص ساختگاه‌های با هندسه‌ی پیچیده باشد. در این راستا، الگوریتم‌های عددی نظیر اجزاء محدود، تفاضل محدود و اجزاء مرزی بر مبنای مدل‌های رفتاری متفاوت استفاده می‌شوند. در پژوهش حاضر از نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC۲D^[۱۹] به‌منظور مدل‌سازی ستون معادل یک بعدی (برای هر پایه به‌طور مجزا) و دو بعدی (تأثیر توپوگرافی ساختگاه) دره‌ی رسوبی پل خلیج فارس با مدل رفتاری ویسکو-کشسان^۹ استفاده شده است. روند مدل‌سازی در نرم‌افزار مذکور به‌گونه‌ی است که پس از معرفی خصوصیات لایه‌های خاک به مدل و تعیین

شود: [۱۹]

$$\sigma_n = \alpha \rho c_p v_n \quad (2)$$

$$\sigma_s = \alpha \rho c_s v_s \quad (3)$$

که در آن‌ها، σ_n و σ_s به ترتیب تنش فشاری و برشی، c_p و c_s سرعت انتشار امواج فشاری و برشی در محیط، v_n و v_s تاریخچه‌ی زمانی سرعت موج فشاری و برشی اعمالی و ρ چگالی جرمی خاک است. در مطالعه‌ی حاضر، به جهت استفاده از مؤلفه‌ی افقی شتاب‌نگاشت‌ها، تنش برشی برای مدل محاسبه و به مرز زیرین اعمال شده است. ضریب ثابت α در روابط مذکور به منظور تصحیح اثر جذب بخشی از تنش اعمال شده توسط میراگرهای ویسکوز در مرز زیرین مدل عددی است که معمولاً عدد ۲ در نظر گرفته می‌شود. [۱۹] با استفاده از مرز زیرین، مشکل انعکاس امواج در مرز پایینی برطرف می‌شود، اما این احتمال وجود دارد که به واسطه‌ی شرایط مرزی، پاسخ تغییرمکان در مرز زیرین پس از انجام تحلیل دینامیکی دقیقاً همانی نباشد که در زلزله‌ی ورودی استفاده شده است. ازاین رو، ضروری است که مقدار ضریب α در این رابطه، با کنترل نتایج تحلیل‌های ستون معادل با مدل یک بعدی تدقیق شود. [۱۹] همچنین به منظور در نظر گرفتن استهلاک انرژی امواج در مدل عددی، از میرایی رایلی^[۱۹] استفاده شده است که مقدار آن در بازه‌ی ۲ تا ۵ درصد میرایی بحرانی برای مصالح ژئوتکنیکی توصیه شده است. [۱۹] در واقع میرایی رایلی شامل میرایی وابسته به سختی و جرم سیستم موردنظر است که میرایی وابسته به جرم در کوتاه‌مدت و میرایی وابسته به سختی در گام‌های زمانی طولانی‌تر در سیستم مؤثر خواهد بود. [۱۹] لذا، به منظور کالیبره‌شدن مدل ستون معادل یک بعدی (با کمک برنامه‌ی FLAC) و مدل یک بعدی تحلیل ساختگاه (با کمک نرم‌افزار Deepsoil) از مقدار میرایی رایلی برابر ۲٪ و از همین مقدار در مدل‌سازی دو بعدی دره‌ی رسوبی نیز استفاده شده است. همچنین با فعال کردن تحریک دینامیکی و اعمال شتاب گرانشی در هنگام تحلیل، مدل تحت بار دینامیکی ناشی از شتاب گرانش قرار می‌گیرد و به علت عدم وجود میرایی، ارتعاش آن تا بی‌نهایت ادامه خواهد داشت. در این حالت با محاسبه‌ی زمان یک دور نوسان کامل سیستم، بسامد طبیعی مدل به دست می‌آید، که در پژوهش حاضر مقدار آن برای ستون معادل یک بعدی در گمانه‌های حفر شده در محل پایه‌های پل در حدود ۱/۲۵-۱/۷۵ هرتز و برای مدل دو بعدی در حدود ۲ هرتز به دست آمده است. در ادامه، به منظور ایجاد تعادل مدل قبل از اعمال بارگذاری لرزه‌یی نیروهای نامتعادل‌کننده، مدل بررسی و تعادل اولیه در آن با تنظیم شرایط مرزی و شرایط اولیه برقرار شده است. سپس جابه‌جایی‌های افقی و قائم اولیه برای انجام تحلیل‌های دینامیکی صفر شده است. [۱۹]

۱.۳. اعتبارسنجی مدل عددی

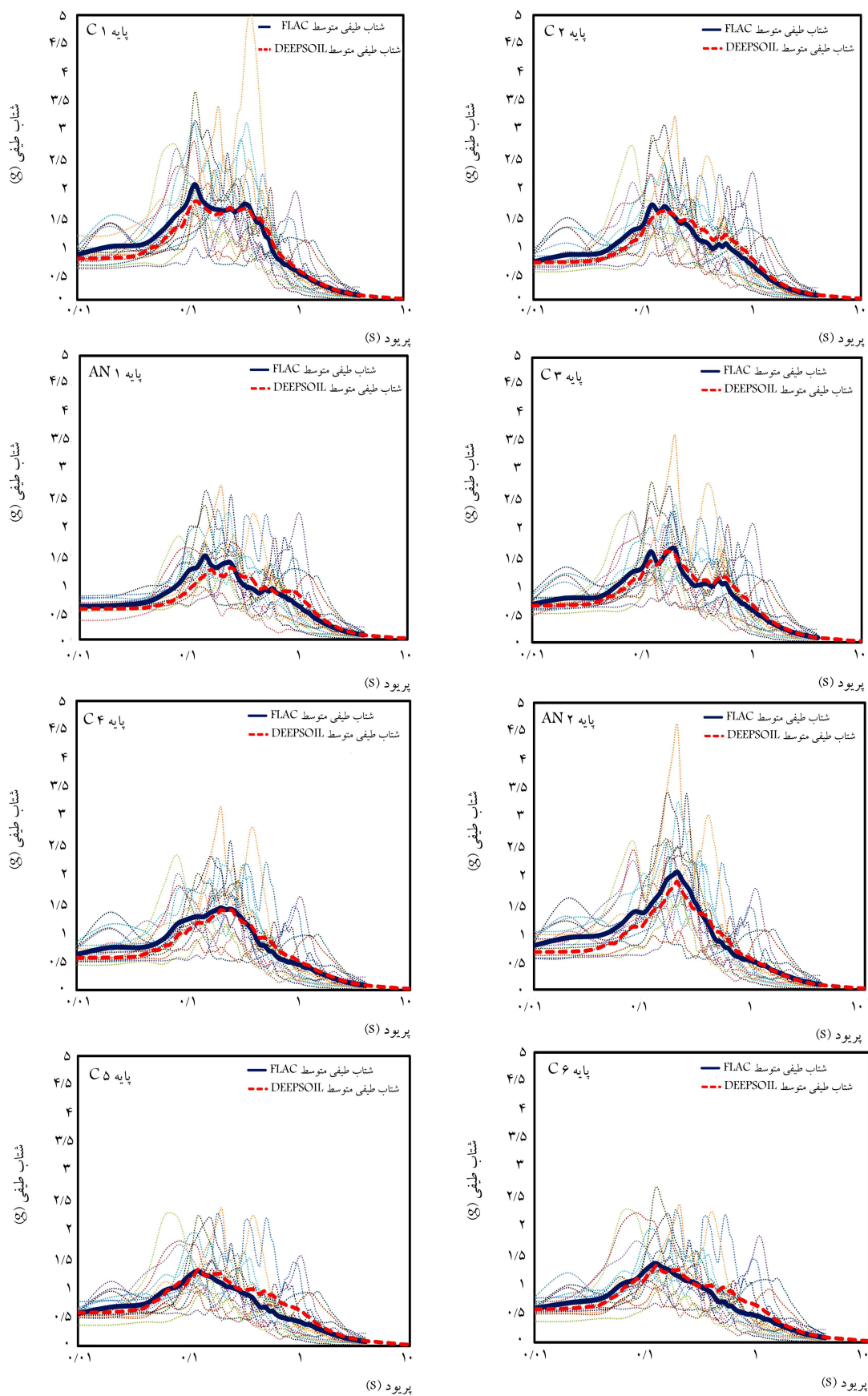
برای کالیبره کردن مدل عددی، رفتار مصالح و همچنین شرایط مرزی در تحلیل‌های پاسخ زمین، صحت‌سنجی مدل عددی موردنیاز است. برای این منظور، پاسخ‌های مدل ستون معادل یک بعدی حاصل از نرم‌افزار FLAC۲D با مدل یک بعدی Deepsoil، [۲۱] برای تمامی پایه‌های پل با روش خطی با سنگ بسترکشنان مقایسه شده است، تا مقدار صحیح ضریب α در رابطه‌ی ۳ استخراج شود و سپس با مقدار α به دست آمده، اقدام به مدل‌سازی صحیح مرز زیرین (مرز آرام) در مدل دو بعدی دره‌ی رسوبی شود. برای مدل‌سازی در نرم‌افزار Deepsoil، تعداد لایه‌های مورد استفاده در پروفیل با توجه به لایه‌بندی ارائه شده در مطالعات ژئوتکنیک به طور

جداگانه برای هر پروفیل ژئوتکنیکی در محل هر پایه‌ی پل مشخص و تعریف شده است. در مدل‌سازی مذکور، سطح آب زیرزمینی بر روی سطح زمین در نظر گرفته شده و سپس متوسط طیف‌های پاسخ حاصل از تحلیل‌ها با کمک نرم‌افزار یک بعدی Deepsoil در محل هر پایه‌ی پل بر مبنای ۱۸ تحریک ذکر شده در جدول ۲ محاسبه شده است.

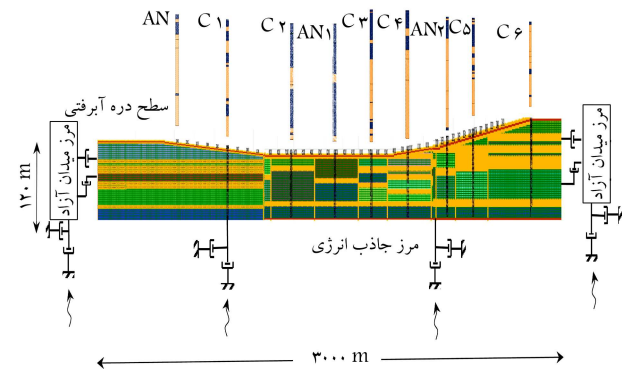
همچنین در برنامه‌ی FLAC، ستونی از خاک به عرض واحد از پروفیل‌های ژئوتکنیکی در محل هر پایه مدل شده و تحت تحریک‌های لرزه‌یی به صورت امواج تنشی قرار گرفته است. در این راستا، متوسط طیف‌های پاسخ به دست آمده از دو نرم‌افزار در محل هر پایه‌ی پل مقایسه شده است، تا ضریب α مناسب و برای استفاده در رابطه‌ی ۳ به دست آید. با بررسی تمامی نتایج به دست آمده و انطباق آن‌ها با یکدیگر، این ضریب برابر با ۱/۱ به دست آمده و مدل براساس آن کالیبره شده است. در شکل ۴، نتایج مقایسه‌ی ذکر شده قابل مشاهده است.

۲.۳. مدل‌سازی دو بعدی دره‌ی رسوبی

حرکت زمین در یک ساختگاه نه فقط تحت تأثیر ویژگی‌ها و ضخامت لایه‌های خاک است، بلکه متأثر از شکل توپوگرافی، بی‌قاعدگی‌ها و ناهمواری‌های سطح زمین نیز است. شکل ناهمواری‌های عوارض توپوگرافی به دلیل ایجاد هم‌گرایی (در تپه‌ها) و واگرایی امواج (در دره‌ها) موجب تشکیل امواج سطحی می‌شوند که می‌توانند تأثیرهای متفاوتی در الگوی بزرگ‌نمایی و جابه‌جایی سطح زمین داشته باشند. [۲۲] اگرچه به منظور تعیین پاسخ لرزه‌یی یک ساختگاه می‌توان از مدل‌های ساده‌ی یک بعدی با لایه‌های افقی استفاده کرد، ولی از آنجا که بسیاری از رسوب‌های آبرفتی در عوارض توپوگرافی دره‌یی شکل واقع شده‌اند، لازم است در طراحی‌های لرزه‌یی سازه‌های واقع بر آن، از آنالیزهای دو و یا سه بعدی استفاده شود. [۲۳] برای این منظور، مدل دو بعدی از دره‌ی رسوبی مورد مطالعه به طول ۳۰۰ متر و عمق ۱۲۰ متر با استفاده از برنامه‌ی FLAC۲D تهیه شده است. البته ذکر این نکته لازم است که طول خالص پل خلیج فارس در دریا برابر ۲۵۰ متر است. در شکل ۵، مدل دو بعدی به همراه شرایط مرزی آن قابل مشاهده است. در این مرحله نیز مدل تحت ۱۸ تحریک لرزه‌یی قرار گرفته و به ازاء هر تحریک، پاسخ طیفی شتاب در محل پروفیل ژئوتکنیکی هر پایه به دست آمده است. سپس متوسط پاسخ طیفی شتاب برای تمامی تحریک‌ها حاصل شده است که در شکل ۶، نتایج مدل ستون معادل یک بعدی و دو بعدی در محل هر پایه‌ی پل با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد با اینکه تحلیل‌های یک بعدی به دلیل سهولت در استفاده از آن در سطوح وسیعی از مسائل ژئوتکنیک لرزه‌یی به کار می‌روند، اما نتایج حاصل نشان از تفاوت قابل توجه پاسخ‌های دو مدل ستون معادل یک بعدی و دو بعدی در دره‌ی آبرفتی با شکل نامنظم دارد. در واقع تداخل سریع مجموعه‌ی امواج درون صفحه‌یی پراکنده شده است، که امواج انعکاس یافته، تبدیل مود و تفرق یافته است و سطحی را در بر می‌گیرند، و میدان جابه‌جایی بسیار آشفته‌یی را می‌توانند بر روی عارضه ایجاد کنند. [۲۳، ۲۲] ایجاد چنین الگوهای رفتاری پیچیده‌یی منجر به تفاوت‌های قابل ملاحظه‌یی بین امواج گسیل شده از چشمه‌ی لرزه‌یی و امواج رسیده به سطح زمین خواهند شد. به عبارتی، تحلیل دو بعدی حوضه‌های رسوبی به دلیل در نظر گرفتن چنین پیچیدگی‌های قابل ملاحظه‌یی در الگوهای تقویت لرزه‌یی، نتایج واقع‌بینانه‌تری نسبت به تحلیل‌های یک بعدی ارائه می‌دهند. [۲۳] از طرفی ایجاد امواج پیچیده می‌تواند پتانسیل حرکت‌های ناهمسان بزرگ را در سازه‌ها با دهانه‌ی بزرگ نظیر پل‌های واقع بر چنین دره‌هایی افزایش دهد که این حرکت‌های



شکل ۴. پاسخ‌های شتاب طیفی مدل ستون معادل یک بعدی در FLAC و مقایسه‌ی متوسط پاسخ‌ها با مدل یک بعدی DEEPSOIL.



شکل ۵. مدل دو بعدی دره آبرفتی پل خلیج فارس با استفاده از نرم افزار $FLAC^{2D}$.

ناهمسان می‌تواند منجر به بارگذاری‌های پیچیده و در نهایت ایجاد خرابی عمده در سازه‌های مذکور شود. لذا با توجه به حساسیت پایه‌های سازه‌هایی نظیر پل‌ها به تغییر مکان‌ها، نشست‌ها و عواقب آثار مخرب آن‌ها در عرشی پل‌ها، اهمیت در نظر گرفتن پاسخ‌های ناهمسان سطح زمین در طراحی لرزه‌ی چنین سازه‌هایی ضروری است.

۴. بررسی نتایج تحلیل‌های عددی

۱.۴. نسبت بزرگ‌نمایی

در مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌ی، ارزیابی نسبت بزرگ‌نمایی امواج می‌تواند راهی برای تخمین منطقی از آثار لرزه‌ی یک ساختمان باشد. در پژوهش حاضر، نسبت بزرگ‌نمایی به صورت نسبت پاسخ طیفی حاصل از مدل دو بعدی به مدل ستون معادل یک بعدی در یک نقطه‌ی یکسان تعریف شده است. در شکل ۷، نسبت بزرگ‌نمایی برای تمامی تحریک‌های اعمالی به صورت جداگانه در برابر دوره‌ی تناوب ترسیم و سپس متوسط نسبت بزرگ‌نمایی در محل هر پایه‌ی پل ارائه شده است. همچنین در جدول ۳، روابط ریاضی مناسب و منطبق بر مقادیر متوسط نسبت بزرگ‌نمایی مدل دو بعدی به ستون معادل یک بعدی در محل پروفیل هر پایه‌ی پل ارائه شده است.

نتایج حاصل گویای این مطلب است که در محدوده‌ی دوره‌های تناوب ۰/۵ تا ۱ ثانیه در یک پروفیل مشخص، اثر بزرگ‌نمایی دو بعدی ساختمان، آشکارتر از نتایج حاصل از مدل ستون معادل یک بعدی است. در صورتی که در دوره‌های تناوب کوچک‌تر از ۰/۵ ثانیه، این موضوع کاملاً برعکس است. همچنین در دوره‌های تناوب بالاتر از حدود ۱ ثانیه، نتایج مدل‌های ستون معادل یک بعدی و دو بعدی تقریباً بر یکدیگر منطبق هستند. مطابق ادبیات فنی در دسترس، نتایج به دست آمده از پژوهشی در سال ۲۰۱۵^[۶] بر روی دره‌ی رسوبی فوژو نیز حکایت از تقویت کاملاً آشکار دوره‌های تناوب ۰/۵ تا ۲ ثانیه در مدل دو بعدی دارد. در واقع، در طراحی سازه‌ها با دوره‌ی تناوب بلند، نظیر پل‌ها، اکتفا به نتایج یک بعدی می‌تواند نتایج دور از واقعیت ارائه دهد. علت این موضوع را می‌توان در اثر دو پدیده‌ی اختلاف امپدانس^{۱۴} بین لایه‌های آبرفتی و شکل عارضه‌ی توپوگرافی دره‌ی شکل دانست. از این رو، مطالعات نشان داده است که نسبت‌های بزرگ‌نمایی حرکت زمین می‌تواند نشأت گرفته از اختلاف شدید بین خصوصیات فیزیکی خاک باشد.^[۲۲]

بنابراین می‌توان اختلاف امپدانس بین لایه‌ها و یا به عبارتی، نسبت امپدانس‌های

کم در لایه‌های پایین را از جمله عوامل مهم ایجاد پاسخ‌های ناهمسان در محل پایه‌های پل خلیج فارس دانست. از طرفی پس از برخورد امواج حجمی با سطح توپوگرافی آبرفتی دره‌ی شکل، تمرکز امواج در پستی و بلندی‌های دره، سبب ایجاد امواج سطحی رایلی در این نقاط شده است که موجب پراکنش امواج لرزه‌ی و بزرگ‌نمایی آن‌ها خواهد شد.^[۲۵،۶،۴] نتایج به دست آمده حاکی از تشدید امواج تابیده شده و بزرگ‌نمایی در سطح دره‌ی رسوبی در هر دو مدل یک بعدی و دو بعدی دارد و در عین حال بیانگر تأثیر عمیق پیچیدگی لایه‌بندی خاک هستند. با اینکه در بعضی شرایط مناسب، بزرگ‌نمایی می‌تواند از مدل‌های یک بعدی استخراج شود، اما از آنجا که ناهمگونی‌های جانبی در دره‌های آبرفتی می‌تواند موجب افزایش تمرکز و تولید امواج سطحی شود، لذا تخمین‌های انجام شده بر مبنای مدل‌های یک بعدی ممکن است نتایج گمراه‌کننده‌ی به همراه داشته باشد. از این رو، برای دستیابی به نتایج قابل اعتماد، استفاده از روش‌های دو بعدی در طراحی پایه‌های پل‌های طولی توصیه می‌شود.

۲.۴. بیشینه‌ی شتاب (PGA)

معمول‌ترین پارامتر مورد استفاده در طراحی سازه‌های مهندسی استفاده از بیشینه‌ی شتاب سطح زمین (PGA) است. اگرچه پارامتر PGA به تنهایی قادر به بیان پیچیدگی‌های حرکت زمین یا مفاهیم وابسته به محتوای بسامدی زمین‌لرزه‌ها نیست.^[۴] ولی به عنوان شاخص طراحی سازه‌ها نظیر پل‌ها در زمره‌ی مهم‌ترین پارامترها در تحلیل‌های لرزه‌ی محسوب می‌شود. در شکل ۸، بیشینه‌ی شتاب زمین در دو مدل ستون معادل یک بعدی و دو بعدی نسبت به بیشینه‌ی شتاب افقی زمین‌لرزه‌های اعمالی نشان داده شده است. به طور کلی نتایج به دست آمده نشان از بزرگ‌نمایی امواج در محل تمامی پایه‌ها برای هر دو مدل دو بعدی و ستون معادل یک بعدی نسبت به زلزله‌های ورودی دارد، اما از طرفی در محل پایه‌های پل، در مدل‌های ستون معادل یک بعدی و دو بعدی نتایج متفاوتی به دست آمده است که باید در طراحی پل‌های خلیج فارس مد نظر قرار گیرد.

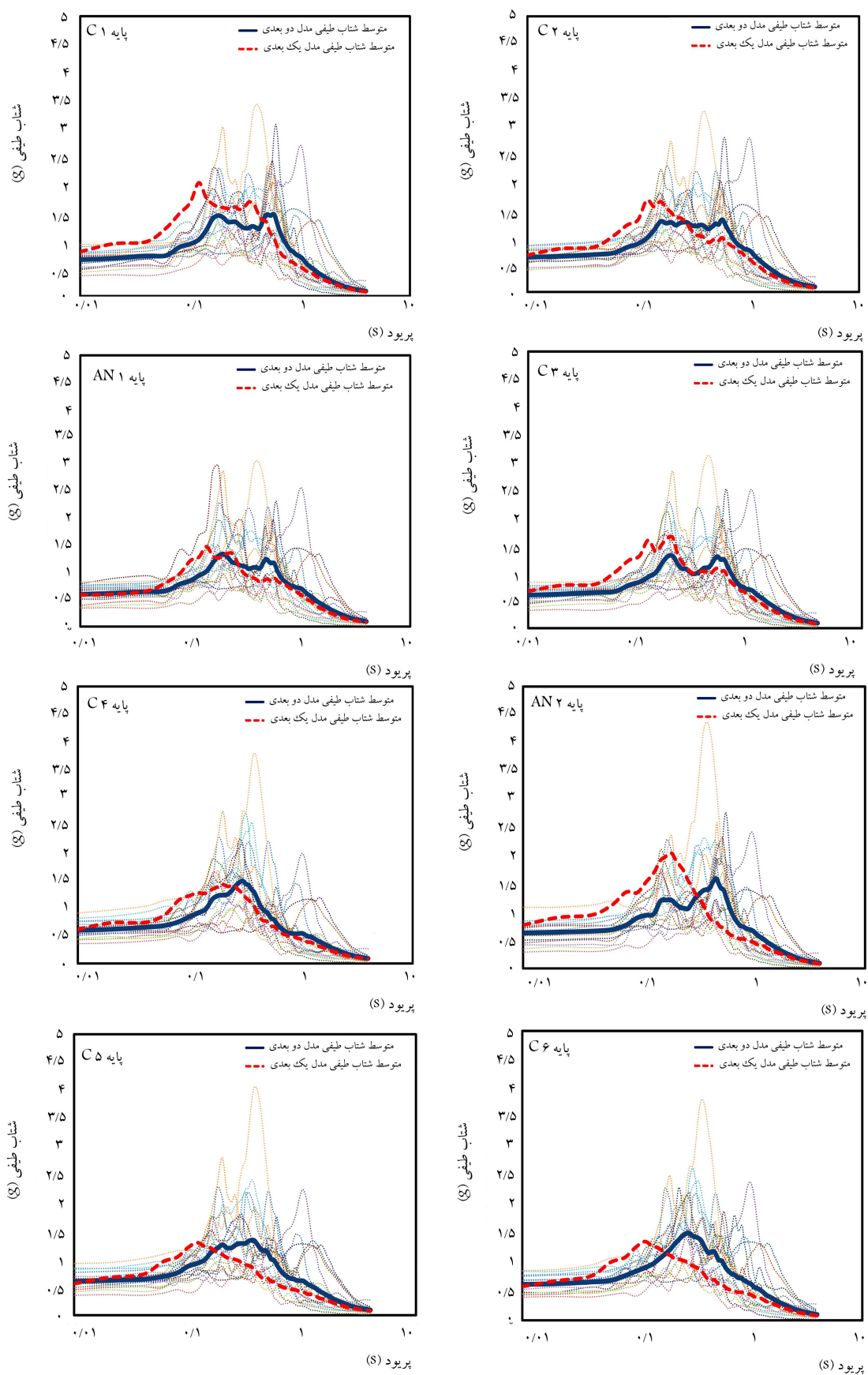
۳.۴. دوره‌ی تناوب مشخصه‌ی ساختمان

چنانچه تمامی نقاط سطح زمین، که تحت تأثیر دره‌ی رسوبی قرار دارند، به صورت هم‌فاز حرکت کنند و همچنین پتانسیل ایجاد بزرگ‌نمایی امواج بزرگ‌تر از ۱ را داشته باشند، دوره‌ی تناوبی که بیشینه‌ی پتانسیل بزرگ‌نمایی در یک نقطه‌ی خاص در سطح دره‌ی رسوبی در آن ایجاد شده است، را می‌توان دوره‌ی تناوب مشخصه‌ی آن دره‌ی رسوبی دانست.^[۲۳]

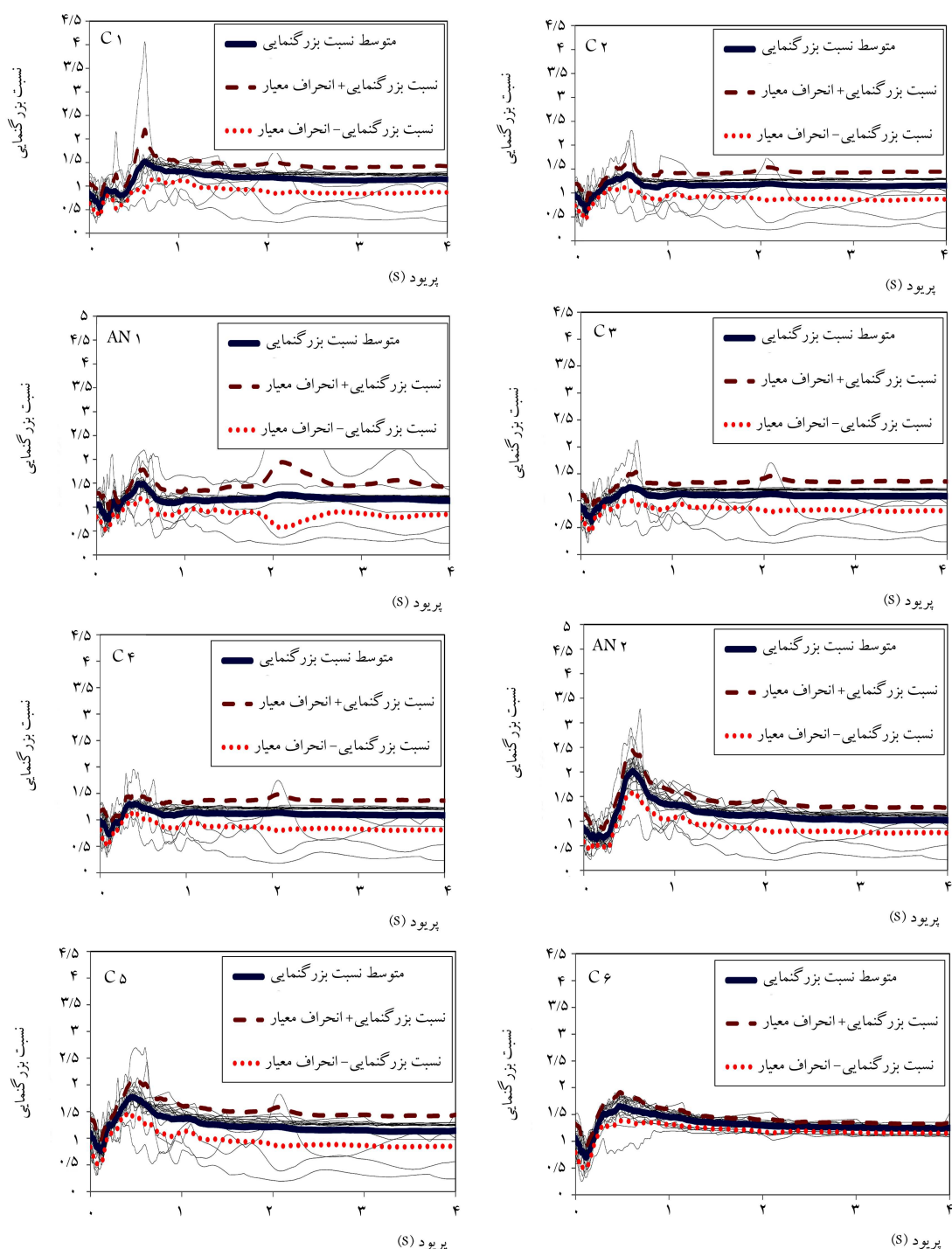
در شکل ۹، دوره‌ی تناوب مشخصه‌ی ساختمان مورد مطالعه در دو مدل ستون معادل یک بعدی و دو بعدی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در مدل ستون معادل یک بعدی، تشدید در مرکز دره‌ی رسوبی در دوره‌های تناوب بیشتری نسبت به کناره‌های دره‌ی رسوبی روی می‌دهد، در حالی که در مدل دو بعدی دوره‌ی تناوب، تشدید کناره‌ها بیشتر از مرکز دره است. به طور کلی دوره‌ی تناوب مشخصه‌ی ساختمان در مدل دو بعدی نسبت به مدل ستون معادل یک بعدی افزایش یافته است.

۴.۴. مقایسه با آیین‌نامه‌ی آشتو

از آنجایی که طراحی پل خلیج فارس بر مبنای آیین‌نامه‌ی آشتو^{۱۵} برای زلزله با



شکل ۶. پاسخ‌های شتاب طیفی مدل دو بعدی حاصل از برنامه‌ی FLAC و مقایسه‌ی متوسط پاسخ‌های مدل دو بعدی و مدل ستون معادل یک بعدی.



شکل ۷. نسبت بزرگ نمایی مدل دو بعدی به مدل ستون معادل یک بعدی در محل پایه‌های پل به همراه منحنی‌های انحراف معیار که به صورت خط چین نشان داده شده است.

خاک منطقه در محل پایه‌های C1، C2، C3، C5 و AN1 از نوع خاک D و در محل پایه‌های C4، C6 و AN2 از نوع خاک C هستند. نتایج به دست آمده گویای محافظه کارانه بودن نتایج تحلیل یک بعدی و دو بعدی به روش خطی نسبت به طیف طرح ارائه شده در آیین‌نامه‌ی آشتو به خصوص در دوره‌های تناوب کمتر از ۱ ثانیه است که به منظور طراحی سازه‌های مهم، نظیر پل‌ها، انجام مطالعات ویژه لرزه‌خیزی و به دنبال آن مطالعات ویژه ساختگاه ضروری است.

دوره‌ی بازگشت ۹۷۵ ساله انجام شده است، طیف‌های به دست آمده از تحلیل‌های یک بعدی و دو بعدی باید با طیف طرح آیین‌نامه‌ی آشتو مقایسه شوند تا جایگاه طیف‌های حاصل نسبت به طیف طرح آیین‌نامه مشخص شود.

در شکل ۱۰، با در نظر گرفتن لرزه‌خیزی و نوع خاک منطقه، نتایج تحلیل‌های انجام شده با طیف آیین‌نامه‌ی آشتو مقایسه شده است. براساس معیار طبقه‌بندی آشتو و با در نظر گرفتن متوسط سرعت موج برشی در ۳۰ متر اول هر پروفیل ژئوتکنیکی،

جدول ۳. رابطه‌ی بزرگ‌نمایی برآزش شده بر نسبت متوسط شتاب‌های طیفی مدل دو بعشی به مدل ستون معادل یک بعشی در محل پایه‌های پل.

$AF = a + bT + cT^2 + dT^3 + eT^4 + fT^5 + gT^6 + hT^7 + iT^8 + jT^9 + kT^{10} \pm \sigma(Y)$											
نام پایه	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
C1	۰٫۸۴۱۴	-۲٫۷۰۰۶	۱۴٫۹۴۶۷	-۲۱٫۶۱۳۹	۹٫۵۵۹۳	۵٫۰۸۹۲	-۷٫۷۳۰۱	۳٫۷۹۴۶	-۰٫۹۵۶۵	۰٫۱۲۴۵	-۰٫۰۰۰۶
C2	۰٫۹۴۷۲	-۴٫۳۹۹۷	۳۶٫۴۴۷۷	-۹۹٫۶۴۲۷	۱۳۸٫۷۳۷۷	-۱۱۳٫۳۴۹۶	۵۷٫۶۰۲۷	-۱۸٫۴۵۵۱	۳٫۶۲۸۰	-۰٫۳۹۹۸	۰٫۰۱۸۹
AN1	۱٫۰۶۱۰	-۵٫۸۵۵۶	۴۷٫۰۲۱۳	-۱۳۳٫۸۳۴۴	۱۹۴٫۲۷۹۲	-۱۶۴٫۷۱۹۹	۸۶٫۴۴۷۸	-۲۸٫۴۷۸۸	۵٫۷۳۴۷	-۰٫۶۴۵۲	۰٫۰۳۱۱
C3	۰٫۸۶۹۲	-۳٫۲۰۰۳	۲۶٫۹۲۳۲	-۷۲٫۶۳۰۱	۹۹٫۸۸۳۰	-۸۰٫۷۷۵۶	۴۰٫۷۰۰۴	-۱۲٫۹۴۵۴	۲٫۵۲۸۹	-۰٫۲۷۷۱	۰٫۰۱۳۰
C4	۰٫۹۱۹۹	-۲٫۶۱۵۴	۲۶٫۸۴۴۸	-۸۰٫۲۶۵۴	۱۱۸٫۵۸۲۹	-۱۰۱٫۲۵۷۴	۵۳٫۲۶۶۷	-۱۷٫۵۴۶۶	۳٫۵۲۸۷	-۰٫۳۹۶۳	۰٫۰۱۹۰
AN2	۱٫۰۹۸۹	-۱۲٫۶۱۶۹	۸۵٫۷۶۹۸	-۲۰۹٫۶۷۹۶	۲۶۶٫۷۱۱۲	-۲۰۱٫۷۲۴۷	۹۵٫۸۴۰۶	-۲۸٫۹۳۰۴	۵٫۳۹۲۳	-۰٫۵۶۶۴	-۰٫۰۲۵۷
C5	۱٫۰۲۹۶	-۴٫۹۱۷۹	۴۸٫۸۱۲۶	-۱۳۹٫۹۰۹۶	۱۹۸٫۵۹۵۸	-۱۶۳٫۹۲۳۴	۸۳٫۸۳۶۱	-۲۶٫۹۷۵۶	۵٫۳۱۸۸	-۰٫۵۸۷۳	۰٫۰۲۷۸
C6	۰٫۹۶۳۰	-۴٫۱۷۵۵	۴۲٫۱۹۳۸	-۱۱۹٫۲۴۵۶	۱۶۸٫۱۴۶۷	-۱۳۸٫۶۰۹۴	۷۱٫۰۰۵۱	-۲۲٫۹۱۸۰	۴٫۵۳۵۹	-۰٫۵۰۲۹	۰٫۰۲۳۹

(Y)σ، انحراف معیار تابع بزرگ‌نمایی که در شکل Y به صورت خط‌چین نمایش داده شده است.

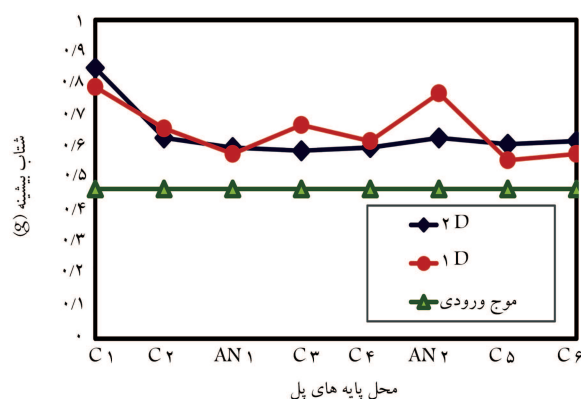
سطح زمین نیز باشد. لذا در پژوهش حاضر، دره‌ی رسوبی پل خلیج فارس به‌عنوان مطالعه‌ی موردی بررسی شده است. در این راستا، به کمک نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC2D، دو مدل ستون معادل یک بعشی (برای پروفیل خاک هر پایه) و دو بعشی (کل دره‌ی آبرفتی) بر مبنای رفتار ویسکو - کشسان تهیه شده است. با توجه به مطالعات لرزه‌خیزی انجام‌شده در محل، از ۱۸ تحریک ورودی مختلف برای بررسی پاسخ لرزه‌ی مدل‌ها استفاده شده است. از جمله مهم‌ترین نتایج حاصل از پژوهش حاضر می‌توان به این موارد اشاره کرد:

۱. در مقایسه‌ی نسبت شتاب طیفی به‌دست‌آمده از مدل دو بعشی به مدل ستون معادل یک بعشی (نسبت بزرگ‌نمایی) مشاهده می‌شود که در محدوده دوره‌ی تناوب ۰٫۵ تا ۱ ثانیه، اثر بزرگ‌نمایی دو بعشی ساختگاه نمایان‌تر از نتایج حاصل از مدل ستون معادل یک بعشی در یک پروفیل مشخص است. در صورتی‌که در دوره‌های تناوب کوچک‌تر از ۰٫۵ ثانیه، این موضوع کاملاً برعکس است. همچنین در دوره‌های تناوب بالاتر از حدود ۱ ثانیه، نتایج مدل‌های ستون معادل یک بعشی و دو بعشی تقریباً بر یکدیگر منطبق هستند. در واقع، در طراحی سازه‌ها با دوره‌ی تناوب بلند، نظیر پل‌ها، اکتفا به نتایج یک بعشی می‌تواند نتایج دور از واقعیت ارائه دهد.

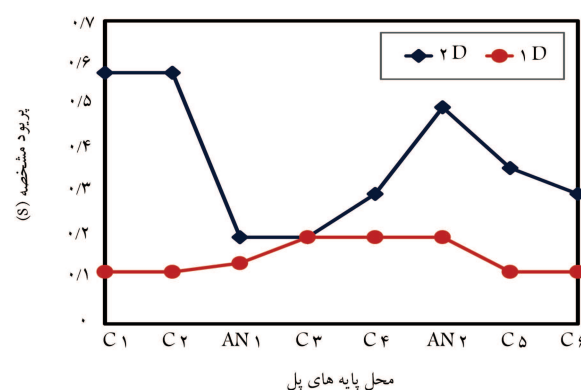
۲. با توجه به پاسخ‌های ناهمسان مشاهده شده، می‌توان بیان کرد که اختلاف امپدانس بین لایه‌های آبرفتی و همچنین شکل عارضه‌ی توپوگرافی دره‌ی شکل و انتشار امواج سطحی رایلی، علت اصلی ایجاد بزرگ‌نمایی و تفاوت مقادیر پاسخ‌ها در محل پایه‌های پل است.

۳. مقایسه‌ی مقادیر بیشینه‌ی شتاب (PGA) به‌دست‌آمده از تحلیل‌های یک بعشی (ستون معادل) و دو بعشی، حاکی از افزایش مقادیر متوسط PGA در محل تمامی پایه‌ها در هر دو مدل یک بعشی و دو بعشی نسبت به زلزله‌های ورودی است. ضمن اینکه با توجه به محل قرارگیری پایه‌ها در حوضه‌ی دره‌ی آبرفتی پل، در مدل‌های یک بعشی و دو بعشی نتایج متفاوتی به‌دست آمده است که می‌تواند در طراحی پل مهم باشد.

۴. در مدل ستون معادل یک بعشی، تشدید در مرکز دره‌ی رسوبی در دوره‌های تناوب بیشتری نسبت به کناره‌های دره می‌دهد؛ در حالی‌که در مدل دو بعشی، دوره‌ی تناوب تشدید در کناره‌ها بیشتر از مرکز دره است. اما در مجموع،



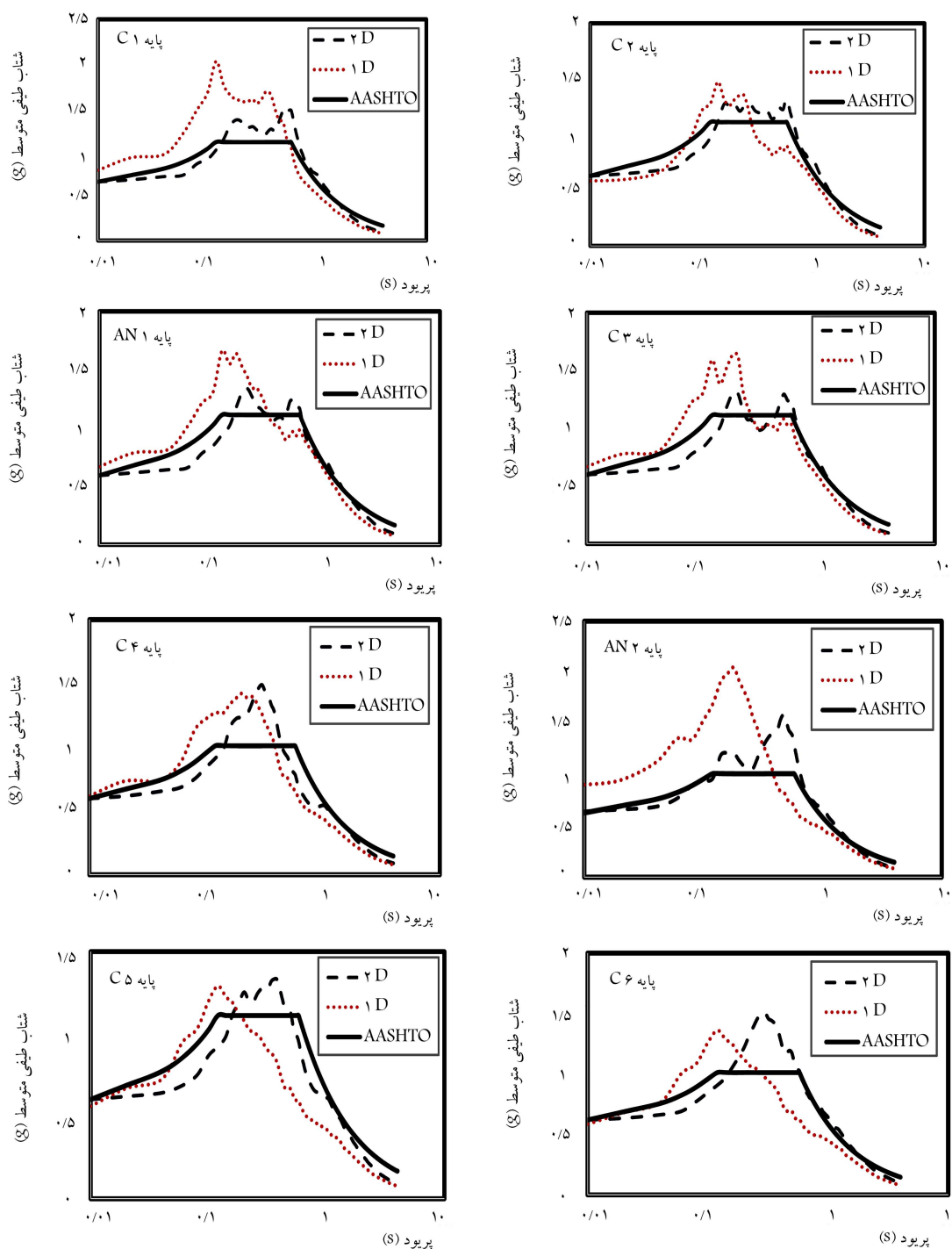
شکل ۸. مقایسه‌ی متوسط شتاب بیشینه در دو مدل ستون معادل یک بعشی و دو بعشی با موج ورودی در محل پایه‌های پل.



شکل ۹. مقایسه‌ی دوره‌ی تناوب مشخصه‌ی ساختگاه در دو مدل ستون معادل یک بعشی و دو بعشی در محل پایه‌های پل.

۵. نتیجه‌گیری

حرکت زمین در یک ساختگاه نه فقط تحت تأثیر ویژگی‌ها و ضخامت لایه‌های خاک است، بلکه می‌تواند متأثر از شکل عوارض توپوگرافی، بی‌قاعدگی‌ها و ناهمواری‌های



شکل ۱۰. مقایسه‌ی متوسط شتاب طیفی دو مدل یک بعدی و دو بعدی با طیف طرح آیین‌نامه‌ی آشتو.

در انتها باید خاطرنشان کرد که در پروژه‌های طولی نظیر پل‌ها، که بر روی دره‌های رسوبی آبرفتی احداث می‌شوند، به دلیل ایجاد میدان‌های پیچیده‌ی امواج، وجود لایه‌های متعدد و مختلف آبرفتی با اختلاف سختی‌های متفاوت و همچنین شکل هندسی پیچیده‌ی عارضه، اکتفا به نتایج تحلیل‌های لرزه‌یی پاسخ زمین بر مبنای مدل‌سازی یک بعدی ساختگاه به ازاء هر پایه می‌تواند نتایج غیرواقعی به‌منظور طراحی چنین سازه‌هایی ارائه دهد. لذا توصیه می‌شود در کنار آثار بزرگ‌نمایی امواج مشاهده شده در تحلیل‌های یک بعدی، از تحلیل‌های دو

دوره‌ی تناوب مشخصه‌ی ساختگاه در مدل دو بعدی نسبت به مدل ستون معادل یک بعدی افزایش یافته است.

۵. نتایج به‌دست آمده از مقایسه با طیف طرح آیین‌نامه‌ی آشتو، گویای محافظه‌کارانه بودن نتایج تحلیل یک بعدی و دو بعدی به روش خطی نسبت به طیف طرح ارائه شده در آیین‌نامه‌ی آشتو به‌خصوص در دوره‌های تناوب کمتر از ۱ ثانیه با توجه به نوع خاک منطقه و شدت موج ورودی است.

تشکر و قدرانی

در پایان، نویسندگان نوشتار حاضر بر خود واجب می‌دانند که مراتب تشکر و قدرانی خود را از شرکت مهندسان مشاور ساحل برای دراختیار گذاشتن اطلاعات مورد نیاز پژوهش حاضر اعلام دارند.

پانوشتها

1. sedimentary basins
2. Taipei
3. Fuzhou
4. predominant period
5. fast lagrangian analysis of continua (Itasca Consulting Group)
6. anchor pier
7. caisson
8. directivity effects
9. visco elastic
10. Kuhlemeyer and Lysmer
11. quiet boundary
12. free-field
13. rayleigh
14. impedance contrast
15. American association of state highway and transportation of ficials

منابع (References)

1. Sokolov, V.Y., Loh, C.H., Eeri, M. and et al. "Empirical study of sediment-filled basin response (the case of Taipei city)", *Earthquake Spectra*, **16**(3), pp. 681-707 (2000).
2. Gelagoti, F., Kourkoulis, R., Anastasopoulos, I. and et al. "Seismic wave propagation in a very soft alluvial valley: Sensitivity to ground-motion details and soil nonlinearity, and generation of a parasitic vertical component", *Seismological Society of America*, **100**(6), pp. 3035-3054 (2010).
3. Gelagoti, F., Kourkoulis, R., Anastasopoulos, I. and et al. "Nonlinear dimensional analysis of trapezoidal valleys subjected to vertically propagating SV waves", *Seismological Society of America*, **102**(3), pp. 999-1017 (2012).
4. Gelis, C. and Bonilla, L.F. "Influence of a sedimentary basin infilling description on the 2D P-SV wave propagation using linear and non-linear constitutive models", *Geophysical Journal International*, **198**(3), pp. 1684-1700 (2014).
5. Adanur, S., Altunisk, A., Dumanoglu, A. and et al. "Contribution of local site-effect on the seismic response of suspension bridges to spatially varying ground motions", *Earthquakes and Structures*, **10**(5), pp. 1233-1251 (2016).
6. Chen, G., Jin, D., Zhu, J. and et al. "Nonlinear analysis on seismic site response of fuzhou basin, China",

بعدی نیز در این‌گونه ساختگاه‌ها استفاده شود که می‌تواند در طراحی صحیح سازه‌ها، اهمیت فراوانی داشته باشد. لازم به ذکر است که در پژوهش حاضر، مدل رفتاری لایه‌های آبرفتی، ویسکو - کشسان در نظر گرفته شده است، که پیشنهاد می‌شود از مدل‌های رفتاری غیرخطی و پیشرفته‌تر در مدل‌سازی‌های عددی استفاده شود.

- Seismological Society of America*, **105**(2a), pp. 928-949 (2015).
7. Seed, H.B., Romo, M.R., Sun, J. and et al. "Relationships between soil conditions and earthquake ground motions in Mexico city in the earthquake of September 19,1985", Report UCB/EERC 87/15, Earthquake Engineering Research Center, University Spitak, Armenia, SSSR, U.S.Geol.surv.Open-File Rep., pp.89- 136A (1987).
8. Borchardt, R.D., Glassmoyer, G., DerKiurghian, A. and et al. "Results and data from seismologic and geologic studies following earthquakes of December 7, 1988 near Spitak", Armenia, SSSR, U.S. Geol. Surv., Open-File Rep., pp. 89- 136A (1989).
9. Hanks, C. and Brady, A.G. "The Loma prieta earthquake, ground motions and damage in Oakland, Treasure Island, and San Francisco", *Bull. Seism. Soc. Am.*, **81**(5), pp. 2019-2047 (1991).
10. Stewart, S.P., Bray, J.D., Seed, H.B. and et al. "Preliminary report on the principal geotechnical aspects of the January 17,1994 Northridge earthquake", Earthquake Engineering Research Center Report No USB/EERC 94-08, University of California, Berkeley (1994).
11. Irikura, K., Iwata, T., Sekiguchi, H. and et al. "Lessons from the 1995 Hyogo-Ken Nanbu earthquake :Why were such destructive motions generated to buildings?", *J. of Nat. Dis. Sci.*, **17**, pp. 99-127 (1996).
12. Yegian, M.K., Ghahraman, V.G. and Gaxetas, G. "Soil amplification effect on building damage during the 1988 Armenia earthquake", *Proc. Of 10th European Conference on Earthquake Engineering*, Balkema, Rotterdam, pp. 2621-2628 (1995).
13. kamatsu, J., Onoue, K., Morikawa, H. and et al. "Bedrock structure in Lijiang basin and its seismic effect, Proc. of the Second Int. Symp. on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion", Yokohama, Japan, Balkema, Rotterdam, pp. 725- 732 (1 Dec., 1998).
14. Kavand, A. and Alielah, H. "Site-specific probabilistic seismic hazard analysis for northern part of the Qeshm Island, Iran", *Nat. Hazards*, **88**(2), pp. 919-946 (2017).
15. Geotechnical Factual Report for Persian Gulf Bridge, Sahel Omid Iranian Consulting Engineering company, p.115 (2012).
16. Wair, B.R., DeJong, J.T. and Shantz, T. "Guide lines for estimation of shear wave velocity profiles", PEER Report No. 2012/08, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley (2012).

17. Building and Housing Research Center of Iran, Iran Strong Motion Network (<http://ismn.bhrc.ac.ir>).
18. Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER, "Users manual for the peer ground motions database web application", The Peer Center, University of California, Berkeley (CA), (2011) (http://peer.berkeley.edu/peer_ground_motion_data_base/site).
19. Itasca. FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua), "User's guide, version 7.0. Minneapolis", (2011).
20. Lysmer, J. and Kuhlemeyer, R.L. "Finite dynamic model for in nite media", *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, **95**(EM4), pp. 859-877 (1969).
21. Hashash, Y.M.A., Groholski, D.R., Phillips, C.A. and et al. "DEEPSOIL 6.1, user manual and tutorial", (2011).
22. Kamalian, M., Gatmiri, B., Sohrabi-Bidar, A. and et al. "Amplification pattern of 2D semi-sine shaped valleys subjected to vertically propagating incident wave", *Communication in Numerical Methods in Engineering*, **10**(23), pp. 871- 887 (2007).
23. Alielahi, H., Kamalian, M. and Adampira, M. "Seismic ground amplification by unlined tunnels subjected to vertically propagating SV and P waves using BEM", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **71**, pp. 63-79 (2015).
24. Kramer, S.L. "Geotechnical Earthquake Engineering", University of Washington (1996).
25. Brian, M.A., Neal, M.O. and Taber, J.J. "The basin-edge effect from weak ground motions across the faultbound-ededge of the lower hutt valley", *New Zealand. Bull Seis-mol. Soc. Am.*, **93**(6), pp. 2703-27 (2003).