

بررسی تفاوت رفتار توده‌های مستعد لغزش در زمین لرزه‌های میدان نزدیک و دور

محمد داودی*^۱ و عباس اکبری اصطهباناتی^۲

استادیار و عضو هیات علمی پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله شناسی و
مهندسی زلزله

کارشناس ارشد شرکت سهامی خدمات مهندسی برق (مشانیر)

(تاریخ دریافت ۱۳۸۷/۰۸/۱۳، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۱۳۸۸/۰۷/۱۸، تاریخ تصویب ۱۳۹۰/۰۵/۱۷)

چکیده:

به دلیل تفاوت جنبش نیرومند زمین در زمین لرزه‌های میدان نزدیک و دور، مطالعه رفتار لرزه‌های دامنه‌های لغزشی که در فاصله‌های گوناگون از رومرکز زمین لرزه قرار می‌گیرد، اهمیت بسیاری دارد. در این پژوهش، توده لغزشی سفارود با پارامترهای ژئوتکنیکی شناخته شده، برگزیده شد. برای بررسی کارایی نرم‌افزار، پس از انجام تحلیل دینامیکی مدلها، پاسخ لرزه‌های مدل دره‌ای نیم‌دایره‌ای شکل به محرک موجک ریکر بدست آمد و با نتیجه پژوهشهای پیشین مقایسه شد. سپس بر روی مدل عددی دامنه و توده لغزشی موجود در مخزن سد سفارود، با هشت نگاشت میدان نزدیک و میدان دور زمین لرزه‌های ایران، آنالیز دینامیکی انجام، و اندازه جابجایی ماندگار توده لغزشی در زمین لرزه‌های گوناگون محاسبه شد. نتیجه‌ها نشان می‌دهد که اندازه جابجایی‌های ایجاد شده در حالتی که دامنه ناپایدار در میدان نزدیک زمین لرزه باشد، کمتر از حالتی است که در میدان دور قرار گیرد. همچنین جابجایی مذکور، بیش از آنکه تحت تاثیر دور یا نزدیک بودن به زمین لرزه باشد، تحت تاثیر محتوای فرکانسی زمین لرزه است.

واژه‌های کلیدی: توده لغزشی، جابجایی ماندگار نیومارک، زمین لرزه میدان نزدیک و دور

مقدمه:

آگاهی‌های بدست آمده از رویدادهای زمین لرزه در جهان نشان داده است که آسیب‌های فراوانی ناشی از ایجاد ناپایداری در دامنه‌ها و شیبها می‌باشد [۱] و [۲]. این آسیبها بگونه‌ای ویژه در ناپایداریها و نیز بگونه‌ای فراگیر در انواع سازه‌های طبیعی و ساخته دست آدمی، به پارامترهای دینامیکی آنها و ویژگیهای محرک ورودی (دامنه، محتوای فرکانسی و دوام نگاشت) بستگی دارد. از آنجا که ویژگیهای محرک ورودی، خود تحت تاثیر سه عامل: چشمه زمین لرزه (source effect)، مسیر انتشار امواج (path effect) و ویژگیهای ساختگاه (site effect) قرار می‌گیرد، بنابراین مطالعه دقیق هر سه عامل گفته شده در برآورد رفتار لرزه‌ها سازه‌ها اهمیت شایانی پیدا می‌کند.

در این راستا به تازگی پژوهشهایی پیرامون تفاوت ماهیت زمین لرزه در میدان دور و نزدیک انجام گرفته است. بررسی ویژگیهای کلی نگاشتهای میدان نزدیک زمین لرزه‌ها نشان می‌دهد رکوردهای ثبت شده در میدان نزدیک عموماً دارای یک پالس شدید و غالب (Impulse) با پریود بلند در نگاشت تاریخیچه زمانی سرعت و جابجایی هستند [۳]. افزون بر وجود پالس قوی در نگاشت سرعت، پایایی نگاشت بدست آمده در جلوی جبهه گسیختگی کوتاهتر از نگاشت بدست آمده در پشت جبهه گسیختگی است [۴]. از سویی

شتابنگاشتهای بدست آمده در میدان نزدیک معمولاً دارای مولفه فرکانس بالا می‌باشند، در حالی که شتابنگاشتهای میدان دور بیشتر دربرگیرنده مولفه‌های فرکانس پایین هستند [۴]. همچنین در میدان نزدیک زمین لرزه‌ها، "مولفه عمود برگسل" جنبنده معمولاً انرژی بسیار بیشتری نسبت به "مولفه موازی با گسل" یادشده دارد [۴]. از دیدگاه طیفی نیز ناحیه سرعت ثابت طیف برای نگاشتهای میدان نزدیک در مقایسه با میدان دور، بسیار باریکتر و ناحیه‌های شتاب ثابت و تغییر مکان ثابت، بسیار پهن تر است [۴].

تاکنون بررسی‌های انجام گرفته تنها پیرامون رفتار لرزه‌های انواع سازه‌های فولادی و بتنی قرار گرفته در فاصله‌های گوناگون از رومرکز زمین لرزه بوده است. در این راستا پس از زمین لرزه سال ۱۹۷۱ San Fernando از سوی مهین و همکاران در سال ۱۹۷۶ و از سوی Bertero و همکاران در سال ۱۹۷۸، پاسخ سازه‌های ویژه در برابر پالس بزرگ جنبش، در نزدیکی چشمه لرزه‌ای، بررسی شد. مطالعات مختلف دیگری در رابطه با اثر میدان نزدیک زمین لرزه‌ها بر روی سازه‌ها، بوسیله "Hall و همکاران در سال ۱۹۹۵، Iwan در سال ۱۹۹۷، A. K. Chopra و C. Chintanapakdee در سال ۱۹۹۸ و ۲۰۰۱ [۴]، Baez و Miranda در سال ۲۰۰۰، acRae و همکاران در سال ۲۰۰۰، Makris N. و C. J. Black در سال ۲۰۰۳ [۵]

رو، در قسمتهای بعدی، نخست موجک بکار گرفته شده به عنوان محرک ورودی معرفی خواهد شد، آنگاه مدل عددی بکار گرفته شده در پژوهش، دربرگیرنده پارامترهای مصالح، مدل هندسی و شرایط مرزی، شرح داده خواهد شد و در پایان، نتایج بدست آمده از آنالیزها آورده شد و سپس تفسیر و جمع بندی خواهد گردید.

جدول (۱): پارامترهای گوناگون مورد نیاز برای ساخت تابع موجک ورودی ریکر

Value	Parameter
0/4	(Sec)t.
0/5	Ω
1300	(m/s) C2
100	(m)r
20/41	ω (rad/sec)
3/25	(Hz)f

مدل کردن محرک ورودی

هدف این بخش از پژوهش، ساخت مدل عددی محرک ورودی موجک ریکر (Ricker wavelet)، بر پایه تابع ارائه شده برای این موجک می باشد. تابع موجک دیگر بر پایه دو پارامتر جابجایی در محور زمان و فرکانس غالب (یا مقدار فرکانس در قله طیف) را نشان می دهد. در این راستا نخست پارامترهای سازنده تابع، محاسبه و تعیین می گردد. با توجه به اینکه رابطه $\omega = 2\pi \cdot f_p$ میان فرکانس زاویه ای ω و فرکانس غالب موج مهاجم f_p برقرار است، از رابطه (۲) برای بدست آوردن ω که در آن فرکانس بدون بعد Ω بر حسب فرکانس زاویه ای موج مهاجم ω تعریف گردیده است، بهره گرفته شد.

$$\Omega = \omega r / \pi C_2 \quad (2)$$

در این رابطه: r شعاع دره و C_2 سرعت موج برشی در مواد سازنده لایه های مدل است.

در شکل (۱) تاریخچه زمانی و محتوای فرکانسی محرک ورودی دیده می شود و در جدول (۱) کلیه پارامترهای مورد نیاز برای ساخت تابع موجک ورودی ریکر آمده است. یادآور می گردد به دلیل اینکه تاریخچه زمانی محرک ورودی در مطالعات پیشینیان از نوع جابجایی بوده است [۱۱] در این بخش از پژوهش نیز که با هدف مقایسه با نتایج پیشینیان انجام شد، از محرک ورودی تاریخچه زمانی جابجایی بجای شتاب یا سرعت بهره گرفته شد.

گزینش پارامترهای مصالح

با توجه به اینکه مصالح تشکیل دهنده مدل دو بعدی از

A. Mavroeidis G. P. و Dong G. در سال ۲۰۰۴ [۳]، A. Rodriguez-Marek در سال ۲۰۰۶ [۶]، و بسیاری دیگر، انجام گرفته است.

پیرامون مطالعه رفتار سدها، در میدان نزدیک زمین لرزه ها می توان از مطالعه رفتار سد بتنی قوسی بوسیله T. Ohmachi و Jalali A. در سال ۱۹۹۹ [۷] و نیز از مطالعه و بررسی اثرهای گسلش پنهان در میدان نزدیک، بر رفتار سد بتنی Kasho بوسیله T. Ohmachi و همکاران در سال ۲۰۰۳ [۸] نام برد. همچنین در زمینه تفاوت رفتار سازه های ژئوتکنیکی، همچون سدهای خاکی مطالعه ای با هدف انتخاب پارامتر زمان دوام در نگاشت زمین لرزه برای آنالیزهای غیرخطی سدهای خاکی بوسیله Yule و همکاران انجام شده است که دربرگیرنده ویژگیهای نگاشت های میدان نزدیک نیز می باشد. ولی تا کنون مطالعه مهم منتشر شده ای پیرامون ارزیابی رفتار سازه های ژئوتکنیکی و پدیده های طبیعی در میدان نزدیک زمین لرزه ها، گزارش نشده است.

با توجه به وابستگی بسیاری از زمین لرزه ها به زمین لرزه و جنبش زمین، مطالعه و آگاهی یافتن از ویژگیهای جنبش زمین بسیار با اهمیت و راه گشای ارزیابی خطر زمین لغزش است. از این رو در این پژوهش کوشش گردیده تا گامی در راستای پاسخگویی به چگونگی تأثیر جنبش نیرومند زمین در میدان نزدیک زمین لرزه ها بر ناپایداری دامنه ها و ایجاد زمین لغزش و همچنین تفاوت آن با میدان دور زمین لرزه ها برداشته شود. برای دیدن جزئیات آنالیزها و نتیجه های کامل مطالعات می توان به [۹] مراجعه کرد.

نرم افزار بهره گرفته شده و کنترل درستی کارکرد آن

پس از گزینش نرم افزار المان محدود دو بعدی PLAXIS برای انجام آنالیز دینامیکی مدل دره، درستی کارکرد نرم افزار اجزا محدود مورد ارزیابی قرار گرفت. برای دستیابی به این هدف، با توجه به سابقه مطالعات جامعی که پیرامون تاثیر توپوگرافی بر جنبش زمین [۱۰] و مطالعاتی که پیرامون بزرگنمایی دره های نیم دایره ای انجام شده است و با توجه به نزدیکی با موضوع پژوهش پیش رو، مطالعه بر روی یک مدل ساده دو بعدی کرنش صفحه ای، از یک دره به شکل نیم دایره که درون یک نیم فضای الاستیک قرار گرفته است، انجام پذیرفت. همچنین به دلیل بهره گیری از موجک ریکر در این دسته از مطالعات، در پژوهش پیش رو نیز موجک ریکر به عنوان محرک ورودی برگزیده شد و پاسخ لرزه ای ناهنجاری توپوگرافی با نتایج بدست آمده از پژوهشهای پیشینیان مقایسه گردید. از این

در نرم‌افزار بهره گرفته شده، میرایی مصالح از نوع میرایی کلاسیک رایلی با رابطه (۳) معرفی می‌شود.

$$C = \alpha M + \beta K \quad (3)$$

که C: ماتریس میرایی M: ماتریس جرم K: ماتریس سختی و α ، β : ضریبهای میرایی رایلی هستند.

با وجود آنکه پژوهشگران مختلف، روابطی برای محاسبه ضرایب میرایی رایلی (α و β) پیشنهاد می‌کنند [۱۲] و [۱۳]، نتیجه‌های برخی از پژوهشها نشان می‌دهد که گزینش مقدارهای دیگری برای α و β می‌تواند سبب بدست آمدن پاسخهای دقیق‌تری شود. در پژوهش پیش‌رو برای گزینش دقیقترین مقدارهای ممکن برای پارامترهای گفته شده، پاسخ مدل عددی در ترکیبهای گوناگونی از اندازه‌های α و β با فرض نسبت میرایی ۵ درصد برای مصالح تشکیل دهنده مدل، محاسبه شد و در پی آن، مناسبترین ضریبهای میرایی رایلی، با انجام مقایسه میان نمودارهای بزرگنمایی بدست‌آمده از این پژوهش با پژوهشهای پیشینیان، بدست آمد.

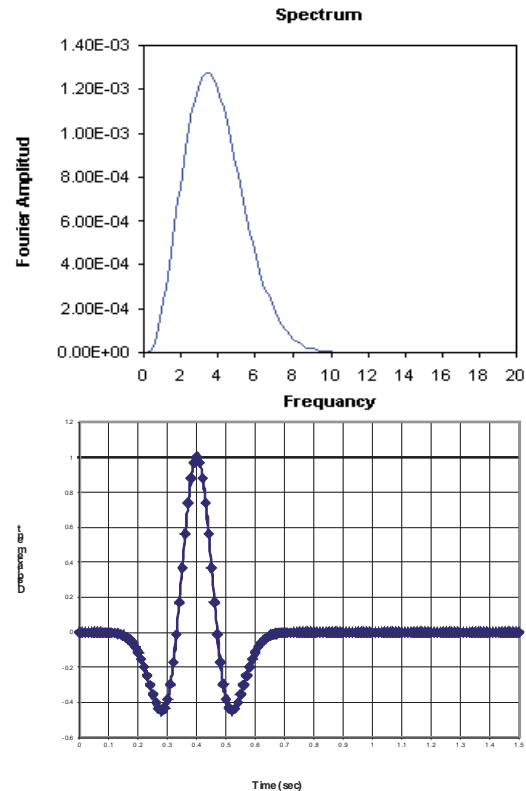
ساخت شکل هندسی مدل دره نیم دایره

برای بدست آوردن اندازه مناسب مدل دو بعدی در محیط نرم‌افزار، بر روی چندین مدل با ابعاد گوناگون تحلیل عددی انجام گردید که دست آخر مناسبترین اندازه برای ارتفاع مدل ۴۰۰ متر بدست آمد. از سوی دیگر آنالیزهایی برای تعیین مناسبترین فاصله مرزهای جاذب از مرکز مدل و تعیین ناحیه "میدان آزاد" انجام گرفت. بر پایه نتایج مطالعات یادشده و با توجه به اندازه‌های بکار گرفته شده در مثالهای راهنمای نرم‌افزار **PLAXIS**، اندازه مدل دو بعدی ساخته شده برابر ۱۲۰۰ در ۴۰۰ متر در نظر گرفته شد تا بگونه‌ای بهینه نیازهای پژوهش را تامین نماید. در این راستا یادآور می‌گردد، مرزهای جاذب انرژی که در نرم‌افزار **PLAXIS** تعریف شده است، توانایی جذب امواج ماسی بازتابیده شده به مرزهای کناری را ندارند و برای کاهش خطای محاسبات، ابعاد هندسی مدل بگونه‌ای تعریف شده است که دامنه امواج یادشده بوسیله میرایی مصالح به اندازه کافی کاهش یابد.

در مرحله المان‌بندی و گزینش اندازه و ابعاد مناسب المانها و تعداد بهینه آنها، آزمونهایی انجام پذیرفت و مدل با تعداد مختلف المان آنالیز گردید. با توجه به نتایج بدست آمده، مدل ساخته شده با ۵۸۳ المان سه گوش (مثلثی) پانزده گرهی، مش‌بندی گردید.

چنانکه در شکل (۲) دیده می‌شود این شبکه‌بندی بگونه‌ای انجام پذیرفت که در نزدیکی ناهنجاری توپوگرافی، اندازه المانها کوچکتر از دیگر جاها بشود.

برای بدست آوردن تاثیر توپوگرافی بر منحنی بزرگنمایی، بر روی توپوگرافی مدل، نقطه‌هایی برگزیده شد تا پاسخ لرزه‌ای به محرک ورودی در بخشهای گوناگون توپوگرافی

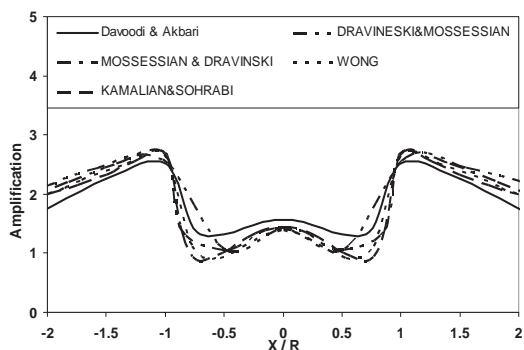


شکل (۱): محتوای فرکانسی (شکل بالا) و تاریخچه زمانی (شکل پایین) محرک ورودی موجک ریکر محاسبه شده در فرکانس بدون بُعد $\Omega = 0.5$

سنگ بکر برگزیده شده است، فرض رفتار خطی در محیط یاد شده دور از واقعیت نیست، بنابراین آنالیز انجام گرفته از مدل رفتاری "الاستیک خطی" پیروی می‌نماید. برای آنکه نتیجه آنالیزهای دینامیکی همخوانی بیشتری با واقعیت‌های موجود در طبیعت داشته باشد، پارامترهای مصالح، از آگاهی‌های بدست آمده از مطالعات انجام گرفته بر روی ساختگاه سد شفارود، آنچنانکه در جدول (۲) نشان داده شده است، برگزیده گردید.

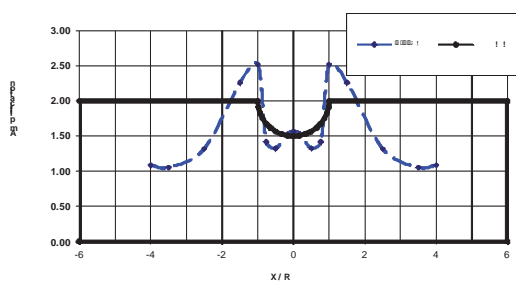
جدول (۲): پارامترهای الاستیک در نظر گرفته شده برای مصالح مدل عددی دره مورد مطالعه

Value	Parameter
26/5	Density (γ) KN/m ³
11650000	modulus (E)KN/m ² Yang
0/28	Poisson's Ratio (ν)
0.001	Horizontal Permeability (K _x)
0.001	Vertical Permeability (k _y)

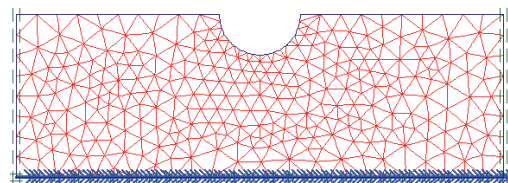


شکل (۴): منحنی تغییرات بزرگنمایی و مقایسه اندازه بزرگنمایی بدست آمده از نرم افزار PLAXIS با مقدارهای بدست آمده از پژوهش پیشینیان و در حالت ضراب میرایی $\alpha=\beta=0.002$.

آنچنانکه در شکل یادشده دیده می‌شود در همگی نقاط سطح دره بزرگنمایی ناشی از لرزش مدل رخ می‌دهد، بگونه‌ای که در وسط دره که پایین‌ترین بخش دره نیز می‌باشد، بزرگنمایی در حدود ۱/۵ است، سپس با دور شدن از وسط دره بزرگنمایی کاهش یافته و پس از آن دوباره از پای دامنه دره افزایش چشمگیری می‌یابد، بگونه‌ای که در مرز ناهنجاری توپوگرافی با سطح گسترده زمین، اندازه بزرگنمایی به ۲/۵ میرسد. با دور شدن از کناره‌های دره، بزرگنمایی کاهش می‌یابد تا آنکه در فاصله‌های دور نسبت به ناهنجاری توپوگرافی به حدود یک (۱) نزدیک می‌شود. برای بررسی تاثیر مقادیر گوناگون میرایی بر منحنی بزرگنمایی، در شکل (۶) مقایسه‌ای میان مقادیر بدست آمده در حالت‌های گوناگون میرایی نشان داده شده است. همانگونه که دیده می‌شود شکل کلی تغییرات در همه حالت‌های میرایی با آنچه که در مطالعه‌های پیشین بدست آمده است از یک روند پیروی می‌کند. همچنین بیشترین اختلاف، میان مقادیر بزرگنمایی در لبه‌های دره به چشم می‌خورد و با فاصله گرفتن از لبه‌های ناهنجاری توپوگرافی، مقادیر بزرگنمایی همگرا شده و تاثیر مقادیر گوناگون میرایی، ناچیز می‌گردد.

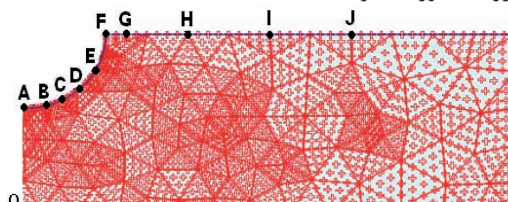


شکل (۵): تغییرات بزرگنمایی بدست آمده از نتایج آنالیز عددی با نرم افزار PLAXIS در نقاط مختلف توپوگرافی دره u شکل



شکل (۲): مش بندی مدل دو بعدی با المانهای سه گوش

با انجام آنالیز دینامیکی، بصورت تاریخیچه زمانی ثبت شود. در شکل (۳) بخشی از مدل المان بندی شده که بر روی آن جایگاه نقطه‌های ثبت پاسخ نمایان گردیده، به نمایش گذاشته شده است. از میان نقاط یادشده، نقطه "o" نیز در نزدیکی مرز پایین مدل برگزیده شد، تا کنترلی بر محرک ورودی صورت گیرد.



شکل (۳): بخشی از مدل دره نیم دایره مش بندی شده به همراه جانمایی نقاط گزینش شده برای دریافت پاسخ لرزهای

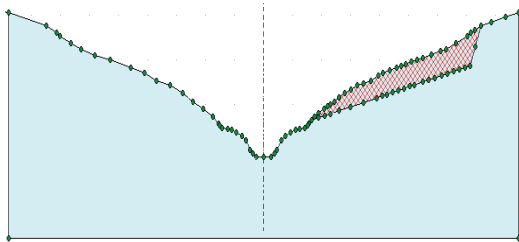
نتایج آنالیز دینامیکی با موجک ریکر

برای انجام آنالیز دینامیکی، محرک ورودی S_v بصورت یک موجک ریکر بگونه‌ای تعریف گردید تا مدل ساخته شده را با زاویه تابش ۹۰ درجه، در راستای افقی به جنبش درآورد [۱۴]. با بهره‌گیری از نتیجه‌های بدست آمده و رسم اندازه بزرگنمایی هر یک از نقاط گزینش شده در برابر نسبت فاصله از دره (X) به شعاع آن (R)، منحنی تغییرات بزرگنمایی در سطح زمین بدست آمد و در پی آن چگونگی تاثیر توپوگرافی بر پاسخ لرزهای، نمایان گردید. منحنی تغییرات بزرگنمایی که به این گونه بدست آمد با نتیجه‌های بدست آمده از پژوهش‌های گذشته که بوسیله

Wong H. L. (1982) [15], Dravinski M. and Mossessian T. (1987) [16], Mossessian T. K. and Dravinski M. (1987) [11], Kamalian M., Gatmiri B., and Sohrabi A. (2003) [11]

و به کمک نرم‌افزارهای دیگر انجام شده است، مقایسه گردید. منحنی تغییرات بزرگنمایی بدست آمده از انجام آنالیز دینامیکی به همراه نمونه‌ای از این مقایسه با ضریب‌های میرایی رایلی $\alpha=\beta=0.002$ که بیشترین همخوانی را با پژوهش‌های پیشینیان نشان می‌دهد، در شکل شماره (۴) به نمایش گذاشته شده است.

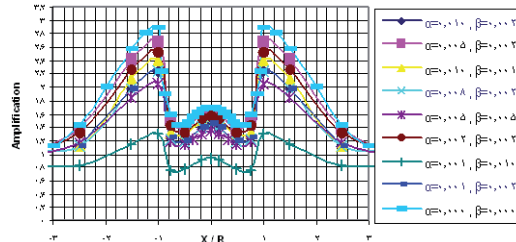
همانگونه که در شکل (۵) دیده می‌شود، با روی هم قرار دادن نمودار، تغییرات بزرگنمایی در برابر نسبت X/R و شکل هندسی به مقیاس در آمده مدل دره، چگونگی واکنش توپوگرافی در برابر محرک ورودی نمایان می‌گردد.



شکل (۷): مدل هندسی ساخته شده در محیط نرم افزار PLAXIS از دره شفارود و توده لغزشی موجود در آن

از سویی با توجه به نتیجه بدست آمده از مطالعات کالیبراسیون که در بخش ۲ مقاله گفته شده است، ضرایب میرایی رایلی مصالح برابر $\alpha = \beta = 0.02$ برگزیده شد. همچنین ویژگیهای ژئومکانیکی مواد سازنده توده لغزشی و ساختگاه بر اساس نتایج آزمایشهای ژئوتکنیک و مکانیک سنگ [۱۸] و [۱۹]، برابر با آنچه که در جدول (۳) نشان داده شده است، گزینش گردید. این توده سنگ برابر با آنچه که در بُرش شکل (۸) نشان داده شده است، به واسطه تقاطع سطوح لایه‌بندی با دو دسته درزه اصلی و یک دسته درزه فرعی حالتی بلوک مانند پیدا کرده است.

با توجه به تجربه بدست آمده در بندهای پیشین مبنی بر گزینش بهینه ابعاد مدل دو بعدی دره نیم دایره، همچنین اندازه‌های بکارگرفته شده در مثالهای نرم‌افزار PLAXIS و ابعاد مختلف آزموده شده در پژوهش پیش‌رو با در نظر گرفتن مدل واقعی دره شفارود، ابعاد بهینه مدل دو بعدی همانگونه که در شکل (۹) نشان داده شده است، برابر ۶۰۰ متر در ۴۰۰ متر گزینش شد. مدل ساخته شده با ۷۸۴ المان سه‌گوشه (مثلثی) پانزده گرهی، المان‌بندی شد، بگونه‌ای که در نزدیکی ناهنجاری توپوگرافی، اندازه المانها کوچکتر از دیگر بخشها (کمینه ۲۰ متر) و با دور شدن از دره و توده لغزشی و نزدیک شدن به کناره‌های مدل، اندازه المانها بزرگ می‌گردد (تا بیشینه ۲۰۰ متر). همچنین در شکل (۹)، چگونگی المان‌بندی مدل یادشده و جایگاه وارد آمدن محرک ورودی در پایین مدل و نیز مرزهای جاذب



شکل (۶): مقایسه میان مقادیر تغییرات بزرگنمایی بدست آمده در حالت‌های مختلف میرایی در مدل دره u شکل

تحلیل دینامیکی مدل دره شفارود

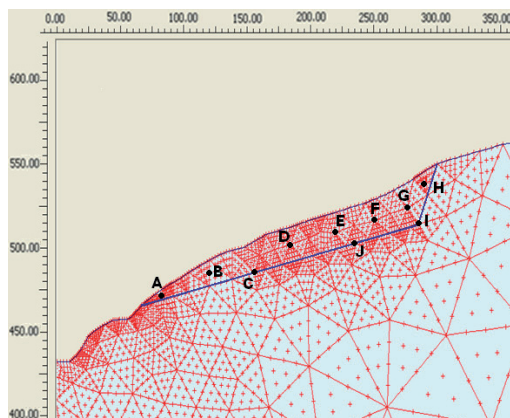
در قسمت پیش با بهره‌گیری از محرک ورودی ریکر و نیز مدل ساده دره u شکل، کارکرد نرم‌افزار PLAXIS در انجام آنالیز دینامیکی کنترل گردید. در این بخش از نکات‌های ثبت شده در میدان دور و میدان نزدیک زمین‌لرزه‌های ایران به عنوان محرک ورودی بهره گرفته خواهد شد و با توجه به نتیجه بدست آمده از بخش پیش، پایداری یک دامنه واقعی، با انجام آنالیز دینامیکی در محیط نرم‌افزار PLAXIS ارزیابی خواهد گردید.

ویژگیهای دامنه و زمین‌لغزه مدل شده

در این پژوهش، توده لغزنده دامنه سوی چپ دریاچه سد شفارود که در استان گیلان و در نزدیکی شهر پونل قرار دارد برای انجام آنالیز دینامیکی در زمین‌لرزه‌های گوناگون میدان دور و نزدیک برگزیده شد. دلیل این گزینش، سابقه انجام مطالعات گسترده از سوی شرکت مهتاب قدس پس از شناسایی توده لغزنده و تعیین سطح لغزش و شناسایی پارامترهای گوناگون مقاومتی و فیزیکی توده لغزنده است. با کمک نقشه‌های زمین‌شناسی و توپوگرافی فراهم شده، موقعیت توده لغزشی و شیب توپوگرافی بررسی گردید. توده لغزشی یادشده در بالادست محور سد قرار گرفته است و از جنس لای سنگ و ماسه سنگ سیلتی است. با توجه به جنس لایه‌های زمین‌شناسی ساختگاه، مدل دو بعدی دره شفارود و توده لغزشی موجود در آن (شکل ۷) به صورت یک محیط پیوسته با مدل رفتاری الاستیک خطی در نظر گرفته شد.

جدول (۳): پارامترهای مصالح در نظر گرفته شده برای مدل دره و سطح لغزش مورد مطالعه در محیط نرم‌افزار

Sliding surface material	Material model	Parameter
26.5	27.2	Density (γ) KN/m ³
11.65	12.50	Yang modulus (E) KN/m ² (106* KN/m ³)
0.24	0.24	Poisson's Ratio (ν)
0.001	0.001	Horizontal Permeability (Kx)
0.001	0.001	Vertical Permeability (ky)
1332	1332	(m/s) Vs
0.9	1.1	Cohesion C (KN/m ³)
30	25	Friction Angle ϕ (degree)



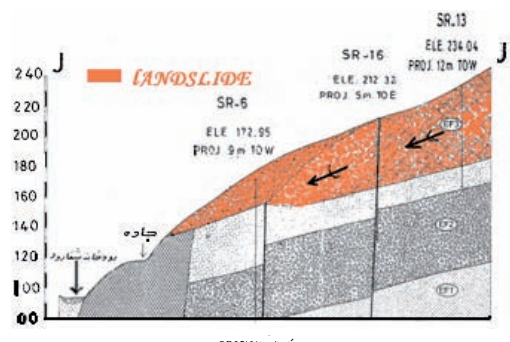
شکل (۱۰): بخشی از مدل مش بندی شده در شکل (۹) به همراه جانمایی نقاط گزینش شده برای دریافت پاسخ لرزه‌ای

کوشش شد نداشتی‌هایی برگزیده شود که ساختگاه ثبت رکورد آنها همانند ساختگاه دره شفارود در پهنه البرز باشد. در مجموع با توجه به معیارهای گفته شده و کم بودن نداشتی‌های میدان نزدیک در دسترس، از نداشتی‌های میدان دور و میدان نزدیک دو زمین لرزه سال ۱۳۷۲ اردبیل با بزرگای $M_s \sim 1/6$ و فیروزآباد کجور با بزرگای $M_s \sim 2/6$ که خواستگاهی در نزدیکی ساختگاه دامنه و توده لغزشی موجود دارند، به عنوان محرک ورودی اصلی و یک نداشتی میدان نزدیک زمین لرزه بم با بزرگای $M_s \sim 5/6$ ، با آگاهی از اینکه از دید زمین شناسی خواستگاهی متفاوت با ساختگاه مورد مطالعه را دارا است، برای مقایسه نتایج بهره گرفته شد. پس از گزینش شتابنگاشت‌های مورد نظر، بر پایه گزارش‌های منتشر شده و با انجام عملیات ریاضی شتابنگاشت‌های عمود بر راستای گسلش محاسبه گردید. به دنبال آن، پس از انجام اصلاحات مورد نیاز بر روی نداشتی‌ها، بیشینه مقادارهای شتاب آنها به مقدارهای $0/3g$ تا $1g$ نرمالیزه گردید.

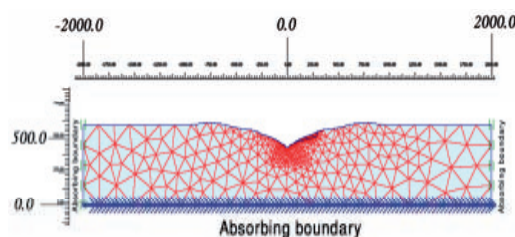
نتایج آنالیز دینامیکی مدل

وضعیت تشدید در مدل دره

پس از انجام آنالیز دینامیکی و بدست آوردن میانگین پاسخ لرزه‌ای توده لغزنده شفارود، با مقایسه طیف شتاب نداشتی‌های ورودی و طیف پاسخ گرفته شده از توده لغزشی، چنین برمی آید که در اثر تحریک زمین لرزه در توده لغزشی بزرگنمایی رخ داده است. شکل‌های (۱۱) نمونه‌ای از مقایسه دو طیف ورودی و پاسخ را که از نداشتی‌های میدان نزدیک و میدان دور دو نداشتی زمین لرزه اردبیل بدست آمده است، نشان می‌دهد. در راهنمای این شکل‌ها، نداشتی ورودی (Input) با "in" و نداشتی پاسخ (Response) با "R" نشان داده شده است. همانگونه که انتظار می‌رود، نداشتی‌های



شکل (۸): برش زمین شناسی [J]-[J'] در لایه‌های سنگی ساختگاه سد شفارود در راستای شمال - جنوب [۳]



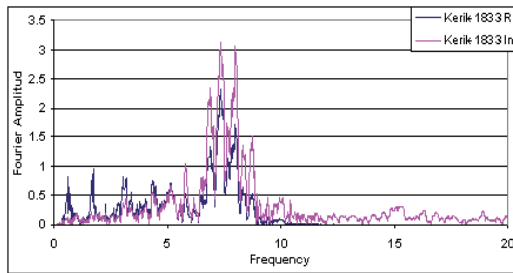
شکل (۹): مش بندی مدل دو بعدی دره شفارود و زمین لغزش موجود در آن با المانهای سه گوش

انرژی که در دو کناره راست و چپ و پایین مدل تعریف شده است، دیده می‌شود.

برای بدست آوردن پاسخ لرزه‌ای توده لغزشی مورد مطالعه، همانگونه که در شکل (۱۰) نشان داده شده است، تعداد ده نقطه درون توده لغزنده برگزیده شد تا با انجام آنالیزهای دینامیکی، پاسخ لرزه‌ای هر یک از نقاط گزینش شده، ثبت گردیده و با توجه به ناحیه تحت تاثیر هر یک از نقاط، با انجام فرآیند وزن دهی، میانگین پاسخ لرزه‌ای توده لغزنده برای محاسبه جابجایی ماندگار بدست آید.

گزینش محرک ورودی

در این پژوهش، معیارهای اصلی گزینش شتاب نداشتی زمین لرزه‌های ورودی مدل عددی، بر پایه سه ویژگی بزرگ، فاصله از رومرکز و ویژگی‌های ساختگاه ثبت رکورد استوار گردید. بر این پایه، زمین لرزه‌های دستگامی رخ داده در نقاط گوناگون کشور ایران و با بزرگای بیش از $M_s \sim 6$ مورد مطالعه قرار گرفت و به دلیل نیاز به محاسبه مولفه قائم بر راستای گسلش، زمین لرزه‌هایی گزینش شدند که راستای گسلش آنها طی مطالعات صورت گرفته پیشین، شناسایی شده بودند. بر پایه مطالعات پیشین و تعریف‌های موجود [۲۰]، شتابنگاشت‌های ثبت شده در پهنه کمتر از ۲۰ کیلومتر به عنوان محرک ورودی میدان نزدیک و شتابنگاشت‌های ثبت شده در پهنه میان ۵۰ تا ۱۵۰ کیلومتر از رومرکز زمین لرزه به عنوان محرک ورودی میدان دور گزینش شد همچنین

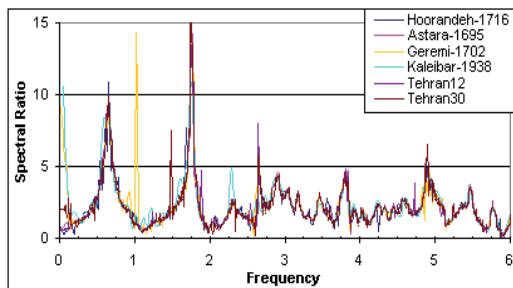


شکل (۱۲): مقایسه طیف ورودی و پاسخ مربوط به نگاشت ایستگاه کریک

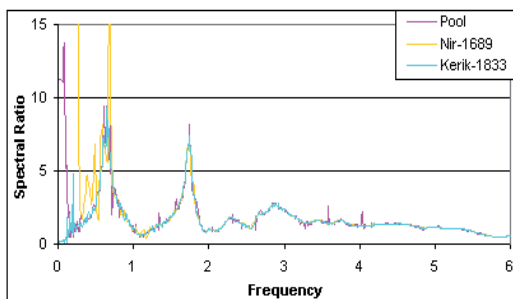
محاسبه جابجایی ماندگار بلوک لغزنده با روش نیومارک

در روش نیومارک فرض بر این است که هر گاه شتاب زمین لرزه از شتاب بحرانی دامنه فزونی گیرد، جابجایی در توده لغزشی رخ میدهد و این تغییر مکان تا زمانی که سرعت نسبی میان دامنه و زمین به صفر برسد ادامه دارد. روشهای مختلفی برای محاسبه سرعت حرکت بلوک لغزنده وجود دارد [۲۱].

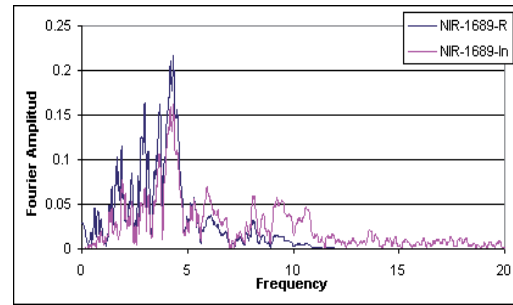
در این پژوهش برای محاسبه چگونگی کاهش سرعت حرکت بلوک پس از کاهش شتاب به زیر شتاب تسلیم، از روشی که دارای دقت بیشتری بوده و پیچیده‌تر نیز می‌باشد بهره گرفته شده است [۲۲]. در این روش، در بخش روند کاهش سرعت، از سطح زیر منحنی تاریخچه زمانی شتاب،



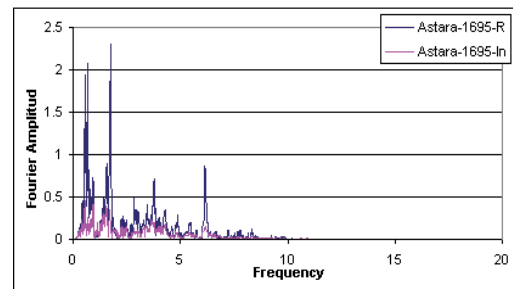
شکل (۱۳): نسبت طیف پاسخ به ورودی نگاشتهای بدست آمده در میدان دور



شکل (۱۴): نسبت طیف پاسخ به ورودی سه نگاشت بدست آمده در میدان نزدیک



(الف)



(ب)

شکل (۱۱): مقایسه طیف ورودی و طیف پاسخ

ایستگاه نیر میدان نزدیک (ب) ایستگاه آستارا میدان دور ثبت شده در میدان نزدیک دارای مولفه‌های فرکانس بالا و نگاشتهای ثبت شده در میدان دور زمین لرزه دارای مولفه‌های فرکانس پایین هستند. پاسخهای بدست آمده از آنالیزهای دینامیکی نیز همین ویژگی را نشان می‌دهد، به این معنی که پاسخهای بدست آمده از نگاشتهای ورودی میدان نزدیک نسبت به نگاشتهای ورودی میدان دور از محتوای فرکانسی بالاتری برخوردار است.

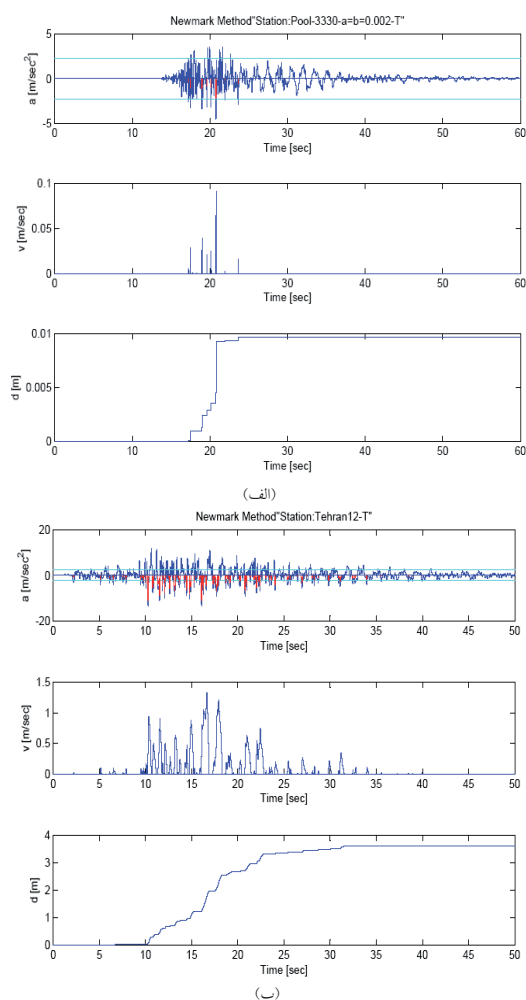
از این میان تنها در مورد نگاشت ورودی ۱۸۳۳ که در ایستگاه کریک ثبت گردیده است، در توده آماده لغزش بجای بزرگنمایی، کوچکنمایی رخ داده است. شکل (۱۲) طیف ورودی و پاسخ بدست آمده از نگاشت ورودی ایستگاه کریک را به نمایش گذاشته است. محاسبات طیفی انجام شد و مقایسه نسبتهای طیفی بدست آمده، وضعیت تشدید امواج در توده مستعد لغزش را نشان می‌دهد.

شکلهای (۱۳) و (۱۴) نسبت طیفی نگاشتهای پاسخ به ورودی، بترتیب بدست‌آمده در میدان دور و میدان نزدیک دو زمین لرزه رویداده در ناحیه البرز را به نمایش گذاشته است. با نگاه به هر یک از نسبتهای طیفی بدست آمده دیده می‌شود که این نسبتها چه برای نگاشتهای میدان نزدیک و چه برای نگاشتهای میدان دور در دو فرکانس ۰/۶۵ هرتز و ۱/۷۵ هرتز بیشترین مقدار خود را دارا هستند. از این رو می‌توان چنین نتیجه گرفت که فرکانس یاد شده مربوط به فرکانسهای مودی مدل ساخته شده از دره شفارود می‌باشد که در این فرکانس‌ها، حالت تشدید در مدل رخ می‌دهد.

بدست آمده برای نگاشتهای میدان نزدیک تنها جابجایی نتیجه شده از نگاشت بم در بخش بالایی نمودار قرار گرفته است. این بدان جهت است که نگاشت بم نسبت به دیگر نگاشتهایی که بعنوان میدان نزدیک بکار گرفته شده علاوه بر تفاوت ساختگاه، دارای دو تفاوت اساسی است:

الف) نگاشت بم دارای محتوای فرکانسی پایین تری نسبت به نگاشتهای میدان نزدیک دیگر است.

ب) فرکانس غالب نگاشت ورودی بم که در ناحیه فرکانسهای پایین قرار گرفته بر فرکانس نخست مود ارتعاشی مدل دره ساخته شده انطباق یافته است که سبب تشدید در مدل می گردد و در نتیجه جابجایی زیادی را بوجود می آورد. نتیجههای بدست آمده از سه نگاشت ایستگاه



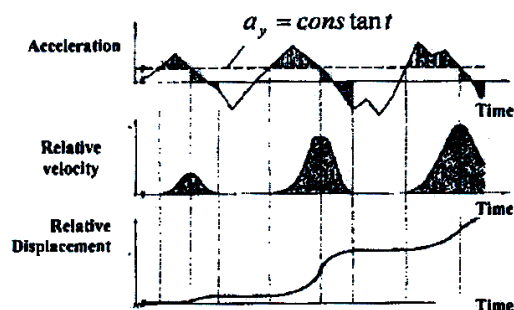
شکل (۱۶): تاریخچه زمانی شتاب، سرعت و جابجایی (بترتیب از بالا به پایین) گوه مستعد لغزش شفاورد در حالت تحریک با شتابنگاشتهای نرمالیزه
الف) ایستگاه پول در میدان نزدیک
ب) ایستگاه تهران-۱۲ در میدان دور

آنچنانکه در شکل (۱۵) به نمایش گذاشته شده است، دو بار انتگرال گیری می شود [۲۳].

از این رو اندازه جابجایی ماندگار با بهره گیری از محیط نرم افزار MATLAB و نیز شتاب تسلیم بدست آمده برای توده لغزشی محاسبه شد. در گام نخست شتاب تسلیم توده لغزشی برابر 0.23g، بدست آمد. آنگاه با مقایسه میان شتاب ورودی و شتاب تسلیم توده لغزشی در گامهای زمانی ۰/۰۰۵ ثانیه، از سطح زیر منحنی تاریخچه زمانی شتاب، در نقاطی که شتاب زمین لرزه از شتاب تسلیم توده لغزشی بیشتر شده است دو بار انتگرال گیری گردید.

شکل (۱۶) نمودار بدست آمده از نتیجه محاسبه اندازه جابجایی مربوط به دو نگاشت ورودی نرمالیزه شده به PGA=0.6g، ایستگاه پول و ایستگاه تهران-۱۲ که در ناحیه البرز و بترتیب در میدان نزدیک و میدان دور زمین لرزه سال ۲۰۰۴ فیروزآباد کجور ثبت گردیده است را بعنوان نمونه نشان می دهد. نمودار تاریخچه زمانی جابجایی بدست آمده، اندازه جابجایی توده لغزشی را در زمانهای گوناگون و برحسب متر نشان داده است.

در جدول شماره (۴) و نمودار شکل شماره ۱۷ مقدارهای جابجاییهای ماندگار توده لغزشی مورد مطالعه در زمین لرزههای گوناگون میدان دور و میدان نزدیک که در محدوده شتابهای $g_1 - g_3$ هم پایه شده اند گردآوری شده است. با توجه به جدول و شکل یاد شده دیده می شود که بطور کلی اندازه جابجایی ایجاد شده در حالتی که توده لغزشی مورد مطالعه در میدان نزدیک یک زمین لرزه باشد، کمتر از حالتی است که توده لغزشی یاد شده در میدان دور همان زمین لرزه قرار می گیرد. در نگاه ریز بینانه تر به اندازه جابجاییهای بدست آمده و طیفهای میانگین پاسخ، که از آنالیز دینامیکی بدست آمده است، چنین نتیجه گیری می شود که اندازه جابجایی ماندگار بیش از آنکه تحت تاثیر دور یا نزدیک بودن به زمین لرزه باشد، تحت تاثیر محتوای فرکانسی امواج زمین لرزه که به توده لغزشی می رسد، قرار گرفته است. در نمودار شکل (۱۷)، از میان نتیجههای



شکل (۱۵): محاسبه روند کاهش سرعت بلوک پس از کاهش شتاب

جدول (۴): مقادارهای جابجایی‌های ماندگار توده لغزشی شفارود در زمین‌لرزه‌های همپایه شده میدان دور و نزدیک

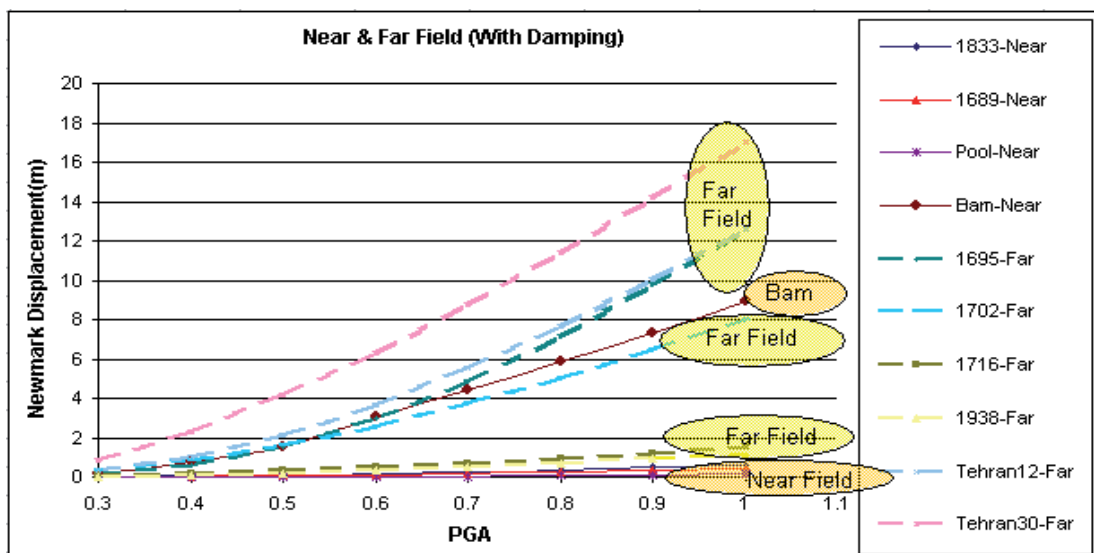
Type	Station No	Newmark Displacement (m)							
		0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
Near Field	Kerik-1833-With Damping	0	0.000104	0.001152	0.003267	0.007061	0.012608	0.02089	0.03157
	Nir-1689-With Damping	0.001981	0.01057	0.02316	0.039949	0.066234	0.096821	0.131218	0.169739
	Pool-3330-With Damping	0	0.000449	0.002917	0.009671	0.02418	0.051612	0.104273	0.168975
	Bam-3168-With Damping	0.203859	0.777005	1.540219	3.096603	4.452069	5.868947	7.30584	8.927868
Far Field	Astara -1695 -With Damping	0.09064	0.432136	1.093186	2.094081	3.594764	5.42558	7.849062	10.44838
	Geremi -1702-With Damping	0.123916	0.343634	0.696416	1.162128	1.812964	2.539828	3.374002	4.319696
	Hoorandeh-1716-With Damping	0.058999	0.167086	0.307109	0.484887	0.697842	0.924241	1.215975	1.509968
	Kalibar-1938-With Damping	0.022	0.094751	0.198157	0.336163	0.507867	0.690029	0.903722	1.14691
	Tehran12-With Damping	0.358874	1.052189	2.157595	3.620872	5.491462	7.639794	10.04803	12.57046
	Tehran30-With Damping	0.84188	2.302791	4.17999	6.311345	8.743114	11.38189	14.2148	16.98397

جابجایی‌های بدست آمده از این گروه نگاشتهای با فرکانس پایین میدان دور است.

نتیجه گیری

* از مقایسه طیف شتاب مربوط به نگاشتهای ورودی و طیف پاسخ بدست آمده از آنالیز دینامیکی توده لغزشی چنین بر می‌آید که در اثر تحریک زمین‌لرزه، تقریباً برای همگی نگاشتها، چه میدان دور و چه میدان نزدیک زمین‌لرزه، در توده لغزشی بزرگنمایی رخ داده است. تنها در مورد یک نگاشت ورودی، در توده آماده لغزش

کریک، نیر و پول که فرکانس بالایی را دارا می‌باشند، جابجایی‌های کمی را نسبت به نگاشتهای میدان دور و نگاشت بدست آمده در ایستگاه بم نشان می‌دهد. از سوی دیگر با مقایسه جابجایی‌های بدست آمده در گروه نگاشتهای میدان دور، باز هم تاثیر محتوای فرکانسی نگاشت بکار گرفته شده آشکار می‌گردد و تا اندازه زیادی نتیجه بالا تایید می‌گردد، بگونه‌ای که جابجایی بدست آمده از دو نگاشت میدان دور ایستگاه کلیبر (۱۹۳۸) و هورانده (۱۷۱۶) که دارای محتوای فرکانسی بالا نسبت به دیگر نگاشتهای بدست آمده در میدان دور زمین‌لرزه هستند، کمتر از اندازه



شکل (۱۷): نمودار اندازه جابجایی‌های ماندگار بدست آمده به روش نیومارک برای نگاشتهای میدان دور و میدان نزدیک زمین‌لرزه در دامنه‌های بیشینه 0.3g تا 1g بر اساس داده‌های جدول (۴)

ماندگار بدست آمده از روش نیومارک می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود که عامل تعیین کننده در اندازه جابجایی، محتوای فرکانسی زمین‌لرزه در محل برخورد موج زمین‌لرزه با توده لغزنده است. از میان نتیجه‌های بدست آمده برای نگاشتهای میدان نزدیک تنها جابجایی نتیجه شده از نگاشت بم در بخش بالایی نمودار قرار گرفته است و این بدان جهت است که نگاشت بم دارای محتوای فرکانسی پایین‌تری نسبت به نگاشتهای میدان نزدیک دیگر است و همچنین فرکانس غالب نگاشت ورودی بم که در ناحیه فرکانسهای پایین قرار گرفته بر فرکانس نخست مد ارتعاشی مدل دره ساخته شده انطباق یافته است که سبب تشدید در مدل می‌گردد و در نتیجه جابجایی زیادی را بوجود می‌آورد.

سپاسگزاری

از پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله که امکان بهره‌گیری از آخرین بازنگری دارای شناسنامه نرم‌افزار PLAXIS را فراهم نمودند و همچنین از شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس برای در اختیار گذاشتن گزارشهای مطالعات پروژه سد شفارود قدردانی می‌شود.

بجای بزرگنمایی، کوچکنمایی رخ داده است که این امر می‌تواند به فاصله گرفتن فرکانس غالب نگاشت ثبت شده در زمین‌لرزه یادشده از فرکانس مودهای پایین ارتعاشی دره شفارود مربوط شود.

* با نگاه به نمودارهای نسبت‌های طیفی بدست آمده، چنین به نظر می‌رسد که در هر یک از دسته نگاشتهای میدان دور و میدان نزدیک، نسبت‌های طیفی در فرکانسهای ۰/۶۵ و ۱/۷۵ بیشترین مقدار را دارا می‌باشند.

از این موضوع می‌توان چنین نتیجه گرفت که مد ارتعاشی مدل ساخته شده از دره شفارود در محدوده فرکانسی پایین است که دربرگیرنده فرکانس‌های یادشده نیز می‌شود. از این رو در این فرکانسها، در مدل دره پدیده رزونانس رخ داده است.

* بطور کلی اندازه جابجایی‌ها در میدان دور زمین‌لرزه‌ها، بزرگتر از اندازه جابجایی‌ها در میدان نزدیک زمین‌لرزه‌ها است. با همه اینها زمین‌لرزه بم که خواستگاه آن با خواستگاه دیگر زمین‌لرزه‌های بکار برده شده تفاوت دارد، از این روند پیروی نمی‌کند. همچنین همانگونه که پیش‌بینی می‌شد با افزایش PGA در هر یک از زمین‌لرزه‌ها اندازه جابجایی توده لغزشی افزایش می‌یابد.

* با توجه به طیف نگاشتهای ورودی و اندازه‌های جابجایی

مراجع

- 1- Keefer D. K., (1984) "Landslides Caused by Earthquakes, U.S. Geological Survey," 345 Middlefield Road, MS 998, Menlo Park, California 94025,
- 2-King, J.L. and Tucker B. E. (1984), "observed variations of earthquake motion across a sediment-filled valley," Bull. Seism. Soc. Am. 74, 137-151.
- 3- Mavroeidis G. P., Dong G. and Papageorgiou A. S. (2004), "Near-Fault Ground Motions, and the Response of elastic and Inelastic Single-Degree of Freedom (SDOF) System." Journal of Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 33:1023-1049.
- 4-Chopra A K and Chintanapakdee C. (2001) "Comparing response of SDF systems to near-fault and far-fault earthquake motions in the context of spectral regions. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 30(12): 1 769-1 789,
- 5- Makris N, and Black C J. (2004), "Evaluation of peak ground velocity as a 'good' intensity measure for near-source ground motions." Journal of Engineering Mechanics, 130(9), 1032-1044.
- 6-Rodriguez-Marek A and Bray J D. (2006), "Seismic Site Response for Near-Fault Forward Directivity Ground Motions." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering © ASCE / December 2006:1611-1620.
- 7- Ohmachi T and Jalali A. (1999), "Fundamental Study on Near-Field Effects on Earthquake Response of Arch Dams. Earthquake Engineering and Engineering Seismology, , Vol.1, No.1, pp1-11,
- 8-Ohmachi T, Kojima N, Murakami A and Komaba N. (2003), "Near Field Effects of Hidden Seismic Faulting on a Concrete Dam." Journal of Natural Disaster Science, Vol. 25, No. 1, pp7-15.
- 9-Akbari Estahbanati A. (2007), "Effect of Near Field Strong Ground Motion on Stability Evaluation of Embankment Slopes", MS. thesis. Islamic Azad University. Science and Research Branch. Tehran, I.R.

Iran

- 10-Bouchon, M. (1973), "Effect of Topography on Surface Motion", Bull. Seism. Soc.Am,63,615-632,
- 11- Kamalian M , Gatmiri B. , and A. Sohrabibidar, (2003). "on Time Domain Two-Dimensional Site Response Analysis of Topographic Structures by B.E.M.," Journal of Seismology and Earthquake Engineering, Vol. 5, No. 2, pp.35-45,
- 12- Davoodi, M. (2003) "Dynamic characteristic evaluation of embankment dams by forced and ambient vibration tests" Ph.D. Thesis, International Earthquake Engineering and Seismology (IEES), Tehran, I.R. Iran, (in Persian),
- 13-Itasca Consulting Group, (2005)."FLAC,Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 5.0, Itasca Consulting Group, Minneapolis, Minnesota,
- 14-Sanchez-Sesma, F. J., Bravo M. A., and Herrera I. (1985),"Surface motion of topographical irregularities for incident P,SV, and Rayleigh waves", Bull. Seism. Soc. Am. 75, 263-269.
- 15- Wong H. L.(1982)," Effect of Surface Topography on the Diffraction of P, SV, and Rayleigh Waves, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 72, No. 4, pp.1167-1183,
- 16- Dravinski M. and Mossessian T. (1987) "Scattreing of Plane Harmonic P, SV, and Rayleigh Waves by Dipping Layers of Arbtrary Shape, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.77, No.1, pp.212-23,
- 17- Mossessian T. K. and Dravinski M. (1987), "Application of a Hybrid Method for Scattering of P, SV, and Rayleigh Waves by Near-Surface regularities," Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 77, No. 5, pp.1784-1803,
- 18- Mahab Ghods Consulting Engineering Co. (2001), Rock Mechanics Report-Shafa Roud in situ tests.
- 19- Mahab Ghods Consulting Engineering Co. (2000),Engineering Geology studies Report-Phase II.
- 20- Ambraseys N., Douglas J. (2000),"Reappraisal of the affect of Vertical ground Motions on Response, Engineering Seismology and Earthquake Engineering ESEE Report No.00-4,
- 21- Mahdavifar M. R., (2006) "Analytic Assessment and Designing of Management System for landslides risk due to Iran Earthquak", Seismology and Seismo engineering International Research.
- 22- Yon L., Matasovic N., and Kavazanjian E. (1996), "Seismic Response of Rigid Block on inclined Plane to Vertical and Horizontal Ground Motions Acting Simultaneously", proc 11th ASCE Engineering mechanics conf Florida., vol.4, pp 1110-1113.
- 23- Newmark N. M., "Effect of Earthquake on Dams and Embankments.London, J. Geotechnique, vol. 15, No.2, pp.139-160, (1965)

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1- fault-normal component
- 2- fault-parallel component
- 3- Plane Strain
- 4- Linear Elastic
- 5- Free Field
- 6- Node
- 7- Amplification