



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

دوره ۴۸، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۵، صفحه ۱۳۹ تا ۱۴۹
Vol. 48, No. 2, Summer 2016, pp. 139-149



نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر - مهندسی عمران و محیط زیست

Amirkabir Journal of Science & Research
Civil and Environmental Engineering
(ASJR-CEE)

بررسی رفتار سازه روی پی لغزشی با در نظرگیری مؤلفه قائم و ضریب اصطکاک متغیر به وسیله تبدیل موجک

مجید محمدی^{۱*}، علی درویش زاده^۲

۱- استادیار، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی زلزله پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله

(دریافت: ۱۳۹۰/۱۱/۲۵، پذیرش: ۱۳۹۴/۴/۱۳)

چکیده

مقاله حاضر به بررسی اثر تغییرات ضریب اصطکاک و مؤلفه قائم بر روی اثر پی لغزشی می پردازد. به علت پیچیدگی مسائل و تمرکز بر روی مسئله اصلی، سازه مورد بررسی یک بلوک صلب که نماینده ای از یک ساختمان یک طبقه ساخته شده از مصالح بنایی می باشد، در نظر گرفته شده است. برای تحلیل از دو مؤلفه افقی و قائم زلزله استفاده شده که در آن بر اساس تحقیقات جدید، ضریب اصطکاک در هر لحظه تابعی از فرکانس و دامنه لحظه ای نوسان در جهت قائم می باشد که در طول زمان زلزله متغیر است. این کمیت های لحظه ای باید به وسیله تبدیل موجک محاسبه شوند. نتایج نشان می دهند که با در نظرگیری ضریب اصطکاک متغیر بیشینه شتاب وارد شده به بلوک کاهش می یابد در حالی که وجود مؤلفه قائم زلزله باعث افزایش بیشینه شتاب وارد شده به بلوک می گردد. در نظرگیری ضریب اصطکاک متغیر و مؤلفه قائم زلزله بر روی لغزش بلوک نیز بسیار مؤثر بوده و در بیشتر موارد باعث افزایش لغزش می شود.

کلمات کلیدی:

ضریب اصطکاک، پی لغزشی، مؤلفه قائم، ارتعاش قائم، دامنه ارتعاش، تبدیل موجک

۱- مقدمه

یکی از مشکلات طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله نحوه به حداقل رساندن تغییر مکان نسبی طبقات و شتاب وارد بر طبقه است. کاهش تغییر مکان نسبی طبقات با افزایش سختی سازه امکان‌پذیر است که می‌تواند باعث افزایش شتاب وارد شده به طبقات شود. از طرف دیگر برای کاهش شتاب وارد بر طبقات می‌توان سیستم سازه ای ساختمان را انعطاف‌پذیر ساخت که این موضوع سبب افزایش تغییر مکان نسبی طبقات می‌شود. یکی از راه‌های عملی برای کاهش تغییر مکان نسبی بین طبقات به همراه شتاب وارد بر کف طبقات استفاده از جداگر پایه می‌باشد. سیستم جداگر پایه میزان انعطاف‌پذیری لازم را به همراه تغییر مکان متمرکز در سطح جداگر مهیا می‌کند. یکی از این سیستم‌ها پی لغزشی خالص می‌باشد که در آن یک لایه لغزشی بین سازه و پی قرار می‌گیرد و باعث لغزش سازه روی پی می‌شود. در این سیستم تنها نیرویی که به سازه وارد می‌شود نیروی اصطکاک می‌باشد. این یکی از مزیت‌های این سیستم نسبت به دیگر سیستم‌های جداگر می‌باشد.

تحقیقات عددی زیادی بر روی پاسخ سازه‌های مجهز به پی لغزشی انجام گرفته است. در بیش‌تر این تحقیقات ضریب اصطکاک ثابت فرض شده است [۱-۴]. علاوه بر این اثر مؤلفه قائم نادیده گرفته شده است.

یکی از قدیمی‌ترین کارهای انجام شده در زمینه بررسی اثر مؤلفه قائم زلزله بر روی سازه‌های دارای جداگر پایه در سال ۱۹۸۹ توسط لیاو و همکارانش [۵] انجام شده است. آن‌ها به بررسی ترکیب اثرات حرکت افقی و قائم یک زلزله واقعی در یک سازه دارای پی لغزشی پرداختند. مطالعات آن‌ها نشان داد که حرکت قائم زمین به طور قابل ملاحظه‌ای پاسخ روسازه و تغییر مکان پایه لغزشی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و وجود جداگر پایه در کاهش شتاب رو سازه بسیار مؤثر است.

شکیب و فولادگر [۶] اثر مؤلفه‌های سه‌گانه زلزله را بر روی پاسخ ساختمان‌های (متقارن و نامتقارن) دارای پی لغزشی بررسی کرده‌اند. آن‌ها ضریب اصطکاک را ثابت فرض کرده و اثر شتاب سازه و تغییر مکان پایه را مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها نشان دادند که در ساختمان‌های متقارن اگر هر سه مؤلفه زلزله در نظر گرفته شود، بیشینه شتاب سازه‌های دارای پرپود پایین (کمتر از ۷/۰ ثانیه) بسیار دست بالا بدست می‌آید، در حالی که شتاب سازه‌های دارای پرپودهای متوسط و بالا در دو حالت زلزله دو یا سه مولفه‌ای تفاوت قابل توجهی نمی‌کند. کارایی جداساز پایه اصطکاک‌ی در ساختمان‌های نامتقارن زمانی که تنها دو مؤلفه افقی زلزله در نظر گرفته می‌شود بیشتر از زمانی است که مؤلفه قائم نیز منظور شود. این امر ناشی از این حقیقت است که مؤلفه قائم زلزله به طور قابل ملاحظه‌ای پاسخ جانبی سیستم نامتقارن دارای جداساز لرزه ای اصطکاک‌ی خالص را تحت تأثیر قرار می‌دهد. پاسخ پیچشی سازه در خروج از مرکزیت‌های متوسط (یعنی $\frac{\theta y}{a} < 2/0$) وقتی که سازه تحت اثر زلزله ی سه مؤلفه ای قرار دارد نسبت به زمانی که تحت اثر زلزله دو مؤلفه ای قرار دارد به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. این موضوع بیانگر

تأثیر مؤلفه ی قائم زلزله بر روی پاسخ پیچشی ساختمان نامتقارن دارای خروج از مرکزیت کم تا متوسط می‌باشد.

تاکاهاشی و همکاران [۷]، ایمورا و همکاران [۸] آزمایشگاهی را به کمک میز لرزان برای مطالعه اثرات حرکات گهواره ای و مؤلفه قائم زلزله روی پاسخ دو بعدی (یک جهت افقی و یک جهت قائم) یک سیستم پی لغزش با نیروی برگرداننده انجام داده‌اند. آن‌ها مشاهده کردند که اثر مؤلفه ی قائم بر روی نیروی اصطکاک زیاد است در حالی که بر روی تغییر مکان بیشینه تأثیر چندانی ندارد.

خوشنودیان و حدقوست [۹] اثر سه مؤلفه ای زلزله را بر روی یک سازه یک درجه آزادی با در نظرگیری تغییرات ضریب اصطکاک بررسی کرده‌اند. آن‌ها مشاهده کردند اگر ضریب اصطکاک ثابت فرض شود پاسخ سیستم می‌تواند با پاسخ واقعی متفاوت باشد. برش بیشینه پایه، برش بیشینه سازه و نسبت انرژی تلف شده به انرژی ورودی برای حالت ضریب اصطکاک ثابت در مقایسه با مقدار واقعی کمتر است. ولی تغییر مکان بیشینه پایه بیشتر از مقدار واقعی است. در این تحقیق رابطه ای را که برای ضریب اصطکاک استفاده کرده‌اند یک رابطه قدیمی بوده که توسط کنستانتینو [۹] و در سال ۱۹۹۳ پیشنهاد شده است.

در این تحقیق به بررسی اثر تغییرات ضریب اصطکاک و اثر مؤلفه قائم بر روی پاسخ سازه دارای پی لغزشی پرداخته می‌شود که در آن برای در نظرگیری تغییرات ضریب اصطکاک از رابطه جدیدی که در سال ۲۰۰۸ و توسط چاجوری و هلالی پیشنهاد شده، استفاده شده است. آن‌ها نشان دادند که ضریب اصطکاک علاوه بر سرعت لغزشی به ارتعاش قائم و دامنه آن نیز بستگی دارد که در ادامه بیشتر توضیح داده خواهد شد.

۲- بررسی اثر ارتعاش قائم و دامنه آن بر روی ضریب اصطکاک

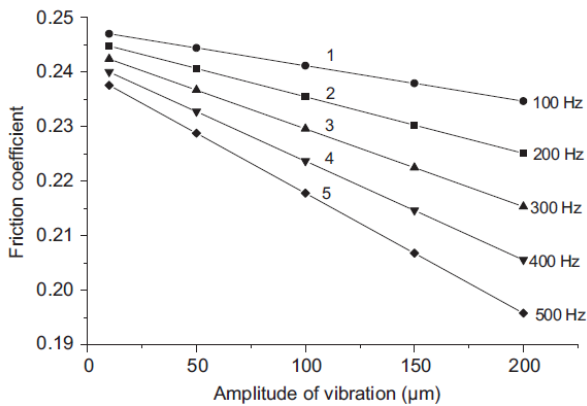
آزمایش‌های مختلف نشان می‌دهند که ضریب اصطکاک تابع عواملی است که در ذیل به بخشی از این عوامل پرداخته می‌شود. چاجوری و هلالی [۱۴] به بررسی اثر فرکانس و دامنه فرکانس قائم روی اصطکاک بین فولاد نرم و الیاف شیشه مسلح شده با پلاستیک، لاستیک، پارچه مسلح شده با کائوچو و پلی تترا فلوراید اتیلن پرداخته‌اند. ضریب اصطکاک در دو حالت بدون ارتعاش و با ارتعاش قائم دارای دامنه و فرکانس‌های مختلف مقایسه شده است.

۲-۱- ابزار اندازه گیری

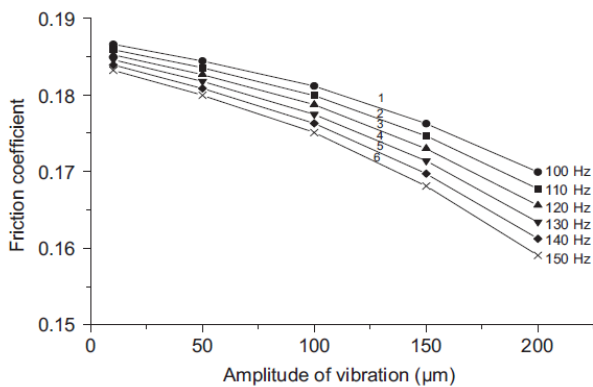
در آزمایشات انجام شده توسط چاجوری و هلالی [۱۴] از دستگاهی استفاده شده که در شکل (۱) مشاهده می‌شود. در این دستگاه پینی بر روی یک صفحه دوار می‌لغزد. در این دستگاه نمونه آزمایش دایره ای (دیسک) بر روی یک صفحه دوار (میز) که دارای یک میله عمودی که با پیچ به سطح پایین صفحه دوار متصل شده، ثابت شده است. میله از میان دو غلاف عبور می‌کند بطوریکه فقط می‌تواند به صورت محوری جابه جا شود و از هر گونه جابه جای شعاعی آن جلوگیری شده است. دو غلاف

کائوچو و لاستیک تقریباً به صورت خطی است اما برای پلی تترا فلوراید اتیلن (PTFE) به صورت غیر خطی می‌باشد.

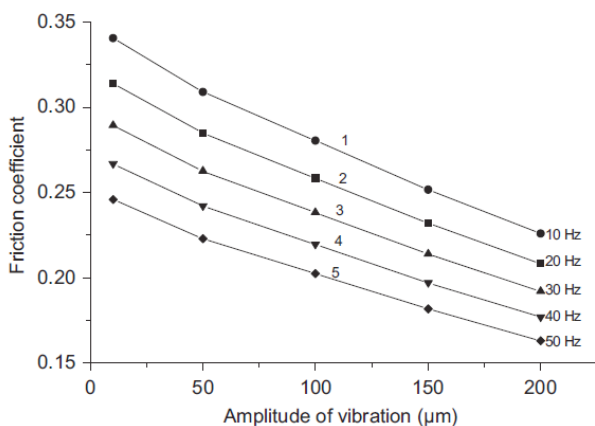
ضریب اصطکاک کائوچو، ایاف شیشه ای مسلح شده با پلاستیک،



شکل ۲: تغییرات ضریب اصطکاک با تغییرات دامنه ارتعاش در فرکانس‌های مختلف (۱/۱۷ m/s) = سرعت ارتعاش، ۱۰ N = نیروی نرمال، ۰/۲ μm = زبری تماس و ۵۰٪ = رطوبت نسبی نمونه آزمایش: پارچه مسلح شده با کائوچو [۱۴]



شکل ۳: تغییرات ضریب اصطکاک با تغییرات دامنه ارتعاش در فرکانس‌های مختلف (۱/۱۷ m/s) = سرعت ارتعاش، ۱۰ N = نیروی نرمال، ۰/۲ μm = زبری تماس و ۵۰٪ = رطوبت نسبی نمونه آزمایش: PTFE [۱۴]

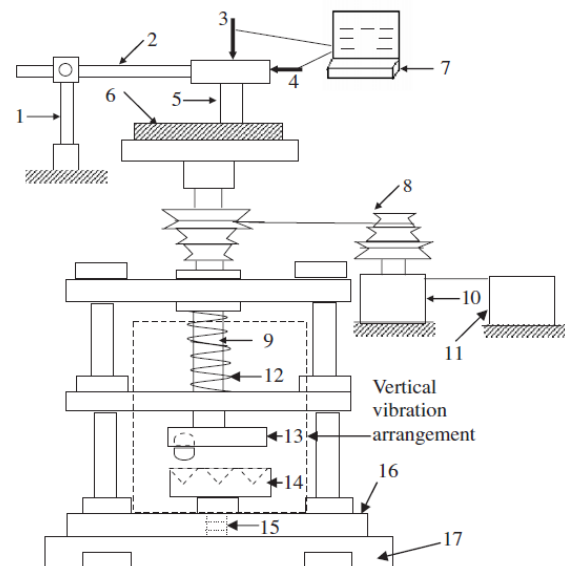


شکل ۴: تغییرات ضریب اصطکاک با تغییرات دامنه ارتعاش در فرکانس‌های مختلف (۱/۱۷ m/s) = سرعت ارتعاش، ۱۰ N = نیروی نرمال، ۰/۲ μm = زبری تماس و ۵۰٪ = رطوبت نسبی نمونه آزمایش: لاستیک [۱۴]

به صفحات مربعی تکیه گاهی که خود بوسیله پایه‌هایی به صفحه پای ستون ثابت شده اند، قرار گرفته اند و باعث صلبیت لازم برای سازه اصلی می‌شوند. یک قرقره وی (۷) شکل بر روی صفحه تکیه گاهی بالایی قرار گرفته و باعث انتقال چرخش از موتور به میله می‌گردد. بین صفحه تکیه گاهی اول و دوم میله ای از داخل یک فنر فشرده عبور کرده و در برابر هرگونه جابجایی محوری میله مقاومت می‌کند.

در انتهای میله دو صفحه دایره ای قرار دارد که یکی در انتهای میله و دیگری به صفحه پای ستون متصل شده است. به سطح پایین صفحه متصل به میله یک گوی کروی قرار دارد و روی سطح بالای صفحه متصل به صفحه پای ستون تعدادی شیار وجود دارد. در هنگام چرخش، گوی متصل به صفحه بالایی بر روی صفحه شیاردار پایینی می‌لغزد و به دلیل وجود فنر میله همراه با صفحه دوار مرتعش می‌شود.

ارتعاش ایجاد شده به صورت سینوسی بوده و جهت ارتعاش عمود بر جهت لغزش بین می‌باشد. با تغییر سرعت میله و تعداد شیارهای صفحه پایین فرکانس ارتعاش تغییر می‌کند و با تغییر ارتفاع این شیارها دامنه



شکل ۱: تصویر دستگاه اندازه گیری ضریب اصطکاک. (۱) نگهدارنده بازو (۲) بازوی نیرو (۳) بار محوری (۴) بار افقی (۵) نمونه (۶) دیسک آزمایش با میز دوار (۷) رایانه (۸) قرقره (۹) میله اصلی (۱۰) موتور (۱۱) واحد کنترل سرعت (۱۲) فنر (۱۳) صفحه بالایی با گلوله (۱۴) صفحه پایینی با شیارهای سینوسی [۱۴]

فرکانس را می‌توان تغییر داد.

۲-۲ نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها

چاقوری و هلالی [۱۴] برای مشاهده اثر دامنه فرکانس روی ضریب اصطکاک، آزمایش‌هایی با دامنه‌های ۱۰، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ μm در فرکانس‌های مختلف انجام شده است. نتایج این آزمایشها در شکل‌های (۲) تا (۵) نشان داده شده است. در این شکل‌ها مشاهده می‌شود که ضریب اصطکاک با افزایش دامنه ارتعاش در فرکانس‌های مختلف و در سرعت‌های متفاوت برای مواد مختلف کاهش می‌یابد. این کاهش ضریب اصطکاک برای فولاد نرم، ایاف شیشه مسلح شده با پلاستیک (GFRP)،

چاقوری و هلالی [۱۵] با توجه به نتایج آزمایشهای انجام شده، رابطه جدیدی برای ضریب اصطکاک برای برخی از این مواد (پارچه مسلح شده با کائوچو، الیاف شیشه مسلح شده با پلاستیک و فولاد نرم) بدست آوردند که در ادامه آورده خواهند شد:

۱- فولاد نرم:

$$\mu_f = 0.19 \left[\frac{AF}{V} \right]^{-0.17} \quad (2)$$

۲- الیاف شیشه ای مسلح شده با پلاستیک:

$$\mu_f = 0.2 \left[\frac{AF}{V} \right]^{-0.05} \quad (3)$$

۳- کائوچو:

$$\mu_f = 0.19 \left[\frac{AF}{V} \right]^{-0.04} \quad (4)$$

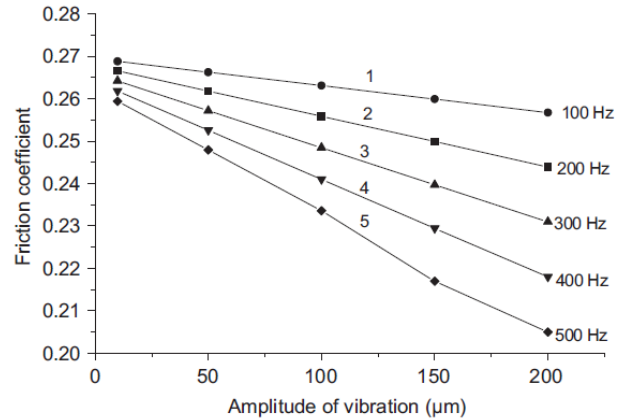
که در آنها F فرکانس قائم ارتعاش، A دامنه ارتعاش قائم و V سرعت لغزش است.

با توجه به اینکه ماده ای که بعنوان لایه لغزشی در نظر گرفته می شود باید ضریب اصطکاک پایین و فراوانی زیاد داشته باشد، هیچکدام از موادی که برای آنها رابطه ذکر شده، نمی توانند گزینه مناسبی برای لایه لغزشی باشند. البته با توجه به اینکه هدف از این تحقیق بررسی تغییرات ضریب اصطکاک بر روی پاسخ سازه دارای پی لغزشی می باشد و از طرف دیگر رابطه ای که برای فولاد نرم بدست آمده از دقت کافی برخوردار نیست، بنابراین در این تحقیق از الیاف شیشه به عنوان لایه لغزشی استفاده شده است.

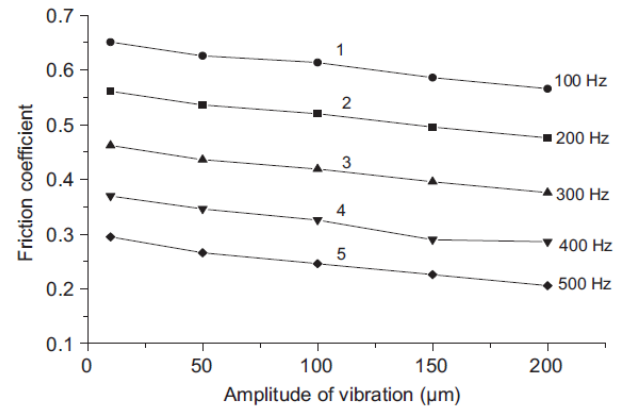
۲-۴- تطبیق رابطه بدست آمده با حرکات زمین

برای استفاده از روابط ۲ تا ۴ در بررسی رفتار پی لغزان باید به مفهوم اصلی فرکانس و دامنه ارتعاش توجه نمود. با توجه به توضیحات داده شده، ارتعاشی دیسک به صورت سینوسی با فرکانس ω است و جهت ارتعاش آن عمود بر جهت لغزش (جهت افقی) است که با توجه به شکل (۱)، دامنه ارتعاش برابر با نصف ارتفاع شیارهای صفحه متصل به پای ستون می باشد. بنابراین می توان دیسک را به زمین و بین و مجموعه متصل به آن را به سازه تشبیه نمود که جابجایی و فرکانس حرکت دیسک مشابه جابجایی قائم زمین در هنگام زلزله است. البته باید دقت نمود که فرکانس اعمال شده در آن آزمایش ثابت می باشد، ولی فرکانس جابجایی قائم زمین یکسان نیست و هر لحظه تغییر می کند. از این رو برای استفاده از این رابطه در پی لغزان باید از فرکانس و دامنه لحظه ای جابجایی قائم زمین استفاده کرد.

فرکانس لحظه ای و ضریب آن را می توان به کمک نرم افزار متلب و تبدیل موجک محاسبه کرد که در ادامه توضیح داده می شود.



شکل ۵: تغییرات ضریب اصطکاک با تغییرات دامنه ارتعاش در فرکانس های مختلف (۱/۱۷ m/s) سرعت ارتعاش، ۱۰ N نیروی نرمال، ۰/۲ μm زبری تماس و ۵۰٪ رطوبت نسبی نمونه آزمایش: الیاف شیشه [۱۴]



شکل ۶: تغییرات ضریب اصطکاک با تغییرات دامنه ارتعاش در فرکانس های مختلف (۱/۱۷ m/s) سرعت ارتعاش، ۱۰ N نیروی نرمال، ۰/۲ μm زبری تماس و ۵۰٪ رطوبت نسبی نمونه آزمایش: فولاد نرم [۱۴]

فولاد نرم و پلاستیک با افزایش سرعت لغزشی در حالت با و بدون ارتعاش، کاهش می یابد. البته سرعت کاهش ضریب اصطکاک در حالت با ارتعاش بیشتر از بدون ارتعاش می باشد. کاهش ضریب اصطکاک برای این مواد (بجز لاستیک) در اثر افزایش سرعت لغزشی می تواند به علت تغییر در سرعت برشی که خود می تواند بر مشخصات مکانیکی مواد تأثیر بگذارد، باشد.

۲-۳- روابط استخراج شده از آزمایشات

خوشنودیان و حقدوست برای در نظرگیری تغییرات ضریب اصطکاک از یک رابطه قدیمی (رابطه ۱) که توسط کنستانتینو [۹] در سال ۱۹۹۳ ارائه شده استفاده کردند. در این رابطه μ_{min} و μ_{max} به ترتیب برابر ضریب اصطکاک بیشینه و کمینه و سرعت لغزشی می باشد. پارامتری است که شدت تغییرات ضریب اصطکاک را از μ_{max} به μ_{min} بیان می کند:

$$\mu = \mu_{max} - (\mu_{max} - \mu_{min}) e^{-\alpha|\dot{\mu}|} \quad (1)$$

۳- تبدیل موجک و محاسبه فرکانس لحظه‌ای

تبدیل موجک یک مبحث بسیار گسترده می‌باشد که در اینجا به طور خیلی مختصر شرح داده می‌شود:

با استفاده از تبدیل فوریه (رابطه ۵) می‌توان یک سیگنال را از حوزه زمان به حوزه فرکانس برد و فرکانس‌های موجود در آن را به دست آورد. البته این کار هیچگونه اطلاعات زمانی در مورد وقوع این فرکانس‌ها ارائه نمی‌کند. در سیگنال‌های ایستا تمام فرکانس‌ها در تمام بازه‌های زمانی آن وجود دارند و نیازی به اطلاعات زمانی نیست. ولی در سیگنال‌های ناپایستا که در آن هر فرکانس در یک بازه زمانی خاص وجود دارد باید بدانیم که هر فرکانس در چه زمانی اتفاق افتاده است که تبدیل فوریه چنین اطلاعاتی را در اختیار ما قرار نمی‌دهد (در رابطه ۵) $x(t)$ تابع انتگرال‌پذیر و f فرکانس می‌باشد).

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{i2\pi ft} dt \quad (5)$$

برای برطرف نمودن این ضعف تبدیل فوریه، تبدیل فوریه زمان-کوتاه (رابطه ۶) پیشنهاد شد. تفاوت تبدیل فوریه زمان-کوتاه با تبدیل فوریه این است که در تبدیل فوریه زمان-کوتاه، سیگنال به بخش‌های به حد کافی کوچکی تقسیم می‌شود به نحوی که بتوان این قسمت‌ها را ایستا فرض نمود. بدین منظور از یک تابع پنجره $w(t)$ استفاده می‌شود که طول آن برابر است با حداقل طول مورد نیاز برای آنکه فرض ایستا بودن قطعات جدا شده سیگنال معتبر باشد (در رابطه ۶) $x(t)$ تابع انتگرال‌پذیر و f فرکانس می‌باشد).

$$STFT_x^w(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) w(t) e^{i2\pi ft} dt \quad (6)$$

تبدیل فوریه زمان-کوتاه پنجره دارای طول محدودی می‌باشد و فقط یک بخش از سیگنال را می‌پوشاند که باعث می‌شود تفکیک‌پذیری فرکانسی ضعیفتر شود به این معنی که مقادیر دقیق مؤلفه‌های فرکانسی موجود در سیگنال را در اختیار ما قرار نمی‌دهد. فقط بیان می‌دارد که چه محدوده فرکانسی در سیگنال وجود دارد.

تنها مسأله مهم در تبدیل فوریه زمان-کوتاه، انتخاب اندازه طول پنجره است. باید دقت داشت که انتخاب پنجره با طول بزرگتر هر چند به افزایش دقت فرکانسی کمک می‌کند، اما فرض ایستا بودن قطعه‌های پنجره شده سیگنال را تحت تاثیر قرار می‌دهد. پاسخ به این مسئله به کاربرد مورد نظر بستگی دارد و اغلب با توجه به سیگنال مورد تحلیل می‌توان طولی از پنجره را انتخاب نمود که در عین حفظ اعتبار ایستایی، دقت زمانی و فرکانسی قابل قبولی داشته باشد. اما با توجه به دشواری این رویکرد و وابستگی آن به سیگنال، ایده استفاده از نوعی تبدیل با دقت قابل تغییر به ذهن می‌رسد که منجر به پیدایش تبدیل موجک گردید.

۳-۱- تبدیل موجک پیوسته

تبدیل موجک پیوسته به عنوان روشی جایگزین برای تبدیل فوریه زمان-کوتاه ارائه گردید و هدف آن فائق آمدن بر مشکلات مربوط به

انتخاب طول پنجره مناسب در تبدیل فوریه زمان-کوتاه است. در تبدیل موجک، مشابه تبدیل فوریه زمان-کوتاه، سیگنال مورد نظر در یک تابع (موجک) ضرب می‌شود که در حقیقت نقش همان تابع پنجره را دارد. همچنین به طور مشابه با قبل، تبدیل موجک نیز به طور جداگانه بر روی قطعه‌های زمانی مختلف سیگنال انجام می‌شود. بنابراین اختلاف عمده تبدیل موجک این است که در تبدیل موجک، عرض پنجره به موازات تغییر مؤلفه‌های فرکانسی تغییر می‌کند که به طور حتم مهم‌ترین ویژگی تبدیل موجک است.

بر این اساس، تبدیل موجک پیوسته به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$CWT_x^\psi(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi^*\left(\frac{t-\tau}{s}\right) dt \quad (7)$$

که در آن $x(t)$ تابع انتگرال‌پذیر، s و τ به ترتیب پارامترهای انتقال و مقیاس می‌باشند. مفهوم انتقال دقیقاً مشابه با مفهوم انتقال زمانی در تبدیل فوریه زمان-کوتاه است که میزان جابجایی پنجره را معلوم می‌کند و به وضوح، اطلاعات زمانی تبدیل را در بردارد. اما برخلاف تبدیل زمان-کوتاه، در تبدیل موجک به طور مستقیم کمیت فرکانس را نداریم و به جای آن، کمیت مقیاس مورد استفاده قرار می‌گیرد که به طور معکوس با فرکانس ارتباط دارد و در ادامه با آن بیشتر آشنا خواهیم شد. در رابطه (۷)، ψ تابع پنجره است که به اصطلاح موجک مادر نامیده می‌شود. اصطلاح موجک به معنای موج کوچک می‌باشد و دلیل استفاده از واژه کوچک، محدود بودن و کوتاه بودن تابع پنجره می‌باشد. علت استفاده از واژه موج نیز به دلیل ماهیت نوسانی این تابع می‌باشد. واژه مادر نیز به این منظور استفاده می‌شود که تمامی نسخه‌های انتقال یافته و مقیاس شده، همگی از روی یک تابع اولیه بدست می‌آیند که اصطلاحاً موجک مادر نامیده می‌شود. به بیان علمی، موجک مادر، یک تابع الگو برای تولید سایر پنجره‌ها می‌باشد.

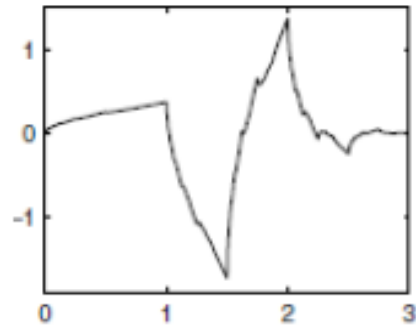
همانطور که پیش از این عنوان شد، در تبدیل موجک به جای فرکانس، پارامتر مقیاس وجود دارد. همانگونه که از معنی این پارامتر برمی‌آید، نوعی مفهوم مقیاس درون آن نهفته است. درست مانند مفهوم مقیاس در نقشه، در تبدیل موجک نیز مقیاس‌های بزرگ، متناظر با یک دید کلی و فارغ از جزئیات به سیگنال است (متناظر با فرکانس‌های پائین) و مقیاس‌های کوچک، متناظر با نگاه به جزئیات سیگنال است و بنابراین در تناظر با فرکانس‌های بالا خواهد بود.

مقیاس کردن، به عنوان یک عملیات ریاضی، سیگنال را منقبض یا منبسط می‌کند. بدین سان، در مقیاس‌های بالا که سیگنال منبسط می‌شود، جزئیات را خواهیم داشت و در مقیاس‌های پائین که سیگنال منقبض می‌شود، کلیات را خواهیم داشت. توجه به این نکته ضروریست که متغیر مقیاس در تعریف تبدیل موجک، در مخرج ظاهر شده است (رابطه ۷).

انواع مختلفی برای موجک ارائه شده که برخی از مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از ۱- هار ۲- دابیشیز (که خود دارای ۱۰ نوع است) ۳- سیملت (که

دارای ۸ نوع است) ۴- کویفلت (که دارای ۵ نوع است) ۵- موجک میر
 ۳- ۲- انتخاب نوع موجک

حال برای بدست آوردن فرکانس لحظه‌ای (فرکانس غالب لحظه‌ای) باید یکی از این موجک‌ها را انتخاب کرد. با توجه به اینکه انتخاب نوع موجک یک مسئله قضایوتی است و از روی ویژگی‌های موجک‌ها، شباهت ظاهری آن‌ها با سیگنال مورد تحلیل، محتوای فرکانسی سیگنال و غیره انجام می‌شود [۱۵]. از طرف دیگر در زلزله شناسی و مهندسی زلزله بیشتر

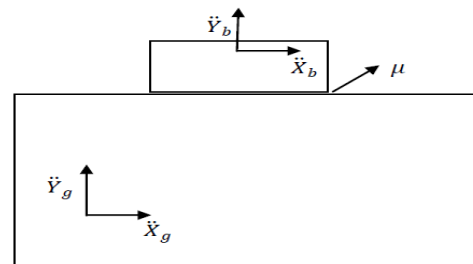


شکل ۷: موجک sym2

از موجک‌های دابیشز و سیملت استفاده می‌شود. در این تحقیق که تمرکز اصلی بر روی جابجایی می‌باشد که فاقد تغییرات لحظه‌ای زیاد است از موجک sym2 که تابع مقیاس آن در شکل (۷) آمده، استفاده شده است. با توجه به اینکه موج مفروض در هر پنجره‌ی در نظر گرفته شده دارای تعدادی موج با فرکانس‌های مختلف است باید از میان آن‌ها یک فرکانس را به عنوان فرکانس اصلی انتخاب نمود. تا به حال سه روش برای محاسبه فرکانس لحظه‌ای پیشنهاد شده است ۱- روش مارسیل که از فاز تبدیل موجک پیوسته برای تخمین فرکانس غالب لحظه‌ای استفاده می‌کند. ۲- روش کارمونا ۳- روش ساده. دو روش اول بیشتر برای سیگنال‌هایی استفاده می‌شوند که دارای پارازیت باشند [۱۶]. در این تحقیق از روش ساده برای تخمین فرکانس لحظه‌ای استفاده شده است. در روش ساده ابتدا از سیگنال تبدیل موجک گرفته و در هر گام زمانی فرکانسی که دارای بیشترین دامنه باشد به عنوان فرکانس غالب لحظه‌ای در نظر گرفته شده است.

۳-۳- رفتار بلوک صلب بر روی پی تک لایه لغزشی

در این بخش برای بررسی رفتار سازه دارای پی لغزشی، از یک جسم صلب (بلوک) که بر روی زمین قرار گرفته استفاده شده است. جزئیات



شکل ۸: مدل تحلیل شده جسم صلب بر روی پی لغزشی

مدل بلوک صلب مورد نظر در شکل (۸) نشان داده شده است. که در آن

$$\ddot{Y}_b: \text{شتاب قائم بلوک} \quad \ddot{X}_b: \text{شتاب افقی بلوک}$$

$$\ddot{Y}_g: \text{شتاب قائم بلوک} \quad \ddot{X}_g: \text{شتاب افقی بلوک}$$

معادله حرکت بلوک در اثر تحریکات زمین به شکل معادله زیر خواهد بود:

$$m_b \ddot{X}_b + N \cdot \mu = -m_b \ddot{X}_g \quad (۸)$$

نیروی $-m_b \ddot{X}_g$ (جرم بلوک) از طرف زمین بر بلوک صلب وارد می‌شود. حداکثر نیروی قابل انتقال به سازه از طرف زمین $N \cdot \mu$ (ضریب اصطکاک) می‌باشد که در آن N نیروی قائم اعمال شده به بلوک از طرف زمین است و مقدار آن برابر است با:

$$N = m_b (g + \ddot{Y}_g) \quad (۹)$$

در صورتیکه در هر گام زمانی رابطه (۱۰) برقرار باشد و لغزش (سرعت نسبی) وجود نداشته باشد، شتاب وارد شده به بلوک همان شتاب زمین می‌باشد (رابطه ۱۱) و در این حالت بلوک به زمین چسبیده و با آن حرکت می‌کند.

$$\mu \cdot N = \mu \cdot m_b (g + \ddot{Y}_g) \geq m_b \ddot{X}_g$$

$$\mu \geq \left| \frac{\ddot{X}_g}{g + \ddot{Y}_g} \right| \quad (۱۰)$$

$$\ddot{X}_b = \ddot{X}_g \quad (۱۱)$$

در غیر اینصورت لغزش وجود داشته و شتاب وارد شده به بلوک از رابطه (۱۲) بدست می‌آید و شتاب بلوک به مقدار حاصلضرب ضریب اصطکاک در مجموع شتاب گرانش و شتاب قائم زلزله محدود می‌شود رابطه (۱۲) که این مهم‌ترین ویژگی پی لغزشی است.

$$\ddot{X}_b = \mu \cdot (g + \ddot{Y}_g) \cdot \text{sgn}(\dot{X}_g - \dot{X}_b) \quad (۱۲)$$

به طوری که می‌توان گفت شتاب افقی منتقل شده به بلوک از طرف زمین در هنگام عبور از لایه لغزان دچار تغییر می‌شود که این تغییرات در واقع تابعی از مقدار ضریب اصطکاک و شتاب قائم زلزله در هر لحظه می‌باشد.

با توجه به رابطه بدست آمده برای ضریب اصطکاک (رابطه ۳) و نحوه محاسبه فرکانس غالب لحظه‌ای به کمک نرم‌افزار متلب برنامه ای برای تحلیل رفتار دینامیکی بلوک روی پی لغزشی با در نظرگیری تغییرات ضریب اصطکاک تدوین شده است.

۴- نتایج تحلیل

۴-۱- اثر ضریب اصطکاک

در شکل (۹) شتاب وارد شده به بلوک در دو حالت ضریب اصطکاک متغیر و ثابت برای زلزله‌های بم، نورث‌ریج، گزلی، طبس و امپریال والی نشان داده شده اند. همانطور که مشاهده می‌شود در بیشتر زمان‌ها شتاب وارد شده به بلوک برای دو حالت یکسان می‌باشد ولی در زمان‌هایی که شتاب وارد شده به بلوک بیشینه می‌شود، شتاب وارد شده به بلوک در حالت ضریب اصطکاک متغیر کمتر است. این نتیجه را برای تمامی زلزله می‌توان مشاهده کرد. علت کمتر بودن بیشینه شتاب بلوک در حالت ضریب اصطکاک متغیر نسبت به ضریب اصطکاک ثابت این است که در رابطه $\mu_s(g + \ddot{Y}_g)$ (بیشینه شتاب وارد شده به بلوک) مقدار داخل پرانتز برای یک زلزله خاص برای دو حالت برابر است ولی مقدار μ (ضریب اصطکاک) برای حالت ضریب اصطکاک متغیر در زمان‌های لغزش کمتر می‌باشد.

نمودار لغزش برای زلزله‌های بم، طبس، نورث‌ریج، گزلی و امپریال والی در شکل (۱۰) نشان داده شده اند. در زلزله بم روند تغییرات نمودارهای لغزش در طول زلزله برای دو حالت مشابه یکدیگر می‌باشد. ولی مقدار لغزش برای حالت ضریب اصطکاک متغیر کمتر می‌باشد. مشابه چنین رفتاری برای زلزله‌های نورث‌ریج و طبس نیز مشاهده می‌شود. در زلزله گزلی نمودار لغزش بلوک در دو حالت تا زمان‌های پایانی بر یکدیگر منطبق هستند ولی بعد از آن لغزش بلوک در حالت ضریب اصطکاک متغیر تقریباً صفر می‌شود درحالی‌که در ضریب اصطکاک ثابت افزایش می‌یابد.

در این چهار زلزله (بم، طبس، نورث‌ریج، گزلی و امپریال والی) فرض ضریب اصطکاک ثابت باعث کاهش لغزش بلوک شده است و میزان این تأثیر در زلزله‌های نورث‌ریج و گزلی بسیار بیشتر می‌باشد. زلزله امپریال والی رفتار متفاوتی از خود نشان داده است و مشاهده می‌شود از همان زمان‌های ابتدایی نمودارهای لغزش در دو حالت از یکدیگر فاصله گرفته اند و لغزش بلوک در حالت ضریب اصطکاک ثابت کمتر است. از نتایج بدست آمده می‌توان نتیجه گرفت که فرض ضریب اصطکاک ثابت چقدر می‌تواند با واقعیت متفاوت باشد.

۴-۲- اثر مؤلفه قائم

در جدول (۱) مقادیر بیشینه شتاب و لغزش در دو حالت با و بدون در نظرگیری مؤلفه قائم برای زلزله‌های مختلف نشان داده شده اند. در تمامی زلزله‌های در نظر گرفته شده وجود مؤلفه قائم باعث افزایش بیشینه شتاب وارد شده به بلوک می‌شود. برای زلزله‌های نورث‌ریج و بم وجود مؤلفه قائم باعث کاهش بیشینه لغزش بلوک شده است درحالی‌که برای زلزله‌های امپریال والی و طبس بیشینه لغزش بلوک افزایش یافته است. مؤلفه قائم تأثیر چندانی بر روی بیشینه لغزش در زلزله گزلی نداشته است.

۴-۳- بررسی نتایج تحلیل با فرض $\mu_s = 0/1$

هدف از این بخش بررسی اثر کاهش ضریب اصطکاک بر روی

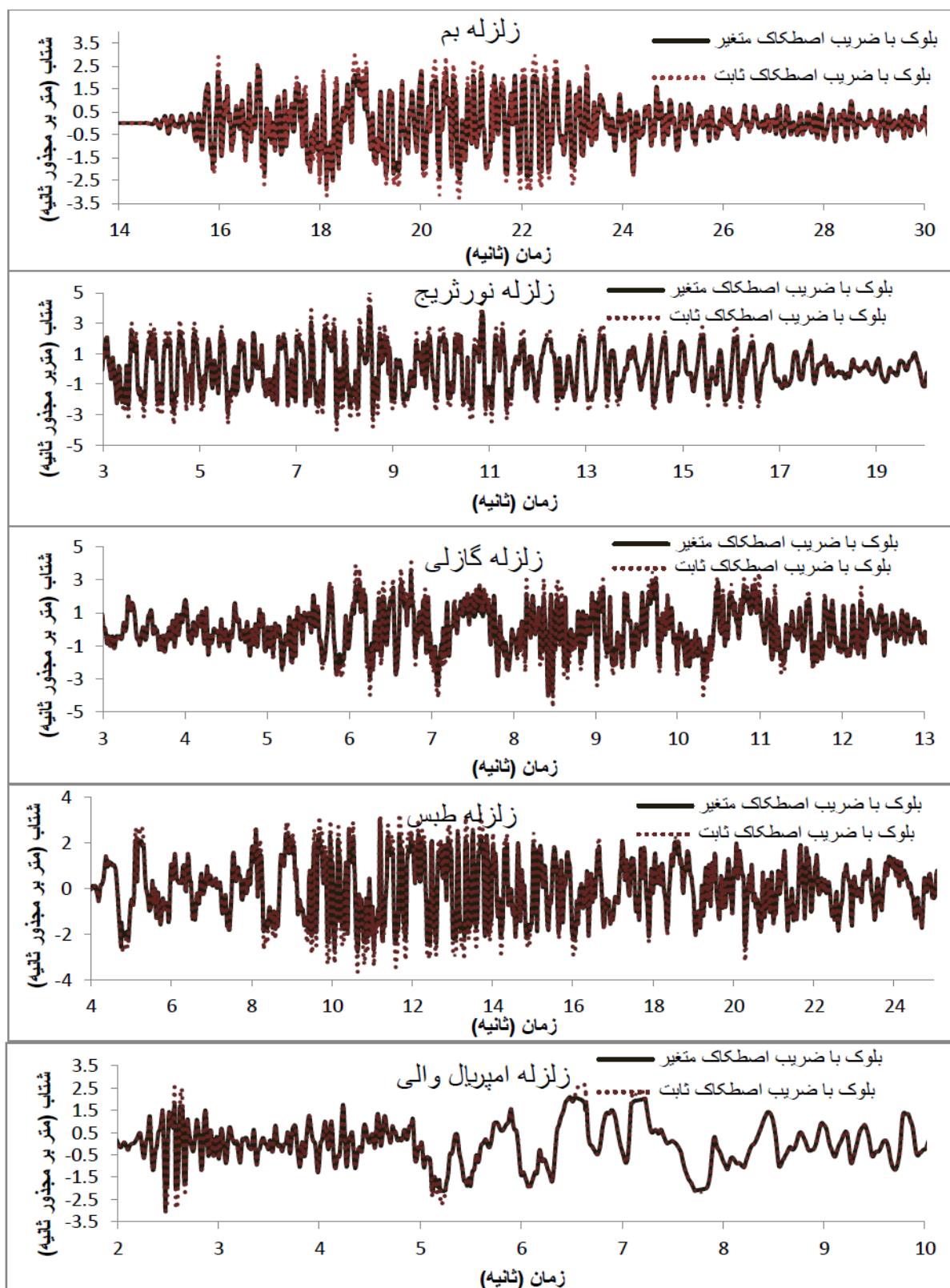
جدول ۱: نتایج تحلیل در حالت با و بدون مؤلفه قائم

		بدون مؤلفه قائم	با مؤلفه قائم
زلزله بم	بیشینه شتاب (m/s ²)	۲/۲۴۲	۲/۷۲۴
	بیشینه لغزش (m)	۵	۱/۵۸۹
زلزله طبس	بیشینه شتاب (m/s ²)	۲/۶۲	۲/۹۹۴
	بیشینه لغزش (m)	۰/۴۹	۱/۶۵۳
زلزله گزلی	بیشینه شتاب (m/s ²)	۲/۶۲	۳/۹۸۶
	بیشینه لغزش (m)	۰/۳۱۶	۰/۳۳۳
زلزله نورث‌ریج	بیشینه شتاب (m/s ²)	۲/۶۲	۴/۰۶۳
	بیشینه لغزش (m)	۲/۲۳	۱/۳۴۱
زلزله امپریال والی	بیشینه شتاب (m/s ²)	۲/۶۲	۳/۰۱۳
	بیشینه لغزش (m)	۰/۳۲۵	۰/۹۹۴

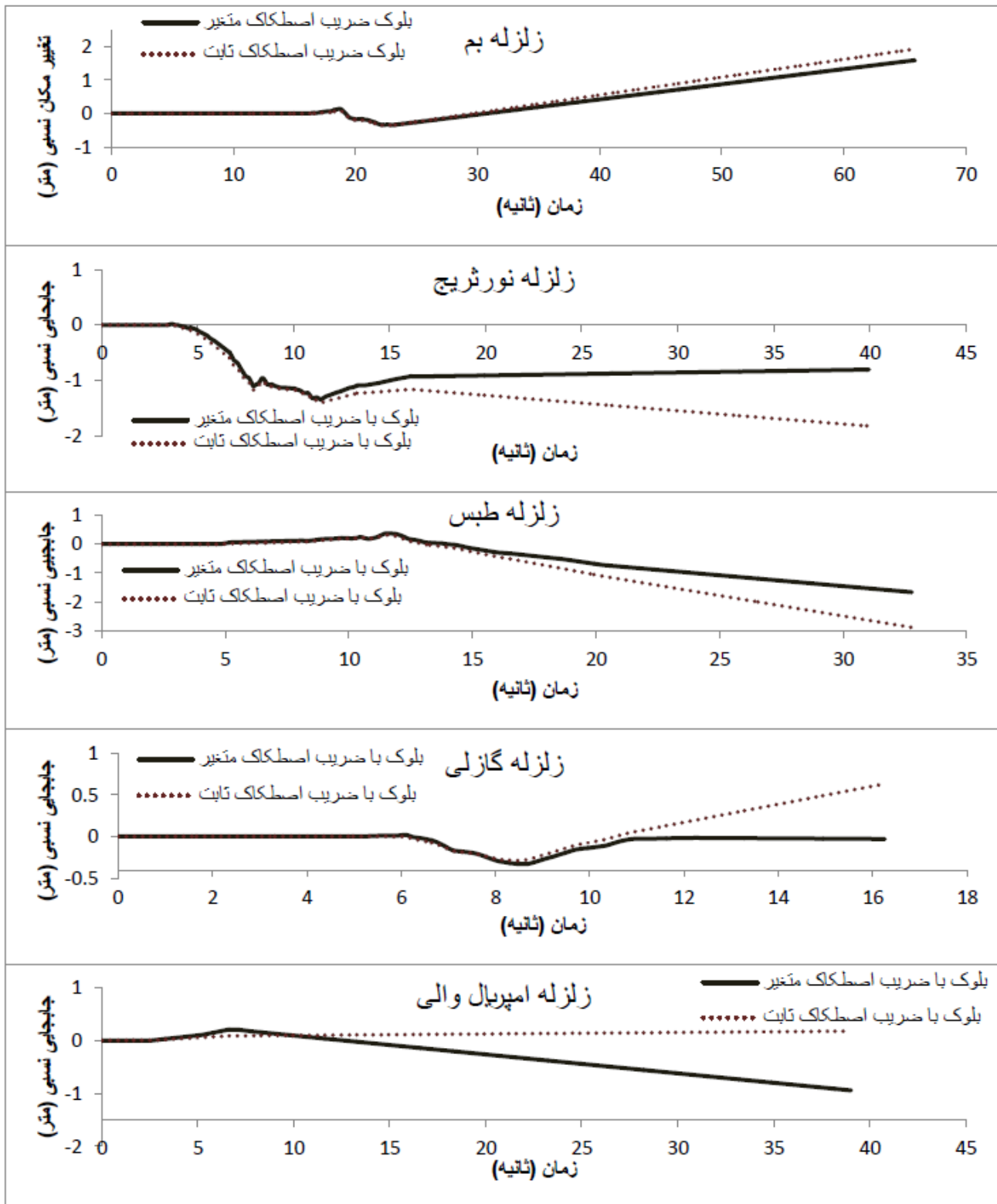
شتاب و لغزش بلوک است. برای این منظور از ماده‌ای فرضی که دارای ضریب اصطکاک استاتیکی برابر ۰/۱ و ضریب اصطکاک دینامیکی آن نیز از همان رابطه لیاغ شیشه تبعیت می‌کند استفاده می‌شود. در جدول (۲) نتایج بدست آمده از $\mu_s = 0/1$ و $\mu_d = 0/267$ (لیاغ شیشه) آمده است. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود کاهش مقدار ضریب اصطکاک باعث می‌شود شتاب وارد شده به بلوک کاهش یابد ولی در مورد جابجایی نسبی نمی‌توان نتیجه قطعی گرفت زیرا تغییرات این کمیت از روند یکنواختی تبعیت نمی‌کند و به علت وابستگی آن به عوامل متعدد مربوط به زلزله، غیر قابل پیش بینی است.

۵- نتایج

در این تحقیق رفتار لرزه ای یک بلوک صلب که می‌تواند به عنوان نماینده ای از یک ساختمان آجری یک طبقه فرض شود، روی پی لغزشی



شکل ۹: شتاب بلوک در دو حالت ضریب اصطکاک ثابت و متغیر



شکل ۱۰: جابجایی نسبی بلوک در دو حالت ضریب اصطکاک ثابت و متغیر

جدول ۲: مقادیر نتایج برای $\mu_s = 0/1$ و $0/267$

ضریب اصطکاک μ_s		0/1	0/267
زلزله بم با شتاب بیشینه 0/78g	شتاب مطلق بیشینه (m/s ²)	1/29	2/734
	جابجایی نسبی بیشینه (m)	2/3	1/589
	جابجایی نسبی باقیمانده (m)	2/3	1/59
زلزله طبس با شتاب بیشینه 0/85g	شتاب مطلق بیشینه (m/s ²)	1/265	2/994
	جابجایی نسبی بیشینه (m)	3/691	1/653
	جابجایی نسبی باقیمانده (m)	3/691	1/524
زلزله گازی با شتاب بیشینه 0/72g	شتاب مطلق بیشینه (m/s ²)	1/582	3/986
	جابجایی نسبی بیشینه (m)	1/516	0/333
	جابجایی نسبی باقیمانده (m)	1/516	0/36
زلزله نورث ریج با شتاب بیشینه 1/78g	شتاب مطلق بیشینه (m/s ²)	1/593	4/063
	جابجایی نسبی بیشینه (m)	5/627	1/341
	جابجایی نسبی باقیمانده (m)	5/627	0/784
زلزله امپریال والی با شتاب بیشینه 0/44g	شتاب مطلق بیشینه (m/s ²)	0/921	3/013
	جابجایی نسبی بیشینه (m)	0/62	0/994
	جابجایی نسبی باقیمانده (m)	0/339	0/926

با در نظرگیری تغییرات ضریب اصطکاک و همچنین اثر مؤلفه قائم مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج زیر بدست آمد.

۱- فرض ضریب اصطکاک ثابت می‌تواند با واقعیت بسیار متفاوت باشد و دست بالا در نظر گرفته شود و در نظرگیری ضریب اصطکاک متغیر

باعث کاهش شتاب وارد شده بر بلوک می‌شود.

۲- فرض ضریب اصطکاک متغیر نمودار لغزش بلوک را بشدت تحت تأثیر قرار می‌دهد و در بیشتر موارد باعث افزایش میزان لغزش بلوک می‌شود. در ضمن هرچه ضریب اصطکاک کمتر شود شتاب وارد به بلوک کاهش می‌یابد و همچنین تأثیر زیادی بر روی لغزش بلوک می‌گذارد و در بیشتر موارد باعث افزایش لغزش بیشینه می‌شود.

۳- با توجه بررسی‌های انجام شده در این تحقیق در نظرگیری اثر مؤلفه قائم باعث می‌شود که شتاب وارد شده به بلوک افزایش می‌یابد ولی در مورد تأثیر آن بر مقدار لغزش بلوک بر روی پی نمی‌توان نتیجه قطعی برای همه رکورد ها گرفت زیرا این عامل در برخی موارد باعث افزایش مقدار لغزش و در برخی دیگر باعث کاهش آن می‌شود.

۶- مراجع

- [1] Mostaghel, X. and Tanbakuchi, J. "Response of Sliding Structures to Earthquake Support Motion", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 11, pp. 729-748 (1983)
- [2] Fan, F.G, Ahmadi, G. and Tadjbakhsh, I.G. "Base Isolation of a Multistory Building under Harmonic Ground motion – a Comparison of Performances of Various Systems", Tech. Report NCEER-88-0010, National Center for Earthquake Engineering, State University of New York, Buffalo (1988)
- [3] Jangid, R. "Seismic Response of Sliding Structures to Bi-Direction Earthquake Excitation", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 25, pp. 1301-1306 (1996)
- [4] Shakib, H. and Fuladgar, A. "Response of Pure-Friction Sliding Structures to Three Components of Earthquake Excitation", Computers and Structures, 81, pp. 189-196 (2003)
- [5] Liaw, T.C, Tian, Q.L. and Cheung, Y.K. "Structures on Sliding Base Subjected to Horizontal and Vertical Motion", Journal of Structural Engineering, ASCE, 114, PP. 2119-2129 (1988).
- [6] Lin, B.C. and Tadjbakhsh, I.G. "Effect of Vertical Motion on Friction Driven System", Earthquake Engineering and Structural Dynamic, 14, pp. 609-622 (1986).
- [7] Takahashi, Y., Iemura, H., Yanagawa, S. and Hibi, M. "Shaking table Test for Frictional Isolator", Proceeding of 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada (2204)
- [8] Iemura, H., Taghikhany, T., Takahashi, Y. and Jain, S. "Effect of Variation of Normal Force on Seismic Performance of Resilient Sliding Isolation Systems

- [13] M Asaduzzaman Chowdhury , Md. Maksud Helali "The effect of amplitude of vibration on the coefficient of friction for different materials" , Tribology International 41 (2008) 307–314
- [14] M Asaduzzaman Chowdhury , Md. Maksud Helali " The frictional behavior of materials under vertical vibration" Industrial Lubrication and Tribology 61/3 (2009) 154–160
- [15] Burrus, C. S., Gopinath, R. A. and Guo, H. (1998) Introduction to Wavelets and Wavelets Transforms. Prentice– Hall
- [16] Todoroska, M.I.(2001) "Estimation of Instantaneous Frequency of Signals Using The Continuous wavelet Transform", Los Angeles, California
- in Highway Bridges", Earthquake Engineering and Structural Dynamic, 34, pp.1777-1797 (2005).
- [9] Mokha, A.,S., Constantinou, M.C.and Reinhorn, A.M. "Vertification of Friction Model of Teflon Bearings under Triaxial Load", Journal of Structural Engineering, ASCE, 119, pp.240-261 (1993).
- [10] Dowson D. History of tribology. 2nd ed. London: Professional Engineerin Publishers, 1998
- [11] Amontons, G. De la resistance caus'ee dans les machines, Mem. l'Acad. Roy. A 1699; 257–82.
- [12] Coulomb CA. Theorie des machines simples, en ayant egard au frottement de leurs parties, et la roideur des cordages. Mem MathPhys Paris 1785; pp:161–342.