

اثر مؤلفه قائم زلزله بر تغییرات ضریب اصطکاک در پی لغزشی

مجید محمدی، استادیار، پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله
علی درویش‌زاده، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

چکیده

نیروی اصطکاک یکی از پرکاربردترین پدیده‌های طبیعت است که در مهندسی زلزله نیز کاربردهای فراوانی دارد. بر خلاف تصور، مقدار ضریب اصطکاک در طول زمان زلزله ثابت نیست و علاوه بر سرعت نسبی دو سطح به فرکانس و دامنه نوسان قائم نیز بستگی دارد. برای محاسبه مقدار این ضریب باید فرکانس و دامنه نوسان قائم را در هر لحظه محاسبه کرد که یکی از بهترین راههای محاسبه این کمیات استفاده از تبدیل موجک می‌باشد. یکی از کاربردهای اصطکاک در مهندسی زلزله، پایه‌های اصطکاکی می‌باشد که در این تحقیق نیز مورد توجه قرار گرفته و تغییرات ایجاد شده در ضریب اصطکاک در سه رکورد مختلف زلزله محاسبه و نشان داده شده است. لازم به ذکر است مؤلفه قائم زلزله علاوه بر اینکه ضریب اصطکاک را متأثر می‌سازد، مقدار نیروی قائم بین پی و ساختمان را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. بررسی‌های این تحقیق نشان می‌دهد که در لحظات لغزش مقدار ضریب اصطکاک با در نظرگیری اثر مؤلفه قائم همواره کوچکتر از زمانی است که از زلزله قائم صرف‌نظر می‌گردد.

کلیدواژه‌ها: ضریب اصطکاک، دامنه ارتعاش، فرکانس قائم، موجک، پی لغزشی

۱- مقدمه

کمیت معروف و بدون بعد ضریب اصطکاک برگرفته از کار فیلسوفان، دانشمندان و به طور خاص لئوناردو داوینچی [۱]، امونتنس [۲] و کولمب [۳] می‌باشد. این متفکران تلاش کردند مقاومت لغزشی بین اجسام جامد با یک قانون کلی که مشاهدات آن روزشان را توجیه کند، بیان کنند. در ابتدای کار با ماشینهای ساده و مالشسنج‌های با مقیاس بزرگ مشاهده شد که نسبت نیروی مخالف با حرکت جسم (نیروی

اصطکاک) به نیروی قائم بین آنها (نیروی نرمال) ثابت می‌باشد. امونتنس، برای مثال دو قانون برای اصطکاک بیان می‌کند که عبارتند از:

۱- نیروی اصطکاک نسبت مستقیم با نیروی قائم دارد.

۲- نیروی اصطکاک مستقل از سطح ظاهری تماس می‌باشد. کاتل نیکو (کسی که علامت مو - μ - را برای نمایش دادن ضریب اصطکاک پیشنهاد کرد) بیان می‌کند اگر نیروی اصطکاک با F و نیروی قائم با P و ضریب اصطکاک با μ نشان داده شوند، آن گاه مقدار نیروی اصطکاک برابر است با [۱]:

$$F = \mu \times P \quad (1)$$

دو نوع ضریب اصطکاک وجود دارد که یکی اصطکاک مقاوم در برابر آغاز جابه‌جایی (آستانه لغزش) را نشان می‌دهد و دیگری اصطکاکی که در برابر ادامه لغزش مقاومت می‌کند. اولی ضریب اصطکاک ساکن (μ_s) و دیگری ضریب اصطکاک جنبشی (μ_k) نامیده می‌شود. این دو نوع ضریب اصطکاک به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\mu_s = F_s / P \quad (2)$$

$$\mu_k = F_k / P \quad (3)$$

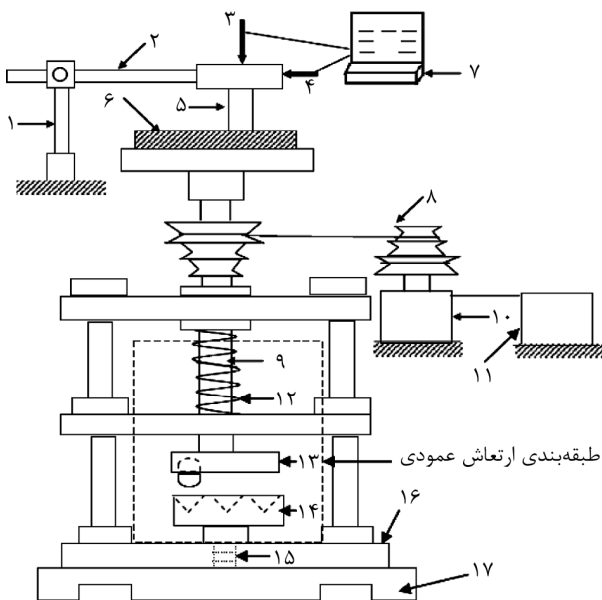
که F_s نیرویی است که در برابر جابه‌جایی نسبی بین دو جسم مقابله می‌کند و F_k نیرویی که در برابر ادامه لغزش بین دو جسم مقاومت می‌کند و P نیروی نرمال در سطح مشترک بین اجسام لغزشی می‌باشد.

بعد از گذشت سالها با افزایش تنوع ماشینها و دامنه تغییرات سرعت و نیروی نرمال، قوانین بیان شده به وسیله امونتنس، کلن و کاتل نیکو در بسیاری از نمونه‌ها نقض و مشخص شد که μ_s و μ_k علاوه بر نوع ماده به کمیات دیگر نیز بستگی دارد. مفاهیم جدید به دست آمده باعث تغییر اعتقاد بسیاری که تصور می‌کردند ضریب اصطکاک از

فلوراید اتیلن^۴ بررسی کرده‌اند که در ادامه توضیح داده خواهد شد.

۳-۱- ابزار اندازه‌گیری

در شکل (۱)، ابزاری که با آن آزمایشات انجام شده، مشاهده می‌شود. در این دستگاه که قسمت‌های مختلف آن به تفکیک در شکل مذکور معرفی شده است، یک پین بر روی صفحه‌ای دوار می‌لغزد. در این دستگاه نمونه آزمایش دایره‌ای (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 به طوری که فقط می‌تواند به صورت محوری جابه‌جا شود و از هر گونه جابه‌جایی شعاعی آن جلوگیری شده است. این دو غلاف به صفحات مربعی تکیه‌گاهی که خود به وسیله پایه‌های به صفحه پای ستون ثابت شده‌اند، قرار گرفته‌اند و باعث صلبیت لازم برای سازه اصلی می‌شوند. یک قرقره وی (۷) شکل بر روی صفحه تکیه‌گاهی بالایی قرار گرفته و باعث انتقال چرخش از موتور به میله می‌گردد.



بخشهای مختلف دستگاه

- | | | |
|---------------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| (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 | |

شکل (۱): تصویر دستگاه اندازه‌گیری ضریب اصطکاک [۱۰]

مشخصات ذاتی مواد می‌باشد، شد. این امر باعث توسعه روشهای آزمایش اصطکاک و طراحی ماشین آلات شد [۲]. به طور مثال مخا و کنستانتینو [۴] رابطه زیر را برای ضریب اصطکاک پیشنهاد کرد:

$$\mu = \mu_{\max} - (\mu_{\max} - \mu_{\min}) e^{-\alpha|\dot{u}|} \quad (4)$$

که در آن μ_{\max} و μ_{\min} به ترتیب برابر ضریب اصطکاک بیشینه و کمینه در سرعت لغزش بینهایت و نزدیک به صفر و تابعی از فشار تماسی و ($\dot{\mu}$) سرعت لغزشی می‌باشند. α پارامتری است که شدت تغییرات ضریب اصطکاک را از μ_{\max} به μ_{\min} بیان می‌کند. خوشنودیان و حقدوست [۵] برای در نظرگیری تغییرات ضریب اصطکاک بر روی پی لغزشی از این رابطه استفاده کرده‌اند. آنها از پلی تترا فلوراید اتیلن که در تماس با فولاد نرم می‌باشد، به عنوان لایه لغزشی استفاده کرده‌اند.

در تحقیق حاضر از رابطه جدیدتری برای در نظرگیری تغییرات ضریب اصطکاک استفاده شده که در آن ضریب اصطکاک علاوه بر عوامل فوق به ارتعاش قائم و دامنه آن نیز وابسته است که در ادامه توضیح داده خواهد شد.

۲- عوامل مؤثر بر روی ضریب اصطکاک

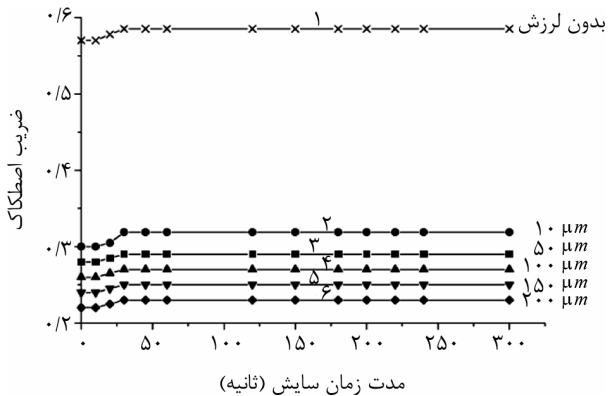
عوامل مؤثر بر روی ضریب اصطکاک عبارتند از [۵-۹]:

- ۱- مشخصات هندسی سطح تماس؛
- ۲- حرکت نسبی که خود عبارت است از حرکت یکطرفه یا تناوبی، بزرگی سرعت نسبی؛
- ۳- نیروی قائم؛
- ۴- استفاده از مواد لغزنده؛
- ۵- دما که عبارت است از اثر دما روی مشخصات مواد و مواد لغزنده؛
- ۶- ارتعاش و دامنه ارتعاش؛
- ۷- رطوبت نسبی.

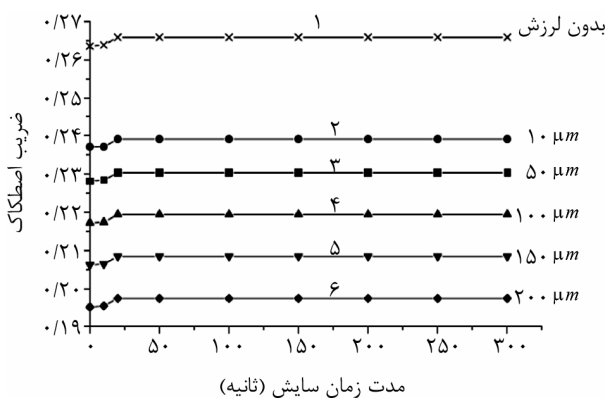
۳- آزمایشات انجام شده

چاقوری و هلالی [۱۰] اثر فرکانس و دامنه ارتعاش را بر روی ضریب اصطکاک موادی از قبیل الیاف شیشه مسلح^۲، لاستیک، فولاد نرم، پارچه مسلح شده با کائوچو^۳ و پلی تترا

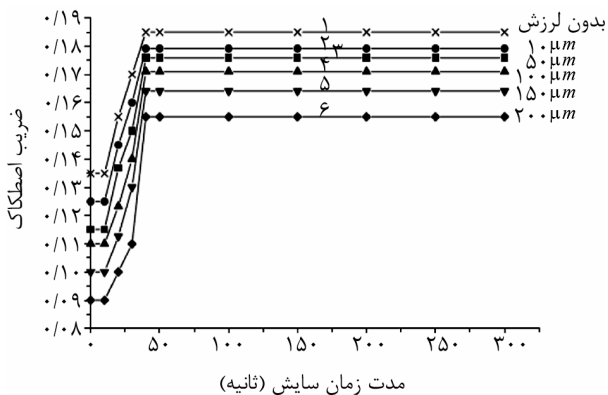
مقدار 0.319 برسد که پس از آن ضریب اصطکاک تا انتهای آزمایش ثابت باقی می‌ماند. منحنی‌های دیگر این شکل مقادیر ضریب اصطکاک در دامنه‌های ارتعاش 50 ، 100 ، 150 ، $200 \mu m$ را نشان می‌دهند. تمامی این منحنی‌ها عملکرد مشابه منحنی دو از خود نشان می‌دهند.



شکل (۲): تغییرات ضریب اصطکاک در برابر زمان لغزش برای دامنه‌های مختلف ارتعاش (فولاد نرم) [۱۰].



شکل (۳): تغییرات ضریب اصطکاک در برابر زمان لغزش برای دامنه‌های مختلف ارتعاش (الیاف شیشه مسلح) [۱۰].



شکل (۴): تغییرات ضریب اصطکاک در برابر زمان لغزش برای دامنه‌های مختلف ارتعاش (پلی تترا فلوراید اتیلن) [۱۰].

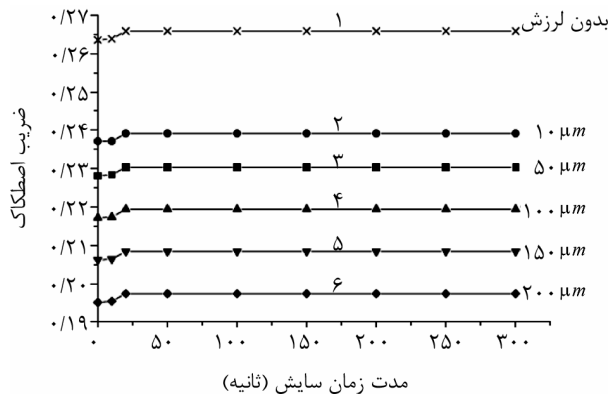
بین صفحه تکیه‌گاهی اول و دوم میله‌ای از داخل یک فنر فشرده عبور و در برابر هر گونه جابه‌جایی محوری میله مقاومت می‌کند. در انتهای میله دو صفحه دایره‌ای قرار دارد که یکی در انتهای میله و دیگری به صفحه پای ستون متصل شده است. به سطح پایین صفحه متصل به میله یک گوی کروی قرار دارد و روی سطح بالای صفحه متصل به صفحه پای ستون تعدادی شیار وجود دارد. روی صفحه شیاردار پایینی می‌لغزد و به دلیل وجود فنر میله همراه با صفحه دوار مرتعش می‌شود. ارتعاش ایجاد شده به صورت سینوسی، جهت ارتعاش عمود بر جهت لغزش بین می‌باشد. در هنگام چرخش، گوی متصل به صفحه بالای بر با تغییر سرعت میله و تعداد شیارهای صفحه پایین فرکانس ارتعاش تغییر می‌کند و با تغییر ارتفاع این شیارها دامنه فرکانس را می‌توان تغییر داد. به صورت خلاصه حرکت بین موجود در صفحه شماره ۱۳ که در شکل (۱) نشان داده شده است بر روی صفحه شیاردار (صفحه شماره ۱۴) باعث می‌گردد که یک تحریک سینوسی با دامنه‌ای برابر نصف عمق شیارها به صفحه شماره ۶ در شکل (۱) که در واقع محل اندازه‌گیری نیروی اصطکاک است، اضافه گردد. ضمن اینکه با تغییر سرعت دورانی صفحه شیاردار می‌توان فرکانس این تحریک را نیز تغییر داد. بنابراین دستگاه نشان داده شده در این شکل می‌تواند مقدار تغییرات نیروی اصطکاک را که بین صفحات شماره ۵ و ۶ وجود دارد برحسب دامنه و فرکانس تحریک قائم وارد به آن اندازه‌گیری نماید و از این طریق مقدار ضریب اصطکاک را به صورت تابعی از این دو کمیت یعنی دامنه و فرکانس تحریک قائم ارائه نماید.

۳-۲- نتایج آزمایشات

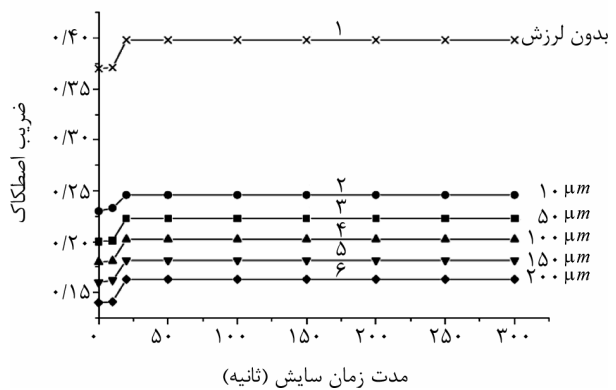
شکل‌های (۲) تا (۶) تغییرات ضریب اصطکاک در طول لغزش در برابر دامنه ارتعاش برای مواد مختلف نشان می‌دهد. منحنی یک در شکل (۲)، ضریب اصطکاک فولاد نرم بدون هرگونه ارتعاش و منحنی دو در این شکل ضریب اصطکاک فولاد نرم در فرکانس 500 هرتز و دامنه ارتعاش $10 \mu m$ را نشان می‌دهند. در زمان شروع لغزش مقدار ضریب اصطکاک برابر 0.3 است که برای 2 ثانیه ثابت باقی مانده و آنگاه تقریباً به صورت خطی افزایش می‌یابد تا به

سطح اصطکاک و افزایش چسبندگی به علت تغییر شکل یا سخت‌شدگی مواد می‌توانند مقداری نقش روی افزایش ضریب اصطکاک داشته باشند. بعد از یک زمان معین لغزش، افزایش زبری و دیگر پارامترها به یک حد مشخص می‌رسند، از این رو مقادیر ضریب اصطکاک بعد از یک حد معین ثابت باقی می‌ماند. مقادیر ضریب اصطکاک در برابر زمان لغزش برای الیاف شیشه مسلح، لاستیک، پارچه مسلح شده با کائوچو و پلی تترا فلوراید اتیلن در شکل‌های (۳) تا (۶) نشان داده شده‌اند. روند تغییرات ضریب اصطکاک در برابر زمان لغزش در منحنی‌های این شکلها مانند شکل (۲) می‌باشد. همچنین زمان رسیدن ضریب اصطکاک به مقدار ثابت برای مواد مختلف متفاوت می‌باشد [۱۰].

برای فولاد نرم، در فرکانسهای بالاتر زمان رسیدن به ضریب اصطکاک ثابت کمتر است. مواد صافتر مشابه پلاستیک و لاستیک زمان رسیدن به ضریب اصطکاک ثابت بین ۲۰-۶۰ ثانیه و برای فولاد نرم بین ۳۰-۱۸۰ می‌باشد. آزمایشات مربوط به پلی تترا فلوراید اتیلن و لاستیک به علت نرم‌شدگی و تغییر خواص اصطکاک‌شان به علت افزایش دما در فرکانسهای بالا، در فرکانسهای پایین انجام شده است. همچنین به نظر می‌رسد در شکل‌های (۲) تا (۶) با افزایش دامنه، ضریب اصطکاک کاهش می‌کند. این امر نشان می‌دهد که با افزایش دامنه ارتعاش جدایی سطوح تماس بیشتر شده در نتیجه سطح تماس ظاهری بین دو جسم و در نتیجه ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد. چنان که با ثابت نگه داشتن فرکانس ارتعاش، دامنه ارتعاش را افزایش دهیم، شتاب ارتعاش افزایش می‌یابد که می‌تواند سبب کاهش بار عمودی گذرا^۷ و در نتیجه کاهش نیروی نرمال مؤثر^۸ و به تبع آن کاهش ضریب اصطکاک شود [۱۰]. برای مشاهده اثر دامنه فرکانس روی ضریب اصطکاک، آزمایشاتی با دامنه‌های ۱۰، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ μm در فرکانسهای مختلف انجام شده است. نتایج این آزمایشات در شکل‌های (۷) تا (۱۱) نشان داده شده است. در این اشکال مشاهده می‌شود که ضریب اصطکاک با افزایش دامنه ارتعاش در فرکانسهای مختلف و در سرعت‌های متفاوت برای مواد مختلف کاهش می‌یابد.

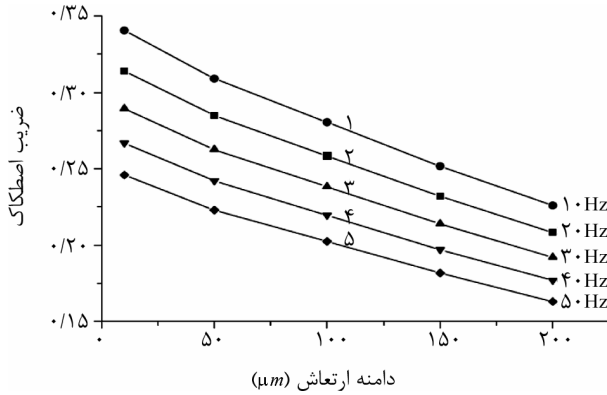


شکل (۵): تغییرات ضریب اصطکاک در برابر زمان لغزش برای دامنه‌های مختلف ارتعاش (پارچه مسلح شده با کائوچو) [۱۰].

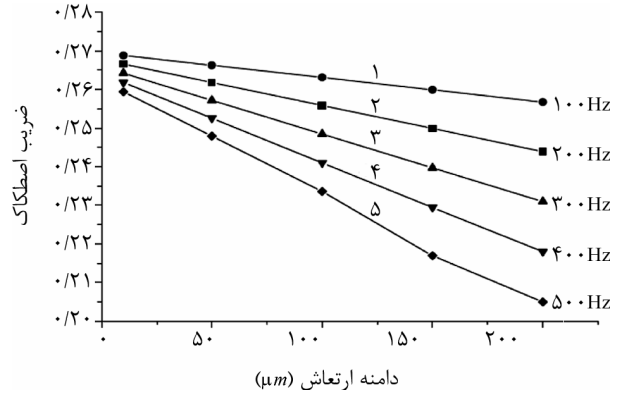


شکل (۶): تغییرات ضریب اصطکاک در برابر زمان لغزش برای دامنه‌های مختلف ارتعاش (لاستیک) [۱۰].

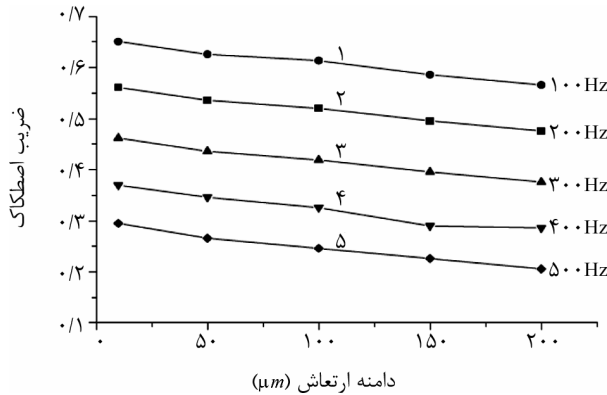
دیگر پارامترها نظیر سرعت لغزش، نیروی نرمال، زبری سطح و فرکانس ارتعاش یکسان هستند ($0.319 =$ سرعت ارتعاش، $10N =$ نیروی نرمال، $1/2 \mu m =$ زبری تماس، 50% درصد = رطوبت نسبی و $50 Hz =$ فرکانس ارتعاش). مقدار اصطکاک در زمان شروع پایین است که می‌تواند به دلیل وجود لایه خارجی روی ماده باشد. این سطح در حالت کلی از: ۱- رطوبت، ۲- اکسید فلزات، ۳- مواد رسوب شده^۵ و غیره تشکیل شده است. فولاد نرم به آسانی در هوا اکسید می‌شود، بنابراین در ابتدای لغزش، لایه اکسید از دو ماده جدا شده و به دلیل اینکه لایه اکسید داری مقاومت برشی کمی است در شروع لغزش ضریب اصطکاک پایین می‌باشد. در زمان آغازین لغزش، لایه رسوبی تجزیه شده و سطوح خالص در تماس با هم قرار گرفته که باعث افزایش نیروی پیوندی^۶ بین سطوح تماس می‌شود. افزایش دمای سطح تماس، میرایی ویسکوز



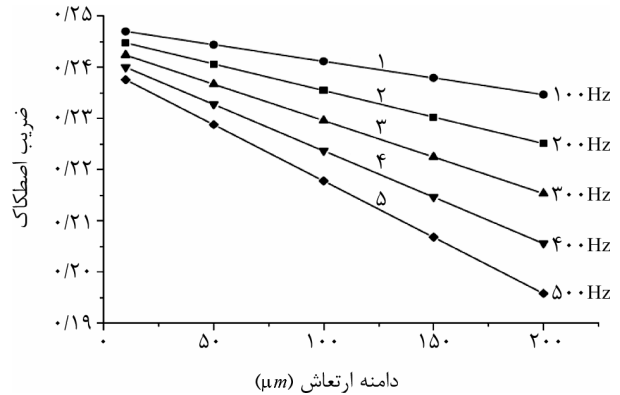
شکل (۱۰): تغییرات ضریب اصطکاک با تغییرات دامنه ارتعاش در فرکانسهای مختلف $1/17 \text{ m/s}$ = سرعت ارتعاش، 10 N = نیروی نرمال، $0.2 \mu\text{m}$ = زبری تماس و 50% = رطوبت نسبی، نمونه آزمایش: لاستیک) [۱۰].



شکل (۷): تغییرات ضریب اصطکاک با تغییرات دامنه ارتعاش در فرکانسهای مختلف $1/17 \text{ m/s}$ = سرعت ارتعاش، 10 N = نیروی نرمال، $0.2 \mu\text{m}$ = زبری تماس و 50% = رطوبت نسبی، نمونه آزمایش: GFRP) [۱۰].



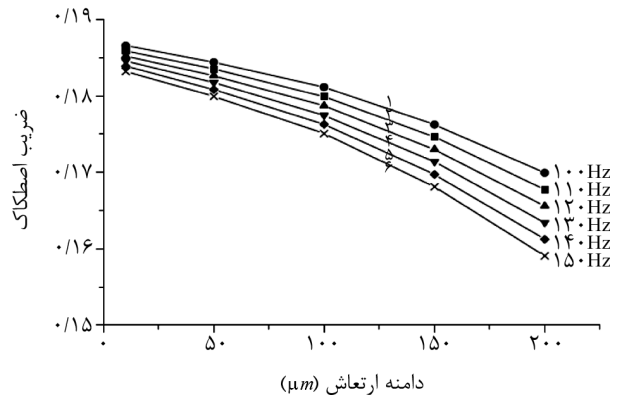
شکل (۱۱): تغییرات ضریب اصطکاک با تغییرات دامنه ارتعاش در فرکانسهای مختلف $1/17 \text{ m/s}$ = سرعت ارتعاش، 10 N = نیروی نرمال، $0.2 \mu\text{m}$ = زبری تماس و 50% = رطوبت نسبی، نمونه آزمایش: فولاد نرم) [۱۰].



شکل (۸): تغییرات ضریب اصطکاک با تغییرات دامنه ارتعاش در فرکانسهای مختلف $1/17 \text{ m/s}$ = سرعت ارتعاش، 10 N = نیروی نرمال، $0.2 \mu\text{m}$ = زبری تماس و 50% = رطوبت نسبی، نمونه آزمایش: پارچه مسلح شده با کائوچو) [۱۰].

این کاهش ضریب اصطکاک برای فولاد نرم، الیاف شیشه مسلح (GFRP)، کائوچو و لاستیک تقریباً به صورت خطی است، اما برای پلی تترا فلوراید اتیلن (PTFE) به صورت غیرخطی می باشد.

ضریب اصطکاک کائوچو، الیاف شیشه ای مسلح، فولاد نرم و لاستیک 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 (به جز لاستیک) در اثر افزایش سرعت لغزشی می تواند به علت تغییر در سرعت برشی^۹ باشد، که خود می تواند بر مشخصات



شکل (۹): تغییرات ضریب اصطکاک با تغییرات دامنه ارتعاش در فرکانسهای مختلف $1/17 \text{ m/s}$ = سرعت ارتعاش، 10 N = نیروی نرمال، $0.2 \mu\text{m}$ = زبری تماس و 50% = رطوبت نسبی، نمونه آزمایش: PTFE) [۱۰].

آزمایشات مورد بررسی قرار گرفته ولی رابطه‌ای برای آن ذکر نشده است). برای دستیابی به چنین اهدافی در این تحقیق، از بین موادی که برای ضریب اصطکاک آنها رابطه داده شده است از الیاف شیشه (رابطه ۶) برای لایه لغزنده استفاده شده است. لازم به ذکر است که هدف از تحقیق حاضر تنها بررسی اثر تغییرات ضریب اصطکاک پی لغزشی می‌باشد و مصالح پیشنهادی برای لایه لغزان آن نیاز به تحقیقات مجزایی دارد.

۴- تطبیق رابطه به دست آمده با حرکات زمین

برای استفاده از رابطه (۶) در بررسی رفتار پی لغزان باید دانست منظور از فرکانس و دامنه ارتعاش چیست. با توجه به توضیحاتی که در بخش آزمایشهای انجام شده توسط چاجوری و هلالی بیان شد، مود ارتعاشی دیسک به صورت سینوسی با فرکانس ω و همچنین جهت ارتعاش آن عمود بر جهت لغزش (جهت افقی) می‌باشد. بنابراین اگر دیسک را به زمین و پین را به سازه تشبیه کنیم، نوسان (جابه‌جایی) دیسک را می‌توان به نوسان (جابه‌جایی) قائم زمین در هنگام زلزله تشبیه کرد. در نتیجه فرکانس ارتعاش دیسک همان فرکانس ارتعاش (جابه‌جایی) زمین می‌باشد. اما توجه به این نکته ضروری است که فرکانس آزمایش انجام شده از ابتدا تا انتهای آزمایش مقدار ثابتی بود در حالی که در زلزله فرکانس مؤلفه قائم زمین تغییر می‌نماید. بنابراین در محاسبه مقدار ضریب اصطکاک در هر لحظه که وابسته به فرکانس و دامنه تحریک قائم در آن لحظه است، (روابط (۵) تا (۷)) باید از فرکانس و دامنه لحظه‌ای جابه‌جایی قائم زمین استفاده کرد. فرکانس لحظه‌ای و دامنه ارتعاش را می‌توان به کمک نرم افزار متلب و تبدیل موجک محاسبه کرد. برای اطلاعات بیشتر می‌توان به مراجع [۱۱-۱۲] مراجعه نمود.

۵- تغییرات ضریب اصطکاک در پی لغزشی در زلزله‌های مختلف

قبل از محاسبه ضریب اصطکاک رفتار جسم صلب بر روی پی لغزشی بررسی می‌گردد. در شکل (۱۲)، یک بلوک صلب بر روی پی لغزشی نشان داده شده است.

مکانیکی مواد تأثیر بگذارند، باشد. مقاومت این مواد در سرعت‌های تغییر شکل نسبی برشی^{۱۰} بالا بیشتر می‌باشد که نتیجه‌اش سطح تماس واقعی کمتر و ضریب اصطکاک پایینتر می‌باشد. کاهش ضریب اصطکاک در اثر افزایش سرعت لغزشی برای لاستیک می‌تواند به علت افزایش دما در سطح لغزش و نرم شدن لاستیک و در نتیجه کاهش ضریب اصطکاک باشد [۱۰].

۳-۳- روابط استخراج شده از آزمایشات

با توجه به آزمایشات انجام شده، چاجوری و هلالی [۱۰] برای برخی از این مواد (پارچه مسلح شده با کائوچو، الیاف شیشه مسلح و فولاد نرم) روابطی را بر حسب ضریب اصطکاک، دامنه ارتعاش، سرعت لغزش و فرکانس به دست آوردند که به شرح زیر می‌باشند:

۱- فولاد نرم:

$$\mu_f = 0.19 \left[\frac{AF}{V} \right]^{-0.17} \quad (5)$$

۲- الیاف شیشه‌ای مسلح:

$$\mu_f = 0.2 \left[\frac{AF}{V} \right]^{-0.05} \quad (6)$$

۳- کائوچو:

$$\mu_f = 0.19 \left[\frac{AF}{V} \right]^{-0.04} \quad (7)$$

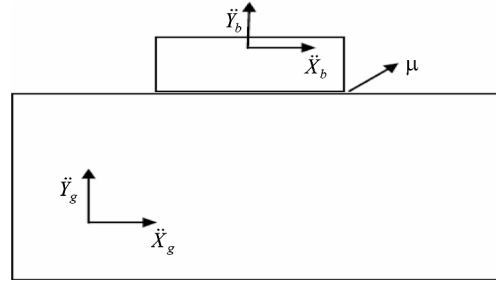
که در آنها F فرکانس قائم ارتعاش، A دامنه ارتعاش قائم و V سرعت لغزشی می‌باشند.

همان‌طور که قبلاً نیز بیان شد، هدف از این قسمت آشنایی با عوامل مؤثر بر روی ضریب اصطکاک و به دست آوردن رابطه‌ای برای ضریب اصطکاک و اثر تغییرات آن بر روی رفتار سازه دارای پی لغزشی است. از طرف دیگر فقط برای سه نوع از این ماده‌ها (پارچه مسلح شده با کائوچو، الیاف شیشه مسلح و فولاد نرم) رابطه مورد نیاز به دست آمده است. با توجه به اینکه رابطه‌ای که برای فولاد نرم بدست آمده از دقت کافی برخوردار نیست و همچنین ماده‌ای را که به عنوان لایه لغزشی در نظر گرفته می‌شود باید دارای دو خصوصیت ۱- فراوانی و هزینه کم و ۲- ضریب اصطکاک پایین باشد (مانند پلی‌تترا فلوراید اتیلن که در این

شده به سازه می‌گردد و در هر لحظه اگر شتاب از مقدار لازم برای لغزش فراتر رود، سازه دیگر شتاب زمین را تجربه نخواهد کرد؛ بلکه با مقدار کمتری که تابعی از مقدار ضریب اصطکاک و شتاب قائم زلزله می‌باشد، مواجه خواهد شد. در ادامه به اثر مؤلفه قائم زلزله بر روی ضریب اصطکاک برای سه رکورد زلزله بم، طیس و گزلی که دارای مؤلفه قائم قابل ملاحظه‌ای می‌باشند، پرداخته می‌شود.

در حالت ضریب اصطکاک متغیر زمانهایی که بلوک به زمین چسبیده است، باید از ضریب اصطکاک در حالت سکون (که یک مقدار ثابت می‌باشد) و در زمانهای لغزش بلوک بر روی زمین باید از ضریب اصطکاک دینامیکی (همان رابطه (۶)) استفاده کرد.

مقادیر فرکانس و دامنه قائم لحظه‌ای که در تعیین ضریب اصطکاک مؤثر می‌باشد، به وسیله تابع موجک^{۱۱} و با استفاده از نرم‌افزار متلب^{۱۲} محاسبه شده است که برای توضیحات بیشتر در این خصوص و دریافت جزئیات محاسبات انجام شده می‌توان به مرجع [۱۴] مراجعه نمود. در نمودارهای موجود در اشکال (۱۳) تا (۱۵)، مقادیر ضریب اصطکاک تنها در زمانهایی که بلوک بر روی زمین می‌لغزد (زمانهای لغزش) با مقدار ضریب اصطکاک ثابت مقایسه شده است. لازم به ذکر است که در سایر لحظات یعنی لحظاتی که لغزشی بین بلوک و پی روی نمی‌دهد مقادیر ضریب اصطکاک متغیر و ثابت یکسان خواهد شد که از ذکر آن خودداری شده است، ولی در همه لحظات لغزش که زمانهای زیادی را به خود اختصاص می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، مقدار ضریب اصطکاک در هر لحظه از مقدار ثابت آن کمتر یا حداکثر با آن مساوی است. لازم به ذکر است که ضریب اصطکاک متغیر بر اساس فرکانس و دامنه لحظه‌ای حرکت قائم زمین که با کمک تابع موجک محاسبه شده به دست آمده است. در زلزله بم که در شکل (۱۳) آمده، شدت تغییرات ضریب اصطکاک در حالت متغیر بسیار شدید می‌باشد و هر چقدر به انتهای زمان لغزش نزدیک می‌شویم، نمودار ضریب اصطکاک متغیر به نمودار ضریب اصطکاک ثابت نزدیکتر می‌شود. در زلزله طیس شدت تغییرات ضریب اصطکاک متغیر بسیار کم بوده و فاصله بین دو نمودار ضریب اصطکاک ثابت و متغیر تقریباً ثابت می‌باشد، شکل (۱۴).



شکل (۱۲): مدل تحلیل شده جسم صلب بر روی پی لغزشی.

که در آن \ddot{Y}_b : شتاب قائم بلوک، \ddot{X}_b : شتاب افقی بلوک، \ddot{Y}_g : شتاب قائم زمین، \ddot{X}_g : شتاب افقی زمین.

معادله حرکت بلوک در اثر تحریکات زمین به صورت زیر می‌باشد [۱۳].

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

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

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

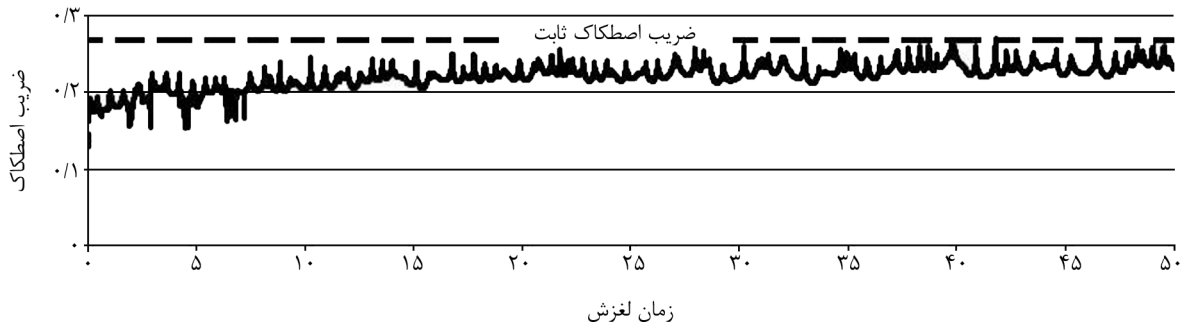
بنابراین اگر رابطه (۱۰) برقرار باشد و لغزش (سرعت نسبی) بلوک صفر باشد، (معمولاً در زمانهای اولیه زلزله به دلیل پایین بودن شتاب زمین، لغزش وجود ندارد) بلوک به زمین چسبیده و دقیقاً مطابق با آن حرکت می‌کند و $\ddot{X}_b = \ddot{X}_g$.

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

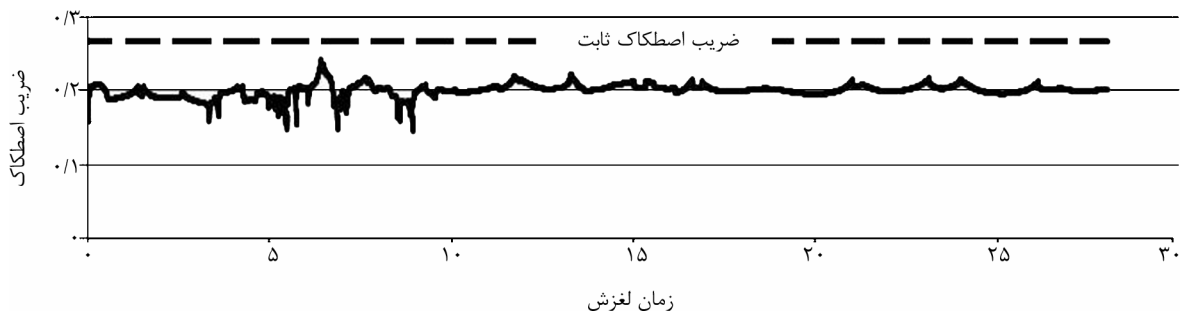
و در غیر این صورت لغزش وجود خواهد داشت و تا زمانی که لغزش ادامه داشته باشد شتاب وارد شده به بلوک از رابطه (۱۱) به دست می‌آید:

$$\ddot{X}_b = \mu (g + \ddot{Y}_g) \cdot \text{sgn}(\dot{x}_g - \dot{x}_b) \quad (۱۱)$$

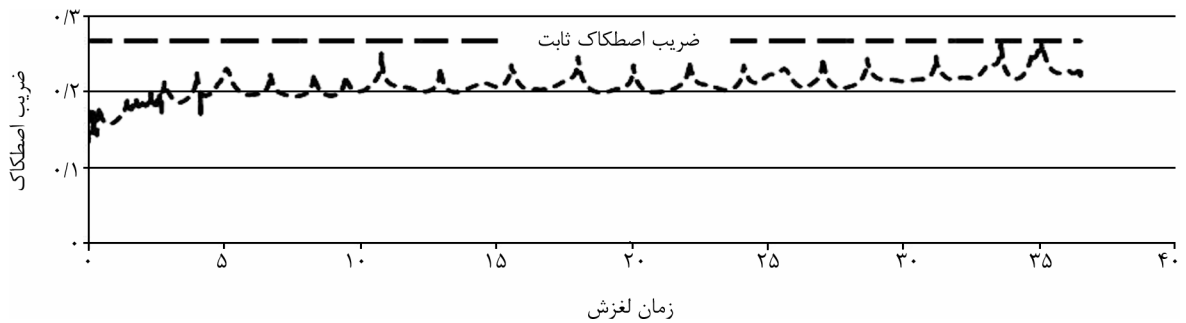
زمانی که بلوک دوباره به وضعیت سکون برسد، ادامه وضعیت آن باید مجدداً با توجه شرایط مذکور بررسی شود. وجود لایه لغزان بین پی و سازه (که در اینجا با یک بلوک نشان داده شده است) باعث ایجاد یک فیلتر در شتابهای افقی اعمال



شکل (۱۳): نمودار ضریب اصطکاک در دو حالت ثابت و متغیر در زمانهای لغزش در زلزله بم.



شکل (۱۴): نمودار ضریب اصطکاک در دو حالت ثابت و متغیر در زمانهای لغزش در زلزله طبس.



شکل (۱۵): نمودار ضریب اصطکاک در دو حالت ثابت و متغیر در زمانهای لغزش در زلزله گزالی.

مرتبط با این نیرو مقدار ضریب اصطکاک ثابت فرض و محاسبات بر مبنای این فرض دنبال می‌شود در حالی که دانشمندان نشان داده‌اند که این فرض صحیح نمی‌باشد. در یکی از تازه‌ترین تحقیقات نشان داده شده است که مقدار ضریب اصطکاک تابعی از فرکانس ارتعاش قائم و دامنه آن در هر لحظه است و علاوه بر این دو کمیت به مقدار سرعت نسبی بین دو سطوح نیز بستگی دارد.

با توجه به وجود تحریک قائم زلزله مقدار ضریب اصطکاک در پی لغزان تابعی از فرکانس و دامنه حرکت قائم زمین در هر لحظه است. در این تحقیق، برای برآورد این دو کمیت از تبدیل موجک با قابلیت محاسبه فرکانس و دامنه لحظه‌ای استفاده شده است. سپس برای برآورد مقدار ضریب اصطکاک در هر

در زلزله گزالی روند تغییرات ضریب اصطکاک متغیر مانند زلزله بم می‌باشد، شکل (۱۵). با توجه به رابطه (۱۱) کاملاً مشخص می‌شود که با کاهش مقدار ضریب اصطکاک، شتاب وارد به سازه نیز کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر در صورت استفاده از رابطه دقیق برای محاسبه ضریب اصطکاک در هر لحظه که حالت واقعی و طبیعی مواد است مقدار شتاب وارد به سازه دارای پی لغزان از آنچه تاکنون با فرض ضریب اصطکاک ثابت برآورد می‌شد کمتر است که این کاملاً به نفع سازه است.

۶- نتیجه‌گیری

برآورد نیروی اصطکاک در بسیاری از مکانیزمهای موجود در مهندسی زلزله کاربرد فراوان دارد. در عمده تحقیقات

8. Abdo, J. and Tahat M. (2008). The effect of frequency and amplitude of vibration on the coefficient of friction for metals, *WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics*, **3**(7).
9. Mathew, P., Foo, S.E., Chan S.L., and Truong, K. (2007). Development of a friction rig and experimental results, *5th Australasian Congress on Applied Mechanics*, Brisbane, Australia.
10. Chowdhury, M. Asaduzzaman, Helali, M.D. and Maksud, (2009). The frictional behavior of materials under vertical vibration, *Industrial Lubrication and Tribology*, **61**(3), 154-160.
11. Burrus, C.S., Gopinath, R.A., and Guo, H. (1998). Introduction to wavelets and wavelets Transforms, Prentice Hall.
12. Todoroska, M.I. (2001). Estimation of instantaneous frequency of signals using the continuous wavelet transform, Research report, Los Angeles, California.

۱۳. حسنی، ابوالفضل (۱۳۷۶). سیستم پی لغزشی برای محافظت ساختمانهای کوچک در برابر زلزله، چاپ دوم، انتشارات مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.

۱۴. درویش‌زاده، علی (۱۳۹۰). رفتار سازه روی پی لغزان با در نظرگیری اثر مؤلفه قائم و تغییرات ضریب اصطکاک، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.

۸- پانویس

- ۱- Lubricant
- ۲- Glass Fiber Reinforced Plastic
- ۳- Cloth Reinforced Ebonite
- ۴- Pollytetraflouroethylene
- ۵- Deposited Lubricating Material
- ۶- Bonding Force
- ۷- Load Vertical Momentary
- ۸- Effective Normal Force
- ۹- Shear Rate
- ۱۰- Shear Strain Rate
- ۱۱- Wavelet
- ۱۲- MATLAB

لحظه از روابط موجود در تحقیقات قبلی بهره‌برداری شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقدار واقعی ضریب اصطکاک لحظه‌ای همواره از مقدار ثابت آن کمتر است و به عبارت دیگر وجود تحریک قائم زلزله باعث کاهش ضریب اصطکاک بین لایه‌های پی لغزان می‌گردد. به همین دلیل شتاب وارد به سازه‌ای که روی پی لغزان بنا شده با در نظرگیری مؤلفه قائم زلزله نسبت به حالتی که از این مؤلفه صرف‌نظر گردد، کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان انتظار داشت که در زلزله‌های واقعی و به خصوص زمین‌لرزه‌های حوزه نزدیک که دارای مؤلفه قائم قابل‌توجهی هستند مقدار شتاب افقی منتقل شده از طریق پی لغزان کمتر از مقداری است که تاکنون با فرض ضریب اصطکاک ثابت در نظر گرفته می‌شد.

۷- مراجع

1. Dowson, D. (1998). History of tribology, 2nd Edition, Professional Engineering Publishers, London.
2. Amontons, G. (1699). De la resistance caus'ee dans les machines, Mem. l'Acad. Roy., 257-282.
3. Coulomb, C.A. (1785). Theorie des machines simples, en ayant egard au frottement de leurs parties, et la roideur des cordages, Mem Math Phys, Paris, 161-342.
4. Mokha, A.S., Constantinou, M.C., and Reinhorn A.M. (1993). Verification of friction model of teflon bearings under triaxial load, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **119**, 240-261.
5. Khoshnoudian, F. and Rezai Haghdoust, V. (2009). Response of pure-friction sliding structures to three components of earthquake excitation considering variations in the coefficient of friction", *Journal of Scientia Iranica*, Sharif University of Technology, **16**(6), 120-112.
6. Blau, P.J. (2001). The significance and use of the friction coefficient, *Journal of Tribology International*, **34**, 585-591.
7. Chowdhury, M. Asaduzzaman, and Helali Md. Maksud (2008). The effect of amplitude of vibration on the coefficient of friction for different materials, *Tribology International*, **41**, 307-314.

