

ایزوله کردن ساختمان‌های کوتاه بنایی از پایه در برابر زلزله با استفاده از سیستم لغزشی

محسن تهرانی زاده
دانشیار

فریبرز محمدی تهرانی
کارشناس ارشد

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

در سال‌های اخیر استفاده از سیستم جداکننده ساختمان از پایه به منظور کاهش اثر نیروی زلزله بر ساختمان‌ها و پل‌ها گسترش زیادی یافته است. اساس این سیستم ایجاد یک لایه با سختی جانبی کم بین سازه فوقانی و زمین است که باعث کاهش فرکانس سازه فوقانی و دور کردن آن از فرکانس نوسانات زمین می‌شود و نیز میزان حرکت انتقال یافته از زمین به سازه را کاهش می‌دهد. سیستم لغزشی یا اصطکاکی خالص یکی از ساده‌ترین و کم‌هزینه‌ترین این سیستم‌ها است که به جهت عدم نیاز به تکنولوژی بالا و نیز امکان استفاده از مصالح محلی می‌تواند در ایران و به ویژه در مورد خانه‌های روستایی به کار گرفته شود. آمار بالای روستائینی در اغلب استان‌های کشور و توجه به این مطلب که عمده ساختمان‌های شهری و روستایی دارای سیستم دیوار باربر با مصالح بنایی می‌باشند، میزان اهمیت و کاربرد این سیستم را در ایران نشان می‌دهد. مطالعات اولیه نشان داده است که برای یک ساختمان کوتاه، اگر لایه لغزنده ضریب اصطکاکی معادل μ داشته باشد، حداکثر شتاب زلزله وارد به ساختمان در حدود μg خواهد بود. بر این اساس در این مقاله نتایج مطالعات آزمایشگاهی بر روی مصالح گوناگون و مؤثر بودن هر یک از این مصالح برای ایجاد یک لایه لغزنده مورد بررسی قرار گرفته است. مصالح مورد مطالعه از نظر سهولت دسترسی در مناطق روستایی و وجود مهارت فنی لازم برای کاربرد آنها مورد توجه بوده است. در نهایت مصالح مناسب معرفی شده‌اند. نتایج به دست آمده از مجموع مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی بیانگر کارایی سیستم ارائه شده برای ساختمان‌های کوچک واقع در مناطق زلزله خیز می‌باشد. به منظور مقایسه و تعیین کارایی سیستم مزبور نتایج آنالیز رفتار دینامیکی سازه صلب بر روی پی لغزشی به روش تاریخچه زمانی برای مؤلفه‌های افقی زلزله‌های طیس ۱۳۵۷ (۱۹۷۸)، ناغان ۱۳۵۶ (۱۹۷۷)، منجیل ۱۳۶۹ (۱۹۹۰)، نورآباد ۱۳۶۷ (۱۹۸۸) و آل سنتر ۱۳۱۹ (۱۹۴۰) ارائه شده است. نتایج آزمایش مصالح معرفی شده و آنالیز عددی، تحت زلزله‌های ایران با در نظر گرفتن چسبندگی و اصطکاک لایه لغزنده و نیز جزئیات پیشنهادی اجرای پی لغزشی براساس نتایج به دست آمده در این نگاشت ارائه شده است.

Sliding Base Isolation System for Unreinforced Small Masonry Bearing Wall Buildings

Mohsen Tehrani-Zadeh
Associate Professor

Fariborz Mohammadi Tehrani
Graduate Student

Civil-Eng. Dept. Amirkabir Univ.

Abstract

The concept of isolating structures from the effects of ground shaking has been discussed for many years. Its practical application was delayed until the successful development of both.

Reliable means of isolating and supporting the structures in such a way that they perform well not only during an earthquake, but also under other conditions such as wind.

Devices to dissipate seismic energy imparted to a structure and to impose a centring motion on the structure during shaking, thereby limiting transitory and permanent displacement.

Much progress has been made in the application of seismic isolation of structures since 1973 and its acceptance is becoming widespread.

One of the most easiest and lowest cost of base isolation system is, the sliding or pure friction type that can be used for unreinforced masonry bearing wall buildings, which have been widely recognized for their sustaining of life hazardous damage as a result of partial or complete collapse during past moderate to strong earthquake. This type of buildings are very common in different parts of Iran.

The purpose of this paper is to introduce the sliding system for unreinforced masonry building which can be used widely for any masonry building and particularly for rural building. preliminary studies have indicated that the maximum earthquake acceleration transmitted to the building will be μg , where μ is coefficient of friction for sliding layer. Experimental studies have been applied on the various materials, particularly those which are accessible in the rural areas.

The experimental and analytical results show that the represented system for small buildings situated in the seismic regions works very well. Dynamic analysis of an one story unreinforced masonry building on the sliding foundation and rigid foundation for horizontal components of different earthquakes records accelerations such as Tabas 1978, Manjil 1990 and Ee Centro 1940 has been done.

مقدمه

هدف اصلی نیز دور کردن پرید سازه به مقدار مطلوب از پرید حرکت زمین و یا کاهش اثر تغییر مکان انتقال یافته از زمین به سازه است. [۳]

شکل ساده سیستم‌های جداکننده، سیستم اصطکاکی است. این سیستم در یک طرح ساده با یک عنصر اصطکاکی طراحی می‌شود.

همانطور که قبلاً اشاره شد، این سیستم برای خانه سازی ارزان قیمت بسیار مناسب است، زیرا نیاز به تکنولوژی پیشرفته یا مهارت ویژه برای یک ساختمان معمولی ندارد.

ایجاد این سیستم نیاز به تأمین یک لایه جداساز در زیر کف سازه دارد. این لایه جداساز در کشور چین با استفاده از لایه‌ای از ماسه تجربه شده است.

باتوجه به مکانیسم اثر نیروی زلزله بر ساختمان‌ها این نظریه مطرح گردیده است که آیا می‌توانیم ساختمان را به طریقی از زمین جدا کنیم، به طوری که حرکات زمین به ساختمان منتقل نشود؟ و یا به میزان زیادی کاهش یابد؟ این نظریه با عنوان نظریه کلی Seismic Isolation (جداسازی و محافظت ساختمان از حرکات لرزه‌ای زمین) در چند دهه اخیر مورد بحث قرار گرفته و نتایج عملی و کاربردی بسیار خوبی نیز به دست آمده است. [۳]

مبنای نظریه جداسازی از حرکات زلزله عبارت است از ایجاد انعطاف پذیری در پایه سازه در صفحه افقی و همزمان با آن ایجاد عناصر مستهلک کننده جهت جذب کامل و یا بخش عمده‌ای از انرژی ناشی از زمین لرزه.

ساختمان های آجری یا بلوک های سیمانی که نسبتاً سخت و سنگین می باشند و مستعد خرابی در اثر زمین لرزه هستند، می توانند با حضور این لایه لغزنده عملکرد خوبی داشته باشند. [۵]

تحقیقات به عمل آمده در جهان در زمینه کاربرد این روش بیانگر عملکرد خوب این سیستم در کاهش نیروهای زلزله است. تحقیقات به عمل آمده براساس آزمایش های مختلف با استفاده از میز لرزان صورت پذیرفته است. از سوی دیگر تحلیل های عددی نیز نتایج به دست آمده را تأیید می کنند.

در چین ساخت چهار ساختمان یک طبقه با مساحت ۱۶ متر مربع در Hoaping در سال ۱۹۷۵ و یک خوابگاه چهار طبقه در Beijing در سال ۱۹۸۱ تجربه عملی این سیستم می باشد.

لایه جداساز این ساختمان ها عبارت است از دو لایه سفال مسلح صیقلی که با ماسه تمیز به قطر ۱/۲ میلیمتر جدا شده اند. ضریب اصطکاک دینامیک این لایه براساس آزمایش میز لرزان ۰/۲ به دست آمده است. بنابراین این انتظار می رود حداکثر شتاب ناشی از زلزله به ۰/۲g برای یک ساختمان صلب کاهش یابد. [۵]

در این سیستم عملکرد دانه های ماسه بیشتر غلطکی بوده تا لغزشی. این عملکرد نیاز به سطوح سفالی کاملاً صیقلی دارد چون در غیر این صورت دانه های ماسه به علت درگیر شدن در زبری سطح سفال عملکرد خود را از دست می دهند.

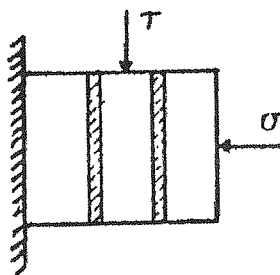
روش آزمایش

برای دستیابی به سیستم پی لغزشی مناسب در ساختمان های بنایی متداول در ایران ابتدا به جزئیات اجرای پی در این ساختمان ها باید توجه شود. استفاده از قیر و گونی و یا ملات ماسه و سیمان به عنوان مصالح آب بند یکی از جزئیات اجرایی متداول در پی سازی است. سطح تمام شده کرسی چینی قبل از اجرای عایق آب بند، سطحی نسبتاً ناصاف متشکل از آجرهای معمولی و درزهای پر شده با ملات است. اگر چه لایه آب بند سطح نسبتاً صاف تری را ایجاد خواهد کرد، اما میزان برجستگی ها و فرورفتگی های سطح، بیشتر از ابعاد دانه های مورد نظر برای عملکرد غلطکی است. [۱]

از آنجا که جایگزین کردن چنین سطوحی با سطوح صیقلی مستلزم افزایش هزینه و حتی تغییر روش های اجرایی می باشد، خواص لایه جداکننده براساس لغزش

در درون لایه باید تعریف گردد. تفاوت اساسی این لایه با کار انجام شده در چین در ضخامت آن بوده و مزایا و برتری های این روش در عدم حساسیت بر صیقلی بودن سطوح مجاور و سهولت اجرای آن می باشد.

برای انتخاب مصالح مناسب جهت لایه لغزنده، ابتدا خواص مصالح از طریق مطالعات و آزمایشات بررسی شده است. [۱] سپس برای محاسبه رفتار اصطکاکی مصالح بین سازه فوقانی و پی و نیز اندازه گیری پارامترهای طرح موهر - کولب برای این مصالح طرح شکل (۱) مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل (۱) طرح آزمایش مصالح

یک سیستم بارگذاری در دو جهت طراحی و آزمایش شده است. به طوری که بتوان همزمان سربار وزن ساختمان و نیروی لغزش مصالح را روی نمونه اعمال نمود. نیروی وزن به کمک یک سیستم بادی با فشار هوا تنظیم و به طور افقی وارد می شود. حدود تغییرات این سربار باتوجه به تنش موجود روی پی ساختمان های کوچک متداول بین ۰/۷ تا ۱/۷ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع در نظر گرفته شده است، که بر آجری با مساحت حدود 2۰۰ cm² اثر می کند. سرعت اعمال نیروی لغزش با سیستم هیدرولیکی در دو مقدار ۱/۲۷mm/min و ۵۰/۸mm/min قابل کنترل است. بنابراین اثرات بار وزن و سرعت بارگذاری در محدوده استاتیکی در آزمایش ها منظور شده است. [۱]

برای نشان دادن رفتار سازه بر پی لغزشی از طریق تحلیل عددی، نرم افزاری برای آنالیز دینامیکی جسم صلب بر پی لغزشی به روش تاریخچه زمانی نگاشته شده است و نتایج برای زلزله های ال سنترو، طیس، نورآباد، منجیل و ناغان به دست آمده است. همچنین رفتار سازه صلب تحت تحریک حرکت سینوسی در پایه بررسی گردید. در این آنالیز اثر شتاب حداکثر پایه، مؤلفه قائم شتاب و محتوای فرکانسی آن مورد بررسی

قرار گرفته است. همچنین اثر تغییر مشخصات لایه لغزنده نظیر ضریب اصطکاک، چسبندگی و زاویه تراز سطح پی در تحلیل آمده است. [۱]

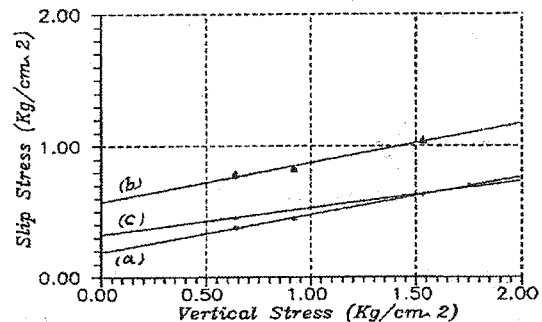
نتایج آزمایش

همانگونه که در روش آزمایش بیان شد، برای به دست آوردن طرح موهر - کولب مصالح، از یک سیستم بارگذاری ۲ محوری استفاده شده است. رابطه فشار لاستیک در سیستم بادی با نیروی عمودی وارد بر نمونه ها، به صورت منحنی هایی، برای فاصله های مختلف بین صفحات فولادی محدود کننده سیستم تعیین گردید و در پردازش نتایج حاصل مورد استفاده قرار گرفت. یکی از مصالحی که نتایج آن در این مقاله ارائه می گردد، ترکیب ماسه بادی و رس است. باتوجه به نتایج آزمایش های فشاری بر نمونه های مکعبی ملات ماسه رس، با درصد های مختلف اختلاط، نمونه هایی با حداقل گیرش لازم تهیه شد و آزمایش لغزش روی آنها انجام یافت.

باتوجه به نیروی مقاوم لغزش تحت بارهای عمودی مختلف، ضریب اصطکاک برای یک لایه ۱ سانتیمتری ملات در سرعت $1/27 \text{ mm/min}$ برابر $0/315$ و در سرعت $50/8 \text{ mm/min}$ برابر $0/299$ می باشد. چنانچه ضخامت لایه به ۳ سانتیمتر افزایش یابد، ضریب اصطکاک در سرعت $50/8 \text{ mm/min}$ ، $0/203$ خواهد شد. مدل موهر - کولب برای این مصالح در نمودار ۱ آمده است.

لازم ذکر است باتوجه به سن ملات (۶۳ روز)، رقم های به دست آمده برای مقاومت لغزشی بسیار نزدیک به مقاومت نهایی ملات می باشد. [۱]

sand-clay mortar
rate : (a) 1.27 mm/min, 1 cm thick.
(b) 50.8 mm/min, 1 cm thick.
(c) 50.8 mm/min, 2 cm thick.



نمودار (۱) نتایج آزمایش ماسه و رس

ماسه بادی خالص مصالح دیگری است که روی آن آزمایش انجام شده است. باتوجه به اینکه ماسه بادی دارای هیچگونه گیرش و مقاومت فشاری نیست، به صورت خشک مورد آزمایش قرار گرفته است. ریزی دانه های ماسه - بادی نسبت به برجستگی های سطح آجر باعث می شود تا لغزش درون لایه ماسه بادی اتفاق بیفتد و ضریب اصطکاک آن مستقل از زبری سطح آجر باشد. بنابراین طرح موهر - کولب حاصل فقط بیانگر اصطکاک است.

ضریب اصطکاک در سرعت $1/27 \text{ mm/min}$ برابر $0/31$ و در سرعت $50/8 \text{ mm/min}$ برابر $0/22$ به دست آمده است. به عبارت دیگر همراه با افزایش سرعت بارگذاری ضریب اصطکاک افت می کند. [۱]

دانه های نسبتاً گردگوشه و درشت پوک که حاصل از انبساط - خاک رس (پوک های صنعتی)، به روش مشابه ماسه بادی تست شده اند. ضخامت لایه حاصل از این مصالح در حدود قطر درشت ترین دانه ها می باشد. طرح به دست آمده برای این مصالح ضریب اصطکاک $0/25$ را نشان می دهد. [۱]

جدول (۱) نتایج حاصل از آزمایش ها را برای مقایسه ضرایب اصطکاک به دست آمده نشان می دهد. همان گونه که قبلاً اشاره شد، بررسی مقادیر ضریب اصطکاک تحت شرایط گوناگون محیطی و سازه ای از اهداف آزمایش بوده که در این مقاله به بررسی آن خواهیم پرداخت. [۱]

جدول (۱) ضریب اصطکاک مصالح مختلف

$0/20 - 0/32$	ملات ماسه رس
$0/23 - 0/31$	ماسه بادی
$0/25$	پوک صنعتی

چسبندگی مصالح

نتایج به دست آمده از ملات ماسه رس بیانگر این نکته مهم است که این مصالح به خاطر چسبندگی به سطوح پی و دیوار، قبل از شکسته شدن، نیروی قابل ملاحظه ای را انتقال می دهند، ولی پس از این مرحله عملکرد لغزشی را می توانند تأمین کنند.

در مصالح دانه ای مورد استفاده، ماسه بادی و پوک سبک، عملاً چنین مشکلی وجود ندارد و این امر از مزایای این مصالح می باشد.

مقایسه نتایج برای ضخامت‌های مختلف مصالح نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت، نیروی لغزش لازم کاهش می‌یابد. اگرچه این افت در کاهش نیروی وارد بر سازه اثر مثبت دارد، اما باتوجه به افزایش نشست سازه، برای هر یک از مصالح یک ضخامت عملی حداکثر وجود خواهد داشت. این محدودیت باتوجه به سربار ناشی از وزن سازه و نیز مقاومت فشاری مصالح اعمال می‌گردد. از سوی دیگر رعایت حداقل ضخامت لایه لغزنده به گونه‌ای که ضریب اصطکاک آن مستقل از ابعاد برجستگی‌های سطوح بلوک‌های دیوار و پی باشد، به بهبود رفتار لغزشی کمک خواهد کرد. بنابراین در مصالح دانه‌ای نظیر ماسه - بادی این ضخامت بسیار بزرگتر از ابعاد دانه‌های ماسه بادی است. اما در پوکه‌های صنعتی می‌توان ضخامت را تقریباً برابر با ابعاد درشت‌ترین دانه‌ها انتخاب کرد. یکنواختی ابعاد دانه‌ها در چنین حالتی باعث می‌شود تا از درگیر شدن دانه‌ها با هم و ایجاد تراکم جلوگیری شود.

تنش قائم

نتایج آزمایش نشان داده است که تغییرات ضریب اصطکاک در محدوده تنش قائم بررسی شده، قابل صرف نظر کردن است. اما باید توجه داشت که باتوجه به مقاومت فشاری نمونه‌ها، تنش قائم ناپیوستگی از حد معین بیشتر نباشد. اگرچه کنترل نشست لایه با توجه به ضخامت آن نیز می‌تواند انجام شود، اما حفظ شرایط لایه بستگی به حداقل مقاومت لازم در برابر تنش قائم وارد شده دارد.

به عنوان مثال نتایج ملات ماسه رس نشان می‌دهد که این ملات دارای کمترین چسبندگی و ضریب اصطکاک می‌باشد. اما پایین بودن مقاومت فشاری آن (حتی گاهی کمتر از 2 kg/cm^2) کاربرد آن را برای ساختمان‌های بیش از یک طبقه می‌کند. همین مشکل در مورد پوکه‌های سبک نیز مطرح است. برخی از پوکه‌ها حتی تنش‌های کم (در حدود 1 kg/cm^2) خرد می‌شوند. بنابراین می‌توان انتظار داشت که با افزایش تنش قائم و خردشدگی بیشتر، ضریب اصطکاک افزایش یابد و در تنش‌های بالا عملاً عملکرد خود را از دست بدهد.

در هر صورت باید توجه داشت نتایج به دست آمده برای مصالح مختلف تنها در محدوده تنش‌های اعمال شده قابل تعمیم می‌باشند.

سرعت بارگذاری

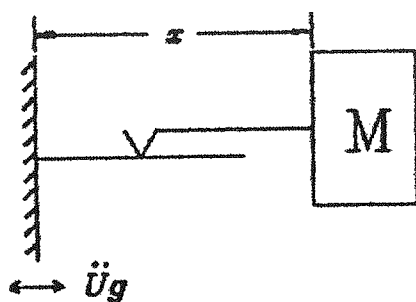
اثر سرعت بارگذاری از دو جنبه حائز اهمیت است. ۱ - چسبندگی مصالح ۲ - ضریب اصطکاک. مقاومت لغزشی نمونه‌ها تحت تنش قائم صفر در اثر چسبندگی با افزایش سرعت بارگذاری افزایش می‌یابد. اگرچه اختلاف حدود سرعت بارگذاری در آزمایش لغزش برای این مصالح بسیار کم بوده است. اما براساس تعمیم نتایج می‌توان دریافت که باتوجه به حرکات ضربه‌ای زمین به هنگام زلزله بایستی حتی‌الامکان از مصالحی استفاده کرد که تحت تنش قائم صفر حداقل مقاومت را در برابر لغزش از خود نشان دهند.

اما اثر سرعت بارگذاری بر ضریب اصطکاک، همانند چسبندگی نیست. نتایج آزمایش لغزش بر ماسه بادی و نیز ملات ماسه رس نشان می‌دهد که ضریب اصطکاک با افزایش سرعت بارگذاری کاهش می‌یابد. مقدار این کاهش برای ماسه بادی بیشتر از ملات ماسه رس است.

آنالیز سیستم پی لغزشی تعریف طرح

بنابر مطالعات انجام شده [۴] می‌توان با دقت قابل قبولی سازه‌های با مصالح بنایی جدا شده را به صورت یک جسم صلب طراحی کرد. از آنجا که با کاهش ارتفاع ساختمان‌ها صلبیت نیز افزایش می‌یابد، این فرض برای سازه‌های روستایی که یک تا دو طبقه می‌باشند، کاملاً منطقی است.

طرح آنالیز انجام شده در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل (۲) مدل آنالیز سازه صلب

برای یک سیستم لغزشی با اصطکاک خالص کولب تا زمانی که سازه با پی در تماس است، می‌توان معادله حاکم بر جابجایی سازه را به صورت زیر بیان کرد:

روش حل

حل روابط داده شده برای آنالیز رفتار دینامیکی سازه صلب روی پی لغزشی به کمک کامپیوتر صورت می‌گیرد. برای این منظور یک برنامه کامپیوتری تدوین شده است.

حل به روش تاریخچه زمانی با گام‌های 0.002 تا 02 ثانیه برای لحظات لغزش و عدم لغزش انجام می‌شود. از آنجا که دقت برنامه به میزان قابل توجهی به طول فاصله زمانی بستگی دارد. انتخاب مناسب فواصل زمانی در برنامه پیش بینی شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که انتخاب گام‌های 0.002 از دقت قابل قبولی برخوردار است. تعیین لحظه دقیق توقف ($\dot{x} = 0$) یکی از نکات مهم در حفظ دقت حل می‌باشد. برای این منظور سرعت نسبی کمتر از ϵ صفر فرض شده است.

برای در نظر گرفتن شرایط مختلف لغزش، آنالیز سیستم فوق با ضرایب اصطکاک 10، 15، 20، 25، و 30. برای زلزله‌های طیس، ناغان، منجیل و ال سنترو انجام پذیرفته است. همچنین اثر چسبندگی لایه لغزنده به ازای مقادیر 0.0، 25، و 50 کیلوگرم بر سانتیمتر مربع با فرض 10 متر مربع سطح تماس سازه و پی و وزن 100 تن برای سازه صلب، در آنالیز زلزله طیس در نظر گرفته شده است. فرضیات فوق برای یک ساختمان کوچک به ابعاد تقریبی $8 \times 6 \text{ m}$ با دیواره‌های آجری به ضخامت 25cm و ارتفاع 3/5 متر مناسب است.

زاویه تراز سطح پی در دو مقدار 5 و 1.0 درصد به ازای ضریب اصطکاک 2. جهت مقایسه با حالت تراز کاملاً افقی سطح پی فرض شده است. این رقم‌ها برای ساختمان مفروض معادل حداکثر اختلاف سطح تقریبی 8 سانتیمتر در طول ساختمان خواهد بود.

نتایج آنالیز

همانگونه که در روابطه ریاضی ارائه شده بیان گردید. شتاب حداکثر یک جسم صلب بر روی پی لغزشی با ضریب اصطکاک μ به مقادیر $\pm \mu g$ محدود می‌گردد. مقادیر ارائه شده برای نتایج هر آنالیز عبارتند از: بیشینه شتاب مطلق، سرعت نسبی و جابجایی نسبی باقی مانده در انتهای آنالیز، مقادیر شتاب بر حسب شتاب ثقل زمین g سرعت بر حسب cm/sec و جابجایی بر حسب cm ارائه شده‌اند.

$$\ddot{x} + \mu \cdot g \cdot \text{Sgn}(\dot{x}) = -\ddot{u}g \quad (1)$$

که در آن $\ddot{u}g$ شتاب افقی زمین، μ ضریب اصطکاک و g شتاب جاذبه است. این معادله رفتار سازه را به هنگام لغزش بیان می‌کند. هنگامی که سازه و پی به هم می‌چسبند و اصطلاحاً وضعیت غیر لغزشی ایجاد میشود، رابطه (2) حاکم خواهد بود.

$$\dot{x} = 0 \quad (2)$$

رابطه (2) تا زمانی که نیروی وارده از طرف زمین کمتر از نیروی اصطکاکی مقاوم بین سازه و پی باشد، برقرار است.

$$\mu g - |\ddot{u}g| > 0 \quad (3)$$

به محض اینکه شرط رابطه (3) برهم بخورد، لغزش آغاز می‌شود و معادله (1) حاکم می‌گردد. هرگاه \dot{x} برابر صفر شود، بایستی توقف یا ادامه لغزش کنترل گردد. اگر سطح پی دارای شیب کوچکی نظیر α باشد، معادله تعادل هنگام لغزش به صورت زیر درخواهد آمد.

$$-\ddot{u}g = \ddot{x} + \frac{\mu \text{Sgn}(\dot{x}) + \tan \alpha}{1 + \mu \text{Sgn}(\dot{x}) \tan \alpha} \times g \quad (4)$$

در این صورت لغزش هنگامی آغاز خواهد شد که شرط رابطه (5) به هم بخورد.

$$\mu g + \tan \alpha \cdot g - |\ddot{u}g| > 0 \quad (5)$$

برای در نظر گرفتن اثر ارتعاش قائم زلزله می‌توان عبارت $g + \ddot{v}$ را به جای g در معادلات (1) و (3) جایگزین نمود. بنابراین این حالت لغزش به صورت رابطه (6) و شرط عدم لغزش به صورت رابطه (7) بیان می‌گردد.

$$-\ddot{u}g = \ddot{x} + \mu (g + \ddot{v}g) \text{Sgn}(\dot{x}) \quad (6)$$

$$\mu (g + \ddot{v}g) - |\ddot{u}g| > 0 \quad (7)$$

جدول (۲) نتایج آنالیز جسم صلب بر روی پی لغزشی برای زلزله های مبنا

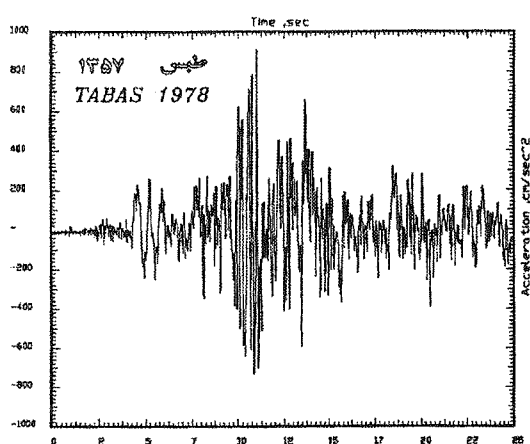
زلزله مبنا	ضریب اصطکاک	شتاب مطلق بیشینه	سرعت نسبی بیشینه	جابجایی نسبی بیشینه	جابجایی نسبی باقیمانده
طیس ۱۳۵۷ (۱۹۷۸)	۰/۱۰ ۰/۱۵	۰/۱۰g ۰/۱۵g	۸۴/۶۴ ۶۰/۴۱	۶۰/۴۸ ۲۹/۵۰	۹/۰۴ ۱۲/۸۳
مؤلفه N16W	۰/۲۰	۰/۲۰g	۴۸/۸۴	۲۱/۱۰	۳/۷۹
با شتاب ۰/۹۳g	۰/۲۵ ۰/۳۰	۰/۲۵g ۰/۳۰g	۴۳/۶۰ ۲۵/۳۷	۱۵/۲۳ ۱۰/۲۹	۹/۲۲ ۷/۳۸
ناغان ۱۳۵۶ (۱۹۷۷)	۰/۱۰ ۰/۱۵	۰/۱۰g ۰/۱۵g	۴۰/۴۲ ۲۳/۳۴	۷/۱۷ ۵/۳۱	۶/۴۰ ۵/۰۳
مؤلفه طولی	۰/۲۰	۰/۲۰g	۳۰/۹۵	۵/۴۴	۵/۳۳
باشتاب بیشینه ۰/۷۲g	۰/۲۵ ۰/۳۰	۰/۲۵g ۰/۳۰g	۲۵/۰۹ ۱۶/۳۷	۴/۸۸ ۳/۶۸	۴/۷۰ ۳/۵۶
منجیل ۱۳۶۹ (۱۹۹۰)	۰/۱۰ ۰/۱۵	۰/۱۰g ۰/۱۵g	۲۲/۶۱ ۱۸/۶۶	۵/۰۵ ۲/۵۴	۱/۴۶ ۱/۵۳
مؤلفه طولی	۰/۲۰	۰/۲۰g	۱۴/۴۵	۱/۶۴	۰/۹۹
باشتاب بیشینه ۰/۵۳g	۰/۲۵ ۰/۳۰	۰/۲۵g ۰/۳۰g	۱۰/۱۶ ۷/۷۱	۱/۰۱ ۰/۵۵	۰/۶۳ ۰/۳۳
ال سنتر ۱۳۱۹ (۱۹۴۰)	۰/۱۰ ۰/۱۵	۰/۱۰g ۰/۱۵g	۲۰/۳۱ ۱۷/۸۲	۲/۸۷ ۱/۷۱	۱/۵۰ ۰/۸۸
مؤلفه NOOW	۰/۲۰	۰/۲۰g	۱۰/۴۹	۱/۲۴	۰/۸۴
باشتاب بیشینه ۰/۳۲g	۰/۲۵ ۰/۳۰	۰/۲۵g ۰/۳۰g	۴/۳۲ ۰/۳۴	۰/۳۷ ۰/۰۱	۰/۲۶ ۰/۰۱

اما مقدار جابجایی نسبی الزاماً از روند یکنواختی تبعیت نمی کند و همانطور که دیده می شود، به علت وابستگی آن به عوامل متعدد دیگر به ویژه پارامترهای زلزله، غیرقابل پیش بینی می باشد.

از مقایسه نتایج چهار زلزله می توان دریافت که مقدار جابجایی نسبی بیشینه نقش مهمی در انتخاب ضریب اصطکاک بهینه دارد. همچنین این مقدار برای زلزله های مختلف متفاوت است و در هر مورد بایستی باتوجه به زلزله های مبنای طرح، حدود آن را تعیین کرد. بنابر این باتوجه به زلزله های مبنای کد ۲۸۰۰ ایران به ویژه طیس می توان دریافت که کاربرد لایه های لغزنده با ضریب اصطکاک کم، همواره دارای توجیه نیست. زیرا در عمل نیاز به اجرای پی عریض تر خواهد بود و این امر سبب افزایش هزینه می شود.

اثر چسبندگی

اگر لایه لغزنده علاوه بر اصطکاک، دارای چسبندگی نیز باشد، لغزش تنها هنگامی اتفاق خواهد افتاد که نیروی وارد بر سازه از طریق پی و این لایه، بر مجموع نیروی چسبندگی و اصطکاک غلبه کند. بنابراین همان طور که در نمودارها و جدول نتایج دیده می شود، تا رسیدن به این نیروی مقاوم، رفتار سازه همانند سازه با پایه صلب خواهد بود و به این لحاظ شتاب وارده نیز افزایش می یابد. اما در این حالت مقادیر جابجایی و سرعت نسبی تغییرات ناچیزی خواهند داشت. باتوجه به مقادیر افزایش شتاب، می توان دریافت که عوامل موحد چسبندگی، سازه را با اشکال مواجه خواهد کرد و از این نظر مطلوب نیستند.



نمودار (۲) شتاب پایه و شتاب جسم صلب تحت زلزله طیس ۱۹۷۸

اثر ضریب اصطکاک

همان طور که دیده می شود، با افزایش ضریب اصطکاک سطح لغزش، شتاب حداکثر جسم صلب به طور خطی تا مقدار شتاب حداکثر پایه افزایش می یابد. در همین حال مقادیر سرعت و جابجایی نسبی کاهش می یابند. این موضوع در نتایج هر چهار زلزله طیس، ناغان، منجیل و ال سنتر دیده می شود.

جابجایی نسبی را با آهنگ سریعتری افزایش دهد. یک نمونه از چنین اثری در جدول مقایسه زلزله های طبس، ناغان، منجیل و ال سنتر و دیده می شود. برای ایجاد سهولت بیشتر نتایج حاصل از زلزله ال سنتر و با حالت تشدید یافته آن با ضریب ۲ برابر مقایسه شده است.

بنابراین سایر پارامترها نظیر محتوای فرکانسی زلزله، ضریب اصطکاک و ثابت می باشد. همان طور که مشاهده می گردد، اگر چه در میزان شتاب حداکثر جسم تغییر حاصل نشده است و این امر از مزایای استفاده از سیستم پی لغزشی است، اما مقادیر سرعت نسبی، بیش از 250% و جابجایی نسبی، بیش از 50% افزایش یافته اند. شایان ذکر است که در یک سیستم الاستومر، هر یک از این مقادیر 100% افزایش می یابند. اما در سیستم های لغزشی با وجود سرعت نسبی بالا، جابجایی نسبی، کمتر افزایش می یابد. به عبارت دیگر نیروهای وارده به صورت شوک های سریع و ناگهانی اثر می کنند و نمی توانند جابجایی زیادی تولید کنند. در هر صورت در طرح عملی این سیستم ها بایستی همواره شتاب حداکثر احتمالی را برای وقوع زلزله های بعدی در نظر داشت.

جدول (۴) نتایج آنالیز مقایسه ای زلزله طبس برای زاویه تراز پی

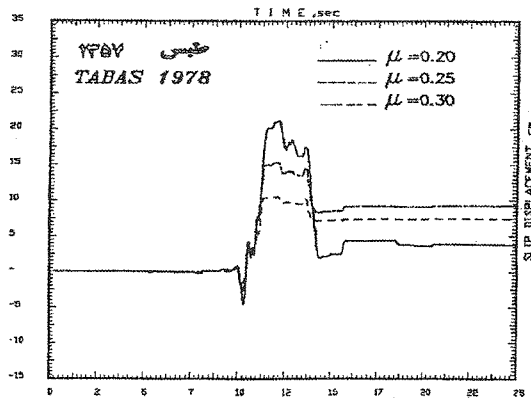
شتاب پایه بیشینه	زاویه تراز پی rad	ضریب اصطکاک	شتاب مطلق بیشینه	سرعت نسبی بیشینه cm/sec	جابجایی نسبی بیشینه cm	جابجایی نسبی باقیمانده cm
۰/۹۳g	۰/۰	۰/۲۰	۰/۲۰۰g	۴۸/۸۴	۲۱/۱۰	۳/۷۹
۰/۹۳g	۰/۰۰۵	۰/۲۰	۰/۲۰۵g	۵۰/۰۶	۲۳/۱۴	۸/۴۱
۰/۹۳g	۰/۰۱۰	۰/۲۰	۰/۲۱۰g	۵۱/۱۹	۲۵/۲۷	۱۲/۸۶

اثر پریود شتاب پایه

جدول زیر نتایج حاصل از تحریک سینوسی را با شتاب حداکثر 5g و پریودهای 1 تا 2 ثانیه نشان می دهد.

جدول (۵) نتایج آنالیز مقایسه ای برای زلزله ال سنتر و شدت یافته

شتاب پایه بیشینه	ضریب اصطکاک	شتاب مطلق بیشینه	سرعت نسبی بیشینه cm/sec	جابجایی نسبی بیشینه cm	جابجایی نسبی باقیمانده cm
۰/۲۲g	۰/۲۰	۰/۲۰g	۱۰/۴۹	۱/۲۴	۰/۸۴
۰/۶۴g	۰/۲۰	۰/۲g	۴۰/۶۸	۵/۷۵	۳/۰۲



نمودار (۳) تغییر مکان نسبی سازه و پی تحت زلزله طبس ۱۹۷۸

جدول (۳) نتایج آنالیز مقایسه ای زلزله طبس برای اثر چسبندگی

شتاب پایه بیشینه	چسبندگی kg/cm ²	ضریب اصطکاک	شتاب مطلق بیشینه	سرعت نسبی بیشینه cm/sec	جابجایی نسبی بیشینه cm	جابجایی نسبی باقیمانده cm
۰/۹۳g	۰/۰	۰/۲۰	۰/۲۰g	۴۸/۸۴	۲۱/۱۰	۳/۷۹
۰/۹۳g	۰/۲۵	۰/۲۰	۰/۴۴g	۴۹/۴۷	۲۱/۶۴	۴/۳۴
۰/۹۳g	۰/۵۰	۰/۲۰	۰/۷۰g	۴۸/۹۰	۱۹/۳۹	۲/۱۰

وزن سازه ۱۰۰ ton و سطح اتصال آن با پی ۱۰ m² فرض شده است.

اثر زاویه تراز سطح پی

با انحراف تراز سطح پی از تراز افقی، می توان انتظار داشت که نمودارهای سرعت و جابجایی به یک سمت متمایل شوند. در این حالت شتاب جسم نیز اندکی زیاد می گردد. نتایج نشان می دهد که انحراف ۱ درصد از افق باعث 5% افزایش شتاب، 4.8% افزایش سرعت نسبی و حدود 20% افزایش جابجایی نسبی می شود. حتی افزایش در مقدار جابجایی باقی مانده نیز قابل انتظار می باشد. باتوجه به این که انحراف تراز سطح پی اغلب کمتر از این حدود است، می توان افزایش ایجاد شده را در حدود عملی طراحی سیستم کم اهمیت دانست.

اثر شتاب حداکثر پایه

همانگونه که قبلاً نیز اشاره شد، افزایش شتاب حداکثر پایه در حدود بالاتر از ۱g تغییراتی در شتاب وارد به جسم نخواهد نمود. اما می تواند مقادیر سرعت و

جدول (۶) نتایج آنالیز برای تحریک سینوسی

جابجایی نسبی باقیمانده cm	سرعت نسبی پیشینه cm/sec	شتاب مطلق پیشینه	ضریب اصطکاک	پریود نوسان سینوسی SEC	شتاب پایه پیشینه
۰/۲۶	۷/۰۶	۰/۲ g	۰/۲۰	۰/۱	۰/۵ g
۱/۰۰	۱۴/۱۳	۰/۲ g	۰/۲۰	۰/۲	۰/۵ g
۶/۲۶	۳۵/۳۴	۰/۲ g	۰/۲۰	۰/۵	۰/۵ g
۲۵/۱۷	۷۰/۶۸	۰/۲ g	۰/۲۰	۱/۰	۰/۵ g
۱۰۰/۵۱	۱۴۱/۳۸	۰/۲ g	۰/۲۰	۲/۰	۰/۵ g

کمی در طراحی عملی سازه دارند. اما در زلزله های شتاب قائم بالا نظیر زلزله منجیل این موضوع بایستی با دقت بیشتری مورد نظر قرار گیرد. همانگونه که در جدول زیر دیده می شود، مؤلفه حداکثر شتاب قائم برای این زلزله حتی بیش از مؤلفه حداکثر شتاب افقی آن است. در این حالت شتاب مطلق پیشینه وارد به جسم صلب 40% افزایش یافته است. همچنین سرعت نسبی 7% افزایش و جابجایی نسبی 17% کاهش داشته است. مقایسه این مقادیر با نتایج زلزله نورآباد نشان می دهد که جابجایی نسبی نسبت به افزایش شتاب قائم با روند یکسانی تغییر نمی کند.

جدول (۷) نتایج آنالیز مقایسه ای زلزله تشدید یافته نورآباد برای نوسان قائم

جابجایی نسبی باقیمانده cm	جابجایی نسبی پیشینه cm	سرعت نسبی پیشینه cm/sec	شتاب مطلق پیشینه	ضریب اصطکاک	شتاب پایه پیشینه قائم	شتاب پایه افقی
۰/۶۶	۰/۶۶	۱۴/۲۳	۰/۲۰ g	۰/۲۰	۰/۰	۰/۵۰ g
۰/۶۰	۰/۷۳	۱۴/۴۱	۰/۲۴ g	۰/۲۰	۰/۱۸ g	۰/۵۰ g

جدول (۸) نتایج آنالیز مقایسه ای زلزله منجیل (آب بر) ی نوسان قائم

جابجایی نسبی باقیمانده cm	جابجایی نسبی پیشینه cm	سرعت نسبی پیشینه cm/sec	شتاب مطلق پیشینه	ضریب اصطکاک	شتاب پایه پیشینه قائم	شتاب پایه افقی
۰/۹۹	۱/۶۴	۱۴/۴۵	۰/۲۰ g	۰/۲۰	۰/۰	۰/۵۰ g
۰/۶۵	۱/۳۶	۱۵/۴۸	۰/۲۸ g	۰/۲۰	۰/۵۵ g	۰/۵۰ g

نتیجه گیری مطالعات

مطالعات و بررسی های آماری انجام شده برای ساختمان های موجود در ایران، نشان می دهد که الگوی غالب ساخت و ساز در کشور ساختمان های بنایی غیر مسلح یک تا دو طبقه می باشند. مقاوم سازی این ساختمان ها با توجه به حجم عظیم آن، بایستی مبتنی بر صرفه اقتصادی باشد. پایین بودن سطح مهارت های فنی دست اندرکاران اینگونه ساختمان ها نیز سبب می شود روش های موجود، در عمل، بهره وری خود را از دست بدهند.

باتوجه به ثابت بودن ضریب اصطکاک 2، شتاب حداکثر نیز در همه تحریک های زیر مقدار 2 g می باشد. اما همان طور که مشاهده می گردد، مقادیر سرعت و جابجایی نسبی به شدت افزایش یافته اند. روند این افزایش تقریباً خطی است به طوری که با دو برابر شدن پریود، سرعت نسبی تقریباً ۲ برابر و جابجایی نسبی تقریباً ۴ برابر شده است.

به طور کلی باتوجه به نتایجی که از آنالیز ریاضی سیستم های جداکننده به دست آمده است و نیز مبانی این سیستم ها، می توان انتظار داشت جداکننده های پایه، برای زلزله های با پریود بلند مناسب نیستند. با این حال سیستم های لغزشی نسبت به سیستم های الاستومر کمتر حساس بوده و به عنوان مثال تغییر شتاب حداکثر آنها ناچیز می باشد.

اثر مؤلفه قائم شتاب

حرکات قائم زمین به هنگام زمین لرزه می تواند عملکرد لغزشی سازه را که بر پایه نیروی اصطکاک حاصل از وزن سازه استوار است، تغییر دهد. در جدول زیر نتایج حاصل از آنالیز تحت زلزله تشدید یافته نورآباد ارائه شده است. از آنجا که شتاب حداکثر این زلزله کمتر از 2 g و در حدود 09 g است، مقدار آن تا میزان 5g افزایش داده شده است. در این حالت شتاب حداکثر قائم از 03 g به 18 g می رسد. مقایسه نتایج نشان می دهد که به دلیل وارد شدن شتاب قائم و جمع شدن آن با شتاب ثقل زمین، میزان نیروی اصطکاک در هر لحظه متغیر است و بنابراین شتاب افقی وارد به سازه نیز می تواند از حد 11 g فراتر رود.

برای ضریب اصطکاک 2، شتاب حداکثر جسم 20% افزایش یافته است. اما سرعت نسبی تنها 1% و جابجایی نسبی 11% افزایش می یابند. اگرچه این مقادیر تأثیر

سیستم جداسازی ساختمان از پایه به دلیل دارا بودن نقش عمده در کاهش نیروهای ناشی از زلزله وارد به ساختمان، می‌تواند به عنوان یک روش مناسب اقتصادی مطرح گردد. نظریه سیستم پی لغزشی روشی برای جداکردن و محافظت ساختمان از حرکات زمین ارائه می‌نماید که دارای مزایایی از قبیل اقتصادی بودن و عدم نیاز به مهارت فنی بالا می‌باشد.

آزمایش

نتایج آزمایشات متعدد برای شناسایی خواص مصالح و به ویژه رفتار لغزشی آنها نشان می‌دهد که مصالح محلی می‌توانند پاسخگوی نیازهای سیستم پی لغزشی باشند. در این زمینه آزمایشات گسترده‌ای برای تحلیل رفتار مصالح در شرایط گوناگون انجام گرفته است. پایداری خواص مصالح تحت شرایط محیطی و بارگذاری مختلف در محدوده عوامل مرتبط با ساختمان‌های مورد مطالعه از پیش نیازهای کاربرد آن است.

بنابر این نتیجه گرفته می‌شود که کاربرد مصالح دانه‌ای نظیر ماسه بادی و پوکه صنعتی عملکرد بهتری نسبت به مصالح چسبنده خواهد داشت.

آنالیز عددی

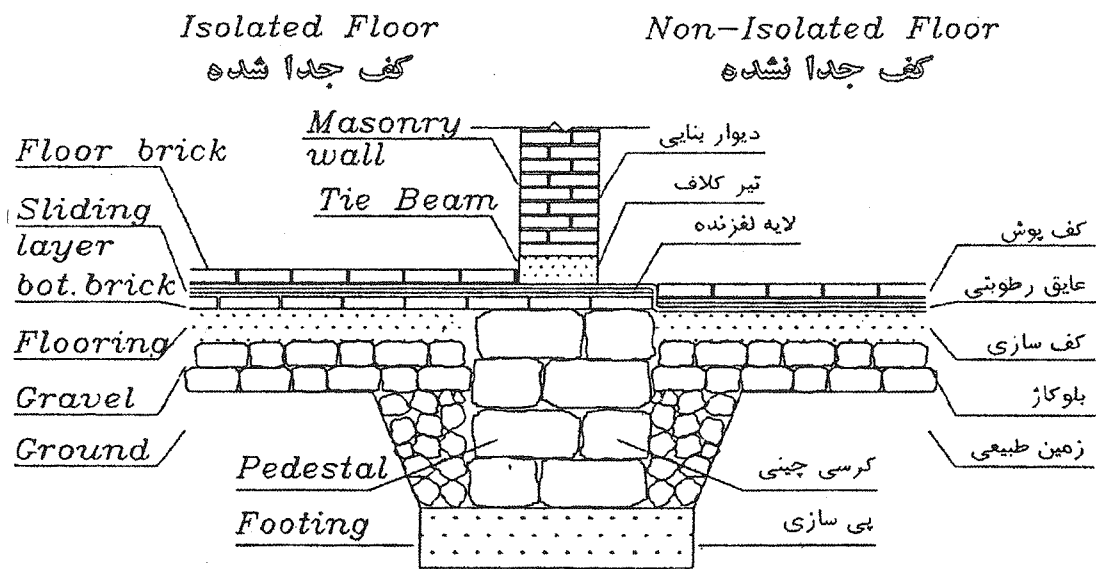
تحلیل رفتار دینامیکی ساختمان‌های بنایی بر پی

لغزشی، بیانگر کاهش نیروهای وارده به ساختمان بر روی پی صلب می‌باشد. همچنین این تحلیل نشان می‌دهد که رفتار سازه جداشده، کمتر به پارامترهای حرکات زلزله حساس است. بنابر این وجود ارتعاشات قائم زمین، افزایش شدت زلزله، اثر ناچیزی بر رفتار این سیستم دارد. همچنین تراز نبودن سطح افقی پی به میزان جزئی این رفتار را تغییر می‌دهد. رفتار سازه بر روی پی لغزشی کاملاً به خواص مصالح لایه لغزنده وابسته است و همراه با تغییرات اصطکاک و چسبندگی آن تغییر می‌کند.

به این منظور چسبندگی مصالح بایستی حداقل باشد. اما از آنجا که ضریب اصطکاک شتاب وارد به ساختمان و جابجایی نسبی پایه را به طور غیر همسو تغییر می‌دهد، بنابر این انتخاب ضریب اصطکاک مناسب بستگی به دو پارامتر فوق دارد.

روش اجراء

باتوجه به نتایج حاصل از آزمایش و تحلیل عددی آنها، می‌توان پی یک سازه بنایی را برای ایجاد رفتار لغزشی، طراحی و اجرا نمود. شکل (۳) جزئیات اجرای پی لغزشی را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌گردد نحوه اجرای پی دیوار تا حدود زیادی مشابه روش‌های معمول اجرایی در ساختمان‌های کوچک است و دارای پیچیدگی فنی خاصی نیست.



Sliding Foundation Detail

شکل (۳) جزئیات اجرای پی لغزشی

برای یکنواخت کردن رفتار سازه در تمام طول پی و دیوار بهتر است یک تیر کلاف در زیر دیوار اجرا شود. این کلاف کمک مؤثری به لغزش یکنواخت در تمامی سطح لایه خواهد کرد.

همچنین عرض پی اجرا شده، بایستی به اندازه عرض لازم برای تحمل وزن ساختمان به اضافه حداکثر جابجایی نسبی احتمالی دیوار، در هنگام زمین لرزه با ضریب اطمینان لازم باشد. به این ترتیب لغزنده می تواند در زیر دیوارهای پارپر اجرا گردد. عایق های رطوبتی کف دیوارها نیز مطابق معمول اجرا می شوند و می توانند نقش هموارکننده بستر و یا محافظ لایه را داشته باشند.

جزئیات نشان داده شده در سمت چپ شکل (۲)، برای حالتی است که تمامی کف بر روی سیستم لغزنده اجرا می گردد. همان گونه که دیده می شود لایه لغزنده در زیر کف پوش ها نیز ادامه دارد، که این امر مستلزم افزایش هزینه جهت اجرای این لایه خواهد بود.

در سمت راست یک سیستم پیشنهادی دیگر وجود دارد که در آنها کف سازی پایین تر از لایه لغزنده انجام می گیرد. بنابراین نیازی به جداسازی آن نیست. اما

مراجع

- [۱] محمدی تهرانی - فریبرز، «سیستم لغزشی خالص برای ایزوله کردن پی ساختمان های کوچک آجری و روستایی مسلح نشده»، پایان نامه کارشناسی ارشد، زیر نظر آقای دکتر محسن تهرانی زاده دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، ۱۳۷۲.
- [۲] تهرانی زاده - محسن، حسنی - ابوالفضل، محمدی تهران - فریبرز، «سیستم پی لغزشی برای ایزوله کردن پی ساختمان های کوچک»، هشتمین سمینار بین المللی پیش بینی برای زلزله، ۱۳۷۲ (۱۹۹۳)
- [3] Buckle I.G., Mayes R.L., "Seismic Isolation: History, Application, and Performance A World

بایستی بخشی از مصالح لغزنده روی پی را که در معرض هوای خارج قرار دارد، محافظت کرد.

خلاصه

- ۱ - ساختمان های بنایی متداولترین و نیز آسیب پذیرترین بناها هستند.
- ۲ - محافظت این ساختمان ها در برابر زلزله بایستی براساس حداقل هزینه و در دسترس بودن مصالح و روش های اجرایی سهل و آسان انجام گیرد.
- ۳ - سیستم جداسازی ساختمان از پایه یک روش عملی برای این منظور است.
- ۴ - استفاده از پی لغزشی یکی از کم هزینه ترین این سیستم هاست.
- ۵ - نتایج آنالیز عددی، مؤثر بودن این سیستم را در کاهش شتاب منتقل شده به سازه و تغییر شکل نسبی آن تأیید می کند.
- ۶ - آزمایشات انجام شده نشان می دهد که چنین روشی با استفاده از مصالح محلی بدون نیاز به تکنولوژی بالا قابل انجام است.

- View", Earthquake Spectra Journal, No. 2, 1990
- [4] Kelly J. M., "Base Isolation: Linear Theory and Design", Earthquake Spectra Journal, No. 2, 1990
- [5] Li Li, "Base Isolation Measure for Aseismic Building in China", 8th World Conference on Earthquake Eng., 1984
- [6] Su L., Ahmadi G., Tadjbakhsh I.G., "Comparative Study of Base Isolation Systems", ASCE Journal of Engineering Mechanics, September 1989.