

Investigation and analysis of the effects of velocity-dependent friction on structures equipped with friction dampers under earthquakes

Valiollah Davari¹, Mohammad Reza Mansoori^{2*}, Masoud Nekooei³

1- Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. davari_1970@yahoo.com.

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. m.mansoori@srbiau.ac.ir.

3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. nekooei@srbiau.ac.ir

ABSTRACT

In the present study, the seismic behavior of structures equipped with friction dampers is investigated by considering the velocity-dependent friction (Stribeck friction with stick-slip phenomenon). For this purpose, the different responses of these structures, which include displacement, velocity and acceleration under the influence of far and near-field earthquakes on the one hand, and also considering the coulomb friction model and velocity-dependent friction model are compared. Due to the nonlinear energy dissipation behavior, programming was used to perform nonlinear dynamic analysis and also the closed-form solution results were compared with the analysis results with Open Sees software. For parametric study, the bending frame equipped with friction damper and lack of equipped with friction damper with different friction models are analyzed by far and near-field earthquakes. (6 case in total).

The results show that in structures equipped with friction dampers, although the displacement in both frictional models under the effect of far-field and near-field earthquakes is almost the same, but the base shear force in the far-field earthquakes for the model with velocity-dependent friction (exact model) is about 20% more than the model with Coulomb friction behavior (simple model). This difference is about 30% for near-field earthquakes. Finally, it can be said that the simplification of the friction model on the one hand and the lack of focus on near-field earthquakes on the other hand, caused errors in estimating displacements, especially internal forces of members, which reduced the error values in estimating responses by considering velocity-dependent friction.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

ARTICLE INFO

Receive Date: 08 May 2021

Revise Date: 01 August 2021

Accept Date: 06 September 2021

Keywords: Velocity-dependent friction

Far-field earthquake

near-field earthquake

Stick-slip phenomena

Symmetric Ricker wavelet

Friction damper

doi: 10.22065/JSCE.2021.285311.2448

*Corresponding author: Mohammad Reza Mansoori
Email address: m.mansoori@srbiau.ac.ir

بررسی تحلیلی اثرات اصطکاک وابسته به سرعت در سازه مجهز به میراگر اصطکاکی تحت تحریک زلزله

ولی اله داوری^۱، محمدرضا منصوری^{۲*}، مسعود نکویی^۳

۱- دانشجوی دکتری سازه، گروه عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- استادیار، گروه عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳- استادیار، گروه عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

چکیده

در این مطالعه رفتار لرزه ای سازه‌های مجهز به میراگر اصطکاکی با در نظر گرفتن اصطکاک وابسته به سرعت (اصطکاک استریک به همراه پدیده لغزشی - ارتعاشی) مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور پاسخ‌های مختلف این سازه‌ها که شامل تغییر مکان، سرعت و شتاب می‌باشد تحت اثر زمین لرزه‌های حوزه دور و حوزه نزدیک گسل از یک طرف و نیز در نظر گرفتن مدل اصطکاکی کولمب و مدل اصطکاکی وابسته به سرعت از طرف دیگر، مورد مقایسه قرار می‌گیرند. با توجه به رفتار غیرخطی استهلاک نیرو، برای انجام آنالیز دینامیکی غیر خطی از برنامه نویسی استفاده شده و همچنین نتایج حل بسته با نتایج حاصل از تحلیل با نرم افزار Open Sees مقایسه شده است. به منظور مطالعه پارامتریک، قاب خمشی در حالات بدون میراگر و با میراگر با مدل‌های اصطکاکی مختلف، هر کدام تحت اثر زمین لرزه‌های حوزه دور و نزدیک تحت تحلیل قرار می‌گیرند. (جمعاً ۶ حالت)

نتایج نشان می‌دهد که در سازه‌های با میراگرهای اصطکاکی، با وجود اینکه جابجایی پدید آمده در هر دو مدل اصطکاکی، تحت اثر زمین لرزه حوزه دور و حوزه نزدیک گسل، تقریباً یکسان است ولی نیروی برشی پایه در حالت زمین لرزه حوزه دور از گسل برای مدل با اصطکاک وابسته به سرعت (مدل دقیق) حدوداً ۲۰٪ بیشتر از مدل با رفتار اصطکاکی کولمب (مدل ساده) است. این تفاوت برای زمین لرزه حوزه نزدیک گسل حدود ۳۰٪ می‌باشد. در نهایت می‌توان گفت ساده سازی مدل اصطکاکی از یک طرف و عدم تمرکز روی زمین لرزه‌های حوزه نزدیک از طرف دیگر، باعث خطا در تخمین جابجایی‌ها و مخصوصاً نیروهای داخلی اعضا شده که با در نظر گرفتن اصطکاک وابسته به سرعت مقادیر خطا در تخمین پاسخ‌ها کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: زمین لرزه حوزه دور، زمین لرزه حوزه نزدیک، اصطکاک وابسته به سرعت، پدیده لغزشی - ارتعاشی، موجک ریکر متقارن، میراگر اصطکاکی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
doi:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
https://doi.org/10.22065/JSCE.2021.285311.2448	۱۴۰۱/۳/۳۱	۱۴۰۰/۶/۱۵	۱۴۰۰/۶/۱۵	۱۴۰۰/۵/۱۰	۱۴۰۰/۰۲/۱۸
محمدرضا منصوری			*نویسنده مسئول:		
m.mansoori@srbiau.ac.ir			پست الکترونیکی:		

۱- مقدمه

اصطکاک باعث استهلاک انرژی و کاهش پاسخ‌های سازه می‌گردد. میراگرهای اصطکاکی بر اساس مکانیزم اصطکاک بین اجسام صلب نسبت به یکدیگر عمل می‌کنند و به‌طور فزاینده‌ای در طراحی سازه‌ها به کار برده می‌شوند. لذا بررسی دقیق اصطکاک و سطح لغزش ضروری است. یکی از اولین تحقیقات در مورد اصطکاک بین سطوح جامد توسط کولمب در سال ۱۷۸۵ انجام شد [۱]. در این تحلیل، مدل فرضی جسم صلب دارای رفتار کاملاً پلاستیک در سطح تماس در نظر گرفته شد و این مدل پایه و اساس مطالعات پیچیده بعدی قرار گرفت. آقای (آرم استرانگ-هلوری و همکاران) [۲] در سال ۱۹۹۴ نشان دادند که نیروی اصطکاک بین سطوح تابع سرعت حرکت دو جسم جامد نیز بوده، بطوریکه مقدار آن در آستانه حرکت و ضمن حرکت باهم متفاوت هستند و توام بودن این موضوع با پدیده لغزشی-ارتعاشی باعث ایجاد اغتشاش و آشفتنگی در جسم در حال حرکت می‌نماید که در شکل ۲ و ۵ نشان داده شده است. آقای استریبک نشان داد که تبدیل از وضعیت آستانه حرکت به وضعیت حرکت دینامیکی به‌صورت پله و سریع نبوده و بلکه به‌صورت نرم می‌باشد. پدیده لغزشی-ارتعاشی می‌تواند پدیده‌های فیزیکی پیچیده را توضیح دهد برای مثال ناپایداری لغزشی-ارتعاشی به‌عنوان منبع اصلی زمین‌لرزه شناخته شده است. دایتریچ [۳] در سال ۱۹۹۱، آرم استرانگ-هلوری و همکاران ۱۹۹۴ و شولتز در سال ۲۰۰۲، ولی اله داوری در سال ۲۰۱۳ [۴] و تی.دیویس و همکاران در سال ۲۰۱۹ [۵].

مدل معمولی اصطکاک کولمب استاتیکی قادر به در نظر گرفتن وقوع لغزشی-ارتعاشی نیست، چراکه منبع اصلی ناپایداری در طول لغزش است. آزمایشات اصطکاک آرم استرانگ-هلوری و همکاران نشان داد که انتقال از حالت استاتیکی به دینامیکی نرم است و نیروی اصطکاک در سرعت‌های لغزش پایین، وابسته به سرعت می‌باشد. ویژگی‌های این انتقال وابسته به پارامترهایی نظیر، مواد سطح، زبری سطح، روغنی بودن و زمان توقف دارد.

آقای کنستانتینیدیس^۵ و ماکریس^۶ در سال ۲۰۰۵ [۶] و نیز در سال ۲۰۰۹ [۷] بر روی تجهیزات در معرض زمین‌لرزه، موضوع لغزشی-ارتعاشی را بررسی و تحقیقات مفصلی انجام داده و اصطکاک وابسته به سرعت و نحوه انتقال از حالت استاتیکی به دینامیکی که همراه با اغتشاش و ارتعاش می‌باشد را به اثبات رساندند.

همچنین ارتعاش لغزشی-ارتعاشی، در آزمایش ممتد کشش تجهیزات سبک توسط دانشمندان هاتچینسون^۷ و چادهاری^۸ در سال ۲۰۰۶ مشاهده شد [۸].

و مشابه تحقیقات بالا نوسانات لغزشی-ارتعاشی در آزمایشات میز لرزه واقع بر سقف توسط یعوو^۹ و همکاران در سال ۲۰۱۴ و نیز لرزش لغزشی-ارتعاشی ناشی از اصطکاک توسط وانگ و هانگ^{۱۰} در سال ۲۰۲۰، [۹] مورد آزمایش، مشاهده و بررسی شده است. در خصوص کنترل لرزه‌های سازه‌های مجهز به میراگرها (میراگرهای اصطکاکی، میراگرهای ویسکوز و ویسکو الاستیک) محققان مختلفی از جمله عماد معلی^{۱۰} و همکاران [۱۰] و نیز دکتر منصوری و همکاران در سال ۲۰۱۴ [۱۱] اشاره کرد.

بر اساس بحث‌های بالا، هم اجسام انعطاف‌پذیر و هم اجسام با پایه صلب در محل تماس با اجسام دیگر در حال حرکت، تحت اصطکاک وابسته به سرعت قرار دارند. که دانشمندان دیگری نیز نظیر (سینق ۱۹۶۰ و پوپوف^{۱۳} ۲۰۰۳) بدین موضوع صحنه گذاشته‌اند [۱۲، ۱۳].

¹ Armstrong-Heloury

² stick-slip

³ Stribeck

⁴ T.Davis

⁵ Konstantinidis

⁶ Makris

⁷ Hutchinson

⁸ Chudhari

⁹ Yeow

¹ Wang

¹ Huag

¹ Mualla, I.H

¹ Singh 1960, Popov 2000

0

1

2

3

وقوع زمین‌لرزه‌های بزرگ در نزدیکی شهرهایی که در مجاورت گسل‌ها قرار گرفته‌اند غیرقابل‌انکار است و این زمین‌لرزه‌ها دارای ویژگی‌های خاصی هستند که آن‌ها را از زلزله‌های دور از گسل متمایز می‌سازد. برخی از این ویژگی‌ها به‌صورتی است که اگر در نظر گرفته نشوند، منجر به تخمین نیروی زلزله بسیار کم‌تر از حد واقعی در طراحی سازه‌ها می‌شود. تحقیقات و بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهند که برش پایه^۴ و لنگر پایه^۵ برای حرکات حوزه نزدیک بسیار بیش‌تر از حوزه دور می‌باشد. مطالعات اخیر نشان داده است که فاصله بر شکل و شدت طیف زلزله تاثیر زیادی می‌گذارد. در گذشته به علت عدم وجود داده‌های کافی از حرکات نیرومند زمین با بزرگراه‌های زیاد، معادلاتی که برای تخمین حرکت نیرومند زمین استفاده می‌شد اغلب مربوط به رکوردهای زلزله‌ها با بزرگی متوسط و در حوزه دور از منبع لرزه زان بود امروزه رکوردهای بیشتری از حرکت نیرومند زمین با بزرگراه‌های زیاد و در حوزه نزدیک منبع لرزه زا در دسترس می‌باشد [۱۴]. بنابراین دو موضوع مهم و جدید اثرگذار بر طراحی میراگرهای اصطکاکی (پدیده لغزشی-ارتعاشی ناشی از اصطکاک وابسته به سرعت و مقایسه پالس تحریک حوزه نزدیک و حوزه دور) که قبلاً مطالعه ای در این خصوص انجام نشده است و نوآوری محسوب می‌شود، در این مقاله مورد بررسی قرار می‌گیرد.

استفاده از نرم‌افزار متلب (ODE) برای تحلیل عددی معادله حرکت جسم صلب با اصطکاک در سطح لغزش، به‌صورت گسترده‌ای بین محققان رواج دارد منتهی با توجه به غیرخطی بودن نیروی اصطکاک در طول یک دوره حرکت در این مقاله از ابزار دسکریت/سیمولینک^۷ نرم افزار متلب استفاده شده است.^۸ این مقاله مطالعات قبلی در مورد اصطکاک وابسته به سرعت، روی سازه‌های مجهز به میراگرهای اصطکاکی تحت پالس تحریک زمین لرزه حوزه دور و مخصوصاً حوزه نزدیک متمرکز و توسعه داده است. و ساده‌سازی‌های رفتار معمولی میراگرهای اصطکاکی که منجر به پیش‌بینی نتایج ضعیف در تحلیل و طراحی اعضای سازه‌ای می‌گردد را، بهبود می‌بخشد.

۲- بیان مسئله

در این تحقیق، با توجه به استفاده گسترده از میراگرهای اصطکاکی برای افزایش میرایی سازه‌ها، کنترل پاسخ و کاهش نیاز لرزه‌ای آن‌ها و همچنین کمبود آگاهی نسبت به رفتار، نحوه طراحی، کنترل کیفیت این میراگرها، مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. در این راستا به دو پارامتر اصلی شامل اثر زلزله بر سازه دارای میراگر اصطکاکی و رفتار میراگر اصطکاکی (ماهیت اصطکاک، لغزش و ارتعاش)، با فرمولاسیون ریاضی مربوطه پرداخته می‌شود.

۲-۱- عامل تحریک

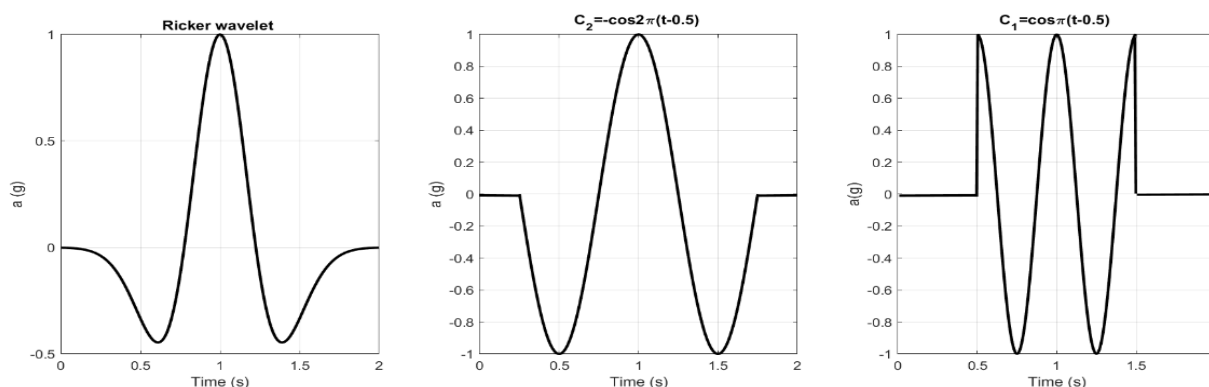
از آنجاکه زمین لرزه، تغییر مکان برشی است که در یک نقطه روی گسل شروع می‌شود و با سرعتی برابر با سرعت حرکت موج برشی، گسترش می‌یابد، انتشار گسیختگی گسل به سمت ساختگاه با سرعتی نزدیک به سرعت موج برشی موجب انباشت انرژی به‌صورت یک پالس بزرگ در ابتدای رکوردهای ثبت‌شده در نزدیکی ساختگاه می‌شود. در اثر این پدیده الگوی انتشار لرزه‌ای، خصوصاً برای پالس‌هایی با پریودهای بیشتر از ۰/۵ ثانیه، تغییر می‌یابد و دامنه جابجایی زمین در راستای عمود بر گسل بزرگ‌تر از مؤلفه موازی با آن می‌شود. همچنین پریود پالس رکورد سرعت ثبت‌شده در جهت موازی گسلش کمتر از میزان آن برای جهت عمودی می‌باشد. برای تشخیص رکورد زمین‌لرزه حوزه نزدیک، می‌توان از تفاوت طیف شتاب در جهت موازی و عمود بر راستای گسل بهره برد. حرکات زمین که دارای پالس در ابتدای رکورد تاریخچه زمانی خود می‌باشد به کلاس ویژه‌ای از حرکات زمین‌لرزه متعلق هستند و موجبات آسیب فراوانی را در سازه‌ها می‌شوند. رکورد این نوع زمین‌لرزه‌ها با اصطلاح رکوردهای پالس گونه نامیده می‌شود. این نوع زمین‌لرزه‌ها معمولاً در مکان نزدیک به محل گسل مشاهده می‌شوند و محققان عامل تفاوت آن را، پدیده جهت پذیری می‌دانند. این در حالی است که تفاوت خاصی بین رکورد تاریخچه

¹ Shear Force 4
¹ Moment 5
¹ Far-field 6
¹ Discrete/Simulink 7
¹ MATLAB [Computer software]. MathWorks, Natick, MA

زمانی شتاب زمین لرزه‌های حوزه نزدیک و حوزه دور دیده نمی‌شود و در واقع بررسی تاریخچه زمانی سرعت و جابجایی این حرکات، مشخصه ویژه این حرکات پالس گونه را به علت جهت پذیری مشخص می‌کند. آسیب‌های شدید مشاهده شده در سازه‌های مختلف طی زلزله‌های اخیر، نشان دهنده این امر است که زمین لرزه‌های پالس گونه تقاضای زیادی را در اجزای مقاوم لرزه‌ای سازه‌ها به وجود می‌آورد [۴، ۵، ۱۵].

زمین لرزه پالس دار به دلیل اینکه: اولاً می‌توانند موجب تقاضای پیش‌بینی نشده‌ای در سازه‌هایی شوند که دارای زمان تناوب اصلی برابر با زمان تناوب پالس هستند. ثانیاً این تقاضا از آنجایی که با استفاده از روش‌های کاربردی مانند شتاب طیفی مد اول، قابل اندازه‌گیری نمی‌باشند، قابل توجه مهندسیین سازه می‌باشد.

برای اولین بار در سال ۱۹۶۵ آقای نیو مارک [۱۶] فرمول ساده‌ای برای جابجایی لغزشی، یک جسم صلب واقع در سطح افقی ارائه نمود که تحت اثر پالس شتاب واحد مستطیلی زمان تناوب کوتاه در پایه قرار داشت. این فرمول حداکثر سرعت در پایه را می‌طلبد. سامرویل و گریوز [۱۷] در سال ۱۹۹۳ اعلام نمودند که تحریک پالس به این دلیل انتخاب می‌شود که اگر به‌طور مداوم توسعه یابد، می‌تواند تقریباً با حرکات دینامیکی زلزله‌های حوزه نزدیک که برای سازه‌ها بسیار مخرب می‌باشند، شبیه‌سازی شود. واسیلیو و ماکریس در سال ۲۰۱۱ برای اسکیل نمودن پالس‌ها، ۱۸۳ حرکت پالس گونه زمین را بررسی کردند و نشان دادند که به لحاظ محتوایی دو موجک نیم سیکل کسینوسی و سیکلوئیدی، بهترین انطباق را با رکوردهای پالس گونه زمین دارند (اولی برای متقارن و دومی برای نامتقارن) [۱۸]. بر اساس مطالعات بسیار دیگری، موجک ریکر متقارن به همراه موجک نیم سیکل کسینوسی که در شکل ۱ نشان داده شده‌اند، انطباق بیشتری با موضوع اصطکاک به‌عنوان عامل تحریک دارند. ما در این مطالعه از موجک ریکر متقارن استفاده خواهیم کرد.



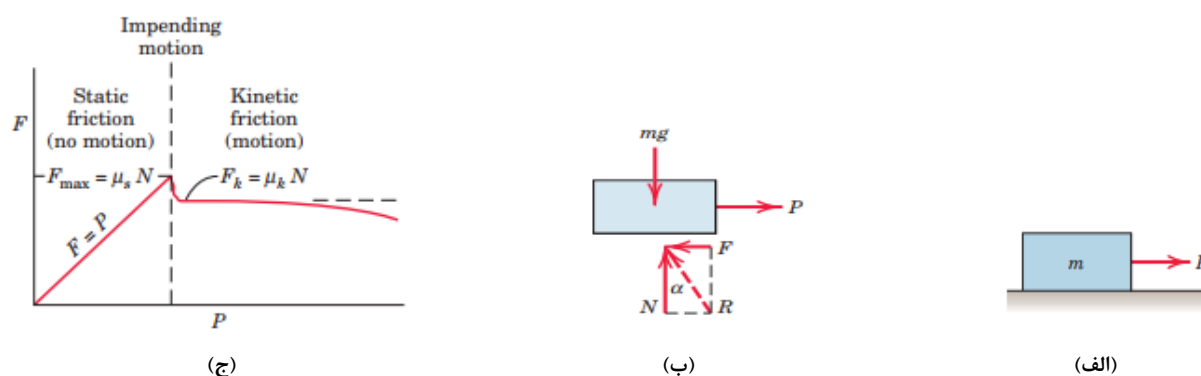
شکل ۱: انواع تحریکات پالس ($T_p = 1.0$, $a_p = 1.0g$)

۲-۲- عملکرد میراگر اصطکاکی با توجه به ماهیت اصطکاک

با توجه به اینکه میراگرهای اصطکاکی بر اساس اصطکاک خشک عمل می‌کنند، طبق یک آزمایش ساده به بررسی سازوکار اصطکاک خشک می‌پردازیم. قطعه‌ای به جرم را در نظر می‌گیریم که همانند شکل ۲-الف در حالت سکون بر روی سطحی افقی قرار دارد. نیروی افقی P به‌صورت تدریجی از صفر تا مقدار کافی جهت حرکت دادن قطعه و ایجاد سرعت قابل توجه افزایش داده می‌شود. در شکل ۲-ب نمودار جسم آزاد قطعه با مقدار دلخواهی از نیروی P نشان داده شده است و در این شکل نیروی اصطکاک مماسی وارد شده از طرف سطح به قطعه F نام‌گذاری شده است. این نیروی اصطکاک وارد بر جسم همیشه بر خلاف جهت حرکت یا تمایل جسم به حرکت است. همچنین در این شکل نیروی عمودی N وجود دارد که در این حالت برابر است با mg و نیروی کل R وارد بر سطح زیرین قطعه، برآیند دوی نیروی N و F است. بی‌نظمی‌های موجود در سطوح تماس و یا به عبارتی برجستگی‌های در سطح تماس باعث می‌شود که نیروی P لازم برای ادامه حرکت معمولاً از نیروی لازم برای شروع حرکت قطعه کمتر است، زیرا در حالت دوم بی‌نظمی‌های سطوح در هم گیر کرده‌اند. با ثبت نیروی اصطکاک F به‌صورت تابعی از P ، رابطه نشان داده شده در شکل ۲-ج به دست می‌آید. زمانی که p صفر است، شرط تعادل

نیازمند آن است که هیچ نیروی اصطکاکی وجود نداشته باشد. با افزایش p تا زمانی که قطعه لغزش نکرده است، نیروی اصطکاک باید با نیروی p مساوی و مخالف باشد. در این فاصله قطعه در تعادل است و تمامی نیروهای وارد بر آن باید در معادلات تعادلی صدق کنند. سرانجام به مقداری از نیروی p می‌رسیم که سبب لغزش قطعه و حرکت آن در جهت نیروی وارد شده می‌شود. در این هنگام نیروی اصطکاک به صورت جزئی اما ناگهانی کاهش پیدا می‌کند. سپس این نیروی اصطکاک اصولاً تا مدتی ثابت باقی می‌ماند، اما با افزایش سرعت باز هم کاهش بیشتری پیدا می‌کند. در شکل ۲-ج ناحیه پیش از نقطه‌ی لغزش یا آستانه حرکت را محدوده اصطکاک ایستا می‌نامند و در این محدوده، نیروی اصطکاک با استفاده از معادلات تعادل تعیین می‌شود. این نیروی اصطکاک می‌تواند هر مقداری از صفر تا حداکثر مقدار آن باشد. آزمایشات انجام شده بر روی دو سطح تماس معین نشان می‌دهد که حداکثر مقدار اصطکاک ایستا یعنی F_{max} با نیروی عمودی N متناسب است و $F_{max} = \mu_s \cdot N$ است و μ_s ضریب اصطکاک ایستا نامیده می‌شود.

پس از وقوع لغزش، حرکت ایجاد شده با شرایط اصطکاک جنبشی همراه است. نیروی اصطکاک جنبشی معمولاً تا حدود زیادی کمتر از نیروی اصطکاک ایستایی حداکثر است. نیروی اصطکاک جنبش $F_k = \mu_k \cdot N$ است و μ_k ضریب اصطکاک جنبشی است. با افزایش سرعت قطعه، اصطکاک جنبشی تا حدودی کاهش می‌یابد و در سرعت‌های بالا این کاهش می‌تواند قابل توجه باشد. ضرایب اصطکاک تا حد زیادی به شرایط دقیق سطوح تماس و همین‌طور سرعت نسبی بستگی دارد و عدم اطمینان زیادی در مورد آن‌ها وجود دارد.



شکل ۲: سازوکار اصطکاک خشک در میراگرهای اصطکاکی

مطالعات و آزمایشات نشان می‌دهد که نیروی اصطکاک اصولاً مستقل از سطح تماس ظاهری است. سطح تماس واقعی بسیار کوچک‌تر از مقدار ظاهری است، زیرا تنها این نوک بی‌نظمی‌های موجود در سطح تماس‌اند که بار را تحمل می‌کنند. حتی بارهای عمودی نسبتاً کوچک نیز تنش‌های بزرگی در این نقاط تماس ایجاد می‌کنند. با افزایش نیروی عمودی، سطح تماس واقعی نیز افزایش پیدا می‌کند و این به دلیل تسلیم شدن ماده تشکیل دهنده‌ی جسم، خرد شدگی یا کندگی نقاط تماس است.

عوامل بسیار متعددی از جمله جاذبه ملکولی در سطوح تماس بسیار نزدیک به هم، ایجاد دمای موضعی بالا و چسبندگی در نقاط تماس، سختی و زبری نسبی سطوح در تماس و وجود لایه‌های بسیار نازکی از اکسید، روغن، گرد و غبار یا موارد دیگر بر نحوه وقوع اصطکاک موثر می‌باشند.

در جدول زیر برخی از مقادیر معمول ضرایب اصطکاک مواد مورد استفاده در میراگرهای اصطکاکی، آورده شده‌اند. این مقادیر تقریبی بوده و بسته به شرایط دقیق موجود می‌توانند تغییر نمایند.

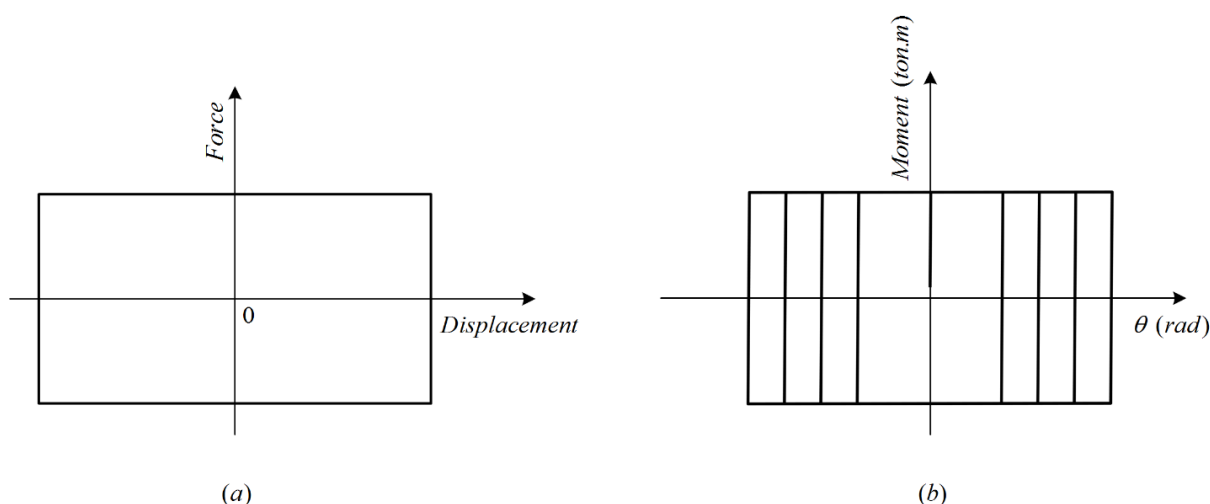
جدول ۱: ضرایب اصطکاک مواد مورد استفاده در میراگرهای اصطکاکی

μ_k/μ_s	μ_k	μ_s	سطح تماس
۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۱	فولاد بر روی فولاد (روغن کاری شده)
۰/۶۷	۰/۴	۰/۶	فولاد بر روی فولاد (خشک)
۰/۷	۰/۰۷	۰/۱	فولاد بر روی باییت (خشک)
۰/۷۵	۰/۳	۰/۴	فولاد بر روی باییت (روغن کاری شده)

جدول ۱: ضرایب اصطکاک مواد مورد استفاده در میراگرهای اصطکاکی

$\mu k/\mu s$	μk	μs	سطح تماس
۰/۷۵	۰/۳	۰/۴	بالشتک ترمز بر روی چدن
۰/۸	۰/۴	۰/۵	برنج بر روی فولاد (خشک)

فلسفه استفاده از میراگر در سازه برای این است که میراگر، دارای ظرفیت بالایی جذب انرژی دینامیکی بوده و به طور قابل توجهی تغییر مکان جانبی قاب را کاهش داده و درصد بالایی از انرژی لرزه‌ای را به صورت گرما و بدون ایجاد مفصل پلاستیکی در ستون و یا عناصر دیگر سازه تلف می‌نماید. اگر منحنی نیرو-تغییر مکان (و یا لنگر-دوران) برای یک ارتعاش کامل سازه مجهز به یک میراگر اصطکاکی ترسیم گردد به این منحنی یک حلقه هیستریزس می‌گویند که شکل ۳ نمونه‌هایی از حلقه هیستریزس را نشان می‌دهد.



شکل ۳: حلقه‌های هیستریزیک میراگرهای اصطکاکی با رفتار ساده

لذا به بررسی دقیق، شبیه‌سازی و فرمولاسیون سازه مجهز به میراگر اصطکاکی که تحت اثر پالس تحریک قرار دارد، می‌پردازیم: مدلی که با فرمولاسیون ریاضی ارائه می‌شود قادر به در نظر گرفتن پدیده لغزشی-ارتعاشی و سیستم‌های دینامیکی همراه اصطکاک می‌باشد، که شامل میراگرهای اصطکاکی نیز می‌گردد شکل (۴). در این مدل از اصطکاک وابسته به سرعت^۹ که از مدل اصطکاک عمومی ارائه شده توسط آقای (خیا ۲۰۰۳) است، استفاده می‌شود [۱۹].

$$\mu(\dot{u}_s) = \mu_s \operatorname{sech}(\beta \dot{u}_s) + \mu_k [1 - \operatorname{sech}(\beta \dot{u}_s)] + \gamma_n |\dot{u}_s|^n \quad (1)$$

در رابطه (۱) که وابستگی ضریب اصطکاک را به پارامتری‌های مختلف معرفی می‌کند، \dot{u}_s = سرعت لغزش، ثابت β تیزی و نرمی انتقال از اصطکاک استاتیکی به دینامیکی است (هر چقدر عدد بزرگ‌تر باشد انتقال تیزتر است) همانطور که در شکل ۵-ج) نشان داده شده است، γ_n = ضریب اصطکاک سطح تماس است. ترم دیگر معادله (۱) یعنی $\gamma_n |\dot{u}_s|^n$ ، تاثیر خطی بودن سرعت در اصطکاک لزوج را در برمی‌گیرد. در صورتی که میراگر اصطکاکی ما ویسکوز باشد، این ترم اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. (اما موضوع بحث ما بیشتر بر اصطکاک خشک متمرکز است).

در سازه‌های ایزوله شده توسط یاتاقان‌های لغزشی همراه با میراگر ویسکوز، هر دو ترم اصطکاک خشک و ویسکوز اهمیت پیدا می‌کنند. جدا از اینکه رفتار ویسکوز ذاتی در سطوح تماس خشک یا روغن کاری شده، وجود دارد، در سیستم‌هایی مثل سازه‌های ایزوله همراه با میراگرهای ویسکوز، به طور مستقیم هر سه ترم معادله (۱) دخیل هستند. بسته به مشخصات سطح تماس، رفتار عادی ممکن است

¹ Stribeck friction

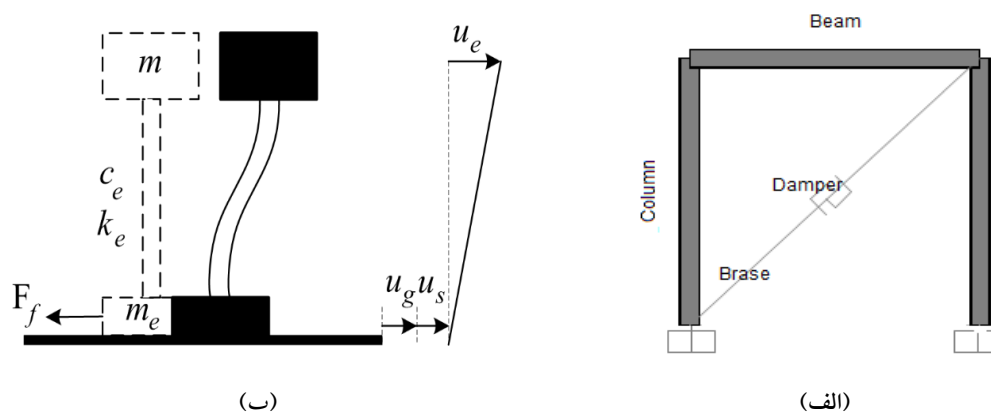
به صورت خطی یا غیرخطی تقریب زده شود. اگر رفتار وسیکوز خطی در نظر باشد، $n=1$ فرض می‌شود و معادله ۱ به صورت معادله (۲) کاهش می‌یابد.

$$\mu(\dot{u}_s) = \mu_s \operatorname{sech}(\beta \dot{u}_s) + \mu_k [1 - \operatorname{sech}(\beta \dot{u}_s)] + \gamma \dot{u}_s \quad (2)$$

نیروی اصطکاک برای مدل لغزشی شکل ۴ (ب)، تحت تحریک افقی با معادله زیر بیان می‌شود.

$$F_f = \mu(\dot{u}_s)(m + m_e)g \operatorname{sgn}(\dot{u}_s) \quad (3)$$

توجه شود در حالی که تجهیزات اضافی مستهلک کننده، به سازه غیر صلب وصل شود، نیروی اصطکاک بایستی بر اساس سرعت نسبی نقطه تماس، محاسبه شود و نه سرعت لغزش. بر اساس فرم عمومی معادله اصطکاک و بسته به حضور و عدم حضور انعطاف‌پذیری در سطح تماس، مدل‌های اصطکاکی و لغزشی دینامیکی مختلفی را می‌توان به دست آورد. بعضی از پدیده‌های فیزیکی موجود را فقط با اصطکاک استریک و پدیده لغزشی-ارتعاشی می‌توان تفسیر نمود.



شکل ۴: مدل عمومی سازه مجهز به میراگر اصطکاکی در یک قاب، (ب) مدل شبیه‌سازی شده.

با توجه به تنوع مدل‌های اصطکاکی و لغزشی، شرح مختصری از آن‌ها به عمل می‌آید:

۲-۳-۲- انواع مدل‌های اصطکاک

۲-۳-۲-۱- مدل اصطکاکی کولمب^{۲۰}

با جایگزینی $\mu_s = \mu_k$ ، $\beta = 0$ و $\gamma = 0$ در معادله (۲)، مقدار $\mu(\dot{u}_s) = \mu_k$ می‌گردد یعنی منجر به مدل اصطکاکی کولمب می‌شود. این مدل در شکل ۵: (الف) نشان داده شده است. برای ارزیابی پاسخ لغزش انواع سازه‌ها، توسط نیومارک و سایر دانشمندان استفاده شده است.

۲-۳-۲-۲- مدل اصطکاکی کولمب+استاتیکی^{۲۱}

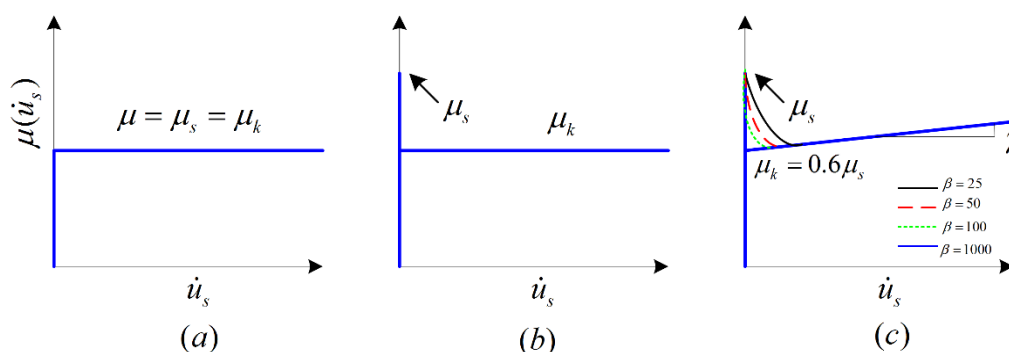
در این مدل همانطور که در شکل ۵: (ب) نشان داده شده است، مقدار ضریب اصطکاک استاتیکی بزرگ‌تر از ضریب اصطکاک دینامیکی است. این مدل نسبت به مدل کولمب کامل‌تر است. در این روش اصطکاک استاتیکی صرفاً برای تعیین شروع لغزش در نظر گرفته می‌شود، اما هنگامی که لغزش جسم آغاز شد، اصطکاک کولمب استفاده می‌شود. با جایگزین اعداد بزرگ برای β به‌عنوان مثال $(=10000\beta/s/m)$ و $\gamma = 0$ در معادله (۲)، یک انتقال بسیار تیز از اصطکاک استاتیکی به جنبشی را نتیجه می‌دهد.

²⁰ Coulomb 0

²¹ Static+Coulomb 1

۲-۳-۳- مدل اصطکاکی استریبک

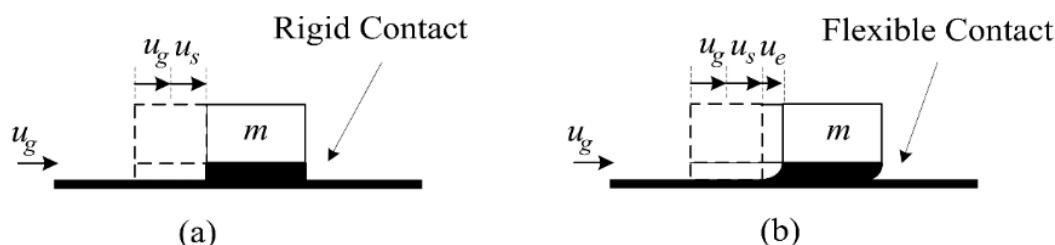
این مدل همانطور که در شکل ۵: (ج) نشان داده شده است، کامل ترین مدل اصطکاک است و بیانگر آن است که انتقال از اصطکاک استاتیکی به دینامیکی به صورت تابعی از سرعت لغزشی است [۲]. اصطکاک استریبک که نشان دهنده نسبت وابستگی اصطکاک در سرعت‌های پایین است باعث می‌شود مشکل پیچیدگی اصطکاک و معرفی پدیده‌های دیگر نظیر فازهای متناوب لغزشی-ارتعاشی حل شود. با معرفی یک انتقال پیوسته از اصطکاک استاتیکی به دینامیکی، مدل ریاضی ارائه شده توانایی پیاده‌سازی، اصطکاک حالت پایدار استریبک را دارد. این مدل یا فرضی تقارن افزایشی و کاهش‌ی رفتار استاتیکی که تابعی از سرعت لغزشی است، می‌باشد. مقدار ضریب β در معادله (۲) این انتقال را کنترل می‌کند. سرعت استریبک برای رابطه‌های لغزشی مختلف، با انجام آزمایش‌های سرعت ثابت به دست می‌آید و این سرعت بستگی به پارامتری‌های مختلفی نظیر مواد سطح، زبری و غیره دارد و با این حال بر اساس تحقیقات آزمایشگاهی روی سطوح مختلف، می‌تواند حدود ۰/۵-۳۰ سانتی متر بر ثانیه باشد [۲۰].



شکل ۵: ضریب اصطکاک μ برای مدل‌های اصطکاکی که تابعی از سرعت لغزش \dot{u}_s است: (الف) مدل اصطکاکی کولمب، (ب) مدل اصطکاکی کولمب + استاتیکی، (ج) مدل اصطکاکی استریبک [۲۱].

۲-۴-۲- مدل‌های لغزشی^{۲۲}

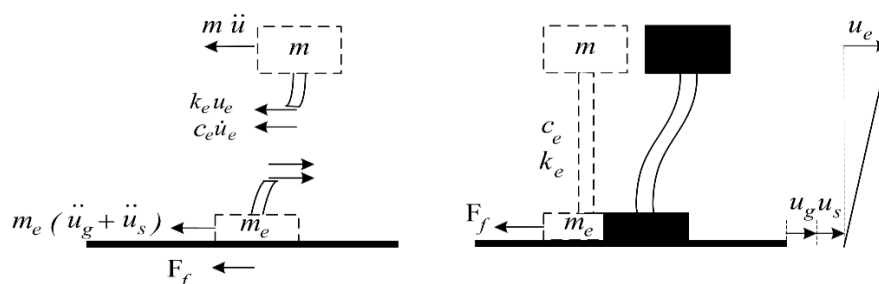
تنوع در مدل‌های لغزشی بستگی به حضور انعطاف‌پذیری در سیستم دارد. وقتی انعطاف‌پذیری وجود ندارد، مدل صلب نیومارک، لغزش دینامیکی را توصیف می‌کند و یک مدل یک درجه آزادی است که در شکل ۶ الف نشان داده شده است. و زمانی که انعطاف‌پذیری وجود دارد یک سیستم نوسانی بالای سطح لغزش، که تغییر دینامیکی مسائل لغزش را بیان می‌کند به نام لغزشی-ارتعاشی معرفی می‌گردد. شکل شماره ۶ ب. اصطکاک استریبک ناپایداری در سرعت‌های پایین را معرفی می‌کند، اما آن را به خودی خود در دوره لغزش (فازهای متناوب لغزشی-ارتعاشی) نمی‌تواند تولید کند. نیروی اصطکاک ناپایدار و انعطاف‌پذیری در سطح تماس (یا خود جسم) شرایط لازمی برای ظهور پدیده متناوب لغزشی-ارتعاشی هستند. انعطاف‌پذیری در مدل با پارامتر u_e بیان می‌شود.



شکل ۶: (الف) مدل بلوک صلب، (ب) مدل بلوک با تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر.

۳- روش حل مسئله

در ادامه توضیحات لغزشی-ارتعاشی و در حالی که تحریک زلزله بر سازه داشته باشیم، با توجه به شکل شماره ۷ و نیز روابط (۱ الی ۴) معادله دیفرانسیل حاکم بر حرکت سیستم به صورت رابطه (۵) نتیجه خواهد شد. با حل معادله دیفرانسیل فوق جابجایی، سرعت، شتاب، نیروی اصطکاک و... همگی قابل محاسبه هستند. که متعاقبا به آن‌ها پرداخته خواهد شد. پارامتر موثر در این خصوص رکورد زلزله و مخصوصا رکورد زمین لرزه حوزه نزدیک می‌باشد که دارای پالس سرعت است.

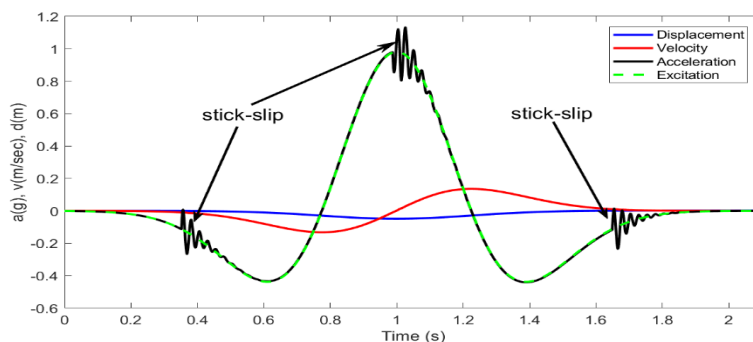


شکل ۷: مدل لغزشی-ارتعاشی با دو درجه آزادی تحت تأثیر لرزه‌ای.

$$\begin{aligned} -c_e \dot{u}_e - k_e u_e &= m(\ddot{u}_e + \ddot{u}_s + \ddot{u}_g) \\ -c_e \dot{u}_e - k_e u_e - F_f &= \lambda m(\dot{u}_s + \dot{u}_g) \end{aligned} \quad (4)$$

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dot{y}_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ \dot{y}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_e \\ \dot{u}_e \\ u_s \\ \dot{u}_s \\ \ddot{u}_s \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ -\frac{\lambda + 1}{\lambda m} (c_e y_2 + k_e y_1) + \frac{F_f}{\lambda m} \\ y_3 \\ y_4 \\ \frac{1}{\lambda m} (c_e y_2 + k_e y_1 - F_f) - \dot{u}_g \end{pmatrix} \quad (5)$$

معادله (۵) یک سیستم معادله دیفرانسیل غیرخطی با نیروی اصطکاک F_f می‌باشد که با سیمولینک متلب حل و شکل‌های حاصله در شکل ۸ رسم شده است که نحوه وقوع پدیده لغزشی-ارتعاشی را برای $\lambda = m_e/m = 0.1$ نشان داده است. سازه مورد بررسی که یک قاب فلزی یک طبقه که دارای زمان تناوب ارتعاشی طبیعی $T = 0.25s$ در این مثال فرض بر این است که سازه صلب و سخت نیست و فقط توانایی لغزش و ارتعاش دارد. ضرایب اصطکاک دینامیکی و استاتیکی به ترتیب 0.1 و 0.2 هستند. ضریب β فرض می‌شود برابر 25 ثانیه بر متر است، و حدود سرعت استریبک، $(0.2-20 \text{ cm/s})$ است. مقادیر پاسخ شتاب، سرعت و جابجایی سیستم فوق تحت اثر موجک متقارن ریگر با $ap = 0.1g$ و $Tr = 1/0s$ (مشخصات پالس ورودی) در شکل شماره ۸ نشان داده شده است. همانطور که در شکل دیده می‌شود سیکل‌های متناوب لغزشی-ارتعاشی مشاهده می‌شود. وقتی لغزش شروع می‌شود، سرعت لغزش تحت اثر پالس ورودی زلزله، افزایش می‌یابد و یکباره به سرعت بحرانی می‌رسد و سیستم لغزشی پایدار دارد. سرعت لغزش پارامتر کنترل کننده لغزشی-ارتعاشی است و هر چه سرعت لغزش کم باشد طول مدت لغزشی-ارتعاشی افزایش می‌یابد. در نهایت وقتی که فرایند به پایان می‌رسد، چسبندگی کامل به وقوع می‌پیوندد و سیستم با فرکانس طبیعی خود شروع به ارتعاش آزاد می‌کند. گفتنی است علاوه بر خصوصیات تحریک ورودی، پارامتری‌های β ، μ_s ، k_e بر وقوع، فرکانس و سیکل‌های لغزشی-ارتعاشی فرایند لغزش تأثیر گذار هستند. همانطور که در این مثال نشان داده شده است، با در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری سیستم همراه با اصطکاک استریبک، مسئله لغزشی-ارتعاشی با ایجاد ارتعاش در بالای سطح لغزش به نمایش گذاشته شده است.



شکل ۸: پاسخ لغزش قاب یک درجه آزادی تحت اثر تحریک موجک متقارن ریکر با $\lambda=0.1$ و $T=0.25$ sec, damping ratio=1%, $\beta=25$, and $\gamma=0$

با جایگزینی مقدار F_f از معادله (۳) در معادله (۶) و با فرض سختی الاستیک بسیار بزرگ، یعنی $k_e \rightarrow \infty$ ، در این حالت $u_e \rightarrow 0$ و معادله حرکت به معادله (۷) تبدیل می‌شود که مدل نیومارک می‌باشد. اگر اصطکاک استریبک مدنظر باشد معادله (۷) و اگر اصطکاک کولمب که $\mu_s = \mu_k$ است مد نظر باشد، معادله (۸) نتیجه خواهد شد.

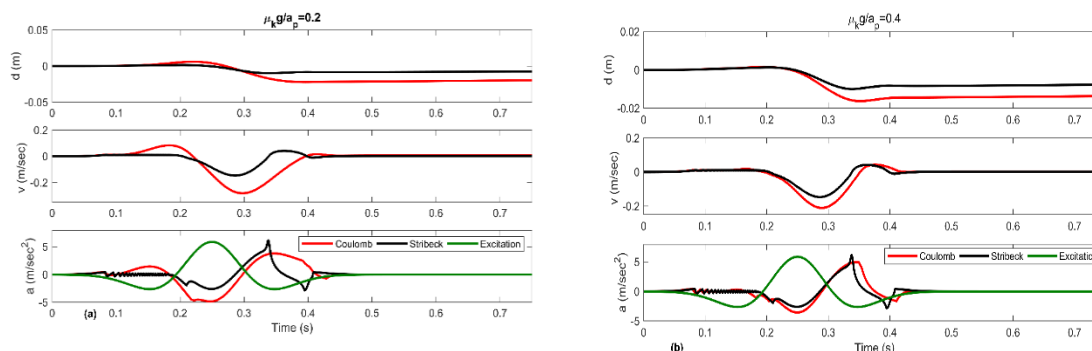
$$\lambda = 0, (4) \rightarrow \begin{cases} -c_e \dot{u}_s - k_e u_e = m(\ddot{u}_e + \ddot{u}_s + \ddot{u}_g) \\ c_e \dot{u}_s + k_e u_e - F_f \approx 0 \end{cases} \rightarrow F_f + m(\ddot{u}_e + \ddot{u}_s + \ddot{u}_g) = 0 \quad (6)$$

با تقسیم طرفین معادله (۶) بر جرم، معادله (۷) و (۸) به دست می‌آیند.

$$\ddot{u}_s + \mu(\dot{u}_s)g \operatorname{sgn}(\dot{u}_s) = -\ddot{u}_g \quad (\text{مدل اصطکاک استریبک}) \quad (7)$$

$$\ddot{u}_s + \mu_k g \operatorname{sgn}(\dot{u}_s) = -\ddot{u}_g \quad (\text{مدل اصطکاک کولمب}) \quad (8)$$

شکل ۹ پاسخ‌های حالت‌های مختلف مدل صلب لغزشی نیومارک را تحت اثر تحریک موجک ریکر با دامنه $a_p=0.6g$ و زمان تناوب $T_p=0.25s$ را نشان می‌دهد. شکل‌های سمت چپ با $\mu_k g/a_p=0.2$ و شکل‌های سمت راست با $\mu_k g/a_p=0.4$ متناظر می‌باشند. یعنی به عبارتی ضرایب اصطکاک در شکل‌های سمت راست دو برابر هستند. برای حالت مدل اصطکاک استریبک، $\mu/\mu_s=0.5$ می‌باشد. با مقایسه پاسخ جابجایی مدل نیومارک دارای اصطکاک کولمب در مقابل مدل نیومارک دارای اصطکاک استریبک با $\mu_k g/a_p=0.2$ ، حداکثر جابجایی منفی مربوط به اصطکاک استریبک که بیشتر از اصطکاک کولمب است زیرا به دلیل وجود μ_s در اصطکاک استریبک به سیستم اجازه حرکت در جهت جابجایی مثبت تحت اثر پالس کوچک ریکر، نداده است. و این خلاف اصطکاک کولمب است که به سیستم اجازه می‌دهد تا در جهت مثبت حرکت کند و بخشی از لغزش جهت منفی را لغو کند. در حالتی که ضریب اصطکاک به $\mu_k g/a_p=0.4$ افزایش می‌یابد (شکل سمت راست) هیچ یک از حالت‌های مدل، لغزشی تحت اثر اولین پالس کوچک ریکر ندارند. بنابراین وقتی که جهت بارگذاری عوض می‌شود، مدل با اصطکاک کولمب جابجایی لغزشی بیشتری نسبت به مدل استریبک تجربه می‌کند. و مجدداً تحت اثر پالس کوچک ثانویه، جابجایی لغزشی وجود ندارد. در پلات‌های سرعت و شتاب لغزشی هم با توجه به ماهیت اصطکاک، اثرات مربوطه مشهود است.



شکل ۹: مقایسه پاسخ‌های مدل لغزشی بلوک صلب نیومارک تحت اثر موجک ریکر با $a_p = 0.6g$ و $T_p = 0.25$ s. (برای مدل اصطکاکی استریبک، $\mu_k/\mu_s = 0.5$ است).

۴- توسعه روابط برای حالت میراگر اصطکاکی در سازه یک درجه آزادی

همانطور که قبلاً اشاره شد با اضافه کردن میراگرهای اصطکاکی، می‌توان عملکرد ساختمان‌ها را افزایش داد زیرا این دستگاه‌ها می‌توانند مقداری از انرژی ورودی زلزله را جذب و مستهلک کنند. امروزه از میراگرهای اصطکاکی به دلیل پتانسیل استهلاک انرژی بالا، هزینه کم، نصب و نگهداری آسان استفاده می‌شود. میراگرهای اصطکاکی چرخشی و لغزشی (FD) توسط آقایان پال و معلی معرفی شده‌اند. همچنین در سال ۲۰۱۸ محمودی صاحبی و فرشید خانجانی [۲۲] و در سال ۲۰۲۱ سلیمانی نژاد و محمودی صاحبی [۲۳] ارزیابی کاهش جابجایی و برش پایه قاب مجهز به میراگر اصطکاکی انجام شده است.

اما آن‌ها، رفتار ساده و معمولی اصطکاک (رفتار کولمب) را در نظر می‌گیرند، که این موجب پیش‌بینی نتایج ضعیف پاسخ‌های سازه‌ها مانند جابجایی و نیروی برشی پایه، تحت تحریک دینامیکی می‌گردد. برای تکمیل و رفع چنین نواقصی، لازم است رفتار واقعی اصطکاک وابسته به سرعت (اصطکاک استریبک) با پدیده لغزشی-ارتعاشی، تحت اثر تحریک واقعی زلزله‌ها قرار گیرند.

در صورتی که وسیله‌ای خاص (میراگر اصطکاکی) برای کاهش ارتعاش در سازه نصب شده باشد نیروی اصطکاک به خاطر لغزش دو سطح خشک به وجود می‌آید. جهت نیروی اصطکاک همواره مخالف جهت حرکت می‌باشد و علامت آن با تغییر جهت حرکت، تغییر می‌نماید. این موضوع رابطه سازی و حل دو معادله دیفرانسیل را ایجاد می‌کند که هر کدام برای یک جهت معتبر می‌باشد و در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

طبق توضیحات کلی قبلی، کاربرد میراگر اصطکاکی در سازه (قاب فلزی یک طبقه) با زمان تناوب طبیعی و سختی مربوطه با مدل ساده‌شده یک بعدی زیر، شبیه سازی می‌شود:

با توجه به شکل (۱۰) داریم:

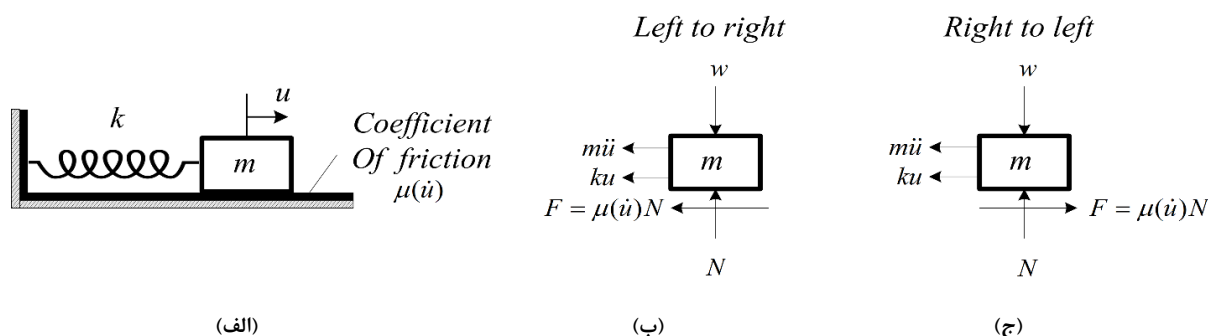
$$F_f + m(\ddot{u}_e + \ddot{u}_s + \ddot{u}_g) + k_s u_s = 0 \quad (9)$$

بنابراین: $u_e = 0$ و $k = m \cdot \omega^2$ که

$$\ddot{u}_s + \mu (\dot{u}_s) g \operatorname{sgn}(\dot{u}_s) + \omega^2 u_s = -\ddot{u}_g \quad (\text{مدل اصطکاکی استریبک}) \quad (10)$$

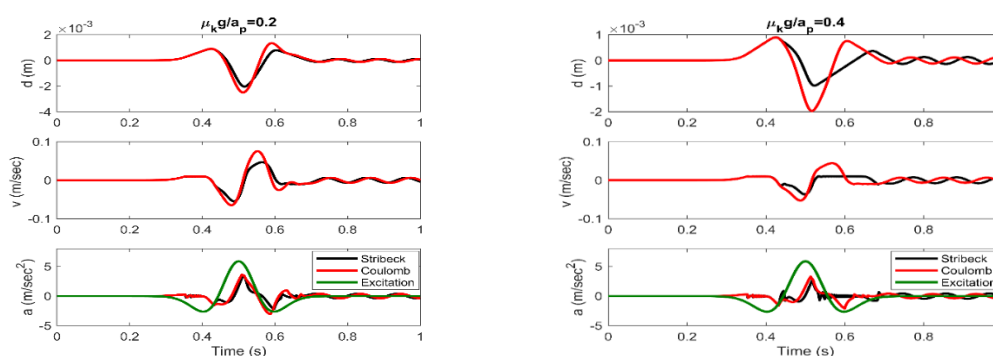
و برای اصطکاک کولمب:

$$\ddot{u}_s + \mu_k g \operatorname{sgn}(\dot{u}_s) + \omega^2 u_s = -\ddot{u}_g \quad (\text{مدل اصطکاکی کولمب}) \quad (11)$$



شکل ۱۰: مدل ساده شده یک بعدی مجهز به میراگر اصطکاکی.

شکل ۱۱، تغییرات پاسخ جابجایی لغزشی سیستم معادل سازه یک طبقه و یک درجه آزادی مجهز به میراگر اصطکاکی را که دارای پریود طبیعی ارتعاشی $T=0.11s$ است را نشان می دهد. مدل لغزشی-ارتعاشی، مشخصات پالس تحریک و اصطکاک مانند شکل ۹ است. پلات های شکل ۱۱ نشان می دهند که در مدل با اصطکاک استریبک دو سیکل لغزشی-ارتعاشی تحت اولین پالس فرعی موجک ریکر تجربه می شود. این دو برآمدگی در تاریخچه سرعت و جابجایی لغزشی نیز مشهود است. همانطور که در شکل ها نشان داده شده است، پاسخ لغزشی هر یک از این مدل ها پیچیده است و به ترکیبی از پارامترهای توصیف سازه و تحریک بستگی دارد.



شکل ۱۱: مقایسه پاسخ های مدل های مختلف اصطکاکی با اصطکاک کولمب و استریبک تحت اثر موجک ریکر با $T_p = 0.25 s$ و $a_p = 0.6g$ (برای مدل اصطکاکی استریبک $\mu_k/\mu_s = 0.5$ است).

۵- اعتبار سنجی مدل

برای بررسی دقت مدل در این مطالعه، نتایج جابجایی، سرعت و شتاب برای سیستم (سازه مجهز به میراگر اصطکاکی) استخراج و در جدول (۲) و شکل (۱۲) مقایسه شده است. اگر در معادلات (۱۰) و (۱۱) به جای رکورد زلزله (اثر پالس موجک ریکر)، شرایط اولیه جابجایی برای شروع ارتعاش سیستم ایجاد شود، معادلات حرکت به صورت زیر درمی آید.

از معادله (۱۰) نتیجه می شود:

$$\ddot{u}_s + \mu(\dot{u}_s) g \operatorname{sgn}(\dot{u}_s) + \omega^2 \cdot u_s = 0 \quad (12)$$

(مدل اصطکاکی استریبک)

و از معادله (۱۱) برای مدل اصطکاکی کولمب نتیجه می شود:

$$\ddot{u}_s + \mu_k g \operatorname{sgn}(\dot{u}_s) + \omega^2 \cdot u_s = 0 \quad (13)$$

(مدل اصطکاکی کولمب)

معادله دیفرانسیل (۱۳)، معادله دیفرانسیل خطی است و جواب تحلیلی آن به صورت زیر است در حالی که معادله دیفرانسیل (۱۲) یک معادله دیفرانسیل غیرخطی تابع سرعت لغزش بوده و حل آن از طریق سیمولینک متلب انجام می شود و پدیده استیک اسلیپ نیز در آن مشهود است.

حل بسته معادله (۱۳) که در شکل ۱۰- (ب) و (ج) نشان داده شده است، به صورت زیر است:

$$(ب) \rightarrow u(t) = A1. \cos \omega t + B1. \sin \omega t - u_f \quad (14)$$

$$(ج) \rightarrow u(t) = A2. \cos \omega t + B2. \sin \omega t + u_f \quad (15)$$

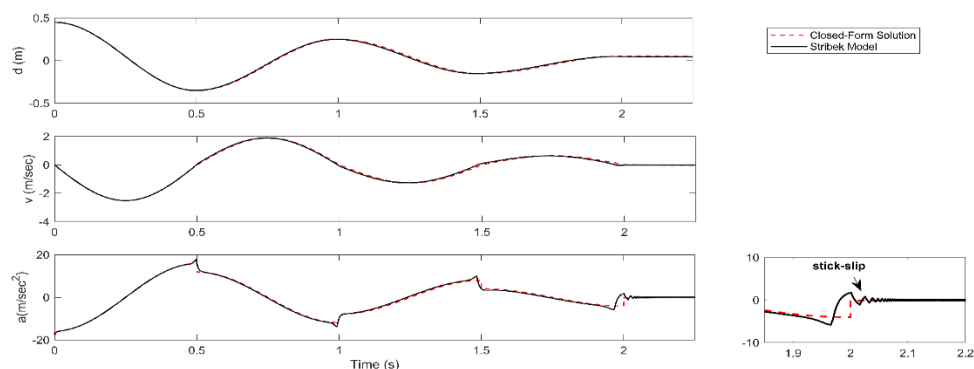
که $u_f = F_f/k = \mu_k g / \omega^2$ و $A1, A2, B1, B2$ از شرایط اولیه به دست می آیند. که u_f تغییر مکان ماندگاری باشد.

با اعمال جابجایی اولیه $+0/45$ متر و سرعت صفر در شروع، در حالی که ضریب اصطکاک دینامیکی برابر $0/2$ و ضریب اصطکاک استاتیکی برابر $0/4$ است و سیستم دارای زمان تناوب طبیعی یک ثانیه می باشد، نتایج به شرح جدول (۲) در پاسخ های سیستم بدست می آید.

جدول (۲): مقادیر عددی پاسخ های حل بسته مدل کولمب و حل عددی سیمولینک مدل استریک

ردیف	شرح	مدل کولمب	مدل استریک	مقدار اختلاف به درصد (%)
۱	حداکثر جابجایی (متر)	۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۰
۲	حداقل جابجایی (متر)	-۰/۳۵۱	-۰/۳۵۱	۰/۰
۳	جابجایی در زمان ۱،۹۶۴ ثانیه (متر)	۰/۰۵۲	۰/۰۴۸	-۷/۷
۴	تغییر مکان ماندگار در زمان ۲،۵ ثانیه (متر)	۰/۰۴۷	۰/۰۴۳	-۸/۵
۵	حداکثر سرعت (متر بر ثانیه)	۱/۸۹۱	۱/۸۹۳	۰/۱
۶	حداقل سرعت (متر بر ثانیه)	-۲/۵۱۵	-۲/۵۱۶	۰/۰
۷	حداقل شتاب (متر بر مجذور ثانیه)	-۱۷/۷۶	-۱۷/۷۷	۰/۱
۸	حداکثر شتاب در زمان ۰،۴۹۹ ثانیه (متر بر مجذور ثانیه)	۱۵/۸	۱۷/۷۷	۱۲/۵
۹	شتاب در زمان ۰،۵۰۱ ثانیه (متر بر مجذور ثانیه)	۱۱/۸۸	۱۷/۷۵	۴۹/۴
۱۰	شتاب در زمان ۰،۹۹ ثانیه (متر بر مجذور ثانیه)	-۱۱/۸۸	-۱۳/۸۴	۱۶/۵
۱۱	شتاب در زمان ۱،۰۱ ثانیه (متر بر مجذور ثانیه)	-۷/۹۶	-۸/۰۳۶	۱/۰
۱۲	شتاب در زمان ۱،۴۹۹ ثانیه (متر بر مجذور ثانیه)	۷/۹۵۷	۹/۸۸	۲۴/۲
۱۳	شتاب در زمان ۱،۵۰۱ ثانیه (متر بر مجذور ثانیه)	۴/۰۳۳	۳/۹۲	-۲/۸
۱۴	شتاب در زمان ۱،۹۶۴ ثانیه (متر بر مجذور ثانیه)	-۳/۹۳	-۵/۸	۴۷/۶

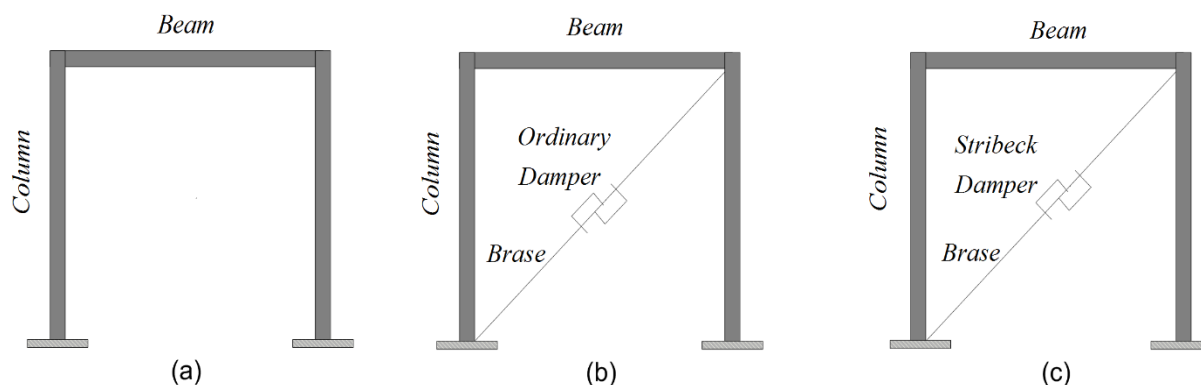
جابجایی بوجود آمده در هر دو مدل تقریباً برابر است ولی در پایان دو سیکل ارتعاش و توقف سیستم، تغییر مکان ماندگار در حالت تحلیلی برابر $+0/50$ متر و در حالت مدل استریک برابر $+0/45$ متر می باشد که حدود 10% اختلاف دارد. سرعت های هر دو مدل تقریباً در طول دو سیکل یکسان است. مقادیر شتاب در دو مدل اصطکاکی غیر از زمانهای توقف و شروع حدوداً یکسان، ولی اختلاف مقادیر شتاب در دو مدل اصطکاکی در زمانهای توقف و شروع به حرکت سیستم مبین تبعیت از شکل های (۵-ب) و (۵-ج)، ضرایب اصطکاک کولمب + استاتیکی و ضریب اصطکاک استریک می باشد. تغییرات شتاب به وجود آمده در سیستم غیر از لحظه شروع که با هم برابر هستند، در زمان های توقف و شروع به حرکت در حالت تحلیلی به صورت پله ای و در حالت مدل اصطکاکی استریک نرم می باشد. که مقادیر مربوطه، به همراه اختلاف آن ها در جدول (۲) برای مقایسه آورده شده است. در زمان ثانیه دوم حرکت، پدیده لغزشی و ارتعاشی در مدل به وجود آمده است در حالی که برای روش تحلیلی پدیده لغزشی و ارتعاشی وجود ندارد. در پایان فرایند در مدل استریک، از آنجاکه یک سیستم دینامیکی تشکیل شده است، جرم با زمان تناوب طبیعی ارتعاش آزاد می کند. و نهایتاً در شکل (۱۲)، نتایج حل بسته اصطکاک کولمب با حل تحلیل عددی اصطکاک مدل استریک مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می شود نتایج تحلیل عددی با تحلیل تئوری حل بسته تطابق خیلی خوبی دارد.



شکل ۱۲: مقایسه بین حل بسته برای مدل انعطاف پذیر با اصطکاک کولمب و حل عددی مدل با اصطکاک استریبک همراه با پدیده لغزشی-ارتعاشی با تغییر مکان اولیه 0.45m ، $T=1.0\text{s}$ ، $\mu_k=0.2$ و $\mu_k/\mu_s=0.5$.

۶- مطالعه پارامتری^{۲۳}

برای انجام مطالعه، قاب ساختمانی فلزی یک طبقه با ارتفاع و عرض دهانه ۳ متر که تیر و ستونهای آن از IPE۲۰۰، مهاربندی که میراگر اصطکاکی بر آن نصب شده دارای سختی محوری $۲/۵ \times ۱۰^۴ \text{KN/M}$ و خود میراگر اصطکاکی هم دارای بار لغزشی ۵۰KN می باشد را انتخاب کرده ایم. در این راستا سازه یک طبقه فلزی در سه حالت بدون میراگر، میراگر با رفتار اصطکاکی معمولی و میراگر با رفتار اصطکاکی واقعی (اصطکاک استریبک و پدیده لغزشی-ارتعاشی) و توأم با اثر زمین لرزه حوزه دور و نزدیک مورد بررسی قرار گرفته شده است به عبارت دیگر شش حالت، مورد بررسی و تحلیل قرار می گیرد. (شکل شماره ۱۳).



شکل ۱۳: الف) قاب فلزی خمشی یک طبقه (ب) قاب فلزی یک طبقه مجهز به میراگر با رفتار اصطکاکی کولمب (ج) قاب فلزی یک طبقه مجهز به میراگر با رفتار اصطکاکی واقعی (اصطکاک استریبک و پدیده لغزشی-ارتعاشی).

برای مدل نمودن رفتار اصطکاکی کولمب به طور عموم از مصالح فولاد^۴ و ۱^۵ استفاده می شود و برای رفتار اصطکاکی استریبک همراه با پدیده لغزشی-ارتعاشی از مصالح تک محوری کست^۵ که بهترین تطابق خواصی را از میان مصالح معرفی شده در Open Sees را دارد، استفاده شده است [۲۴].

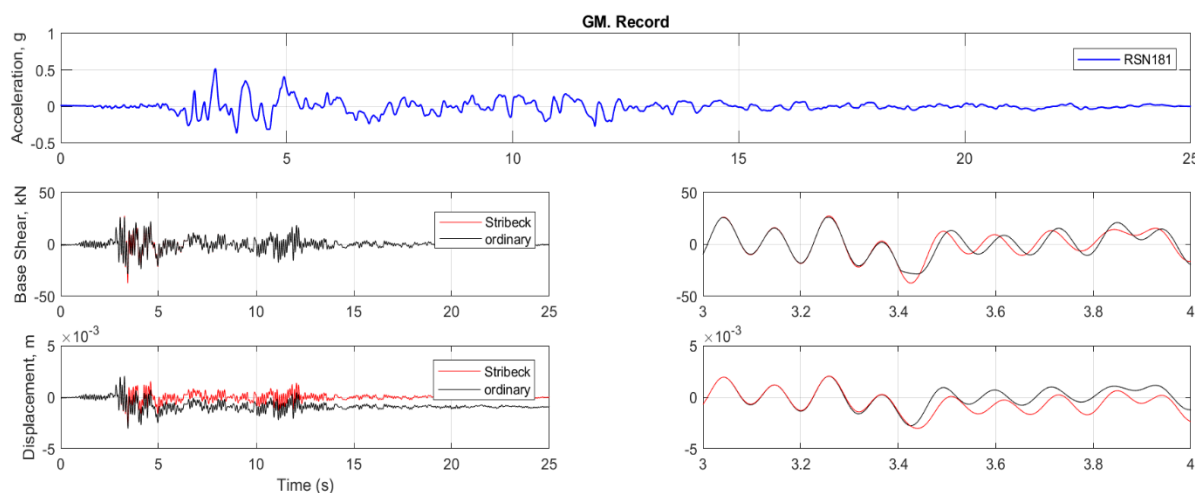
در این تحقیق رکوردهای وارد بر سازه برای زمین لرزه حوزه نزدیک و حوزه دور، طبق جدول زیر انتخاب شده اند:

² parametric study	3
² Uniaxial Material Steel01	4
² Uniaxial Material cast	5

جدول ۳: مشخصات رکوردهای زلزله‌های مورد استفاده

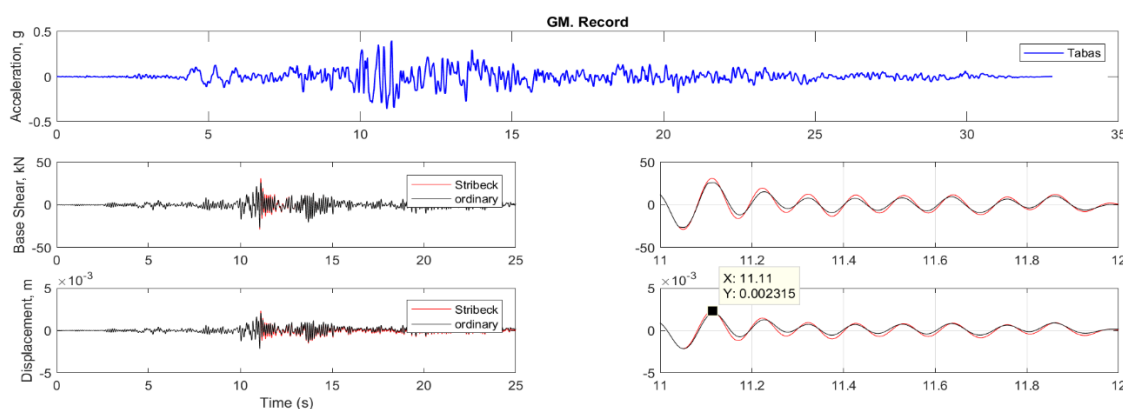
ردیف	نوع رکورد به لحاظ نزدیکی و دوری از گسل	محل وقوع و مشخصات رکورد زلزله
۱	حوزه دور	TabasLN, DT=0.02sec and PGA=0.4g
۲	حوزه نزدیک	Imperial Valley-06, El Centro Array #6, dt=0.005 sec and PGA=0.447g, RSN181

در این مطالعه، پارامتر جابجایی طبقه و برش پایه که اهمیت خاصی در برآورد میزان آسیب‌پذیری سازه دارند ارزیابی شده است. برای حالت حوزه نزدیک که رکورد RSN181 به قاب‌ها اثر می‌کند، همانطور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است، مقدار نیروی برشی در قاب (ب) برابر ۲۷/۴KN و برای قاب (c) برابر ۳۶/۸۳KN (یعنی حدود ۳۶٪ افزایش) و مقدار ماکزیمم جابجایی در قاب (ب) برابر ۳mm و در قاب (c) برابر ۲/۷۳mm (یعنی ۹٪ کاهش) می‌باشد. (در حالی که مقدار نیروی برشی و جابجایی در قاب (الف) بدون میراگر به ترتیب ۴۰/۸KN و ۰/۰۱۷۰ متر بوده است).



شکل ۱۴: مقایسه نمودار خروجی تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی نیروی برشی و جابجایی بین قاب (ب) با رفتار اصطکاکی معمولی و قاب (ج) رفتار اصطکاکی استریبک همراه با پدیده لغزشی-ارتعاشی تحت زمین لرزه حوزه نزدیک.

برای حالت زمین لرزه دور از گسل، رکورد طیس بر قاب‌ها اثر می‌کند. همانطور که در شکل ۱۵ نشان داده شده است، مقدار ماکزیمم نیروی برشی در قاب (ب) برابر ۲۶/۱۰KN و در قاب (c) برابر ۳۱/۳۰KN (یعنی ۲۰٪ افزایش) و مقدار ماکزیمم جابجایی در قاب (ب) برابر ۲/۰۵mm و در قاب (ج) برابر ۲/۳۰mm (یعنی ۱۲٪ افزایش) است. (در حالی که مقدار نیروی برشی و جابجایی در قاب (الف) بدون میراگر به ترتیب ۵۷/۳۵KN و ۰/۰۲۴۴۵ متر بوده است).



شکل ۱۵: مقایسه نمودار خروجی تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی نیروی برشی و جابجایی بین قاب (ب) با رفتار اصطکاکی معمولی و قاب (ج) با رفتار اصطکاکی استریبک همراه با پدیده لغزشی-ارتعاشی تحت زمین لرزه حوزه دور طیس.

با توجه به نتایج شکل‌های ۱۴ و ۱۵، لزوم در نظر گرفتن اثرات واقعی اصطکاک در میراگرها نمایان است و همچنین با مقایسه شکل‌های ۱۴ و ۱۵ پیداست که اثر پدیده لغزشی-ارتعاشی با اصطکاک وابسته به سرعت تحت اثر رکورد زمین لرزه حوزه نزدیک بزرگ‌تر از زمین لرزه حوزه دور می‌باشد. به طور کلی عدم توجه به اثرات اصطکاک استریک به همراه پدیده لغزشی-ارتعاشی موجب دست کم گرفتن مقادیر جابجایی و مخصوصاً نیروی برشی پایه و به تبع آن نیروهای اعضای متصل به میراگرهای اصطکاکی، می‌گردد.

۷- نتیجه‌گیری

میراگرهای اصطکاکی از جمله وسایلی هستند که در کنترل غیر فعال سازه‌ها انرژی را از طریق اصطکاک، در اثر لغزش بین سطوح فولادی و لنت ترمز اتلاف می‌کنند. از مزایای چنین سیستمی می‌توان به عدم نیاز به منبع انرژی خارجی، هزینه کم ساخت و نگهداری و کم کردن هزینه کلی ساختمان به علت افزودن سختی اضافی به سازه اشاره کرد.

در این میان نحوه استهلاک انرژی متاثر از عواملی نظیر ارتعاش ورودی به سازه (پالس ورودی و یا به عبارتی رکورد زلزله) و رفتار دقیق و واقعی سطح در تماس اصطکاک می‌باشد. برای سادگی در اغلب تحلیل‌ها و طراحی‌ها، تنها اصطکاک جنبشی (اصطکاک کولمب) در نظر گرفته می‌شود. در حالی که در نظر گرفتن اصطکاک استاتیک برای شروع حرکت و لغزش از بدیهیات است. و مهمتر از همه اینکه تبدیل از وضعیت استاتیکی به دینامیکی و بالعکس در سیکل‌های رفت و برگشتی زلزله مدام در حال وقوع می‌باشد، از ضروریات بررسی دقیق به شمار می‌رود. تبدیل از وضعیت استاتیکی به دینامیکی و بالعکس با پدیده لغزشی-ارتعاشی و ارتعاش همراه است. در طراحی عرف میراگرها به این موضوع مهم پرداخته نشده که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در این مطالعه علاوه بر تحریک موجک ریکر، رکوردهای واقعی زمین لرزه‌های حوزه دور و نزدیک بر مدل ساده‌شده سازه مجهز به میراگر اصطکاکی مورد بررسی قرار گرفته است.

یکی از نتایجی که از بحث اعتبارسنجی بدست می‌آید، با لحاظ مدل اصطکاکی دقیق (مدل اصطکاکی استریک همراه با پدیده لغزشی-ارتعاشی)، مقادیر پاسخ‌های جابجایی و سرعت در سیستم‌های مجهز به میراگر اصطکاکی تقریباً برابر و تغییر مکان ماندگار حدود ۱۰٪ اختلاف دارد. ولی مقادیر پاسخ شتاب در دو مدل اصطکاکی از ۱۰ الی ۳۰ درصد اختلاف دارد.

یکی دیگر از نتایج قابل توجه به دست آمده در این مطالعه این است که در طراحی سیستم میراگرهای اصطکاکی، با وجود اینکه جابجایی به وجود آمده در مدل با رفتار معمولی (اصطکاک کولمب) و مدل با رفتار دقیق (مدل لغزشی-ارتعاشی و اصطکاک استریک) تحت اثر زمین لرزه حوزه دور و حوزه نزدیک گسل، تقریباً یکسان است ولی نیروی برشی پایه در حالت زمین لرزه حوزه دور از گسل در مدل با رفتار دقیق حدوداً ۲۰٪ بیشتر از مدل با رفتار معمولی می‌باشد ولی در حالت زمین لرزه حوزه نزدیک گسل نیروی برشی پایه در مدل با رفتار دقیق حدود ۳۰٪ بیشتر از مدل با رفتار معمولی است. لذا در نظر گرفتن اصطکاک وابسته به سرعت همراه با پدیده لغزشی-ارتعاشی در طراحی میراگرها و مخصوصاً حالتی که سازه مجهز به میراگر اصطکاکی در معرض زمین لرزه حوزه نزدیک قرار داشته باشد از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشد. زلزله‌های حوزه نزدیک دارای ویژگی‌های خاصی است که اگر در طراحی‌های سازه‌ها از جمله سازه‌های مجهز به میراگر در نظر گرفته نشوند، منجر به تخمین نیروی زلزله‌ی بسیار کمتر از حد واقعی در طراحی سازه‌ها می‌شود.

نکته آخر اینکه، عوامل دیگری غیر از اصطکاک وابسته به سرعت من جمله اصطکاک وابسته به فشار نیز می‌تواند بر پاسخ سیستم سازه مجهز به میراگر اصطکاکی تاثیر گذار باشد و در مطالعات آینده مورد بررسی قرار گیرد.

مراجع

1. Coulomb, C.A., *Théorie des machines simples: en ayant égard au frottement de leurs parties, et a la roideur des cordages: piece qui a remporté le prix double de l'Académie des sciences pour l'année 1781.* 1785: De l'Imprimerie Royale.
2. Armstrong-Hélouvry, B., P. Dupont, and C.C. De Wit, *A survey of models, analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction.* Automatica, 1994. **30**(7): p. 1083-1138.
3. Dieterich, J. *Micro-mechanics of slip instabilities with rate-and state-dependent friction.* in *Eos, Trans. Am. Geophys. Union, Fall Meeting Abstract Volume.* 1991.

4. Davari, V., *operation method of wave's diffusion problem solving in elastic environment under the influence of cylinder overlap*. TextRoad publication, 2013.
5. Davis, T., D. Healy, and E. Rivalta, *Slip on wavy frictional faults: Is the 3rd dimension a sticking point?* Journal of Structural Geology, 2019. **119**: p. 33-49.
6. Konstantinidis, D. and N. Makris, *Experimental and analytical studies on the seismic response of freestanding and anchored laboratory equipment*. 2005: University of California, Berkeley, Pacific Earthquake Engineering Research
7. Konstantinidis, D. and N. Makris, *Experimental and analytical studies on the response of freestanding laboratory equipment to earthquake shaking*. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2009. **38**(6): p. 827-848.
8. Hutchinson, T.C. and S.R. Chaudhuri, *Bench-shelf system dynamic characteristics and their effects on equipment and contents*. Earthquake engineering & structural dynamics, 2006. **35**(13): p. 1631-1651.
9. Wang, X., et al., *Friction-induced stick-slip vibration and its experimental validation*. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020. **142**: p. 106705.
10. Mualla, I.H. *Parameters influencing the behavior of a new friction damper device*. in *Smart Structures and Materials 2000: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways*. 2000. International Society for Optics and Photonics.
11. Mansoori, M. and A. Moghadam. *Controlling Torsional Responses of Structures Under One and Two Directional Excitation Using Dampers*. in *Second European conference on earthquake engineering and seismology*. 2014.
12. Singh, B., *Study of critical velocity of stick-slip sliding*. 1960.
13. Persson, B. and V. Popov, *On the origin of the transition from slip to stick*. Solid state communications, 2000. **114**(5): p. 261-266.
14. Somerville, P., et al., *Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion*. Seismological Research Letters, 1999. **70**(1): p. 59-80.
15. Shahi, S.K. and J.W. Baker, *An empirically calibrated framework for including the effects of near-fault directivity in probabilistic seismic hazard analysis*. Bulletin of the Seismological Society of America, 2011. **101**(2): p. 742-755.
16. Newmark, N.M., *Effects of earthquakes on dams and embankments*. Geotechnique, 1965. **15**(2): p. 139-160.
17. Somerville, P. and R. Graves, *Conditions that give rise to unusually large long period ground motions*. The structural design of tall buildings, 1993. **2**(3): p. 211-232.
18. Vassiliou, M.F. and N. Makris, *Estimating time scales and length scales in pulselike earthquake acceleration records with wavelet analysis*. Bulletin of the seismological society of America, 2011. **101**(2): p. 596-618.
19. Xia, F., *Modelling of a two-dimensional Coulomb friction oscillator*. Journal of Sound and Vibration, 2003. **265**(5): p. 1063-1074.
20. Bengisu, M. and A. Akay, *Stick-slip oscillations: Dynamics of friction and surface roughness*. The Journal of the Acoustical Society of America, 1999. **105**(1): p. 194-205.
21. Nikfar, F. and D. Konstantinidis, *Effect of the stick-slip phenomenon on the sliding response of objects subjected to pulse excitation*. Journal of Engineering Mechanics, 2017. **143**(4): p. 04016122.
22. Mahmoudi Sahebi, M. and F. Khanjani, *Evaluation of seismic performance of X bracing systems equipped with flexural yielding dampers*. Scientific-Research Journal of Iranian Structural Engineering Association, 1396. **12**(2): p. 123-138.
23. Soleimaninezhad, M. and M. Mahmoudi, *Experimental and analytical evaluation of the seismic performance of Y-shaped braces equipped with yielding diagonal dampers*. Journal of Building Engineering, 2021: p. 102362.
24. Gray, M., C. Christopoulos, and J. Packer. *Cast steel yielding fuse for concentrically braced frames*. in *Proceedings of the 9th US national and 10th Canadian conference on earthquake engineering*. 2010. Earthquake Engineering Research Institute and the Canadian Association for