نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۴، شماره ۷، سال ۱۴۰۱، صفحات ۲۴۶۳ تا ۲۴۸۰
DOI: 10.22060/ceej.2021.20367.7423

مدل‌سازی حدی جداساز لغزشی سه‌گانه و بررسی اثر آن بر رفتار روسازه

محمود اسماعیلی، تورج تقی‌خانی*

دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

خلاصه: جداسازهای لغزشی–قوسی از انواع شناخته شده این ابزار کنترل لرزه‌ای می‌باشند که مشاهده‌های مختلف نشان از نقش مؤثر آن‌ها در کاهش خسارت‌های لرزه‌ای سازه‌ها داشته است. هر چند این ابزار در سطوح مختلف لرزه‌ای عملکرد سازه را به صورت قابل‌ملاحظه‌ای ارتقا می‌دهند، اما وجود عدم قطعیت‌ها در رفتار حدی این جداساز در زلزله‌هایی با دوره بازگشت طولانی، توجه محققین را در سال‌های اخیر به مدل‌سازی رفتار حدی آن‌ها جلب نموده است. با رسیدن جداساز به ظرفیت جابجایی خود، قطعه‌های لغزنده به لبه کناری صفحه‌های لغزش برخورد نموده و عملکرد سازه تحت تأثیر این شرایط خاص قرار می‌گیرد. در مطالعه حاضر پس از پیاده‌سازی معادله‌های حاکم بر رفتار این جداسازها، اقدام به مدل‌سازی ریاضی رفتار حدی و بررسی اثر آن بر پاسخ دینامیکی روسازه شده است. در این راستا، با طراحی و مدل‌سازی یک سازه نمونه، پاسخ دینامیکی آن در سطوح مختلف شتاب چندین زلزله بررسی گردیده است. نتایج نشان داده‌اند که حالت حدی برخورد تحت شتاب‌نگاشت‌های مورد مطالعه به طور میانگین زمانی به وقوع می‌پیوندد که شتاب زمین به حدود ۱/۲۵ برابر شتاب بیشینه زلزله مورد انتظار (MCE) رسیده باشد. در این مرحله و پیش از وقوع برخورد، متوسط نیروی برش پایه حدود ۰/۴۸ وزن روسازه و بیشینه تغییر مکان نسبی میان طبقه‌ای برابر ۰/۳۸ درصد مشاهده شده است. با افزایش سطح شتاب، میزان برش پایه افزایش می‌یابد تا سطحی که رفتار روسازه وارد حوزه رفتار غیرخطی می‌گردد. با انجام تحلیل‌ها بر روی مدلی بدون رفتار حدی و مقایسه نتایج دو مدل، ضرایبی برای تبدیل نتایج حاصل از مدل غیرحدی به حدی ارائه گردیده است.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۲۷
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۹/۰۹
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۱۱
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۹/۲۲

کلمات کلیدی:
جداسازی لرزه‌ای
جداساز لغزشی سه‌گانه
رفتار حدی برخورد
زلزله شدید
مدل‌سازی جداساز لغزشی سه‌گانه در متلب

۱- مقدمه

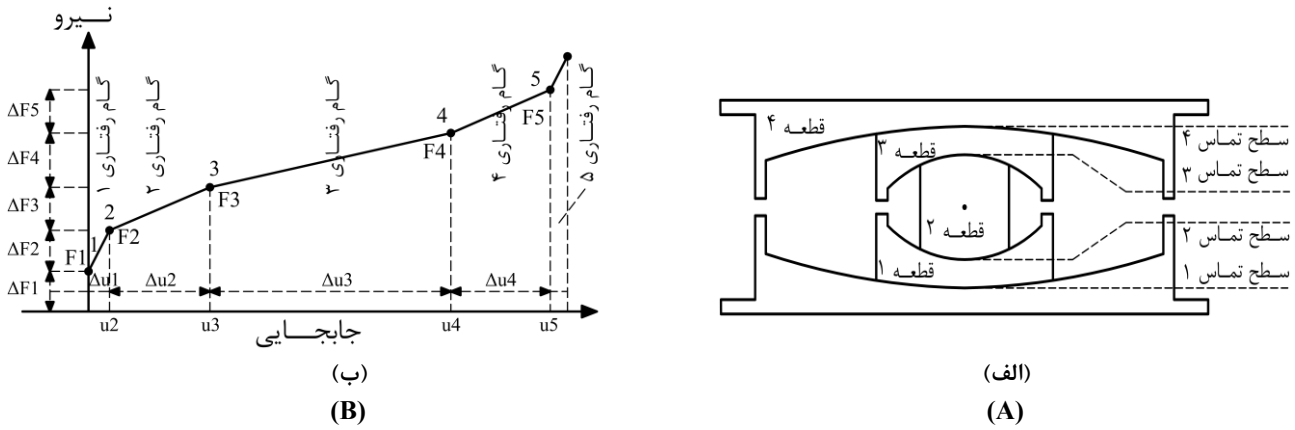
یکی از پرکاربردترین سامانه‌های کنترلی، جداسازهای لرزه‌ای و از جمله شناخته شده‌ترین ابزار آن‌ها، جداسازهای لغزشی قوسی می‌باشند. اگر چه جداسازهای لغزشی قوسی تأثیر چشم‌گیری در کاهش پاسخ‌های سازه ایجاد می‌کنند، اما این ابزار در زلزله‌های شدید دچار جابجایی‌های قابل‌توجهی می‌شوند. در سال‌های اخیر برای حل این مشکل و بهبود عملکردی این ابزار، استفاده از جداسازهای تطبیق‌پذیر[1] لغزشی قوسی پیشنهاد شده است. جداسازهای لغزشی سه‌گانه[2] با رفتار تطبیق‌پذیر در طول رخدادهای زلزله کوچک‌تر از حداکثر زلزله در نظر گرفته شده[3] با جذب تغییر شکل سازه و میرا کردن انرژی زلزله، از تغییر شکل‌های شدید در روسازه جلوگیری می‌کنند. اما در نهایت هر یک از این جداسازهای لغزشی سه‌گانه دارای ظرفیت جابجایی هستند و با بزرگ‌تر شدن مقیاس زلزله در نهایت به پایان ظرفیت جابجایی خود می‌رسند و با برخورد لغزنده داخلی به لبه جداساز وارد حالت حدی برخورد[4] می‌شوند. بررسی‌های حدی از جمله اثر برخورد نهایی برای جداسازهای لغزشی و به صورت خاص جداساز لغزشی سه‌گانه از جمله بحث‌های مطرح کنونی است که تحت زلزله‌های شدید با عدم اطمینان‌هایی روبرو هستند و نیاز به بررسی‌های عددی و آزمایشگاهی بیش‌تری دارند.

جداسازهای لغزشی سه‌گانه می‌توانند دارای طرح‌های متفاوتی در هندسه و ضرایب اصطکاک باشند اما در مطلوب‌ترین حالت همانند شکل ۱–الف با قطعه‌های متقارن و ضرایب اصطکاکی همانند رابطه (۱) در نظر گرفته می‌شوند تا نمودار رفتاری تطبیق‌پذیر مطلوبی همانند شکل ۱–ب داشته باشند. در این حالت جداساز سه‌گانه دارای ۵ گام رفتاری است که گام‌های حرکتی آن تابعی از هندسه و ضرایب اصطکاک در نظر گرفته شده سطوح

1 Adaptive
2 Triple Friction Pendulum isolator (TFP)
3 Maximum Considered Earthquake (MCE)
4 Ultimate contact behavior

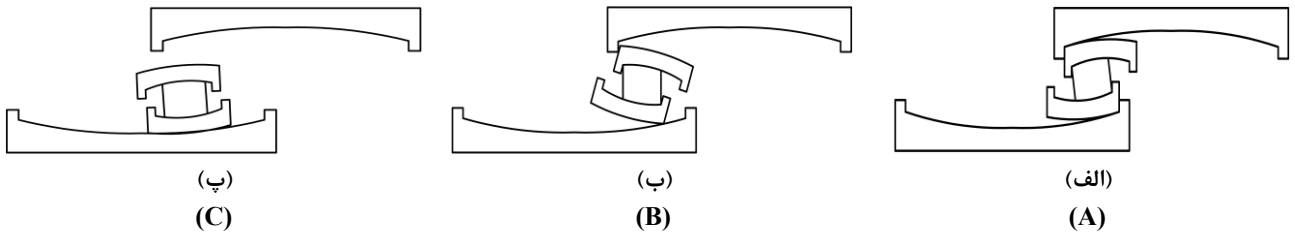
* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ttaghikhany@aut.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.



شکل ۱. معرفی جداساز لغزشی سه‌گانه الف) هندسه و ساختار [۱] ب) نمودار رفتاری [۱]

Fig. 1. Introduction of Triple Friction Pendulum A) Geometry [1] B) Behavioral Diagram [1] Introduction of Triple Friction Pendulum A) Geometry [1] B) Behavioral Diagram [1]



شکل ۲. رفتارهای حدی جداساز لغزشی سه‌گانه الف) برخورد نهایی [۲] ب) بلند شدگی رخ داده پس از برخورد نهایی [۲] پ) بلند شدگی رخ داده در میانه رفتار جداساز [۲]

Fig. 2. Ultimate Behaviors of TFP A) Ultimate Contact [2] B) Uplift after Ultimate Contact [2] C) Uplift in The Middle of Isolator Behavior [2]

است. مهم‌ترین رفتارهای حدی در جداسازهای سه‌گانه شامل برخورد (با پایان ظرفیت جابجایی جداساز) و بلند شدگی[1] می‌باشند که در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. اثرهای برخورد در این مطالعه بررسی شده‌اند.

$$\mu_2 = \mu_3 < \mu_1 \leq \mu_4 \qquad (۱)$$

در خصوص رفتار حدی جداسازهای لغزشی قوسی، بکر و همکاران[2] [۲] با انجام یک تحلیل دینامیکی میز لرزه بر روی سازه دو طبقه و دو دهانه قاب خمشی فولادی با افزایش گام به گام مقیاس شتاب‌نگاشت‌های وارده به بررسی رفتار روسازه و مودهای حدی جداساز سه‌گانه تحت زلزله‌های شدید پرداختند. در این آزمایش برخورد نهایی جداسازها در حد 1.4MCE و خرابی واحدهای جداساز در حد 1.6MCE و با مودهای خرابی متفاوتی ثبت شد. طراحی ضعیف بولت‌های قطعه مقعر بالایی به ستون باعث پرتاب شدن قطعه بالایی پس از برش بولت‌ها و در نتیجه از بین رفتن کامل باربری جداساز شد اما طراحی ضعیف بولت‌های قطعه مقعر پایینی به پدستال امکان لغزش المان جداساز روی بتن را با ضریب اصطکاک بالا به عنوان یک رفتار پساخرابی به وجود آورد. برش پایه ثبت شده در زمان خرابی جداسازها حدود ۱/۰۷ برابر وزن روسازه و حداکثر جابجایی نسبی میان‌طبقه‌ای (دریفت)

1 Uplift
2 T.C. Becker et al.

روسازه در 1.4MCE به ۱/۵٪ و در 1.6MCE به ۲/۹٪ رسیدند. اگر چه روسازه ظرفیتی معادل با رسیدن جداساز لغزشی به ظرفیت جابجایی داشت اما با این وجود رفتار سازه وارد ناحیه غیرخطی شد و پس از انجام آزمایش‌ها کرنش‌های باقی‌مانده در اعضا و دریفت باقی‌مانده در روسازه قابل مشاهده بودند. میزان نیروی محوری وارد بر هر جداساز در مود خرابی رخداده بسیار مؤثر گزارش شد. تأثیر نیروی محوری بر رفتار نهایی جداساز لغزشی توسط بائو و همکاران[1] [۳] با استفاده از مدل اجزای محدود غیرخطی در یک جداساز لغزشی دوگانه بررسی و نشان داده شد که وزن زیاد روسازه روی جداساز باعث می‌شود که در برخورد رخداده در جداساز لبه‌های قطعه‌ها به تسلیم برسند و خرابی جداساز از مود بلند شدگی به مود برش لبه‌ها تغییر یابد. در این مطالعه همچنین کاهش نسبت ارتفاع به پهنا در لغزنده صلب داخلی پایداری جداساز را در برخورد نهایی به طور مؤثری افزایش داد. بائو و همکاران [۴] در مطالعه‌ای دیگر با مدل‌سازی عددی یک قاب خمشی و یک قاب مهاربندی با جداسازهای لغزشی، این سازه‌ها را با سه طرح متفاوت: جداساز با ظرفیت بیش از معمول، قاب قوی‌تر از حد معمول و طرح سوم به صورت قاب و جداساز با طرح عادی تحت ۱۴ زلزله و تحت مقیاس‌های شدید بررسی کردند. نتایج این بررسی نشان داد که سختی روسازه تأثیر بسزایی در فروریزش سازه و مود خرابی جداسازها دارد. در طرح معمولی و طرح روسازه قوی، مود خرابی ترکیبی از تسلیم روسازه و بلند شدگی واحدهای جداساز حاصل شدند در حالی که در طرح جداساز با ظرفیت زیاد، تسلیم روسازه مود حاکم بر خرابی روسازه بود. همچنین در مطالعه‌ای اخیر که تومک[2] و همکاران به کمک نرم‌افزار LS-DYNA بر روی برخورد نهایی در جداسازهای لغزشی سه‌گانه انجام دادند [۵]، افزایش پاسخ‌های روسازه ناشی از این برخورد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مطالعه به عنوان پایه‌ای برای مدل‌سازی ساده برخورد و خرابی لبه جداساز در نرم‌افزار LS-DYNA ارائه شده است.

با توجه به مطالعه‌های محدود و گستره زمینه‌های بررسی حدی، میزان نیروها و تغییر شکل‌های روسازه در لحظه برخورد و پس از آن همچنان مورد بحث و نیازمند مطالعه‌های بیش‌تری هستند. رفتار روسازه پیش از برخورد به جسم صلب بر روی غلتک و پس از رخداد برخورد به سازه پایه ثابت تشبیه می‌شود اما بررسی نموداری تغییر شکل روسازه و توزیع نیروی زلزله در هر یک از شرایط فوق همچنان پاسخ کاملی را در بر ندارد و به عنوان یک مسئله اساسی، در این مطالعه تلاشی در مسیر پاسخ به این مسئله انجام شده است.

1 Y. Bao et al.
2 P.Tomek

آیین‌نامه ASCE7-10 [۶] نیز توزیع نیروی زلزله را به صورت خطی و آیین‌نامه ASCE7-16 [۷] به صورت منحنی ارائه می‌دهند و در ارائه این توزیع نیرو تفاوتی را برای حدود زلزله که پیش و پس از برخورد هستند قائل نمی‌شوند و بررسی تفاوت توزیع نیرو در این دو حالت سؤالی اساسی برای بررسی را باقی می‌گذارد.

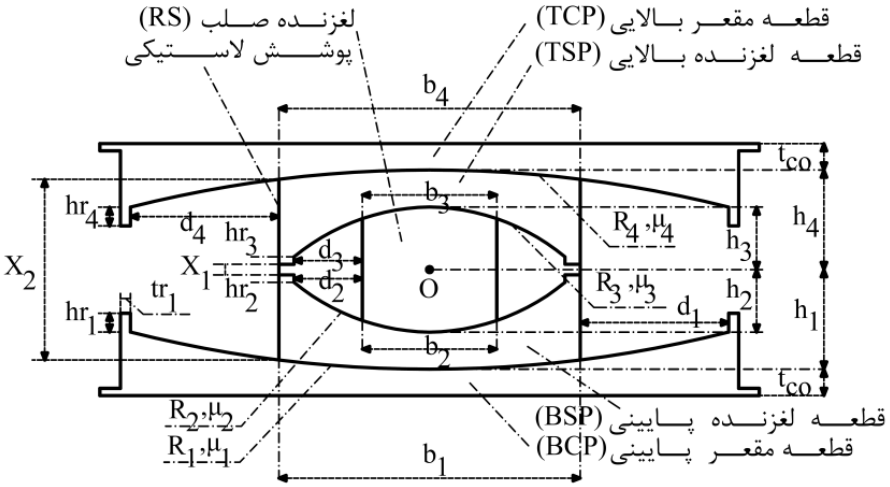
۲- مدل دینامیکی جداساز لغزشی سه‌گانه

مدل‌های متفاوتی برای در نظر گرفتن اثر جداساز لغزشی سه‌گانه در زیر سازه توسط فنز و کنستانتینو[3] [۸-۱۲]، بکر و میهین[4] [۱۳]، دائو و همکاران[5] [۱۴] و سارلیس و کنستانتینو[6] [۱] ارائه شده‌اند. جامع‌ترین مدل پذیرفته شده، مدل سارلیس و کنستانتینو است که شامل رفتار نهایی برخورد در جداساز می‌شود. این مدل شامل هیچ محدودیتی برای در نظرگیری مقادیر ضرایب اصطکاک سطوح مختلف جداساز نمی‌شود و با افزایش تعداد درجه‌های آزادی که معرفی کننده رفتار جداساز هستند، محل نیروهای ایجاد شده بین قطعه‌ها را به طور صریح از مراکز تماس این سطوح خارج می‌کند. برای مرتبط کردن این درجه‌های آزادی به نیروها، معادله‌های تعادل دورانی در کنار معادله‌های افقی و قائم قطعه‌ها وارد می‌شوند و حرکت هر یک از قطعه‌های جداساز به صورت دقیق و مستقل محاسبه می‌گردند. بنابراین هرگونه وابستگی ضرایب اصطکاک سطوح به سرعت لغزشی، دما و فشار به صورت مستقل و دقیق قابل‌محاسبه است [۱].

شماره سطوح و قطعه‌ها در شکل ۱-الف و مؤلفه‌ها و نام‌گذاری‌های یک جداساز لغزشی سه‌گانه در شکل ۳ تعریف شده‌اند. معادله‌های حرکت جداساز لغزشی سه‌گانه برای حرکت در یک راستا بر اساس نمودار جسم آزاد شکل ۴ که برای وضوح تفکیک شده است، به دست می‌آیند. با در نظرگیری زوایای دوران کوچک برای قطعه‌ها و نوشتن معادله‌های تعادل قائم، مقادیر نیروهای عمود بر سطح در هر یک از چهار سطوح در تماس با هم مانند روابط (۲) به دست می‌آیند.

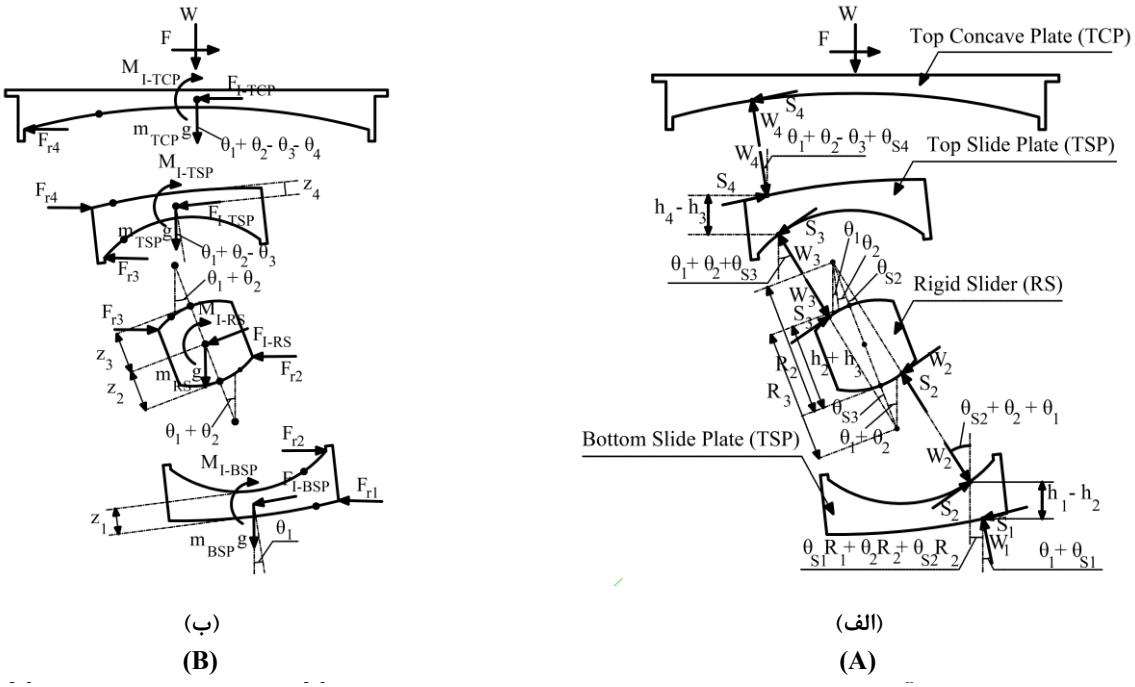
$$\begin{aligned} W_1 &= W + m_{TCP}g + m_{TSP}g + m_{RS}g + m_{BSP}g \\ W_2 &= W + m_{TCP}g + m_{TSP}g + m_{RS}g \\ W_3 &= W + m_{TCP}g + m_{TSP}g \\ W_4 &= W + m_{TCP}g \end{aligned} \qquad (۲)$$

3 D.M. Fenz, M.C. Constantinou
4 T.C. Becker, S.A. Mahin
5 N.D. Dao et al.
6 A.A. Sarlis, M.C. Constantinou



شکل ۳. مؤلفه‌های جداساز لغزشی سه‌گانه [۱]

Fig. 3. TFP Components and Parameters [1]



شکل ۴. نمودار جسم آزاد قطعه‌های جداساز لغزشی سه‌گانه الف) نیروهای مابین سطوح [۱] ب) اثرهای اینرسی و برخورد [۱]

Fig. 4. Free Body Diagram of TFP Components A) Sliding Forces [1] B) Inertia and Contact Forces [1]

که در آن m جرم قطعه‌ها، W وزن روسازه روی جداساز و W_i ها مقادیر نیروهای عمود بر سطح در سطوح تماس قطعه‌ها هستند.

معادله‌های تعادل افقی و دورانی قطعه‌ها در دسته معادله شماره (۳) ارائه شده است. این معادله‌ها شامل معادله‌های دیفرانسیل معمولی و معادله‌های جبری می‌شوند. معادله‌های a ، b ، c و g به ترتیب معادله‌های تعادل افقی قطعه‌های BSP ، TSP ، TCP و RS هستند و معادله‌های d ، e و f به ترتیب معادله‌های تعادل دورانی قطعه‌های RS ، BSP و TSP هستند. معادله تعادل دورانی قطعه مقعر بالایی (TCP) با معادله جبری h جایگزین

شده است.

$$
\begin{aligned}
&(a): W_2(\theta_1+\theta_2+\theta_{s2})+\\
&\quad S_2-S_1+F_{r2}-F_{r1}-W_1(\theta_1+\theta_{s1})-\\
&\quad m_{BSP}(R_1-z_1)\ddot{\theta}_1-m_{BSP}\ddot{u}_g=0\\
&(b): W_3(\theta_1+\theta_2+\theta_{s3})+S_3-S_4+\\
&\quad F_{r3}-F_{r4}-W_4(\theta_1+\theta_2-\theta_3+\theta_{s4})+\\
&\quad m_{TSP}(R_{eff\,1}-h_4+z_4)\ddot{\theta}_1+\\
&\quad m_{TSP}(R_{eff\,2}-h_4+z_4)\ddot{\theta}_2+\\
&\quad m_{TSP}(R_{eff\,3}+h_4-z_4)\ddot{\theta}_3+m_{TSP}\ddot{u}_g=0\\
&(c): F-W_4(\theta_1+\theta_2-\theta_3+\theta_{s4})-S_4-\\
&\quad F_{r4}-m_{TCP}\ddot{u}-m_{TCP}\ddot{u}_g=0\\
&(d): W_2(\theta_{s2}R_2+\theta_{s3}R_3)-W_2\theta_{s2}(h_2+h_3)-\\
&\quad S_2(h_2+h_3)-F_{r2}(h_2+h_3)-\\
&\quad (I_{RS}+m_{RS}(R_{eff\,1}+h_2-z_2)z_3)\ddot{\theta}_1-\\
&\quad (I_{RS}+m_{RS}(R_2-z_2)z_3)\ddot{\theta}_2-m_{RS}z_3\ddot{u}_g-\\
&\quad m_{RS}g(\theta_1 z_3+\theta_2 z_3+\theta_{s3}R_3)=0\\
&(e): W_2(\theta_{s1}R_1-\theta_2R_2-\theta_{s2}R_2)-\\
&\quad (h_1-h_2)[W_2(\theta_{s2}+\theta_2)+S_2+F_{r2}]-\\
&\quad I_{BSP}\ddot{\theta}_1+(m_{BSP}(R_1-z_1)\ddot{\theta}_1-m_{BSP}\ddot{u}_g)z_1+\\
&\quad m_{BSP}g(\theta_{s1}R_1+\theta_1 z_1)=0\\
&(f): W_3(\theta_{s4}R_4-\theta_{s3}R_3-\theta_3R_3)-\\
&\quad (h_4-h_3)[W_3(\theta_{s3}+\theta_3)+S_3+\\
&\quad F_{r3}]-m_{TSP}g(\theta_{s4}R_4+(\theta_1+\theta_2-\theta_3)z_4)-\\
&\quad I_{TSP}(\ddot{\theta}_1+\ddot{\theta}_2-\ddot{\theta}_3)-m_{TSP}z_4[(R_{eff\,1}-h_4+z_4)\ddot{\theta}_1+\\
&\quad (R_{eff\,2}-h_4+z_4)\ddot{\theta}_2+(R_{eff\,3}+h_4-z_4)\ddot{\theta}_3+\ddot{u}_g]=0\\
&(g): W_2(\theta_1+\theta_2+\theta_{s2})+S_2+F_{r2}-\\
&\quad W_3(\theta_1+\theta_2+\theta_{s3})-S_3-F_{r3}+\\
&\quad m_{RS}(R_{eff\,1}+h_2-z_2)\ddot{\theta}_1+\\
&\quad m_{RS}(R_2-z_2)\ddot{\theta}_2+m_{RS}\ddot{u}_g=0\\
&(h): \theta_1+\theta_2-\theta_3-\theta_4=0\\
&(j): u=\theta_1R_1-(h_1+h_4)\theta_1+\\
&\quad (R_2-h_2-h_4)\theta_2+(R_3-h_4-h_3)\theta_3+\theta_4R_4
\end{aligned}
\qquad (۳)
$$

که در آن θ_i زاویه دوران قطعه‌ها، θ_{si} زاویه انحراف نیروهای تماسی با مراکز سطوح تماس، S_i نیروهای اصطکاکی، F_{ri} نیروهای برخورد، R_i شعاع انحنای سطوح، z_i فاصله سطوح تا مراکز جرم قطعه‌ها مطابق شکل ۴ هستند. u جابجایی افقی TCP و R_{eff} ها مطابق رابطه (۴) هستند.

$$R_{eff,i}=R_i-h_i \quad , \quad i=1,2,3,4 \qquad (۴)$$

از معادله‌های جبری h و j برای جایگزینی متغیرهای θ_3 و θ_4 در سیستم معادله‌ها استفاده می‌شود و سیستم به دسته معادله‌های صرفاً دیفرانسیلی تبدیل می‌شود. معادله‌های دیفرانسیل حاصل شده می‌توانند به فرم ماتریسی معادله (۵) نوشته شوند:

$$M\ddot{\theta}_t+K\theta_t+S+F_g+F_e=0 \qquad (۵)$$

در معادله شماره (۵)، θ_t برداری شامل زوایای لغزش و زوایای انحراف نیرو و جابجایی u است. S بردار نیروهای اصطکاکی، F_g بردار نیروهای برخورد به لبه قطعه‌ها و F_e بردار مؤلفه‌های تحریک ورودی هستند. بردار θ_t و زیر بردارهای آن در روابط (۶) ارائه شده است. با ارائه زیر بردارها، معادله (۵) به فرم معادله (۷) حاصل می‌شود.

$$
\begin{aligned}
&\theta_t=[\theta_1 \quad \theta_2 \quad u \quad \theta_{s1} \quad \theta_{s2} \quad \theta_{s3} \quad \theta_{s4}]=\\
&\quad [\theta \quad \theta_s]\\
&\theta=[\theta_1 \quad \theta_2 \quad u];\\
&\theta_s=[\theta_{s1} \quad \theta_{s2} \quad \theta_{s3} \quad \theta_{s4}]
\end{aligned}
\qquad (۶)
$$

$$
\begin{bmatrix} M_{aa} & M_{ab} \\ M_{ba} & M_{bb} \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{\theta}_s \end{Bmatrix}+\begin{bmatrix} K_{aa} & K_{ab} \\ K_{ba} & K_{bb} \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \theta \\ \theta_s \end{Bmatrix}+\begin{Bmatrix} S_a \\ S_b \end{Bmatrix}+\begin{Bmatrix} F_{ga} \\ F_{gb} \end{Bmatrix}+\begin{Bmatrix} F_{ea} \\ F_{eb} \end{Bmatrix}=0 \qquad (۷)
$$

با توجه به صفر بودن ماتریس‌های M_{ab} و M_{bb}، متغیرهای θ_s به صورت وابسته به نتایج دیگر متغیرها و از رابطه (۸) محاسبه می‌شوند.

$$\theta_s=K_{bb}^{-1}(-F_{eb}-F_{gb}-S_b-K_{ba}\theta-M_{ba}\ddot{\theta}) \qquad (۸)$$

با جایگذاری رابطه (۸) در معادله (۷)، معادله‌ها به فرم معادله ماتریسی (۹) حاصل می‌شوند. این ماتریس‌ها در روابط (۱۰) تعریف شده‌اند.

$$M\ddot{\theta}+K\theta+S+F_g+F_e=0 \qquad (۹)$$

$$
\begin{aligned}
M &= M_{aa} - K_{ab}K_{bb}^{-1}M_{ba} \\
K &= K_{aa} - K_{ab}K_{bb}^{-1}K_{ba} \\
S &= S_a - K_{ab}K_{bb}^{-1}S_b \\
F_g &= F_{ga} - K_{ab}K_{bb}^{-1}F_{gb} \\
F_e &= F_{ea} - K_{ab}K_{bb}^{-1}F_{eb}
\end{aligned}
\qquad (۱۰)
$$

در روابط بالا، نیروی اصطکاکی هر سطح (S_i) با استفاده از روابط (۱۱) که بر اساس اصلاحی از مدل بوک–ون است، محاسبه می‌شود.

$$
\begin{aligned}
S_i &= \mu_i W_i Z_i \\
\dot{Z}_i &= (R_i / Y)(1 - a_i Z_i^2)\dot{\theta}_i \\
a_i &= \begin{cases} 1 & , \quad \dot{\theta}_i Z_i > 0 \\ 0 & , \quad \dot{\theta}_i Z_i \le 0 \end{cases}
\end{aligned}
\qquad (۱۱)
$$

در روابط (۱۱)، μ_i ضرایب اصطکاک سطوح و Y مقدار جابجایی تسلیم مدل ویسکوپلاستیک برای نیروی اصطکاک است که باید مقداری کم و عموماً برابر ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شود. نیروهای برخورد به لبه‌های قطعه‌های جداساز (F_{ri}) نیز می‌توانند توسط رابطه (۱۲) محاسبه شوند. مقادیر سختی‌ها در رابطه (۱۳) و بر اساس نیروی یک برش ۶۰ درجه از لبه قطعه‌ها ارائه شده است.

$$
F_{ri} = \begin{cases}
0 & , \quad |\theta_i| \le d_i / R_i \\
K_{ri}(\theta_i - d_i / R_i) + c_{ri}\dot{\theta}_i & , \\
\theta_i > d_i / R_i \;\&\; \left|\max[\theta_i(0 \le t \le t_n)]\right| < \dfrac{d_i}{R_i} + \dfrac{F_{ry}}{K_{ri}} & \\
K_{ri}(\theta_i + d_i / R_i) + c_{ri}\dot{\theta}_i & , \\
\theta_i < -d_i / R_i \;\&\; \left|\min[\theta_i(0 \le t \le t_n)]\right| < \dfrac{d_i}{R_i} + \dfrac{F_{ry}}{K_{ri}} & \\
0 & , \quad elsewhere
\end{cases}
\qquad (۱۲)
$$

$$
\begin{aligned}
K_{ri} &= \frac{\pi(t_{ri}^2 + s_i t_{ri})F_{ry}}{6Y_r} \quad , \quad i = 1,4 \\
K_{ri} &= \frac{1}{4}\frac{\pi(b_1^2 + s_i^2)t_{ri}F_{ry}}{6Y_r} \quad , \quad i = 2 \\
K_{ri} &= \frac{1}{4}\frac{\pi(b_4^2 + s_i^2)t_{ri}F_{ry}}{6Y_r} \quad , \quad i = 3
\end{aligned}
\qquad (۱۳)
$$

در روابط فوق d_i ظرفیت جابجایی هر قطعه، t زمان، c_{ri} ضریب میرایی لبه‌ها و عموماً برابر صفر، $F_{ry} = 172Mpa$ مقاومت تسلیم فلز جداساز، $Y_r = 2.5mm$ جابجایی تسلیم لبه‌ها و t_{ri} ضخامت لبه‌ها هستند. مؤلفه s_i نیز مطابق رابطه (۱۴) تعریف می‌شود.

$$
s_i = b_i + 2d_i \qquad (۱۴)
$$

در مرحله نهایی پس از تعریف بردار $Q = \begin{bmatrix} \theta & \dot{\theta} & Z \end{bmatrix}^T$، می‌توان همانند رابطه (۱۵)، معادله‌ها را در فضای حالت و به فرم معادله‌های دیفرانسیل مرتبه اول داشت. این دسته معادله‌های مرتبه اول به سادگی در نرم‌افزار متلب [۱۵] قابل پیاده‌سازی هستند.

$$
\frac{dQ}{dt} = \frac{d}{dt}\begin{Bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ Z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \dot{\theta} \\ -M^{-1}K\theta - M^{-1}S - M^{-1}F \\ \dot{Z} \end{Bmatrix}
\qquad (۱۵)
$$

با پیاده‌سازی مدل فوق در محیط نرم‌افزار متلب و انجام آزمایش جابجایی کنترل بر روی جداساز سه‌گانه با مشخصه‌های جدول ۱، تحت جابجایی ورودی سینوسی با فرکانس ۰/۲ هرتز، صحت‌سنجی مدل با مثال بخش ۴–۵ از مرجع [۱] در شکل ۵ نشان داده شده است.

۳- مدل‌سازی روسازه بر روی جداساز لغزشی سه‌گانه

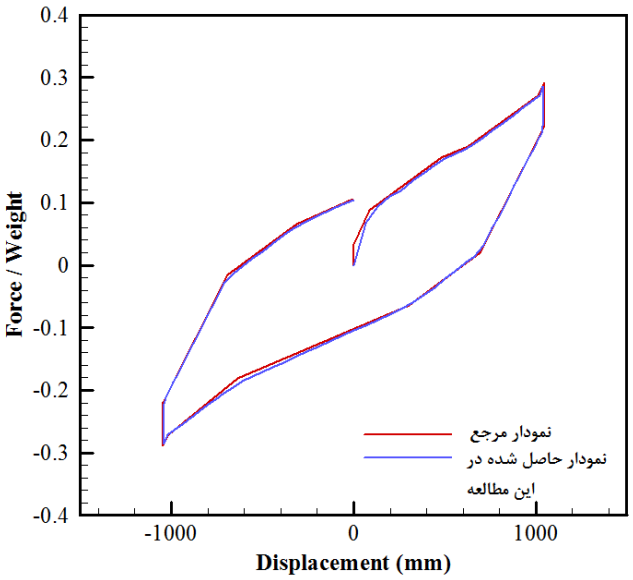
در فصل دوازدهم نشریه شماره ۷۵۱ سازمان مدیریت بحران فدرال آمریکا[1] [۱۶]، ساختمان یک مرکز عملیات اضطراری بر اساس فصل هفدهم استاندارد ASCE7 با جداسازهای لغزشی سه‌گانه و هدف دستیابی به دو نتیجه سطح عملکرد ایمنی جانی در زلزله بزرگ و محدود کردن خسارت‌های

1 FEMA, Federal Emergency Management Agency

جدول ۱. مشخصه‌های جداساز سه‌گانه صحت‌سنجی شده [۱]

Table 1. Validated TFP Characteristics [1]

مشخصه‌های هندسی و اصطکاکی	مقدار مؤلفه‌ها
$R_1 = R_4 (mm)$	۳۹۶۲
$R_2 = R_3 (mm)$	۹۹۱
$h_2 = h_3 (mm)$	۱۱۵
$h_1 = h_4 (mm)$	۱۶۵
$d_1 = d_4 (mm)$	۴۰۶
$d_2 = d_3 (mm)$	۱۵۲
$b_1 = b_4 (mm)$	۷۶۲
$b_2 = b_3 (mm)$	۴۰۶/۴
μ_1	۰/۰۷۵
μ_4	۰/۱۲۵
μ_2	۰/۰۵
μ_3	۰/۰۱



شکل ۵. نمودار صحت‌سنجی جداساز لغزشی سه‌گانه

Fig. 5. Verification Diagram of TFP Model

جدول ۲. مشخصه‌های دینامیکی روسازه مرتبط با یک جداساز [۱۶]

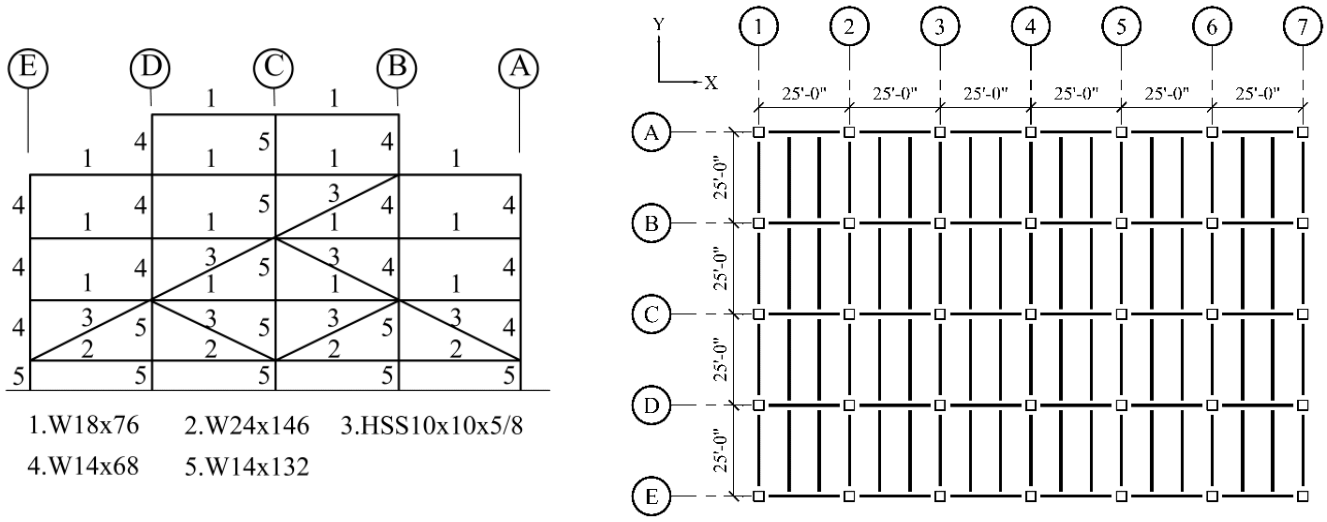
Table 2. Dynamic Properties of Superstructure Associated With a Isolator [16]

طبقه	جرم لرزه‌ای (kg)	سختی (N/m)
۱	۲۳۶۱۰	۷۰۷۰۱۴۶۵
۲	۲۳۳۶۰	۴۳۰۹۶۲۸۵
۳	۲۲۵۷۹	۲۷۵۳۶۴۱۹
۴	۲۴۲۵۱	۲۵۰۴۱۰۳۸

وارده به سازه در سطح زلزله طراحی، ارائه شده است. این سازه در منطقه اوکلند کالیفرنیا با فاصله تقریبی ۶ کیلومتر از گسل های وارد[1] قرار گرفته است که شتاب متناظر با زلزله سطح MCE در آن برابر ۰/۵۲۵ متر بر مجذور ثانیه است. سازه مرکز عملیات اضطراری حاضر، یک ساختمان سه طبقه فولادی با سیستم مهاربندی شده به همراه یک پنت‌هاوس بزرگ در بالای سقف سوم است. ارتفاع طبقه اول برابر ۴/۲۵ متر (۱۴ فوت) و طبقه‌های دوم و سوم و پنت‌هاوس ۳/۶۵ متر (۱۲ فوت) است. پلان طبقه‌ها ۳۰/۵×۴۵/۵ مترمربع (۱۰۰×۱۵۰ فوت مربع) برای طبقه‌های اول تا سوم و ۱۵/۵×۳۰/۵ مترمربع (۵۰×۱۰۰ فوت مربع) برای طبقه پنت‌هاوس است و فاصله ستون‌ها از یکدیگر در هر دو جهت به اندازه ۷/۶ متر (۲۵ فوت) هستند. پلان طبقه‌های ۱ تا ۳ با سقف عرشه فولادی و نمای یکی از قاب‌ها به همراه مقاطع اعضا در شکل ۶ نشان داده شده‌اند. مشخصه‌های دینامیکی جرم و سختی سازه فوق برای مدل‌سازی عددی در جدول ۲ ارائه شده است.

سیستم باربر لرزه‌ای این سازه شامل ۳۵ واحد جداساز لرزه‌ای در زیر ستون‌ها است که تقریباً به اندازه ۰/۹ متر (۳ فوت) پایین‌تر از سطح زمین قرار گرفته‌اند. جداساز سه‌گانه این سازه و نمودار رفتاری آن در شکل ۷ نمایش داده شده‌اند. نمودار آبی رنگ در شکل ۷–ب شامل رفتار جداساز لغزشی مورد

1 Hayward Fault

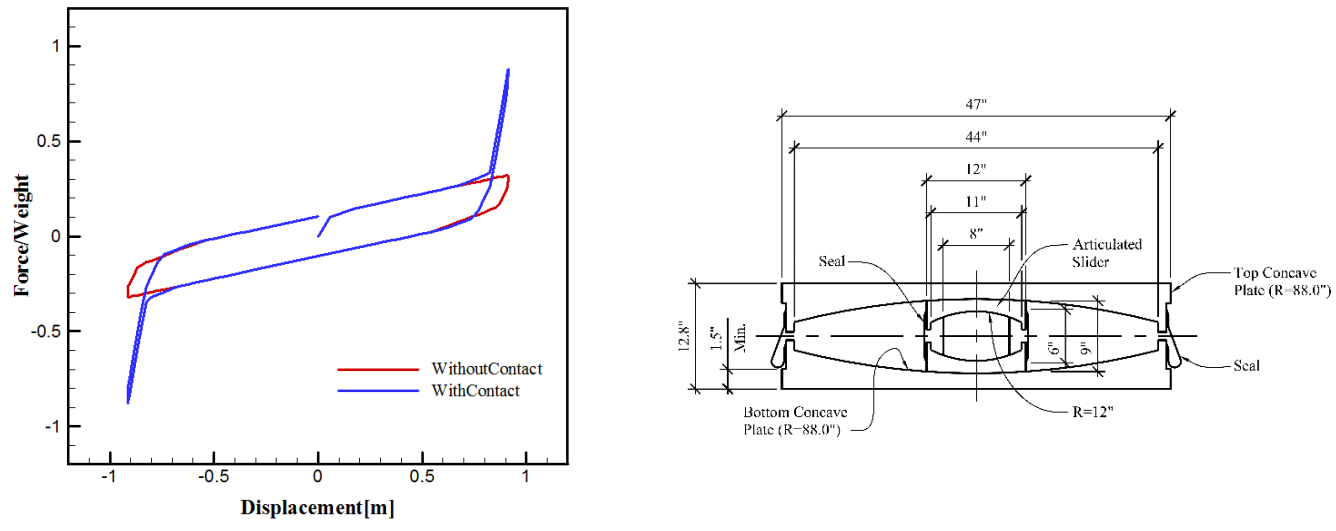


(ب) (الف)

(B) (A)

شکل ۶. مشخصات سازه مورد مطالعه الف) پلان طبقه‌های اول تا سوم [۱۶] ب) نمای محورهای ۲ و ۶ [۱۶]

Fig. 6. Characteristics of The Studied Structure A) Plan of The First Three Floors [16] B) Section of Axes 2 and 6 [16]



(ب) (الف)

(B) (A)

شکل ۷. جداساز لغزشی مورد استفاده در تحلیل‌ها الف) هندسه جداساز [۱۶] ب) نمودار رفتاری (نمودار آبی: مدل حدی و نمودار قرمز: مدل غیرحدی)

Fig. 7. The Analyzed TFP A) Geometry [16] B) Behavioral Diagram (Blue Diagram: Ultimate Model, Red Diagram: Non-Ultimate Model)

جدول ۳. مشخصات شتاب‌نگاشت‌های انتخابی مورد استفاده در این مطالعه

Table 3. Characteristics of Selected Accelerometers in This Study

نام زلزله	ایستگاه ثبت	شماره اختصاصی شتاب‌نگاشت (RSN)	تاریخ
ایمپریال ولی	السنترو	۱۷۴	۱۰/۱۵/۱۹۷۹
لندرز	کول واتر	۸۴۸	۶/۲۸/۱۹۹۲
نورث‌ریدج	بورلی هیلز	۹۵۳	۱/۱۷/۱۹۹۴
منجیل ایران	ابر	۱۶۳۳	۶/۲۰/۱۹۹۰
فیوری ایتالیا	تولمزو	۱۲۵	۵/۶/۱۹۷۶
کوبه ژاپن	نیشی‌آکاشی	۱۱۱۱	۱/۱۶/۱۹۹۵
سن‌فرناندو	هالی‌وود استور	۶۸	۲/۹/۱۹۷۱

استفاده در تحلیل‌ها است که در آن رفتار نهایی برخورد در مدل جداساز وارد شده (مدل حدی) و در نمودار با شاخک‌هایی قابل تشخیص است و نمودار قرمز رنگ رفتار همین جداساز را بدون در نظر گرفتن اثر حدی برخورد در مدل جداساز (مدل غیرحدی) نشان می‌دهد و همان‌طور که دیده می‌شود تفاوت این دو مدل رفتاری تنها در حدود بالای زلزله که ظرفیت جداساز به اتمام می‌رسد و برخورد رخ می‌دهد، قرار دارد. نمودار آبی رنگ نشان می‌دهد به دلیل تعریف سختی غیرصلب برای لبه‌های جداساز که در روابط ۱۳ به آن اشاره شد، بخش بالا زدگی نمودار دارای شیبی است که اشاره به برخورد ارتجاعی دارد و در نتیجه پس از برخورد همچنان در لغزنده جابجایی ناچیزی مشاهده می‌شود. مطابق نمودار رفتاری، بالا زدگی نمودار در حدود جابجایی ۰/۸۲۵ متر رخ می‌دهد که برابر ظرفیت جابجایی جداساز است. با مدل‌سازی روسازه در هر دو این مدل‌ها که تنها در یکی از آن‌ها رفتار حدی برخورد دیده شده است، به مقایسه تفاوت تأثیر این دو مدل در پاسخ لرزه‌ای روسازه پرداخته شده است.

۴- رکوردهای مورد استفاده و چگونگی مقیاس آن‌ها در این مطالعه

انتخاب و مقیاس کردن شتاب‌نگاشت‌ها یکی از مهم‌ترین چالش‌ها برای انجام تحلیل‌های تاریخچه زمانی محسوب می‌شوند. در این مطالعه شتاب‌نگاشت‌ها از زلزله‌های معرفی شده در نشریه FEMA P-695 [۱۷] انتخاب و مقیاس شده‌اند. شتاب‌نگاشت‌های انتخابی در جدول ۳ آورده شده‌اند.

بیشینه شتاب هر یک از شتاب‌نگاشت‌های ورودی به سازه به صورت گام‌های متوالی در بازه 0.8MCE تا 1.7MCE مقیاس شده و برای تحلیل دینامیکی مدل معرفی شده، استفاده شده است. در این روند اولین لحظه‌ای که بین لغزنده و لبه جداساز برخورد صورت می‌گیرد "لحظه برخورد" نامیده شده و مقیاس شتاب مربوط به این لحظه با عنوان مشابه ثبت شده است. با توجه به تعاریف و نحوه طراحی جداساز لرزه‌ای سه‌گانه، این بازه از مقیاس شتاب، محدوده پیش از رسیدن به رفتار نهایی جداساز و برخورد لغزنده به لبه تا مرحله پس از برخورد را شامل می‌شود. بنابراین پاسخ سازه در محدوده مقیاس اولیه تا لحظه برخورد، به عنوان رفتار پیش از برخورد حدی و پاسخ سازه تحت مقیاس‌های بالاتر، به عنوان رفتار پس از رفتار حدی جداساز اطلاق شده است.

۵- نتایج و بحث

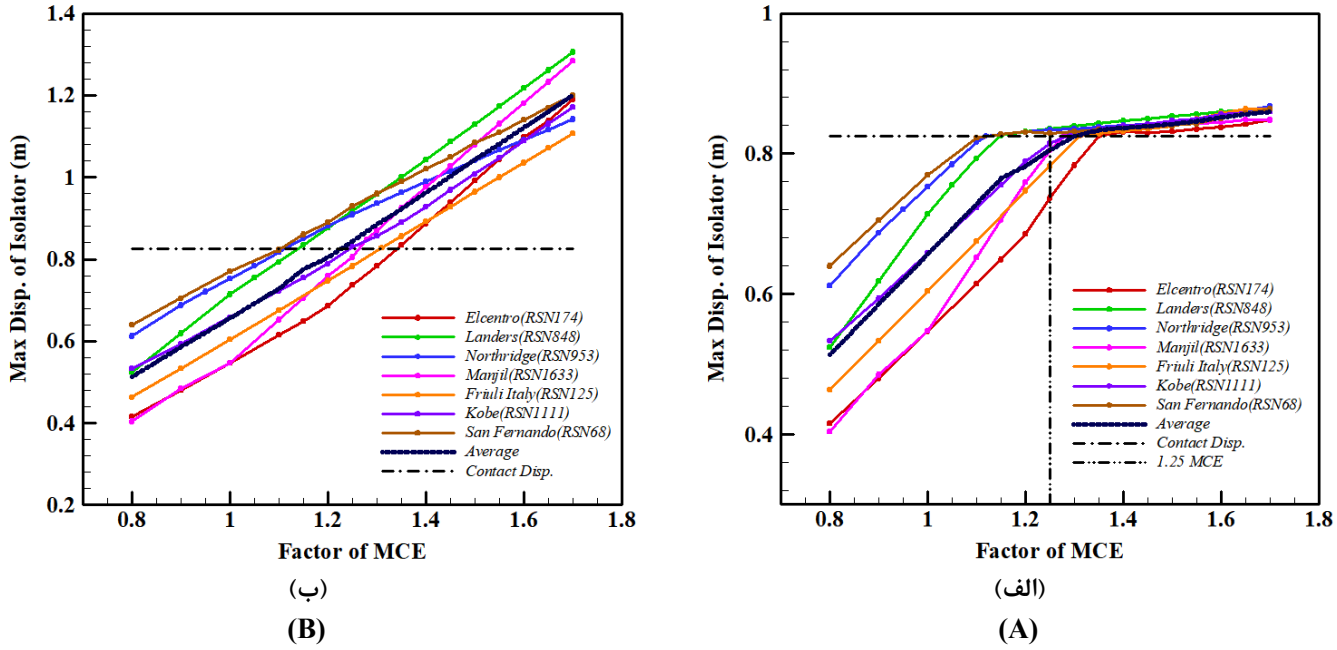
در انتها با انجام تحلیل دینامیکی لرزه‌ای تحت مجموعه‌ای از شتاب‌نگاشت‌های اشاره شده و در شرایط مختلف، نتایج پاسخ‌ها بررسی و مقایسه شده است. از این رو در ابتدا سه حالت مختلف مورد بررسی، معرفی شده‌اند:

حالت ۱ - رفتار سیستم پیش از لحظه برخورد

حالت ۲ – رفتار سیستم پس از لحظه برخورد، زمانی که جداساز به شکل حدی مدل شده است

حالت ۳ – رفتار سیستم پس از لحظه برخورد، زمانی که جداساز به شکل غیرحدی مدل شده است

در ادامه نتایج به دست آمده از مقادیر بیشینه پارامترهای مختلف پاسخ سیستم در حالت‌های مختلف مورد بحث قرار گرفته‌اند.



شکل ۸. نمودار تغییرات جابجایی بیشینه جداساز در برابر ضرایب نسبی مقیاس بیشینه شتاب رکوردهای مختلف (به صورت ضرایبی نسبت به شتاب MCE) برای دو مدل مختلف از رفتار جداساز الف) مدل حدی ب) مدل غیرحدی

Fig. 8. Maximum Isolator Displacement - Maximum Ground Acceleration (As a Coefficient Relative to MCE Acceleration) Diagram for Two Different Models of Isolator Behavior A) Ultimate Model B) Non-Ultimate Model

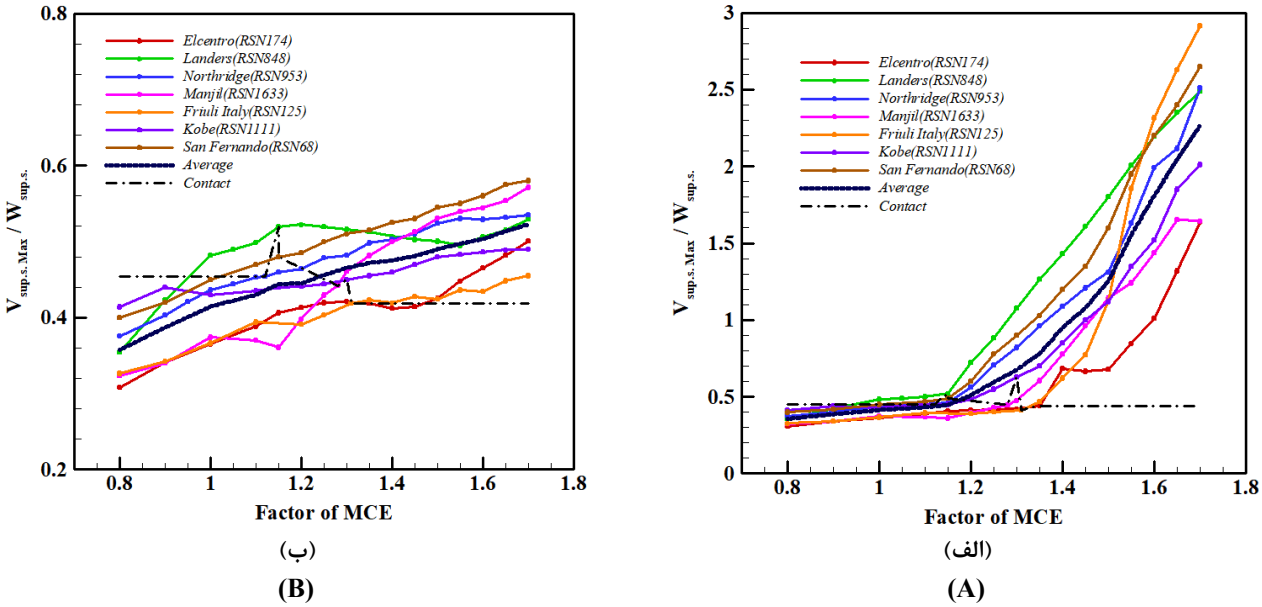
۵- ۱- سطح شتاب لحظه برخورد و رفتار جابجایی جداساز

با ثبت نتایج حداکثر جابجایی رخ داده در جداساز تحت تحلیل‌های دینامیکی برای زلزله‌های السنترو، لندرز، نورث‌ریدج، منجیل، فریولی، کوبه و سن‌فرناندو، که شتاب بیشینه آن‌ها در بازه اشاره شده در بخش پیشین مقیاس شده است، شکل ۸ مقادیر حاصله را برای دو مدل حدی و غیرحدی نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده از رکوردهای مختلف در این مثال، شتاب متوسط لحظه برخورد را برابر 1.25MCE که معادل 0.65g است، نشان داده است.

شکل ۸-الف که مربوط به مدل حدی است، به وضوح توقف تقریبی جابجایی در جداساز پس از وارد شدن به حالت ۲ را نشان داده است. میزان جابجایی ثبت شده پس از برخورد وابسته به سختی‌های غیرصلب معرفی شده در روابط ۱۳ است. با ثبت همین نتایج در مدل غیرحدی، شکل ۹-ب تفاوت زیاد جابجایی ثبت شده پس از برخورد در جداساز مدل غیرحدی را نشان داده است.

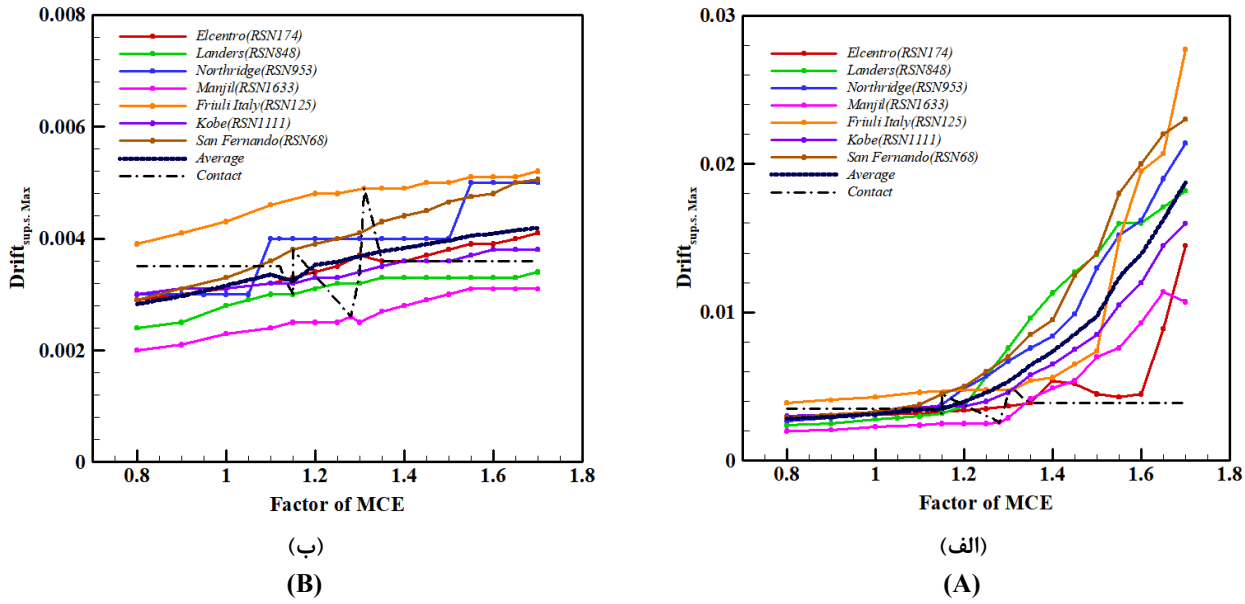
۵- ۲- برش‌پایه انتقال یافته به روسازه

شکل ۹ تغییرات حداکثر برش پایه انتقال یافته به روسازه را برای دو مدل حدی و غیرحدی در برابر ضرایب نسبی مقادیر مختلف شتاب حداکثر رکوردهای انتخابی نسبت به شتاب سطح MCE نشان می‌دهد. مطابق نمودار ۹-الف، در مرحله پیش از برخورد (حالت ۱) میزان رشد برش پایه روندی نسبتاً خطی و با شیب کم را نشان داده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، متوسط مقدار برش پایه در لحظه برخورد حدود ۰/۴۸ وزن روسازه است. با وارد شدن به حالت ۲ شیب منحنی‌ها ناگهان تغییر یافته و رشد برش پایه روندی نمایی یافته است. این امر نشان می‌دهد که در این حالت رفتار سیستم به سازه پایه ثابت نزدیک شده است. این در حالی است که در مدل غیرحدی (حالت ۳) در شکل ۹-ب، روند افزایش برش پایه مشابه حالت ۱ دیده می‌شود و تغییر محسوسی را ندارد. این امر نشان دهنده این است که در نظر نگرفتن حالت حدی می‌تواند به شکل جدی غیرمحافظه کارانه باشد.



شکل ۹. حداکثر برش پایه انتقال یافته به روسازه الف) مدل حدی ب) مدل غیرحدی

Fig. 9. Maximum Base Shear Transferred to Superstructure A) Ultimate Model B) Non-Ultimate Model

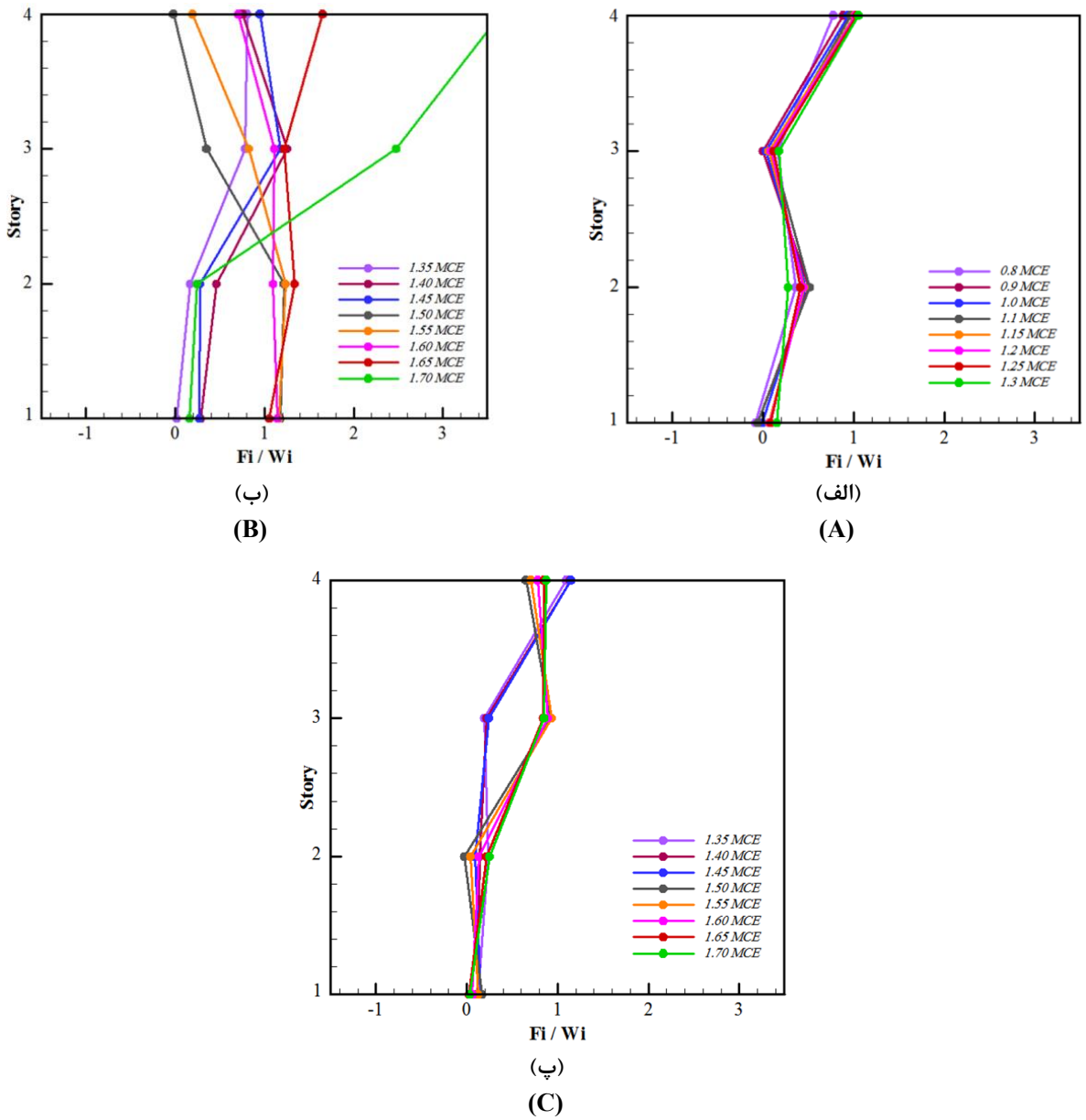


شکل ۱۰. حداکثر جابجایی نسبی میان طبقه‌ای در روسازه الف) مدل حدی ب) مدل غیرحدی

Fig. 10. Maximum Superstructure Drift A) Ultimate Model B) Non-Ultimate Model

۵- ۳- حداکثر جابجایی نسبی میان‌طبقه‌ای

شکل ۱۰ تغییرات حداکثر جابجایی نسبی میان‌طبقه‌ای (دریفت) در روسازه را برای دو مدل حدی و غیرحدی در برابر ضرایب نسبی مختلف شتاب حداکثر رکوردهای انتخابی نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۰-الف قابل مشاهده است، در حالت ۱ و پیش از زمان برخورد، رشد حداکثر جابجایی نسبی میان‌طبقه‌ای رابطه‌ای خطی با میزان افزایش ضریب شتاب را نشان داده است. متوسط نتایج مجموعه تحلیل‌ها نشان داده است که حداکثر جابجایی نسبی الاستیک میان‌طبقه‌ای در لحظه برخورد حدود ۰/۰۰۳۸ است.



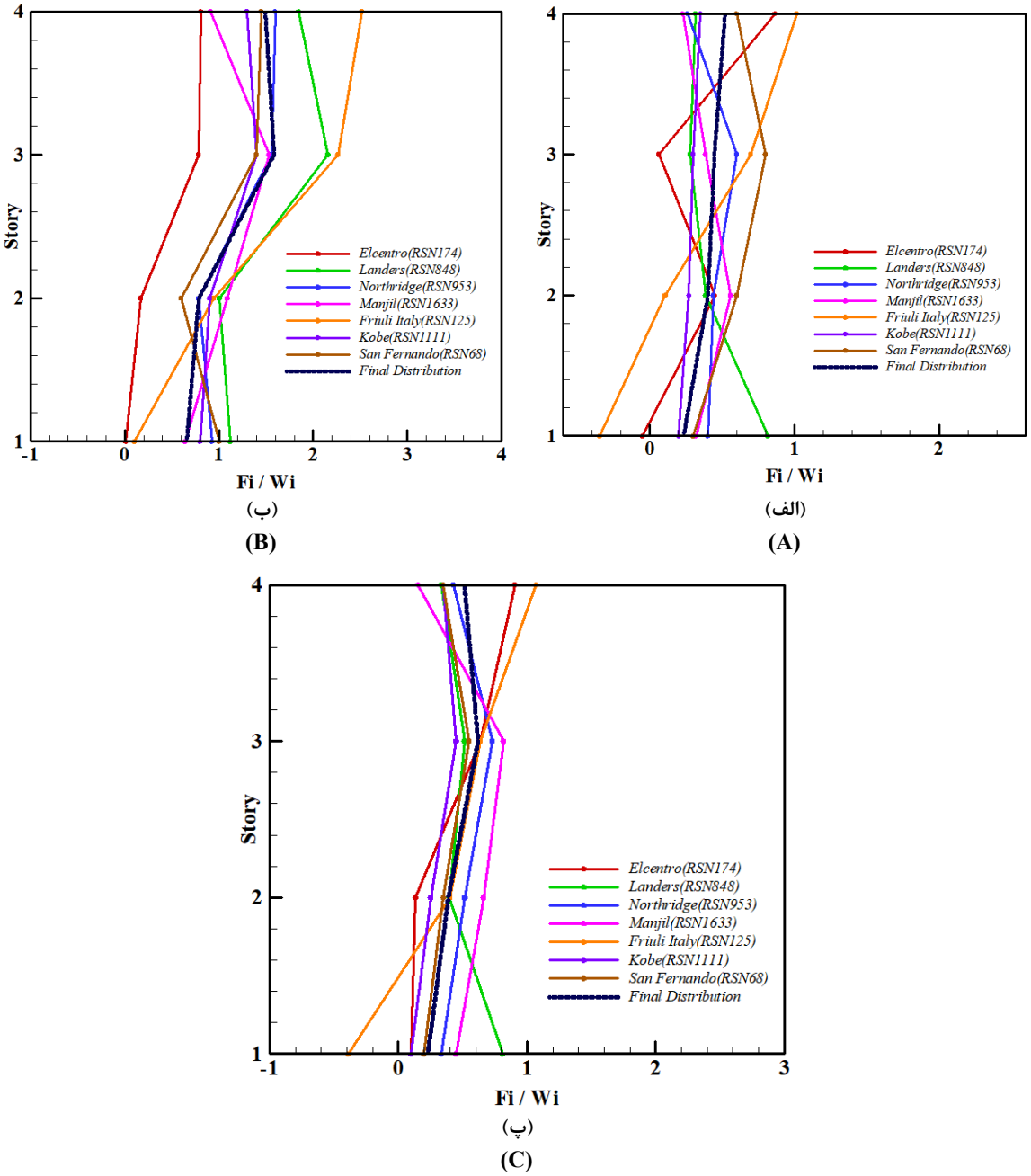
شکل ۱۱. توزیع‌های ارتفاعی نیروی جانبی در حدود مختلف شتاب حداکثر برای زلزله السنترو الف) حالت ۱ ب) حالت ۲ پ) حالت ۳

Fig. 11. Vertical Distributions of Earthquake Load at Different Steps of Maximum Ground Acceleration for El Centro Record A) Stage 1 B) Stage 2 C) Stage 3

در حالت ۲ نرخ رشد حداکثر جابجایی نسبی میان‌طبقه‌ای روسازه با افزایش قابل ملاحظه‌ای روبرو شده است. در این میان می‌توان رفتار نسبتاً متفاوتی را در خصوص نمودار مربوط به رکورد زلزله السنترو مشاهده کرد. شکل ۱۰-ب نتایج مدل غیرحدی را با یک روند یکنواخت در مرحله پیش و پس از برخورد نشان داده است. در انتهای بازه ضرایب شتاب، متوسط حداکثر جابجایی نسبی در مدل حدی تقریباً ۴/۵ برابر مدل غیرحدی حاصل شده است.

۵- ۴- توزیع ارتفاعی نیروی جانبی وارد به طبقه‌های روسازه

در اینجا به منظور بررسی اثر رفتار حدی جداساز بر توزیع ارتفاعی حداکثر نیروی جانبی وارد به روسازه، مقدار آن‌ها در ۳ مرحله تعیین گردیده است. در گام اول توزیع‌های نیروی جانبی حاصل شده از تحلیل در حدود مختلف شتاب حداکثر $(0.8MCE - 1.7MCE)$، برای ۷ زلزله معرفی شده، ثبت شده است. شکل ۱۱ توزیع‌های ارتفاعی نیروی جانبی در حدود مختلف شتاب حداکثر را برای زلزله السنترو در سه حالت معرفی شده نشان می‌دهد.

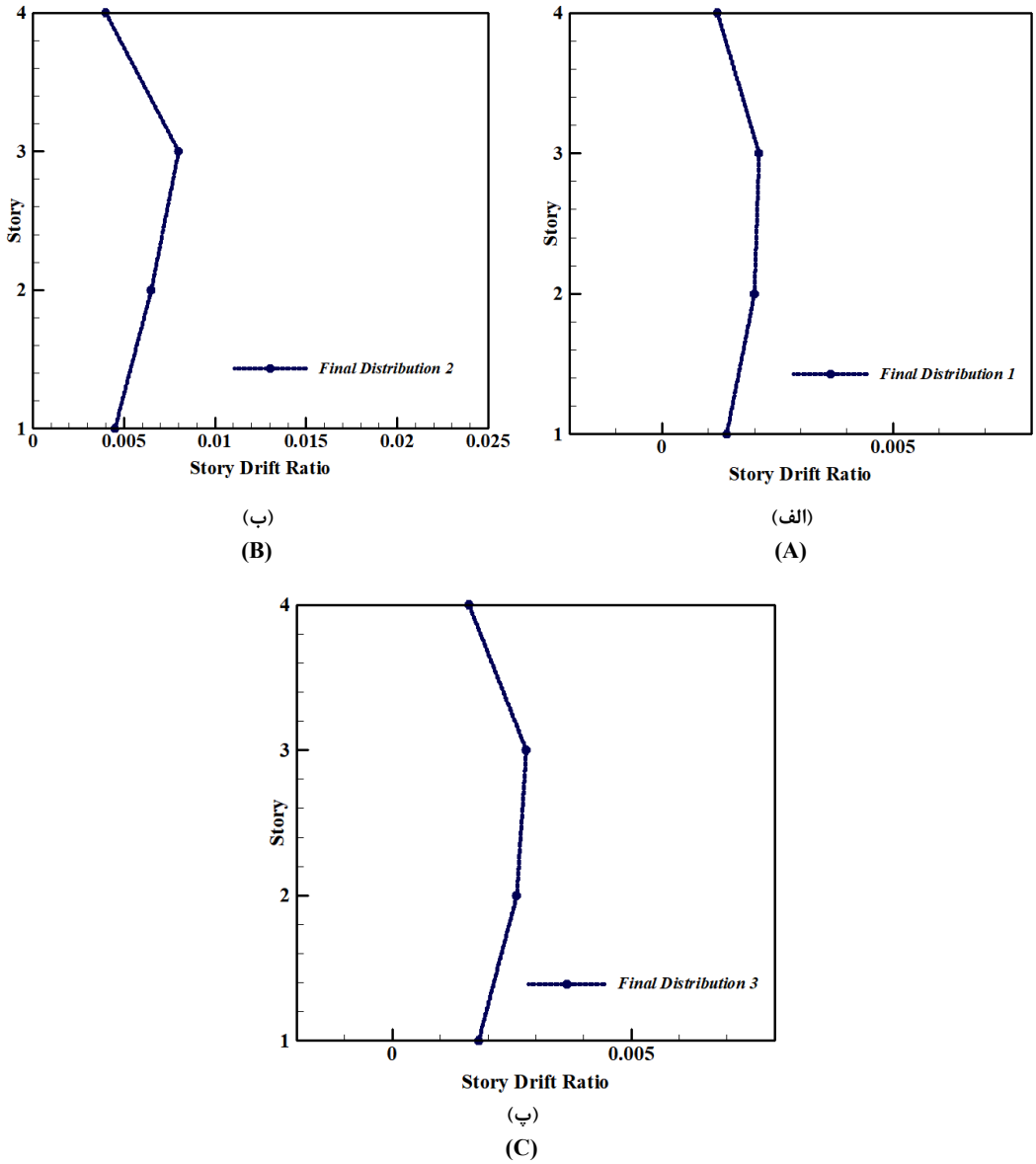


شکل ۱۲. توزیع ارتفاعی نیروی جانبی وارد به طبقه‌های روسازه الف) حالت ۱ ب) حالت ۲ پ) حالت ۳

Fig. 12. Vertical Distributions of Earthquake Load for Floors A) Stage 1 B) Stage 2 C) Stage 3

در گام دوم برای توزیع‌های ارتفاعی هر زلزله در هر یک از حالت‌های سه‌گانه نماینده‌ای تعیین شده است. این نماینده عموماً میانگین توزیع‌های ارتفاعی هر زلزله در هر یک از حالت‌ها است که در شکل ۱۲ با خطوط نازک مشخص شده‌اند. سپس در گام سوم با میانگین‌گیری از نماینده‌های تمامی زلزله‌ها در هر یک از حالت‌های سه‌گانه، نتیجه توزیع ارتفاعی نیروی جانبی وارد به طبقه‌های روسازه مشخص شده که در شکل ۱۲ با خطوط پر رنگ نمایش داده شده است.

توزیع ارتفاعی نیرو در شکل ۱۲-الف برای حالت ۱ نشان از توزیع یکنواخت نیرو در ارتفاع و متناسب با رابطه شماره ۹-۱۷.۵ از آیین‌نامه ASCE7-10 مشاهده شده است. در نسخه جدیدتر این آیین‌نامه (ASCE7-16)، توزیع نیروی جانبی از فرم خطی به شکل سهمی شکل مطابق رابطه ۹-۱۷.۵ تا ۱۱-۱۷.۵ تغییر پیدا کرده که متناسب با



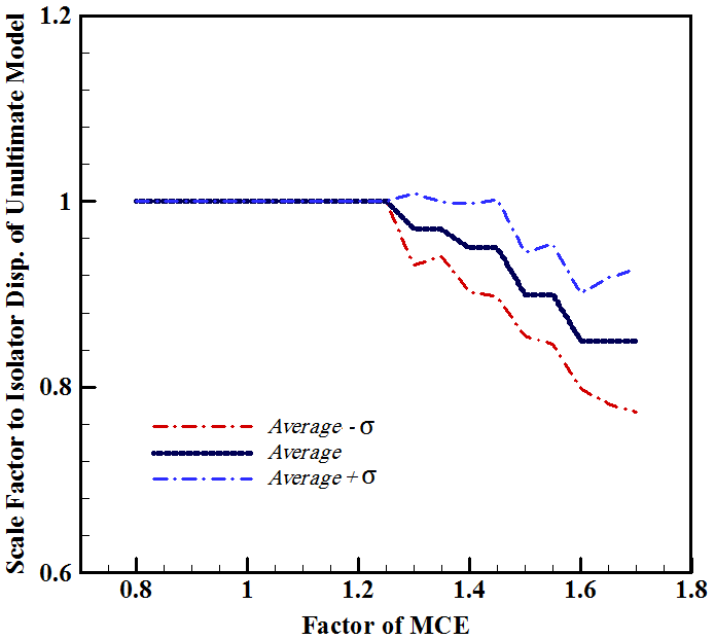
شکل ۱۳. توزیع ارتفاعی جابجایی نسبی میان طبقه‌ای در روسازه الف) حالت ۱ ب) حالت ۲ پ) حالت ۳

Fig. 13. Vertical Distributions of Superstructure Drift A) Stage 1 B) Stage 2 C) Stage 3

میزان میرایی و زمان تناوب تحلیلی روسازه است. توزیع ارتفاعی نیرو در شکل ۱۲-ب برای حالت ۲ یک توزیع منحنی شکل را نشان داده است که تطابق بیشتری با روابط ASCE7-16 دارد و از توزیع خطی ارائه شده در ASCE7-10 منحرف شده است. توزیع ارتفاعی نیرو در شکل ۱۲-پ برای حالت ۳ یک توزیع یکنواخت و مطابق با ASCE7-10 را نشان داده است که نشان از عدم تغییر توزیع نیرو در مرحله پس از برخورد در مدل غیرحدی دارد که با توجه به گیرداری تقریبی سازه در این حالت، ارائه‌ای غیر واقع‌گرایانه است. در مجموع با در نظر گرفتن توزیع نیرو در حالت‌های سه‌گانه دریافت شده است که برای سازه‌هایی همانند سازه حاضر که سخت هستند، در صورتی که هدف تحلیل‌ها به صورت پیش‌بینی شده، قبل از برخورد باشد، توزیع خطی ASCE7-10 رفتار مناسبی را پیش‌بینی و کفایت می‌کند. اما در صورتی که تحلیل سازه برای حدود بالای زلزله انجام می‌شود و ورود جداساز به حالت حدی برخورد قابل پیش‌بینی است، استفاده از توزیع منحنی شکل ASCE7-16 مناسب‌تر است.

۵- توزیع ارتفاعی جابجایی نسبی میان‌طبقه‌ای

نتایج توزیع ارتفاعی جابجایی نسبی میان‌طبقه‌ای روسازه در شکل ۱۳، با به کارگیری روش استفاده شده در بخش قبل حاصل شده است. با صرف‌نظر



شکل ۱۴. ضرایب پیشنهادی تبدیل نتایج مدل غیرحدی به حدی برای جابجایی درون جداساز

Fig. 14. The Proposed Conversion Coefficients for Non-Ultimate Model Isolator Displacement

از طبقه چهارم که یک پنت‌هاوس با جرم و سختی متفاوت از سایر طبقه‌ها است، در هر سه حالت توزیع ارتفاعی جابجایی نسبی میان‌طبقه‌ای به صورت خطی قابل مشاهده است. توزیع خطی جابجایی نسبی نشان از تغییر شکل منحنی سازه در مود خمشی دارد و با توجه به اینکه سازه حاضر یک سازه مهاربندی شده است، تغییر شکل منحنی حاصل شده در همه حالت‌ها، مطابق با مود اصلی سازه مهاربندی شده است و صحتی بر نتایج تحلیل‌ها نیز است.

۵- ۶- ضرایب تبدیل پیشنهادی برای تحلیل غیرحدی

تفاوت نتایج حاصل از تحلیل سازه جداسازی شده با مدل حدی و غیرحدی برای مؤلفه‌های مختلف پاسخ روسازه در بخش‌های ۵-۱ تا ۵-۵ نشان داده شده است. با هدف تبدیل نتایج به دست آمده از مدل غیرحدی جداساز به نتایج مدل حدی، با متوسط‌گیری از نمودارهای حاصل شده برای ۷ زلزله، ضریب نسبی نتایج در قالب نمودارهای شکل ۱۴ تا ۱۶ پیشنهاد شده است. مقادیر پیشنهادی این نمودارها با حداکثر انحراف معیار ۱۰ درصد برای جابجایی درون جداساز و ۲۰ درصد برای برش پایه و جابجایی نسبی میان‌طبقه‌ای در این اشکال قابل مشاهده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار ضرایب برای پاسخ‌های روسازه در سطوح بالاتر شتاب بیشتر می‌گردد و برای جابجایی جداساز روندی کاهشی دارد.

۶- نتیجه‌گیری

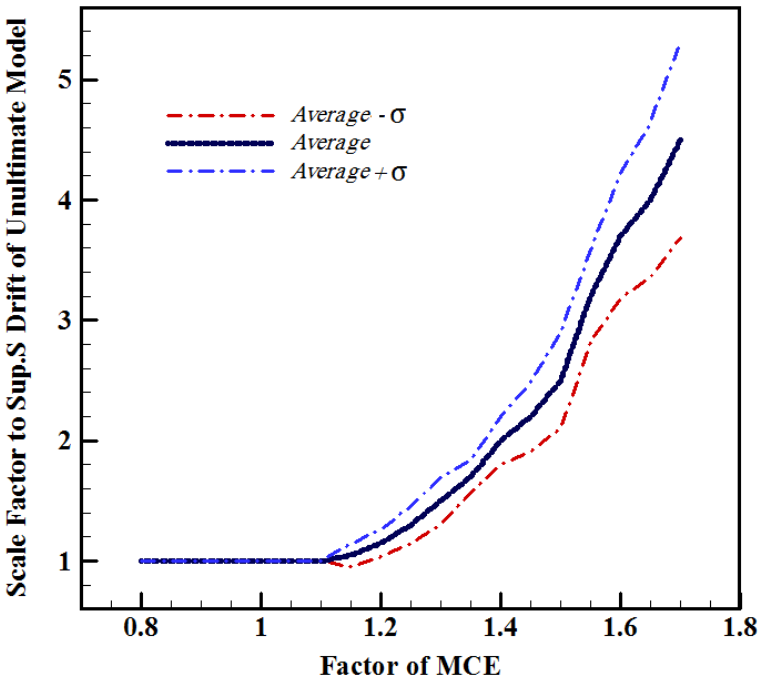
در این مطالعه با مدل‌سازی عددی رفتار حدی سیستم جداساز لغزشی سه‌گانه اقدام به بررسی تأثیر برخورد لغزنده به دیواره در این جداساز بر رفتار لرزه‌ای روسازه شده است. در این ارتباط پاسخ یک سازه مهاربندی جداسازی شده با مدل حدی با پاسخ مدل رایج جداساز مقایسه گردیده است. از مطالعه حاضر نتایج زیر حاصل شده است:

۱) متوسط شتاب زمین به دست آمده از رکوردهای مختلف که در آن اولین برخورد لغزنده با دیواره صفحه مقعر لغزش رخ داده است، حدود ۱/۲۵ برابر سطح شتاب زلزله MCE مشاهده شده که نشان دهنده نیاز شتاب بالا برای وقوع چنین رخدادی است.

۲) میزان جابجایی ثبت شده در جداساز و رفتار صحیح مدل پس از برخورد وابستگی مستقیمی با برآورد دقیق سختی لبه‌ها داشته است. استفاده از مدل دو خطی برای مدل‌سازی عددی لبه‌های جداساز به منظور مدل‌سازی تسلیم و رفتار غیرخطی آن‌ها نتایج را به واقعیت نزدیک‌تر می‌کند.

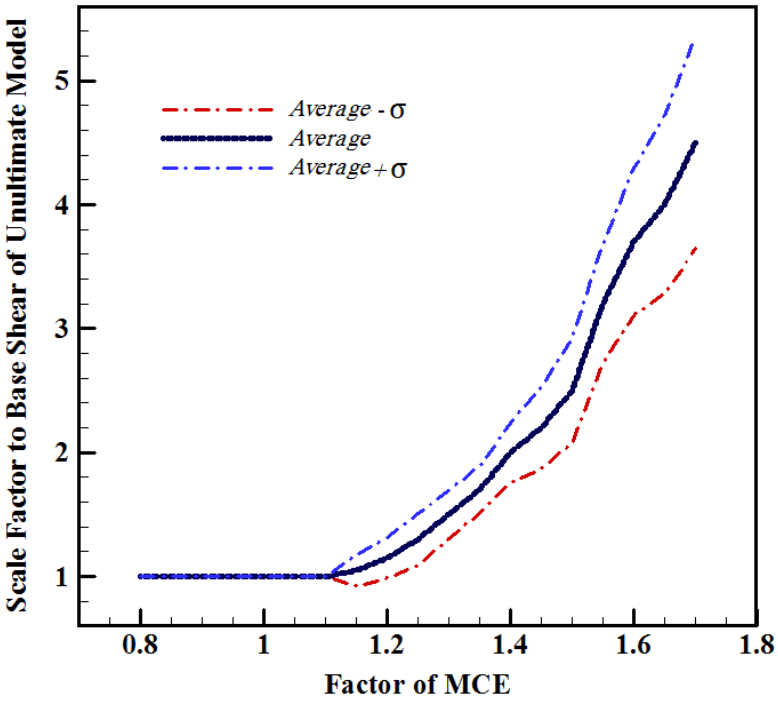
۳) متوسط برش پایه الاستیک روسازه در لحظه برخورد برابر ۰/۴۸ وزن روسازه ثبت شده است. نمودار تغییرات برش پایه نشان از افزایش شدید آن در تراز شتاب‌های پس از زمان برخورد در روسازه داشته است.

۴) متوسط بیشینه جابجایی نسبی میان‌طبقه‌ای الاستیک روسازه در



شکل ۱۵. ضرایب پیشنهادی تبدیل نتایج مدل غیرحدی به حدی برای دریفت روسازه

Fig. 15. The Proposed Conversion Coefficients for Non-Ultimate Model Superstructure Drift



شکل ۱۶. ضرایب پیشنهادی تبدیل نتایج مدل غیرحدی به حدی برای برش پایه

Fig. 16. The Proposed Conversion Coefficients for Non-Ultimate Model Base Shear

لحظه برخورد ۰/۰۰۳۸ بوده است که مقدار آن پس از برخورد به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است، به گونه‌ای که در سطوح بالای شتاب در مدل حدی این مطالعه به حدود ۴/۵ برابر مدل غیرحدی رسیده است، که به صورت واضح ورود سازه به ناحیه غیرخطی و ضرورت در نظرگیری ظرفیت شکل‌پذیری برای سازه را نشان می‌دهد.

۵) توزیع ارتفاعی بیشینه نیروی برش لرزه‌ای پس از برخورد، تطابق بیشتری با اصلاحات توصیه شده در آخرین نسخه آیین‌نامه ASCE7 در سال ۲۰۱۶ در مقایسه با نسخه پیشین آن را نشان داده است.

۶) مقایسه نتایج مدل غیرحدی با مدل حدی نشان از تفاوت آشکار نتایج برای دو مدل در مرحله پس از برخورد داشته است و پیشنهاد می‌شود برای مشاهده نتایج حالت حدی مستقیماً از مدلی شامل شرایط حدی در جداساز استفاده شود. در صورت استفاده از مدل غیرحدی، ضرایب اصلاحی برای واقعی‌سازی نتایج حاصل از تحلیل مورد نیاز هستند که نمونه‌ای از این ضرایب تبدیل برای مدل مورد بررسی این مطالعه، ارائه گردیده است.

۷- فهرست علائم

علائم انگلیسی

b	قطر خارجی قطعه‌ها، m
c_r	ضریب میرایی لبه قطعه‌ها، N.Sec/m
d	ظرفیت جابجایی هر قطعه، m
F	نیروی اعمالی به قطعه مقعر بالایی، N
F_r	نیروی برخورد، N
F_{ry}	مقاومت تسلیم فلز جداساز، kg/m^2
g	شتاب ثقل، m/Sec^2
I	ممان اینرسی جرمی، $kg.m^2$
K_r	سختی لبه قطعه‌ها، N/m
m	جرم، kg
R	شعاع انحنای قطعه‌ها، m
R_{eff}	شعاع انحنای مؤثر قطعه‌ها، m
S	نیروی اصطکاک، N
s	قطر داخلی قطعه‌ها، m
t	زمان، Sec
t_r	ضخامت لبه قطعه‌ها، m
u	جابجایی افقی قطعه مقعر بالایی، m
$\ddot{u}_g$	شتاب حرکت زمین، m/Sec^2
W	مؤلفه عمود بر سطح نیروهای سطوح در تماس، N
Y	جابجایی تسلیم مدل ویسکوپلاستیک، m
z	فاصله سطوح تا مراکز جرم قطعه‌ها، m

علائم یونانی

θ	زاویه دوران قطعه‌ها، درجه
θ_s	زاویه انحراف نیروهای تماسی، درجه
μ	ضریب اصطکاک سطوح

منابع

[1] A.A. Sarlis, M.C. Constantinou, Model of triple friction pendulum bearing for general geometric and frictional parameters and for uplift conditions, MCEER, 2013.

[2] T.C. Becker, Y. Bao, S.A. Mahin, Extreme behavior in a triple friction pendulum isolated frame, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 46(15) (2017) 2683-2698.

[3] Y. Bao, T.C. Becker, H. Hamaguchi, Failure of double friction pendulum bearings under pulse-type motions, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 46(5) (2017) 715-732.

[4] Y. Bao, T.C. Becker, Effect of design methodology on collapse of friction pendulum isolated moment-resisting and concentrically braced frames, Journal of Structural Engineering, 144(11) (2018) 04018203.

[5] P. Tomek, H. Darama, R. Sturt, Y. Huang, modelling rim impact and ultimate behaviour of triple friction pendulum bearings, 17th World Conference on Earthquake Engineering, (2020).

[6] A.S.o.C. Engineers, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (ASCE/SEI 7-10), in, American Society of Civil Engineers, 2013.

[7] A.S.o.C. Engineers, Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures, in, American Society of Civil Engineers, 2017.

[8] D. Fenz, M. Constantinou, Development, Implementation, and Verification of Dynamic Analysis Models for Multi-spherical Sliding Bearings, Technical Report MCEER-08-0018, in, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, State …, 2008.

[9] D.M. Fenz, M.C. Constantinou, Mechanical behavior of

multi-spherical sliding bearings, (2006).

[10] D.M. Fenz, M.C. Constantinou, Spherical sliding isolation bearings with adaptive behavior: Theory, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 37(2) (2008) 163-183.

[11] D.M. Fenz, M.C. Constantinou, Spherical sliding isolation bearings with adaptive behavior: Experimental verification, Earthquake engineering & structural dynamics, 37(2) (2008) 185-205.

[12] D.M. Fenz, M.C. Constantinou, Modeling triple friction pendulum bearings for response-history analysis, Earthquake Spectra, 24(4) (2008) 1011-1028.

[13] T.C. Becker, S.A. Mahin, Experimental and analytical study of the bi-directional behavior of the triple friction pendulum isolator, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 41(3) (2012) 355-373.

[14] N.D. Dao, K.L. Ryan, E. Sato, T. Sasaki, Predicting the displacement of triple pendulum™ bearings in a full-scale shaking experiment using a three-dimensional element, Earthquake engineering & structural dynamics, 42(11) (2013) 1677-1695.

[15] MATLAB and Statistics Toolbox Release 2015b, The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States.

[16] F.E.M. Agency, 2009 NEHRP Recommended Seismic Provisions: Design Examples, in, FEMA P-751, Washington, DC, 2012.

[17] C. Kircher, G. Deierlein, J. Hooper, H. Krawinkler, S. Mahin, B. Shing, J. Wallace, Evaluation of the FEMA P-695 methodology for quantification of building seismic performance factors, 2010.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Esmaeili, T. Taghikhany, Extreme modeling of triple friction pendulum isolator and its effect on the behavior of superstructure, Amirkabir J. Civil Eng., 54(7) (2022) 2463-2480.

DOI: 10.22060/ceej.2021.20367.7423