

بررسی دینامیک لرزه ای ساختمان های ایزوله شده با جداگرهای لرزه ای

نوید سیاه پلو^۱

کارشناس ارشد سازه، دانشگاه شهید چمران، مجتمع آموزش عالی بهبهان
n_siahpolo@yahoo.com

خلاصه

در این تحقیق، در ابتدا انواع جداگرهای لرزه ای موجود در صنعت ساختمان معرفی می گردد. سپس به منظور بررسی تاثیر جداگرهای لرزه ای در کاهش نیروی های القایی زلزله و افزایش پریود ساختمان، یک مدل یکدرجه آزاد متشکل از یک دیافراگم صلب متکی بر دو ستون ساخته شده و تحت اثر تحریکات القایی زلزله ال سنتر برای دو حالت بدون جداگر لرزه ای و با جداگر لرزه ای تحلیل صورت گرفته و تاثیر استفاده از جداگر لرزه ای بررسی می گردد. در انتها با معرفی نمونه های از کاربرد جداگرهای لرزه ای به نتیجه گیری از بحث ارائه شده خواهیم پرداخت.

کلمات کلیدی: جداگر لرزه ای، شبه شتاب ما کزیم، برش پایه، آنالیز مدال، طیف طرح مطلوب

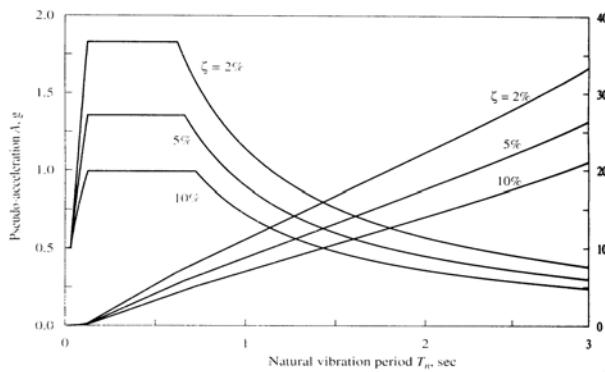
مقدمه

روزانه بحث نگهداری و محافظت از ساختمانهایی که در معرض خطرات ناشی از زلزله قرار گرفته اند به کمک معرفی انواع سیستم های ایجاد مقاومت جانبی اضافی همچون تعبیه تکیه گاه بی که ساختمان را از تکانهای شدید زمین جدا می کنند، رو به گسترش می باشد. به منظور معرفی این نوع سیستم ها مکانیزیم های مختلفی به شکل فرضیات حاصل از تحقیقات مطرح شده است. اگرچه مسئله استفاده از جداگرهای لرزه ای حدوداً ۱۰۰ سال است که مورد توجه قرار گرفته اما کاربرد این جداگرها اخیراً به عنوان یک راهکار عملی برای طراحی ساختمانهای مقاوم در برابر زلزله مطرح شده است. در این مقاله سعی شده است که رفتار دینامیکی این جداگرهای لرزه ای روی ساختمانهایی که دارای سیستم های لرزه جدا در تکیه گاهشان هستند بررسی شده و تا حدودی معین گردد که این جداگرهای لرزه ای چگونه و چه شرایطی برای کاهش نیروی مؤثر زلزله تأثیر گذار بود و کاربرد آنها مفید فایده خواهد بود. لازم به ذکر است استفاده از جداگرها یک زمینه گسترده و وسیع در مقوله تحقیق می باشد که مقالات بسیار زیادی درباره این سیستم ها نگارش شده است که به طو مثال برخی از مهمترین جنبه هایی که بدان پرداخته شده است عبارتند از: مکانیک و ساختار سخت افزاری این جداگرها، آزمایشهای مرتبط با این جداگرها همچون آزمایش تعیین مدل برشی، تحلیل دینامیکی غیر خطی جداگرها، میز آزمایش لرزان به منظور بررسی رفتار لرزه ای آنها، ارائه روابط طراحی ساختمانهای مقاوم با کمک جداگرها، روشهای نصب و اجرا و عملکرد این جداگرها در محل استفاده از آنها.

سیستم های جداگر

با وجود انواع مختلفی از جداگرهای لرزه ای از لحاظ جزئیات و ساختار به طور کلی تکنیک جداگرها مسیر یکسانی را ضمن رعایت یکسری معیارهای مشخصی را دنبال می کنند، اولین دستاورد این است که یک لایه با سختی جانبی کم بین سازه و فونداسیون ایجاد می کنند که از این طریق پریود سازه به مراتب بلندتر از پریود طبیعی اش در حالیکه که تکیه گاه ثابت داشته باشد خواهد شد. همانطور که در شکل ۱ قابل رویت است افزایش پریود از حالت کم به میزان قابل توجهی باعث خواهد شد که سازه از ناحیه حساس به شتاب خارج شده و در نتیجه شبه شتاب سازه کاهش یابد و در نتیجه نیروی القایی زلزله به سازه کاهش خواهد یافت. اما همین امر (استفاده از جداگرها) سبب افزایش جابجایی نسبی سازه خواهد شد که البته این تغییر شکل ها در جداگرهای لرزه ای تجمع یافته و در نتیجه جابجایی القاء شده به ساختمان سازه ای بسیار کم خواهد شد. این نوع جداگرها زمانی مؤثر خواهند بود که سیستم سازه ای نامیرا بوده و رفتارش خطی باشد. نکته مهم این است که نباید فراموش کرد میرایی برای ساختمان آن سودمند بوده و نیروی وارد بر سازه و تغییر شکل جداگرهای لرزه ای را کاهش خواهد داد.

^۱مربی دانشکده مهندسی، مجتمع آموزش عالی بهبهان، دانشگاه شهید چمران، اهواز



شکل ۱- افزایش زمان تناوب و کاهش شبه شتاب طرح

اغلب سیستم های رایج که ساختاری شبیه آنچه توضیح داده شد دارند غالباً از یک نشیمن استوانه ای شکل با ارتفاع کم که دارای یک یا تعدادی سوراخ روی آن بوده و از مقادیر متغیری لایه های فولادی پلاستیک فشرده تشکیل شده اند. این نشیمن های لایه لایه که عامل ارتباط بین کف سازه و فونداسیون می باشند، در برابر بارهای قائم بسیار سخت و محکم بوده ولی در مقابل بارهای جانبی بسیار انعطاف پذیر می باشند. بدلیل اینکه خاصیت میرایی طبیعی پلاستیک کم است، غالباً لازم است از یکسری میراگرهای اضافی تحت عنوان میراگرهای مکانیکی در کنار این نوع سیستم ها استفاده گردد. این میراگرهای مکانیکی غالباً از رو لپلاک های سربی که درون یک حفره یا میراگرهیدرولیکی، میلگرد فولادی یا هسته های فولادی جای داده شده اند تشکیل شده است. نوع دوم جداگرهای لرزه ای سیستم هایی هستند که با کمک یکسری المانهای لغزشی بین فونداسیون سازه و کف سازه ای جای می گیرند. در این نوع سیستم ها با نگهداشتن ضریب اصطکاک در حد پایین مطابق شرایط کاربردی آن، برشی که توسط لرزش درون جداگر القاء می شود، در سطح تماس با کف سازه ای به حداقل ممکن رسیده و به نوعی کاهش می یابد. به منظور دسترسی به تأثیر مطلوب جداگرهای لرزه ای لازم است اصطکاک موجود به اندازه کافی مقاوم بوده که توانایی استقامت برابر لرزه های خفیف و بادهای شدید را داشته باشد. در این نوع سیستم های جداگر، جابجایی های لغزشی به ۲ روش کنترل می شود:

۱. استفاده از فنرهای کششی با مقاومت بالا یا نشیمن های پلاستیکی ورقه ورقه

۲. ایجاد سطوح منحنی شکل تماسی

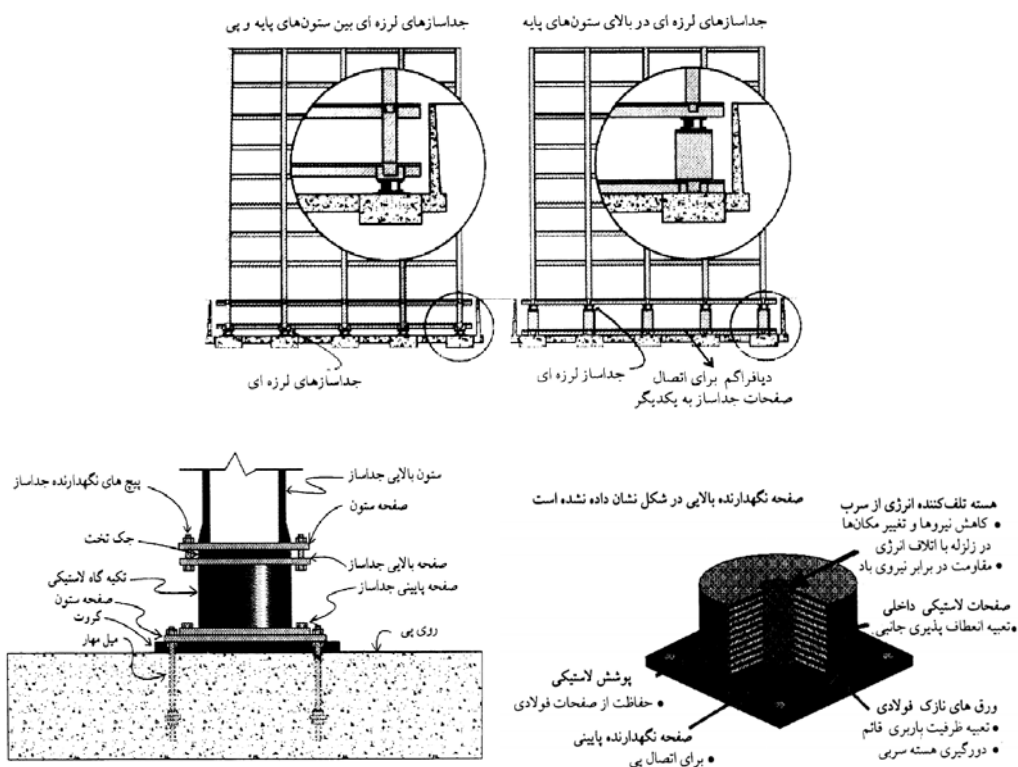
که البته استفاده از دو روش بالا این مزیت را داراست که نیروهایی وارده به سازه را در خود ذخیره کرد و سازه را با اعمال نیرو به موقعیت تعادلی برساند. سیستم های اصطکاکی پاندولی (FPS) سیستم های جداگر لغزشی هستند که در آن وزن سازه روی یک سطح لغزشی استوانه ای شکل نگهداشته شده که این لایه ها به صورت نسبی روی هم (زمانی که حرکات زمانی از حد آستانه ای تجاوز می کند) لغزش پیدا می کند. عمل ذخیره سازی نیرویی از طریق خیز اندک ساختمان بوجود آمده هنگامی که لغزشی روی صفحه استوانه ای رخ دهد ساختار دینامیکی این دسته از جداگرهای لغزشی به دلیل اینکه پروسه لغزشی ذاتاً غیر خطی است، مسئله مبهم و پیچیده است. برای اجتناب از برخورد با این نوع پیچیدگی، در این مقاله سعی شده است که رفتار دینامیکی سازه هایی که از سیستم های جداگر لرزه ای بصورت نشیمن پلاستیکی متورق تشکیل شده اند، استفاده گردیده و این نوع رفتار مورد بررسی قرار گیرند. رفتار این نوع ساختمانهای دارای جداگر شبیه روش آنالیز مدال مرتبط با ساختمانهای معمولی است. برای درک ساختار تشکیل دهنده انواع مختلف جداگر های لرزه ای موجود نمونه های مختلف این جداگر ها به همراه قسمتهای تشکیل دهنده آن نشان داده شده است. همچنین نحوه قرار گیری این جداگر ها روی فونداسیون و نحوه اجرای آنها نیز آورده شده است. به اشکال ۲ الی ۴ توجه نمایید.



شکل ۲- نمونه ای از فونداسیون به همراه جداگر های لرزه ای نصب شده در محل اتصال به ستون



شکل ۳- شمای کلی جداگر های لرزه ای اصطکاکی و قسمت های تشکیل دهنده آونگ اصطکاکی



شکل ۴- شمای کلی یک جداگر لرزه ای و جزئیات اجرایی اتصال آن به ستون و فونداسیون

ساختمانهای یک طبقه لرزه جدا

در این بخش بررسی خواهد شد که چرا یک جداساز لرزه ای در کاهشی نیروهای القایی ناشی از زلزله مؤثر می باشد. برای شناخت این مسئله در این تست یک ساختمان یک طبقه که یک جداگر لرزه ای بین کف سازه و فونداسیون قرار گرفته است را در نظر می گیریم. اکثر جداگرهای لرزه ای دارای رفتار غیر خطی نیرو - تغییر شکل می باشند اما برای مقدمه و جهت شناخت عملکرد جداگرهای لرزه ای لازم است این نوع عملکرد (عملکرد غیر خطی) مورد توجه قرار گیرد. بررسی مقدماتی عملکرد جداگرهای لرزه ای ما را آنچه مقصودمان است و همانا بررسی رفتار دینامیکی جداگرهای لرزه ای در ساختمان است نیل خواهد داد. ما در نهایت برای مقاصد طراحی لازم است رفتار غیر خطی نیرو - تغییر مکان الاستومرها در نظم گرفته شود .

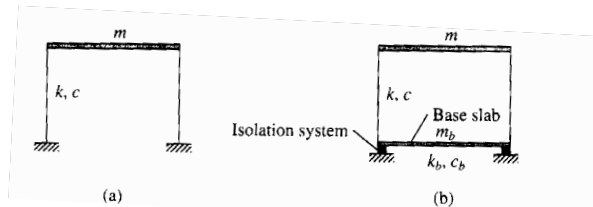
• پارامتر و ملاحظات سیستم جداگر لرزه ای :

یک ساختمان یک طبقه که در شکل 5.a توسط جداگرهای لرزه ای نمایش داده شده است دارای مشخصات زیر است : جرم متمرکز m ، سختی جانبی k ، میدای جانبی C ، این سیستم همان سیستم آشنای SDF (یک درجه آزاد) با فرکانس طبیعی W_n و پریود طبیعی T_n و نسبت

میرایی ξ است. به منظور این که نشان دهیم سازه مورد آزمایش دارای تکیه گاه ثابت است T در فرمولها از اندیس f بجای اندیس n استفاده خواهد شد.

$$\omega_f = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad T_f = \frac{2\pi}{\omega_f} \quad \xi_f = \frac{c}{2m\omega_f} \quad (1)$$

مطابق شکل 5.b سازه یک طبقه را نشان می دهد که روی دال با جرم m_b که بوسیله سیستم جداگرهای لرزه ای در پایه قرار داده شده است قرار گرفته و این دال دارای سختی جانبی k_b و میرایی ویسکوز خطی c_b بوده و T_b پارامتر ξ_b ویژگی های سیستم جداگر را بیان می کنند.



شکل ۵- مدل تحلیل a- بدون جداگر لرزه ای ، b : با جداگر لرزه ای

$$T_b = \frac{2\pi}{\omega_b} \quad \text{where} \quad \omega_b = \sqrt{\frac{k_b}{m+m_b}} \quad \text{and} \quad \xi_b = \frac{c_b}{2(m+m_b)\omega_b} \quad (2)$$

در این حالت T_b و ξ_b به ترتیب بیان کننده پریود طبیعی ارتعاشی و نسبت میرایی :

۱. سیستم جداگر لرزه ای (با این فرضی که ساختمان صلب است)

۲. سازه دارای جداگر لرزه ای با این فرضی که سازه صلب است

برای اینکه نشان دهیم جداگرهای لرزه ای مؤثر خواهند بود لازم است همواره $T_b > T_f$. همانگونه که در مقدمه نیز توضیح داده شد، این عمل سبب کاهش میزان شبه شتاب شده و در نتیجه نیروی القایی کاهشی می یابد. سیستم سازه شکل 5.b دو سیستم سازه ای SDOF مجزا با ماتریسهای سختی جرم و میرایی نمایش داده شده با k, m, c می باشد. اختلاف بین میرایی بالای نشیمن های لاستیکی و میرایی پایین ساختمان بدین معنی است که میرایی در سیستم های ترکیبی غیر کلاسیک است. همانگونه که می دانید آنالیز سیستم های میرایی غیر کلاسیک مستلزم حل کردن عددی دسته ای از معادلات همبسته حرکت است. اگرچه حل این دسته از معادلات به روشهای عددی موجود امکان پذیر است با این حال تکرار اصول مربوطه به این روشها برای شناخت رفتار دینامیکی ساختمانهای دارای جداگرهای پایه ای مناسب و مد نظر نویسنده نمی باشد.

اگرچه مطابق با اصول و قواعد استفاده از آنالیز مدال برای سیستم های غیر کلاسیک کاربرد ندارد، اما کاربرد این روش ها برای نیل به هدف ما به صورت تقریبی مناسب و قابل استفاده است. از این روش جهت تعیین پاسخ سازه های دارای جداگرهای لرزه ای که تحت حرکات زمین قرار گرفته به کمک طیف طرح استفاده می شود. سازه توصیف شده در بخش قبل که یک درجه آزاد در قسمتی بوده و در تکیه گاه آن جداگر لرزه ای وجود دارد، براساس روشهای موجود آنالیز، مورد تحلیل قرار می گیرد. با استفاده ماتریسهای جرم m ، سختی k و میرایی c که قابل تعریف بوده و براساس مشخصات سازه بدست می آیند معادله حاکم بر سیستم سازه عبارتست است از :

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g \quad (3)$$

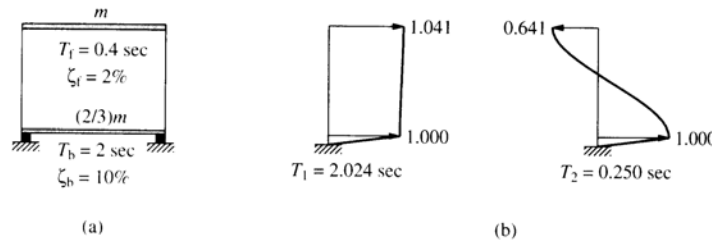
با حل معادله فوق و تعیین مقدار ویژه آن پریود طبیعی و مدهای آنالیز سیستم بدست آمده همچنین نتایج آنالیز طیف پاسخ نیز قابل محاسبه هستند.

• تأثیرات جداگرهای لرزه ای :

برای شناسایی دینامیک جداگرهای لرزه ای ، ابتدا یک سیستم خاصی با مشخصات $m_b = 2m/3, T_f = 0.4 \text{ sec}, T_b = 2.0 \text{ sec}, \xi_f = 2\% \text{ and } \xi_b = 10\%$ در نظر می گیریم. جهت محاسبه برش پایه V_b ساختمان و جایجایی پایه U_b به کمک طیف طرح الاستیک شکل ۱- که برای میرایی های ۵، ۱۰ و ۲۰٪ نمایش داده شده است، استفاده می شود. آنچه قابل درک است اینکه برای سازه میرایی ۲٪ که معمولاً حد بحرانی میرایی است و از آنچه میرایی معمول با درصد ۵٪ در نظر گرفته می شود، کمتر است، در بحث طراحی و آنالیز سازه در برابر زلزله در نظر گرفته شده است. همانگونه که می دانید وجود مقادیر میرایی بر روی ساختمانهای معمول و مرسوم که در معرض تکانه های شدید ناشی از زلزله قرار می گیرند، وسیله مناسبی برای اتلاف انرژی حاصل از خسارتهای غیر سازه ای ایجاد شده می باشد. بطور کلی هدف از استفاده جداگرهای لرزه ای کاهشی نیروهای وارده بر سازه است به گونه ای که هیچگونه تخریب و خسارتهای سازه و غیر سازه ای در اجزای ساختمانها ایجاد نگردیده همچنین با توجه به این ساختار استفاده از میراگرها به حداقل ممکن برسد.

ویژگی های لرزه ای

مطابق شکل ۶، فرکانس طبیعی T_n و مدهای نوسانی Φ_n سازه یک طبقه یک درجه آزاد که روی جداگرهای لرزه ای قرار گرفته است، نمایش داده شده است. مطابق مد اول جداگر لرزه ای در معرض تغییر شکل قرار گرفته ولی سیستم سازه ای همچنان بصورت صلب عمل کرده است. به همین دلیل به مد اول ارتعاشی اصطلاحاً مد جداگر لرزه ای نیز گفته می شود. پریود طبیعی این مد نوسان $T_b=2.04$ sec ثانیه است. این پدیده این نکته را نمایان می سازد که پریود طبیعی سیستم با جداگر لرزه ای $T_b=2$ sec تنها به مقدار اندکی آن هم بوسیله انعطاف پذیری سازه تغییر کرده است. در مد دوم نیز همچنان جداگر لرزه ای دارای تغییر شکل جانبی بوده ولی سازه نیز دچار تغییر شکل جانبی می گردد. به همین دلیل به مد دوم اصطلاحاً مد سازه ای گفته می شود. البته بعداً گفته خواهد شد که این مد مشارکت کمی در القاء نیروهای جانبی ناشی از زلزله بر سازه خواهد داشت. مطابق شکل پریود طبیعی این مد $T_2 = 0.25$ sec بوده که نسبت به پریود سازه با تکیه گاه گیردار به طور قابل توجهی کمتر است. بهر شکل پریود طبیعی سازه ترکیبی در مقایسه با پریود سیستم جداگر T_b و پریود سازه با انتهای گیردار T_f دارای تفاوتی قابل توجهی است.



شکل ۶- فرکانس طبیعی و اشکال مود ارتعاشی سازه با جداگر لرزه ای

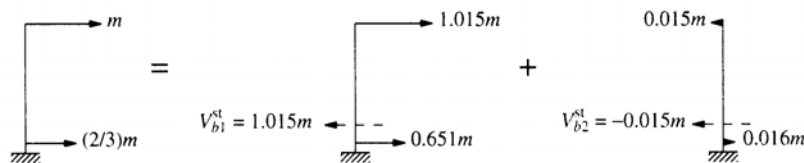
پاسخ استاتیکی مدال

همانگونه که می دانید توسعه مدال نیروی توزیع یافته موثر زلزله $S = m1$ برای سیستم شکل ۶، در شکل ۷ نمایش داده شده است. نتایج شگفت انگیز آنالیز این نکته را نمایان می کند که نیروی توزیع یافته ناشی از مداول ارتعاشی S_1 به میزان قابل توجهی به کل نیروی القایی بر سازه نزدیک بوده و نیروی القایی مدار ارتعاشی دوم S_2 به مراتب کوچک و قابل چشم پوشی است. مطابق آنالیز استاتیکی سازه برای نیروی ناشی از مد n ام، S_n ، پاسخهای استاتیکی T_n^{st} ناشی از مد n ام را برای مقادیر پاسخ $\Gamma(t)$ (وابسته زمان) بدست می آورد، در حالت خاصی برای برش پایه $V_b(t)$ در سازه و جابجایی $u_b(t)$ در تکیه گاه که همانا جابجایی جداگر لرزه ای است. پاسخ های استاتیکی مدال برای دو مد ارتعاشی عبارتند از:

$$V_{b1}^{st} = 1.015m \quad V_{b2}^{st} = -0.015m$$

$$\omega_1^2 u_{b1}^{st} = 0.976 \quad \omega_2^2 u_{b2}^{st} = 0.024$$

مطابق نتایج فوق واضح است که نتایج مربوط به پاسخهای سازه ناشی از مد اول ارتعاش دوم در مقایسه با مد اول قابل چشم پوشی است. بنابراین انتظار می رود که مد دوم در القاء نیروی زلزله بر سازه نسبت به مد اول از سهم کمتری برخوردار باشد.



شکل ۷- نیروهای برش پایه ناشی از مد اول و دوم با استفاده از جداگر لرزه ای

نسبت های میرایی مدال

برای محاسبه نسبت ها میرایی در هر مد از رابطه زیر استفاده می شود:

$$\xi_n = \frac{C_n}{2M_n \omega_n} \quad (4)$$

که در آن

$$M_n = \phi_n^T m \phi_n \quad \text{and} \quad C_n = \phi_n^T c \phi_n \quad (5)$$

که برای سیستم مورد آزمایش خواهیم داشت:

$$\xi_1 = 9.65\% \quad \xi_2 = 5.06\% \quad (6)$$

با مشاهده $\xi = 9.65\%$ ناشی از مد اول این نکته قابل استنباط است که میرایی ناشی از مداول که همانا جداگر لرزه ای است، بسیار شبیه به میرایی سیستم جدا گر لرزه ای $\xi_b = 10\%$ می باشد و میرایی ناشی از خود سازه روی میرایی مداول (مد جداگر لرزه ای) تأثیر ناچیزی می گذارد، زیرا در این مد سازه به صورت صلب عمل می کند. در مقابل میرایی بالای سیستم جداگر لرزه ای باعث می شود که میرایی مد سازه ای (مد دوم) از مقدار 2% به 5.06% رشد داشته باشد. به دلیل اینکه میرایی در سیستم بصورت غیر کلاسیک است ترم های زوج $C_{21} = C_{12} = \Phi_1^T X C X \Phi_2$ غیر صفر بوده و در نتیجه معادلات مداول همبسته می باشد. به دلیل همین همبسته بودن معادلات است که ما از استفاده از آنالیز مدال به صورت کلاسیک در مورد این سیستم ها خودداری می کنیم. لازم به یادآوری است که هرگاه در ماتریس میرایی، ماتریس قطری بوده و سایر عناصر آن صفر باشند. دسته معادلات دیفرانسیل حاصل از معادله حرکت غیر همبسته بوده و در این حالت اصطلاحاً می گویند میرایی سیستم کلاسیک است. زیرا برای حل این دسته از معادلات می توان از روشهای تحلیل کلاسیک استفاده نمود. چنانچه ماتریس میرایی قطری نباشد (مانند سیستم فوق) در این صورت روشهای تحلیل غیر کلاسیک برای حل دسته معادلات ضروری بوده و به چنین سیستم هایی، سیستم های بامیرایی غیر کلاسیک گفته می شود.

پاسخهای حداکثر مدال و کلی سازه

حداکثر تعداد مشارکت مدی n ام $\Gamma_n(t)$ ناشی از پاسخ $\Gamma(t)$ بوسیله رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$r_n = r_n^{st} A_n \quad (7)$$

که در این رابطه $A_n = A(T_n, S_n)$ مقدار پاسخ شبه شتاب (طرح) طیف مورد نظر در یک پرورد T_n و برای یک میرایی مشخص ξ_n . حال متناسب با آنچه مطلوب ما در این مقاله است و مقدار پاسخی که برای ما مهم و قابل استفاده است عبارتند از: نیروی برش پایه V_b و تغییر مکان افقی جداگر لرزه ای u_b که از رابطه زیر قابل محاسبه هستند:

$$V_{bn} = V_{bn}^{st} A_n \quad u_{bn} = (\omega_n^2 u_{bn}^{st}) D_n \quad (8)$$

که در رابطه فوق $D_n = A_n / \omega_n^2$ ، تغییر مکان طیف مربوطه است. محاسبات مربوطه به طور خلاصه در جدول ۱ آورده شده است. برای محاسبات مربوط از مقادیر شکل ۸ به عنوان A_n استفاده شده است. مقادیر این جدول براساس مقادیر واقعی میرایی بدست آمده اند. مطابق این جدول نکته قابل درک این است که پاسخهای سازه ای ناشی از مد دوم، مد سازه ای، علی رغم اینکه شبه شتاب مربوطه به خاطر کم بودن پرورد طبیعی زیاد است، کم می باشد چون پاسخهای استاتیکی مدال کم می باشد. با ترکیب پاسخهای ناشی از آنالیز مدال به روش SRSS، تغییر شکل جداگر لرزه ای $14/0.42$ اینچ می باشد. هم چنین نیروی برشی پایه حدوداً $36/5$ درصد از وزن ساختمان با احتساب دال پایه می باشد.

جدول ۱- محاسبه نیروی برش پایه و تغییر شکل جداگر لرزه ای

Mode	Base Shear			Isolator Deformation		
	A_n/g	V_{bn}^{st}/m	V_{bn}/w	D_n (in.)	$\omega_n^2 u_{bn}^{st}$	u_{bn} (in.)
1	0.359	1.015	0.365	14.390	0.976	14.042
2	1.347	-0.015	-0.021	0.823	0.024	0.020
SRSS			0.365			14.042

کاهش نیروی برش پایه

چنانچه سازه ای دارای جداگر لرزه ای نباشد نیروی برش پایه در آن زیاد خواهد بود، مطابق سازه مورد آزمایش که پرورد طبیعی آن در حالتی که تکیه گاه آن گیر دار و بدون جداگر لرزه ای است 0.4 ثانیه و میرایی آن 2% می باشد. برای چنین سازه ای مطابق شکل ۸ براساس طیف طرح موجود مقدار شبه شتاب $A(T_f, \xi_f)$ را $1.83g$ نتیجه می دهد. بنابراین برش پایه برای چنین سازه ای عبارتست از:

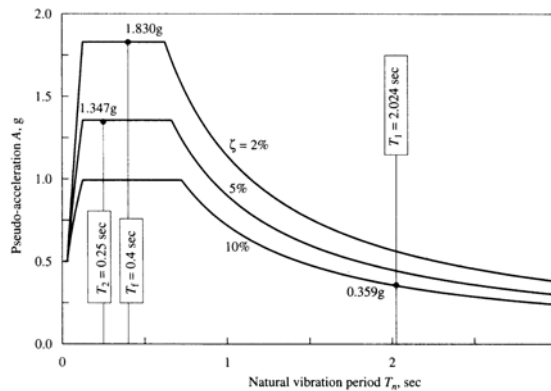
$$V_b = mA(T_f, \xi_f) = m(1.830g) \quad \text{or} \quad \frac{V_b}{w} = 1.830 \quad (9)$$

که بیانگر این مطلب است که نیروی برش پایه در حالت بدون جداگر حدود 183% وزن سازه بدون احتساب بار دال کف می باشد که در مقایسه با برش ناشی از حالت وجود جداگر لرزه ای 5 برابر می باشد.

جداگرهای لرزه ای به این دلیل باعث کاهش نیروی برش پایه سازه می شوند که بخاطر وجود جداگرهای لرزه ای پرورد ارتعاشی مداول، مد جداگر لرزه ای، که عمده پاسخ سازه مرتبط با این مد است، در مقایسه با پرورد سازه با تکیه گاه گیردار بسیار بلندتر بود و به همین دلیل مقادیر متناظر با طیف در این حالت (شبه شتاب) به مراتب کمتر خواهد شد. این مسئله از طریق آزمایش مجدد رابطه مربوط به برش پایه قابل دسترسی است:

$$V_{b1} = V_{b1}^{st} A_1 = (1.015m)(0.359g) \quad (10)$$

با مقایسه برش پایه در دو حالت آنچه قابل درک است اینکه با استفاده از سیستم جداگر لرزه ای میزان شبه شتاب از 1.83g به 0.359g کاهش یافته در حالیکه جرم مدی مؤثر در دو حالت انتهای گیردار و وجود جداگر شبیه به هم می باشد .



شکل ۸- نحوه تاثیر جداگر های لرزه ای در افزایش پریود سازه و کاهش نیروی برش پایه

چرا جداگرهای لرزه ای مؤثر هستند ؟

جداگرهای لرزه ای با افزایش پریود طبیعی سازه سبب کاهش شبه شتاب سازه (مطابق با طیف مطلوب) گشته و در نتیجه میزان نیروی القا شده توسط زلزله، کاهش می یابد. مددوم ارتعاشی اگرچه دارای شبه شتاب زیادی است، اما تغییر شکل ایجاد شده از این مد آنقدر زیاد نیست که سبب ایجاد نیروی برش خیلی زیادی بر اثر حرکت زمین گردد. این مسئله به شکل کلی زیر قابل بیان است : مداول ارتعاشی سازه دارای جداگرهای لرزه ای حاوی تغییر شکل در جداگر لرزه ای به تنهایی بوده در حالیکه سازه بالای آن کاملاً صلب باقی ماند. بنابراین مولفه S_1 ناشی از مداول بر اثر توزیع نیروی مؤثر زلزله $S = mI$ کاملاً شبه کل برش پایه S (نیروی مؤثر کل) می باشد و نیروی توزیع یافته ناشی از مد دوم بسیار کوچک بود و در نتیجه پاسخ حاصل از این نیرو نیز بسیار اندک می باشد. بنابراین به طور کلی می توان گفت مهم ترین و اصلی ترین تأثیر جداگرهای لرزه ای افزایش طول پریود سازه و در نتیجه کاهش نیروی زلزله القاء شده بر سازه ناشی از مداول است. دومین تأثیر عامل جداگرهای لرزه ای وجود میرایی در جداگرهای لرزه ای سبب تسهیل در اتلاف انرژی در سازه گردیده و در نتیجه پاسخ های مربوطه به سازه را کاهش خواهد داد .

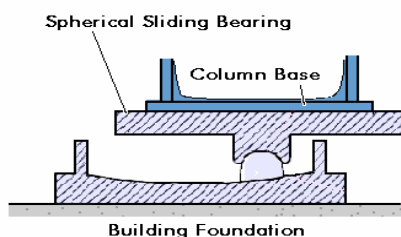
کاربردهای جداگرهای لرزه ای

بطور کلی استفاده از جداگرهای لرزه ای به عنوان یک گزینه کاربردی در بحث طراحی سازه های با تکیه گاه گیر دار مرسوم بوده و در بحث هزینه به عنوان یک گزینه مناسب جهت کاهش هزینه های مرتبط با ساخت و طراحی سازه های احداثی در نواحی با حرکات قوی محتمل در زمین قابل دسترس است. شاید سودمندترین گزینه موجود در ساخت (بناهایی که لازم است پس زلزله های بزرگ همچنان کاربری خود را حفظ کنند همچون بیمارستان ، مراکز ارتباطات اورژانسی ، مراکز پردازش رایانه و غیره) نیز همین جداگرهای لرزه ای باشند. امروزه بسیاری از سازه های جدید از جداگرهای لرزه ای از نوع لاستیکی (الاستومریک) یا جداگرهای FPS استفاده می کنند. هر دوی انواع جداگرهای لرزه ای فوق الذکر برای بحث مقاوم سازی ابنیه های شکننده و ضعیف موجود استفاده می شوند. به طور مثال در ساختمانهای بنایی غیر مسلح یا ساختمانهای بتن مسلحی که براساس ضوابط طراحی جدید دارای جزئیات میلگرد گذاری مناسب جهت داشتن عملکرد مناسب شکل پذیری استفاده از جداگرهای لرزه ای مفید و مؤثر می باشد. در بحث مقاوم سازی از روشهای مرسوم و معمول می توان به اضافه کردن اعضاء جدید همچون دیوارهای برشی، کابلها و مهار بندی ها اشاره نمود. در واقع جداگرهای لرزه ای نیاز به استفاده از این روشهای مرسوم را با کاهش نیروی زلزله اعمال شده بر سازه کاهش می دهد. به همین دلیل استفاده از این جداگرهای لرزه ای بهترین روش برای تقویت ساختمان های تاریخی یا ابنیه های معماری که لازم است عملکرد ویژه ای هایشان حفظ گردد، می باشد. اما نباید فراموش شود که احداث یک سیستم جدید فونداسیون جهت نصب جداگر لرزه ای به منظور اصلاح پایه ساختمان به گونه ای که بتواند جداگر لرزه ای را نگه داشته و حفظ پایداری ساختمان در حین ساخت سیستم فونداسیون و جداگر لرزه ای را تضمین کند یک کار پر هزینه و دشوار است. یکی از بهترین شاهد مثالهای کاربرد جداگر لرزه ای از نوع سیستم جداگر لرزه ای همراه نشیمن و ورقهای لاستیک ، برج (City Hall) شهر سان فرانسیسکو است (کالیفرنیا). این ساختمان در سال ۱۹۱۵ جهت جایگزین کردن ساختمانی که بر اثر زلزله سال ۱۹۰۶ سان فرانسیسکو تخریب شده بود ساخته شده است. این ساختمان یک مثال معمولی از معماری کلاسیک بوده و در فهرست اماکن تاریخی ملی آمریکا ثبت گردیده است. این ساختمان از ۵ طبقه تشکیل شده به همراه گنبد موجود در این سازه ارتفاعی معادل $300f^2$ داشته و ابعاد این ساختمان در پلان $309 \times 408 f^2$ می باشد. با این ابعاد ۲ بلوک از فضای محوطه را اشغال نموده است .



شکل ۹- ساختمان city hall در سانفرانسیسکو تقویت شده با جداگرهای لرزه ای

سیستم سازه ای این ساختمان قاب فولادی و دال بتنی است و دیوار و سازه توسط آجرهای بنایی غیر مسلح با نمای سنگ گرانیت بنا شده ، دیوارهای پر کننده درون سازه از بلوکهای رسی حفره حفره تشکیل شده و بسیاری از قسمتهای درونی سازه بوسیله پانلهای آهنی یا مرمری پوشش یافته است . در سال ۱۹۸۹ بر اثر وقوع زلزله Loma Prieta ، که آن در فاصله ۶۰ مایلی نسبت به ساختمان قرارداشت، خسارتها و آسیبهای جدی بر سازه وارد آمده و به همین دلیل تعمیرات و مقاوم سازی دار این سازه مطرح گردید. پریود طبیعی ارتعاشی ساختمان بخاطر وجود پایه گیردار تقریباً حدود ۰/۹ ثانیه تقریب زده می شد، این نکته را متوجه ساخت که در صورت وقوع تکانهای شدید ناشی از کانون زلزله نزدیک به گسل San andreas نیاز شکل پذیری زیادی به منظور استهلاک انرژی حادث شده مورد نیاز است. برای ارضاء نیاز شکل پذیری و بحث مقاوم سازی استفاده از جداگرهای لرزه ای به دلیل که ویژگی های تاریخی سازه را دست خوش تغییرات نمی کرد، گزینه مناسبی به شمار می رفت. علاوه بر جداگر لرزه ای سازه مورد نظر توسط یک دیوار برشی جدید که در بخش داخلی سازه احداث گردید تقویت شد. این پروژه مقاوم سازی و ترمیم در سال 1998 به پایان رسید . سیستم جداگر لرزه ای مشتمل بر ۳۵۰ جداگر بود که هریک از این جداگرها از نوع جداگرهای با ورقه های لاستیکی و هسته سربی بوده و در زیر تک تک ستونهای سازه و دیوار برشی که جدیداً به سازه اضافه گردید قرار گرفتند. ارتفاع این جداگرهای لرزه ای ۲۱ و قطر آنها بین ۳۱ تا ۳۶ اینچ متغیر است. هریک از ستونها بر روی یک یا چند جداگر لرزه ای که در زیر یک سازه فولادی صلیبی شکل قرار گرفته اند جای داده شده و جداگرهای اضافی برای بهبود عملکرد باربری ستونهایی که بار معمولی زیادی دارند بکار برده شد. عملیات نصب و احداث این جداگرهای لرزه ای بسیار سخت و پیچیده بوده و برای احداث ابتدا ستون را بریده و ظرفیت باربری آن را به یکسری تکیه گاههای موقتی انتقال داده، سپس جداگر لرزه ای نصب می شد. البته حصول اطمینان از اینکه شمهائی کمکی توانایی باربری بارهای وارده بر ستون قطع نشده را داشته باشند، نکته بسیار مهم و ضروری بود. سطح تراز جداگرهای لرزه ای دقیقاً در بالای فونداسیون موجود قرار داده شد . طبق محاسبات ساختمان تقویت شده توسط جداگر لرزه ای تحت اثرشتاب ماکزیمم زلزله طرح 0.4g که دارای پریود 2.5 sec می باشد حدوداً بین ۱۸ تا ۲۶ اینچ جابجایی خواهد داشت. به منظور ارضاء جابجایی مجاز تخمین زده شده برای فراهم آوردن حداقل درز لرزه ای ۲۸ اینچ، یک درز انقطاع در اطراف سازه احداث گردید. از این فضای ایجاد شده برای درز انقطاع جهت احداث اتصالات انعطاف پذیری مربوط به تشکیلات ساختمان چون خطوط تلفن ، سیمهای برق و ... استفاده گردید .



شکل ۱۰- جداگرهای لرزه ای نصب شده در ساختمان city hall در شهر سانفرانسیسکو

شاهد مثالی مناسب دیگری که بیانگر استفاده اخیر جداگرهای لرزه ای در صنعت ساختمان است، ترمینال فرودگاه بین المللی سان فرانسیسکو است که در سال ۲۰۰۰ عملیات ساخت آن به پایان رسید. این ساختمان به گونه ای طراحی شده است که بتواند در صورت وقوع زلزله با بزرگی ۸ ریشتر ناشی از گسل San Andreas و با فاصله مرکز ۳ مایل نسبت به سازه عملکرد خود را حفظ کرده و سطح کاربری خود را از دست ندهد. برای دسترسی به این مقصود طراحان تصمیم گرفتند که زیر سازه را توسط جداگرهای لرزه ای تقویت کرده و سیستم سازه ای را قاب خمشی همراه اتصالات خمشی جوشی و مهار بندی های هم گرا و واگرا به صورت ترکیبی در نظر بگیرند. در سیستم جداگر لرزه ای این سازه، یک نشیمن از چدن که سطح آن از سطوح کرومی فولاد ضد زنگ و لغزنده جداگانه شکل گرفته است، ساخته شده است و به کمک این جداگر لرزه ای، پریود سازه به 3 sec افزایش یافته است .



شکل ۱۱- ترمینال بین المللی سافرانسیسکو- پس از عملیات نصب جداگرهای لرزه ای

به کمک این جداگر لرزه ای نیروی زلزله اعمال به سازه در مقایسه با حالتی که انتهای سازه ثابت و بدون جداگر لرزه ای است حدود ۳۰٪ کاهش یافته است. با این میزان کاهش در نیروی اعمال زلزله امکان نگه داشتن سازه در محدود الاستیک وجود داشته و بنابراین می توان انتظار داشت که سازه اگر در معرض شتاب ماکزیمم زمین 0.6g قرار بگیرد، بدون خسارت و آسیب دیگری باقی بماند .

نتیجه گیری

در بحث ساخت ابنیه های مقاوم در برابر زلزله متناسب با درجه اهمیت سازه است که پارامترهای مختلف در طراحی دخیل می شوند. به طور مثال اینکه آیا لازم است سازه در محدوده الاستیک بماند یا سطح کاربری سازه پس از اعمال زلزله چگونه باشد. به هر شکل طراح در بخش فاز اول پروژه است که این موارد را روی کاغذ آورده و با بررسی تک تک گزینه های موجود بهترین و در عین حال اقتصادی ترین راهکار را انتخاب می کند. اما نویسنده به عنوان یک نکته یادآور می شود چنانچه سازه ای جزء ابنیه تاریخی یک کشور و به گونه ای که هویت و فرهنگ یک کشور توسط آن ابنیه ها معرفی می گردد یا ساختمانها و سازه هایی که لازم است پس از وقوع زلزله هایی که هیچگاه خبر نمی کنند سطح کاربری خود را حفظ کنند ، صرف هزینه های ولو در دید اول زیاد و نگران کننده نه تنها غیر معقولانه نیست بلکه چه بسا یک راهکار اصولی است از وقوع ضرر و زیانهایی که گاه با صرف هزینه های چندین برابر قابل برگشت نیست .

نگارنده این مقاله به دلیل رسالت و موضوع مقاله از جنبه اقتصادی به تجزیه و تحلیل هزینه های تمام شده در بحث جداگرها نپرداخته و با یک نگاه اجمالی به موضوع زلزله و خرابی های ناشی از آن اگرچه در دید دید اول استفاده از سیستم های نوین پر هزینه است، ولی مطمئناً در صورت گذشت زمان این هزینه ها نتیجه خواهد بود. بهر شکل در انتها یادآوری شود که با کمک سیستم های جداگر لرزه ای به طور فهرست وار می توان راهکارهای زیر را دنبال نمود .

۱. با افزایش پریود طبیعی سازه میتوان شبه شتاب وارد به سازه را کاهش داده در نتیجه نیروی القایی سازه را کاهش دهیم .
۲. از بروز خسارتهای جانبی و مالی که مخالف منافع ملی است جلوگیری کنیم .
۳. به خاطر وجود خاصیت میرایی در این نوع سیستم ها، می توان بحث وجود میراگرها را در ساختمان به میزان قابل توجهی کاهش دهیم .

1. Kelly, J.M, *Earthquake Resistant Design with Rubber*, 2nd ed., Springer-Verlag, London, 1996, Chapters 1, 3, and 4.
2. Naeim, F., and Kelly, J.M., *Design of seismic Isolated Structures: From Theory to Practice*, Wiley, Chichester, U.K., 1999.
3. Skinner, R. I., Robinson, W. H., and McVerry, G. H., *An Introduction to Seismic Isolation*, Wiley, Chichester, U.K., 1993.
4. Warburton, G. B., *Reduction of Vibration*, The 3rd Mallet-Milne Lecture, Wiley, Chichester, U.K., 1992, pp.21-46.

۵. تنکابنی پور، سید مهدی، *اصول مقاوم سازی ساختمانها*، ویرایش اول، تهران، انتشارات آزاده، آذرماه ۱۳۸۴.