بسمه تعالی

گروه مهندسین دریان

جداسازهای اصطکاکی آونگی

(EPS)

REV	شرح	تهیه	بررسی	تأیید	تصویب	تاریخ انتشار	محل ضرب مهرهای تحت کنترل- منسوخ
۰۰	**جداسازهای اصطکاکی آونگی (EPS)**	**وحید پاچیده**	**امیر ساعدی**				
۰۱							
۰۲							
۰۳							

www.daryan.co

تهران - سعادت آباد - خیابان ریاضی بخشایش - بن بست قائم - پلاک ۴ - طبقه چهارم

تلفن: ۷-۲۲۱۳۷۰۸۶ فکس: ۲۲۱۳۷۰۸۴

فهرست مطالب

۱- مقدمه ۳

۲- مشخصات دینامیکی جداسازهای آونگی ۴

۳- مدلسازی جداسازهای اصطکاکی آونگی ۵

۴- مشخصات مقاومتی جداسازهای اصطکاکی ۷

۴-۱- خصوصیات پیچشی ۷

۴-۲- مقاومت فشاری جداساز ۷

۴-۳- سختی فشاری ۹

۵-انواع جداسازهای اصطکاکی آونگی ۱۰

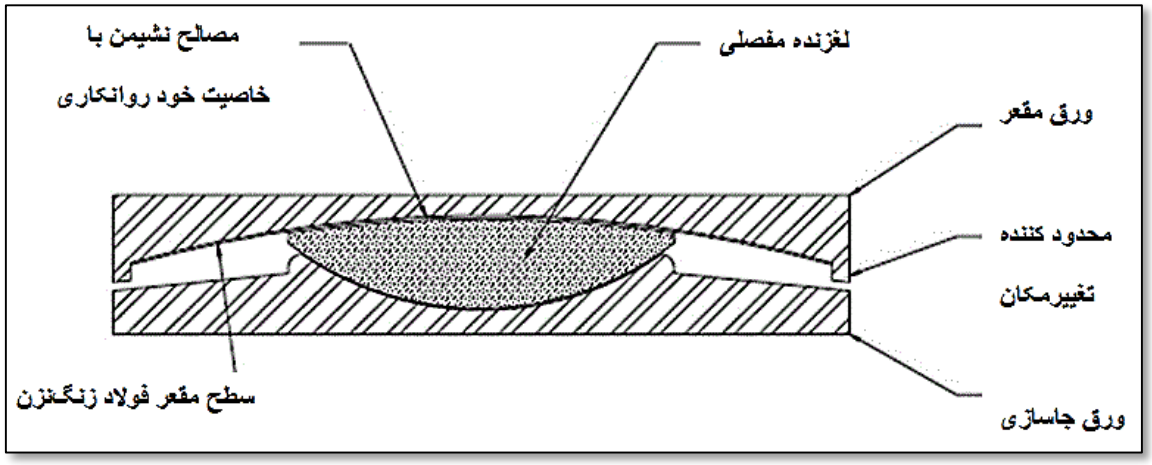
۵-۱- جداسازهای اصطکاکی آونگی ساده ۱۰

۵-۲-جداسازهای اصطکاکی آونگی دوگانه ۱۱

۵-۳-جداسازهای اصطکاکی آونگی سه گانه ۱۴

۱- مقدمه

سیستم جداساز اصطکاکی آونگی[۱] توسط ویکتور زایاس در سال ۱۹۸۵ ابداع شده است. این سیستم با کاهش بارهای جانبی و حرکات لرزشی انتقال یافته به سازه، می‌تواند از سازه و محتویات آن در برابر زلزله‌های شدید محافظت کند، خصوصا کاربرد آن قابلیت استفاده در برابر لرزه‌های حوزه نزدیک به گسل و در نواحی با خاک متوسط را دارا می‌باشد.



شکل ۱: مقطع جداساز اصطکاکی آونگی

جداسازهای اصطکاکی آونگی از خصوصیات آونگ برای افزایش دوره تناوب سازه و جلوگیری از تشدید نیروهای زلزله استفاده می‌کنند. دوره تناوب این جداساز به سادگی با انتخاب شعاع انحنای سطح مقعر بدست می آید و مستقل از جرم سازه می‌باشد. در این جداساز حرکات پیچشی سازه به حداقل ممکن می‌رسد، زیرا مرکز سختی جداسازها بطور اتوماتیک در محل مرکز جرم سازه قرار می‌گیرد.

این جداسازها دارای خواص تطبیق‌پذیری هستند که می‌تواند پاسخگوی نیازهای متفاوت ساختمان‌ها، پل‌ها و تجهیزات صنعتی باشد. دوره تناوب، ظرفیت بار قائم، میرائی، ظرفیت تغییرمکان، و ظرفیت کششی جداساز می‌توانند بصورت مستقل انتخاب شوند. در این جداسازها دوره تناوب دینامیکی از ۱ تا ۵ ثانیه، و ظرفیت تغییر مکان تا ۱۵۰ سانتی‌متر می‌تواند فراهم شود. همچنین تأمین نیروی اصطکاک دینامیکی از ۳ تا ۲۰ درصد وزن سازه امکان‌پذیر است. میرائی موثر در محدوده ۱۰ تا ۴۰ درصد می‌باشد. هر جداساز می‌تواند بار قائمی تا حدود ۱۵۰۰۰

---

[۱] *Friction Pendulum System*

تن و بار کششی تا حدود ۱۰۰۰ تن را - به شرط استفاده از جزئیات خاص- تحمل کند. خواص چندگانه جداساز-های اصطکاکی آونگی اجازه می‌دهد تا طراحی جداسازی لرزه‌ای برای بهترین عملکرد و کمترین هزینه ساخت بهینه شود.

۲- مشخصات دینامیکی جداسازهای آونگی

عملکرد جداسازهای لرزه‌ای اصطکاکی آونگی بر اساس یک روش ابتکاری است که حرکت آونگی را ممکن می‌سازد. هندسه و جاذبه مشخصات دینامیکی مطلوب را ایجاد می‌کنند و نتیجه آن یک پاسخ لرزه‌ای ساده و پایدار است.

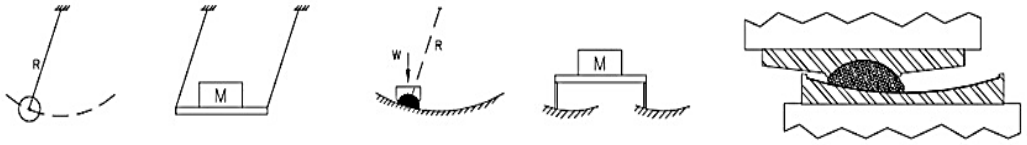
دوره تناوب جداساز بوسیله انتخاب شعاع انحنای سطح مقعر، R، کنترل می‌شود. زمان تناوب طبیعی ارتعاش یک سازه صلب که بر روی جداسازهای اصطکاکی آونگی قرار دارد با رابطه (۱) تعریف می‌شود.

$$T = ۲\pi\sqrt{\frac{R}{g}} \qquad (۱)$$

که در آن g شتاب گرانشی زمین است. در زلزله‌های خفیف که نیروهای زمین‌لرزه پایین‌تر از سطح نیروی اصطکاک هستند، سازه با جداساز آونگی اصطکاکی همانند یک سازه معمولی، با زمان تناوب جداسازی نشده ارتعاش می‌کند. زمانی‌که این نیرو از سطح نیروی اصطکاک تجاوز کند، پاسخ سازه با زمان تناو۶ب جداسازی شده تعیین خواهد شد و پاسخ دینامیکی و میرائی بوسیله مشخصات جداسازها کنترل می‌شود.

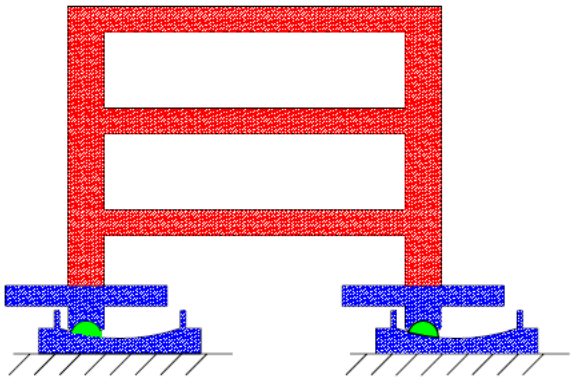
جداساز اصطکاکی آونگی دارای انطباق‌پذیری برای رسیدن به گستره وسیعی از مشخصات می‌باشد. با در نظر گرفتن زمان تناوب لغزشی در حدود ۲ تا ۳ ثانیه، برش پایه کاهش و تغییر مکان افزایش می‌یابد. تغییر ضریب اصطکاک از ۰/۱ به ۰/۰۵ باعث کاهش بیشتر در برش پایه و افزایش بیشتر تغییر مکان می‌شود.

در شکل (۲) عملکرد این جداسازها بصوت شماتیک نمایش داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌کنیم مجموعه نیروی وزن ساختمان در تکیه‌گاه و سطح مقعر با شعاع انحنای R همانند جرم متمرکز در انتهای یک ریسمان به طول R در آونگ می‌باشد. بنابراین عملکرد جداساز در حالتی که سطح مقعر پایین باشد یا بالا یکسان است.



حرکت آونگی — حرکت آونگی لغزشی — عملکرد جداگر

$$K = W/R \qquad T = 2\pi\sqrt{\frac{R}{g}}$$



شکل ۲: اصول عملکرد جداساز اصطکاکی آونگی

۳- مدلسازی جداسازهای اصطکاکی آونگی

پارامترهای اصلی در مدلسازی و طراحی جداسازهای اصطکاکی آونگی بر اساس معادلات (۳-۲) تا (۳-۷) محاسبه می‌شود.

$$K_i = \frac{\mu W}{D_y} \quad (D_y \approx ۲,۵\, mm) \qquad (۲)$$

$$K_{fps} = \frac{W}{R} \qquad (۳)$$

$$F = \mu W + \left[\frac{W}{R}\right] D \qquad (۴)$$

$$K_{eff} = \frac{F}{D} \qquad (۵)$$

$$T_{eff} = ۲\pi\sqrt{\frac{W}{K_{fps} g}} = ۲\pi\sqrt{\frac{R}{g}} \qquad (۶)$$

$$B_{eff} = \frac{۲}{\pi}\left[\frac{\mu}{\mu + D/R}\right] \qquad (۷)$$

پارامترهای موجود در این معادلات به شرح زیر می‌باشد:

K_i : سختی اولیه

B_{eff} : میرائی موثر

K_{fps} : سختی جداساز اصطکاکی آونگی

D :تغییر مکان طرح (جابجایی از وضعیت اولیه)

F : نیروی برشی انتقال یافته از جداساز

μ : اصطکاک دینامیکی

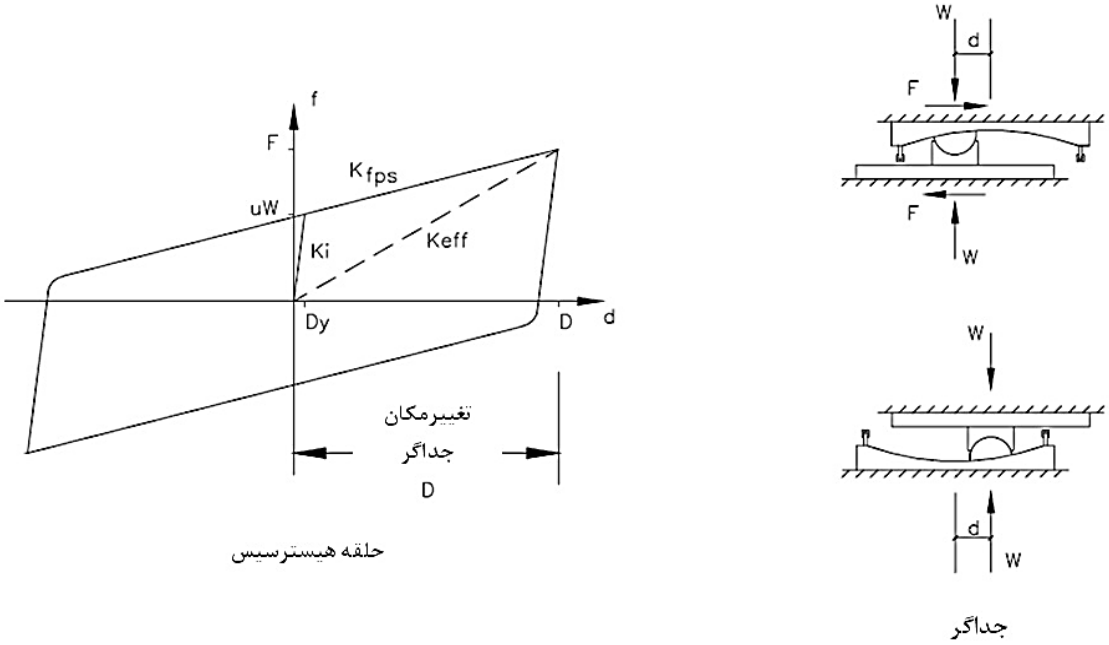
K_{eff} : سختی موثر

W: بار قائم بر روی جداساز

T_{eff}: زمان تناوب موثر جداساز

R : شعاع انحنا

در شکل (۳) این پارامترها را بصورت شماتیک نمایش می‌دهد.



شکل ۳: مدلسازی جداسازهای آونگی اصطکاکی

جداساز اصطکاکی آونگی باید بصورت یک المان دو خطی در نرم‌افزارها مدل سازی شود. ضریب اصطکاک دینامیکی (μ) معمولا بین ۳ تا ۱۰٪ می‌باشد. مقادیر استاندارد شعاع انحنا (R) و زمان تناوب موثر (T_{eff}) متناظر با آن در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: مقادیر استاندارد شعاع انحنا (R) و زمان تناوب موثر (T_{eff}) متناظر با آن

شعاع (سانتیمتر)	۹۹	۱۵۵	۲۲۴	۳۰۵	۳۹۶	۶۲۰
زمان تناوب موثر (ثانیه)	۱/۹۹۶	۲/۴۹۸	۳/۰۰۳	۳/۵۰۴	۳/۹۹۳	۴/۹۹۶

طراحی لغزنده مفصلی شبه سیلندری موجب فشار تقریباً یکنواختی زیر لغزنده مفصلی می‌شود. این توزیع فشار نسبتاً یکنواخت حرکت لغزشی- چسبنده را کاهش داده و از تمرکز تنش فشاری در جداساز جلوگیری می‌کند.

بر طبق رابطه (۳) سختی جانبی بازگرداننده جداساز اصطکاکی آونگی برابر با $K=W/R$ می‌باشد، که در آن W وزن سازه و R شعاع انحنای سطح مقعر است که همان سختی یک آونگ ساده است. این حقیقت که دوره تناوب جداساز اصطکاکی آونگی مستقل از جرم سازه است یک مشخصه مهم است که در تعیین پاسخ سازه امتیازاتی دارد.

دوره تناوب مطلوب به سادگی با انتخاب شعاع انحنای سطح مقعر بدست می‌آید. اگر سازه سبک و سنگین باشد، همچنین اگر وزن سازه تغییر کند یا با آنچه فرض شده است متفاوت باشد، دوره تناوب تغییری نمی‌کند.

میرائی با اصطکاک دینامیکی هیسترسیس کنترل می‌شود، که بصورت اتوماتیک برای عدم قطعیت‌ها یا تغییر در جرم سازه تنظیم می‌شود. توانایی جبران خودکار عدم قطعیت‌ها و تغییر در جرم سازه توسط جداساز سبب افزایش اطمینان می‌شود.

٤- مشخصات مقاومتی جداسازهای اصطکاکی

٤-١- خصوصیات پیچشی

خصوصیات آونگی این جداسازها باعث می‌شود در حداقل کردن اثرات مخرب حرکات پیچشی که باعث خروج از مرکزیت‌های اتفاقی جرم می‌شود، بسیار موثر باشند. سختی دینامیکی جداسازها به طور مستقیم با وزن سازه متناسب است، بنابراین همواره مرکز سختی جداسازها در محل مرکز جرم قرار دارد.

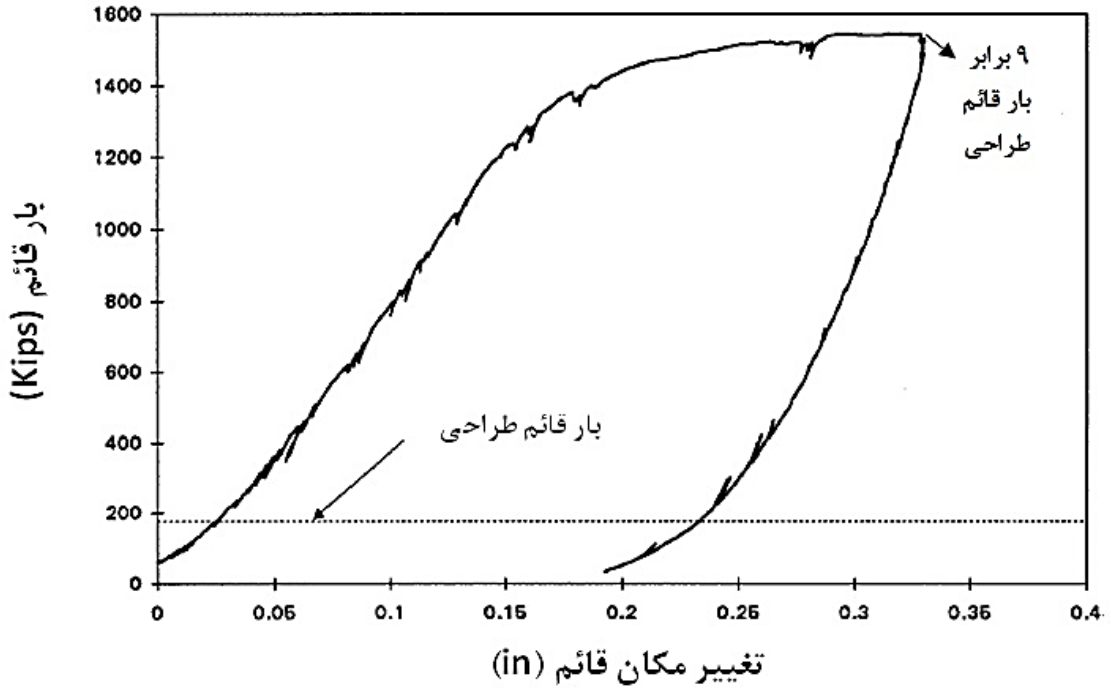
از آنجا که نیروی اصطکاک نیز با وزن سازه متناسب است، مرکز نیروهای اصطکاکی هم در مرکز جرم سازه قرار دارد. بنابراین نیروهای سختی و اصطکاکی بصورت اتوماتیک برای خروج از مرکزیت های اتفاقی جرم تنظیم می‌شوند.

آزمایش‌های میز لرزان نشان داده است که این خصوصیات پیچشی جداساز، بطور مشخصی حرکات پیچشی و تنش ناشی از آن در سازه را کاهش می‌دهد، ایمنی سازه را بالا برده و تغییرمکان جداسازها را کاهش می‌دهد. تغییرمکان کمتر جداساز ابعاد درز لرزه‌ای مورد نیاز و مخارج آن را کاهش می‌دهد.

٤-٢- مقاومت فشاری جداساز

جداسازهای اصطکاکی مقاومت و پایداری بیشتری نسبت به سایر جداسازهای لرزه‌ای دارند. یکی از جداساز-های استفاده شده در دیوان استیناف آمریکا که در سانفرانسیسکو مورد استفاده قرار گرفته است، در آزمایش

بارگذاری فشاری تحت نیروی ۹ برابر بار قائم طراحی در تغییرمکان جانبی طراحی و در موقعیت مرکزی قرار گرفته است. سپس جداساز تحت آزمایش‌های چرخه‌ای فشاری و برشی قرار گرفته است، و نتایج نشان داد که جداساز توانایی عملکرد خود را برای سختی جانبی، میرائی، و ظرفیت بار قائم حفظ می‌کند.



شکل ۴: آزمایش بار فشاری در تغییرمکان جانبی برابر با ۲۸ سانتی‌متر

تک تک جداسازها می توانند بار سرویس ۱۵۰۰۰ تن را تحمل کنند. علاوه بر این مقاومت جداسازها در برابر بارهای بزرگتر از بار سرویس از ضریب ایمنی بالایی برخوردار است. حرکات قائم زلزله و لنگرهای واژگونی لرزه‌ای ضریب ایمنی بارهای قائم جداسازها را به یک ملاحظه ایمنی حیاتی و بحرانی تبدیل می‌کند. جداسازهایی که در برابر لنگر واژگونی لرزه‌ای مقاومت می‌کنند بارهای قائم ماکزیمم را زمانیکه در تغییرشکل جانبی حداکثر قرار دارند، تجربه می‌کنند. جداسازها در حالیکه تغییرشکل جانبی داده‌اند، باید بار قائم اضافی ناشی از حرکات قائم زلزله را نیز تحمل کنند. علاوه بر این سختی قائم کاهش یافته جداساز که در آن تغییرشکل جانبی طرح اتفاق افتاده، سبب افزایش دامنه حرکات و بار قائم بیشتر می‌شود. حرکات قائم زمین لرزه می‌تواند بار قائم جداساز را با ضریب ۲ یا بیشتر افزایش دهد و باید در طراحی در نظر گرفته شود. در زلزله نورثریج، دامنه‌های دینامیکی بیشتر از ۲ در حرکات قائم سازه‌های جداسازی شده با جداسازهای الاستومری مشاهده شد.

بارهای قائم جداساز بعلت حرکات قائم زمین لرزه معمولا بطور صریح در آیین‌نامه‌ها به حساب آورده نمی-شوند. برای مقاومت کافی در برابر حرکات قائم و سایر بارهای ناشی از عدم قطعیت، توصیه می‌شود که جداسازها

باید ضریب ایمنی مقاومت حداقل۱/۲ برای بارهای فشاری و تحت حداکثر تغییرشکل جانبی را تأمین کنند. این ضریب برای جداسازهای الاستومری توسط آیین‌نامه *UBC* برابر ۱ توصیه می‌شود. تحت ترکیب حرکات قائم و جانبی زمین‌لرزه، یک ضریب ایمنی مقاومت کم می‌تواند منجر به واژگونی و ریزش سازه در زلزله طرح شود. مهم‌ترین فرض ایمنی جانی در طراحی جداسازهای لرزه‌ای پایداری بارهای قائم در موقعیت تغییرشکل جانبی است. در این موقعیت جداساز تحت حداکثر بار و لنگر ناشی از خروج از مرکزیت قرار دارد.

٤-۳- سختی فشاری

سختی فشاری جداسازهای اصطکاکی آونگی بطور معمول در حدود ۷ تا ۱۰ برابر بزرگ‌تر از جداسازهای الاستومری است. جداسازهای اصطکاکی آونگی سختی قائم خود را در تغییرشکل جانبی طرح حفظ می‌کنند. در جداسازهای الاستومری معمولی سختی قائم در تغییرمکان طرح در مقایسه با حالت تغییرشکل نداده، به حدود نصف می‌رسد. بنابراین، سختی قائم که در مقابل لنگر واژگونی مقاومت می‌کند در جداسازهای اصطکاکی ۱۴ تا ۲۰ برابر بزرگ‌تر از جداسازهای الاستومری می‌باشد. این سختی قائم نزول سختی دیوار برشی سازه بعلت حرکت گهواره‌ای حول پایه را به حداقل می‌رساند، و نیاز به تحمل نیروی برکنش[۱] در جداساز را کاهش می‌دهد و همچنین نیاز به دیوار و خرپای توزیع را در پایه ساختمان به منظور افزایش بازوی لنگر مقاوم در برابر لنگر واژگونی را کاهش می‌دهد. این عوامل بطور مشخصی هزینه استفاده از جداساز را کاهش می‌دهند.

همچنین سختی قائم بیشتر این نوع جداسازها منجر به دوره تناوب قائم کمتر می‌شود، تا در مقابل دامنه حرکات قائم دینامیکی در معرض خطر کمتری باشد. دوره تناوب قائم یک جداساز اصطکاکی آونگی معمولی تقریباً برابر ۰/۰۳ ثانیه می باشد. که طبق طیف طرح استاندارد ضریب بزرگنمایی دینامیکی آن در حدود ۱/۳ است. در صورتی‌که دوره تناوب قائم یک جداساز الاستومری معمولی در تغییرشکل جانبی طراحی تقریباً برابر ۰/۱ ثانیه و ضریب بزرگنمایی دینامیکی آن در حدود ۲ می باشد. ضریب بزرگنمایی دینامیکی کمتر برای جداساز اصطکاکی آونگی بارهای قائم ناشی از حرکات قائم زمین لرزه را کاهش داده و باعث بهبود پایداری بارهای قائم در مقایسه با جداسازهای الاستومری می‌شود.

---

[۱] *Uplift*

۵- انواع جداسازهای اصطکاکی آونگی

جداسازهای آونگی اصطکاکی را می‌توان در سه نوع طراحی و تولید کرد:

الف- جداسازهای اصطکاکی آونگی ساده[۱]؛

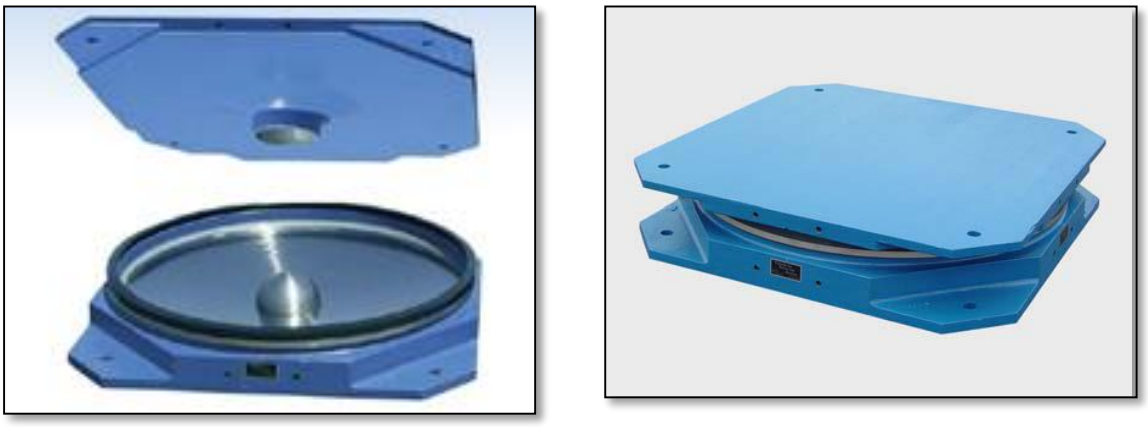
ب- جداسازهای اصطکاکی آونگی دوگانه[۲]؛

پ- جداسازهای اصطکاکی سه‌گانه[۳]؛

۵-۱- جداسازهای اصطکاکی آونگی ساده

جداساز اصطکاکی آونگی ساده نوع اصلی و پایه‌ای جداساز اصطکاکی آونگی می‌باشد. لغزنده ساده بار قائم تکیه‌گاهی را در مرکز عضو سازه‌ای حساس به خروج از مرکزیت نگاه می‌دارد. این امر زمانی که یک سیستم سازه‌ای، در بالا یا پایین جداساز، حساس و دیگری غیر حساس باشد موجب کاهش چشمگیر هزینه به کارگیری جداسازها می‌شود. مثلا برای بکارگیری در حد فاصل ستون و پی می‌توان خروج از مرکزیت را به پی منتقل ساخت و ستون را تحت بارهای محوری حفظ کرد.

جداسازهای ساده دارای ارتفاع کمتری نسبت به سایر انواع می‌باشند که می تواند در بعضی موارد نصب را راحت‌تر نماید. جداسازهای آونگی ساده را می توان به همراه جزئیاتی طراحی کرد که نیروی برکنش را تحمل نمایند.



شکل ۵: جداساز اصطکاکی آونگی ساده

---

[۱] *Friction Pendulum(FP)*

[۲] *Double Concave Friction Pendulum(DCFP)*

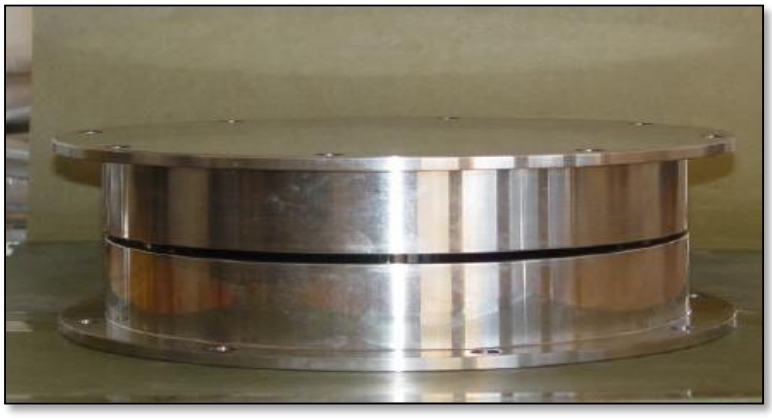
[۳] *Triple Friction Pendulum (TFP)*

شکل ۶: جداساز اصطکاکی آونگی ساده با ظرفیت باربری قائم ۱۰۰۰۰ تن

۵-۲- جداسازهای اصطکاکی آونگی دوگانه

ایده نشیمن اصطکاکی آونگی دوگانه اولین ایده ثبت شده برای سیستم جداسازی لرزه‌ای می‌باشد که توسط جولز تویلن در سال ۱۸۷۰ برای یک بلبرینگ غلطان دوگانه مطرح شد. در حدود ۱۳۰ سال بعد ین ایده بطور کاربردی برای سیستم جداسازی لرزای توسط هیاکودا در سال ۲۰۰۱ در ژاپن استفاده شد.

در این پژوهش از جداساز اصطکاکی دارای سطح لغزشی با شعاع انحنای و ضرایب اصطکاک یکسان استفاده کرد. کنستانتینو در سال ۲۰۰۴ این جداساز را بطور تحلیل و تجربی بررسی نمود. در شکل‌های (۷) و (۸) تصاویری از جداساز آزمایش شده نمایش داده شده است.

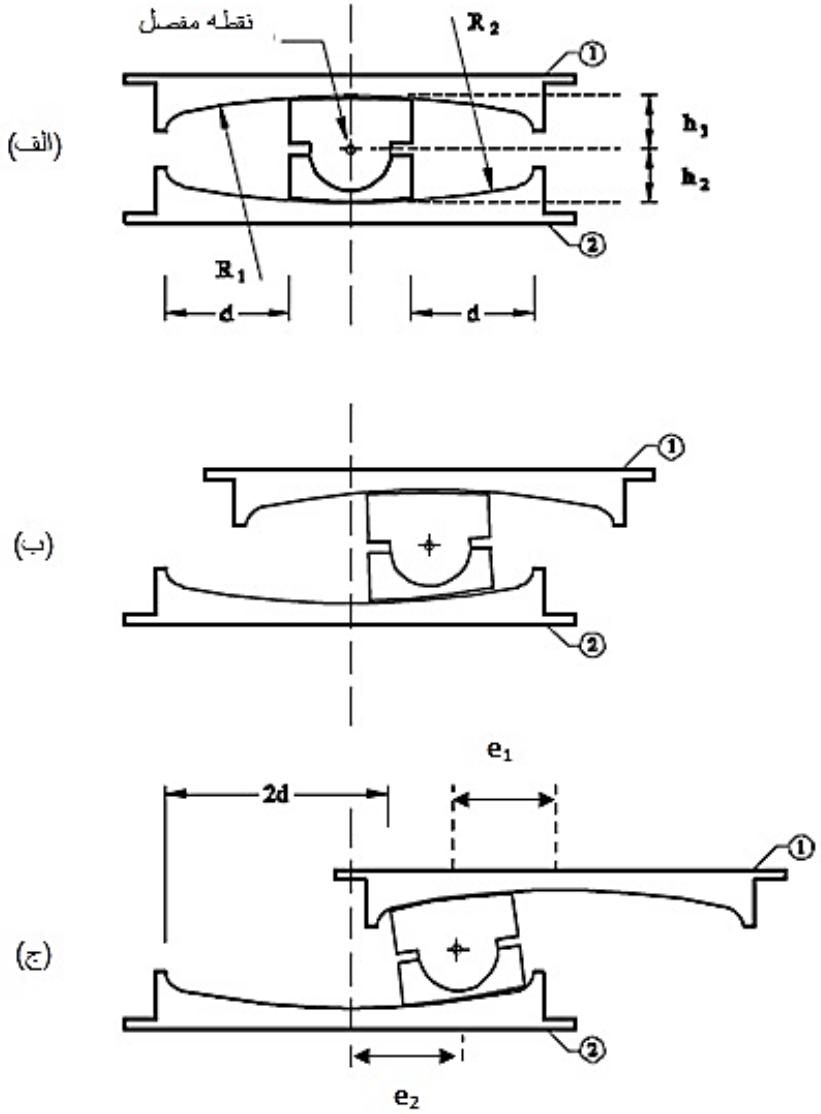


شکل ۷: جداساز اصطکاکی آونگی دوگانه

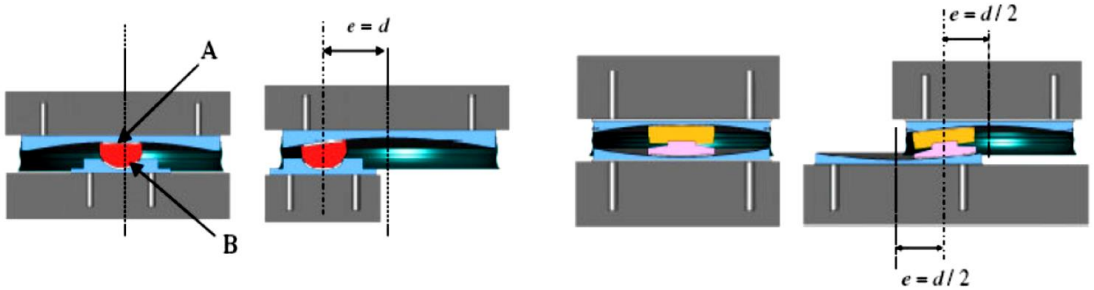
شکل ۸: اجزای داخلی جداساز اصطکاکی آونگی دوگانه

جداساز اصطکاکی آونگی دوگانه با تقسیم سطوح حرکت به دو سطح مشابه موجب کاهش تغییر مکان‌های جانبی جداساز و تقلیل آن به نصف می‌شوند. با استفاده از این نوع جداساز، هم سازه و هم قسمت زیرین آن تحت نیروهای خروج از مرکزیت قرار می‌گیرند (شکل ۹).

در شکل (۱۰) خروج از مرکزیت انتقال یافته در جداساز آونگی ساده و دوگانه بصورت شکاتیک نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در جداساز اصطکاکی آونگی ساده با انتخاب محل اتصال لغزنده مفصلی به سازه یا پی می‌توان تعیین کرد که لنگر ناشی از خروج از مرکزیت به سازه یا پی منتقل شود.



شکل ۹: مقطع جداساز اصطکاکی آونگی دوگانه، الف) حالت بدون تغییرمکان، ب) حرکت تنها بر روی سطح پایین، ج) تغییرمکان حداکثر

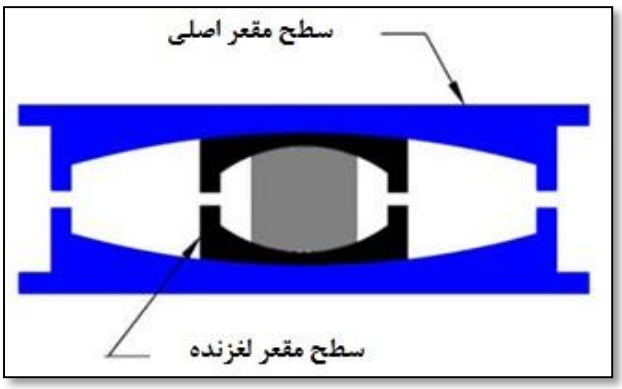


شکل ۱۰: خروج از مرکزیت انتقال یافته در جداساز آونگی ساده و دوگانه

با تغییر ضریب اصطکاک سطوح بالا و پایین جداساز می‌توان ترتیبی اتخاذ نمود که هر یک از سطوح جداساز در یک سطح زلزله متفاوت وارد عمل شوند. برای مثال سطوح با ضریب اصطکاک ۲٪ در زلزله با دوره بازگشت ۲۰۰ ساله . سطوح با ضریب اصطکاک ۵٪ در زلزله با دوره بازگشت ۵۰۰ ساله وارد عمل شوند.

۵-۳- جداسازهای اصطکاکی آونگی سه‌گانه

جداساز آونگی سه‌گانه، حالت تعمیم‌یافته جداساز آونگی دوگانه می‌باشد که سه آونگ را با هم بصورت سری بکار می‌گیرد و مشخصات هر کدام برای بهینه کردن پاسخ لرزه‌ای سازه در زمین لرزه‌های با قدرت و فرکانس‌های متفاوت انتخاب می‌شود (شکل ۱۱).

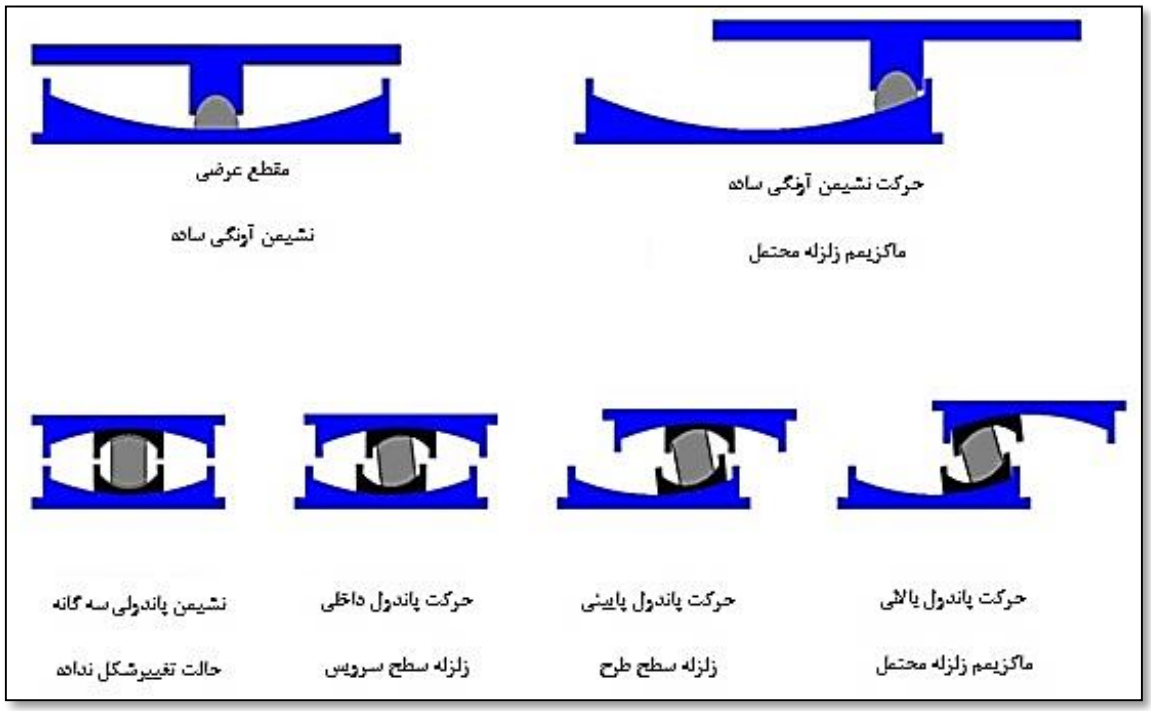


شکل ۱۱: جداساز آونگی سه‌گانه

این نوع جداساز دارای مزایای زیادی از جمله عملکرد بهتر لرزه‌ای ، ابعاد و هزینه ساخت کمتر در قیاس با تکنولوژی عادی جداسازی لرزه‌ای است. خصوصیات هر یک از سه آونگ طوری انتخاب می‌شود که به ترتیب در زلزله‌های با قدرت متفاوت فعال شوند. با افزایش حرکات زمین تغییرشکل جداساز نیز افزایش می‌یابد. در تغییرشکل‌های بزرگتر طول موثر آونگ و میرائی آن افزایش یافته، که در نتیجه آن نیروهای لرزه‌ای و تغییرشکل-های جداساز کاهش می‌یابد.

این جداساز از یک لغزنده تشکیل شده که در امتداد دو سطح مقعر کروی می‌لغزند. مشخصات داخلی جداساز بطور معمول طوری انتخاب می‌شود که شتاب‌های وارد به سازه کاهش داده شود و درصد مشارکت مدهای بالاتر به حداقل ممکن رسیده و نیروی برش سازه که در سطح زمین لرزه بهره‌برداری می‌باشد نیز کاهش پیدا کند. دو لغزنده محدب در امتداد دو سطح مقعر می‌لغزند که شامل دو جداساز آونگی مستقل بیشتر می‌باشد.

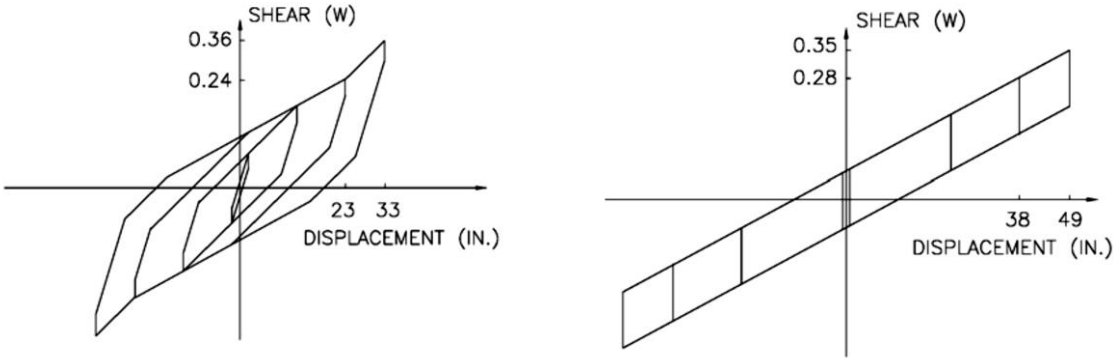
مشخصات آونگ دوم نیز بطور معمول به گونه‌ای انتخاب می‌شود که نیروهای برشی سازه را که در هنگام زمین‌لرزه در پایه بوجود می‌آیند به حداقل برساند که منجر به کاهش هزینه ساخت خواهد شد. خصوصیات آونگ سوم در راستای حداقل کردن تغییرشکل‌های جداساز تحت حداکثر زمین لرزه محتمل انتخاب می‌شود. این امر موجب کاهش ابعاد و هزینه جداسازها و همچنین کاهش تغییرشکل و در نتیجه کاهش درز لرزه‌ای سازه خواهد شد. شکل ۱۲ بصورت شماتیک تفاوت بین پاندول ساده و پاندول سه‌گانه را نمایش می‌دهد.



شکل ۱۲: مقایسه بین ابعاد و پاسخ به حرکات لرزه‌ای در جداساز آونگی ساده و سه‌گانه

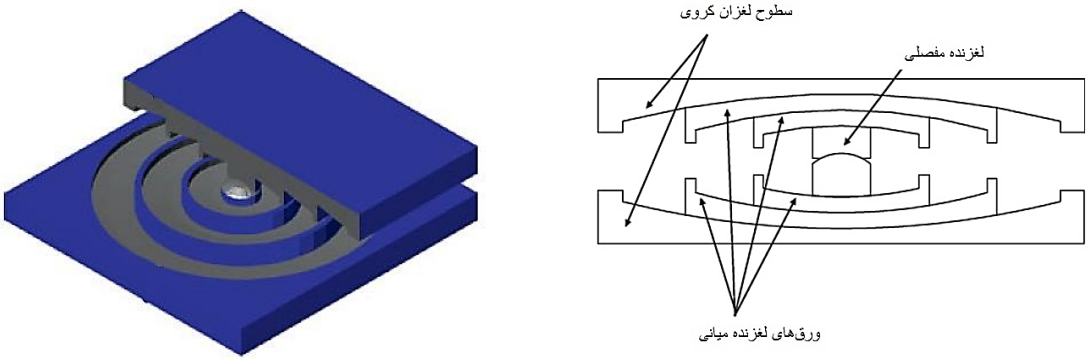
جداساز آونگی ساده دارای سختی جانبی، ضریب اصطکاک و دوره تناوب ثابت برای تمام سطوح تغییرشکل و حرکت زمین لرزه می‌باشد. در جداساز آونگی سه‌گانه با قوی‌تر شدن زمین‌لرزه سه مکانیسم آونگی به ترتیب فعال می‌شوند. تغییرشکل‌های کوچک، فرکانس‌های بالای حرکت زمین بوسیله ضریب اصطکاک کم و دوره تناوب کوتاه پاندول داخلی جذب می‌شود. برای زمین‌لرزه‌های قوی‌تر در سطح زلزله طرح، ضریب اصطکاک و دوره تناوب افزایش پیدا کرده و منجر به کاهش تغییرشکل جداساز و برش پایه کمتر می‌شود. برای شدیدترین

زمین‌لرزه محتمل ضریب اصطکاک و سختی جانبی افزایش پیدا کرده ومنجر به کاهش تغییرشکل جداساز می-شود. زمانی که جداساز برای حداکثر زلزله محتمل طراحی می‌شود، ابعاد طرح جداساز آونگی سه‌گانه تقریباً ۶۰٪ جداساز آونگی ساده معادل خواهد بود. نمودارهای چرخه هیترزیس این جداساز ها در شکل ۱۳ نمایش داده شده است.



شکل ۱۳: نمودار چرخه هیسترزیس جداسازهای اصطکاکی الف- آونگی ساده، ب- آونگی سه‌گانه

جداسازهای اصطکاکی آونگی سه‌گانه حالت تعمیم یافته جداساز آونگی دوگانه می باشد. بطور کلی به این حالت از جداسازهای اصطکاکی آونگی، سیستم جداساز اصطکاکی آونگی چندگانه[۱] گفته می‌شود. تسای، لین و سو در سال ۲۰۱۰ در پژوهش تحلیلی خود فرمول‌بندی رفتار این سیستم را ارائه کردند. این جداساز در شکل (۱۴) نمایش داده شده است. مهمترین هدف از ایجاد سطوح متعدد کاهش ابعاد جداساز، کاهش لنگر ناشی از خروج از مرکزیت ستون در حالت دوگانه و همچنین ایجاد سطوح لغزش با سختی و ضریب اصطکاک مختلف برای یک عملکرد مشخص در سطوح مختلف زلزله می‌باشد.



شکل ۱۴: جداساز اصطکاکی آونگی چندگانه

---

[۱] *Multiple Friction Pendulum System (MFPS)*