تحلیل و طراحی لرزه‌ای اجزای غیرسازه‌ای

مهدی علیرضایی، دکترای سازه (M.Alirezaei@iiees.ac.ir)

۱. مقدمه

مشاهدات موجود از زلزله‌های گذشته مانند زلزله اخیر در شهرستان ورزقان و اهر نشان داد، عدم توجه طراحان به مسئله طراحی اجزای غیرسازه‌ای می‌تواند باعث تخریب این قسمت‌های الحاقی به سازه شود. در بسیاری از سازه‌های مشاهده شده آسیب‌های موجود در اسکلت سازه زیاد نبوده ولیکن خرابی‌های زیادی در اجزای غیرسازه‌ای آنها دیده شد که این تخریب‌ها می‌توانند باعث خسارات جانبی و مالی فراوان شود. ضوابط مربوط به قطعات الحاقی و اجزای غیرساختمانی[۱] در ساختمان، مربوط به اجزایی است که معمولاً رفتار دینامیکی آنها باعث تغییر قابل ملاحظه‌ای در بازتاب کل سازه نمی‌شود. ضرایب نیروهایی که برای اینگونه سازه‌ها به کار می‌رود، معمولاً بزرگتر از ضرایبی هستند که برای طراحی کل ساختمان مورد استفاده قرار می‌گیرند. اجزای غیرسازه‌ای را می‌توان به سه دسته کلی تقسیم نمود:

- ✓ اجزای مربوط به معماری بنا
- ✓ تاسیسات مکانیکی و الکتریکی ساختمان
- ✓ محتویات درون ساختمان

به عنوان مثال، آسانسورها، پلکان‌ها، جان‌پناه‌ها، تیغه‌ها، فرودگاه هلیکوپتر و آویزهای سقف را می‌توان جزو دسته اول و مخزن‌های ذخیره، لوله‌های تحت فشار، سیستم‌های لوله‌کشی، پله‌های برقی[۲]، داکت‌ها، دودکش‌ها، آنتن‌ها، تابلوها، سیستم‌های کنترل آتش‌سوزی، سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی جزو دسته دوم و کتابخانه‌ها، کابینت‌ها و بقیه اجزای زینتی درون ساختمان را می‌توان به عنوان دسته سوم در نظر گرفت. این اجزا به استثنای حالاتی که از مصالح شکل‌پذیر ساخته شده و یا توسط این نوع مصالح به ساختمان وصل شده‌اند، دارای خواص جذب انرژی و افزونگی نبوده و بنابراین ممکن است استفاده از نظریه کاهش نیروها در آنها منطقی نباشد.

۲. اهمیت اجزای غیرسازه‌ای

با وجودی که این اجزاء جزو اعضای اصلی در سازه نیستند اما به لحاظ خساراتی که ممکن است در حین زلزله ایجاد نمایند، بایستی مورد رسیدگی قرار گیرند. همچنین عدم کارایی سیستم‌های اورژانسی بعد از زلزله قابل قبول نمی‌باشد. تجربه زلزله‌های گذشته نشان داده است که ایجاد خرابی در اجزای غیرسازه‌ای و واژگونی آنها می‌توان اختلالاتی در امر کمک رسانی و کار نیروهای امداد، بعد از زلزله داشته باشد. به عنوان مثال در زلزله بم در استان کرمان تعدادی از بیمارستان‌ها با وجود عدم خرابی، بعد از وقوع زلزله قادر به ارائه خدمات درمانی نبودند. علت این امر شکسته شدن خطوط لوله و مخازن نگهداری آب، خرابی در سیستم‌های گرمایش و تهویه مطبوع بود. در برخی از موارد نیز خرابی اجزای غیرسازه‌ای ممکن است باعث مرگ

---

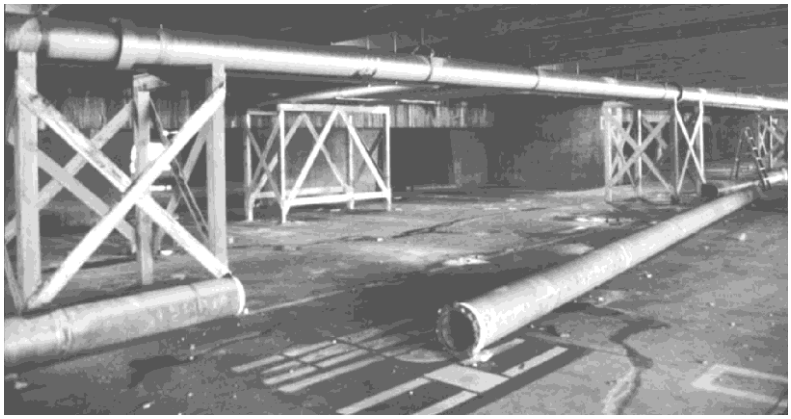
[۱] Nonstructural Elements

[۲] Escalators

افراد گردد و یا تحمیل خسارات مالی فراوانی گردد. خرابی جان‌پناه‌ها، تابلوها و شیشه‌ها، واژگونی تجهیزات سنگین، کتابخانه‌ها، قطع لوله‌های حاوی مواد سمی می‌تواند باعث ایجاد خسارات جانی گردد.

شکل ۱- خرابی در یک تابلو تبلیغاتی در حین زلزله کوبه(۱۹۹۵)

شکل‌های ۱ تا ۵ نمونه‌هایی از خرابی‌ها و خسارات ایجاد شده برای اجزای غیرسازه‌ای در حین چند زلزله را نشان می‌دهد. براحتی دیده می‌شود که هر یک از این خسارات می‌تواند باعث ایجاد خسارات جانبی نیز گردد.



شکل ۲- خرابی در سیستم لوله‌کشی ساختمان

شکل ۳- شکست در خرپشته یک بیمارستان در حین زلزله مکزیک (۱۹۸۵)

شکل ٤- خرابی در نمای یک ساختمان در حین زلزله ورزقان و اهر (۱۳۹۱)

شکل ۵- خرابی در اثر عدم اتصال صحیح نما به دیوار در حین زلزله بم (۱۳۸۲)

۳. مشخصات کلی

برخی از مشخصات فیزیکی باعث آسیب‌پذیری اجزای ناسازه‌ای در ساختمان‌ها در برابر زلزله می‌شوند. برخی از این مشخصات به صورت زیر می‌باشند.

- بیشتر اجزای ناسازه‌ای در نقاط بالای سازه قرار داده می‌شوند. این امر باعث می‌شود که این اجزاء بطور کلی تحت حرکت زمین نباشند و حرکت آنها در حین زلزله توسط پاسخ دینامیکی سازه تشدید می‌شود.
- وزن این اجزاء ناسازه‌ای در برابر وزن سازه سبک و دارای سختی کمتری نسبت به سختی سازه می‌باشد و وقتی به سازه متصل می‌شوند، ممکن است فرکانس‌های طبیعی این اجزا به فرکانس‌های طبیعی سازه نزدیک شده و در نهایت تشدید برای آنها ایجاد گردد.
- ممکن است نسبت میرایی این اجزاء در برابر میرایی سازه مقدار پایین‌تر باشد و این کمبود میرایی در این المان‌ها شرایط را برای ایجاد تشدید فراهم خواهد می‌کند.
- این اجزاء ممکن است در بیش از یک نقطه به سازه متصل شده و تحت تحریک تکیه‌گاه‌های مختلف قرار گیرند.

مشخصات فیزیکی شرح داده شده در فوق، بدین معنی نیستند که اجزای ناسازه‌ای مستعد خرابی در حین زلزله هستند. بلکه بدین معنی است که رفتار و پاسخ این اجزاء در برابر زلزله با رفتار و پاسخ ساختمان متفاوت بوده و منطبق با رفتار شناخته شده ساختمان‌های متعارف نیست. برخی از این مشخصات را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

- پاسخ یک المان ناسازه‌ای به خصوصیات دینامیکی و پاسخ سازه‌ای که به آن متصل می‌شود وابسته بوده و این امر مستقل از مشخصات جنبش زمین می‌باشد.
- پاسخ یک المان ناسازه‌ای به میزان زیادی وابسته به مکان قرار گیری این المان‌ها در داخل ساختمان می‌باشد. بدین معنی که قرار گرفتن این اجزاء در ترازهای مختلف باعث بروز پاسخ‌های متفاوتی خواهد شد.

- المان‌های ناسازه‌ای دارای اندرکنش متقابلی با اجزای سازه می‌باشند. بطوری که حرکت یک المان ناسازه‌ای می‌تواند حرکت سازه را نیز دچار تغییر کند.
- وقتی المان‌های ناسازه‌ای به سازه‌ای در چند نقطه متصل می‌شوند، این اجزاء با حرکت‌های متفاوتی که غیر همفاز می‌باشند روبرو شده و این خود سبب پیچیدگی رفتار آنها می‌شود.
- از آنجایی که میرایی موجود در اجزاء ناسازه‌ای کمتر از میرایی سازه می‌باشد، بنابراین رفتار کلی این دو سیستم پیچیده شده و میرایی را نمی‌توان یکنواخت در نظر گرفت.
- با توجه به مسائل مطرح شده در فوق، ممکن است فرکانس اصلی اجزاء ناسازه‌ای نزدیک فرکانس اصلی سازه اصلی شده که این خود باعث ایجاد تشدید می‌شود.

۴. مدل‌سازی اجزاء ناسازه‌ای

همانطور که در قبل اشاره شد طیف وسیعی از اجزای ناسازه‌ای در یک ساختمان وجود دارند. بنابراین نباید انتظار داشت که یک روش کلی یا یک استاندارد پذیرفته شده برای مدلسازی اینچنین اجزایی وجود داشته باشد. لیکن برای مدلسازی این اجزا بایستی بر رفتار دینامیکی این اجزاء واقف بود. بطور کلی می‌توان مدلسازی این اجزاء را در سه بخش کلی تقسیم نمود: صلب، انعطاف پذیر و آویخته از سقف. در صورتی که جزء ناسازه به صورت صلب باشد، می‌توان آن را به صورت یک سیستم یک درجه آزادی با جرمی معادل جرم کلی المان و سختی معادل سختی تکیه‌گاه آن مدلسازی نمود. موتورهای نصب شده بر روی سقف‌های یک ساختمان توسط پیچ مثال‌هایی از این حالت می‌باشند. در حالتی که جزء ناسازه به صورت انعطاف پذیر رفتار می‌کند، بایستی آن را به صورت یک سیستم چند درجه آزادی با جرم و سختی توزیع شده مدلسازی نمود. این نوع مدلسازی تقریباً شبیه مدلسازی ساختمان است ولی در صورتی که جزء غیرسازه‌ای دارای چند تکیه‌گاه باشد می‌تواند با مدلسازی یک ساختمان معمولی متفاوت باشد. لوله‌ها و تابلوهای اعلان نمونه‌هایی از این نوع اجزاء غیر سازه‌ای هستند. در نهایت در صورتی که جزء غیر سازه‌ای به صورت آویز باشد، می‌توان آن را به صورت یک پاندول وارونه یک درجه آزادی در نظر گرفت. نوع اخیر اجزاء غیرسازه‌ای عموماً در نظر گرفته نمی‌شوند، چرا که خرابی آنها در حین زلزله بسیار معمولاً ناچیز است. لیکن در صورتی که حرکت شدید این اجزاء در حین زلزله ممکن باشد به اجزاء دیگر ضربه وارد کند (مانند لوسترها) بایستی حرکات نوسانی آنها بررسی شود.

۵. روش‌های تحلیل

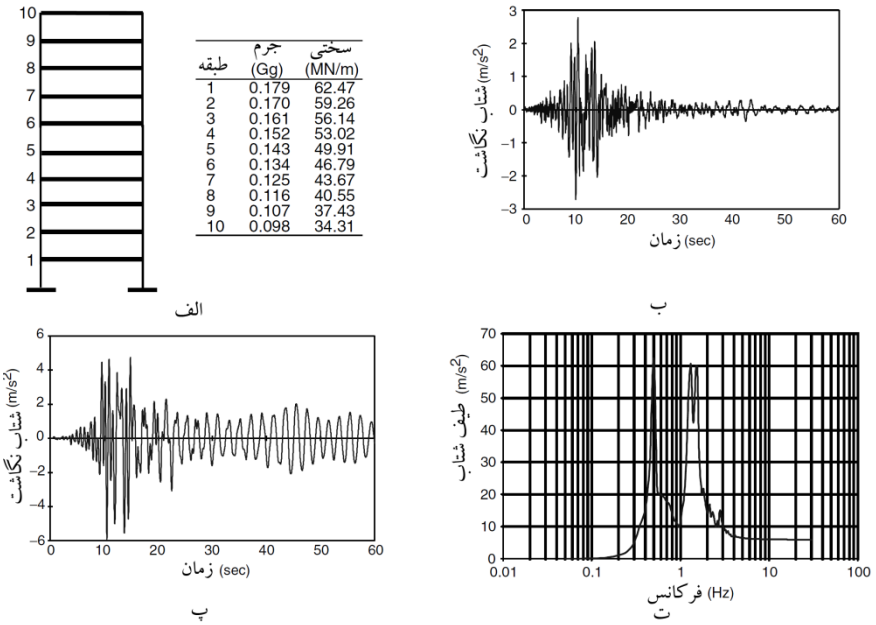
در سه دهه گذشته تلاش‌های زیادی در جهت بدست آوردن روش‌های مدلسازی اجزای غیرسازه‌ای به انجام رسیده است. اکثر این تحقیقات برای تجهیزات کنترل سیستم هسته‌ای، خطوط لوله و تجهیزات بحرانی به انجام رسیده است. روش‌های دقیق تحلیل اجزاء غیرسازه‌ای عموماً سخت و دشوار هستند. این سیستم‌ها عموماً دارای تعداد درجات آزادی زیاد هستند.

روش طیف پاسخ طبقه[۳]

[۳] Floor Response Spectrum Method

یکی از روش‌های ساده جهت تحلیل اجزاء غیر سازه‌ای استفاده از این روش است. در این روش المان غیر سازه‌ای بر حسب طیف پاسخ ساختمان بیان می‌شود. سپس اجزاء غیرسازه‌ای تحلیل می‌شوند و می‌توان از طیف پاسخ استفاده نمود. توجه شود در این حالت طیف پاسخی که برای تحریک پایه اجزاء غیرسازه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد با طیف پاسخ زمین متفاوت است. به همین خاطر به آن روش طیف پاسخ طبقه گفته می‌شود. در صورتی که در هر طبقه یک المان غیرسازه‌ای داشته باشیم، برای هر یک از طبقات نیاز به یک طیف پاسخ داریم که طیف‌های پاسخ هر نقطه می‌تواند به طور برجسته‌ای با بقیه نقاط متفاوت باشد. طیف پاسخ طبقه معمولاً توسط یک تحلیل تاریخچه زمانی تعیین می‌شود. از آنجایی که نمی‌توان از یک شتاب‌نگاشت برای تهیه طیف پاسخ طراحی استفاده نمود، بایستی از مجموعه‌ای از شتاب‌نگاشت‌ها استفاده نمود و در نهایت از روش میانگین‌گیری و یا روش پوش مقادیر، جهت بدست آوردن طیف استفاده نمود. روش دیگر جهت تحلیل طیفی، استفاده از طیف طراح برای یک زمین مشخص است که دیگر نیازی به استفاده از تحلیل تاریخچه زمانی ندارد[۴].

مثال) در بام یک ساختمان ۱۰ طبقه، قطعه‌ای از تجهیزات تاسیساتی همانند شکل ٦الف قرار داده شده است. این قطعه را می‌توان به صورت یک سیستم یک درجه آزادی با فرکانس طبیعی ۲ هرتز مدلسازی نمود. حداکثر شتاب این قطعه را با استفاده از روش طیف پاسخ طبقه، وقتی تحت اثر مولفه شرقی – غربی شتاب‌نگاشت لوماپریتا (۱۹۸۹) در ایستگاه شهر فُستر که در شکل ٦ب نشان داده شده است را تعیین نمایید. فرض نمایید ماتریس میرایی ساختمان متناسب با ماتریس سختی آن بوده و نسبت میرایی برای مُد اصلی ارتعاش برابر ۲٪ است. همچنین درصد میرایی برای قطعه را برابر ۵٪ در نظر بگیرید.

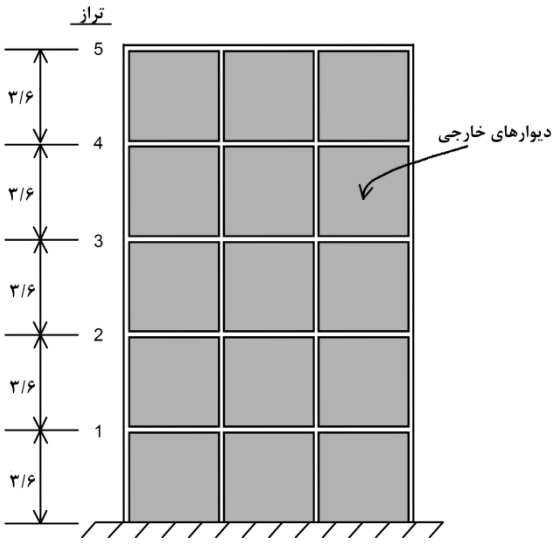


شکل ٦ الف)ساختمان ده طبقه ب) مولفه شرقی – غربی شتاب‌نگاشت لوماپریتا (۱۹۸۹) در ایستگاه شهر فُستر پ) پاسخ شتاب قطعه نصب شده ت) طیف پاسخ طبقه

[۴] Biggs and Roesset (1970), Amin et al. (1971), Kapur and Shao (1973), Peters et al. (1977) Vanmarcke (1977), Atalik (1978) and Singh (1980).

حل) اولین گام در حل این مسئله، ایجاد طیف پاسخ بام است. برای رسیدن به این هدف یک تحلیل تاریخچه زمانی برای ساختمان انجام شد. پاسخ شتاب طبقه بام در شکل ۱۳-٦پ و طیف پاسخ آن در شکل ۱۳-٦ت نشان داده شده است. با توجه به طیف پاسخ نشان داده شده، میزان شتاب متناظر با فرکانس ۲ هرتز، برابر ۱٤/٤ متر بر مجذور ثانیه می‌باشد. بنابراین شتاب قطعه متصل شده به سازه در هنگام زلزله تقریباً معادل *1.47g* می‌باشد. روش طیف پاسخ طبقه وقتی دارای دقت قابل قبول است که جرم المان ناسازه نسبت به جرم سازه ناچیز بوده و همچنین فرکانس طبیعی المان به فرکانس سازه نزدیک نباشد. در صورتی که المان ناسازه‌ای این شرایط را نداشته باشد، استفاده از این روش ممکن است به جواب‌های محافظه‌کارانه‌ای منجر شود. براساس تحقیقات تورو و همکاران[۵] در سال ۱۹۸۹، در صورتی که نسبت جرم اجزاء ناسازه‌ای به جرم سازه بیش از ۰/۰۰۱ شود، میزان خطای ایجاد شده قابل توجه خواهد بود.

مثال) سازه ۵ طبقه نشان داده شده در شکل ٦، که بصورت قاب خمشی است را در نظر بگیرد. منطقه با لرزه‌خیزی بالا، پانل‌های خارجی دارای طولی برابر ۵/۸ متر و ارتفاع ۳/۳ متر، وزن هر پانل ٦/۵ تن و کاربری سازه مسکونی می‌باشد. ضوابط طراحی برای دیوارهای پیرامونی و نیروی زلزله طراحی برای دیوارهای موجود در طبقات چهارم و اول را تعیین نمایید.



شکل ۷

روش آیین‌نامه UBC97: بند 1632.2 آیین‌نامه UBC97 ضوابط طراحی برای دیوارهای خارجی را ارائه داده است.

$$F_p = \frac{a_p C_a I_p}{R_p}\left(1+3\frac{h_x}{h_r}\right)W_p \geq 0.7 C_a I_p W_p$$

با استفاده از جدول 16-O، $a_p = 1$ و $R_p = 3$ می‌باشد. ضریب زلزله C_a به نوع خاک و فاصله از گسل بستگی دارد که در این مثال فرض نمایید برابر ۰/۴ باشد. با فرض ضخامت ۳۰ سانتیمتر برای تیرهای بین طبقات، نیروی طراحی زلزله برای پانل طبقه چهارم به صورت زیر می‌باشد:

[۵] Toro et al 1989

$h_r = 18\,\text{m} \qquad h_L = 11.1\,\text{m} \qquad h_U = 14.1\,\text{m}$

$$F_{pU} = \frac{1\times 0.4\times 1}{3}\left(1+3\frac{14.1}{18}\right)W_p = 0.447W_p$$

$$F_{pL} = \frac{1\times 0.4\times 1}{3}\left(1+3\frac{11.1}{18}\right)W_p = 0.38W_p$$

$$F_{p4} = \frac{F_{pU}+F_{pL}}{2} = \frac{0.447+0.38}{2}W_p = 0.414W_p = 0.414\times 6.5 = 2.7\ \text{ton}$$

کنترل $F_{p4} \geq 0.7C_aI_pW_p = 0.7(0.4)(1.0)W_p = 0.2W_p$ خوب است

با فرض ضخامت ۳۰ سانتیمتر برای تیرهای بین طبقات، نیروی طراحی زلزله برای پانل طبقه اول به صورت زیر می‌باشد:

$h_r = 18\,\text{m} \qquad h_L = 0 \qquad h_U = 3.3\,\text{m}$

$$F_{pU} = \frac{1\times 0.4\times 1}{3}\left(1+3\frac{3.3}{18}\right)W_p = 0.207W_p$$

کنترل $F_{pU} = 0.7C_aI_pW_p = 0.7(0.4)(1.0)W_p = 0.28W_p$ خوب نیست

$$F_{pL} < F_{pU} < 0.28W_p \quad \Rightarrow \quad F_{pL} = F_{pU} = 0.28W_p$$

$$F_{p1} = \frac{F_{pU}+F_{pL}}{2} = 0.28W_p = 0.28\times 6.5 = 1.82\ \text{ton}$$

نیروی جانبی F_p بایستی برای طراحی پانل برای نیروهای خارج از صفحه به کاربرده شود.

روش ۲۸۰۰: بند ۲-۸ استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش سوم) رابطه ساده‌ای را برای تخمین نیروی طراحی اجزای الحاقی در نظر می‌گیرد که چندان مناسب بنظر نمی‌رسد. در این استاندارد نیروی طراحی اجزای غیرسازه‌ای رابطه‌ای با ارتفاع ندارند. طبق ۲۸۰۰ داریم:

$$F_p = AB_pIw_p$$

که در رابطه فوق،A لرزه‌خیزی منطقه، I ضریب اهمیت سازه، w_p وزن قطعه الحاقی و B_p ضریبی است که طبق جدول ۷ استاندارد ۲۸۰۰ تعیین می‌شود که در این مثال طبق این جدول برابر ۰/۷ می‌باشد. در این مثال فرض نمایید A=0.35g باشد. در این حالت داریم:

$$F_p = 0.35\times 0.7\times 1\times 6.5 = 1.6\ \text{ton}$$

همانطور که دیده می‌شود طبق ۲۸۰۰ نیروی طراحی اجزای الحاقی در طبقات مختلف یکسان می‌باشد در حالی که این مقدار طبق *UBC97* با توجه به ارتفاع آن از تراز پایه سنجیده می‌شود. همچنین مقدار بدست آمده از استاندارد ۲۸۰۰ مقدار کمتری را نسبت به مقدار بدست آمده از *UBC97* را نشان می‌دهد.

مراجع:

1- Chen, W.F. and Scawthorn, C. (2002). ***Earthquake Engineering Handbook***, CRC Press, Boca Raton, FL.
2- Chopra, A.N. (2001). ***Dynamics of Structures***, 2nd ed., Prentice-Hall, New York.
3- Bozorgnia, Y. and Bertero, V.V. (2004). **Earthquake Engineering. From Engineering Seismology to Performance - Based Engineering**. CRC Press , Boca Raton, FL, USA .
4- **Uniform Building Code.** (1997). Volume 2, Structural Engineering Design Provisions, International Conference on Building Officials, Whittier.
۵- **آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله**، استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش سوم