



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

دینامیک لرزه‌ای سازه‌ها

ویرایش دوم



مؤلف: آنیل کی چوپرا

مترجمان:

دکتر مسعود محمودآبادی

(استادیار و عضو هیئت علمی دانشگاه قم)

مهندس سید محمد رضا حسنی

سرشناسه	: چوپرا، انیل کی. K Chopra, Anil.
عنوان و نام پدیدآور	: دینامیک لرزه‌ای سازه‌ها
مشخصات نشر	: تهران : نوآور.
مشخصات ظاهری	: ۱۲۸ ص.
شابک	: ۹۷۸-۶۰۰-۱۶۸-۲۱۱-۷
وضعیت فهرست نویسی	: فیپای مختصر
یادداشت	: این مدرک در آدرس http://opac.nlai.ir قابل دسترسی است.
شناسه افزوده	: محمودآبادی، مسعود، ۱۳۴۷ -
شناسه افزوده	: حسنی، محمدرضا، ۱۳۶۸ -
شماره کتابشناسی ملی	: ۳۵۸۰۲۲۵

دینامیک لرزه‌ای سازه‌ها

آنیل کی. چوپرا

دکتر مسعود محمودآبادی - مهندس سید محمدرضا حسنی

نوآور

۲۰۰ نسخه

محمدرضا نصیرنیا

۹۷۸-۶۰۰-۱۶۸-۲۱۱-۷

مؤلف:

مترجمین

ناشر:

شمارگان:

مدیر تولید:

شابک:



نشر نوآور

مرکز فروش:

نوآور: تهران - خیابان انقلاب، خیابان فخررازی، خیابان شهدای ژاندارمری نرسیده به خیابان دانشگاه ساختمان ایرانیان،

پلاک ۵۸، طبقه اول، واحد ۳

تلفن: ۹۲-۶۶۴۸۴۱۹۱

www.noavarpub.com

هشدار!

کلیه حقوق چاپ و نشر این کتاب مطابق با قانون حقوق مؤلفان و مصنفان، مصوب سال ۱۳۴۸ برای ناشر محفوظ و منحصراً متعلق به نشر نوآور می‌باشد. لذا هر گونه استفاده از کل یا قسمتی از این کتاب به هر شکل از قبیل هر نوع چاپ، فتوکپی، اسکن، تایپ از کتاب، تهیه پی دی اف از کتاب، عکس برداری، نشر الکترونیکی، هر نوع انتشار به صورت اینترنتی، سی دی، دی وی دی، فیلم، فایل صوتی یا تصویری و غیره بدون اجازه کتبی از نشر نوآور ممنوع بوده و **شرعاً حرام** است و متخلفین تحت پیگرد قانونی و قضایی قرار می‌گیرند.

با توجه به اینکه هیچ کتابی از کتب نشر نوآور بصورت فایل ورد یا پی دی اف و موارد اینچنین، توسط این انتشارات در هیچ سایت اینترنتی ارائه نشده است لذا در صورتی که هر سایتی اقدام به تایپ، اسکن و یا موارد مشابه نماید و کل یا قسمتی از متن کتب نشر نوآور را در سایت خود قرار داده و یا اقدام به فروش آن نماید، توسط کارشناسان امور اینترنتی این انتشارات که مسئولیت اداره سایت این انتشارات را به عهده دارند و به طور روزانه به بررسی محتوای سایت‌ها می‌پردازند، بررسی و در صورت مشخص شدن هر گونه تخلف، ضمن اینکه این کار از نظر شرعی حرام می‌باشد، وکیل قانونی انتشارات از طریق وزارت ارشاد و نیز سایر مراجع قانونی اقدام به مسدود نمودن سایت متخلف کرده و طی انجام مراحل قانونی و اقدامات قضایی، خاطیان مورد پیگرد قانونی و قضایی قرار گرفته و کلیه خسارات وارده به این انتشارات از متخلف اخذ می‌گردد.

همچنین در صورتی که کتابفروشی اقدام به تهیه کپی، جزوه، چاپ دیجیتال، چاپ ریسو، افست و غیره از کتب انتشارات نوآور نموده و اقدام به فروش آن نماید، ضمن اطلاع رسانی تخلفات کتابفروشی مزبور به سایر همکاران و موزعین محترم، از طریق وزارت ارشاد، اتحادیه ناشران، و انجمن ناشران دانشگاهی و نیز مراجع قانونی و قضایی اقدام به استیفای حقوق خود از کتابفروشی متخلف می‌نماید.

خرید، فروش، تهیه، استفاده و مطالعه از روی نسخه غیر اصل کتاب شرعاً حرام است.

انتشارات نوآور از خوانندگان گرامی خود درخواست دارد که در صورت مشاهده هر گونه تخلف از قبیل موارد فوق مراتب را از طریق تلفن‌های انتشارات نوآور به شماره ۲-۶۶۴۸۴۱۹۱ و ۰۲۱ ۶۶۴۸۴۱۹۱ و یا از طریق ایمیل info@noavarpub.com و یا از طریق منوی تماس با ما در سایت www.noavarpub.com به این انتشارات ابلاغ نمایند تا از تضییع حقوق ناشر، پدیدآورنده و نیز خود خوانندگان محترم جلوگیری به عمل آید. و نیز به عنوان تشکر و قدردانی از کتب انتشارات نوآور هدیه دریافت نمایند.

فهرست مطالب

۷	 دیباچه
۹	 پیشگفتار
۱۱	 فصل ۱ / سیستمهای ارتجاعی خطی
۱۱	 ۱- سیستمهای یک درجه آزاد ارتجاعی
۱۱	 ۱-۱- معادله حرکت
۱۳	 ۱-۲- پارامترهای سیستم
۱۴	 ۱-۳- حرکت زمین در هنگام زلزله
۱۶	 ۱-۴- تاریخچه پاسخ
۱۷	 ۱-۵- طیف پاسخ
۱۷	 ۱-۵-۱- مفهوم طیف پاسخ
۱۸	 ۱-۵-۲- طیف پاسخ تغییر شکل
۱۹	 ۱-۵-۳- طیف پاسخ شبه سرعت
۲۰	 ۱-۵-۴- طیف پاسخ شبه شتاب
۲۲	 ۱-۵-۵- طیف ترکیبی $A-V-D$
۲۲	 ۱-۵-۶- طیف پاسخ
۲۵	 ۱-۶- نواحی طیفی
۲۸	 ۱-۷- طیف طراحی ارتجاعی
۳۱	 ۱-۸- محاسبه پاسخ سازه‌های حداکثر با استفاده از طیف
۳۳	 ۲- سیستمهای چند درجه آزاد ارتجاعی
۳۴	 ۲-۱- معادلات حرکت
۳۶	 ۲-۲- تحلیل مدی: مفهوم اصلی
۳۶	 ۲-۲-۱- بسط مدی نیروهای موثر
۳۷	 ۲-۳- تحلیل تاریخچه زمانی پاسخ مدی
۳۷	 ۲-۳-۱- پاسخهای مدی
۳۸	 ۲-۳-۲- پاسخ کل

۳۹	۲-۳-۳- تفسیر تحلیل مدی.....
۳۹	۲-۳-۴- پاسخ استاتیکی مدی.....
۴۰	۲-۳-۵- جرم موثر مدی و ارتفاع موثر مدی.....
۴۱	۲-۳-۶- مثال.....
۴۵	۲-۴-۴- تحلیل طیفی پاسخ مدی.....
۴۵	۲-۴-۱- پاسخهای مدی حداکثر.....
۴۶	۲-۴-۲- قواعد ترکیب مدی.....
۴۸	۲-۴-۳- مثال.....
۵۰	۲-۴-۴- تفسیری دیگر برای تحلیل طیفی پاسخ.....
۵۱	۲-۵-۵- مشارکت مدهای بالاتر در پاسخ به زلزله.....
۵۱	۲-۵-۱- ضرایب مشارکت مدی.....
۵۲	۲-۵-۲- خصوصیات سازه‌های.....
۵۳	۲-۵-۳- تاثیر T_1 روی پاسخ مدهای بالاتر.....
۵۵	۲-۵-۴- تاثیر ρ روی پاسخ مدهای بالاتر.....
۵۵	۲-۶- چه تعداد مد باید لحاظ شود؟.....
۵۸	فصل ۲ / سیستمهای غیرارتجاعی.....
۵۸	۳- سیستمهای یک درجه آزاد غیرارتجاعی.....
۵۸	۳-۱- سیستمهای غیرارتجاعی ایده‌آل شده.....
۶۱	۳-۲- ضریب کاهش مقاومت تسلیم و ضریب شکلپذیری.....
۶۲	۳-۳- معادله حرکت و پارامترهای تعیین کننده آن.....
۶۲	۳-۴- تغییر شکل حداکثر و تقاضای شکلپذیری.....
۶۵	۳-۵- طیف پاسخ برای تغییر شکل تسلیم و مقاومت تسلیم.....
۶۷	۳-۵- روابط بین R_y ، μ و T_n
۶۹	۳-۷- طیف طراحی شکلپذیری ثابت.....
۷۰	۳-۸- کاربردهای طیف طراحی غیرارتجاعی.....
۷۱	۳-۸-۱- طراحی سازه‌های برای یک شکلپذیری مجاز.....
۷۳	۳-۸-۲- تعیین تغییر شکل یک ساختمان موجود.....
۷۳	۳-۹- تعیین تغییر شکل بوسیله روش گرافیکی.....
۷۴	۳-۱۰- نسبت تغییر شکل غیرارتجاعی.....
۷۹	۳-۱۰-۱- برآورد تغییر شکل سیستمهای غیرارتجاعی.....

۷۹	۴- ساختمانهای چند طبقه با رفتار غیرارتجاعی.....
۸۰	۴-۱- تحلیل تاریخچه زمانی پاسخ غیرخطی.....
۸۱	۴-۲- چرا تحلیل مودال قابل کاربرد نیست؟.....
۸۲	۴-۳- تقاضای مقاومت سیستمهای یک درجه آزاد و چند درجه آزاد.....
۸۵	۴-۴- تاثیر رفتار غیرارتجاعی بر روی تغییر مکانهای نسبی طبقات.....
۸۶	۴-۵- اثرات $P-\Delta$
۸۸	۴-۶- تاثیر فرضیات مدل سازی بر روی تقاضاهای لرزه‌ای.....
۹۰	۴-۷- تغییرات آماری در تقاضاهای لرزه‌ای.....
۹۲	۴-۸- تقاضای تغییر مکانهای نسبی طبقات.....
۹۳	فصل ۳ / آئین‌نامه‌های طراحی و دستورالعمل‌های ارزیابی ساختمانها.....
۹۳	۵- جایگاه دینامیک سازه‌ها در آئین‌نامه‌های طراحی ساختمانها.....
۹۴	۵-۱- آئین‌نامه بین‌المللی ساختمان (ایالات متحده).....
۹۴	۵-۱-۱- برش پایه.....
۹۶	۵-۱-۲- نیروهای جانبی.....
۹۷	۵-۱-۳- نیروهای طبقات.....
۹۷	۵-۲- ارتباط بین آئین‌نامه بین‌المللی ساختمان و تحلیل دینامیکی.....
۹۷	۵-۲-۱- برش پایه.....
۱۰۲	۵-۲-۲- کاهش نیروی طراحی.....
۱۰۳	۵-۲-۳- توزیع نیروی جانبی.....
۱۰۶	۶- جایگاه دینامیک سازه‌ها در دستورالعمل‌های ارزیابی ساختمانها.....
۱۰۷	۶-۱- تحلیل تاریخچه زمانی پاسخ غیرخطی.....
۱۰۹	۶-۲- رویه فعلی.....
۱۱۰	۶-۳- برآورد تغییر مکان بام با استفاده از تغییر شکل یک سیستم یک درجه آزاد.....
۱۱۲	۶-۴- برآورد تغییر شکل سیستمهای یک درجه آزاد غیرارتجاعی.....
۱۱۲	۶-۴-۱- روش ATC-40.....
۱۱۳	۶-۴-۲- روش FEMA-356.....
۱۱۴	۶-۵- روش تحلیل استاتیکی غیرخطی FEMA-356.....
۱۱۷	۶-۶- روشهای استاتیکی غیرخطی اصلاح یافته.....
۱۲۰	نمادها.....
۱۲۰	مخففها.....

۱۲۱	 زیرنویسها
۱۲۱	 بالانویسها
۱۲۱	 نمادهای رومی
۱۲۴	 نمادهای یونانی
۱۲۵	 مراجع

دیباچه

هفت تکنگار اصلی موسسه تحقیقات مهندسی زلزله (EERI) بین سالهای ۱۹۷۹ تا ۱۹۸۳ منتشر گردید و بدنبال آن سمینارهایی در مورد مهندسی زلزله توسط موسسه تحقیقات مهندسی زلزله در چندین شهر برگزار گردید. این تکنگارا شامل جنبه‌های اساسی مهندسی زلزله از قبیل لرزه‌خیزی، رکوردهای حرکت قوی، طیف زلزله، روانگرایی، دینامیک، معیارهای طراحی و آئین‌نامه‌ها می‌گردید. موضوعات تکنگارا همگی بنیادین و متمرکز شده بود و محتوای آنها همگی کامل و بدون بحث بود. این تکنگارا کمبود مراجع در دسترس را پر نموده و مورد استقبال زیادی قرار گرفتند.

این اولین تکنگاری است که تصمیم گرفته شد که یک موضوعی که در تکنگار اولیه آورده شده بود در آن به روز شود. در تکنگار اولیه که عنوان آن دینامیک سازه‌ها، مبانی مقدماتی، بود و توسط آنیل، کی. چوپرا تالیف گردیده بود موضوع دینامیک سازه‌های خطی در آن تشریح گردیده بود و به عنوان یک متن کلاسیک در تمام دنیا مورد استفاده قرار می‌گرفت. با اینحال، مولف توصیه نمود که با توجه به گرایش که در حال حاضر به تحلیل دینامیکی غیرخطی در آئین‌نامه‌های ساختمانی جهت طراحی سازه‌ها وجود دارد موسسه تحقیقات مهندسی زلزله این تکنگار را بدون به روز کردن چاپ مجدد ننماید. نسخه به روز شده شامل بازنویسی اساسی متن اولیه می‌گردید که جنبه‌های مختلف تحلیل غیرخطی نیز به آن اضافه شده بود. با توجه به اینکه روشهای انجام تحلیلهای غیرخطی ساده شده در حال تکامل است، لذا این فرض که این تکنگارا بنیادین و مفهومی باشند و عاری از موضوعاتی باشند که با گذشت زمان دچار خدشه نشوند را از لحاظ بازنگری کردن دچار مشکل می‌ساخت. افرادی مانند روبرت دی. هانسون، هلموت کراوینکلر، فرزاد نعیم و خود مولف پیش‌نویسهای این تکنگار را مرور نمودند تا متنی بدست آمد که از این جهت مناسب بود.

موسسه تحقیقات مهندسی زلزله در نظر دارد با انتشار گاه به گاه تکنگارهای به روز شده یا اضافی که از جنبه‌های مختلف به موضوع مهندسی زلزله می‌پردازد ماهیت اصلی تکنگارهای اولیه را حفظ کند. تکنگارهای جدید که توسط متخصصین لایق و خبره تهیه می‌گردد به شرح و تفسیر جنبه‌های متمرکز یافته و ظریف از علم مهندسی زلزله می‌پردازد. با این حال، آنها ممکن زمینه و بینش لازم در مورد یک موضوع را برای خوانندگانی فراهم سازند که از تخصصهای مختلف یا مشاغل متفاوتی باشند. با توجه به خصوصیات فنی موضوع، مخاطبین مورد نظر میتوانند شامل طراحان حرفه‌ای، پژوهشگران، دانشمندان علوم اجتماعی و

یا سیاستمداران باشند. تکنگارهای جدید به منظور راهنمایی برای طراحی تدوین نگردیده‌اند و همچنین جزئیات نکات فنی مقالات تخصصی در آنها آورده نشده است. محتوای این تکنگارها شامل مفاهیم بنیادین و اساسی می‌باشد و انتظار می‌رود که بطور کلی شامل موضوعاتی نباشند که سریعاً منسوخ می‌گردند. صرفنظر از وجود یک فهرست اولویت‌بندی شده از موضوعات مورد نظر و جدول زمان‌بندی شده سفت و سخت برای انتشار آنها، موسسه تحقیقات مهندسی زلزله با موضوعات تکنگارهای مجزایی که مقتضی و مناسب باشند موافقت می‌کند.

ویلیام تی. هولمز

سرپرست کمیته تکنگار

ژوئیه ۲۰۰۵

پیشگفتار

بر اساس سمینارهای ارائه شده در اواخر دهه ۱۹۷۰ در موسسه تحقیقات مهندسی زلزله (EERI)، تکنگاری با عنوان "دینامیک سازه‌ها، یک مقدمه" (۱۹۸۰)، برای آشنایی مهندسان حرفه‌ای که فرصت مطالعه دینامیک سازه‌ها را به صورت رسمی به عنوان دانشجوی نداشتند تدوین گردید. آن تکنگار در زمانی تدوین گردید که طراحی ساختمانها بر اساس تحلیل ارتجاعی برای بارهای جانبی بود و این بارهای جانبی شامل ضریبی می‌گردید که اثرات غیرارتجاعی بطور غیر مستقیم در آن ملحوظ می‌گردید. در آن کتاب مفاهیم پایه و دانش مورد نیاز برای فهم رفتار سازه‌هایی که توسط زلزله به ارتعاش در می‌آیند برای افراد غیرمتخصص در علم دینامیک سازه‌ها توضیح داده شده بود. اما با صرفنظر از سه صفحه از آن، آن تکنگار ۱۲۶ صفحه‌ای محدود به تحلیل دینامیکی ارتجاعی ساختمانها می‌گردید.

از زمانی که تکنگار اول چاپ گردید تا به اکنون، حرفه مهندسی سازه در عمل، مخصوصاً در کالیفرنیا، حداقل از دو جنبه تغییرات زیادی داشته است. اول اینکه بیشتر مهندسانی که هم‌اکنون از دانشگاه فارغ‌التحصیل می‌شوند درس دینامیک سازه‌ها را در دانشگاه می‌گذرانند. دوم اینکه دستورالعملهای ارزیابی ساختمانهای موجود بر مبنای عملکردمانند FEMA-273؛ جایگزین آن FEMA-356 و ATC-40 - رفتار غیرارتجاعی سازه‌ها را مستقیماً در برآورد تقاضاهای لرزه‌ای در سطوح پایین عملکرد مانند ایمنی جانی و آستانه فروریزش ملحوظ می‌دارند.

با در نظر گرفتن ملاحظات مذکور، این تکنگار جدید دو هدف را دنبال می‌کند:

۱. توضیح مفاهیم اساسی و دانش مورد نیاز برای فهم رفتار سازه‌ها تحت اثر زلزله برای افراد غیرمتخصص در علم دینامیک سازه‌ها
۲. ارائه مفاهیم مربوط به دینامیک سازه‌ها و نیز روشهای تحلیل در محدوده ارتجاعی و یا غیرارتجاعی سازه‌ها که در آئین‌نامه‌های طراحی و یا دستورالعملهای ارزیابی لرزه‌ای ساختمانها بکار گرفته می‌شوند.

این تکنگار متشکل از سه قسمت است: قسمت اول مربوط به سیستمهای ارتجاعی خطی می‌باشد؛ قسمت دوم مربوط به سیستمهای غیرارتجاعی است؛ و قسمت سوم در ارتباط با آئین‌نامه‌های طراحی و دستورالعملهای ارزیابی لرزه‌ای ساختمانها می‌باشد. در قسمت اول، برداشت جدیدی از دینامیک سیستمهای ارتجاعی خطی ارائه می‌شود که شامل بسیاری از عناوینی است که در تکنگار اولیه ارائه گردیده بود. فصل سوم که در قسمت دوم تکنگار واقع گردیده است به مباحث دینامیک سیستمهای یک درجه آزاد غیرارتجاعی، طیف پاسخ سیستمهای غیرارتجاعی، طیف طراحی غیرارتجاعی و کاربرد آن در طراحی سازه‌های جدید و

ارزیابی ایمنی سازه‌های موجود اختصاص دارد. فصل چهارم یک معرفی مقدماتی از موضوع گسترده تحلیل پاسخ غیرارتجاعی ساختمانهای چند طبقه می‌باشد. در فصل پنجم که در قسمت سوم تکنگار واقع گردیده است توزیع نیروهای جانبی مقرر گردیده در نسخه سال ۲۰۰۳ آئین‌نامه بین‌المللی ساختمان شرح داده می‌شود و ارتباط آن با مفاهیم دینامیک سازه‌ها که در فصول ۱ تا ۴ آورده شده است تشریح می‌گردد. همچنین در این فصل توضیحات مربوط به سه آئین‌نامه ساختمانی دیگر نیز آورده شده است. در فصل ششم نیز به جنبه‌هایی منتخب از چگونگی محاسبه تقاضاهای لرزه‌ای برای ارزیابی ساختمانهای موجود بر اساس دستورالعملهای FEMA و ATC پرداخته شده است و ارتباط آن با مفاهیم مربوط به علم دینامیک سازه‌ها که در فصول ۱ تا ۴ آورده شده است تشریح گردیده است.

فهرست مراجع اگر چه طولانی است اما کامل نمی‌باشد و تنها مراجعی که مستقیماً مرتبط با موضوع می‌باشند آورده شده‌اند. مراجعی آورده شده است که از لحاظ جنبه تاریخی شکل‌گیری بعضی مفاهیم اصلی در مهندسی زلزله دارای اهمیت می‌باشند. این مفاهیم آنچنان با علم مهندسی زلزله عجین گردیده‌اند که بسیاری از محققین و مهندسين از آنها استفاده می‌نمایند در حالیکه ممکن است ندانند از کجا نشأت گرفته‌اند.

من سپاسگزار افراد چندی هستم که وقت و بینش آنها در کامل شدن این تکنگار سودمند بود: راکش کی. گوئل و چاتپن چیتاناکدی که نرم‌افزارهای کامپیوتری لازم برای تولید نتایج عددی را ایجاد و اجرا نمودند و شکل‌های این تکنگار را تهیه کردند. آکشای گوپتا و علاالدین نصار داده‌های عددی مربوط به کارهای تحقیقاتی‌شان که مربوط به چند شکل از فصل ۴ می‌گردد را در اختیار گذاشتند و گابریل هورتادو شکل‌های مربوطه را تهیه نمود. بسیاری از شکل‌ها از کتاب دینامیک سازه‌ها: نظریه و کاربردها در مهندسی زلزله که توسط آنیل کی. چوپرا نوشته شده است و مربوط به ویرایش ۲۰۰۱ آن می‌باشد برداشت گردیده است. این شکل‌ها با اجازه شرکت آموزشی پیرسون که در نیوجرسی واقع است دوباره چاپ گردیده است. چارلز دی. جیمز از مرکز تحقیقات مهندسی زلزله واقع در دانشگاه کالیفرنیا، برکلی، در جمع‌آوری و انتخاب عکسها به من کمک کرد. بازبینی فنی این تکنگار بوسیله رابرت دی. هانسون، هلموت کراوینکلر و فرزاد نعیم انجام گردید. کلایر جانسون متن کتاب را تهیه کرده و جفت و جور نمود و باربارا زیدرز نیز از آن نسخه‌برداری کرد.

این تکنگار در طی یک سال کار من به عنوان استاد تحقیقاتی میلر در دانشگاه کالیفرنیا، برکلی، تهیه گردیده است که بدینوسیله از موسسه میلر برای در اختیار گذاشتن این فرصت به من برای انجام این تحقیق در علم سپاسگزاری می‌شود.

آنیل کی. چوپرا

فصل ۱

سیستم‌های ارتجاعی خطی

۱- سیستم‌های یک درجه آزاد ارتجاعی

مبحث دینامیک سازه‌ها با مطالعه سازه‌های ساده‌ای مانند ساین نشان داده شده در شکل (۱-۱) و یا مخزن آب هوایی نشان داده شده در شکل (۲-۱) شروع می‌شود. این سازه‌های ساده را می‌توان به صورت جرم‌های متمرکزی بر روی سازه‌های بدون جرم، که فقط دارای سختی می‌باشند قرار در نظر گرفت. علاوه بر این، میرایی در سیستم نیز برای اتلاف انرژی در هنگام ارتعاشات باید در نظر گرفته شود.

۱-۱- معادله حرکت

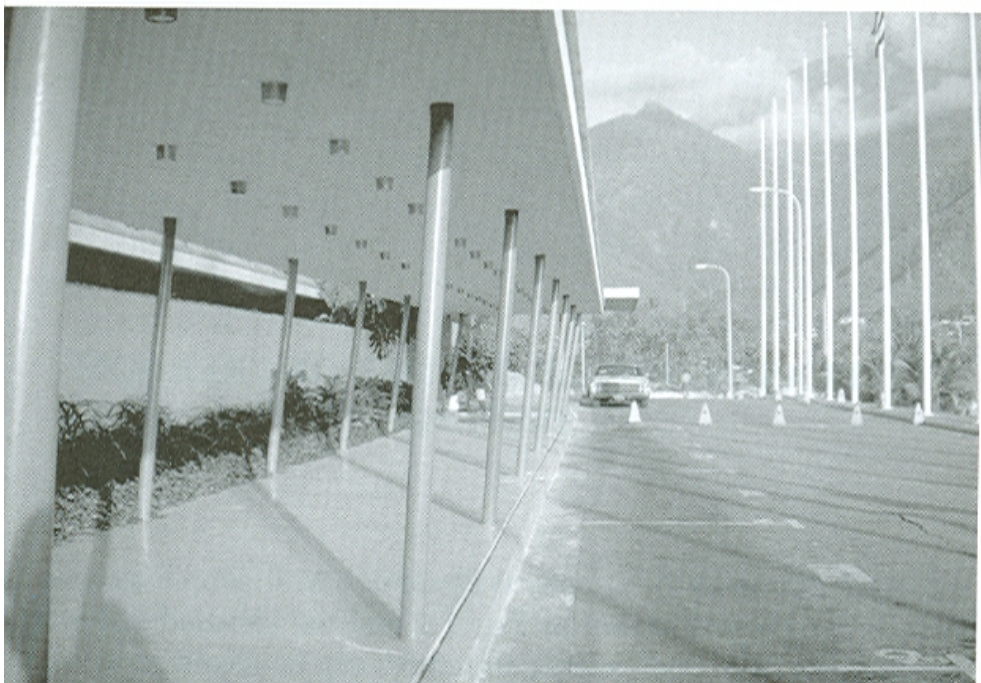
سیستم مورد مطالعه در شکل (۳-۱) شامل یک جرم متمرکز m ، یک قاب با سختی k و یک میراگر لزج با ضریب میرایی c که انرژی ارتعاشی سیستم را جذب می‌کند (این عنصر به عنوان ضربه‌گیر نیز شناخته شده است). هدف مطالعه رفتار دینامیکی این سیستم تحت اثر حرکات بوجود آمده زلزله $u_g(t)$ در پایه سازه می‌باشد. در این فصل تنها سیستم‌های ارتجاعی خطی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

معادله حاکم بر تغییر مکان نسبی جرم m نسبت به زمین عبارت است از:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g(t) \quad (1-1)$$

توجه شود که شتاب زمین، $\ddot{u}_g(t)$ در سمت راست معادله دیفرانسیل ظاهر شده است. به توجه به اینکه حرکت سیستم را می‌توان توسط تنها یک تغییر مکان بیان نمود این نوع سیستم‌ها، سیستم‌های یک درجه آزاد نامیده می‌شوند. جرم و سختی سیستم با استفاده از ابعاد سازه و اندازه‌های عناصر سازه‌ای آن قابل محاسبه است اما میرایی سیستم را نمی‌توان با استفاده

از این خصوصیات بدست آورد. برای تعیین میرایی سیستم در دامنه‌های کوچک ارتعاشی، نیاز به آزمایشات ارتعاش آزاد و یا آزمایشات ارتعاش اجباری بر روی سازه‌های واقعی است. همچنین برای تخمین میرایی سیستم در دامنه‌های بزرگ ارتعاشی، احتیاج به ثبت ارتعاشات سازه‌ها در هنگام زلزله می‌باشد تا با استفاده از روشهای شناسایی سیستم، مقادیر میرایی سیستم در دامنه‌های بالاتر حرکت بدست آید.



شکل (۱-۱): این سایبان مربوط به هتل ماکوتو-شراتون است که در نزدیکی کاراکاس ونزوئلا واقع شده است و در زلزله ۲۹ ژوئیه ۱۹۶۷ آسیب دیده است. این سازه که در فاصله ۱۵ مایلی از مرکز زلزله واقع گردیده بود در اثر این زلزله که بزرگای آن ۶/۵ بود ستونهای فولادی لوله‌ای آن کرنشهای بیش از حدی را متحمل شده بود. (با تشکر از مرکز اطلاعات ملی مهندسی زلزله دانشگاه برکلی کالیفرنیا)

با تقسیم معادله (۱-۱) بر m ، معادله حرکت به شکل زیر در می‌آید:

$$\ddot{u} + 2\zeta\omega_n\dot{u} + \omega_n^2 u = -\ddot{u}_g(t) \quad (۲-۱)$$

که در معادله (۲-۱) پارامترهای ω_n و ζ عبارتند از:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \zeta = \frac{c}{2m\omega_n} \quad (۳-۱)$$



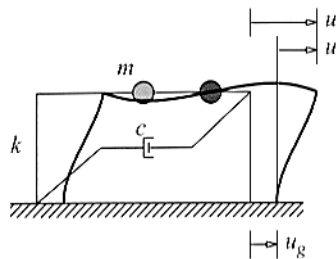
شکل (۲-۱): این مخزن بتن مسلح که بر روی یک ستون منفرد ۴۰ فوتی قرار دارد و در نزدیکی فرودگاه والدیویا واقع شده است در زلزله ماه مه ۱۹۶۰ شیلی آسیب ندید. در زمانیکه مخزن پر از آب باشد سازه را می توان به صورت یک سیستم تک جرمی متمرکز در نظر گرفت. (از مجموعه ک. وی. اشتنبرگ، با تشکر از مرکز اطلاعات ملی مهندسی زلزله دانشگاه برکلی کالیفرنیا)

۲-۱- پارامترهای سیستم

دو پارامتر سیستم، ω_n و ζ ، که در معادله (۲-۱) ظاهر گردیده اند، به ترتیب تحت نامهای فرکانس دایروی ارتعاش (که واحد آن رادیان بر ثانیه است) و نسبت میرایی (یک کمیت بی بعد که میزان میرایی را مشخص می کند) شناخته شده اند. در ارتباط با ω_n ، دوره تناوب طبیعی ارتعاش سیستم تعریف می شود که عبارت است از زمان لازم برای سیستم بدون میرایی تا یک حرکت رفت و برگشت کامل را آزادانه و بدون تحریک خارجی انجام دهد و با T_n (که واحد آن ثانیه است) نشان داده می شود و رابطه آن با ω_n عبارت است از:

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} \quad (۴-۱)$$

سیستم مورد بحث، $1/T_n$ رفت و برگشت را در یک ثانیه در هنگام ارتعاش آزاد انجام می‌دهد. واحد این فرکانس رفت و برگشتی طبیعی ارتعاشی که با $f_n \equiv 1/T_n$ نشان داده می‌شود هرتز (سیکل بر ثانیه) می‌باشد. اصطلاح فرکانس طبیعی هم به ω_n و هم به f_n اطلاق می‌گردد. خصوصیت ارتعاش طبیعی سیستم، ω_n ، T_n و یا f_n فقط بستگی به جرم و سختی سازه دارد. صفت طبیعی که برای ω_n ، T_n و یا f_n مورد استفاده قرار گرفته است بر این موضوع تاکید دارد که این پارامترها خصوصیات طبیعی سیستم را بیان می‌کنند هنگامیکه آزادانه و بدون وجود تحریک خارجی ارتعاش کنند. این خصوصیات تا زمانیکه سیستم در محدوده رفتار خطی آن می‌باشد دارای اعتبار است. با داشتن دوره تناوب طبیعی T_n و نسبت میرایی ζ سیستم، محاسبه تغییر مکان $u(t)$ سیستم در برابر شتاب مشخص شده $\ddot{u}_g(t)$ زمین مورد نظر می‌باشد.



شکل (۳-۱): سیستم یک درجه آزاد

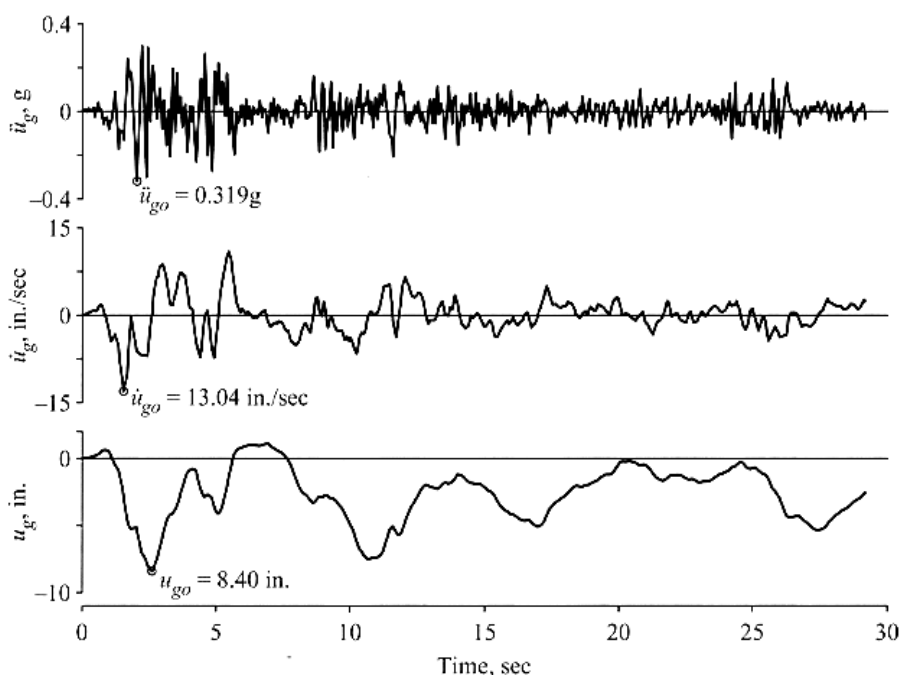
۳-۱- حرکت زمین در هنگام زلزله

برای مقاصد مهندسی، تغییرات زمانی شتاب زمین سودمندترین راه جهت بیان تکانهای زمین در هنگام زلزله می‌باشد که این پارامتر در سمت راست معادله دیفرانسیل (۲-۱) آمده است. ابزاری موسوم به شتابنگارهای حرکت شدید زمین، سه مولفه شتاب زمین (دو مولفه افقی عمود بر هم و یک مولفه قائم) را در هنگام زلزله ثبت می‌کنند. شکل (۴-۱) مولفه شمالی-جنوبی حرکت ثبت شده زمین در محلی در السترو کالیفرنیا در زلزله ۱۸ مه ۱۹۴۰ امپریال والی^۱ را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که تغییرات شتاب زمین نسبت به زمان بسیار نامنظم است. صرف نظر از اینکه تغییرات شتاب تا چه حد نامنظم باشد فرض می‌شود که حرکت زمین مشخص بوده و مستقل از پاسخ سازه باشد. به عبارت دیگر فرض می‌شود که هیچگونه اندرکنش خاک-سازه وجود ندارد.

شتابنگاشتهای زلزله تبدیل به عدد گردیده و پردازشهای لازم بر روی آنها صورت گرفته و در نهایت به شکل اعدادی که در فواصل زمانی مشخصی از یکدیگر قرار دارند جهت استفاده در تحلیلهای دینامیکی تاریخچه زمانی ارائه می‌شوند [۱،۲]. فواصل زمانی باید در حدی نزدیک به هم

در نظر گرفته شود که تغییرات بسیار نامنظم شتاب نسبت به زمان را بتواند منعکس سازد. به عنوان مثال، فواصل زمانی ۰/۰۲ تا ۰/۰۱ ثانیه در نظر گرفته می‌شود که در این صورت برای داشتن شتابنگاشت نشان داده شده در شکل (۴-۱) احتیاج به ۱۵۰۰ تا ۳۰۰۰ نقطه می‌باشد.

علاوه بر شتاب ثبت شده زمین، سرعت و تغییر مکان زمین که بوسیله انتگرال‌گیری مکرر از شتاب نسبت به زمان بدست آمده است در شکل (۴-۱) نشان داده شده است. همچنین مقادیر اوج این سه نمودار در شکل (۴-۱) مشخص گردیده است. تعیین دقیق سرعت و تغییر مکان زمین به دو علت مشکل است: اولاً مولفه‌های حرکت که دارای دوره تناوبهای خیلی بلند هستند معمولاً در جریان پردازش فیلتر می‌شوند و ثانیاً شتابنگارهای آنالوگ^۱ قسمت اولیه شتابنگاشت را تا زمانیکه شتابنگار شروع بکار ننموده است را ثبت نمی‌کنند و در نتیجه خط پایه (شتاب صفر) نامعلوم باقی می‌ماند. در شتابنگارهای دیجیتالی، مشکل دوم با فراهم کردن یک حافظه کوچک رفع گردیده است و بدین ترتیب اندکی قبل از شروع حرکت زمین (شتاب صفر) نیز توسط این شتابنگارها اندازه‌گیری می‌شود.



شکل (۴-۱): مولفه شمالی-جنوبی شتاب افقی زمین که در ایستگاه فرعی بخش آبیاری امپریال والی، ال سنتر و کالیفرنیا، در هنگام زلزله ۱۸ مه ۱۹۴۰ امپریال والی اندازه‌گیری شده است. سرعت و تغییر مکان زمین با انتگرال‌گیری از شتاب زمین بدست آمده است.