

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

۱۳۹۰



بررسی حساسیت آنالیز دینامیکی افزایشده به تغییر در زلزله
ورودی

محسن بوانی

دانشکده فنی و مهندسی

گروه عمران

۱۳۸۸

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد مهندسی عمران - سازه

۱۳۸۹/۴/۸

استاد راهنما :

تعمیرات و بازسازی
تعمیرات

دکتر سعید تارپوردیلو

۱۳۸۶۰۸

پایان نامه در سطح کارشناسی ارشد کن براساس به تاریخ ۸۸۶/۳۱ شماره ۲۴۲-۲۲۳ مور دپذیرش هیأت محترم

داوران بارتبه عالی و نمره - ۱۹ (نزده عا) قرار گرفت.

۱- استاد راهنما و رئیس هیئت دوران:

سید یاور نام

۲- استاد مشاور:

خلیل کهریز

۳- داور داخلی:

کدیف سیدان

۴- داور خارجی:

۵- نماینده تحصیلات تکمیلی:

طارق نورانی

حق طبع و نشر مطالب این پایانه تالیف در انجمن دانشکده ارومیه می باشد

تقدیم به

پدر و مادرم عزیزم

خواهر و برادر مهربانم

و

همسر فداکارم

تقدیر و تشکر

به نام یگانه خالق هستی، او که در تمام مراحل زندگی یار و یاور همیشگی من بوده و همواره با یاد او مکنونات درونم آرام می‌گیرد. اینک که کار نگارش این پایان نامه به پایان رسیده است، بجاست از تمامی عزیزانی که هر یک به نوعی یاری‌گر تهیه و تدوین آن بوده اند تشکر و قدردانی کنم.

بدین منظور ابتدا از استاد گرانقدر، آقای دکتر تاروردیلو که رهنمودهایشان زمینه ساز انجام تحقیق حاضر می‌باشد، سپاسگذاری می‌نمایم. همینطور از اساتید گرامیم آقایان دکتر منیر، دکتر شوکتی و دکتر شیدایی که در طی این دوره زحمات زیادی را متحمل شدند، کمال تشکر را دارم.

همچنین از کلیه دوستان و هم کلاسیهای این دوره که بهترین خاطرات دانشجوییم با آنها رقم خورد، تشکر می‌کنم.

فهرست مطالب

۲	فصل اول
۲	پیشگفتار
۲	۱-۱ مقدمه
۳	۱-۲ هدف تحقیق
۴	۱-۳ فصل بندی پایان نامه
۵	فصل دوم
۵	آنالیز دینامیکی افزایشی و کاربرد آن در طراحی براساس عملکرد
۵	۲-۱ مقدمه
۶	۲-۲ تاریخچه
۶	۲-۳ اهداف آنالیز دینامیکی غیرخطی افزایشی
۷	۲-۴ تعاریف در تحلیل دینامیکی افزایشی
۷	۲-۴-۱ ضریب مقیاس
۷	۲-۴-۲ اندازه شدت حرکت زمین (IM)
۸	۲-۴-۳ شدت خرابی یا تغییرپذیری شرایط سازه (DM)
۸	۲-۴-۴ مطالعه یک IDA تک‌نگاشت
۹	۲-۵ برخی خواص منحنی IDA
۱۰	۲-۶ خلاصه کردن منحنی‌های IDA
۱۱	۲-۷ ظرفیت و سطوح عملکرد در آنالیز دینامیکی افزایشی
۱۲	۲-۸ خلاصه‌ای از مراحل انجام آنالیز IDA
۱۲	۲-۹ منحنی شکست
۱۳	۲-۱۰ خلاصه
۱۴	فصل سوم
۱۴	انتخاب شتابنگاشت ها و ساخت شتابنگاشت مصنوعی
۱۴	۳-۱ مقدمه
۱۵	۳-۲ مروری بر مطالعات گذشته
۱۶	۳-۳ انتخاب شتابنگاشت بر اساس آئین نامه
۱۷	۳-۴ اسپیلون (E) و رابطه آن با ریخت طیف زلزله
۲۰	۳-۵ شتابنگاشت مصنوعی

۲۰	.....	۳-۵-۱	مقدمه
۲۱	.....	۳-۵-۲	تولید شتابنگاشت با استفاده از جمع توابع سینوسی
۲۲	.....	۳-۵-۳	۱-۲-۵ محاسبه تابع چگالی نسبی توان با استفاده از طیف زلزله هدف
۲۲	.....	۳-۵-۲-۲	محاسبه دامنه حرکت
۲۲	.....	۳-۵-۲-۳	روند تولید شتابنگاشت
۲۳	.....	۳-۵-۲-۴	تعیین طیف پاسخ
۲۳	.....	۳-۵-۲-۵	اصلاح طیف پاسخ زلزله
۲۴	.....	۳-۵-۲-۶	مثال نمونه
۲۵	.....	۳-۵-۳	تولید شتابنگاشت با استفاده از تبدیلات موجک
۲۷	.....	۳-۵-۳-۱	تبدیلات موجک
۲۸	.....	۳-۵-۳-۲	فرایند تولید شتاب نگاشت مصنوعی با استفاده از تبدیل موجک
۳۰	.....	۳-۵-۳-۳	مثال نمونه
۳۱	.....	۳-۶	مقایسه دو روش ساخت شتابنگاشت مصنوعی
۳۲	.....	۳-۷	خلاصه و نتیجه گیری
۳۴	.....		فصل چهارم
۳۴	.....		روش انجام کار
۳۴	.....	۴-۱	مقدمه
۳۴	.....	۴-۲	آنالیز لایه‌های مقاطع فیبری
۳۵	.....	۴-۳	مدل محبوسشدگی بتن
۳۶	.....	۴-۴	مدل شیخ و یه (SHEIKH & YEH, ۱۹۹۰)
۳۷	.....	۴-۵	مدل مندر و همکاران (MANDER, PRIESTLEY, & PARK, ۱۹۸۸)
۳۸	.....	۴-۶	نرم افزار OPENSEES
۳۹	.....	۴-۷	مدل سازی
۴۰	.....	۴-۸	علت انتخاب المان NON-LINEAR BEAMCOLUMN
۴۱	.....	۴-۹	روش حل عددی مورد استفاده در این مطالعه:
۴۳	.....	۴-۱۰	استهلاک رایلی
۴۶	.....	۴-۱۱	گروه بندی شتابنگاشت‌ها برای استفاده در آنالیز IDA
۴۹	.....	۴-۱۲	خلاصه
۵۰	.....		فصل پنجم
۵۰	.....		بررسی حساسیت و مقایسه نتایج تحلیل‌های IDA
۵۰	.....	۱-۵	مقدمه

۵۰	۵-۲ بررسی نتایج
۵۸	فصل ششم
۵۸	نتایج و پیشنهادات
۵۸	۶-۱ مقدمه
۵۸	۶-۲ نتایج
۵۹	۶-۳ پیشنهادات برای تحقیقات آتی
۶۰	پیوست A
۶۰	طراحی و مشخصات مدل مورد استفاده
۶۴	پیوست B
۶۴	اتکال مربوط به شتابنگاشت های ساخته شده

فهرست نمودارها و اشکال

- شکل ۱-۲: منحنی های IDA یک قاب ۵ طبقه مهاربندی شده فولادی ($T1 = 1.8s$) تحت اثر چهار شتابنگاشت مختلف ۹
- شکل ۲-۲: منحنیهای IDA یک قاب 5 طبقه مهاربندی شده فولادی تحت ۳۰ شتابنگاشت ۱۰
- شکل ۱-۳: تابع چگالی نسبی توان $G(w)$ و پارامتر طیف Ω ۲۳
- شکل ۲-۳: تابع پوش شدت نمائی، It ۲۳
- شکل ۳-۳: تابع پوش شتابنگاشت A-BOV000 و قدرمطلق مقادیر شتاب حرکت این زلزله ۲۴
- شکل ۴-۳: نمودار طیف پاسخ شتابنگاشت A-BOV000 و شتابنگاشتهای ساخته شده از روی آن ۲۵
- شکل ۵-۳: شکل تاریخچه زمانی شتاب، سرعت و جابجایی زلزله حقیقی A-BOV000 به همراه سه شتابنگاشت شبیه سازی شده از روی آن ۲۶
- شکل ۶-۳: (A) تابع موجک مادر $\zeta = 0.05, \Omega = \pi$; (B) تبدیل فوریه تابع موجک مادر ۲۹
- شکل ۷-۳: (A) زلزله واقعی A-BOV000 و تاریخچه سرعت و جابجایی آن; (B) زلزله شبیه سازی شده آن با استفاده از تبدیلات موجک; (C) طیف زلزله شبیه سازی شده در تکرارهای مختلف برای رسیدن به طیف هدف; (D) طیف اصلی این زلزله، طیف هدف و طیف زلزله شبیه سازی شده و (E) نمودار خطا در تکرارهای مختلف ۳۱
- شکل ۸-۳: آنالیز زمان فرکانس شتابنگاشت حقیقی A-BOV000 ۳۲
- شکل ۹-۳: آنالیز زمان-فرکانس شتابنگاشت ساخته شده از طیف A-BOV000 با استفاده از برنامه SIMQKE ۳۲
- شکل ۱۰-۳: آنالیز زمان-فرکانس شتابنگاشت ساخته شده از طیف A-BOV000 با استفاده از برنامه SIMQKE ۳۲
- شکل ۱-۴: المان و مقطع لایه‌های در نرم افزار OPENSEES ۳۵
- شکل ۲-۴: محبوس شدگی ناشی از آرماتورهای عرضی در مقاطع بتنی در طول المان و در تراز قرارگیری آرماتور عرضی ۳۶
- شکل ۳-۴: جزئیات روش محبوس شدگی شیخ و یه ۳۶
- شکل ۴-۴: منحنی تنش-کرنش فرضی برای بتن محبوس شده و نشده در روش (MANDER, PRIESTLEY, & PARK, 1988) ۳۷
- شکل ۵-۴: شکل شماتیک از نحوه‌ی مدل‌سازی اجزا سازه ای/ژئوتکنیکی در OPENSEES ۳۹
- شکل ۶-۴: نمودارهای مربوط به مصالح ۴۰
- شکل ۷-۴: رفتار نرم شوندگی مدل ستون طره ۴۲
- شکل ۸-۴: روش نیوتن ۴۳
- شکل ۹-۴: روش نموی نیوتن - رافسون ۴۳
- شکل ۱۰-۴: استهلاک رایلی ۴۵
- شکل ۱۱-۴: طیف پاسخ همپایه شده شتابنگاشتهای گروه AR به همراه مقدار متوسط هندسی آنها ۴۶
- شکل ۱۲-۴: متوسط هندسی طیف شتابنگاشتهای گروه EP و EN که در دوره تناوب قاب مورد نظر همپایه شده‌اند ۴۷
- شکل ۱۳-۴: شتابنگاشت حقیقی A-BOV000 و شتابنگاشت اصلاح شده آن با متوسط طیف شتابنگاشتهای گروه EP ۴۸
- شکل ۱۴-۴: شتابنگاشت حقیقی A-BOV000 و شتابنگاشت اصلاح شده متوسط طیف شتابنگاشتهای گروه EN ۴۹

- شکل ۱-۵: مقایسه نتایج IDA گروه‌های AR، EN و EP؛ (A) نمودار چندک ۵۰٪ IDA؛ (B) نمودار چندک ۱۶٪ و ۸۴٪ IDA؛ (C) منحنی شکست در حالت حدی CP؛ (D) منحنی شکست در حالت حدی IO. ۵۱
- شکل ۲-۵: مقایسه نتایج IDA گروه‌های AR و M-AR؛ (A) نمودار چندک ۵۰٪ IDA؛ (B) نمودار چندک ۱۶٪ و ۸۴٪ IDA؛ (C) منحنی شکست در حالت حدی CP؛ (D) منحنی شکست در حالت حدی IO. ۵۳
- شکل ۳-۵: مقایسه نتایج IDA گروه‌های EP و M-AR؛ (A) نمودار چندک ۵۰٪ IDA؛ (B) نمودار چندک ۱۶٪ و ۸۴٪ IDA؛ (C) منحنی شکست در حالت حدی CP؛ (D) منحنی شکست در حالت حدی IO. ۵۴
- شکل ۴-۵: مقایسه نتایج IDA گروه‌های AR و S-AR؛ (A) نمودار چندک ۵۰٪ IDA؛ (B) نمودار چندک ۱۶٪ و ۸۴٪ IDA؛ (C) منحنی شکست در حالت حدی CP؛ (D) منحنی شکست در حالت حدی IO. ۵۵
- شکل ۵-۵: مقایسه نتایج IDA گروه‌های EP، S-EP و S-EN، EN؛ (A) نمودار چندک ۵۰٪ IDA؛ (B) نمودار چندک ۱۶٪ و ۸۴٪ IDA؛ (C) منحنی شکست در حالت حدی CP؛ (D) منحنی شکست در حالت حدی IO. ۵۶
- شکل ۶-۵ (A): مقایسه نتایج IDA گروه‌های EP، S-EP و S-EN، EN؛ (A) نمودار چندک ۵۰٪ IDA؛ (B) نمودار چندک ۱۶٪ و ۸۴٪ IDA؛ (C) منحنی شکست در حالت حدی CP؛ (D) منحنی شکست در حالت حدی IO. ۵۷

چکیده:

آنالیز دینامیکی افزاینده^۱ و یا (IDA) یکی از روش‌های ارزیابی سازه است که با استفاده از تحلیل دینامیکی غیر خطی مدل ریاضی سازه، تحت شتابنگاشت‌های مقیاس شده رفتار لرزه‌ای و ظرفیت سازه را تعیین می‌کند. سپس با تعریف حالات حدی مانند استفاده بی‌وقفه، آستانه فروریزش و ناپایداری دینامیکی روی منحنی‌های این آنالیز و با ترکیب این نتایج با تحلیل‌های احتمالاتی خطر لرزه‌ای^۲ و یا (PSHA) ساختگاه، می‌توان تعداد متوسط سالیانه افزایش پاسخ از حالت حدی خاصی را تعیین نمود. میزان اعتماد به نتایج این آنالیز بستگی به انتخاب مناسب شتابنگاشت، انتخاب معیار شدت زلزله موثر^۳ و کارآمد^۴ و انتخاب معیار آسیب (خرابی) سازه دارد.

نتایج IDA از یک شتابنگاشت به شتابنگاشت دیگر تغییرات زیادی را نشان می‌دهد. علت این امر تغییرات لحظه‌ای محتوای فرکانسی (تغییرات محتمل) و همچنین ریخت طیف شتابنگاشت‌ها است. در یک دوره تناوب و با شتاب طیفی معلوم، ریخت (شکل) طیف پاسخ زلزله عامل مهمی در پاسخ سازه‌های چند درجه آزادی است. این مطالعه به بررسی حساسیت نتایج این آنالیز به ریخت طیف زلزله و این تغییرات محتمل در محتوای فرکانسی شتابنگاشت‌ها می‌پردازد. بدین منظور یک قاب بتنی تحت دسته شتابنگاشت‌های مختلف و با استفاده از این روش مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای مدل سازی تغییرات محتمل از شتابنگاشتهایی که به صورت مصنوعی ایجاد شده اند استفاده شده و ریخت طیف زلزله با استفاده از مقادیر اپسیلون در نظر گرفته شده است. سپس منحنی‌های IDA هر دسته شتابنگاشت طی انجام آنالیز دینامیکی غیر خطی بدست می‌آید و از روی این نتایج منحنی شکست سازه در حالات حدی تعیین می‌گردد. دیده می‌شود که در نظر نگرفتن ریخت طیف زلزله در انتخاب شتابنگاشت باعث تخمین دست پائین‌تری از رفتار سازه خواهد شد. همچنین تغییرات محتمل در شتابنگاشت‌های مربوط به زلزله‌های قوی‌تر، بیشتر نتایج آنالیز IDA را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: آنالیز دینامیکی افزاینده، ریخت طیف، شتابنگاشت مصنوعی، حالت حدی، منحنی شکست

1. Incremental dynamic Analysis
2. Probabilistic Seismic Hazard Analysis
3. Efficiency
4. Sufficiency

فصل اول

پیشگفتار

۱-۱ مقدمه

از دیر باز، جهت تحلیل و طراحی سازه ها از روش های متفاوتی استفاده شده است که شامل تحلیل استاتیکی خطی^۵، تحلیل استاتیکی غیرخطی^۶، تحلیل دینامیکی خطی^۷ و در نهایت تحلیل دینامیکی غیرخطی^۸ می شوند. ساده ترین این روش ها، تحلیل استاتیکی خطی است که در آن رفتار تمامی اعضا در محدوده خطی تعریف شده و کلیه نیروهای وارد بر سازه به صورت بارهای استاتیکی، مدل می شوند. در واقعیت رفتار مصالح از ماهیت خطی و الاستیک کامل برخوردار نبوده و این مساله به استفاده از روش های غیرخطی منجر می گردد. در این راستا می توان از روش تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده^۹ نام برد. این تحلیل روش مناسبی در پیشبینی نیازهای تغییرشکل و نیرو بوده و در آن تمامی خصوصیات مهم پاسخ غیرخطی و خطی ارایه می شوند. در این روش تحلیلی، بارهای جانبی به صورت الگوهای از پیش

-
5. Linear Static Procedure
 6. Non-Linear Static Procedure
 7. Linear Dynamic Procedure
 8. Non-Linear Dynamic Procedure
 9. Pushover

تعیین شده به کار می‌روند و به صورت تقریبی نیروهای اینرسی نسبی را در موقعیت جرم‌های واقعی تعمیم یافته نشان می‌دهند. سپس با استفاده از روش‌های موجود، تغییر مکان هدف را در سازه مورد نظر تعیین کرده و نیروی جانبی را تحت الگوی مشخص تا رسیدن به تغییر مکان هدف افزایش می‌دهند. تغییر شکل‌ها و نیروهای داخلی در هر سطحی از تغییر مکان محاسبه می‌شوند. این‌ها تخمینی از نیاز تغییر شکل و مقاومت سازه هستند که با ظرفیت موجود قابل مقایسه اند. این روش، تصویر کاملی از رفتار سازه از مرحله الاستیک تا فروریزش را در اختیار قرار می‌دهد، اما ماهیت استاتیکی و مستقل از نوع بار این تحلیل و تناسب نتایج آن با مود اول ارتعاشی، از نقاط ضعف این روش به حساب می‌آیند.

با توجه به ماهیت دینامیکی نیروهای ناشی از زمین‌لرزه که به صورت مشخص در قالب یک تابع ریاضی قابل بیان نیستند، روش‌های متعدد تحلیل عددی دینامیکی سازه‌ها توسعه یافت. از آنجا که سازه‌ها حتی در زلزله‌های با شدت متوسط وارد مرحله غیرخطی رفتاری می‌شوند، باید در تحلیل آنها رفتار غیرخطی مصالح و رفتار غیرخطی هندسی سازه در نظر گرفته شود. در تحلیل دینامیکی غیرخطی سازه‌ها، تغییر شکل‌ها، نیروهای داخلی و به طور کلی پاسخ سازه تحت اثر یک یا چند شتابنگاشت مشخص محاسبه می‌شود. در این روش فرض بر این است که ماتریس‌های سختی و میرایی می‌توانند از یک گام به گام بعدی تغییر کنند، اما فواصل زمانی گام‌ها ثابت است و پاسخ سازه تحت شتاب در نظر گرفته شده برای هر گام زمانی و با استفاده از روش‌های عددی قابل محاسبه است.

پیچیدگی مدل سازه‌ای و رفتار سازه‌ها در هنگام مواجهه با بارهای دینامیکی و در مواردی لزوم تخمین دقیق‌تر از تقاضا و ظرفیت سازه باعث گسترش روش‌های کارآمدتری در علم تحلیل سازه‌ها گردید. بدین ترتیب بررسی‌ها به تدریج از روش‌های استاتیکی خطی به دینامیکی خطی، استاتیکی غیرخطی و در نهایت دینامیکی غیرخطی پیش رفته است. از طرفی افزایش قدرت پردازش کامپیوترها نیز امکان انجام اینگونه تحلیل‌ها را با دقت فراوان مهیا کرده است. یکی از جدیدترین روش‌های تحلیل سازه، روش تحلیل دینامیکی غیرخطی افزاینده یا IDA می‌باشد. این آنالیز پارامتریک بر مبنای آنالیز دینامیکی غیرخطی بوده و جهت بررسی عملکرد سازه‌ها تحت بار زلزله ابداع شده است. در این شیوه تحلیل، یک یا چند شتابنگاشت به چندین سطح از شدت، مقیاس شده و به سازه اعمال می‌گردند. هدف از مقیاس کردن شتابنگاشت‌ها، پوشش دقیق کل محدوده رفتاری سازه از حالت الاستیک تا ویرانی می‌باشد. در هر گام مقیاس کردن، مدل سازه‌ای تحت نگاشت‌های مورد نظر تحلیل شده و یک یا چند منحنی از پاسخ خسارت بر حسب شدت حاصل می‌شود. با استفاده از این منحنی‌ها، تعریف حالات حدی و در نهایت ترکیب نتایج با منحنی تحلیل احتمالی، می‌توان به ارزیابی سازه‌ها پرداخت. اطلاعات منحصر به فردی که این منحنی‌ها در مورد پاسخ سازه‌های چند درجه آزادی بدست می‌آید، می‌تواند توجیهی برگسترش استفاده از این روش، با وجود فرایند دشوار و زمان‌بر انجام آن باشد.

۱-۲ هدف تحقیق

منحنی‌های آنالیز دینامیکی افزاینده از یک شتابنگاشت به شتابنگاشت دیگر رفتار متفاوتی را نشان می‌دهند. این اختلاف در درجه اول وابسته به انتخاب معیار شدت زلزله می‌باشد. عوامل دیگری از جمله نحوه انتخاب شتابنگاشت، عدم قطعیت‌های ناشی از نوع خاک، بزرگای زلزله، فاصله از گسل، مکانیزم گسل و غیره که همگی باعث بوجود آمدن تغییراتی در محتوای فرکانسی زلزله‌ها می‌گردند، نیز در این اختلاف تاثیرگذار است. بررسی تاثیر این عوامل بر زوی نتایج آنالیز دینامیکی افزاینده هدف اصلی است که در این مطالعه دنبال می‌شود.

۱-۳ فصل بندی پایان نامه

در فصل دوم، مفاهیم پایه و همچنین چگونگی انجام آنالیز IDA مرور خواهد شد. روش خلاصه کردن نتایج این آنالیز و چگونگی تعیین حالات حدی روی منحنی‌های آن توضیح داده خواهد شد. در این قسمت نیز درباره منحنی شکست^۱ و چگونگی ساخت آن از روی نتایج IDA مطالبی بیان می‌شود.

فصل سوم مختص به انتخاب و ساخت شتابنگاشت مصنوعی دارد، ابتدا انتخاب شتابنگاشت به روش آئین نامه بیان می‌شود. سپس پارامتری به نام اپسیلون ϵ معرفی و رابطه آن با ریخت طیف بررسی می‌شود. سپس از این پارامتر عددی در انتخاب شتابنگاشت استفاده خواهد شد. در ادامه برای مدل کردن تغییرات احتمالی در یک شتابنگاشت نگاهی اجمالی بر روش‌های تولید شتابنگاشت مصنوعی خواهیم داشت، و جزئیات روش‌های استفاده شده برای تولید شتابنگاشت مصنوعی در این پایان نامه بیان می‌گردد.

فصل چهارم اختصاص به روش انجام این مطالعه دارد. ابتدا درباره نرم افزار المان محدود مورد استفاده مطالبی ارائه می‌شود. شتابنگاشت‌های مختلف که برای اهداف تحقیق نیاز است و چگونگی انتخاب و یا ساخت آنها بیان می‌گردد.

در فصل پنجم به بررسی حساسیت نتایج آنالیز IDA تحت شتابنگاشت‌های مختلف خواهیم پرداخت.

و در نهایت در فصل ششم به بررسی نتایج و ارائه پیشنهادات پرداخته خواهد شد.

فصل دوم

آنالیز دینامیکی افزایشده^{۱۱} و کاربرد آن در طراحی براساس عملکرد

۱-۲ مقدمه

خسارات و خرابی‌های ناشی از زلزله‌های قبلی خلاء موجود در روش‌های طراحی آئین نامه‌ها را نشان می‌دهد. در این راستا مهندسی زلزله بر اساس عملکرد^{۱۲} و یا PBEE مورد توجه بسیاری از آئین نامه‌ها قرار گرفته است. (SEAOC, Vision 2000, 1995) (ATC, 1996)، (FEMA, 1997)، (FEMA-350, 2000). مهم‌ترین مرحله در طراحی براساس عملکرد استفاده از یک روش قدرتمند برای آنالیز دقیق مدل سازه، تخمین (تعیین توزیع) میزان آسیب در هر شدت از زمین‌لرزه و همچنین تعیین شدت زلزله‌ای که باعث افزایش پاسخ سازه از حالت حدی خاصی می‌شود، می‌باشد. این نتایج با ترکیب با تحلیل‌های احتمالی خطر زلزله و یا PSHA تعداد متوسط سالیانه افزایش پاسخ سازه از حالت حدی مدنظر را تعیین می‌کند. برای این منظور روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است، ولی مهم‌ترین و جدیدترین آنها آنالیز دینامیکی افزایشده

-
11. Incremental Dynamic Analysis (IDA)
 12. Performance Base Earthquake Engineering

(IDA) است. بر اساس این روش، قابلیت بررسی رفتار سازه از حالت الاستیک خطی تا انهدام کامل با کمک گرفتن از مقیاس زلزله‌ها و اعمال آنها به سازه امکان پذیر می‌شود و درک نسبتاً مناسبی از رفتار سازه، تحت اثر یک زلزله و یا چند زلزله، در اختیار قرار می‌گیرد. با خلاصه کردن نمودارهای نتایج این آنالیز همچنین تعریف حالات حدی روی این منحنی‌ها و ترکیب این نتایج با تحلیل‌های احتمالاتی خطر زلزله (PSHA)، به راحتی می‌توان به هدف اشاره شده دست یافت. در این فصل پس از آشنایی با مفاهیم پایه آنالیز IDA، به توضیحاتی درباره منحنی شکست^{۱۳} و نحوه ساخت آن از روی نتایج آنالیز IDA پرداخته می‌شود. در فصل‌های آینده با مقایسه نتایج منحنی‌های خلاصه شده IDA و همچنین بررسی منحنی‌های شکست به مقایسه نتایج آنالیز IDA پرداخته می‌شود.

۲-۲ تاریخچه

روش افزایش تدریجی بارهای لرزه ای اولین بار توسط محققانی از جمله (Bertero, 1977)، (Nassar & Krawinkler, 1991)، (Mehanny & Deierlein, 2000) و (Luco & Cornell, 2000) برای بررسی عملکرد سازه‌ها مورد استفاده قرار گرفت، ولی (Vamvatsikos & Cornell, 2002) برای اولین بصورت سیستماتیک به بررسی امکان استفاده از این روش برای ارزیابی رفتار سازه‌ها پرداختند. در دهه اخیر این روش توسط آژانس مدیریت بحران فدرال آمریکا^{۱۴} (FEMA) پذیرفته شده و در راهنماهای (FEMA-350, 2000) و (FEMA-351, 2000) برای تعیین ظرفیت فروریزش کلی سازه مورد توجه قرار گرفته است.

۲-۳ اهداف آنالیز دینامیکی غیرخطی افزایشی

- امروزه روش آنالیز دینامیکی غیرخطی افزایشی (IDA)، روشی با اهداف و کاربری‌های مختلف بوده که برخی از این اهداف عبارتند از: (Vamvatsikos & Cornell, 2002)
- ✓ درک کامل از دامنه پاسخ یا نیاز یک سازه در برابر سطوح شدت مختلف حرکت زمین.
 - ✓ درک بهتر رفتار سازه در زلزله‌های شدید و نادر.
 - ✓ تشخیص بهتر تغییر در پاسخ سازه با افزایش شدت زمین‌لرزه (تغییرات در الگوهای تغییرشکل‌های ماکزیمم در ارتفاع سازه، شروع روند کاهش سختی و مقاومت و الگوها و شدت آنها و...).
 - ✓ تخمین نسبتاً دقیق‌تر از ظرفیت دینامیکی کلی سیستم.
 - ✓ چگونگی پایداری یا تغییرپذیری موارد فوق با استفاده از مطالعه چند منحنی IDA.

13. Fragility curve

14. Federal Emergency Management Agency

۲-۴ تعاریف در تحلیل دینامیکی افزایشنده

در این بخش به صورت خلاصه به تعریف مبانی و مفاهیم مورد نیاز در این تحلیل می‌پردازیم. (Vamvatsikos & Cornell, 2002).

۲-۴-۱ ضریب مقیاس

برای تعیین حرکت زمین در سطوح مختلف شدت از ملایم تا خیلی قوی، باید شتابنگاشت انتخاب شده را مقیاس کرد. بدین منظور از یک تبدیل ساده و یکنواخت با استفاده از ضریب مقیاس استفاده می‌شود. ضریب مقیاس در یک شتابنگاشت مقیاس شده، یک مقدار عددی (اسکالر) غیرمنفی است که دامنه آن از صفر تا بینهایت تغییر می‌کند. (۱-۲)

$$\lambda \in [0, +\infty)$$

این مقدار عددی در تمامی مقادیر ثبت شده از شتابنگاشت مورد نظر ضرب شده و با توجه به کوچک یا بزرگ بودن آن، سطح شدت کاهش یا افزایش می‌یابد. در صورتی که بردار شتابنگاشت مقیاس نشده را a_1 و بردار شتابنگاشت مقیاس شده را a_λ بنامیم: (۲-۲)

$$a_\lambda = \lambda a_1$$

مقدار $\lambda = 1$ به شتابنگاشت طبیعی، $\lambda < 1$ به شتابنگاشت با مقیاس پائین و $\lambda > 1$ به شتابنگاشت با مقیاس بالا دلالت دارد.

۲-۴-۲ اندازه شدت حرکت زمین^{۱۵} (IM)

اندازه شدت حرکت زمین و یا معیار شدت (IM)، کمیتی مقیاس‌پذیر از یک شتابنگاشت است. این کمیت در واقع تابعی، از شتابنگاشت اصلی است که به صورت هماهنگ با افزایش یا کاهش شتابنگاشت، تغییر می‌کند. (۳-۲)

$$IM = f_{a_1}(\lambda)$$

مثال‌هایی از این کمیت که قابلیت مقیاس شدن دارند، شامل ماکزیمم شتاب زمین (PGA)، ماکزیمم سرعت زمین^{۱۶} (PGV) و شتاب طیفی در مود اول ارتعاشی سازه با در نظر گرفتن نسبت میرایی ۵ درصد ($Sa(T1, \zeta = 5\%)$) می‌باشند. کمیت‌های دیگری نیز وجود دارند که توانایی بیان اندازه شدت حرکت زمین را داشته اما قابلیت مقیاس‌پذیری ندارند که از آن جمله می‌توان به بزرگای لنگر، مدت زمان اثر شتابنگاشت و شدت اصلاح شده مرکالی اشاره کرد.

15. Intensity Measure
16. Peak ground velocity

به طور کلی بسته به نوع سازه و هدف مورد نظر معیار شدت های مختلفی را می توان استفاده نمود. یک معیار شدت مناسب باید کارآمد^{۱۷}، کافی^{۱۸}، و مقیاس پذیر باشد. منظور از کارآمد بودن معیار شدت، معیار شدتی است که باعث شود که در یک شدت یکسان پراکندگی کمتری در پاسخ سازه دیده شود و در نتیجه پاسخ سازه مستقل از مشخصات شتابنگاشت (بزرگ، فاصله از گسل و...) باشد و منظور از کفایت معیار شدت، معیار شدتی است که طی آن پاسخ سازه مستقل از انتخاب شتابنگاشت و مقیاس آن باشد.

۲-۴-۳ شدت خرابی یا تغییرپذیری شرایط سازه^{۱۹} (DM)

این کمیت نیز یک مقدار عددی مثبت است که خصوصیات پاسخ مدل سازه ای را در برابر بارهای لرزه ای مورد نظر، بیان می کند.
(۲-۴)

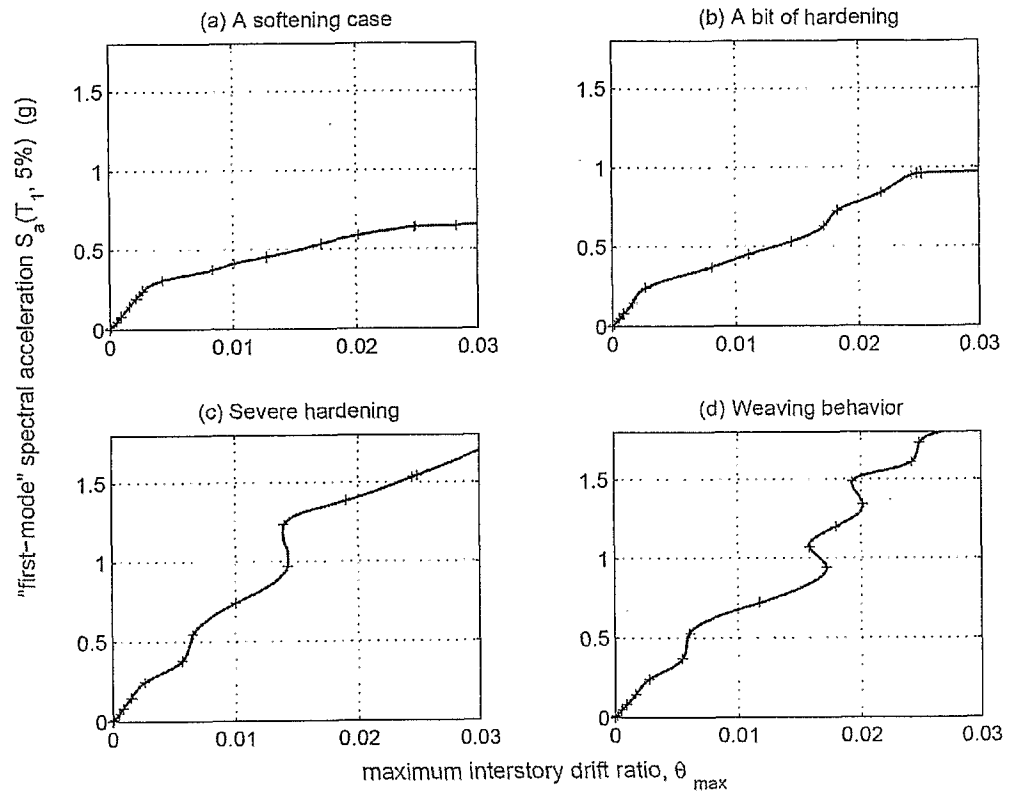
$$DM \in [0, +\infty)$$

به عبارت دیگر (DM) کمیتی است که می تواند از نتایج خروجی تحلیل دینامیکی غیرخطی برداشت شود. گزینه مناسب برای این کمیت می تواند ماکزیمم برش پایه، چرخش های گره ای، حداکثر شکل پذیری طبقه، حداکثر تغییر مکان بام، حداکثر زاویه تغییر مکان نسبی طبقه ای^{۲۰} یک سازه n طبقه و یا ماکزیمم آنها و یا زاویه تغییر مکان نسبی کل طبقات در یک سازه n طبقه $\theta_{max} = \text{Max}(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$ باشد. انتخاب یک DM مناسب به نوع سازه و خرابی مورد نظر بستگی دارد. در طراحی سازه بر اساس عملکرد گاهی لازم است که از دو و یا چند فاکتور شدت خرابی که همگی از آنالیزهای غیر خطی یکسان حاصل شده اند، برای ارزیابی پاسخ سازه، تعیین سطوح عملکردی و یا تعیین موده های خرابی استفاده شود.

۲-۴-۴ مطالعه یک IDA تک نگاهت

این منحنی شامل یک سری آنالیز دینامیکی غیرخطی است که بر روی مدل سازه ای با در نظر گرفتن یک شتابنگاشت منفرد وجود می آید. این شتابنگاشت به وسیله ضریب مقیاس به سطوح شدت مختلف مقیاس شده است. قابل ذکر است که این تحلیل ها با توجه به در نظر گرفتن IM مناسب که محدوده کاملی از رفتار سازه از الاستیک تا غیرخطی و در نهایت تروریزش را نشان می دهد، انجام می شوند. هدف بدست آوردن خرابی ها یا DM های مدل سازه ای در هر سطحی از IM است. انجام آنالیزها با افزایش گام به گام IM تا زمان رسیدن به ناپایداری دینامیکی ادامه می یابد. با ترسیم مقادیر IM و DM در یک دستگاه، منحنی پیوسته IDA حاصل می شود. در شکل ۱-۲ نمونه هایی از منحنی های فوق برای یک قاب ۵ طبقه مهاربندی شده تحت ۴ شتابنگاشت نشان داده شده است.

-
- 17. Efficient
 - 18. Sufficient
 - 19. Damage Measure
 - 20. Maximum Interstory Drift (MID)

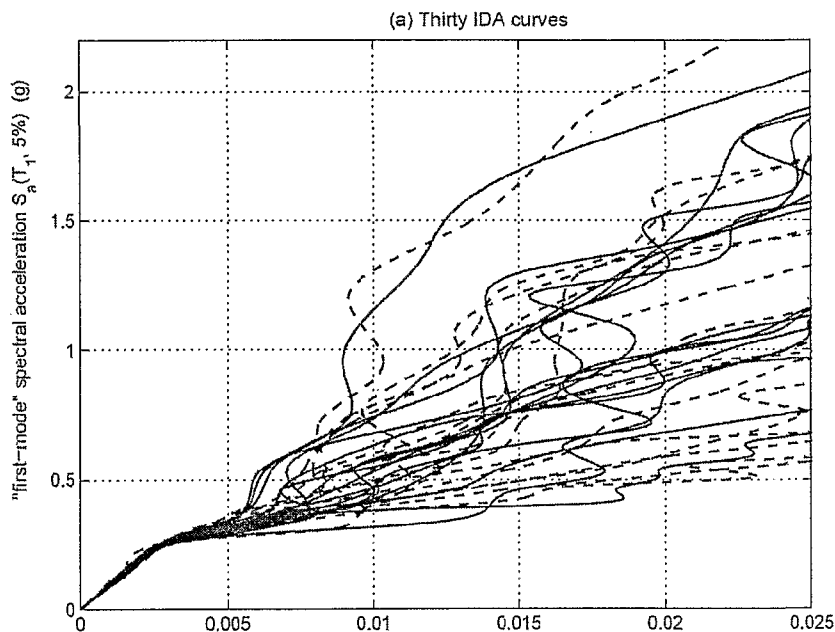


شکل ۱-۲: منحنی های IDA یک قاب ۵ طبقه مهاربندی شده فولادی ($T_1 = 1.8s$) تحت اثر چهار شتابنگاشت مختلف

منحنی های آنالیز دینامیکی غیرخطی افزایش یافته شامل تعدادی منحنی IDA است که هر یک از آنها با استفاده از چند آنالیز دینامیکی غیرخطی بر روی شتابنگاشتی که روی چند سطح شدت مقیاس شده است، بدست می آیند. شکل ۲-۲ نمونه ای از این نمودارها را برای سازه مهاربندی شده ۵ طبقه تحت ۳۰ نگاشت را نشان می دهد.

۲-۵ برخی خواص منحنی IDA

همانطور که در شکل های ۱-۲ و ۲-۲ نشان داده شد، یک مدل سازه ای رفتار متفاوتی را در برابر شتابنگاشت های مختلف از خود نشان می دهد. به عنوان مثال، در منحنی (a) شکل ۱-۲ سازه حالت نرم شدگی سریع داشته و در منحنی (c)، همان سازه، رفتار سخت شونده از خود نشان می دهد. این تفاوت رفتاری به علت وجود اختلاف در ویژگیهای شتابنگاشت ها (محتوای فرکانسی) می باشد. کلیه منحنی های شکل ۱-۲ و ۲-۲ دارای قسمتی خطی هستند که در $S_a \approx 0.2g$ و $\theta_{max} = 0.2\%$ متناظر با زمانی که اولین کماتش بادبند رخ خواهد داد، تمام می شود. در واقع در تمام مدل های سازه ای زمانی که اولین عضو به حد جاری شدن رسیده و وارد مرحله غیرخطی شود، منحنی IDA از حالت الاستیک خارج می شود.



شکل ۲-۲: منحنیهای IDA یک قاب 5 طبقه مهاربندی شده فولادی تحت ۳۰ شتابنگاشت

با دقت در منحنی‌های شکل ۲-۲ و ۲-۲، می‌توان مشاهده کرد که در یک DM مشخص، هر یک از منحنی‌ها در یک IM، متفاوت از سایر منحنی‌ها قطع می‌شود. به طور مثال منحنی (a) پس از اولین کماتش سریعاً نرم می‌شود، ولی منحنی‌های (d) و (c) حول یک خط با شیبی برابر با شیب الاستیک نوسان می‌کنند. دلیل رفتار موجی شکل در این منحنی‌ها، نرم شدگی و سخت شدگی‌های متوالی است که به وسیله کاهش یا افزایش سختی در IM‌های متفاوت ایجاد می‌شوند. بخش نرم شدگی نهایی زمانی اتفاق می‌افتد که انباشتگی خسارت در سازه به مقدار قابل توجهی افزایش یابد. نقطه شروع نرم شدگی، یعنی زمانی که با افزایش بسیار اندک شدت (IM)، خسارت به شدت افزایش می‌یابد، آغاز ناپایداری دینامیکی سازه می‌باشد.

این گونه رفتار در سازه بیش از آنکه به اندازه شدت حرکت زمین بستگی داشته باشد به الگوی بار و تغییرات آن نسبت به زمان وابسته است. بنابراین علت اصلی تفاوتی که در نمودارهای IDA تحت شتابنگاشت‌های مختلف دیده می‌شود، به شتابنگاشت انتخاب شده و محتوای فرکانسی (الگوی بار) آن بستگی دارد.

۲-۶ خلاصه کردن منحنی‌های IDA

پس از انتخاب و مقیاس شتابنگاشت‌ها به سطح‌های مورد نیاز و انجام آنالیز دینامیکی غیرخطی افزاینده تحت هر یک از آنها، یک دسته منحنی IDA حاصل می‌شود که در صورت انتخاب DM و IM یکسان می‌توان تمامی منحنی‌ها را در یک دستگاه ترسیم کرد. در این حالت حجم زیادی از اطلاعات برای سازه با توجه به زلزله‌های اعمالی به آن بوجود می‌آید. علاوه بر این به دلیل وجود دامنه وسیعی از پاسخ‌های مدل سازه‌ای در مقابل زلزله‌های مورد استفاده، خلاصه کردن اطلاعات ضروری به نظر می‌رسد.