

## ۱-۱-۱- روش تحلیل دینامیکی افزایشی

در حال حاضر، دقیق‌ترین روش برای تحلیل سازه‌ها، روش تحلیل دینامیکی غیرخطی است؛ اما یکی از معایب این روش، این است که نتایج این روش به شدت به شتاب‌نگاشت استفاده‌شده برای انجام تحلیل وابسته است. برای حل این مشکل، محققان به ابداع روش‌های جدیدی دست زدند که بتوان طیف وسیعی از شتاب‌نگاشت‌ها را در تحلیل سازه‌ها در نظر گرفت و به پاسخ‌های کلی‌تری دست یافت. یکی از جدیدترین و دقیق‌ترین روش‌ها که در حال حاضر نیز کاربرد وسیعی در کارهای تحقیقاتی دارد، روش تحلیل دینامیکی افزایشی است. در این روش پس از انتخاب تعدادی شتاب‌نگاشت که مناسب سازه‌های مورد بررسی باشد، با انتخاب یکی از پارامترهای مربوط به شتاب‌نگاشت به عنوان شدت زلزله و مقیاس کردن شتاب‌نگاشت‌ها بر اساس این پارامتر و با ضرایب مقیاس مختلف، تحلیل سازه را تحت هر رکورد تا جایی ادامه می‌دهیم که سازه به حد فروپاشی برسد. بدین ترتیب به جامعه آماری وسیع‌تری دست می‌یابیم و می‌توان رفتار سازه را به صورت بسیار دقیق‌تری و برای طیف وسیعی از لرزه‌ها به دست آورد. لازم به ذکر است که در این تحقیق بیشینه نسبت دررفت بین طبقات به عنوان معیار ارزیابی شدت خرابی در نظر گرفته شده است؛ زیرا بحث خرابی معمولاً مربوط به تغییر شکل غیرخطی است؛ بنابراین می‌توان پارامتر آسیب را به صورتی در نظر گرفت که معرف یک نوع تغییر شکل در سازه باشد. شدت زلزله‌ها نیز با استفاده از شتاب طیفی مود اول مشخص شده است. این پارامتر در مقایسه با سایر پارامترها قابل اعتمادترین معیار شدت زلزله است، زیرا هم به مشخصات خاک محل و هم به پیوند اولیه سازه وابسته است [۵۲].

### ۱-۱-۱-۱- ارزیابی روش تحلیل دینامیکی افزایشی

نتایج استفاده از تحلیل IDA در کارهای تحقیقاتی متنوع ثابت کرده است که این روش، کارایی بسیار مناسبی در ارزیابی عملکردی سازه‌ها دارد و رفتار سازه را در طیف وسیعی از زلزله‌ها با شدت‌های مختلف منعکس می‌کند. داده‌های حاصل از این نوع تحلیل، اطلاعات ارزشمندی از جمله، محدوده پاسخ سازه در مقابل شدت‌های محتمل زمین‌لرزه، رفتار سازه در مقابل زمین‌لرزه‌های نادر و شدید، پاسخ طبیعی سازه به افزایش تدریجی شدت زمین‌لرزه، ظرفیت محتمل دینامیکی سیستم سازه‌ای و... را در اختیار محقق می‌گذارد.

### ۱-۱-۲- تشریح روش تحلیل دینامیکی افزایشی

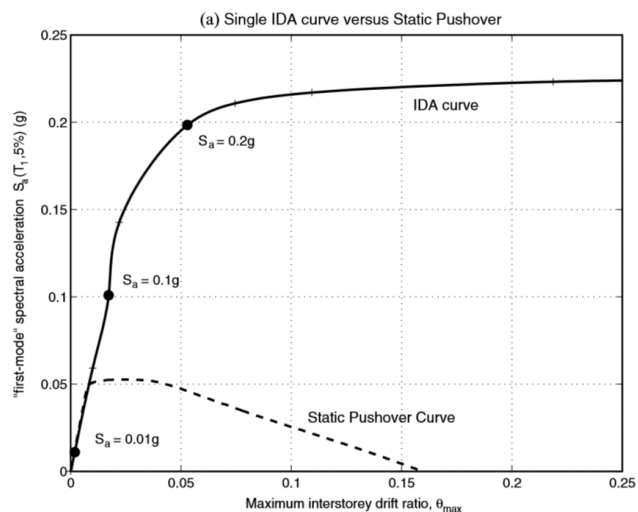
برای انجام تحلیل دینامیکی افزایشی در گام اول، کاربر باید دو پارامتر، یکی به عنوان معیاری برای سنجش شدت زلزله و دیگری به عنوان معیاری برای سنجش شدت خرابی انتخاب نماید. روند تحلیل بدین صورت است که بر

اساس پارامتر انتخاب شده به عنوان شدت زلزله، شتاب‌نگاشت مورد نظر، با استفاده از ضرایب مقیاس مختلف، طوری مقیاس می‌شود که از شتاب‌نگاشت مورد نظر، شتاب‌نگاشت‌های متعددی با شدت‌های مختلف ساخته می‌شود؛ و هر کدام از شتاب‌نگاشت‌های حاصل از مقیاس کردن شتاب‌نگاشت مورد نظر به سازه اعمال می‌گردد و پاسخ آن با استفاده از پارامتری که به عنوان معیار شدت خرابی سازه در نظر گرفته شده بود، سنجیده می‌شود. عمل مقیاس کردن شتاب‌نگاشت و اعمال آن به سازه تا رسیدن به حد فروپاشی سازه انجام می‌گردد. پارامترهای مختلفی از جمله بیشینه شتاب، بیشینه سرعت، شتاب طیفی مود اول و... می‌تواند به عنوان شدت زلزله در نظر گرفته شود. همچنین پارامترهایی از جمله بیشینه برش پایه، دوران گره‌ای سازه، بیشینه نسبت دریافت بین طبقات و ... می‌توانند به عنوان معیار شدت خرابی در نظر گرفته شوند. انتخاب پارامتر خرابی به کاربری سازه و اهمیت آن بستگی دارد.

با به دست آوردن مقادیر خرابی متناظر با شدت‌های مختلف، می‌توان منحنی IDA را برای رکورد مورد نظر رسم نمود. منحنی‌های IDA، منحنی‌های شدت خرابی در مقابل شدت زلزله می‌باشند. هر منحنی IDA مربوط به یک شتاب‌نگاشت می‌باشد. منحنی‌های IDA را می‌توان به صورت سه بعدی نیز رسم نمود؛ اما منحنی‌های IDA دوبعدی کاربرد بیشتری در کارهای تحقیقاتی دارد؛ زیرا می‌توان منحنی‌های IDA دوبعدی را با سایر منحنی‌های رفتاری سازه از جمله نیرو-جابجایی، پوش‌آور و ... مقایسه نمود.

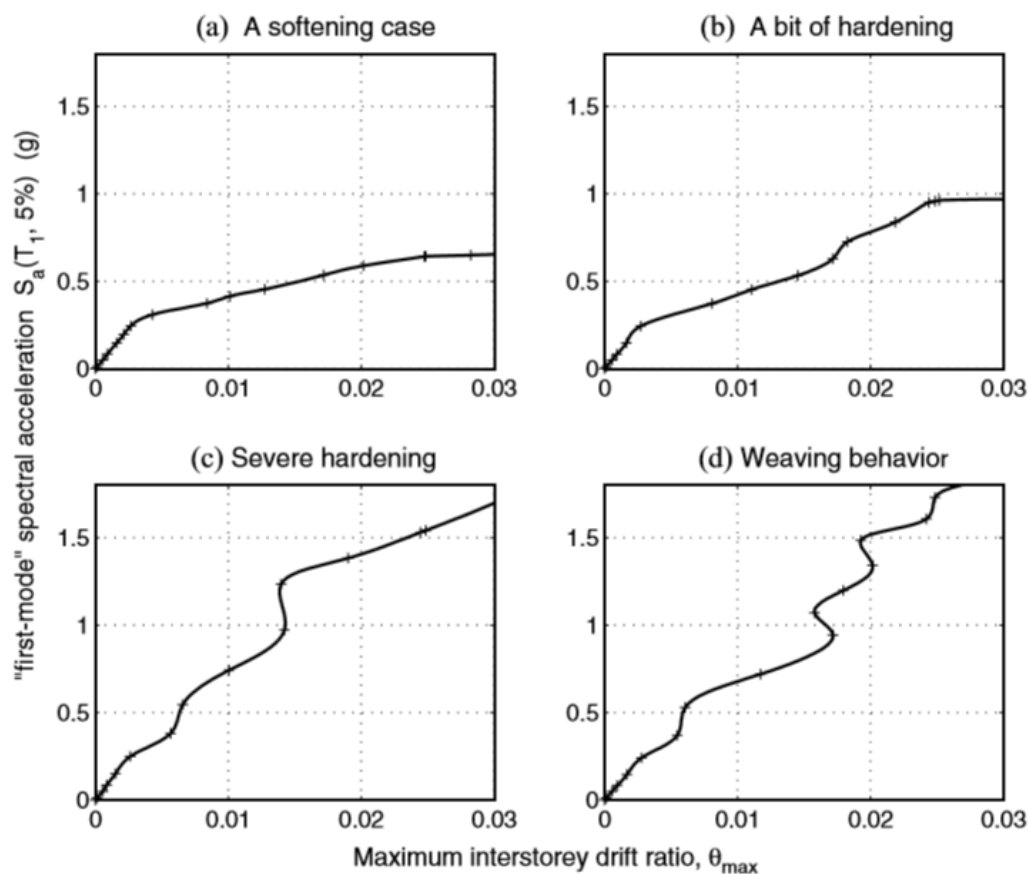
### ۱-۱-۳- تحلیل دینامیکی افزایشی تکررکورد

اگر روندی را که در بخش قبل توضیح داده شد، انجام شود، داده‌هایی به دست می‌آیند که در واقع نقاطی از منحنی IDA سازه تحت آن رکورد است؛ بنابراین از مقیاس کردن یک شتاب‌نگاشت با ضرایب مختلف و اعمال آن‌ها به سازه و تحلیل سازه تحت آن‌ها یک منحنی به دست می‌آید. این منحنی را، منحنی تکررکورد IDA می‌نامند. منحنی تکررکورد به تنهایی پاسخ جامع و دقیقی از سازه را نشان نمی‌دهد؛ زیرا منحنی‌های IDA به شتاب‌نگاشت مورد استفاده به شدت وابسته است؛ بنابراین باید این آنالیز دینامیکی افزایشی را طبق روند گفته شده برای تعداد بیشتری شتاب‌نگاشت انجام داد تا به مجموعه‌ای از منحنی‌های IDA دست یافت و برای محاسبات مورد نظر و ارزیابی سازه مورد مطالعه جامعه آماری بزرگ‌تری در اختیار باشد. شکل (۱-۱) نمونه‌ای از منحنی تک رکورد IDA را نمایش می‌دهد.



شکل (۱-۱) نمونه‌ای از منحنی IDA تک رکورد که برای قاب خمشی فولادی ۲۰ طبقه به دست آمده است. [۵۳]

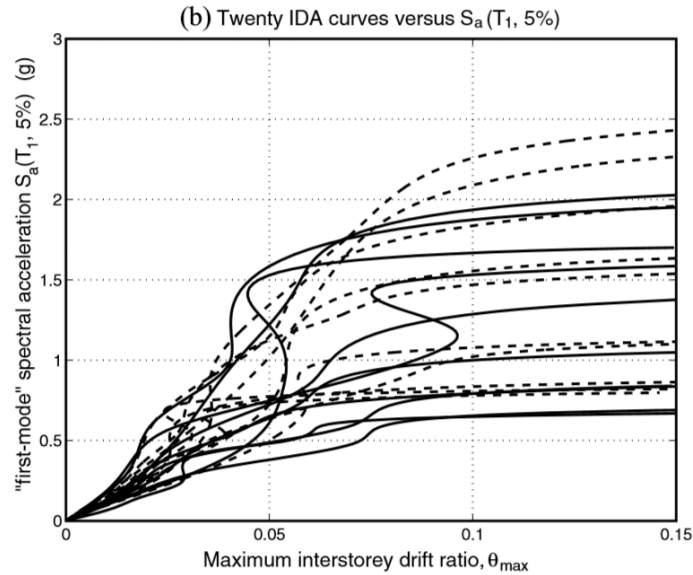
منحنی‌های IDA به نوع سازه و خصوصیات شتاب‌نگاشت، به خصوص محتوای فرکانسی آن به شدت وابسته است؛ بنابراین اگر یک سازه مشخص را تحت شتاب‌نگاشت‌های مختلف با استفاده از این روش تحلیل نماییم، به منحنی‌های متفاوتی دست می‌یابیم. شکل (۲-۱) منحنی‌های IDA تک‌رکورد را برای یک سازه مشخص که تحت ۴ شتاب‌نگاشت مختلف تحلیل شده است را نمایش می‌دهد. در شکل مذکور مشاهده می‌شود که قسمت ابتدایی همه منحنی‌های IDA خطی است که نماینده رفتار سازه در حوزه الاستیک می‌باشند؛ و سپس از نقطه‌ای به بعد وارد حوزه غیرخطی شده و شیب نمودار در آن قسمت‌ها، نماینده سختی سازه در ناحیه غیرخطی است. در واقع هر یک از نمودارهای IDA نماینده رفتار سازه تحت یک شتاب‌نگاشت خاص می‌باشند.



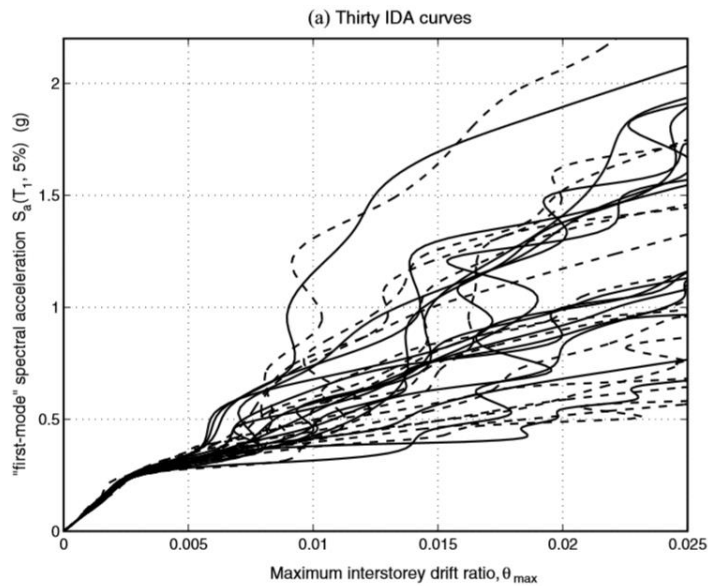
شکل (۲-۱) منحنی‌های IDA یک سازه فولادی تحت ۴ شتاب‌نگاشت مختلف [۵۳]

#### ۴-۱-۱- تحلیل دینامیکی افزایشی چند رکورد

در بخش قبل ذکر شد که با استفاده از تنها یک شتاب‌نگاشت نمی‌توان به رفتار دقیق سازه دست یافت؛ بنابراین باید از مجموعه‌ای از شتاب‌نگاشت‌ها برای تحلیل سازه استفاده نمود. منحنی‌های IDA چندرکورد، در واقع مجموعه‌ای از منحنی‌های IDA تک‌رکورد است که حاصل انجام تحلیل‌های دینامیکی افزایشی با استفاده از مجموعه‌ای از شتاب‌نگاشت‌ها است. این منحنی‌ها امکان دستیابی دقیق‌تر به رفتار سازه را ایجاد می‌کند (شکل ۱-۳) و شکل (۱-۴) نمونه‌هایی از منحنی‌های IDA چند رکورد است که برای دو قاب مهاربندی شده به ترتیب با تعداد طبقات ۵ و ۹ به دست آمده است.



شکل (۳-۱) مجموعه منحنی‌های IDA برای یک قاب مهاربندی شده ۹ طبقه [۵۳]



شکل (۴-۱) مجموعه منحنی‌های IDA برای یک قاب فولادی مهاربندی شده ۵ طبقه تحت ۳۰ شتاب‌نگاشت [۵۳]

### ۵-۱-۱- ترکیب نمودارهای IDA

همان‌طور در بخش‌های قبل اشاره شد، یک منحنی IDA تک‌رکورد به تنهایی نمی‌تواند رفتار دقیقی از سازه را منعکس نماید، به همین دلیل منحنی‌های IDA برای سازه مورد مطالعه تحت چندین شتاب‌نگاشت استخراج می‌شود. نتایج حاصل از تحلیل آن‌ها جامعه آماری قابل قبولی را در اختیار می‌گذارد که می‌توان رفتار سازه را به

صورت دقیق تر و قابل اطمینان تری ارزیابی نمود. بعد از دست یافتن به چنین جامعه آماری، لازم است که داده‌های موجود با روش‌های آماری و به شکل صحیحی با هم ترکیب شوند و رفتار کلی سازه را تحت شتاب‌نگاشت‌های کلی نمایش دهند. در واقع می‌توان با ترکیب منحنی‌های IDA که هر یک رفتار زلزله را تنها تحت یک شتاب‌نگاشت خاص نشان می‌دهد، به رفتار کلی سازه تحت شتاب‌نگاشت‌های کلی دست یافت. در واقع از ترکیب منحنی‌های IDA که داده‌های قطعی هستند، به منحنی‌های IDA تصادفی دست می‌یابیم و می‌توان از آن‌ها توابع احتمالاتی مربوط به رفتار سازه تحت زمین‌لرزه را نیز استخراج نمود. ساده‌ترین روشی که برای ترکیب منحنی‌های IDA استفاده می‌گردد، منحنی‌های صدک‌های ۱۶٪، ۵۰٪ و ۸۴٪ مجموعه منحنی‌های IDA است. در این تحقیق نیز از همین روش برای ترکیب منحنی‌های به دست آمده برای سازه‌های مورد مطالعه استفاده شده است.

## ۱-۲- انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها

انتخاب رکوردهای مناسب از مهم‌ترین گام‌های تحلیل دینامیکی افزایشی است؛ زیرا منحنی‌های به دست آمده از تحلیل IDA به شدت به رکوردها وابسته هستند. رعایت نکات زیر در انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها برای انجام تحلیل IDA ضروری است:

❖ اگر رکورد ضعیفی به سازه اعمال شود، ممکن است سازه به حد فروپاشی نرسد و منحنی‌های ناقصی به دست آید؛ و از طرفی اگر رکورد خیلی قوی به سازه اعمال گردد، سازه دچار شکست ترد می‌گردد و به سرعت دچار فروپاشی می‌شود و امکان بررسی دقیق رفتار سازه وجود ندارد؛ بنابراین لازم است که بزرگی لرزه‌های انتخابی در محدوده معقولی باشد. در این تحقیق بزرگی لرزه‌های اصلی در محدوده ۵.۵۹ الی ۷ است و بزرگی پس‌لرزه‌ها در محدوده ۵.۰۱ الی ۶.۵ است. همان‌طور که در فصل دوم اشاره شد، بر اساس قانون باث به طور میانگین بزرگی پس‌لرزه‌ها، به مقدار ۱.۱۱ کمتر از لرزه‌های اصلی است. تفاوت بزرگی لرزه‌های اصلی و پس‌لرزه‌های انتخاب‌شده نیز به همین دلیل است.

❖ در انتخاب رکوردها توجه به نوع خاک نیز ضروری است. رکوردهای انتخاب‌شده باید به لحاظ ساختگاه مشابه باشند. در این تحقیق با توجه به اینکه خاک محل احداث سازه‌ها از نوع سوم طبق آیین‌نامه ۲۸۰۰ فرض شده بود، انتخاب رکوردها نیز به صورتی بوده است که سرعت موج برشی مربوط به محل برداشت داده‌ها در محدوده خاک نوع سوم آیین‌نامه ۲۸۰۰ باشد. جدول (۱-۱) طبقه‌بندی خاک بر اساس آیین‌نامه ۲۸۰۰، ویرایش چهارم را نمایش می‌دهد.

❖ مسئله مهم دیگر در انتخاب رکوردها برای انجام تحلیل IDA، مدت زمان تداوم لرزه‌ها است که باید

حداقل ۱۰ ثانیه باشد. در این تحقیق نیز به این مسئله توجه شده است.

❖ رکوردهای زلزله بر اساس فاصله تا گسل به دو دسته دور از گسل و نزدیک به گسل تقسیم‌بندی می‌شوند. رکوردهای زلزله‌ای که در فاصله ده کیلومتر و یا کمتر از گسل ثبت شده‌اند، در دسته رکوردهای نزدیک به گسل قرار دارند و رکوردهایی که در فاصله بیش از ده کیلومتر ثبت شده‌اند، در دسته رکوردهای دور از گسل می‌باشند [۹]. با توجه به تفاوت‌های این دو نوع لرزه، رکوردهای انتخاب‌شده برای انجام تحلیل IDA باید همگی از یکی از این دسته‌ها انتخاب گردد. در این تحقیق همه لرزه‌های انتخاب‌شده از نوع لرزه‌های دور از گسل می‌باشند.

❖ تعداد رکوردهای انتخابی نیز برای انجام تحلیل IDA باید طوری باشد که هم به جواب‌های دقیقی رسید (یعنی جامعه آماری مناسبی ایجاد شود) و هم اینکه تعداد بیش از اندازه زیاد نباشد که منجر به حجم زیاد خروجی‌ها و زمان بر شدن تحلیل گردد. طبق توصیه‌ی شوم<sup>۱</sup> و کورنل<sup>۲</sup> [۵۴] تعداد ۱۰ تا ۲۰ رکورد زلزله دقت قابل قبولی برای برآورد تقاضای آسیب‌پذیری سازه‌ها ایجاد می‌کند. در این تحقیق از ۱۵ رکورد متوالی استفاده گردیده است. رکوردهای استفاده‌شده در این تحقیق در **Error! Reference source not found.** ارائه شده است. این شتاب‌نگاشت‌ها از دو پایگاه داده مرکز تحقیقات زلزله اقیانوس آرام [۵۱] و مرکز مهندسی داده‌های زمین‌لرزه‌های قوی [۵۵] برداشت شده‌اند. طیف‌های شتاب مود اول لرزه‌های استفاده‌شده نیز در **Error! Reference source not found.** و **Error! Reference source not found.** مشاهده می‌گردد.

جدول (۱-۱) طبقه‌بندی نوع خاک طبق آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران-ویرایش چهارم [۴۱]

طبقه‌بندی نوع زمین	متوسط سرعت موج برشی خاک در عمق ۳۰ متر (متر بر ثانیه)
نوع یک	$V_s \geq 750$
نوع دوم	$375 < V_s < 750$
نوع سوم	$175 < V_s < 375$

<sup>۱</sup> Shome

<sup>۲</sup> Cornell

$$V_s \leq 175$$

نوع چهارم