

مدل سازی برای

طراح سازدها

*Dr.grahamH.powell*

مترجمین

مهندس علیرضا صالحین و مهندس مرتضی راضی

## فهرست مطالب

۱	فصل اول - مقدمه
۱-۱	۱-۱ کلیات
۲-۱	۲-۱ مراحل انجام تحلیل
۳-۱	۳-۱ اهمیت نسبی مراحل مختلف تحلیل
۴-۱	۴-۱ تقاضا و ظرفیت
۵-۱	۵-۱ تحلیل الاستیک و غیرالاستیک
۶-۱	۶-۱ تحلیل های استاتیکی و دینامیکی
۷-۱	۷-۱ تحلیل تغییرشکل های بزرگ و کوچک
۸-۱	۸-۱ تحلیل تقاضا و تحلیل ظرفیت
۲۷	فصل ۲ - مدل تحلیلی چیست؟
۲۷	۱-۲ سازه ای واقعی و مدل سازه ای
۲۷	۲-۲ دو نوع مدل سازه ای
۲۹	۳-۲ مشخصات مدل المان - گره
۳۱	۴-۲ برخی از انواع المان های سازه ای
۳۲	۵-۲ اتصال بین گره ها و المان ها
۳۴	۶-۲ شکاف ها و هم پوشانی های بین المان ها
۳۵	۷-۲ تعادل بین المان ها
۳۷	۸-۲ مدل گسسته با المان هایی با بعد محدود و المان های بی بعد
۳۸	۹-۲ مدل های پیوسته
۴۱	۱۰-۲ المان ها و اجزاء سازه ای
۴۲	فصل ۳ - روش سختی مستقیم
۴۲	۱-۳ سختی المان و انعطاف پذیری
۵۲	۲-۳ روش های تحلیل سختی و انعطاف پذیری
۵۴	۳-۳ روش سختی مستقیم
۶۵	۴-۳ قیود پیرو بودن - دیافراگم صلب
۶۷	۵-۳ خطاهای تعادل در تحلیل خطی
۷۸	۶-۳ بارهای المان
۸۳	۷-۳ تحلیل دینامیکی و غیرخطی
۸۵	۸-۳ زیرسازه ها و روسازه ها
۸۸	فصل چهارم - رفتار اجزاء سازه ای، روابط نیرو-تغییرشکل $F-D$ یک محوری
۸۸	۱-۴ نگاه کلی
۹۰	۲-۴ روابط نیرو-تغییرشکل اعضاء سازه ای

- ۳-۴ کدامیک از روابط نیرو-تغییر مکان مورد نیاز هستند؟ ----- ۱۰۲
- ۴-۴ سختی در تحلیل ارتجاعی ----- ۱۰۳
- ۵-۴ روابط نیرو-تغییر مکان برای تحلیل غیرارتجاعی ----- ۱۰۶
- ۶-۴ حلقه‌های هیسترتیک برای انجام تحلیل غیرارتجاعی ----- ۱۱۳
- فصل ۵ - رفتار اجزاء سازه‌ای-روابط نیرو-تغییر مکان چند محوری اندرکنشی ----- ۱۲۰
- ۱-۵ نگاه کلی ----- ۱۲۱
- ۲-۵ اندرکنش سختی ----- ۱۲۱
- ۳-۵ اندرکنش مقاومت ----- ۱۲۲
- ۴-۵ اندرکنش غیرخطی: رفتار پساتسلیم ----- ۱۲۳
- ۵-۵ تئوری پلاستیسیته برای تسلیم فلزات ----- ۱۲۵
- ۶-۵ سطوح اندرکنشی برای اصطکاک ----- ۱۳۲
- ۷-۵ بسط به اندرکنش  $P-M-M$  ----- ۱۳۴
- ۸-۵ آیا تئوری پلاستیسیته برای اندرکنش  $P-M$  مفید است؟ ----- ۱۴۵
- ۹-۵ افزایش طول محوری در تیرهای بتنی ----- ۱۵۵
- ۱۰-۵ مقاطع فیبری برای در نظر گرفتن اندرکنش  $P-M$  ----- ۱۵۶
- ۱۱-۵ برش غیر ارتجاعی در تیرها و ستون ها ----- ۱۶۱
- ۱۲-۵ برش در دیوارهای بتنی ----- ۱۶۶
- ۱۳-۵ مدل های مصالح چند محوری برای بتن ----- ۱۷۰
- ۱۴-۵ اندرکنش ظرفیت ----- ۱۸۱
- فصل ۶ - آثار  $\Delta-P$ ، پایداری و کمانش ----- ۱۸۴
- ۱-۶ نگاه کلی ----- ۱۸۵
- ۲-۶ آثار  $\Delta-P$  و  $P-\delta$  بر روی یک ستون ----- ۱۹۰
- ۳-۶ اهمیت نسبی آثار  $\Delta-P$  و  $P-\delta$  ----- ۱۹۳
- ۴-۶ مدلسازی آثار  $\Delta-P$  و  $P-\delta$  ----- ۱۹۶
- ۵-۶ رفتار قاب<sup>۱</sup> ها تحت بار جانبی ----- ۲۰۶
- ۶-۶ رفتار کمانشی قاب ها ----- ۲۱۵
- ۷-۶ ستون های  $\Delta-P$  در ساختمان های چندطبقه و سه بعدی ----- ۲۲۴
- ۸-۶ کمانش قاب های چندطبقه و سه بعدی ----- ۲۲۸
- ۹-۶ کمانش ستون تحت بار محوری ----- ۲۳۰
- ۱۰-۶ سازه ی ساده با اعضای مفصلی ----- ۲۴۰
- ۱۱-۶ ستون های ارتجاعی دو سر مفصل تحت خمش ----- ۲۴۵
- ۱۲-۶ مقاومت تیر-ستون ها ----- ۲۴۹
- ۱۳-۶ طراحی تیر-ستون ها بر اساس مقاومت ----- ۲۵۶
- ۱۴-۶ طراحی تغییرشکلی برای تیر-ستون ها ----- ۲۵۹

۱۵-۶	اعضای فشاری در قاب های مهار شده	۲۶۰
۱۶-۶	ستون ها در قاب های مهار نشده	۲۶۳
۱۷-۶	دریفت های اولیه	۲۶۷
۱۸-۶	کاهش سختی	۲۶۹
۱۹-۶	بحث تئوری-سختی هندسی	۲۷۵
۲۰-۶	روش های تحلیل ارتجاعی بار های جانبی	۲۷۹
۲۱-۶	روش تحلیل مستقیم برای قاب های فولادی	۲۹۸
۲۲-۶	تحلیل غیرارتجاعی قاب ها در مقابل بارهای جانبی	۳۰۵
۲۳-۶	تحلیل کمانش	۳۰۶
۲۴-۶	برخی دیگر از سازه ها	۳۱۰
۲۵-۶	کمانش پیشی-جانبی تیرها	۳۱۷
۲۶-۶	مهارهایی برای جلوگیری از کمانش	۳۲۵
۲۷-۶	آثار $\Delta-P$ در جداسازهای لرزه ای	۳۲۷
۲۸-۶	برخی دیگر از انواع کمانش	۳۳۴
۲۹-۶	تغییرمکان های بزرگ واقعی	۳۳۴
فصل ۷ -	برخی دیگر از جنبه های رفتاری سازه ها	۳۳۶
۱-۷	مکانیسم های خمیری	۳۳۶
۲-۷	کنترل مکانیسم با استفاده از طراحی ظرفیت	۳۴۲
۳-۷	عدم قطعیت استاتیکی و نامعینی	۳۴۵
۴-۷	اجزاء غیرسازه ای	۳۴۹
۵-۷	کار و انرژی	۳۵۰
۶-۷	زندگی در کنار عدم قطعیت ها	۳۵۵

# فصل

## مقدمه

تحلیل سازه اغلب هدف نهایی نمی باشد، بلکه تنها ابزاری برای طراحی سازه ها می باشد. تحلیل سازه شامل سه مرحله است: مدل سازی، محاسبات و تفسیر نتایج. در این فصل بیان خواهد شد که بخش مدلسازی و تفسیر نتایج دارای اهمیت زیادی برای مهندسين محاسب هستند. بخش محاسبات که در برگيرنده تئوری تحلیل سازه و روش های محاسباتی می باشد، برای مهندسين اهمیت کمتری دارد. همچنین در این فصل، در مورد ضرورت انجام تحلیل ها (به ویژه تحلیل سازه) بحث خواهد شد.

### نگاه کلی

#### ۱-۲-۲ تفسیر نتایج

در این بخش به موضوعات زیر پرداخته می شود:

- ۱) مراحل انجام تحلیل سازه (مدلسازی، محاسبات و تفسیر نتایج) و اهمیت نسبی آنها.
- ۲) تقاضاها، ظرفیت ها و نسبت تقاضا به ظرفیت.
- ۳) ارزیابی عملکرد و طراحی مستقیم.
- ۴) طراحی ظرفیت.
- ۵) تحلیل الاستیک و غیرالاستیک.
- ۶) بارهای استاتیکی و دینامیکی.
- ۷) تغییرمکان های کوچک و تغییرمکان های بزرگ.
- ۸) تحلیل تقاضا و تحلیل ظرفیت.

موضوعات فوق در این فصل مختصراً مورد بررسی قرار گرفته و پایه و اساس مباحث فصل‌های بعدی را تشکیل می‌دهند.

## ۲-۱ مراحل انجام تحلیل

تردیدی نیست که تحلیل سازه روی مدل سازه‌ای (و نه سازه‌ی واقعی) صورت می‌گیرد. چالش عمده در این مرحله، تهیه‌ی مدل سازه‌ای صحیح می‌باشد. چند نکته مهم در این رابطه را به شرح زیر می‌توان برشمرد:

- ۱) مدل تحلیلی باید جنبه‌های مهم رفتار سازه را دربرگیرد. در یک مدلسازی مناسب، این کار با دقت کافی، رعایت مسائل اقتصادی و با جزئیات لازم، برای کاربردهای عملی انجام می‌شود. نیازی نیست که مدل سازه‌ای کاملاً دقیق باشد و چنین چیزی اصولاً امکان‌پذیر نیست.
- ۲) مدل سازه‌ای تقریباً همیشه از ترکیب المان‌ها و گره‌ها تشکیل می‌شود که شامل نقاط صلب و المان‌های شکل‌پذیر می‌باشد. در فصل دوم جزئیات بیشتری در این زمینه مطرح گردیده است.
- ۳) نکته‌ی مهم دیگر، انتخاب المان‌ها و اختصاص سختی و مقاومت مناسب به آنهاست. این بخش دارای حساسیت زیادی بوده و به مهارت و دانش کافی نیاز دارد.
- ۴) دومین کار مهم در تحلیل سازه، انتخاب مناسب معیارهای اندازه‌گیری تقاضا و ظرفیت، به منظور تعیین عملکرد سازه می‌باشد. این بخش نیز به مهارت و دید مهندسی کافی نیاز دارد.
- ۵) شباهت ظاهری مدل سازه‌ای به سازه‌ی واقعی بدین مفهوم نیست که رفتار این دو، یکسان باشد. هرچند تهیه‌ی مدل سازه‌ای به نحوی که شباهت ظاهری زیادی با سازه‌ی اصلی داشته باشد، می‌تواند مطلوب باشد، اما به هیچ عنوان بیانگر یکسان بودن رفتار مدل سازه‌ای با سازه‌ی واقعی نمی‌باشد.

## ۲-۲-۱ تفسیر نتایج

هدف بخش مدلسازی، تهیه‌ی یک مدل سازه‌ای دقیق است. همچنین هدف اصلی مرحله‌ی محاسبات، تهیه‌ی مجموعه‌ای از نتایج برای مدل سازه‌ای می‌باشد که عمدتاً شامل تغییر مکان گره‌ها و نیروهای داخلی المان‌ها (و برخی موارد دیگر) می‌باشد. نکته‌ی اساسی در مرحله‌ی تفسیر نتایج، استفاده‌ی مناسب از نتایج حاصله، به منظور اتخاذ تصمیمات لازم جهت طراحی سازه‌ی واقعی می‌باشد. در این رابطه چند نکته‌ی مهم وجود دارد، که به آنها اشاره می‌شود:

- ۱) تعیین هدف از انجام تحلیل سازه دارای اهمیت است، به طوری که تفسیر نتایج به نحوی انجام گیرد که این اهداف را برآورده سازد. تحلیل سازه به خودی خود، یک هدف نیست و نمی‌توان یک روش خاص برای تفسیر نتایج را برای تحلیل‌های مختلف (با اهداف مختلف)، پیشنهاد نمود.

(۲) در بسیاری از کتب تحلیل سازه، نتایج تحلیل، به صورت تصویر تغییرشکل یافته‌ی سازه و دیافراگم لنگر اعضاء بیان می شود. هر چند این موارد دارای جذابیت هستند، اما برای طراحی سازه مناسب نیستند. برای انجام طراحی سازه، لازم است مقادیر تقاضا، ظرفیت و نسبت تقاضا به ظرفیت محاسبه شده و مدنظر قرار گیرند.

(۳) ممکن است مدل سازه‌ای دارای ایراداتی باشد یا در بخش محاسبات انسانی خطاهایی صورت گیرد. بنابراین، لازم است صحت نتایج کنترل شود.

(۴) همواره در ذهن داشته باشید که نتایج حاصله به مدل سازه‌ای مربوط میشوند و نه سازه‌ی واقعی. یک مدل سازه‌ای، هرگز بیانگر رفتار واقعی سازه نخواهد بود، و اصولاً نیازی هم به یکسان بودن رفتار این دو نیست، هرچند لازم است تا حد امکان تشابه لازم بین رفتار سازه‌ی واقعی و مدل سازه‌ای فراهم شود.

### ۳-۲-۱ محاسبات

تعریف محاسبات در این کتاب در برگرفته مواردی است که خارج از بحث مدلسازی و تفسیر نتایج قرار گیرد. با داشتن مدل تحلیلی، مرحله‌ی محاسبات مواردی را شامل می شود که برای به دست آوردن نتایج مورد نیاز انجام می شود. این یک فرآیند پیچیده است که تئوری اجزاء محدود، قوانین پیچیده و پرحجم محاسبات عددی را دربر می گیرد.

برخی از نکات کلیدی در این رابطه را می توان به صورت زیر برشمرد:

(۱) با فرض اینکه از روش مدلسازی سازه‌ی واقعی برای تحلیل سازه استفاده شود، محاسبات عددی تقریباً همیشه توسط کامپیوتر انجام می شود. با توجه به اینکه تهیه‌ی یک برنامه‌ی کامپیوتری مستلزم صرف هزینه‌ی نسبتاً زیاد و دارا بودن آگاهی‌های کافی و دانش تخصصی زیادی است، در اکثر موارد از برنامه‌های کامپیوتری تجاری برای مدلسازی و تحلیل سازه استفاده می شود. بنابراین، بیشتر مهندسين به مهارت و تخصص مهندسين و برنامه‌نویسانی تکیه می کنند که برنامه‌های تحلیلی تجاری را تهیه می کنند.

(۲) مهندسينی که از برنامه‌های کامپیوتری استفاده می کنند، باید از آگاهی و دانش پایه در رابطه با محاسبات سازه برخوردار باشند. کتاب حاضر، برای این مهندسين تهیه شده است. یکی از اهداف این کتاب ارائه‌ی دانش و درک پایه از محاسبات سازه می باشد.

۳) محدود مهندسی که از برنامه‌نویسی برای تحلیل سازه استفاده می‌کند، باید درک و آگاهی عمیقی از مرحله‌ی محاسبات سازه داشته باشند. تهیه‌ی برنامه‌های کامپیوتری امری تخصصی می‌باشد و موضوع بحث این کتاب نیست.

### ۳-۱ اهمیت نسبی مراحل مختلف تحلیل

برای مهندسی که از تحلیل سازه به عنوان ابزاری کاربردی استفاده می‌کند، دو چالش عمده وجود دارد. اولین مورد، تهیه‌ی مدل سازه‌ای صحیح برای به دست آوردن نتایج مناسب و دومین مورد، استفاده از نتایج حاصله برای اهداف طراحی سازه می‌باشد. جزئیات محاسباتی و اینکه نتایج نهایی چگونه حاصله‌اند، در درجه‌ی دوم اهمیت قرار دارد و کنترل آن بر عهده‌ی شخصی است که تهیه‌ی برنامه‌ی کامپیوتری را بر عهده دارد. برای بیشتر مهندسين، مراحل مدلسازی و تفسیر نتایج اهمیت بیشتری داشته و مرحله‌ی محاسبات کمتر مورد توجه قرار می‌گیرد.

برای مهندسی که برنامه‌ی کامپیوتری را تهیه می‌کند (معمولاً به صورت گروهی و نه انفرادی)، مرحله‌ی محاسباتی حائز بیشترین اهمیت است. هرچند مدلسازی و تفسیر نتایج (و همچنین تهیه‌ی محیط کاربری مناسب، گرافیک مطلوب و سایر موارد) نیز دارای اهمیت خواهند بود. مدلسازی و تفسیر نتایج امور پیچیده‌ای می‌باشند. برنامه‌ی کامپیوتری زمانی موفق ارزیابی می‌شود که دارای کارایی و عملکرد مطلوب در زمینه‌ی مدلسازی و تفسیر نتایج باشد.

زمانیکه یک برنامه‌ی کامپیوتری به عنوان ابزار کاربردی مورد استفاده قرار گیرد، عملکرد برنامه با اتوماسیون برنامه (قرار دادن بخش‌های خودکار) برای بخش‌های مدلسازی و تفسیر نتایج می‌تواند تقویت شود. مهندسين در انتظار برنامه‌هایی هستند که به طور خودکار، مدل سازه‌ای را تهیه کرده، طی زمان کوتاه محاسبات تحلیل سازه را به انجام رسانده و نتایج را (به صورتی که بتوانند به سادگی برای طراحی سازه مورد استفاده قرار گیرند) ارائه کنند. در حال حاضر، این هدف برای سازه‌های ساده تأمین گردیده است و انتظار بر آن است که در آینده، برای سازه‌های پیچیده‌تر نیز محقق گردد.

### ۴-۱ تقاضا و ظرفیت

#### ۴-۱-۱ ارزیابی عملکرد

تحلیل سازه اساساً ابزاری برای ارزیابی عملکرد سازه می‌باشد. طراحی سازه معمولاً طی چندین گام صورت می‌گیرد که از گام‌های ابتدایی تا مراحل نهایی طراحی را در بر می‌گیرد.



در گام‌های اولیه، مشخصات کلی و ابعاد سازه مورد بررسی و بازبینی قرار می‌گیرند و در مراحل انتهایی، ابعاد المان‌های سازه‌ای و سایر جزئیات انتخاب می‌شوند. تحلیل سازه می‌تواند با استفاده از مدل ساده‌سازی شده برای طراحی اولیه سازه و یا با استفاده از مدل‌های دقیق سازه‌ای برای طراحی نهایی سازه صورت گیرد. در هر گام، تحلیل سازه ابزاری برای ارزیابی عملکرد سازه جهت کنترل شرایط بهره‌برداری تحت بارهای معمول و کنترل شرایط ایمنی تحت بارهای شدیدتر، می‌باشد.

عملکرد سازه تقریباً همواره با مقایسه‌ی مقادیر تقاضا و ظرفیت انجام می‌پذیرد. چند مثال ساده در این رابطه در زیر ارائه گردیده است:

(۱) اگر برای تأمین شرایط بهره‌برداری، تغییرشکل یک نقطه‌ی خالص مدنظر باشد، مقدار تقاضا می‌تواند مقدار تغییرشکل ایجاد شده در آن نقطه باشد (که از تحلیل به دست می‌آید). در این مورد، ظرفیت متناظر برابر تغییرشکل مجاز آن نقطه خواهد بود.

(۲) اگر مقاومت خمشی یک تیر معیار ایمنی باشد، مقدار تقاضا می‌تواند لنگر خمشی محاسبه شده در سطح مقطع تیر باشد، در حالی که مقدار ظرفیت آن برابر مقاومت خمشی در آن مقطع می‌باشد.

(۳) اگر تسلیم المان سازه‌ای مجاز باشد، شرط ایمنی برای یک تیر می‌تواند به صورت میزان تسلیم‌شدگی در خمش در مقادیر بیش از ظرفیت تسلیم آن (قابلیت تسلیم بدون کاهش قابل ملاحظه در مقاومت ناشی از شکست، کمانش و غیره)، در نظر گرفته شود. المان تیر را می‌توان توسط مفاصل پلاستیک مدلسازی شود. در این صورت مقدار تقاضا می‌تواند دوران محاسبه شده در یک مفصل خاص باشد که در این صورت ظرفیت تیر برابر دوران مجاز تیر در آن مفصل می‌باشد.

(۴) اگر هزینه‌ی تعمیر پس از زلزله مدنظر باشد، برای میزان تقاضا می‌تواند مقدار هزینه‌ی محاسبه شده برای تعمیر را در نظر گرفت. برای این مورد، ظرفیت برابر هزینه‌ی قابل قبول می‌باشد. این نوع از مقایسه‌ی تقاضا و ظرفیت دارای تحلیل‌های پیچیده برای تعیین مقادیر تقاضا و ظرفیت بوده و در حال حاضر، راه زیادی وجود دارد که این روش به یک روش استاندارد تبدیل شود. زمانیکه تحلیل سازه برای ارزیابی عملکرد سازه انجام می‌شود، می‌توان در یک نگاه این فرآیند را به صورت زیر بیان نمود:

(۱) هندسه‌ی سازه و اندازه‌ی اعضاء (شامل جزئیات میلگردگذاری و ...) برای سازه‌ی مورد نظر تا حد زیادی مشخص است.

(۲) مقادیر معیارهای مختلف تقاضا و ظرفیت (شامل تغییرمکان‌ها، لنگرهای خمشی، دوران مفاصل پلاستیک و ...) تعیین می‌شود.

- (۳) سازه‌ی مورد نظر مدلسازی شده و از نتایج تحلیل مقادیر تقاضا به دست می‌آیند.
- (۴) مقادیر ظرفیت سازه با استفاده از آیین‌نامه‌های ساختمانی یا قضاوت مهندسی انتخاب یا محاسبه می‌شوند.
- (۵) نسبت تقاضا به ظرفیت، برای المان‌های مختلف محاسبه می‌شود.
- (۶) اگر نسبت تقاضا به ظرفیت ( $b/c$ ) از مقدار واحد تجاوز نکند، عملکرد مطلوب ارزیابی می‌شود.
- (۷) اگر عملکرد مطلوب نباشد، باید سازه اصلاح شده یا مدل تحلیلی باید به نحوی بازنگری شود که مقادیر اصلاح‌شده‌ی تقاضا و ظرفیت، عملکرد مناسب سازه را نتیجه دهد.

#### ۱-۴-۲ طراحی مستقیم

تحلیل سازه می‌تواند به منظور طراحی مستقیم سازه به کار رود. این فرآیند را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

- (۱) هندسی کلی مشخص است، اما ابعاد تمام المان‌ها مشخص نیست. هدف این مرحله تعیین اندازه‌ی المان‌های سازه‌ای می‌باشد.
- (۲) مدل تحلیلی با استفاده از اندازه‌ی تخمینی المان‌ها تشکیل می‌شود.
- (۳) سازه تحلیل می‌شود و نیازهای مقاومت اعضاء محاسبه می‌شود.
- (۴) اندازه‌ی المان‌ها طوری محاسبه می‌شود که نیازهای محاسباتی ارضاء شوند، که این امر جنبه‌ی مستقیم بودن طراحی را نشان می‌دهد.
- (۵) اگر اندازه‌ی المان‌ها با اندازه‌ی تخمینی آنها تفاوت قابل ملاحظه‌ای داشته باشد، می‌بایست از روش سعی و خطا استفاده نمود.
- البته این فرآیند همواره ساده نیست، ولی به هر حال تفاوت زیادی بین تحلیل‌های مربوط به روش طراحی مستقیم و تحلیل‌های مربوط به ارزیابی عملکرد سازه وجود دارد. این نکته باید روشن شود که هدف از انجام تحلیل چیست و دقیقاً نتایج تحلیلی چگونه در فرآیند طراحی مورد استفاده قرار خواهند گرفت.

#### ۱-۵-۵ تحلیل الاستیک و غیرالاستیک

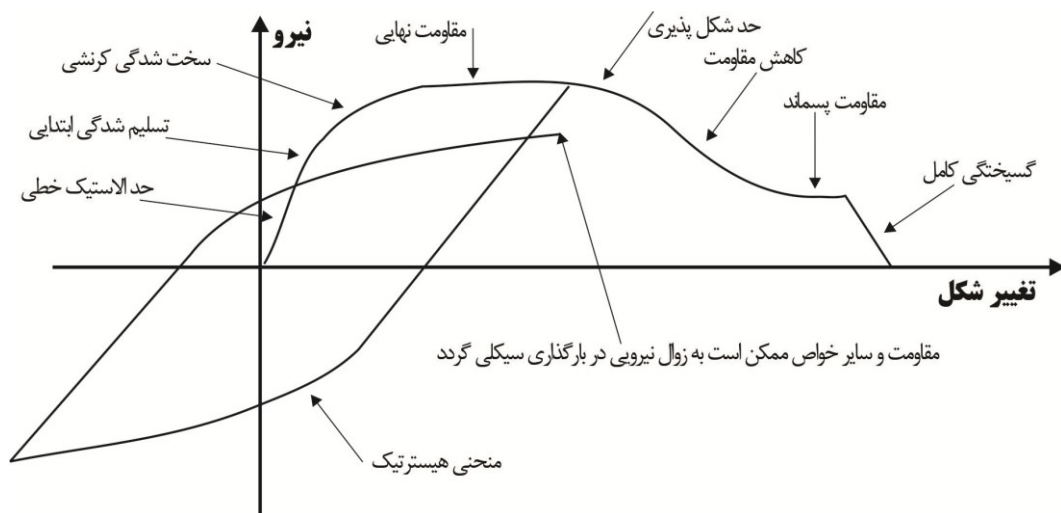
##### ۱-۵-۱ رفتار اعضاء سازه‌ای

در تحلیل سازه، از روابط بین نیروها یا بارها با مقادیر تغییرشکل‌ها یا تغییرمکان‌های منطبق بر آنها، استفاده می‌شود.

در این کتاب عبارت "رابطه‌ی نیرو- تغییرشکل" برای اعضاء سازه‌ای، به کار می‌رود. نیرو می‌تواند به شکل نیروی محوری در یک میله، لنگر خمشی در یک مفصل پلاستیک، نیروی برشی، تنش قائم، تنش برشی، و...

باشد. شکل نیرو به نوع عضو مورد بررسی بستگی دارد. نوع تغییرشکل نیز به نوع نیرو بستگی دارد و می‌تواند از نوع تغییر طول عضو، دوران مفصل پلاستیک و ... باشد.

در این کتاب، عبارت "رابطه‌ی نیرو- تغییرمکان" برای سازه‌ی کلی یا مدل تحلیلی کامل، به کار می‌رود. رابطه‌ی نیرو- تغییرمکان برای کل سازه، بستگی به روابط نیرو- تغییرشکل اعضای آن دارد. رابطه‌ی نیرو- تغییرشکل برای یک عضو سازه‌ای معمولی، در شکل (۱-۱) نشان داده شده است. رابطه‌ی نیرو- تغییرمکان مربوط به یک سازه‌ی کلی نیز، شکل مشابهی دارد.



شکل ۱-۱ رابطه‌ی نیرو- تغییرشکل اعضای سازه‌ای

بخش‌های کلیدی رابطه‌ی نیرو- تغییرشکل عبارتند از:

- (۱) رفتار اولیه، که اساساً به شکل خطی می‌باشد.
- (۲) تسلیم اولیه، که محل آن می‌تواند کاملاً تعریف شده یا تقریبی باشد.
- (۳) بخش مربوط به افزایش مقاومت (سخت‌شدگی کرنشی).
- (۴) مقاومت نهایی.
- (۵) حد شکل‌پذیری، در نقطه‌ای که می‌تواند کاملاً مشخص یا تقریبی باشد.
- (۶) بخش کاهش مقاومت.
- (۷) مقاومت پس‌ماند، جایی است که مقاومت بدون تغییر باقی می‌ماند.
- (۸) محل گسیختگی کلی.
- (۹) بارگذاری و باربرداری چرخه‌ای، با حلقه‌های چرخه‌ای مختلف.
- (۱۰) زوال چرخه‌ای، جایی که زوال مقاومت و سختی یا زوال شکل‌پذیری به طور مستمر کاهش می‌یابد.

### ۱-۵-۲ رفتار الاستیک و غیرالاستیک

در شکل (۱-۱)، عضو سازه‌ای تا رسیدن به لحظه‌ی تسلیم، رفتار خطی (یا نزدیک به خطی) دارد. در این ناحیه رفتار اساساً الاستیک است و این بدان معناست که زمانیکه نیرویی به عضو وارد می‌شود، انرژی کرنشی در عضو به طور کامل ذخیره می‌شود و زمانیکه نیرو رها می‌شود، انرژی کرنشی بازیابی می‌گردد. اگر نیروی وارد بر عضو از مقدار نیروی تسلیم تجاوز نماید، رفتار به صورت غیرخطی و غیرالاستیک خواهد بود. در رفتار غیرالاستیک با رها شدن نیروی وارده تنها بخشی از انرژی آزاد می‌شود.

مفهوم الاستیک بودن و خطی بودن با هم تفاوت دارند. یک عضو، زمانی الاستیک تلقی می‌شود که تمام کار انجام شده بر روی عضو (هنگامی که تغییر شکل می‌یابد)، به صورت انرژی کرنشی قابل بازگشت ذخیره می‌شود. اعضای الاستیک معمولاً رفتار خطی دارند، اما ممکن است رفتار غیرخطی نیز داشته باشند. به عنوان مثال، می‌توان به سیستم فنری که دارای شکاف می‌باشد، اشاره نمود. سختی عضو تا زمانیکه شکاف باز باشد، برابر صفر است. زمانیکه شکاف بسته می‌شود، سختی فنر افزایش می‌یابد، بنابراین سختی تغییر کرده و رفتار غیرخطی می‌باشد، اما فنر رفتار الاستیک دارد. در عضو غیرالاستیک، بخشی از انرژی ذخیره شده در عضو (ناشی از تغییر شکل آن)، به صورت کار پلاستیک، اصطکاک، انرژی شکست و ... مستهلک می‌گردد. عضو غیرالاستیک همواره رفتار غیرخطی دارد.

### ۱-۵-۳ طراحی بر اساس مقاومت با استفاده از تحلیل الاستیک

روش سنتی برای طراحی سازه بدین صورت است که سازه برای دارا بودن مقاومت کافی برای مقابله با نیروهای خارجی و در ناحیه‌ی رفتار الاستیک، طراحی می‌شود. همچنین، تأمین ضوابط شرایط بهره‌برداری دارای اهمیت می‌باشد. بدین منظور سازه باید سختی کافی را برای کنترل مقادیر تغییر شکل و ارتعاشات را داشته باشد. برای طراحی بر اساس مقاومت، تحلیل سازه باید به صورت الاستیک انجام شود و هدف اصلی آن محاسبه‌ی تقاضای نیرو در المان‌های سازه‌ای می‌باشد. در ادامه، ظرفیت‌های نیرویی متناظر حاصله (در بیشتر موارد از طریق فرمولهای ارائه شده در آیین‌نامه‌های طراحی)، به دست می‌آیند. ظرفیت نیرویی حاصله از فرمول‌های آیین‌نامه‌ای، معمولاً اندکی کمتر از مقادیر مقاومت نهایی واقعی می‌باشند.

اگر تقاضای نیروی یک عضو خاص نزدیک به مقدار ظرفیت نیرویی آن باشد، قابلیت تغییر شکل غیرالاستیک قابل ملاحظه‌ای را خواهد داشت. اگر نیروی داخلی در تعداد زیادی از اعضای سازه‌ای نزدیک به مقادیر ظرفیت نیروی آنها باشد، تغییر شکل‌های غیرالاستیک قابل ملاحظه‌ای در کل سازه رخ می‌دهند. بدین سبب، رفتار سازه می‌تواند تحت بارهای طراحی به صورت غیرخطی باشد و در نتیجه لزوماً تحلیل الاستیک دقت کافی را نخواهد داشت. به ویژه در صورتی که طراحی سازه برای کاهش وزن آن بهینه سازی شود، این

موضوع جلوه‌ی بیشتری خواهد داشت. در این موارد، بسیاری از اعضای سازه‌ای به طور کامل تحت تنش قرار می‌گیرند. هر چند، چندین دهه تجربه نشان داده است که تحلیل الاستیک برای بیشتر اهداف طراحی، دقت کافی را داراست.

برای در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های بارگذاری، بارهای مورد انتظار در ضرایب بار ضرب می‌شوند که این کار باعث افزایش تقاضای نیرو در اعضاء سازه می‌شود. برای مثال، جهت محاسبه‌ی مقادیر تقاضای المان‌ها، بارهای گرانشی را می‌توان در عدد ۱,۲ ضرب نموده و با ۱,۶ برابر مقادیر بار زنده محاسباتی ترکیب نمود. جهت در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها در مقاومت اعضاء، مقادیر مقاومت مورد انتظار اعضای سازه در ضرایب کاهش ظرفیت (ضرایب مقاومت) ضرب می‌شود، که این ضرایب معمولاً عددی بین ۰,۷۵ و ۰,۹ می‌باشند. اعضایی که به طور خاص برای انسجام کلی سازه اهمیت زیادی دارند، از مقادیر ضریب مقاومت کمتری استفاده می‌شود. جزئیات بیشتر در این رابطه در آیین‌نامه‌های طراحی سازه موجود می‌باشند. نکته‌ی مهم این است که تحلیل الاستیک را می‌توان به کار گرفت و هدف اصلی از تحلیل سازه، محاسبه‌ی مقادیر تقاضای نیرو می‌باشد.

#### ۱-۵-۴ طراحی بر اساس مقاومت با استفاده از تحلیل غیرالاستیک

در طراحی بر اساس مقاومت و با استفاده از تحلیل الاستیک، کنترل مقاومت سازه‌ای در تراز المان‌ها صورت گرفته و مقاومت کلی سازه به طور صریح محاسبه نمی‌شود. روش دیگری که می‌تواند برای در نظر گرفتن مقاومت کلی سازه به کار رود، استفاده از بارهای خارجی به عنوان مقادیر تقاضا و در نظر گرفتن مقاومت کلی سازه به عنوان معیار ظرفیت، می‌باشد. برای این منظور، مقادیر تقاضا تعیین شده و تحلیل سازه برای محاسبه‌ی ظرفیت مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش، روشی مستقیم برای اطمینان از مقاومت کافی در کل سازه می‌باشد و این قابلیت را دارد که طراحی اقتصادی‌تری را نتیجه دهد. با این وجود، به دلایلی که در زیر بیان می‌شود، استفاده از این روش برای بسیاری از کاربردهای عملی مقدور نیست.

(۱) فرضیات مدلسازی می‌تواند تأثیر زیادی بر تخمین مقادیر ظرفیت مقاومت محاسبه شده‌ی یک سازه، داشته باشد. یکی از روش‌های مدلسازی، می‌تواند مدلسازی تمام مودهای رفتاری مؤثر بر رفتار کلی و شکست سازه باشد. این روش، مودهای اصلی رفتاری سازه را در بر می‌گیرد که شامل خمش غیرالاستیک در تیرها (شکل‌گیری مفصل پلاستیک)، و موارد پیچیده‌تر (نظیر کمانش ستون‌ها و موارد خیلی پیچیده‌تر (نظیر برش غیرالاستیک در دیوارهای بتنی مسلح)، و موارد فوق پیچیده (نظیر شکست ترد در جوش‌ها) می‌شود. این روش نه تنها غیرکاربردی بوده، در برخی اوقات ناممکن نیز می‌باشد. برای یک سازه‌ی

پیچیده، حتی با استفاده از دقیق ترین مدل تحلیلی نمی توان تمام عوامل مؤثر بر رفتار سازه را در نظر گرفت.

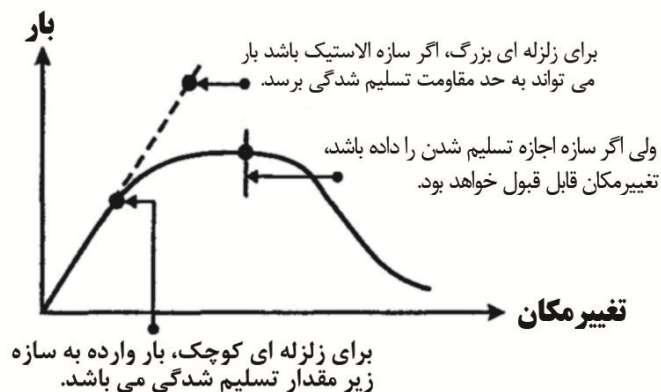
۲) یک روش کاربردی تر، محدود نمودن مودهای رفتاری مؤثر در شکست سازه می باشد. برای مثال، می توان از برش غیرالاستیک در دیوارهای بتنی مسلح جلوگیری نمود، به این صورت که مقاومت برشی دیوار به قدر کافی بزرگتر از مقداری باشد که رفتار برش غیرالاستیک رخ دهد. بدین ترتیب، نیازی به در نظر گرفتن برش غیرالاستیک نخواهد بود و مدل تحلیلی ساده تر خواهد بود. به دلیل اینکه برش غیرالاستیک به صورت ترد اتفاق می افتد، انتظار می رود که عملکرد سازه تحت بارهای شدید بهبود یابد. این مورد مثالی از طراحی ظرفیت می باشد.

۳) حتی زمانی که از روش طراحی ظرفیت استفاده شود، محاسبه ی مستقیم مقاومت سازه، مستلزم انجام تحلیلی غیرالاستیک می باشد که بسیار پیچیده تر و گران تر از انجام تحلیل های الاستیک می باشد. یکی از پیچیدگی های این تحلیل این است که برای تحلیل الاستیک تنها به مقادیر سختی المان ها احتیاج است، در حالی که برای تحلیل غیرالاستیک، علاوه بر سختی، باید مقاومت عضو، رفتار سخت شدگی کرنشی و سایر ویژگی های رفتاری نیز در نظر گرفته شوند. مدل الاستیک را می توان بر اساس اندازه ی تقریبی المان ها ایجاد نموده و پس از تعیین اندازه ی صحیح المان ها نیز به سادگی قابل بروزرسانی می باشد (بسیاری از برنامه های کامپیوتری این کار را به صورت خودکار انجام می دهند). این کار در مدل های غیرالاستیک چندان آسان نیست.

۴) در طراحی سازه علاوه بر بارهای خارجی، باید عوامل زیادی را در نظر گرفت. این موارد شامل انبساط حرارتی، خزش (به ویژه در سازه های بتنی مسلح) و حرکات پی می باشند. برخی از این عوامل تنها بر شرایط بهره برداری (و نه مقاومت آنها) تأثیر گذارند. ساده ترین راه این است که این عوامل در تحلیل الاستیک در نظر گرفته شوند.

برای بیشتر سازه ها، تحلیل الاستیک به عنوان روش استاندارد برای پیش بینی رفتار سازه در نظر گرفته می شود. یک استثناء در این زمینه، طراحی سازه هایی می باشد که بارهای شدید زلزله را تحمل می کنند. در طراحی سازه ها در مقابل زلزله، احتمال رخداد یک زلزله ی خفیف طی عمر مفید سازه بسیار زیاد و احتمال وقوع زلزله ی شدید، اندک می باشد. برای زلزله های خفیف، سازه به نحوی طراحی می شود که رفتار الاستیک داشته باشد، در حالی که برای یک زلزله ی شدید، طراحی سازه برای باقی ماندن در ناحیه ی الاستیک اقتصادی نبوده و اجازه داده می شود که سازه تا حد معینی وارد ناحیه ی غیرالاستیک گردد.

بنابراین، برای یک زلزله‌ی شدید، تقاضای مقاومت الاستیک سازه از مقدار ظرفیت مقاومت آن تجاوز می‌کند. این موضوع در شکل (۱-۲) نشان داده شده است.



شکل ۱-۲ رفتار سازه تحت بار زلزله

اگر بار زلزله به صورت باری استاتیکی به سازه وارد می‌شد، سازه قادر به تحمل آن نبود، اما بارهای زلزله به صورت رفت و برگشتی به سازه وارد شده و جهت آنها به سرعت تغییر می‌کند. طی یک زلزله، میزان باری که از مقاومت سازه بیشتر است، می‌تواند چندین بار به سازه اعمال شود و سازه همچنان بدون شکست باقی بماند. بار زلزله به شکل دینامیکی و طی مدت کوتاهی به سازه اعمال می‌شود، بنابراین تحمل آن برای سازه ساده‌تر است. همانطوری که در شکل (۱-۲) نشان داده شده است، حداکثر تغییر مکان سازه حتی در صورتی که تعدادی از اعضای سازه‌ای وارد ناحیه‌ی غیرالاستیک شده‌اند می‌تواند مورد پذیرش واقع شود، چرا که سازه قادر خواهد بود عملکرد مطلوبی داشته باشد. برای اعضای که وارد ناحیه‌ی رفتار غیرالاستیک می‌شوند، معیار طراحی مقدار تغییر شکل آن (و نه مقدار مقاومت آن) می‌باشد. برای رسیدن به عملکرد مطلوب، تقاضای تغییر شکل عضو غیرالاستیک باید عموماً کمتر از حد شکل پذیری آن (که در شکل (۱-۱) تعریف شده) باشد.

منطقی‌ترین روش برای طراحی سازه در مقابل زلزله‌های شدید، استفاده از تحلیل غیرالاستیک بوده که دارای مزایای زیر می‌باشد:

- ۱) برای اعضای که رفتار غیرالاستیک دارند، معیار طراحی، میزان تغییر شکل (یا شکل پذیری) می‌باشد و نه مقاومت آن. تحلیل غیرالاستیک این قابلیت را دارد که مقادیر تقاضای تغییر شکل اعضای سازه‌ای را به شکل مستقیم محاسبه نماید، در حالی که تحلیل الاستیک این قابلیت را ندارد.

۲) زمانیکه سازه وارد ناحیه‌ی رفتار غیرالاستیک می شود، نیروهای سازه‌ای می‌توانند بازتوزیع شود و بدین ترتیب، توزیع نیرو در سازه نسبت به مقادیر حاصله از تحلیل الاستیک، تغییرات زیادی دارد. این موضوع می‌تواند تأثیرات زیادی بر رفتار سازه داشته باشد. تحلیل غیرالاستیک، باز توزیع نیرو در اجزای سازه‌ای را در نظر می‌گیرد، در حالی که تحلیل الاستیک چنین قابلیت را ندارد.

زمانیکه از روش طراحی ظرفیت استفاده می‌گردد، مقادیر تقاضای نیرو باید برای آن دسته از اجزاء محاسبه شوند که می‌بایستی الاستیک باقی بمانند. برای مثال، اگر برش غیرالاستیک در دیوار بتنی مسلح مجاز نباشد، تقاضای نیروی برشی باید محاسبه شده و دیوار باید برای میزانی از ظرفیت برشی طراحی شود که از میزان تقاضا بیشتر باشد. در تحلیل غیرالاستیک مقادیر تقاضای نیروی محاسبه شده برای عضو سازه‌ای می‌تواند به مقاومت اعضای مجاور آن یا به مقاومت خود عضو بستگی داشته باشد. برای مثال، تقاضای نیروی برشی در یک دیوار می‌تواند به مقاومت خمشی آن بستگی داشته باشد. در تحلیل غیرالاستیک، این موضوع را می‌توان به طور مستقیم در نظر گرفت و این بدان معناست که طراحی ظرفیت می‌تواند به طور دقیق‌تری به کار گرفته شود. طراحی ظرفیت می‌تواند با استفاده از تحلیل الاستیک نیز به کار رود، اما این کار با استفاده از روش غیرمستقیم صورت می‌پذیرد.

برای یک سازه‌ی معمولی، تحلیل استاتیکی غیرالاستیک (تحلیل بار افزون، *Pushover Analysis*) می‌تواند کافی باشد. اما برای یک سازه‌ی بزرگ یا پیچیده، احتمالاً انجام تحلیل دینامیکی غیرالاستیک ضروری گردد.

### ۱-۵-۶ طراحی بر اساس مقاومت برای بارهای زلزله

استفاده از تحلیل غیرالاستیک برای طراحی در مقابل بارهای زلزله ضرورتی ندارد. برای اهداف طراحی، می‌توان از تحلیل الاستیک استفاده نمود و رفتار غیرالاستیک سازه را نه به صورت صریح، بلکه به صورت ضمنی در نظر گرفت.

اگر سازه طوری طراحی شود که طی رخداد زلزله‌های شدید در محدوده‌ی رفتار الاستیک باقی بماند، بارهای منطبق بر این زلزله به سازه اعمال شده و اجزای سازه‌ای برای مقادیر تقاضای نیروی حاصله از تحلیل الاستیک، طراحی خواهند شد. این نیروها را تحت عنوان "تقاضای نیروی الاستیک" می‌شناسیم. زمانیکه رفتار غیرالاستیک مجاز باشد، روش معمول طراحی بدین صورت است که اجزای سازه‌ای برای میزان تقاضای نیروی محوری طراحی می‌شود، که اساساً از تقاضای الاستیک کمتر است. این مقادیر تقاضا، با اعمال یک ضریب کاهش (ضریب رفتار، *R Factor*) به مقادیر تقاضای نیروی ارتجاعی به دست می‌آیند. ضریب رفتار به میزان شکل‌پذیری اعضای سازه و اهمیت نسبی آن بستگی دارد.



برای مثال، اگر عضو سازه‌ای بسیار شکل پذیر باشد، می‌تواند برای مقدار نیرویی برابر حدود یک هشتم نیروی الاستیک (ضریب رفتار برابر ۸ فرض شده) طراحی گردد. این بدان معناست که این عضو، نسبتاً ضعیف (و شکل پذیر) است و احتمالاً تغییرشکل‌های غیرالاستیک قابل توجهی را تجربه خواهد کرد. در عوض، اگر عضوی رفتار ترد داشته باشد، باید برای نیرویی برابر تقاضای الاستیک آن، طراحی شود (یعنی ضریب رفتار برابر ۱ فرض شود). چنین عضوی، نسبتاً قوی بوده و انتظار می‌رود تغییرشکل‌های الاستیک ناچیزی داشته یا رفتار ترد داشته باشد.

بنابراین، با این روش سازه‌هایی طراحی خواهند شد که رفتار مناسبی داشته و با در نظر گرفتن صرفه جویی اقتصادی (با در نظر گرفتن المان‌های شکل پذیر با رفتار غیرالاستیک)، ایمنی را با داشتن اجزای قوی و با رفتار الاستیک تأمین می‌کند. به علاوه، با توجه به اینکه طراحی بر اساس روش مقاومت و با استفاده از روش تحلیل الاستیک صورت می‌گیرد، این روش کاملاً کاربردی است. هرچند تحلیل الاستیک قادر به در نظر گرفتن بازتوزیع نیرو در سازه (در ناحیه‌ی رفتار غیرخطی) نمی‌باشد، و به همین سبب استفاده از این روش اطمینان کافی را برای رسیدن به عملکرد مناسب سازه تأمین نمی‌کند. در برخی از موارد، تحلیل الاستیک می‌تواند نتایج کاملاً غیردقیق به دست دهد. این روش، زمانی قابل اعتمادتر خواهد بود که در ترکیب با روش طراحی ظرفیت به کار رود. در بخش بعد به این موضوع پرداخته شده است. این روش نباید با چشمان بسته به کار گرفته شود.

در اینجا تأکید می‌شود که لازم نیست که تحلیل سازه کاملاً دقیق باشد، بلکه تنها کافی است نتایج حاصله دقت کافی را برای مقاصد طراحی ارائه کنند. در طراحی یک مهندسی خوب، سازه‌هایی که با استفاده از تحلیل الاستیک طراحی می‌شوند، می‌توانند تحت زلزله‌های شدید عملکرد مناسبی داشته باشند.

### ۱-۵-۷ طراحی ظرفیت با استفاده از تحلیل الاستیک

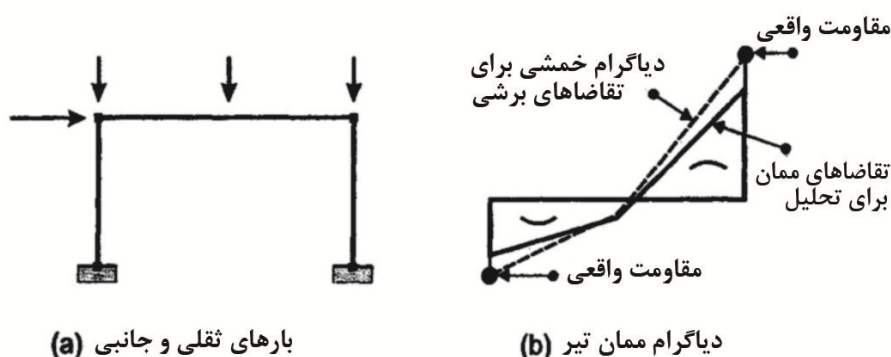
در فرم اصلی طراحی بر اساس مقاومت، تحلیل الاستیک برای محاسبه‌ی تقاضای نیرو در اعضای سازه استفاده می‌شود و اعضاء طوری طراحی می‌شوند که مقاومت کافی را (به میزان برابر یا بیش از مقدار تقاضا) دارا باشند. این فرآیند، باید زمانیکه از روش طراحی ظرفیت استفاده می‌شود، تغییر یابد.

به عنوان مثال، یک قاب بتنی مسلح را در نظر بگیرید که خمش غیرالاستیک در تیرها مجاز است، اما رفتار برشی باید در محدوده‌ی الاستیک باقی بماند. این کار به این دلیل انجام می‌شود که تیرهای بتنی مسلح می‌توانند در خمش شکل پذیر باشند، در حالی که رفتار آنها در برش به شکل ترد می‌باشد.

همانطور که در بخش گذشته بحث شد، زمانیکه تحلیل الاستیک برای تعیین بارهای زلزله استفاده می‌شود، روش معمول بدین صورت است که رفتار غیرالاستیک سازه به صورت ضمنی و با استفاده از ضریب رفتار در

نظر گرفته می شود. یک روش برای در نظر گرفتن شکل پذیری نسبی، می تواند استفاده از مقادیر کمتر برای ضریب رفتار برشی (در مقایسه با رفتار خمشی) باشد. هرچند روش مستقیم تر و بهتری نیز وجود دارد که این روش، استفاده از روش طراحی ظرفیت می باشد.

برای روشن شدن این موضوع، قاب شکل (۳-۱ الف) را در نظر می گیریم. در این شکل، بارهای گرانشی و بارهای جانبی استاتیکی زلزله نشان داده شده اند. برای این بارها، تقاضای لنگر خمشی سازه در شکل (۳-۱ ب) نشان داده شده است که این مقادیر، میزان تقاضای الاستیک به علاوه مقادیر لنگرهای زلزله تقسیم بر ضریب رفتار، می باشند. برای تیر بتنی مسلح، ضریب رفتار را می توان برابر ۸ در نظر گرفت.



شکل ۳-۱ طراحی ظرفیت برای برش

همانطوری که در شکل بالا مشاهده می نماییم، مقاومت واقعی تیر در خمش از تقاضای لنگر خمشی بسیار بزرگتر می باشد، زیرا:

- (۱) سطح مقطع میلگردها معمولاً بزرگتر از سطح مقطع لازم برای رسیدن به ظرفیتی می باشد، که آنرا محاسبات سازه الزام می دارد.
- (۲) مقاومت واقعی مصالح معمولاً بیشتر از مقادیر مفروض برای طراحی می باشند. برای طراحی تیرها، معمولاً برای در نظر گرفتن عدم قطعیت ها، ضریب کاهش ظرفیت به مقادیر اسمی مقاومت خمشی (مقادیر مورد انتظار) اعمال می شود. برای تخمین مقاومت خمشی واقعی، مقاومت مورد انتظار مصالح (یا مقداری بیشتر از آن) و بدون اعمال ضریب کاهش ظرفیت، باید در نظر گرفته شود.
- (۳) با استفاده از روش طراحی ظرفیت، تقاضای نیروهای برشی بر اساس دیاگرام لنگر خط چین در شکل (۳-۱ ب) تعیین می شود. از آنجا که نیروهای برشی بستگی به لنگرهای خمشی داشته و چون بدون توجه به مقاومت زلزله، لنگرهای خمشی، حداکثر مقادیر قابل حصول هستند، اگر المان تیر برای این مقدار از بارهای برشی طراحی شود، رفتار برشی همواره به شکل الاستیک باقی می ماند.

روش دیگر جهت طراحی تیر برای تقاضای محاسبه شده، می‌تواند از ضرایب رفتار مختلف برای خمش و برش استفاده نمود. این روش ممکن است (و نه لزوماً) شرایط باقی ماندن رفتار برشی در محدوده‌ی الاستیک را برآورده سازد. طراحی ظرفیت، روش مناسب‌تری می‌باشد.

### ۶-۱ تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی

بارهای خارجی وارد بر سازه می‌توانند استاتیکی یا دینامیکی باشند. اصولاً بیشتر بارها دینامیکی هستند، اما برای مقاصد تحلیلی، می‌توان برخی از بارها را به صورت استاتیکی فرض نمود، به شرطی که بار وارده با سرعت کم (نسبت به پریود ارتعاش سازه) به آن وارد شود.

برای موارد استاتیکی، بارهای خارجی وارد بر سازه تماماً توسط نیروهای استاتیکی داخلی در اعضای سازه‌ای تحمل می‌شود. برای موارد دینامیکی، بارهای خارجی توسط نیروهای اینرسی که مرتبط به جرم سازه نیز می‌توانند تحمل شوند. اگر نیروهای اینرسی و نیروهای موجود در اعضای سازه‌ای در یک جهت عمل کنند، نیروهای اعضا کمتر از مقداری خواهد بود که همان بارها به صورت استاتیکی به آن اعمال شوند. اگر نیروهای اینرسی و نیروهای اعضا در جهت مخالف عمل کنند، نیروهای موجود در اعضای سازه‌ای بزرگتر از حالی خواهد بود که همان نیروها به صورت استاتیکی اعمال شوند. به طور کلی، نیروهای اعضا و نیروهای دینامیکی در زمان‌های مختلف، جهات مختلفی در بخش‌های مختلف سازه، به آن وارد می‌شوند و در نظر گرفتن اندرکنش آنها امری پیچیده است. نیروهای اینرسی به صورت خطی به شتاب بستگی دارند (با فرض ثابت بودن جرم). نیروهای ویسکوز (نیروهای لزجی) نیز می‌توانند وجود داشته باشد که مقدار آنها به مقدار سرعت بستگی دارد. تجربه نشان می‌دهد که زمانیکه سازه به صورت دینامیکی بارگذاری می‌شود، حتی اگر سازه الاستیک باشد، مقداری از انرژی مستهلک می‌شود. معمولاً فرض می‌شود که استهلاک انرژی توسط مکانیسم میرایی ویسکوز صورت می‌گیرد که به حضور نیروهای وابسته به سرعت، اشاره دارد. این نیروها می‌توانند به صورت خطی یا غیرخطی به سرعت وابستگی داشته باشند که این بستگی به مکانیسم میرایی ویسکوز دارد.

پیچیدگی دیگری که وجود دارد، روابط نیرو- تغییرشکل برای اعضای سازه‌ای می‌باشد که می‌تواند به سرعت (نرخ) تغییرشکل‌های اعضا بستگی داشته باشد، که آن نیز به مقدار سرعت بستگی دارد. برای مثال، برای یک عضو سازه‌ای، زمانیکه بارهای خارجی به صورت دینامیکی با نرخ تغییرشکل‌های زیاد به سازه اعمال شود، نسبت به حالتی که بار به صورت استاتیکی به آن وارد شود، اساساً قوی‌تر خواهد بود.

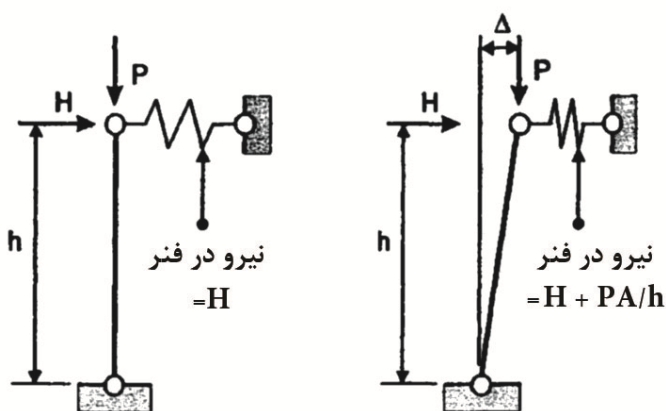
## ۷-۱ تحلیل تغییر شکل های بزرگ و کوچک

اگر یک سازه دارای اعضای غیرالاستیک باشد، مقاومت آن غیرخطی خواهد بود. این موضوع تحت عنوان (غیرخطی بودن مصالح) در نظر گرفته می شود. همچنین، زمانیکه سازه تحت تغییر شکل های بزرگ قرار می گیرد، می تواند رفتار غیرخطی داشته باشد، حتی اگر در محدوده‌ی غیرالاستیک باقی بماند که این موضوع تحت عنوان (رفتار غیرخطی هندسی) شناخته می شود.

دو دلیل برای رفتار غیرخطی هندسی وجود دارد، دلیل اول وجود تعادل و دلیل دوم شرط سازگاری (پیوستگی) در سازه. در این بخش توضیح مختصری راجع به آنها ارائه می شود و در فصل ۶ به تفصیل در مورد آنها بحث می شود.

۷-۱-۲ زمانیکه سازه‌ای تحت بارگذاری قرار می گیرد، تغییر شکل می دهد و تعادل بین نیروهای خارجی و نیروهای خارجی باید در حالت تغییر شکل یافته‌ی سازه نیز ارضاء شود. هر چند، اگر تغییر شکل ها کوچک باشند، می توان با در نظر گرفتن تقریب اندک، معادلات تعادل را برای وضعیت بدون تغییر شکل سازه در نظر گرفت که در این صورت به دلیل فرض ثابت ماندن شکل سازه، معادلات تعادل به صورت خطی می باشند. برای مثال، دو برابر شدن نیروهای خارجی باعث افزایش دو برابری نیروهای داخلی می شود (با صرف نظر از رفتار غیرخطی مصالح).

اگر تغییر مکان ها کوچک نباشد، تعادل باید در وضعیت تغییر شکل یافته در نظر گرفته شود. در این حالت، معادلات تعادل خطی نمی باشند. به عبارت دیگر، با دو برابر کردن نیروهای خارجی، نیروهای داخلی دقیقاً دو برابر نمی شوند. این موضوع در شکل (۴-۱) نشان داده شده است.



(a) موقعیت تغییر شکل نیافته

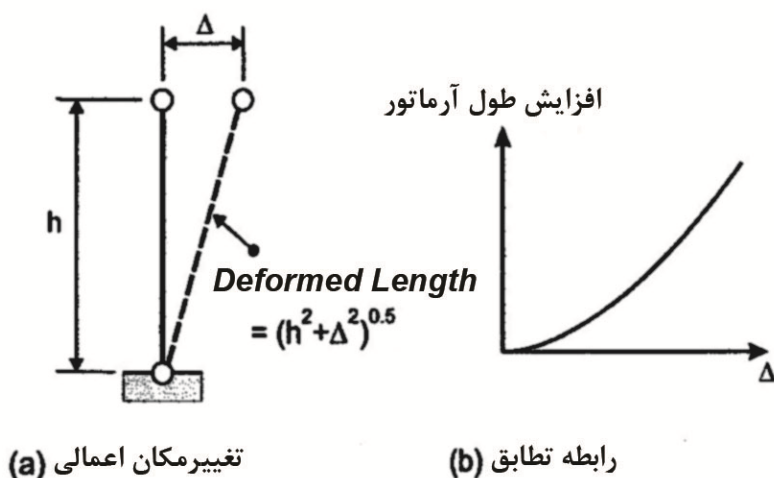
(b) موقعیت تغییر شکل یافته

شکل ۴-۱ تعادل در وضعیت های تغییر شکل یافته و بدون تغییر شکل

در شکل (۱-۴ الف) وضعیت بدون تغییرشکل، نشان داده شده است. لنگر خمشی در پای مفصلی باید برابر صفر شود و از روی معادله‌ی تعادل می‌توان دریافت که نیروی فنر برابر نیروی افقی خواهد بود. در شکل (۱-۴ ب) وضعیت تغییرشکل یافته نشان داده شده است. فرض شود که فنر فشرده می‌شود و بالای میله به صورت افقی به اندازه‌ی  $\Delta$  حرکت می‌کند. در این حالت نیز، لنگر خمشی در پای مفصلی برابر صفر خواهد بود. بنابراین، برای ارضاء معادله‌ی تعادل، مقدار نیرو در فنر باید بزرگتر از نیروی اعمالی باشد. همچنین، نیروی فنر متناسب با بار اعمالی نیست. اگر  $P$  و  $H$  دو برابر شوند، نیروی فنر بیش از دو برابر خواهد شد.

### ۱-۷-۳ سازگاری (پیوستگی)

روابط هندسی بین تغییرمکان‌های سازه و تغییرشکل‌های اجزای آن برقرار است. در شکل (۱-۵) این رابطه نشان داده شده است.



### شکل ۱-۵ روابط سازگاری غیرخطی

در شکل (۱-۵ الف) بالای میله به صورت افقی حرکت می‌کند، بنابراین میله برای حفظ انسجام خود باید افزایش طول بدهد. در شکل (۱-۵ ب) رابطه‌ی بین تغییرمکان و تغییرطول تیر نشان داده شده است. تغییرطول میله برابر طول تغییرشکل یافته منهای طول تغییرشکل نیافته می‌باشد ( $h$ ). برای تغییرمکان افقی اندک، تغییرطول تیر نزدیک به صفر می‌باشد (در حد نهایی برای تغییرمکان خیلی کوچک، تغییرطول تیر دقیقاً برابر صفر می‌باشد). برای تغییرمکان‌های بزرگ، میله تغییر طول داده و بین تغییرمکان و تغییر طول رابطه‌ی غیرخطی وجود دارد.

## ۷-۴ انواع تحلیل

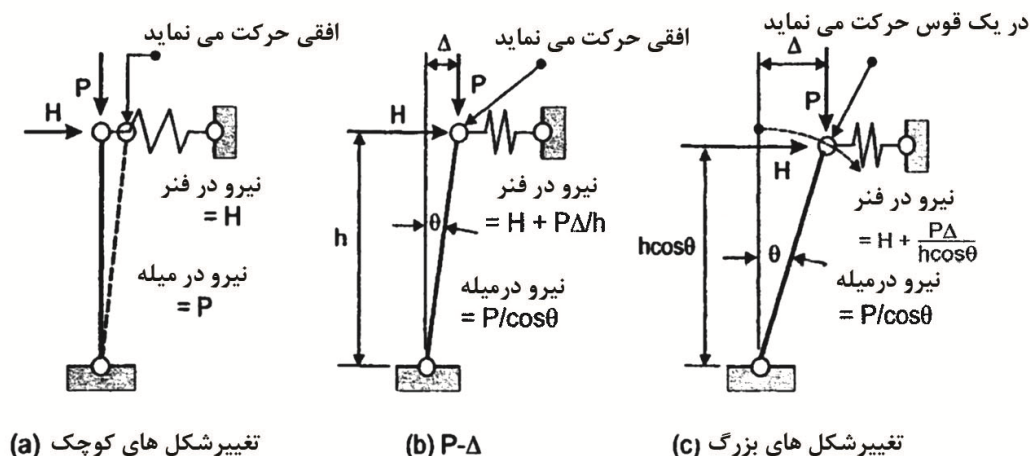
برای تحلیل سازه، آثار تغییرمکان های بزرگ بر روابط تعادل و روابط سازگاری باید به صورت جداگانه در نظر گرفته شود. در نتیجه، سه نوع مختلف برای تحلیل سازه وجود دارد که در زیر به آنها اشاره می شود:

(۱) تحلیل تغییرمکان های کوچک. در اینجا تعادل در وضعیت تغییرشکل نیافته در نظر گرفته می شود و برای سازگاری، فرض می شود که تغییرمکان ها بسیار کوچک باشند.

(۲) تحلیل تغییرمکان های بزرگ واقعی. تعادل در وضعیت تغییرشکل یافته در نظر گرفته می شود و برای شرط سازگاری، تغییرمکان ها محدود فرض می شوند.

(۳) تحلیل  $P-\Delta$ . تعادل در وضعیت تغییرشکل یافته در نظر گرفته می شود و برای سازگاری، فرض می شود که تغییرمکان ها خیلی کوچک باشند.

نوع چهارمی هم وجود دارد (وضعیت تغییرشکل یافته برای تعادل، تغییرمکان های کوچک برای سازگاری) که مورد استفاده قرار نمی گیرد.



## شکل ۱-۶ مدل های آنالیز مختلف

در شکل (۱-۶) تفاوت های ذکر شده برای یک سازه ی ساده نشان داده شده است. برای این سازه فرض می شود که میله همچنان رفتار محوری داشته باشد، به طوری که دارای تغییرمکان محوری بسیاری کوچک می باشد. بنابراین، شکل (۱-۶ الف) بارها و نیروها را برای تحلیل تغییرمکان های کوچک نشان می دهد و شکل (۱-۶ ب) به تحلیل  $P-\Delta$  و شکل (۱-۶ ج) به تحلیل تغییرمکان های بزرگ مربوط می شود. توجه شود که در شکل (۱-۶ ج) فرض شده است که فنر به صورت افقی باقی بماند.

تفاوت بین سه روش ذکر شده بستگی به مقادیر نسبی نیروهای  $P$  و  $H$  و نیز به تغییرمکان  $\Delta$  بستگی دارد. دو مثال زیر در نظر می گیریم:

۱-  $P=0$  و  $\frac{\Delta}{h} = 0.1$  (نسبت تغییرمکان جانبی ۱۰ درصد که برای بیشتر سازه ها تغییرمکان جانبی بزرگی می باشد). برای هر سه روش، نیرو در فنر برابر  $H$  و نیرو در میله برابر صفر است. تنها تفاوت بین روش ها در این است که تغییرمکان قائم برای تحلیل تغییرمکان های کوچک و تحلیل  $P-\Delta$  قابل صرف نظر کردن است و برای روش تحلیل تغییرمکان های بزرگ، برابر مقدار کوچک  $0.055H$  می باشد.

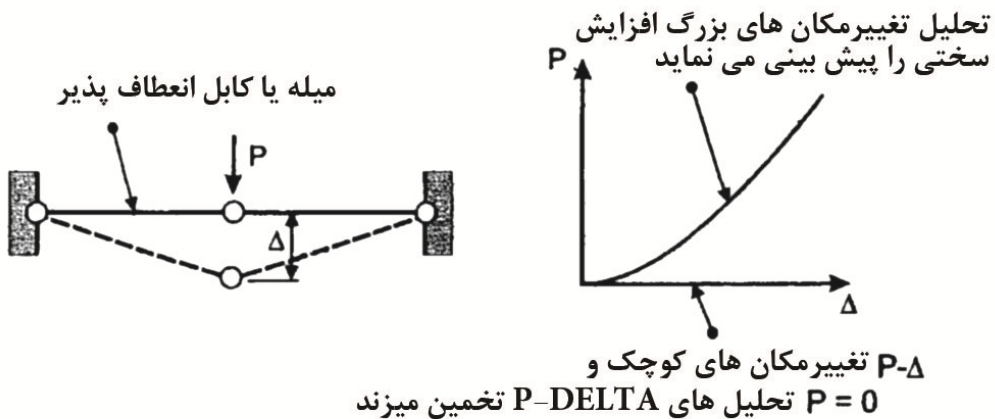
۲-  $P/H=5$  و  $\frac{\Delta}{h} = 0.1$ ، برای روش تحلیل تغییرمکان های کوچک، نیروی میله و فنر به ترتیب برابر  $P$  و  $H$  می باشد. برای تحلیل  $P-\Delta$ ، این نیروها به ترتیب برابر  $1.5H$  و  $0.995P$  می باشند و برای تحلیل تغییرمکان های بزرگ، این نیروها به ترتیب برابر  $1.503H$  و  $0.995P$  می باشند. اساساً تغییرمکان های قائم برای حالت  $P=0$ ، برای هر سه روش یکسان است.

این مثال ها نشان می دهد که تحلیل تغییرمکان های کوچک، زمانیکه مقادیر نیروهای گرانشی بزرگ بوده و تغییرمکان جانبی های بزرگ داشته باشیم، می تواند دارای خطا باشد. اما فقط برای نیروی فنر (در مثال دوم)، خطای ۵۰ درصدی در نیروی فنر وجود دارد. برای هر سه نوع تحلیل، نیروی محوری در میله بسیار به  $P$  بزرگ نزدیک می باشد (زیرا  $\cos\theta$  نزدیک به مقدار ۱ می باشد). زمانیکه تحلیل  $P-\Delta$  و تحلیل تغییرمکان های بزرگ مورد مقایسه قرار می گیرند، تفاوت اندکی در مقادیر نیروی فنر وجود دارد. تنها تفاوت عمده در این مورد، تغییرشکل قائم محاسبه شده بوده که برای تحلیل  $P-\Delta$  برابر صفر و برای تحلیل تغییرمکان های بزرگ دارای یک مقدار کوچک است.

این مثال ها تقریباً مدلی از یک ساختمان یک طبقه را نشان می دهند (که فنر، سختی افقی سازه را مدل می کند). این مثال ها نشان می دهد که در نظر گرفتن آثار  $P-\Delta$  می تواند حائز اهمیت باشد، اما در نظر گرفتن اثر تغییرشکل های بزرگ لزوم چندانی ندارد. این نکته از این دیدگاه دارای اهمیت می باشد که تحلیل  $P-\Delta$  می تواند از لحاظ محاسباتی بسیار کارایی تر از روش تحلیل تغییرمکان های بزرگ باشد. برای سازه های ساختمانی تحت بار زلزله به علاوه بارهای جانبی معمولاً در نظر گرفتن آثار  $P-\Delta$  مهم است، اما در نظر گرفتن تغییرشکل های بزرگ به ندرت ضرورت می یابد.

## ۷-۵ اثر کاتاناری

رفتارهایی که در بخش قبلی توضیح داده شد، برای همه ی سازه ها کاربرد ندارد. در شکل (۷-۱) نوع دیگری از رفتار، نشان داده شده است.



شکل ۷-۱ اثر کاتاناری

در این مثال با افزایش تغییرشکل سازه، سختی آن بیشتر می شود. این اثر تحت عنوان (اثر کاتاناری) شناخته می گردد. تنها روش تحلیل تغییرمکان های بزرگ قادر به در نظر گرفتن چنین اثری می باشد. دلیل این امر آن است که روش تحلیل تغییرمکان های کوچک و تحلیل  $P-\Delta$  برای سازگاری تغییرشکل ها از فرض وجود رابطه ی خطی بین تغییرمکان سازه و تغییرطول میله استفاده می کنند. در این مثال، رابطه ی سازگاری خطی، تغییرطول تیر را حتی برای مقادیر بزرگ  $\Delta$ ، برابر صفر در نظر خواهد گرفت. در نتیجه، نیروی میله برابر صفر شده و در نتیجه  $P=0$  در وضعیت های تغییرشکل یافته و بدون تغییرشکل، برقرار می شود. در روش تحلیل تغییرمکان های بزرگ از رابطه ی سازگاری غیرخطی (مطابق شکل ۵-۱) استفاده گردیده و بدین ترتیب، اثر کاتاناری در نظر گرفته می شود.

یک تفاوت عمده بین رفتار غیرخطی هندسی و رفتار غیرخطی مصالح این است که در مورد رفتار غیرخطی هندسی، دو عامل شناخته شده وجود دارد (تعادل و سازگاری)، که هر دوی آنها از قوانین ریاضی روشنی تبعیت می کنند، در حالی که رفتار غیرخطی مصالح می تواند عوامل و اشکال مختلفی داشته باشد. آگاهی ما از رفتار غیرخطی مصالح، به طور کلی بستگی به چیزی دارد که ما در آزمایشاتی که روی سازه های واقعی انجام می شود، مشاهده می نماییم.



## ۸-۱ تحلیل تقاضا و تحلیل ظرفیت

### ۸-۱-۱ نگاه کلی

در بیشتر موارد، تحلیل سازه برای محاسبه‌ی مقادیر تقاضا برای تخمین عملکرد سازه یا طراحی مستقیم، مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین می‌توان از تحلیل سازه برای محاسبه‌ی مقادیر ظرفیت استفاده نمود که بین آنها تفاوت وجود دارد.

در اینجا به چهار نوع تحلیل اشاره می‌گردد:

۱- روش تقاضای مقاومت (*Strength Demand*). این روش رایج ترین نوع تحلیل سازه می‌باشد. این روش تحلیلی جهت محاسبه‌ی لنگر خمشی، نیروهای برشی و ... در المان‌های سازه‌ای به کار می‌رود. مقادیر ظرفیت نیز با استفاده از آیین‌نامه‌های طراحی یا سایر منابع حاصل می‌گردد.

۲- روش تقاضای تغییرشکل (*Deformation Demand*). بیشتر تحلیل‌های غیرخطی از این دسته هستند. در این روش، تحلیل سازه برای تعیین میزان دوران مفاصل پلاستیک، کرنش‌های برشی و ... به کار می‌رود. همچنین، مقادیر ظرفیت با رجوع به آیین‌نامه‌های طراحی یا سایر مراجع (نظیر ۴۱ ASCE) به دست می‌آید.

۳- روش تحلیل ظرفیت (*Capacity Analysis*). این روش اساساً آزمایشی بوده و برای تخمین مقاومت یک سازه یا عضو سازه‌ای به کار می‌رود.

۴- روش تحلیل ظرفیت تغییرشکل (*Deformation-Capacity Analysis*)، که روشی آزمایشی بوده و برای تخمین روابط نیرو- تغییرشکل اعضای سازه‌ای (یا شاید رابطه‌ی نیرو- تغییرمکان برای یک سازه)، کاربرد دارد. با استفاده از این روابط، می‌توان تخمینی از حداکثر تغییرشکلی که می‌توان به عضو سازه‌ای اعمال نمود (ظرفیت تغییرشکلی عضو)، به دست آورد. در این بخش، مثال‌هایی از روش طراحی ظرفیت ارائه می‌شود.

### ۸-۱-۲ بار جانبی در لحظه‌ی شروع تسلیم

این مثال، یک مثال ساختگی برای روش تحلیل ظرفیت می‌باشد که بیانگر روند انجام تحلیل است. فرض کنیم که قرار است که یک قاب سازه‌ای در محدوده‌ی الاستیک باقی بماند، یعنی تحت ترکیبات بار گرانشی و بارهای استاتیکی جانبی (مثلاً بار باد) هیچ مفصل پلاستیکی در آن تشکیل نشود. فرض شود که (الف) بار گرانشی از نظر توزیع و مقدار، مشخص می‌باشد و (ب) توزیع نیروی جانبی مشخص، اما مقدار آن نامعلوم باشد. لازم است مقدار بار جانبی که در آن قاب از وضعیت الاستیک خارج می‌شود، محاسبه گردد (یعنی جایی که اولین مفصل شکل می‌گیرد). این مقدار بار جانبی، ظرفیت الاستیک قاب می‌باشد.

این تحلیل به سادگی قابل انجام است و مراحل آن به صورت زیر می باشد:

- (۱) تهیه مدل الاستیک سازه
  - (۲) تعیین تمام موقعیت هایی که ممکن است در آنها مفصل پلاستیک تشکیل شود و محاسبه ظرفیت گشتاور خمشی در این موقعیت ها
  - (۳) تحلیل سازه برای بارهای گرانشی
  - (۴) افزودن بار جانبی و افزایش گام به گام بزرگی بار، تا زمانیکه تقاضای لنگر خمشی در یکی از محل های مستعد برای تشکیل مفصل، از مقدار ظرفیت خمشی تجاوز کند. از طرف دیگر، به دلیل اینکه رفتار سازه خطی می باشد، می توان تحلیل های مجزا را برای بارهای جانبی و بارهای گرانشی انجام داده و سپس حداقل بار جانبی مورد نیاز برای رسیدن به نسبت  $D/C$  (تقاضا به ظرفیت) برابر یک را تعیین نمود.
  - (۵) این مقدار بار، میزان ظرفیت بار جانبی سازه می باشد.
- توجه داریم که لزومی به تهیه مدل غیرخطی (و مدلسازی مفاصل پلاستیک) نمی باشد.

### ۱-۸-۳ شدت زلزله در لحظه شکست

در اینجا یک مثال واقعی تر از روش تحلیل ظرفیت ارائه می شود. تحلیل هایی از این نوع، برای تخمین احتمال شکست سازه های واقعی به کار می روند.

یک قاب سازه ای با میزان بار گرانشی و زلزله ای مشخص را در نظر بگیرید. برای این زلزله، تغییرات شتاب زمین با زمان مشخص می باشد، اما شدت آن می تواند تغییر کند (یعنی شتاب های زمین می توانند به سمت بالا یا پایین مقیاس شوند). بدین طریق، شدت زلزله ای لازم برای شکست سازه محاسبه می شود. این شدت، ظرفیت شکست قاب سازه ای می باشد.

فرآیند محاسبه ای ظرفیت شکست، معمولاً تحت عنوان تحلیل دینامیکی افزایشی ( $IDA$ ) شناخته می شود که مراحل آن به صورت زیر است:

- (۱) تهیه مدل غیرخطی سازه
- (۲) تحلیل سازه برای بارهای گرانشی
- (۳) انتخاب معیار شدت زلزله و انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی با فرض بارهای گرانشی ثابت. باید تعیین شود که آیا سازه دچار شکست می شود یا خیر.
- (۴) تحلیل سازه برای مقادیر دیگر شدت زلزله (معمولاً با روند افزایشی) انجام می شود. در صورت انجام صحیح تحلیل ها، سازه در برخی از شدت های زلزله دچار شکست نخواهد شد، اما برای مقادیری اندک بیش از آن، گسیخته می گردد.

(۵) با این روش، ظرفیت شکست سازه تعیین می شود. تقریب این روش به تعداد تحلیل‌ها و شدت‌های زلزله بستگی دارد.

هدف کلی این تحلیل (مانند مثال قبلی) محاسبه‌ی ظرفیت سازه می‌باشد، هر چند در جزئیات کاملاً متفاوت هستند. برای کنترل مقادیر  $D/C$ ، تهیه‌ی مدل‌های الاستیک نسبت به مدل‌های غیرالاستیک کار ساده‌تری است. طبیعی است که تهیه‌ی مدلی که در برگیرنده‌ی عوامل مختلف در تشکیل رفتار غیرخطی سازه باشد، می‌تواند بسیار سخت و پیچیده باشد و برای انجام یک تحلیل دینامیکی دقیق و معنادار برای چنین مدلی، امری تخصصی و مشکل است. تحلیل‌هایی از این نوع، دارای تقریبات زیاد می‌باشند و نتایج تحلیل بستگی زیادی به مفروضات مدلسازی دارد.

#### ۱-۸-۴ مقاومت خمشی تیرها

دو مثال قبلی به سازه‌های کلی مربوط می‌شد. در اینجا، مثالی ارائه شده است که به بخش کوچکی از سازه مربوط می‌شود و به صورت روش تحلیل ظرفیت انجام می‌شود. یک تیر بتنی مسلح با سطح مقطع پیچیده فرض شود، به طوری که فرمولهای رایج برای محاسبه‌ی ظرفیت لنگر خمشی برای این تیر قابل استفاده نباشد. در این گونه موارد، تحلیل سازه می‌تواند برای محاسبه‌ی ظرفیت سازه، به شکلی که در زیر آمده، مورد استفاده قرار گیرد:

(۱) تهیه‌ی مدل تحلیلی که شامل طول محدودی از تیر بوده و به نحوی بارگذاری گردد که لنگر تیر در تمام طول آن ثابت باشد (خمش خالص).

(۲) سطح مقطع تیر به تعدادی از فیبرهای طولی تقسیم‌بندی می‌شود. برخی از فیبرها نمایانگر رفتار بتن بوده و فیبرهای دیگر رفتار مصالح فولادی را مدل می‌کنند.

(۳) فیبرهای بتنی با استفاده از مدل مصالح الاستیک طوری مدل می‌شود که در برگیرنده آثار خرد شدگی و ترک خوردگی باشد.

(۴) مدلسازی فیبرهای فولادی با استفاده از مصالح غیرالاستیک، طوری انجام می‌شود که در برگیرنده خاصیت تسلیم و سخت شدگی کرنشی فولاد باشد.

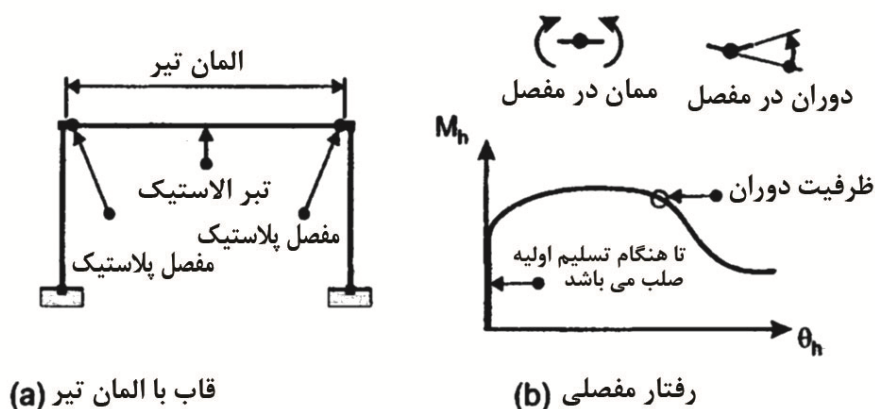
(۵) فرض می‌شود که مقاطع مسلح به صورت مسطح باقی بمانند، که معمولاً این فرض در تئوری تیرها رایج است.

(۶) یک تحلیل غیرالاستیک انجام شده و لنگر خمشی به صورت افزایشی تا رسیدن به مقاومت نهایی، افزایش داده می‌شود.

در واقع این مثال یک تحلیل غیرالاستیک ساده می‌باشد و نتایج آن باید با احتیاط به کار گرفته شود، زیرا رفتار خمشی یک تیر بتنی مسلح واقعی می‌تواند بسیار پیچیده‌تر از آن باشد که در تحلیل مفروض واقع شده است. به ویژه، فرض (خمش خالص در تیرها) فرضی غیرواقعی است، زیرا خمش همواره با برش همراه است. برای تیر بتنی مسلح، نیروی برشی می‌تواند آثار زیادی بر رفتار خمشی داشته باشد.

### ۸-۵ ظرفیت دوران مفصل پلاستیک

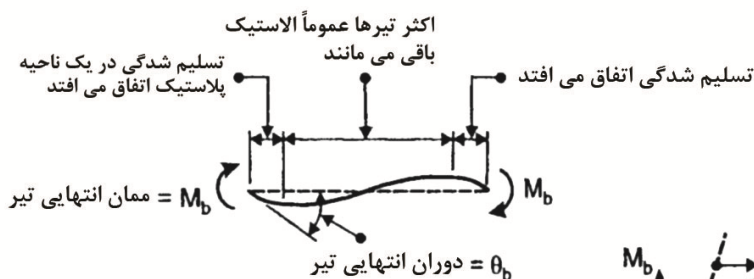
در اینجا، مثالی از روش تحلیل ظرفیت تغییرشکلی ارائه می‌شود. رفتار غیرالاستیک تیر تحت خمش را معمولاً می‌توان با استفاده از مفاصل پلاستیک مدل نمود (شکل ۸-۱).



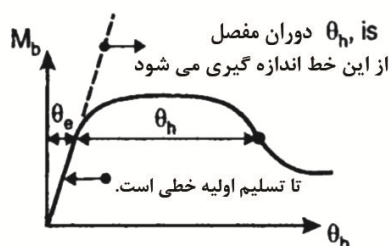
شکل ۸-۱ مفصل پلاستیک

در اینجا، المان تیر به صورت تیر الاستیک با مفاصل پلاستیک انتهایی مدل می‌شود. مفصل پلاستیک در ابتدا صلب می‌باشد و پس از تسلیم شدن، شروع به دوران می‌کند. مشخصات یک مفصل پلاستیک، مقاومت آن در خمش و ظرفیت دورانی آن را در بر می‌گیرد که در این مثال، دوران در حد شکل پذیر (حد قبل از تسلیم) مد نظر می‌باشد.

زمانیکه یک المان تیر غیرالاستیک با استفاده از مفاصل پلاستیک مدل گردد، فرض می‌شود که تمام تغییرشکل‌های غیرالاستیک در مفصل تیر متمرکز شده و بخش‌های دیگر تیر به صورت غیرالاستیک باقی بمانند. با توجه به اینکه رفتار غیرالاستیک در تیرهای واقعی معمولاً در یک طول مشخصی از تیر گسترده می‌شود، فرض وجود مفصل پلاستیک با طول صفر، دارای تقریب است. شکل (۹-۱) نشان می‌دهد که چگونه مشخصات یک مفصل پلاستیک می‌تواند تعیین گردد.



(a) تیر واقعی با نواحی پلاستیک



(c) رفتار تیر



$\theta_h$  دوران مفصل پلاستیک

(b) مدل تیر با مفاصل پلاستیک

### شکل ۹-۱ تیر ارتجاعی و دوران مفصل

شکل (۹-۱) تیری با دو لنگر انتهایی برابر و مختلف جهت را نشان می دهد. در شکل (۹-۱ ب) مدلی از المان تیر با مفاصل پلاستیک را نشان داده شده است. اگر رابطه‌ی بین لنگر انتهایی و دوران کلی انتهایی معلوم باشد، مشخصات مفصل پلاستیک می تواند به صورتی که در شکل (۹-۱ ج) نشان داده شده، تعیین گردد. مشخصات مفصل پلاستیک معمولاً به شکل آزمایشگاهی تعیین می شود، گرچه در این مثال فرض بر این است که تیر دارای سطح مقطع جدار نازک می باشد و برای آن، نتایج آزمایشگاهی موجود نیست. مشخصات مفصل پلاستیک باید با استفاده از تحلیل سازه تخمین زده شود. مهمترین مشخصه‌ای که باید محاسبه گردد، مقاومت خمشی و ظرفیت دورانی مفصل می باشد. این مورد را می توان با تحلیل غیرالاستیک تیر طره حاصل نمود (شکل ۱۰-۱).

در شکل (۱۰-۱ الف) المان تیر نشان داده شده است. در شکل (۱۰-۱ ب)، تیر طره معادل نشان داده شده است. در شکل (۱۰-۱ ج) انواع مدل های اجزاء محدود که برای انجام تحلیل تیر طره قابل استفاده می باشد، را نشان می دهد.