Modeling for Structural Analysis

مدل سازی برای طراحی سازه ها

همراه با DVD

کاربرد در:

SAP 2000
ETABS
PERFORM 3D

Dr. Graham H. Powell

ترجمه: علیرضا مقیمی

مرتضی رائفی

صلوات خاصه حضرت امام رضا علیه السلام

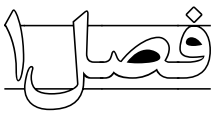
اَللّٰهُمَّ صَلِّ عَلٰى عَلِيِّ بْنِ مُوسَى الرِّضَا الْمُرْتَضٰى
الْاِمَامِ التَّقِيِّ النَّقِيِّ وَحُجَّتِكَ عَلٰى مَنْ فَوْقَ الْاَرْضِ
وَمَنْ تَحْتَ الثَّرٰى الصِّدِّيقِ الشَّهِيدِ صَلٰوةً كَثِيرَةً
تَامَّةً زَاكِيَةً مُتَوَاصِلَةً مُتَوَاتِرَةً مُتَرَادِفَةً كَاَفْضَلِ مَا
صَلَّيْتَ عَلٰى اَحَدٍ مِنْ اَوْلِيَائِكَ

فهرست مطالب

فصل اول – مقدمه ---------- ۱
۱-۱ کلیات ---------- ۱
۱-۲ مراحل انجام تحلیل ---------- ۲
۱-۳ اهمیت نسبی مراحل مختلف تحلیل ---------- ۴
۱-۴ -تقاضا و ظرفیت ----------۴
۱-۵ تحلیل الاستیک و غیرالاستیک ----------۶
۱-۶ تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی ---------- ۱۵
۱-۷ تحلیل تغییرشکل های بزرگ و کوچک ---------- ۱۶
۱-۸ تحلیل تقاضا و تحلیل ظرفیت ---------- ۲۱
فصل ۲ - مدل تحلیلی چیست؟ ----------۲۷
۲-۱ سازه‌ی واقعی و مدل سازه‌ای ---------- ۲۷
۲-۲ دو نوع مدل سازه‌ای ---------- ۲۷
۲-۳ مشخصات مدل المان- گره ---------- ۲۹
۲-۴ برخی از انواع المان های سازه‌ای ---------- ۳۱
۲-۵ اتصال بین گره‌ها و المان ها ---------- ۳۲
۲-۶ شکاف‌ها و هم‌پوشانی‌های بین المان ها ---------- ۳۴
۲-۷ تعادل بین المان ها ---------- ۳۵
۲-۸ مدل گسسته با المان هایی با بعد محدود و المان های بی‌بعد ---------- ۳۷
۲-۹ مدل های پیوسته ---------- ۳۸
۲-۱۰ المان ها و اجزاء سازه ای ---------- ۴۱
فصل ۳ - روش سختی مستقیم ----------۴۲
۳-۱ سختی المان و انعطاف پذیری ---------- ۴۲
۳-۲ روش های تحلیل سختی و انعطاف پذیری ---------- ۵۲
۳-۳ روش سختی مستقیم ---------- ۵۴
۳-۴ قیود پیرو بودن-دیافراگم صلب ---------- ۶۵
۳-۵ خطاهای تعادل در تحلیل خطی ---------- ۶۷
۳-۶ بارهای المان ---------- ۷۸
۳-۷ تحلیل دینامیکی و غیرخطی ---------- ۸۳
۳-۸ زیرسازه ها و روسازه ها ---------- ۸۵
فصل چهارم - رفتار اجزاء سازه‌ای، روابط نیرو-تغییرشکل F-D یک محوری ---------- ۸۸
۴-۱ نگاه کلی ---------- ۸۸
۴-۲ روابط نیرو-تغییرشکل اعضاء سازه‌ای ---------- ۹۰

۳-۴ کدامیک از روابط نیرو-تغییرمکان مورد نیاز هستند؟ ---------- ۱۰۲
۴-۴ سختی در تحلیل ارتجاعی ---------- ۱۰۳
۵-۴ روابط نیرو-تغییرمکان برای تحلیل غیرارتجاعی ---------- ۱۰۶
۶-۴ حلقه‌های هیسترتیک برای انجام تحلیل غیرارتجاعی ---------- ۱۱۳
فصل ۵ - رفتار اجزاء سازه‌ای-روابط نیرو-تغییرمکان 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 P-Δ، پایداری و کمانش ---------- ۱۸۴
۱-۶ نگاه کلی ---------- ۱۸۵
۲-۶ آثار P-Δ و P-δ بر روی یک ستون ---------- ۱۹۰
۳-۶ اهمیت نسبی آثار P-Δ و P-δ ---------- ۱۹۳
۴-۶ مدلسازی آثار P-Δ و P-δ ---------- ۱۹۶
۵-۶ رفتار قاب¬ها تحت بار جانبی ---------- ۲۰۶
۶-۶ رفتار کمانشی قاب ها ---------- ۲۱۵
۷-۶ ستون های P-Δ 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-ستون‌ها ---------- ۲۴۹
۱۳-۶ طراحی تیر-ستون ها بر اساس مقاومت ---------- ۲۵۶
۱۴-۶ طراحی تغییرشکلی برای تیر-ستون ها ---------- ۲۵۹

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



مقدمه

تحلیل سازه اغلب هدف نهایی نمی باشد، بلکه تنها ابزاری برای طراحی سازه‌ها می‌باشد. تحلیل سازه شامل سه مرحله است: مدل‌سازی، محاسبات و تفسیر نتایج. در این فصل بیان خواهد شد که بخش مدلسازی و تفسیر نتایج دارای اهمیت زیادی برای مهندسین محاسب هستند. بخش محاسبات که در برگیرنده تئوری تحلیل سازه و روش های محاسباتی می‌باشد، برای مهندسین اهمیت کمتری دارد. همچنین در این فصل، در مورد ضرورت انجام تحلیل‌ها (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، ظرفیت‌ها 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 می دهند.

۱-۲ 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 می شود. نیازی نیست که مدل سازه‌ای کاملاً دقیق باشد و چنین چیزی اصولاً امکان‌پذیر نیست.

۲) مدل سازه‌ای تقریباً همیشه از ترکیب المان ها و گره ها تشکیل می شود که شامل نقاط صلب و المان های شکل پذیر می‌باشد. در فصل دوم جزئیات بیشتری در این زمینه مطرح گردیده است.

۳) نکته‌ی مهم دیگر، انتخاب المان ها 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 سازه ای با سازه‌ی واقعی نمی‌باشد.

۱-۲-۲ 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 تغییرمکان گره ها و نیروهای داخلی المان ها (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 می شود:

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.

۱-۲-۳ محاسبات

تعریف محاسبات در این کتاب در برگیرنده 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 می‌گیرد.

برخی از نکات کلیدی در این رابطه را می‌توان 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 مهندسین به مهارت و تخصص مهندسین و برنامه‌نویسانی تکیه می کنند که برنامه‌های تحلیلی تجاری را تهیه می کنند.

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

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

۱-۳ 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 عهده ی شخصی است که تهیه‌ی برنامه‌ی کامپیوتری را بر عهده دارد. برای بیشتر مهندسین، 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 (وهمچنین تهیه‌ی محیط کاربری مناسب، گرافیک مطلوب و سایر موارد) نیز دارای اهمیت خواهند بود. مدلسازی و تفسیر نتایج امور پیچیده‌ای می باشند. برنامه‌ی کامپیوتری زمانی موفق ارزیابی می شود که دارای کارآیی وعملکرد 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 بخش های خودکار) برای بخش های مدلسازی و تفسیر نتایج می‌تواند تقویت شود. مهندسین در انتظار برنامه‌هایی هستند که به طور خودکار، مدل سازه ای 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.

۱-۴ تقاضا و ظرفیت

۱-۴-۱ 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 المان های سازه‌ای و سایر جزئیات انتخاب می‌شوند. تحلیل سازه می‌تواند با استفاده از مدل ساده‌سازی شده برای طراحی اولیه سازه و یا با استفاده از مدل های 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 می آید). 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 می توان توسط مفاصل پلاستیک مدلسازی شود. در این صورت مقدار تقاضا می‌تواند دوران محاسبه‌شده 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 می شود، 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 تغییرمکان ها، لنگرهای خمشی، دوران مفاصل پلاستیک و...) تعیین می شود.

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 المان های مختلف محاسبه می شود.

۶) اگر نسبت تقاضا به ظرفیت *(b/c)* از مقدار واحد تجاوز نکند، عملکرد مطلوب ارزیابی می شود.

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 المان ها مشخص نیست. هدف این مرحله تعیین اندازه‌ی المان های سازه‌ای می‌باشد.

۲) مدل تحلیلی با استفاده از اندازه‌ی تخمینی المان ها تشکیل می شود.

۳) سازه تحلیل می شود و نیازهای مقاومت اعضاء محاسبه می شود.

۴) اندازه‌ی المان ها طوری محاسبه می شود که نیازهای محاسباتی ارضاء شوند، که این امر جنبه‌ی مستقیم بودن طراحی را نشان می دهد.

۵) اگر اندازه‌ی المان ها با اندازه‌ی تخمینی آنها تفاوت قابل ملاحظه‌ای داشته باشد، می بایست 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 تحلیل الاستیک و غیرالاستیک

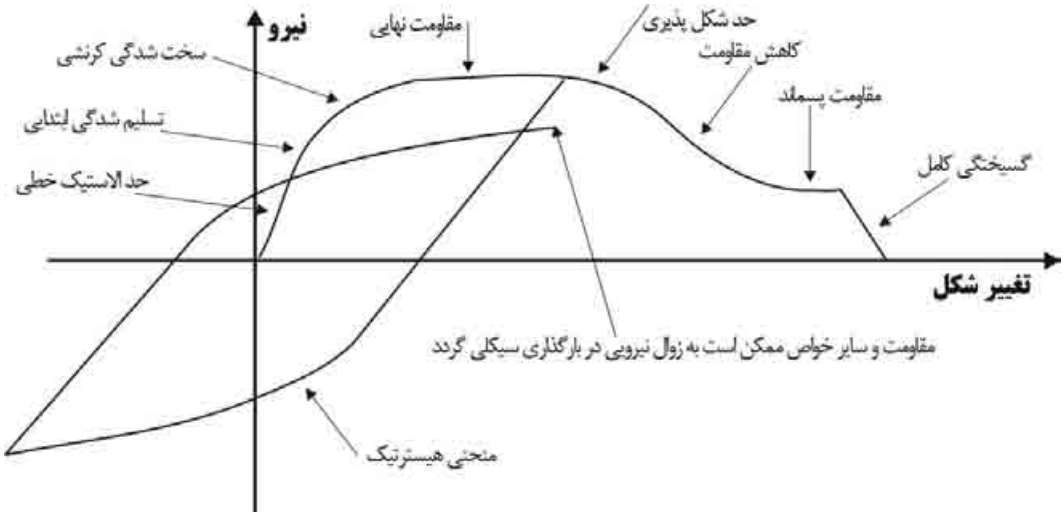
۱-۵-۱ رفتار اعضاء سازه‌ای

در تحلیل سازه، از روابط بین نیروها یا بارها با مقادیر تغییرشکل ها یا تغییرمکان های منطبق بر آنها، استفاده می شود.

در این کتاب عبارت "رابطه‌ی نیرو- تغییرشکل" برای اعضای 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

بخش های 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 شکل پذیری، 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 شکل پذیری 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 می شود، انرژی کرنشی در عضو به طور کامل ذخیره می شود و زمانیکه نیرو رها می شود، انرژی کرنشی بازیابی می گردد. 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 می شود.

مفهوم الاستیک بودن و خطی بودن با هم تفاوت دارند. یک عضو، زمانی الاستیک تلقی می شود که تمام کار انجام شده بر روی عضو (هنگامی که تغییرشکل می‌یابد)، به صورت انرژی کرنشی قابل بازگشت ذخیره می شود. 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 می شود، 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 تغییرشکل آن)، به صورت کار پلاستیک، اصطکاک، انرژی شکست و ... مستهلک می گردد. 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 می شود. 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 المان های 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 فرمول های آیین‌نامه‌ای، معمولاً اندکی کمتر از مقادیر مقاومت نهایی واقعی می‌باشند.

اگر تقاضای نیروی یک عضو خاص نزدیک به مقدار ظرفیت نیرویی آن باشد، قابلیت تغییرشکل غیرالاستیک قابل ملاحظه‌ای را خواهد داشت. اگر نیروی داخلی در تعداد زیادی از اعضای سازه‌ای نزدیک به مقادیر ظرفیت نیروی آنها باشد، تغییرشکل های غیرالاستیک قابل‌ملاحظه‌ای در کل سازه رخ می دهند. 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 می شود. برای مثال، جهت محاسبه‌ی مقادیر تقاضای المان ها، بارهای گرانشی را می توان 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 می شود، 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 می شود. جزئیات بیشتر در این رابطه در آیین‌نامه‌های طراحی سازه موجود می باشند. نکته‌ی مهم این است که تحلیل الاستیک را می توان 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 المان ها صورت گرفته و مقاومت کلی سازه به طور صریح محاسبه نمی شود. 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 می شود، 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 روش های 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 (شکل گیری 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) می شود. این روش نه تنها غیرکاربردی بوده، در برخی اوقات ناممکن نیز می باشد. برای یک سازه‌ی

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

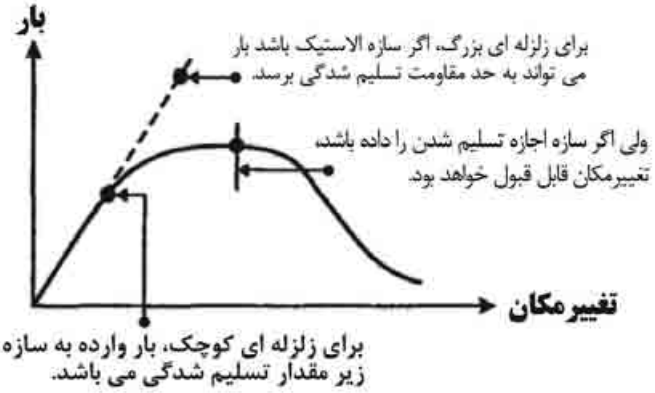
۲) یک روش کاربردی‌تر، محدود نمودن مودهای رفتاری مؤثر در شکست سازه می‌باشد. برای مثال، می‌توان از برش غیرالاستیک در دیوارهای بتنی مسلح جلوگیری نمود، به این صورت که مقاومت برشی دیوار به قدر کافی بزرگتر از مقداری باشد که رفتار برش غیرالاستیک رخ دهد. بدین ترتیب، نیازی به در نظر گرفتن برش غیرالاستیک نخواهد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

۳) حتی زمانیکه از روش طراحی ظرفیت استفاده شود، محاسبه‌ی مستقیم مقاومت سازه، مستلزم انجام تحلیلی غیرالاستیک می‌باشد که بسیار پیچیده‌تر و گران‌تر از انجام تحلیل‌های الاستیک می‌باشد. یکی از پیچیدگی‌های 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 ویژگی‌های رفتاری نیز در نظر گرفته شوند. مدل الاستیک را می توان بر اساس اندازه‌ی تقریبی المان ها ایجاد نموده و پس از تعیین اندازه‌ی صحیح المان ها نیز به سادگی قابل بروزرسانی می باشد (بسیاری از برنامه‌های 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 سازه‌های بتنی مسلح) و حرکات پی می‌باشند. برخی از این عوامل تنها بر شرایط بهره‌برداری (و نه مقاومت آنها) تأثیر گذارند. ساده‌ترین راه این است که این عوامل در تحلیل الاستیک در نظر گرفته شوند.

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

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



شکل ۲-۱ 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 می شود، بنابراین تحمل آن برای سازه ساده‌تر است. همانطوری که در شکل (۲-۱) نشان داده شده است، حداکثر تغییرمکان 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 اعضایی که وارد ناحیه‌ی رفتار غیرالاستیک می‌شوند، معیار طراحی مقدار تغییرشکل آن (و نه مقدار مقاومت آن) می‌باشد. برای رسیدن به عملکرد مطلوب، تقاضای تغییرشکل 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 اعضایی که رفتار غیرالاستیک دارند، معیار طراحی، میزان تغییرشکل (یا شکل پذیری) می‌باشد و نه مقاومت آن. تحلیل غیرالاستیک این قابلیت را دارد که مقادیر تقاضای تغییرشکل 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 قابلیتی را ندارد.

زمانیکه از روش طراحی ظرفیت استفاده می گردد، مقادیر تقاضای نیرو باید برای آن دسته از اجزاء محاسبه شوند که می بایستی 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 می توان به طور مستقیم در نظر گرفت و این بدان معناست که طراحی ظرفیت می‌تواند به طور دقیق تری 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 می شود، 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 شکل پذیری 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 تغییرشکل های 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 تغییرشکل های الاستیک نا چیزی 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 المان های 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 می شود 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

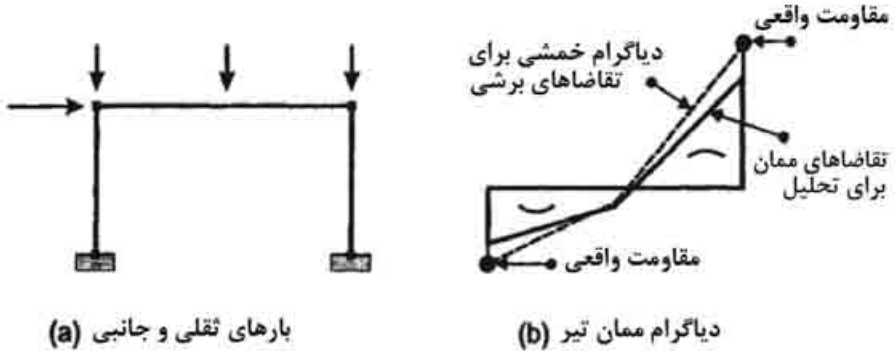
در فرم اصلی طراحی بر اساس مقاومت، تحلیل الاستیک برای محاسبه‌ی تقاضای نیرو در اعضای سازه استفاده می شود و اعضاء طوری طراحی می‌شوند که مقاومت کافی را (به میزان برابر یا بیش از مقدار تقاضا) دارا باشند. این فرآیند، باید زمانیکه از روش طراحی ظرفیت استفاده می شود، تغییر یابد.

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 می شود 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 می شود، 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، می‌تواند استفاده از مقادیر کمتر برای ضریب رفتار برشی (در مقایسه با رفتار خمشی) باشد. هرچند روش مستقیم‌تر و بهتری نیز وجود دارد که این روش، استفاده از روش طراحی ظرفیت می‌باشد.

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 شده‌اند. 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، می‌باشند. 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 می‌باشد، زیرا:

۱) سطح مقطع میلگردها معمولاً بزرگتر از سطح مقطع لازم برای رسیدن به ظرفیتی می‌باشد، که آنرا محاسبات سازه الزام می‌دارد.

۲) مقاومت واقعی مصالح معمولاً بیشتر از مقادیر مفروض برای طراحی می‌باشند. برای طراحی تیرها، معمولاً برای در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها، 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 (۱-۳ 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 می‌ماند.

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.

۱-۶ 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 می شود. 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 اعضاء کمتر از مقداری خواهد بود که همان بارها به صورت استاتیکی به آن اعمال شوند. اگر نیروهای اینرسی و نیروهای اعضاء 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 اعضاء و نیروهای دینامیکی در زمان های مختلف، جهات مختلفی در بخش های 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 می دهد که زمانیکه سازه به صورت دینامیکی بارگذاری می شود، حتی اگر سازه الاستیک باشد، مقداری از انرژی مستهلک می شود. معمولاً فرض می شود 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) تغییرشکل های اعضاء 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 تغییرشکل های زیاد به سازه اعمال شود، نسبت به حالتی که بار به صورت استاتیکی به آن وارد شود، اساساً قوی‌تر خواهد بود.

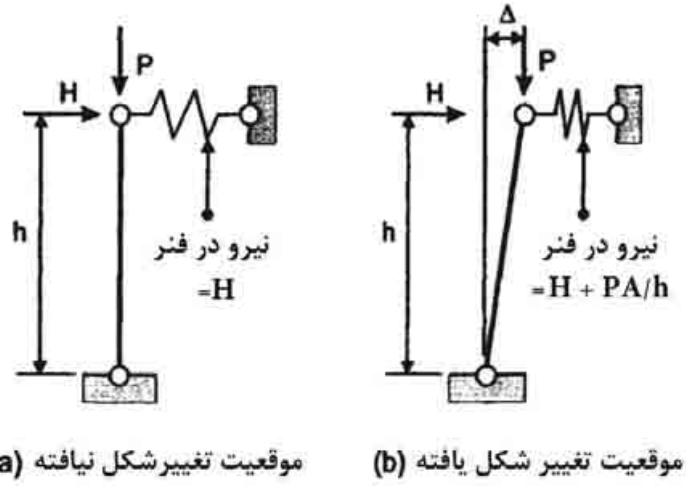
۱-۷ تحلیل تغییرشکل های بزرگ و کوچک

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 تغییرشکل های بزرگ قرار می‌گیرد، می‌تواند 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.

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

اگر تغییرمکان ها کوچک نباشد، تعادل باید در وضعیت تغییرشکل 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 نمی‌شوند. این موضوع در شکل (۴-۱) نشان داده شده است.

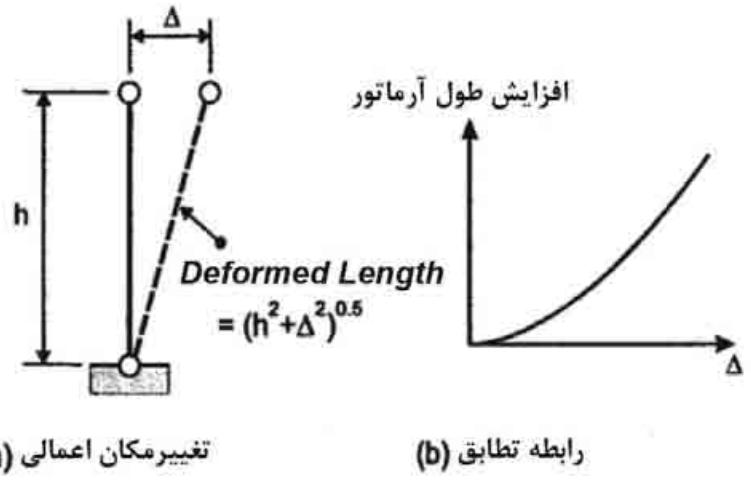


شکل ۴-۱تعادل در وضعیت‌های تغییرشکل‌یافته و بدون تغییرشکل

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 می شود و بالای میله به صورت افقی به اندازه‌ی Δ 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 وH دو برابر شوند، نیروی فنر بیش از دو برابر خواهد شد.

۱-۷-۳ سازگاری (پیوستگی)

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



شکل ۵-۱ روابط سازگاری غیرخطی

در شکل (۵-۱ الف) بالای میله به صورت افقی حرکت می‌کند، بنابراین میله برای حفظ انسجام خود باید افزایش طول بدهد. در شکل (۵-۱ 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 تغییرمکان های بزرگ، میله تغییر طول داده و بین تغییرمکان و تغییر طول رابطه‌ی غیرخطی وجود دارد.

۱-۷-۴ انواع تحلیل

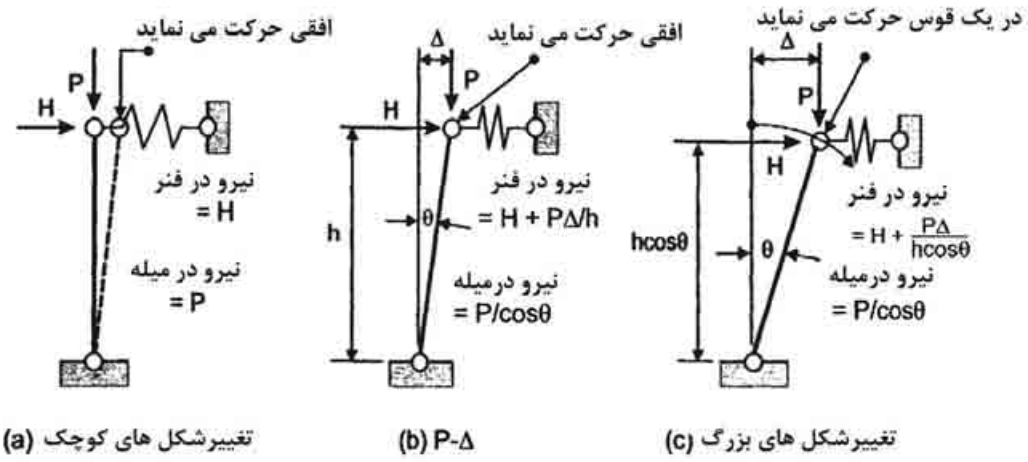
برای تحلیل سازه، آثار تغییرمکان های بزرگ بر روابط تعادل و روابط سازگاری باید به صورت جداگانه در نظر گرفته شود. در نتیجه، سه نوع مختلف برای تحلیل سازه وجود دارد که در زیر به آنها اشاره می شود:

۱) تحلیل تغییرمکان های کوچک. در اینجا تعادل در وضعیت تغییرشکل‌نیافته 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 می‌شوند.

۳) تحلیل P-Δ. 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 نمی‌گیرد.



شکل ۶-۱ مدل های آنالیز مختلف

در شکل (۶-۱) تفاوت‌های ذکر شده برای یک سازه‌ی 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 می‌باشد. بنابراین، شکل (۶-۱ الف) بارها و نیروها را برای تحلیل تغییرمکان های کوچک نشان می دهد و شکل (۶-۱ ب) به تحلیل P-Δ و شکل (۶-۱-ج) به تحلیل تغییرمکان های بزرگ مربوط می شود. توجه شود که در شکل (۶-۱-ج) فرض شده است که فنر به صورت افقی باقی بماند.

تفاوت بین سه روش ذکرشده بستگی به مقادیر نسبی نیروهای P و H و نیز به تغییرمکان Δ بستگی دارد. دو مثال زیر در نظر می گیریم:

۱- P=۰ و $\frac{\Delta}{h} = 0.1$ (نسبت تغییرمکان جانبی ۱۰ درصد که برای بیشتر سازه‌ها تغییرمکان جانبی بزرگی می‌باشد). 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-Δ قابل صرف‌نظر کردن است و برای روش تحلیل تغییرمکان های بزرگ، برابر مقدار کوچک ۰,۰۵۵H می‌باشد.

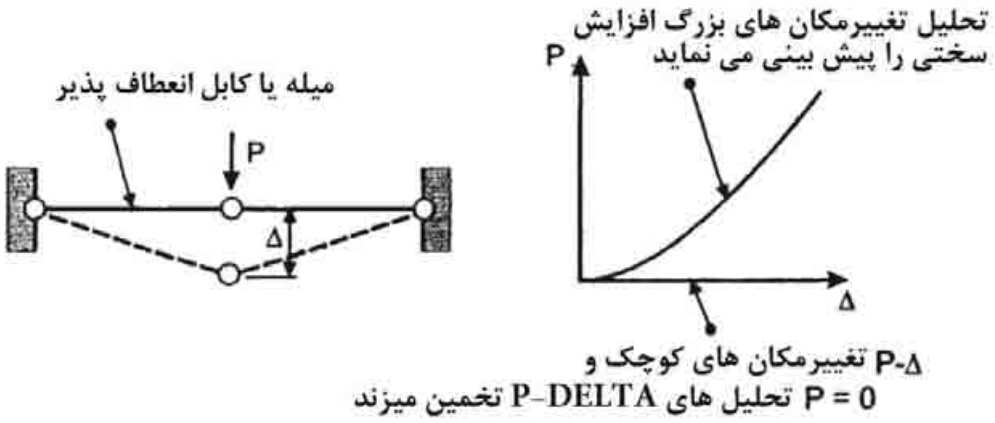
۲- P/H=۵ و $\frac{\Delta}{h} = 0.1$، برای روش تحلیل تغییرمکان های کوچک، نیروی میله و فنر به ترتیب برابر P و H می‌باشد. برای تحلیل P-Δ، این نیروها به ترتیب برابر ۱,۵H و ۰,۹۹۵P می‌باشند و برای تحلیل تغییرمکان های بزرگ، این نیروها به ترتیب برابر ۱,۵۰۳H و ۰,۹۹۵P می‌باشند. اساساً تغییرمکان های قائم برای حالت P=۰، 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 جانبی‌های بزرگ داشته باشیم، می‌تواند 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 می‌باشد (زیرا $cos\theta$ نزدیک به مقدار ۱ می‌باشد). زمانیکه تحلیل P-Δ و تحلیل تغییرمکان های بزرگ مورد مقایسه قرار می‌گیرند، تفاوت اندکی در مقادیر نیروی فنر وجود دارد. تنها تفاوت عمده در این مورد، تغییرشکل قائم محاسبه شده بوده که برای تحلیل P-Δ 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 می‌کند). این مثال ها نشان می دهد که در نظر گرفتن آثار P-Δ می‌تواند حائز اهمیت باشد، اما در نظر گرفتن اثر تغییرشکل های بزرگ لزوم چندانی ندارد. این نکته از این دیدگاه دارای اهمیت می‌باشد که تحلیل P-Δ می‌تواند از لحاظ محاسباتی بسیار کارایی تر از روش تحلیل تغییرمکان های بزرگ باشد. برای سازه‌های ساختمانی تحت بار زلزله به علاوه بارهای جانبی معمولاً در نظر گرفتن آثار P-Δ مهم است، اما در نظر گرفتن تغییرشکل های بزرگ به ندرت ضرورت می‌یابد.

۱-۷-۵ اثر کاتاناری

رفتارهایی که در بخش قبلی توضیح داده شد، برای همه‌ی سازه‌ها 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 می‌باشد. دلیل این امر آن است که روش تحلیل تغییرمکان های کوچک و تحلیل P-Δ برای سازگاری تغییرشکل ها از فرض وجود رابطه‌ی خطی بین تغییرمکان سازه و تغییرطول میله استفاده می کنند. در این مثال، رابطه‌ی سازگاری خطی، تغییرطول تیر را حتی برای مقادیر بزرگ Δ ، برابر صفر در نظر خواهد گرفت. در نتیجه، نیروی میله برابر صفر شده و در نتیجه $P=0$ در وضعیت‌های تغییرشکل یافته و بدون تغییرشکل، برقرار می شود. در روش تحلیل تغییرمکان های بزرگ از رابطه‌ی 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 می‌تواند 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 سازه‌های واقعی انجام می شود، مشاهده می نماییم.

۱-۸ تحلیل تقاضا و تحلیل ظرفیت

۱-۸-۱ 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 می گردد:

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 المان های سازه‌ای به کار می‌رود. مقادیر ظرفیت نیز با استفاده از آیین نامه‌های طراحی یا سایر منابع حاصل می گردد.

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 *ASCE* ۴۱) به دست می آید.

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، مثال هایی از روش طراحی ظرفیت ارائه می شود.

۱-۸-۲ 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 می شود، 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 می‌باشد:

۱) تهیه‌ی مدل الاستیک سازه

۲) تعیین تمام موقعیت هایی که ممکن است در آنها مفصل پلاستیک تشکیل شود و محاسبه‌ی 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 محل‌های مستعد برای تشکیل مفصل، از مقدار ظرفیت خمشی تجاوز کند. از طرف دیگر، به دلیل اینکه رفتار سازه خطی می‌باشد، می‌توان تحلیل‌های 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 می‌باشد.

توجه داریم که لزومی به تهیه‌ی مدل غیرخطی (و مدلسازی مفاصل پلاستیک) نمی‌باشد.

۱-۸-۳ شدت زلزله در لحظه‌ی شکست

در اینجا یک مثال واقعی‌تر از روش تحلیل ظرفیت ارائه می شود. تحلیل‌هایی از این نوع، برای تخمین احتمال شکست سازه‌های واقعی به کار می‌روند.

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

فرآیند محاسبه‌ی 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 تحلیل‌ها، سازه در برخی از شدت‌های 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 مدل های الاستیک نسبت به مدل های 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 می شود و به صورت روش تحلیل ظرفیت انجام می شود. 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 می شود. برخی از فیبرها نمایانگر رفتار بتن بوده و فیبرهای دیگر رفتار مصالح فولادی را مدل می کنند.

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

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

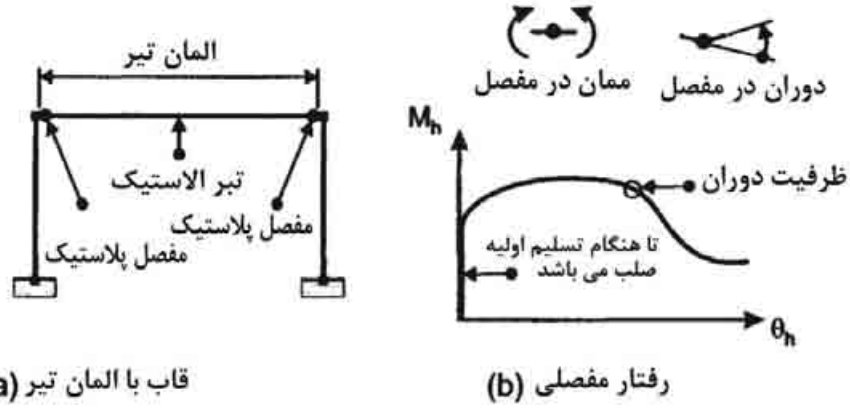
۵) فرض می شود که مقاطع مسلح به صورت مسطح باقی بمانند، که معمولاً این فرض در تئوری تیرها رایج است.

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

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.

۱-۸-۵ ظرفیت دوران مفصل پلاستیک

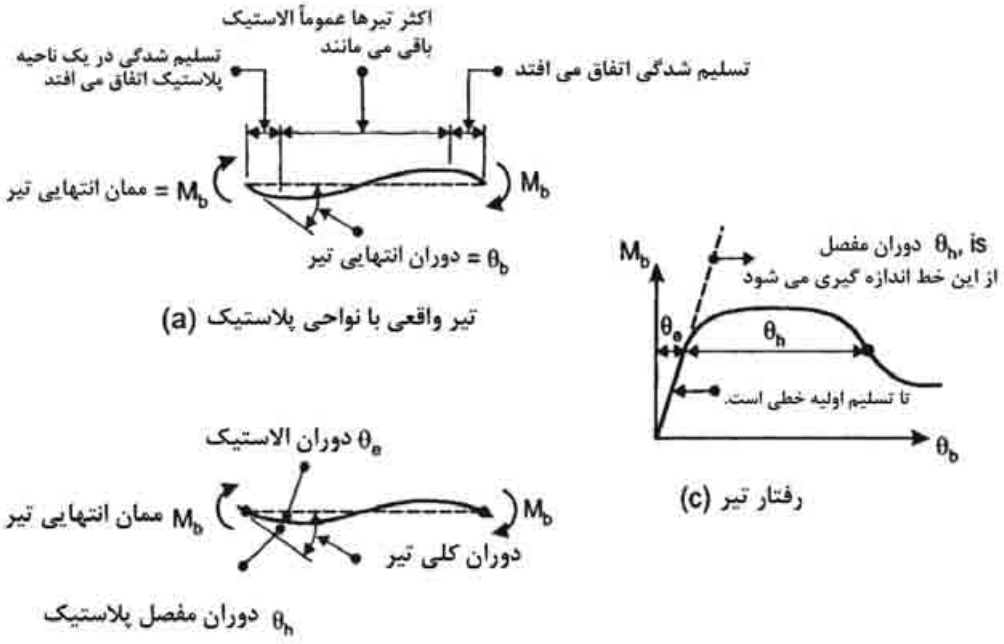
در اینجا، مثالی از روش تحلیل ظرفیت تغییرشکلی ارائه می شود. رفتار غیرالاستیک تیر تحت خمش را معمولاً می توان با استفاده از مفاصل پلاستیک مدل نمود (شکل ۸-۱).



شکل ۸-۱ مفصل پلاستیک

در اینجا، المان تیر به صورت تیر الاستیک با مفاصل پلاستیک انتهایی مدل می شود. مفصل پلاستیک در ابتدا صلب می‌باشد و پس از تسلیم شدن، شروع به دوران می کند. 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.

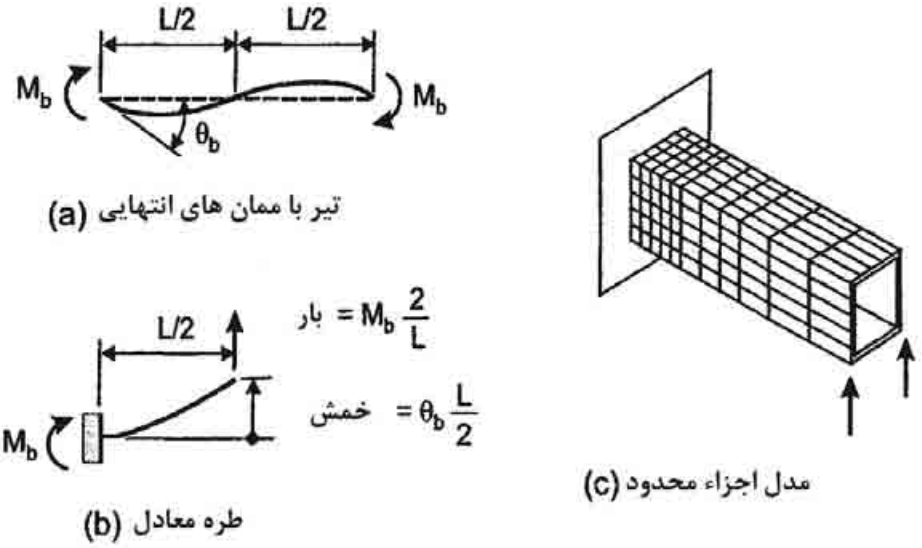
زمانیکه یک المان تیر غیرالاستیک با استفاده از مفاصل پلاستیک مدل گردد، فرض می شود که تمام تغییرشکل های غیرالاستیک در مفصل تیر متمرکز شده و بخش های دیگر تیر به صورت غیرالاستیک باقی بمانند. با توجه به اینکه رفتار غیرالاستیک در تیرهای واقعی معمولاً در یک طول مشخصی از تیر گسترده می شود، فرض وجود مفصل پلاستیک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



شکل ۹-۱ تیر ارتجاعی و دوران مفصل

شکل (۹-۱) تیری با دو لنگر انتهایی برابر و مختلف الجهت 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 می‌تواند 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 می‌باشد 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 می‌باشد. 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 می‌باشد، را نشان می دهد.



شکل ۱-۱۰ تخمین مشخصات مفصل پلاستیک از طریق تحلیل سازه

برای محاسبه‌ی مقاومت خمشی المان تیر، باید تسلیم شدگی فولاد در ناحیه‌ی مفصل در نظر گرفته شود. نکته‌ی مهم‌تر این است که حد شکل پذیری برای المان تیر معمولاً توسط کمانش موضعی مقطع فولادی تعیین می گردد. بنابراین، المان ها باید قادر باشند تا رفتار غیرالاستیک هندسی را در نظر بگیرند. رفتار کمانشی می‌تواند به ناکاملی‌های هندسی (مثلاً تغییر در ضخامت ورق‌ها و اعوجاج‌های موضعی ناشی از جوشکاری اتصالات انتهایی) وابستگی داشته باشد. روابط تنش و کرنش برای مصالح فولادی ممکن است دارای عدم قطعیت باشد و از نقطه‌ای به نقطه‌ی دیگر روی تیر، تغییر نماید.

این مثال، یک تحلیل ظرفیت می‌باشد که در آن تحلیل سازه به عنوان جایگزینی برای انجام آزمایش استفاده می شود. هر چند سازه‌ی مورد بررسی می‌تواند کوچک باشد، اما تهیه‌ی مدل غیرخطی برای انجام یک تحلیل دقیق کار مشکل و پیچیده‌ای است، به ویژه اگر بنا باشد تغییرشکل های چرخه‌ای در نظر گرفته شود، کار مشکل‌تر می گردد.

فصل ۲

مدل تحلیلی چیست؟

زمانی که سازه‌ای تحلیل می‌شود، در واقع نه خود سازه، بلکه مدل آن سازه تحلیل می‌شود. این نکته هرچند بدیهی به نظر می‌رسد، اما می‌تواند به آسانی از نظر دور نگاه داشته شود. برای تحلیل یک سازه‌ی کامل، تقریباً همواره مدل المان-گره یا مدل اجزاء محدود مورد استفاده قرار می‌گیرند. این نوع مدل سازه‌ای، شامل تعدادی از گره‌ها و المان ها می‌شود. در این فصل نگاهی بر این نوع از مدل سازه‌ای خواهیم داشت.

به منظور تعیین مشخصات المان ها در یک مدل المان-گره، معمولاً از مدل های پیوسته، استفاده می‌شود. در این فصل، نگاه مختصری بر این نوع از مدل سازه‌ای نیز خواهیم داشت.

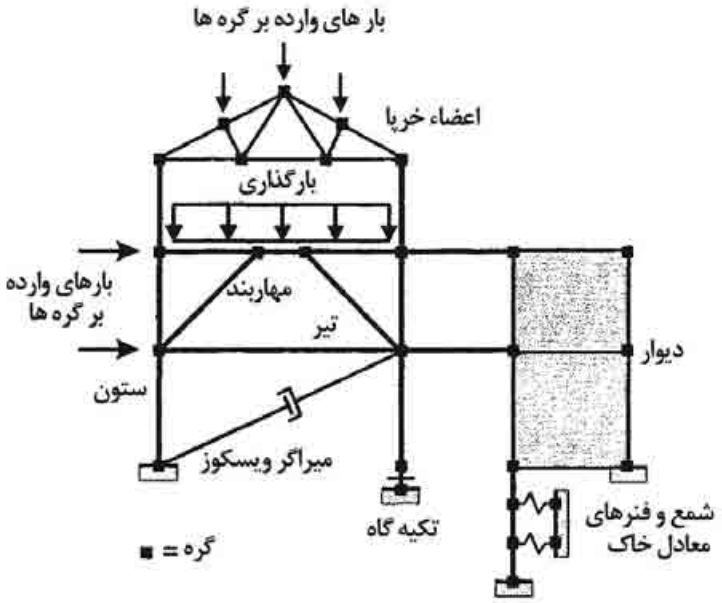
۲-۱ سازه‌ی واقعی و مدل سازه‌ای

باید همواره در ذهن داشت که مدل سازه‌ای تقریبی از رفتار سازه‌ی واقعی را ارائه می‌کند که شاید تقریب چندان دقیقی هم نباشد. انتظاری که از یک مدل تحلیلی وجود دارد این است که با صرف نظر کردن از جزئیات ریز، جنبه‌های مهم رفتار سازه را نشان دهد.

۲-۲ دو نوع مدل سازه‌ای

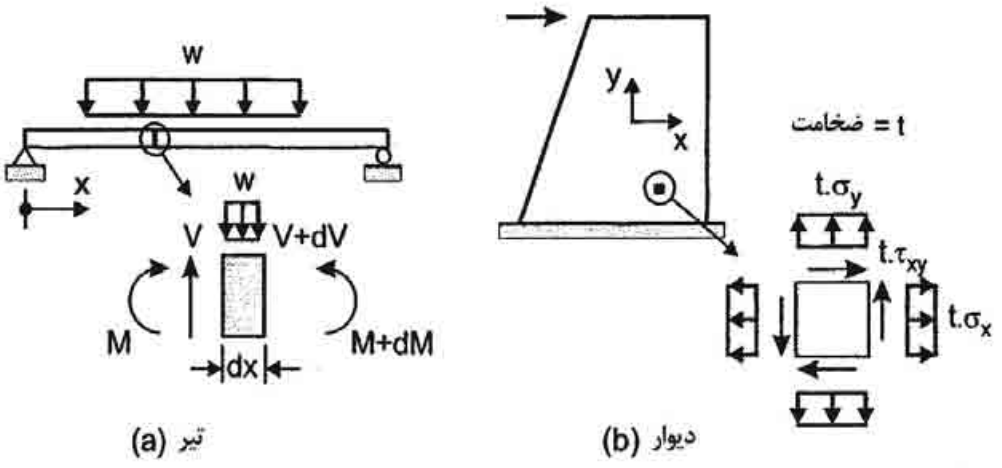
دو نوع مختلف برای مدل سازه وجود دارد: ۱) مدل اجزاء محدود که شامل تعدادی از المان ها با اندازه‌ی محدود می‌باشد و ۲) مدل پیوسته که شامل تعداد نامحدودی از المان های بسیار کوچک می‌باشد. در مدل های اجزاء محدود، المان ها در تعداد محدودی از گره‌ها به هم متصل می‌شوند. در این کتاب، این نوع مدل سازه‌ای به دقت مورد بررسی قرار گرفته و تحت عنوان (مدل المان-گره) از آن یاد خواهد شد.

در مدل های پیوسته، المان ها به شکل مستقیم و بدون گره به هم متصل می‌شوند. در شکل (۲-۱) یک مدل المان-گره نشان داده شده است که شامل چندین نوع المان می‌باشد. این مثال در حقیقت یک مثال ساختگی می‌باشد و مدل های واقعی به صورت ۳ بعدی و بسیار بزرگتر می‌باشند.



شکل ۲-۱ مدل المان-گره

در شکل (۲-۲) برخی از انواع مدل های پیوسته نشان داده شده است.



شکل ۲-۲ مدل های پیوسته

در شکل (۲-۲- الف)، هر یک از المان ها طول بسیار محدودی از تیری می‌باشد که تحت لنگرهای خمشی و نیروهای برشی و بارهای خارجی احتمالی قرار دارد. در شکل (۲-۲ ب)، هر المان، حجم محدودی از مصالح می‌باشد که تحت تأثیر تنش‌های نرمال و برشی و بارهای خارجی احتمالی (مثلاً وزن خود المان) قرار دارند.

بخش‌های زیر توصیف‌کننده‌ی مدل المان-گره و مدل های پیوسته می‌باشند.

۲-۳ مشخصات مدل المان- گره

مشخصه‌های اصلی مدل المان-گره شامل موارد زیر است:

۱- گره‌ها به شکل صلب بوده و به صورت نقاطی از فضا می‌باشند. اصولاً نقطه می‌تواند ابعاد محدودی داشته باشد، اما معمولاً موضوعیت ندارد.

۲- المان ها به صورت شکل‌پذیر می‌باشند و می‌توانند به صورت یک‌بعدی، دوبعدی و سه‌بعدی بوده و یا دارای بعد صفر باشند. یک المان می‌تواند دارای طولی برابر صفر بوده و شکل‌پذیر هم باشد. گرچه این نکته از لحاظ فیزیکی امکان‌پذیر نیست، اما از لحاظ ریاضی ممکن است.

۳- گره‌ها می‌توانند به صورت اجسام صلب تغییرمکان دهند. تغییرمکان ها می‌توانند به شکل جابجایی یا دوران باشند. تغییرمکان ها در بیشتر گره‌ها، در ابتدا نامعلوم می‌باشند. تغییرمکان ها در برخی گره‌ها (معمولاً گره‌های تکیه‌گاهی)، می‌توانند معمولاً دارای مقادیر مشخص باشند، اما ضرورتاً مقدار آن برابر صفر نخواهد بود.

۴- المان ها به شیوه‌های مختلف تغییرشکل می‌دهند. تمام تغییرشکل سازه در المان ها شروع می‌شود. همچنان، المان ها می‌توانند تغییرمکان هایی به صورت جسم صلب داشته باشند. به طور کلی، یک المان می‌تواند تغییرمکان و تغییرشکل داشته باشد. به عنوان مثال، یک المان میله‌ی خرپایی می‌تواند تغییرطول داشته باشد، تغییرمکان دهد و دوران نیز داشته باشد.

۵- نیرو می‌تواند بر گره به سه طریق اعمال شود: ۱) بارهای خارجی ، ۲) نیروهای مقیدکننده‌ی خارجی (عکس‌العمل‌های تکیه‌گاهی) و ۳) نیروهای داخلی اعمال شده بر گره، توسط المان های متصل به آن گره. عبارت (نیرو) دربرگیرنده‌ی لنگرهای خمشی نیز می‌باشد.

۶- دو نوع نیرو می‌تواند روی المان تأثیرگذار باشد: ۱) نیروهای خارجی اعمال شده به المان (بارهای المان که معمولاً می‌توانند در هر مکانی به المان اعمال شوند) و ۲) نیروهای داخلی اعمال شده از طرف گره‌ها به المان هایی که به آنها متصل است، که این نیرو به انتهای المان وارد می‌شود (نقاطی که المان به گره‌ها متصل می‌شود). برای یک المان برای یک المان میله‌ای یا المان تیر، دو گره انتهای عضو واقعاً انتهای

عضو هستند. برای یک المان سطحی دوبعدی یا المان توپر سه‌بعدی، نقاط انتهایی جایی هستند که به گره‌های مجاور متصل هستند. در حقیقت، هیچ تماس المان به المان مستقیم یا انتقال نیرو وجود ندارد.

۷- هر گره و المان باید به عنوان یک جسم آزاد، در تعادل باشد. به علاوه، نیروهای اعمال شده توسط یک گره بر المان متصل به آن، باید هم‌اندازه و در جهت مخالف با نیرویی باشد که توسط المان به گره وارد می‌شود. به این موارد، شرایط تعادل گفته می‌شود.

۸- نباید هیچ گونه شکاف و هم‌پوشانی در انتهای المان ها وجود نداشته باشد. این بدان معناست که تغییرشکل ها و تغییرمکان های هر المان باید به نحوی باشد که المان دقیقاً بین گره‌های متصل شده‌ی آن جای بگیرد (فیت شود). به این مورد، شرط سازگاری اطلاق می گردد. این شرایط به هیچ عنوان از وجود شکاف‌ها یا هم‌پوشانی‌ها در طول مرز المان های دوبعدی و سه‌بعدی ممانعت نمی‌کنند. در ادامه توضیحات بیشتری ارائه خواهد شد.

۹- رابطه‌ی نیرو-تغییرمکان باید برای هر المان مشخص باشد. رابطه‌ی نیرو-تغییرمکان برای یک المان، اساساً رابطه‌ی بین نیروهای وارد بر انتهای المان و تغییرمکان های انتهایی متناظر آن، در المان می‌باشد، خواه این روابط در فرم سختی یا در فرم انعطاف‌پذیری باشد.

۱۰- زمانی که دو انتهای المان ثابت بوده و المان دارای بارهای المانی باشد، برای محاسبه‌ی نیروهای انتهایی المان، می‌توان از روش هایی استفاده نمود. به این نیروها، (نیروهای انتهای ثابت) گفته می‌شود که معمولاً به صورت نیروهای اعمالی بر المان، بیان می‌شوند. نیروهای گرهی از لحاظ مقدار برابر نیروهای المان و از لحاظ جهت، در خلاف جهت نیروهای وارد بر المان هستند.

مشخصات مدل سازه‌ای، شامل موقعیت گره‌ها، المان ها، روابط نیرو-تغییرمکان، بارها و غیره، همگی باید توسط مهندس محاسب انجام‌دهنده‌ی تحلیل مشخص گردد. در برخی موارد، توصیه‌هایی برای این موارد ارائه شده است، اما اغلب موضوعیت ندارد. در برخی از موارد، مشخصات می‌توانند توسط یک برنامه‌ی کامپیوتری تولید شوند که این امر بدین معناست که توسط یک برنامه‌نویسی کامپیوتری مشخص می‌شوند.

با داشتن مدل تحلیل مناسب، تحلیل سازه برای محاسبه‌ی تغییرمکان های گرهی، تغییرشکل های المان ها، نیروهای المان ها و عکس‌العمل‌های تکیه گاهی، استفاده می‌شود. روش تحلیل باید این اطمینان را حاصل نماید که شرایط سازگاری و تعادل همواره برقرار باشند (البته، نه به صورت کاملاً دقیق، بلکه با دقت مناسب برای اهداف کاربردی). در عمل، روشی که تقریباً همواره مورد استفاده است، روش سختی مستقیم می‌باشد. مشخصه‌های اصلی این روش در ادامه شرح داده خواهد شد.

عبارت مدل اجزاء محدود، معمولاً اشاره به مدل های دوبعدی و سه‌بعدی اشاره دارد. المان های خطی یک‌بعدی برای خرپاها و قاب‌ها، معمولاً تحت عنوان (المان) خطاب می گردند. تفاوت بین آنها جزئی است. همچنین عبارات (مدل اجزاء محدود) و (مدل المان-گره) را می توان به جای هم به کار گرفت. در این کتاب، از عبارت (مدل المان-گره) استفاده گردیده است.

۲-۴ برخی از انواع المان های سازه‌ای

انواع مختلف و نامحدودی از المان های سازه‌ای وجود دارد. برخی از انواع معمول المان های سازه‌ای در زیر آمده است:

۱- المان میله‌ای ساده، این المان با دو گره انتهایی همراه است و دارای سختی محوری بوده و فاقد سختی خمشی می‌باشد.

۲- المان قابی، که دارای سختی محوری، خمشی و پیچشی بوده و برای مدلسازی تیرها و ستون‌ها به کار می‌رود. این المان به صورت خطی و همراه با دو گره می‌باشد.

۳- المان غشایی (*Membrane element*) دوبعدی، که تحت تنش‌های درون‌صفحه‌ای قرار می‌گیرد. این المان از نوع صفحه‌ای بوده و تنها آثار درون‌صفحه‌ای در آن لحاظ می‌شود. المان مثلثی، حداقل دارای سه گره و المان چهاروجهی حداقل دارای چهار گره در گوشه‌ها می‌باشند. برخی از المان ها ممکن است دارای گره‌های اضافی در لبه‌ها یا نواحی داخلی المان باشند.

۴- المان های توپر (*Solid element*) سه‌بعدی، یک المان چهاروجهی حداقل چهار گره دارد. همچنین، هر المان مکعبی حداقل هشت گره دارد. توجه داریم که ممکن است تعداد گره‌ها بیش از مقادیر حداقل باشد که دلیل آن امکان وجود گره‌های داخلی در المان است.

۵- المان پوسته ای *(shell element)*، این المان دارای سختی پوسته‌ای درون‌صفحه‌ای و سختی خمشی برون‌صفحه‌ای می‌باشد. در حقیقت، این المان شبیه به المان پوسته‌ای به علاوه‌ی سختی خمشی برون‌صفحه‌ای می‌باشد. از طرف دیگر، می‌توان این المان را حالت خاصی از المان توپر سه‌بعدی نیز در نظر گرفت. هر المان مثلثی حداقل سه گره و هر المان چهارضلعی دارای حداقل چهار گره خواهد بود.

۶- المان فنر تکیه‌گاهی، که دارای حداکثر سه مؤلفه‌ی سختی انتقالی و سه مؤلفه‌ی سختی دورانی می‌باشد. این المان اصولاً به صورت المان تک گرهی می‌باشد.

۷- المان اتصال بی‌بعد *(zero-length element)*، که دارای دو گره می‌باشد که در یک مختصات یکسان قرار دارند.

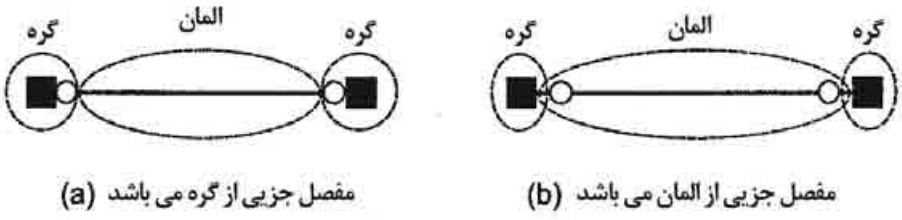
۲-۵ اتصال بین گره‌ها و المان ها

۲-۵-۱ نگاه کلی

در مدل های المان-گره، المان ها تنها در گره‌ها به هم متصل می‌شوند و انتهای المان ها دارای تغییرمکان هایی برابر با تغییرمکان های گره‌ها می‌باشند. طبیعت مدل المان-گره طوری است که نیازمند دقت کافی در مدلسازی می باشند.

۲-۵-۲ اتصالات مربوط به المان های میله‌ای

المان های میله‌ای معمولی تنها بارهای محوری را تحمل می‌کنند و هیچ گونه لنگر خمشی و نیروی برشی در آنها وجود ندارد. به بیان دیگر می‌توان ابراز داشت که این المان تنها دارای سختی محوری بوده و سختی خمشی آن برابر صفر است. به عبارت دیگر، المان میله‌ای با اتصالات مفصلی به گره‌ها متصل می‌شود، طوری که لنگر خمشی در دو انتهای المان، برابر صفر باشد (شکل ۲-۳ ملاحظه شود).



شکل ۲-۳ اتصال مفصلی به گره

در شکل ۲-۳ الف، مفصل بخشی از گره می‌باشد. البته این ایده‌ی خوبی نیست، زیرا باعث می‌شود که گره ، پیچیدگی بیشتری داشته باشد. راه صحیح تر این است که مفصل را به صورتی بخشی از المان تعریف کنیم (شکل ۲-۳ ب). این بدان معناست که گره همچنان به صورت یک جسم صلب ساده باقی خواهد ماند.

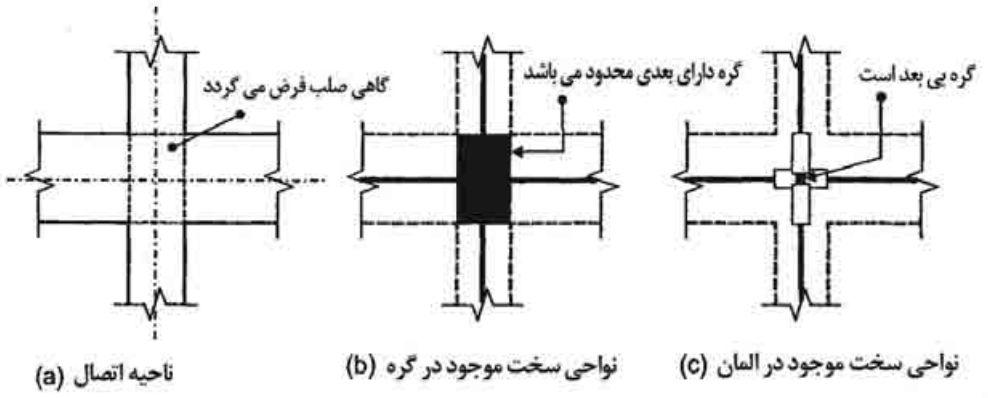
زمانی که از مفاصل استفاده می‌شود، المان میله‌ای می‌تواند دارای سختی خمشی غیرصفر باشد، به طوری که در فشار دچار کمانش نشود. دو انتها المان، محلی هستند که المان به گره متصل می‌شود و در بیرون مفصل قرار دارد. تغییرمکان های انتهایی میله برابر تغییرمکان های گرهی می‌باشد، که می‌تواند دارای درجات آزادی انتقالی و دورانی باشد.

معمولاً فرض می‌شود که لنگر دو انتهای المان میله‌ای برابر صفر باشد، در حالی که در سازه‌های واقعی، بیشتر المان های میله‌ای دارای نوعی از اتصالات انتهایی خواهند بود که می‌تواند لنگر خمشی قابل توجهی را انتقال دهد.

در شکل ۲-۳ المان میله‌ای در فضای دوبعدی نشان داده شده است. در فضای سه‌بعدی، لنگرهای پیچشی نیز وجود دارد. می‌توان سختی پیچشی را با قرار دادن یک مفصل پیچشی در المان، برابر صفر قرار داد. در این حالت، باید صرفاً از یک مفصل پیچشی استفاده نمود، زیرا با وجود دو مفصل پیچشی در دو انتها، طول بین دو مفصل می‌تواند آزادانه حول محور طولی بچرخد. این امر به معنای ناپایداری المان میله‌ای خواهد بود. راه دیگر برای حذف مفصل پیچشی می‌تواند این باشد که سختی پیچشی را برابر صفر قرار دهیم.

۲-۵-۳ نواحی صلب انتهایی

در این کتاب فرض شده است که گره‌ها به صورت نقاطی در فضا با بعد صفر می‌باشند. این فرض، یک فرض ضروری نیست. اگر گره‌ها دارای ابعاد محدود باشند، پیچیدگی‌های زیادی می‌تواند وجود داشته باشد. ساده‌تر این است که با گره‌ها مانند نقطه برخورد شود. این عامل می‌تواند تأثیراتی بر مدلسازی اتصالات المان-المان در سازه داشته باشد. برای مثال شکل (۲-۴-الف) اتصال بین یک تیر و یک ستون در یک قاب را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۴ اتصال بین تیر و ستون

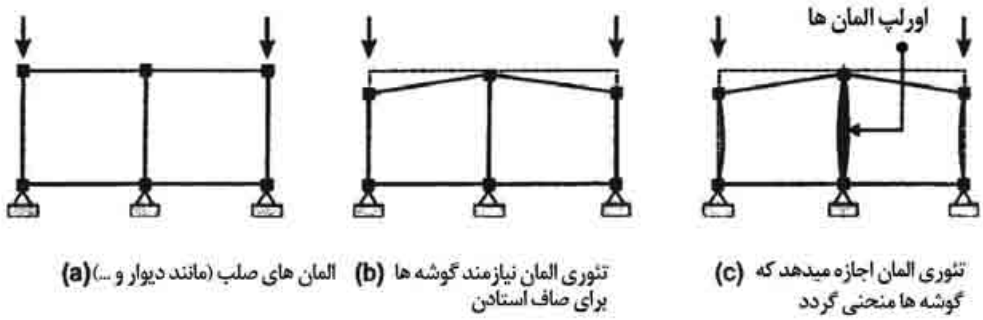
معمولاً در عمل فرض می‌شود که تغییرشکل های خمشی در ناحیه‌ی اتصال، بسیار کوچکتر از مقادیر مربوط به تیرها و ستون‌های مجاور می‌باشد. اغلب از فرض ناحیه‌ی اتصال صلب استفاده می‌شود. این فرض می‌تواند ترغیب کننده‌ی این مطلب باشد که در اتصالات تیر به ستون، بعد محدودی برای گره‌ها در نظر گرفته شود (شکل۲-۴-ب ملاحظه شود). همانطور که ذکر شد، این ایده‌ی مناسبی نیست، زیرا پیچیدگی‌های زیادی را وارد مدلسازی می‌کند. راه ساده‌تر و منطقی‌تر این است که فرض ناحیه‌ی صلب اتصال، با فرض نواحی صلب انتهایی در مدل های المان های تیر و ستون وارد شود (شکل ۲-۴ ج).

یکی از مزایای افزودن نواحی صلب انتهایی به المان این است که تنها با ایجاد یک تغییر کوچک اجازه داده می‌شود که قدری انعطاف پذیری در نواحی انتهایی وجود داشته باشد. این امر با مدل کردن نواحی انتهایی به صورت قطعاتی که بسیار سخت و شکل‌پذیر هستند، انجام می‌شود. این روش واقعی‌تر است، زیرا تغییرشکل های قابل ملاحظه‌ای در نواحی اتصال وجود خواهد داشت.

۲-۶ شکاف‌ها و هم‌پوشانی‌های بین المان ها

۲-۶-۱ المان های صفحه‌ای

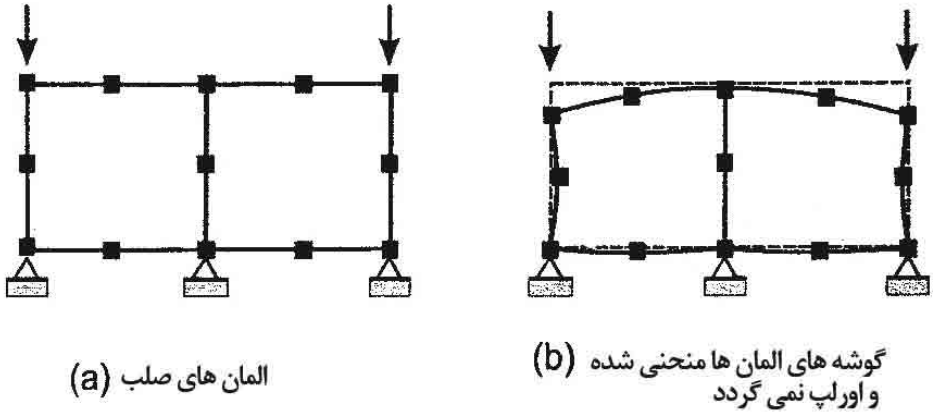
زمانی که از المان های صفحه‌ای برای مدلسازی اجزاء سازه‌ای نظیر دال ها و دیوارها استفاده می‌شود، المان دارای شکل چهارضلعی می‌باشد (شکل ۲-۵ الف)



شکل ۲-۵ شکاف‌ها و هم‌پوشانی‌های بین المان ها

المان ها صرفاً در گره‌ها به هم متصل می‌شوند و هیچ گونه اتصال المان به المانی در طول لبه‌ها و بین گره‌ها، وجود ندارد. در برخی موارد، برای تخصیص مشخصاتی از المان که تضمین کننده‌ی پیوستگی آن باشد، از تئوری‌هایی استفاده می‌شود. برای مثال، اگر تئوری المان الزام دارد که لبه‌های المان به صورت مستقیم باقی بماند، زمانی که المان های مجاور تغییرشکل می‌دهند، بین المان های مجاور در تمام نقاط پیوستگی وجود خواهد داشت (شکل ۲-۵ ب).

هر چند اگر تئوری المان این امکان را بدهد که لبه‌های المان به صورت منحنی در آید، می‌توان شکاف‌ها یا هم‌پوشانی‌هایی را در طول لبه‌های المان های مجاور را فرض نمود و شرط پیوستگی معمولاً ارضاء نمی‌شود (شکل ۲-۵ ج). این مورد لزوماً ناخوشایند نیست، چرا که گاهی با آزاد کردن بخشی از ملزومات پیوستگی می‌توان به دقت بالاتری دست یافت. شکل (۲-۶ الف) المان های مستطیلی با تعداد نقاط بیشتر را نشان می‌دهد. زمانی که المان هایی از این نوع، تغییرشکل می‌دهند، لبه‌ها می‌توانند دارای انحناء بوده و همزمان شرایط پیوستگی را ارضاء کنند (شکل ۲-۶-ب).



شکل ۲-۶ المان هایی با درجه‌ی بالاتر این امکان را می‌دهند که لبه‌ها هم‌زمان با ارضای شرایط پیوستگی، دارای انحناء نیز باشند.

۲-۶-۲ تماس المان با المان

برای تمام انواع المان ها (شامل المان های تیرها و میله‌ها) در مدل المان-گره پایه، هیچ چیزی وجود ندارد که از همپوشانی المان ها ممانعت به عمل آورد. این مدل ها امکان می‌دهند که گره‌ها یا نقاط، دارای مختصات یکسانی در فضا باشند. اگر لازم باشد که از همپوشانی جلوگیری به عمل آید، معمولاً لازم می‌شود یک یا چند خط یا صفحه تعریف شود که تعریف کننده‌ی مرز بین اجزایی از سازه‌ای که نباید هم‌پوشانی کنند، باشند. معمولاً این صفحات توسط گره‌ها تعریف می‌شوند و گره‌های روی یک سطح بررسی می‌شوند تا معلوم شود آیا آنها در سطوح مجاور نفوذ می‌کنند یا خیر. در صورتی که این اتفاق بیفتد، مراحلی باید انجام شود تا با در نظر گرفتن نیروهای نرمال (تکیه گاهی) و نیروهای مماسی (اصطکاکی) از نفوذ در سطح مشترک، جلوگیری کند. این کار یک فرآیند پیچیده‌ی محاسباتی می‌باشد.

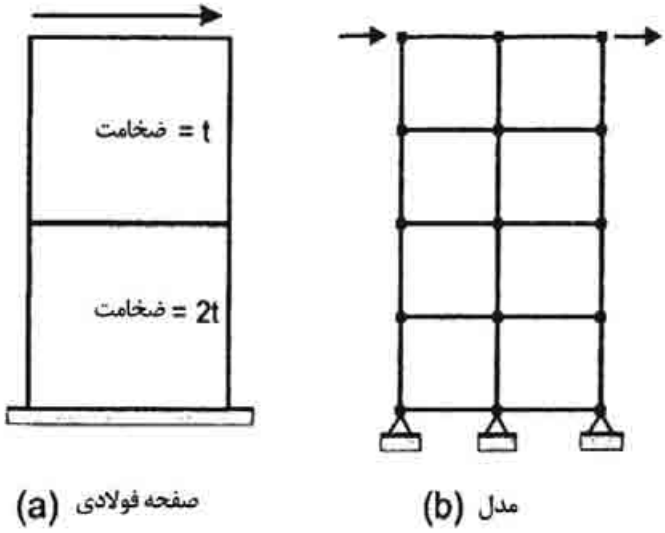
۲-۷ تعادل بین المان ها

۲-۷-۱ تعادل در مرزهای المان

در مدل های المان-گره، تعادل در صورتی ارضاء می‌شود که تمام موارد زیر ارضاء شود:

- هر یک از گره‌ها به صورت یک جسم آزاد در تعادل باشد.
- هر یک از المان ها به عنوان جسم آزاد در تعادل باشند.
- نیروهای اعمال شده توسط گره‌ها بر المان ها برابر و مختلف‌الجهت با نیروهای اعمال شده از طرف المان ها به گره‌ها باشند.

- در شکل (۲-۷ الف) یک صفحه‌ی فولادی نشان داده شده است که به صورت درون‌صفحه‌ای بارگذاری شده است. شکل (۲-۷ ب) یک مدل المان-گره با المان های صفحه‌ای را نشان می‌دهد. ضخامت صفحه در میانه‌ی ارتفاع تغییر می‌کند. فرض شود که ضخامت به صورت دفعی تغییر می‌کند، اگرچه در عمل، صفحات به هم جوش می‌شوند و تغییر سطح ناگهانی نیست. تنش‌های خمشی و برشی که دقیقاً زیر ارتفاع میانی قرار می‌گیرند، تنها نیمی از تنش‌هایی هستند که دقیقاً در بالای نیم‌ارتفاع قرار می‌گیرند.



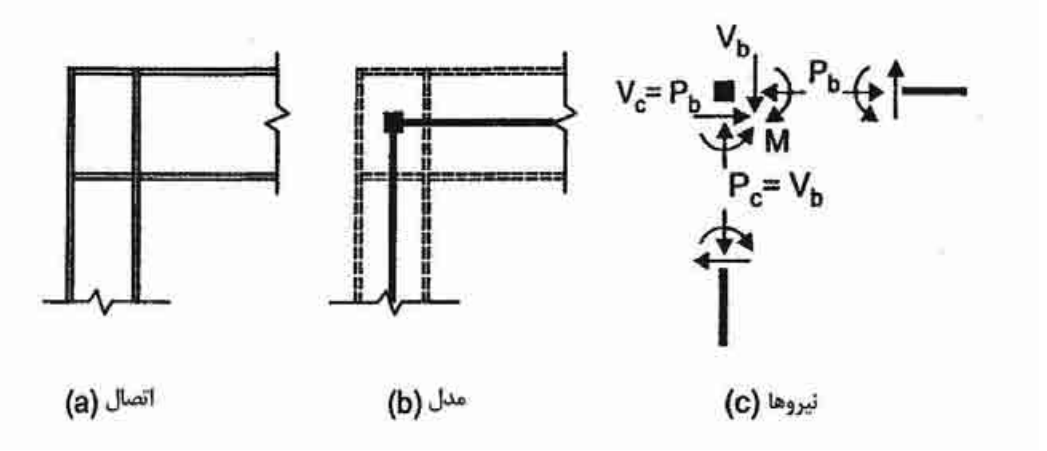
شکل ۲-۷ تعادل در مرزهای المان

در صفحه‌ی واقعی، تنش‌ها در طولی که تقریباً برابر ضخامت صفحه می‌باشد، تغییر می‌کنند (با پیروی از اصل سن ونان). در ارتفاع میانی، شرط تعادل الزام می‌دارد که تنش‌ها در هر دو سمت صفحه یکسان باشند. در مدل المان-گره، هر المان ضخامت ثابتی دارد و ضخامت صفحه به شکل دفعی در ارتفاع میانی آن تغییر می‌کند. تنش‌های برشی و خمشی در سطح مشترک اجزاء المان وجود خواهد داشت. هرچند، تنش‌ها در بالای المان پایینی متفاوت از مقادیر تنش‌های موجود در پایین المان بالایی خواهد بود. بدین سبب، هرچند این راه‌حل شرط تعادل را برای مدل المان-گره را ارضاء می‌کند، تعادل تنش در سطح مشترک ارضاء نمی‌شود.

در مدلی با المان های صفحه‌ای یا توپر، تعادل تنش ندرتاً در مرز بین المان ها ارضاء می‌شود. مثال بالا، به روشنی این موضوع را نشان می‌دهد. اما حتی اگر ضخامت صفحه ثابت باشد، تنش‌ها در مرز المان ها معمولاً با المان های مجاور یکسان نیستند. این بدان معنا نیست که تحلیل‌هایی که با استفاده از المان های

صفحه‌ای یا توپر انجام می‌شود، دقیق نیستند. برعکس، زمانی که از آنها به شکل صحیح استفاده شود، می‌توانند دقت بسیار زیادی برای اهداف کاربردی داشته باشند. در مثال بالا، یک تغییر ناگهانی در تنش از تغییری که طی فاصله‌ای برابر با ضخامت صفحه رخ می‌دهد، متفاوت نیست.

شکل (۲-۸-الف) اتصال بین یک تیر و ستون را در یک قاب فولادی نشان می‌دهد.



شکل ۲-۸ نیروهای اتصال

شکل (۲-۸-ب) یک گره و المان های تیر و ستون را برای حالتی که بارهای خارجی روی گره وجود ندارد،نشان می‌دهد. شکل (۲-۸-ج) نیروهای مؤثر بر گره را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه گره در تعادل قرار دارد، نیروی محوری تیر به نیروی برشی ستون تبدیل می‌شود و نیروی برشی تیر به نیروی محوری در ستون تبدیل می‌شود. در مدل المان-گره، گره نیروهایی را از تیر به ستون انتقال می‌دهد. این مدل مشخص نمی‌کند که نیروها چگونه از طریق گره انتقال می‌یابند. در مدل های المان-گره، گره‌ها نقاط صلبی هستند که می‌توانند هر نوع نیرویی را با هر اندازه‌ای، انتقال دهند. در یک قاب واقعی، نیروها از طریق اتصالات فیزیکی از تیر به ستون انتقال می‌یابد و چگونگی انتقال نیرو ممکن است چندان روشن نباشد.

برای مثال، تنش‌های برشی در تیر تبدیل به نیروی محوری در ستون می‌شود. برای اتصال فیزیکی، برای تعیین اینکه چگونه نیروها انتقال پیدا می‌کنند، فهم رفتار اتصال لازم است.

۲-۸ مدل گسسته با المان هایی با بعد محدود و المان های بی‌بعد

در این کتاب، مدل المان-گره دارای گره‌هایی می‌باشد که به شکل نقطه هستند و المان ها نیز دارای ابعاد معینی می‌باشند. برعکس این مدل، مدلی خواهد بود که المان ها دارای بعد صفر (اما همچنان انعطاف‌پذیر) باشند و گره‌ها دارای ابعاد محدودی باشند. این مدل ها می‌توانند پایه‌ای برای مدل های "المان های کاربردی" *(Applied elements)* باشند. در این نوع مدل، قاب می‌تواند با استفاده از قطعه‌ها صلب (یعنی

کاربردی" *(Applied elements)* باشند. در این نوع مدل، قاب می‌تواند با استفاده از قطعه‌ها صلب (یعنی گره‌ها) که توسط المان های شکل‌پذیر با طول صفر (مفاصل) به هم متصل شده‌اند، مدل شود (شکل ۲-۹). این نوع مدل سازه‌ای می‌تواند برای سازه‌هایی مفید باشد که تحت تغییرمکان های بزرگ قرار می‌گیرند، به طوری که بخش‌هایی از سازه با یکدیگر تماس می‌یابند. همانطور که قبلاً ذکر شد، برای در نظر گرفتن تماس دو سطح در یک مدل المان-گره معمولی، سطوحی باید تعریف شوند و تغییرمکان های گره‌های روی یک سطح، باید طوری بررسی گردند که مشخص شود آیا این نقاط در صفحه‌ی دیگر نفوذ می‌کنند با خیر.این مسئله در مدل "المان های کاربردی" متفاوت است. در این حالت، حرکات گره‌ها بررسی شده و تماس زمانی رخ می‌دهد که گرهی با گره دیگر هم‌پوشانی داشته باشد. در این حالت، گره‌ها به صورت اجسام صلب می‌باشند و روش های مناسبی برای حل مسئله‌ی اندرکنش وجود دارد.

شکل ۲-۹ مدل المان های کاربردی برای یک قاب

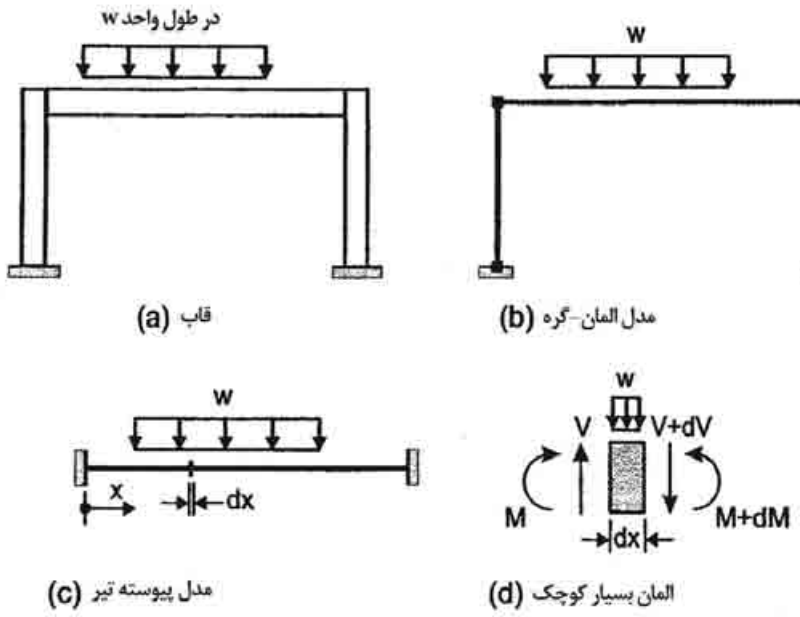
اشکال اساسی روش المان های کاربردی این است که تمام تغییرشکل ها در المان هایی با طول صفر که گره‌ها را به هم متصل می‌کنند، متمرکز می‌شوند و نشان دادن رفتار سازه صرفاً توسط المان هایی با طول صفر، مشکل است. به ویژه در مورد مدل قاب نشان داده شده در شکل (۲-۹)، نسبت به مدل المان-گره به تعداد گره‌ها و المان های بسیاری بیشتری نیاز خواهد بود.

۲-۹ مدل های پیوسته

۲-۹-۱ سازه‌های قابی

مدل های گسسته دارای تعداد مشخصی از المان هایی می‌باشد که در تعداد مشخصی از گره‌ها به یکدیگر متصل می‌شوند. در مدل های پیوسته، تعداد نامحدودی از المان های بسیار کوچک وجود دارند که مستقیماً و بدون استفاده از گره‌ها به هم متصل می گردند. این قاب می‌تواند به صورت یک جسم پیوسته‌ی تنها تحلیل شود، اما این کار رایج نیست. روش مرسوم این است که قاب به صورت مدل المان-گره و احتمالاً با

استفاده از سه المان (مطابق شکل ۲-۱۰ ب) تحلیل شود. مشخصات هر المان باید تعیین شود. برای این منظور، اصولاً از یک مدل پیوسته استفاده می‌شود. در اینجا، نیروهای تکیه‌گاهی باید در حالتی که بارهای خارجی اعمال شده و گره‌ها ثابت هستند، محاسبه شوند. این کار را می توان با استفاده از یک مدل پیوسته (مطابق شکل ۲-۱۰ ج) انجام داد. در شکل (۲-۱۰ د) یک المان بسیار محدود در این مدل نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۰ قاب ساده

نتایج تحلیل برای یک مدل پیوسته باید شرایط زیر را برآورده سازد:

۱) سازگاری هندسی (پیوستگی مصالح) باید ارضاء شود. این بدان معناست که تغییرشکل های المان باید با وضعیت تغییرشکل داده شده تیر سازگار بوده و هیچ گونه شکاف یا هم‌پوشانی بین المان ها وجود نداشته باشد. همچنین، در شکل (۲-۱۰ ج) تغییرمکان ها در دو انتهای تیر باید برابر صفر باشد.

۲) برای هر المان محدود، می‌بایست یک رابطه‌ی رفتاری (اساساً یک رابطه‌ی نیرو-تغییرشکل) برقرار باشد، که مرتبط کننده‌ی نیروهای وارد بر المان به تغییرشکل های آن می‌باشد. برای یک المان تیر، این رابطه به صورت رابطه‌ی لنگر-انحناء می‌باشد که می‌بایست در هر نقطه‌ای از طول تیر ارضاء گردد. اگر تغییرشکل های برشی قابل ملاحظه باشند، رابطه‌ی بین نیروی برشی و تغییرشکل برشی نیز مورد نیاز خواهد بود.

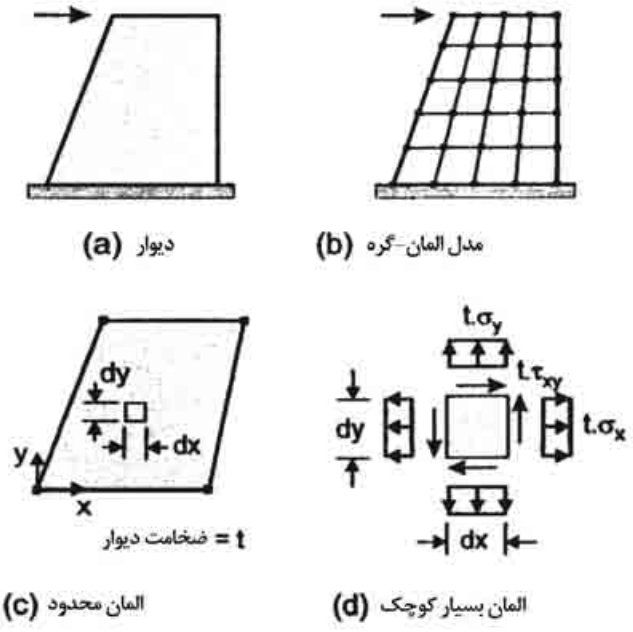
۳) هر المان محدود (که تحت نیروهای المان های مجاور به علاوه‌ی نیروهای خارجی قرار دارد) می‌بایست به عنوان یک جسم آزاد، در تعادل باشد. نیروهایی که المان های مجاور بر یکدیگر اعمال می‌کنند، باید برابر و مختلف‌الجهت باشند.

روش های تحلیلی مختلفی برای مدل های پیوسته‌ی تیرها وجود دارد که شامل (الف) ایجاد و حل یک معادله دیفرانسیل و (ب) روش لنگر-سطح، می‌باشد. جزئیات مربوطه را می‌تواند در کتب پایه‌ی مکانیک یافت.

قابل ذکر است که اگر تغییرشکل های برشی در تیرها برابر صفر فرض شوند، معقول به نظر می‌رسد که فرض شود سطوح صاف ، صاف باقی می‌مانند. بدین ترتیب، المان های محدود مجاور می‌توانند به طور دقیق بر هم جفت و جور شوند. هر چند، اگر کرنش‌های برشی بزرگ باشند، صفحات صاف به صورت صاف باقی نخواهند ماند و المان های مجاور نمی‌توانند به طور دقیق بر هم جفت و جور شوند. بدین ترتیب، شرایط سازگاری ممکن است به طور دقیق ارضاء نشود. هر یک از خطاهایی از این نوع، کوچک و قابل صرف نظر کردن هستند.

۲-۹-۲ دیوارهای سازه‌ای

به عنوان مثال دوم، شکل (۲-۱۱ الف) یک دیوار ساده را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۱ المان های محدود توپر در مدل های پیوسته

چنین دیواری می‌تواند با استفاده از یک مدل پیوسته، تحلیل شود، اما محتمل تر آن است که از یک مدل المان-گره استفاده شود که در آن از المان های محدود صفحه‌ای و توپر استفاده گردد (شکل ۲-۱۱ ب). مشخصات مربوط به هر یک از المان های محدود، با استفاده از یک مدل پیوسته به دست می‌آیند (شکل ۲-۱۱ج و شکل ۲-۱۱ د). برای یک المان محدود، شرایط سازگاری، روابط نیرو-تغییرشکل (یا تنش-کرنش) و روابط تعادل، باید در المان ارضاء شود. جزئیات انجام این کار در کتب اجزاء محدود ذکر گردیده است.

۲-۱۰ المان ها و اجزاء سازه‌ای

در بخش (۲-۴) چندین المان قابل استفاده معرفی شده‌اند. بعضی از المان ها می‌توانند صرفاً شامل یک جزء سازه‌ای باشند. برای مثال، المان میله‌ای می‌تواند شامل یک عضو میله‌ای تنها با سختی محوری و بدون سختی خمشی باشد. هرچند، المان میله‌ای می‌تواند دارای سه عضو باشد که شامل یک عضو میله‌ای با سختی محوری و سختی خمشی به علاوه‌ی دو عضو مفصلی در هر انتهای آن باشند (شکل ۲-۳ ب). به طریق مشابه، المان تیر می‌تواند در برگیرنده‌ی یک عضو ناحیه‌ی صلب انتهایی در هر انتها به همراه یک المان تیر انعطاف‌پذیر در بین آنها باشد. یک المان تیر پیچیده با نواحی انتهایی، اتصالات نیمه‌صلب انتهایی، سطح مقطع غیریکنواخت و رفتار غیرارتجاعی می‌تواند شامل چندین عضو از انواع مختلف باشد. در یک المان تیر با نواحی انتهایی و سطح مقطع یکنواخت بین آنها، تیر یکنواخت می‌تواند به عنوان یک مدل پیوسته با تعداد نامحدودی از اجزاء بسیار کوچک، در نظر گرفته شود.

در تمام این موارد، مشخصات المان توسط مشخصات اجزاء آن تعیین می‌شود. تئوری‌ها و روابط ریاضی زیادی وجود دارند که می‌توانند برای ترکیب مشخصات اجزاء سازه‌ای جهت رسیدن به مشخصات سازه‌ای هر المان خاص، استفاده شوند. این مباحث، خارج از بحث ماست. نکته‌ی مهم این است که مشخصات المان از مشخصات اجزاء آن به دست می‌آید.