

# نکاتی در تحلیل و طراحی سازه‌ها

دکتر محمود هریسچیان، فوق دکترای مهندسی سازه

استادیار مهندسی عمران دانشکده فنی دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب

امروزه تحلیل و طراحی سازه‌ها عمدتاً با استفاده از فناوری رایانه‌ای صورت می‌گیرد. اگر چه سرعت و سهولت در تعریف مدل‌های تحلیلی و اخذ جواب می‌تواند فرصت کنترل و بررسی جواب‌ها را محدود نماید، معهداً با توجه نمودن به نکات ذکر شده در این مقاله در جهت کسب اطمینان از درستی و مناسب و بجا بودن اطلاعات ورودی سازنده مدل و روش تحلیلی بکار گرفته شده، می‌توان از بروز خطاهایی که به راحتی پیش می‌آید اجتناب نمود. البته خطاهای بنیادی ناشی از قضاوت نامناسب مهندسی و تعبیر نامناسب واقعیت‌های فیزیکی سازه‌ای (واقعی) خارج از شمول بحث این مقاله می‌باشد.

## ۱- نرم‌افزارهای مورد استفاده

برای یک سازه "معمولی" استفاده از نرم‌افزارهایی مثل برنامه‌های STAAD.Pro، ETABS و SAP مناسب و کافی می‌باشد. بعضی از نرم‌افزارها مثل ANSYS امکانات بیشتری داشته و در عین حال سنگین‌تر می‌باشد. به لحاظ کاربری، نرم‌افزار ETABS برای یک ساختمان مسکونی (یا اداری، تجاری) قابل استفاده‌تر است. در صورتی که نرم‌افزاری مثل SAP برای تحلیل سازه‌های متنوع‌تری می‌تواند مفید باشد. به هر حال چون اصول و مبانی مورد استفاده در این نرم‌افزارها یکسان می‌باشد، علیرغم ظاهر متفاوت، در صورتی که کاربرد خاصی را پوشش دهند، با هم فرقی نخواهند داشت.

قبل از کاربری یک نرم‌افزار، باید با ویژگی‌های آن آشنا شد. در این مورد هدف اصلی از آشنایی، این نیست که به سرعت مدل ساخت و تحلیل نمود (گرچه چنین تسلطی نیز مفید است) بلکه منظور از آشنایی با یک نرم‌افزار عبارت است از آشنایی با اصول و مبانی بکار رفته در هر دستوری از نرم‌افزار.

لازم است روش‌های تحلیلی مورد نظر ابتدا در مورد چند مثال ساده امتحان شده و پس از کسب آشنایی با روش، شرایط تکیه گاهی ...، نوع بارگذاری، حالات بارگذاری... در مورد سازه‌های (پیچیده) بکار رود. برای مثال‌های حل شده می‌توان از مراجع مختلف تحلیل سازه‌ها کمک گرفت. در ضمن دستور کمک و راهنما (Help) که در آن کلیه دستورات برنامه شرح داده شده است، به‌طور معمول دارای پرونده‌ها و پوشه‌های زیر است:

- مثال‌هایی (Examples) از نحوه شروع کار با نرم‌افزار (برای مبتدیان)، امکانات مختلف نرم‌افزار مثل انواع تحلیل‌های استاتیکی، دینامیکی، بارهای فزاینده و...
- مثال‌های تأیید نرم‌افزار (Verification Examples) که جواب‌های مثال‌های خاصی از مراجع مختلف برگرفته و با جواب‌های مدل نظیر نرم‌افزار مقایسه شده است.
- مراجع نظری و یا استانداردهای مورد استناد نرم‌افزارها (گاهی بعضی از این مراجع نیز پیوست نرم‌افزار می‌باشد).

## ۲- پیش فرض‌های نرم‌افزارها

هر نرم‌افزاری در موارد متعددی بر مبنای پیش فرض‌هایی کار می‌کند که این پیش فرض‌ها (یا موارد قراردادی اولیه) بیشتر بر مبنای عرف و عادت رایج مهندسان کشور تهیه‌کننده نرم‌افزار، انتخاب شده است. برای نمونه نرم‌افزار SAP در مصالح فولادی مبنای فولاد قراردادی و یا پیش فرض را A36 که تا حدودی قوی‌تر از فولاد S235JR(ST37-2) می‌باشد منظور نموده است و کاربر باید از این فرض آگاه باشد.

در مثالی دیگر، در طراحی اعضاء یک سازه اسکلتی، نرم‌افزار، پارامترهای طراحی را به‌صورت ترکیبی از پیش فرض‌ها و داده‌های مدل در نظر گرفته و به نسبت تنش می‌رسد، در طراحی یک عضو، متغیرهای متعددی دخیل می‌باشد، همچون طول عضو (ضریب طول موثر...) طول آزاد بال فشاری و... طراح باید از تک‌تک متغیرها آگاه باشد. مثلاً ممکن است در شرایطی برای تیر داخل یک کف، در جایی که بال فشاری آن مقید است نرم‌افزار هیچ‌گونه قید جانبی منظور ننماید و یا مثلاً در شبیه‌سازی یک تیر لانه زنبوری، متغیرهای طراحی مناسب فرض شده است یا خیر؟

## ۳- تغییر شکل‌ها و تعادل نیروها

تعادل نیروهای وارد به سازه در شرایط مختلف، با استفاده از واکنش‌های تکیه گاهی، همیشه باید مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد. چنین تعادلی به سادگی می‌تواند بهم بخورد (در واقع در روش تحلیل، تعادل

همواره برقرار است ولی شرایطی غیر از شرایط مورد نظر می تواند ایجاد شود) و این حالت می تواند اثرات سوایی داشته باشد. در بررسی تعادل نیروها باید دقت داشت که بسیاری از نرم افزارها، واکنش های مربوط به انواع متفاوت تکیه گاه ها (مثلاً بدون نشست و تکیه گاه های فنی) را در یک صفحه (پنجره) واحد نشان نمی دهد و باید به این نکته توجه نموده و جداگانه مقدار هر یک و یا جمع آنها را دید.

در عین حال به تغییر شکل های سازه نیز باید توجه کافی داشت. از طرف دیگر حدود تغییر شکل و حدود نیرو، هر دو، مهم است.

#### ۴- کف های صلب و نیمه صلب

با امکانات نرم افزاری و سخت افزاری امروز به تعریف کف های صلب طبق تعریف آیین نامه ۲۸۰۰ و یا بررسی نیمه صلب بودن آن نیازی نیست. به راحتی می توان کف ها را با بریدگی ها و شکل های هندسی خاص خود در نظر گرفت. در این شبیه سازی به ابعاد و جهت تیرریزی ها و ضخامت دال (بتنی) روی تیرها باید توجه نمود. در یک مدل سه بعدی تغییر جهت تیرریزی، روی پخش بار (استاتیکی) و روی پخش جرم، که در تحلیل دینامیکی مورد استفاده قرار می گیرد تأثیر خواهد داشت. به این ترتیب در مدل سه بعدی خروج از محوری ها را، به صورت واقعی تری، می توان منظور نمود.

#### ۵- اجزای سازه ای مدل

چه اجزایی از سازه را باید در مدل منظور نمود؟ امکانات نرم افزاری و سخت افزاری، امروزه، بسیاری از محدودیت ها را از بین برده است. بنابراین شاید این تصور پیش آید که هر چه اجزای سازه ای بیشتر و یا حالت های بارگذاری بیشتر و... یا رفتارهای سازه ای پیچیده تری منظور شود بهتر خواهد بود. پیچیدگی مدل نباید چنان شود که اجزای فرعی بر اجزای اصلی سایه افکنده، مدل از کنترل خارج شده و امکان نتیجه گیری روشن تحلیل، خدشه دار شود. ممکن است در یک مدل سازی تحقیقاتی و یا بررسی های خاص، مدل های پیچیده ای در نظر گرفته شود ولی معمول پروژه های عادی نیست. چنانچه لازم باشد می توان از رده های متفاوتی از مدل ها استفاده نمود.

#### ۶- بررسی مدل

مدل باید تحت کنترل تحلیل گر باشد و به عبارت دیگر جنبه های مختلف مدل (که بهتر است به صورت نوشته / سیاهه / چک لیست "Check list" باشد) همچون هندسه، میزان بارها، حالات بارگذاری، تکیه گاهها

(انواع و محل آنها)، و... کنترل شود. به همین صورت جواب‌های مدل (خروجی‌ها) به صورت کامل باید بازبینی شود. بعضی از اشکالات را به سادگی می‌توان از تصاویر اولیه سازه و یا از تصاویر بعد از تحلیل (تغییر شکل یافته) دید. مثلاً اینکه، آیا تکیه گاهها سر جای خود قرار دارند و یا اعضا به هم متصل شده است یا خیر. ولی علاوه بر این اشکالات ظاهری، اشکالاتی نیز در تحلیل می‌تواند بروز نماید که از نوع "نهفته" است و با نگاهی سطحی نمی‌توان به وجود آنها پی برد. باید توجه شود که در بسیاری از موارد، این نوع اشکالات تأثیر گذاری جدی در جواب‌ها دارد.

## ۷- بررسی حساسیت‌ها

اگر چنانچه برخی از فرضیه‌های محاسبه، شفاف نباشد و به دلایل مختلفی مقادیر آنها امکان تغییر یابد، باید به جای اینکه تحلیل فقط برای میزان مشخص و معینی از متغیرها انجام یابد، برای محدود احتمالی از آنها صورت پذیرد. برای مثال، اگر سازه‌ای نسبت به نشست یک یا چند تکیه‌گاه حساس باشد، در آن مورد لازم است تحلیل حساسیت صورت گیرد تا از پیامدهای ناشی از میزان متفاوت نشست آگاه شد. یا مثالی دیگر، فرض تکیه‌گاه گیردار کامل و یا مفصلی کامل (که اغلب موارد به صورت ایده آل وجود خارجی ندارند) باعث ازدیاد نیروهای داخلی اعضا (و کمانش و یا کشش زیادی آنها) به ویژه در بارهایی مثل بارهای حرارتی و یا در مقابل حالت‌های بارگذاری زلزله خواهد شد، در صورتی که اگر، رهاسازی حتی جزئی تکیه‌گاهی نیز منظور شود، میزان تغییر شکل‌ها، نیروها و واکنش‌های تکیه‌گاهی تغییرات منطقی‌تر خواهد داشت.

## ۸- تحلیل با آخرین تغییرات

گاهی بر مبنای جواب‌های به دست آمده از تحلیل‌های (ابتدایی)، تحلیل‌گر تغییراتی در سازه اعمال می‌نماید. برای مثال مقاطع اعضا سبک و یا سنگین می‌شود و... اعمال چنین تغییراتی باعث تغییر شکل و یا در حالت کلی تغییر نیروی اجزا می‌شود. بنابراین لازم است پس از انجام تغییرات (جدی)، تحلیل دوباره‌ای از مدل صورت گیرد.

## ۹- مستندسازی تحلیل

کارکرد منظم و مستندسازی باید از اهم ویژگی‌های لازم یک تحلیل و یک تحلیل‌گر باشد. با انجام مستندسازی یک تحلیل و به ویژه انجام آن طبق یک روال و دستورالعمل جامع مشخص و معین از پیش تعیین شده (Check list)، به جرأت می‌توان گفت که، در یک سازه متعارف، امکان بروز اشکال در تحلیل محو

خواهد شد. این مستندات باید شامل اطلاعاتی از قبیل اسم تحلیل گر (و یا تحلیل گران)، مشخصات (شماره و تاریخ انتشار) نرم افزار ... و تاریخ انجام آخرین تغییرات در مدل... باشد. لازم است، پس از تأیید مدل، نسبت به "فصل نمودن" و یا "منجمدسازی" مدل اقدام شود و برای مثال در وسایل "فقط خواندنی - غیرقابل بازنویسی" حفظ شود.

## ۱۰- بازتاب تحلیل در نقشه‌ها

هدف نهایی بسیاری از تحلیل‌ها عبارت از اجرای سازه مدل است، و این کار از طریق نقشه‌ها به مهندس مجری می‌رسد. لازم است نقشه‌های (سازه‌ای) با فرضیه‌های مدل و جواب‌های مدل مقایسه گردیده و اطمینان حاصل شود که، ویژگی‌های اساسی مدل در آن بازتاب یافته و دچار خدشه نشده باشد. گرچه در نقشه‌ها به تحلیل (شماره و تاریخ مستندات تحلیل) فعلاً اشاره نمی‌شود ولی، انجام این امر بسیار مفید خواهد بود و حداقل لازم است این کار روی نسخه (شخصی) سخت‌افزاری و یا نرم‌افزاری مهندس طراح، منعکس گردد.

## ۱۱- ارائه مدل و جواب‌های تحلیل

جواب‌های کامل یک تحلیل (سازه‌ای) رایانه‌ای، برای یک سازه نه چندان پیچیده به راحتی به چند صد صفحه خواهد رسید. ارائه چاپی کامل چنین جواب‌هایی چندان مفید نبوده و باعث اتلاف وقت (و اتلاف کاغذ و مضر به محیط زیست!) خواهد شد. در صورت نیاز به ارائه کل جواب‌ها نیز، می‌توان آنها را به صورت نرم‌افزاری ارائه داد. در حالت کلی ارائه مدل و جواب‌های تحلیل باید طبق یک استاندارد و الگوی مشخص و معین باشد. در این مورد روش‌های زیر پیشنهاد می‌شود:

\* ارائه مدل تحلیلی نرم‌افزاری؛ از محاسن این روش این است که همه کلیات و جزئیات مدل قابل دسترسی خواهد بود و از اشکالات آنکه، در صورت در دسترس نبودن آن نرم‌افزار و یا انتشار خاصی که تحلیل با آن انجام گرفته است، باز کردن مدل ممکن نخواهد بود، در ضمن آشنایی به نرم‌افزار نیز لازم است.

\* ارائه فرضیه‌ها و جواب‌های کلیدی؛ از محاسن این روش وقت بر نبودن آن، لازم بودن آشنایی فرد (بیننده جواب‌ها) با اصول مهندسی سازه و اصول تحلیل است. از شرایط کافی بودن این روش، تعریف دقیق و مناسب "جواب‌ها و فرضیه‌های کلیدی" می‌باشد.

جواب‌ها بهتر است به صورت ترکیبی، توضیحاتی از نمودارها، تصاویر دوبعدی و یا سه بعدی، جداول و لیست‌ها، آمار ... حداکثرها (و یا حداقلها) و حتی المقدور به صورت نرم‌افزاری باشد. در مورد نمودارها و تصاویر باید دقت شود که برای مفید بودن آنها، لازم است معیار مقایسه‌ای به طور روشن همراه آنها ارائه شود.

برای تحلیل‌هایی مثل تاریخچه زمانی، تصویر "گام به گام" (و یا فیلم) تهیه شود و چنین امکاناتی در نرم‌افزارها میسر است.

## ۱۲- بازیابی

برای اطمینان از صحت مدل لازم است، در شرایط متفاوت (و بهتر است در زمانی دیگر) توسط تحلیل‌گر مورد بازیابی قرار گیرد. البته اگر بازیابی توسط شخص دیگری انجام گیرد می‌تواند بسیار مفیدتر و مؤثرتر باشد. در واقع انجام چنین امری در طرح‌های پیچیده و خاص یک ضرورت است. حتی در مواردی لازم خواهد بود که تحلیلی مجدد و مستقل انجام پذیرد. از بازیابی و یا بازیابی‌ها فقط آنهایی مؤثر تلقی گردد که مستند شده باشد (به صورت نرم‌افزاری و یا سخت‌افزاری) و گرنه، بازیابی مستند نشده، همانند انجام نیافتن آن است.