مهندسی عمران شریف، (زمستان ۱۳۹۵)
دوره‌ی ۲-۳۲، شماره‌ی ۴/۱، ص. ۸۱-۹۲

Original Article

آنالیز دقیق توالی ساخت و مقایسه‌ی آن با آنالیز متداول و روش تقریبی ضرایب اصلاح

علی خیرالدین (استاد)
مجید قلهکی* (دانشیار)
محمد جلیل‌زاده افشاری (دانشجوی دکتری)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

در تحلیل‌های متداول سازه‌یی، کل طبقات سازه با فرض عدم اعمال بار تا اتمام مراحل ساخت به طور هم‌زمان و یک‌باره تحت بارگذاری قرار می‌گیرند، در حالی که بارهای مرده ناشی از وزن سازه و کف‌سازی همگام با پیشرفت مراحل ساخت به تدریج به اعضاء ساخته‌شده در مراحل قبلی اعمال می‌شوند. طبقات پایین سازه تحت بارهای ثقلی مذکور، تغییرشکل می‌یابند و طبقات فوقانی، برروی سازه‌ی تغییرشکل یافته‌ی زیرین قرار می‌گیرند. تغییرشکل‌های نهایی سازه، از جمع کلیه‌ی تغییرشکل‌های رخداده در هر مرحله تا تکمیل نهایی سازه حاصل می‌شود. در این نوشتار، آنالیز دقیق توالی ساخت و محاسبه‌ی دستی آن به جهت آگاهی از نحوه‌ی عملکرد نرم‌افزار ETABS مورد بررسی قرار گرفته و میزان اختلاف نتایج با آنالیز متداول و روش‌های شبیه‌ساز رفتار واقعی سازه منطبق با مراحل عملی ساخت مانند روش ضرایب اصلاح، در قالب مطالعه‌ی موردی سازه‌ی فلزی ۲۱ طبقه مقایسه شده است. عدم لحاظ توالی ساخت در سازه‌ی مورد بررسی، موجب طرح غیراقتصادی تیرها و بادبندها شده است.

ali.kheyroddin@uta.edu
mgholhaki@semnan.ac.ir
m_jalilzadeh.afshari@yahoo.com

واژگان کلیدی: آنالیز مرحله‌یی توالی ساخت، آنالیز متداول، روش ضرایب اصلاح، کوتاه‌شدگی ستون.

۱. مقدمه

امروزه در تحلیل‌های متعارف سازه‌یی، کل طبقات سازه به طور هم‌زمان تحت اثر بارهای مرده و زنده قرار می‌گیرند. به‌عبارت دیگر، فرض بر این است که تا زمان اتمام مراحل ساخت، سازه تحت اثر هیچ‌بارگذاری قرار نمی‌گیرد. این مسئله در مورد بارهای جانبی نظیر باد و زلزله منطقی به نظر می‌رسد و حتی در مورد بارهای مرده ناشی از تجهیزات داخلی سازه نیز می‌توان شرایط بارگذاری فوق را پذیرفت. اما بارگذاری بارهای مرده ناشی از وزن مرده‌ی سازه و کف‌سازی به گونه‌ی دیگری است. زیرا این‌گونه بارها هم‌زمان با پیشرفت مراحل ساخت و مطابق با برنامه‌ی اجرایی سازه، به‌تدریج به اعضاء ساخته‌شده در مراحل قبلی اعمال می‌شوند، که این امر به نحوه‌ی ساخت سازه و ترتیبات اجرایی آن بستگی دارد. به‌عبارت دیگر، طبقات پایین سازه پیش از احداث طبقات بالا، در معرض بارهای مرده‌ی ناشی از وزن طبقات قرار گرفته و تغییرشکل‌های سازه در آنها به وقوع می‌پیوندد. در واقع سازه در هر مرحله از ساخت، برروی سازه‌ی تغییرشکل یافته‌ی زیرین ناشی از وزن مرده و کف‌سازی مرحله‌ی قبل قرار می‌گیرد. از این رو، تغییرشکل‌های نهایی سازه با فرض مراحل ساخت طبقه به طبقه از جمع کلیه‌ی تغییرشکل‌های رخداده در هر طبقه تا تکمیل نهایی سازه حاصل می‌شود.

از طرفی بر واضح است که بار مرده‌ی اعضاء اضافه‌شده به سازه طی مراحل ساخت، توسط همان بخشی از سازه که تا آن لحظه موجود است، تحمل می‌شود. بنابراین توزیع تنش‌ها و تغییرمکان‌های ناشی از بار اعضاء موجود در هر لحظه از ساخت سازه، مستقل از اندازه، خواص، و حضور بقیه‌ی اعضایی است که هنوز وارد مراحل ساخت نشده‌اند. عدم توجه به موضوع ذکرشده و نیز لحاظ‌کردن بازتوزیع نیروهای داخلی اعضاء ناشی از کوتاه‌شدگی تجمعی ستون‌ها، که اصولاً در یک تحلیل سنتی و یک‌باره‌ی کل سازه بدون درنظرگرفتن مراحل و توالی ساخت صورت می‌پذیرد، در موارد بسیاری منجر به بروز مشکلات قابل توجه در طراحی سازه‌ها بالاخص در سازه‌های بلندمرتبه می‌شود.

نتایج و تجربیات متعدد نشان می‌دهد که اصولاً سازه‌های بتنی به واسطه‌ی پدیده‌های خزش و جمع‌شدگی، در درازمدت تغییرشکل‌ها و یا حتی اضافه تنش‌های زیادی را متحمل می‌شوند. نتیجه‌ی این مسئله افزایش خیز تیرهای بتنی، گسترش ترک‌ها در نواحی کششی المان‌های بتنی، کوتاه‌شدگی فزاینده‌ی ستون‌ها، تغییرمکان‌های متفاوت اعضاء سازه‌یی افقی نظیر تیرها ناشی از تغییرشکل‌های محوری متفاوت اعضاء سازه‌یی مجاور که با گذشت زمان سیر صعودی دارند و بازپخش قابل توجه تنش در بین المان‌های سازه‌یی است. تمامی این پدیده‌ها به نوعی در تغییر رفتار سازه مستقیماً و یا غیرمستقیم دخالت دارند، که باید در قالب آنالیز توالی ساخت و بارگذاری

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۸/۱۳، اصلاحیه ۱۳۹۵/۷/۱۴، پذیرش ۱۳۹۵/۸/۸.

Archive of SID
www.SID.ir

مرحله به مرحله حین ساخت در طراحی ساختمان‌های بلندمرتبه مدنظر قرارگیرند.[۱-۶]

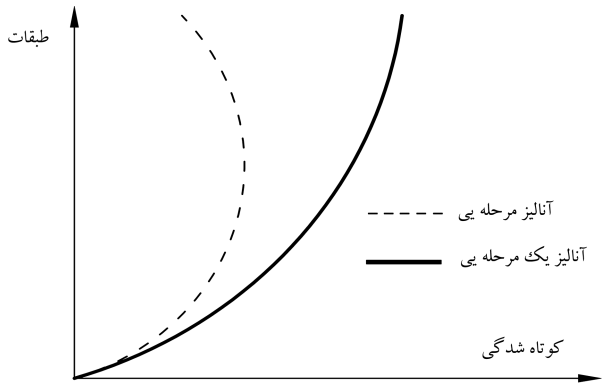
این پژوهش سعی در معرفی مفهوم توالی ساخت و نحوه‌ی اعمال آن در آنالیز سازه به منظور محاسبه‌ی دستی تغییرشکل‌های کشسان رخداده مطابق با مراحل عملی اجرا داشته و میزان اختلاف تغییرشکل‌ها و نیروهای داخلی اعضا ناشی از ۳ نوع آنالیز مرحله‌یی توالی ساخت و آنالیز متداول یک مرحله‌یی و آنالیز CFM [۱] (که از جمله روش‌های تحلیل رفتار واقعی سازه منطبق بر مراحل عملی اجراست) مقایسه شده است. با توجه به هدف ترسیم‌شده‌ی نوشتار حاضر، اهمیت آشنایی با تاریخچه‌ی پژوهش‌های مرتبط با موضوع مورد بررسی و روش‌های موجود مورد استفاده جهت چگونگی منظورکردن توالی ساخت در آنالیز آشکار است. از جمله مهم‌ترین این روش‌ها، روش آنالیز طبقه‌ی فعال و روش ضرایب اصلاح (CFM) هستند، که در ادامه به طور خلاصه مورد بررسی قرارگرفته‌اند.

۱.۱. آنالیز توالی ساخت با مفهوم آنالیز طبقه‌ی فعال

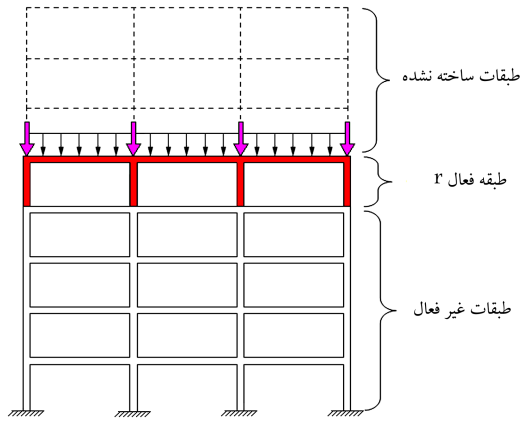
یکی از مهم‌ترین عواملی که عدم درنظرگرفتن آن در اثر طراحی متداول و یک مرحله‌یی کل سازه و غفلت از آنالیز مرحله به مرحله، موجب تفاوت فاحش در نتایج آنالیز شده است و باعث می‌شود که از ظرفیت سازه کاملاً استفاده نشود، مسئله‌ی کوتاه‌شدگی ستون‌هاست. ستون‌های بیرونی ساختمان تقریباً به میزان نصف ستون‌های داخلی باربری ثقلی دارند، لیکن در طراحی به جهت تحمل لنگرهای واژگونی ناشی از بارهای جانبی، سطح مقطعی برابر با ستون‌های داخلی خواهند داشت. این تفاوت قابل توجه در نسبت باربری ثقلی به سطح مقطع ستون‌های داخلی و خارجی، سبب بروز مقادیر متفاوتی از کوتاه‌شدگی در این ستون‌ها می‌شود و این تفاوت در میزان کوتاه‌شدگی منجر به ایجاد لنگرهای خمشی و نیروهای برشی در اعضاء متصل به ستون‌های ذکرشده می‌شوند.

در تحلیل متداول کلی سازه، بیشترین کوتاه‌شدگی تحت بار ثقلی به‌صورت تجمعی در طبقات فوقانی رخ می‌دهد و به‌تبع آن بیشترین لنگرهای خمشی و نیروهای برشی ناشی از این تفاوت در کوتاه‌شدگی ستون‌های مجاور نیز در تیرهای طبقات بالایی سازه مشاهده می‌شود. لیکن از آنجا که در عملیات واقعی اجرا و بالاخص در سازه‌های بتنی، طبقات در زمان اجرا و احداث خود (صرف‌نظر از تغییرشکل‌های وابسته به زمان رخداده در طبقات زیرین) در تراز موردنظر قالب‌بندی و اجرا می‌شوند، تغییرشکل‌های طبقات زیرین قابل صرف‌نظر کردن است و میزان کوتاه‌شدگی ستون‌ها و در پی آن لنگرها و برش‌ها ناشی از آن در تیرها نیز کمتر خواهد بود، به گونه‌یی که تفاوتی قابل توجه مابین لنگرها و نیروهای برشی تیرهای طبقه‌های فوقانی سازه‌ی تحلیل‌شده به روش متداول و روش تحلیل مرحله‌به مرحله به چشم خواهد خورد.

به‌طور کلی فارغ از سیستم سازه‌یی مورد بررسی، مقادیر کوتاه‌شدگی نسبی در اعضاء قائم در تحلیل یک مرحله‌یی، روندی رو به رشد در ارتفاع سازه دارد و این در حالی است که در تحلیل مرحله به مرحله و اعمال تدریجی بارها، از روند رو به رشد آن در ارتفاع به مراتب کاسته می‌شود و در طبقات میانی سازه، بیشترین مقدار خود را دارد و نهایتاً در طبقات بالایی سازه از روند نزولی تبعیت می‌کند و در طبقه‌ی انتهایی به مقدار بسیار کمتری در مقایسه با مقدار متناظر به دست‌آمده در تحلیل یک مرحله‌یی کلی مطابق شکل ۱ می‌رسد. در حقیقت در سازه‌ی تحلیل‌شده تحت بارگذاری تدریجی و مطابق با برنامه‌ی‌بارگذاری، مقدار تغییرمکان قائم سازه تحت بارهای ثقلی و در آخرین طبقه، تنها به تغییرمکان قائم ناشی از بارهای اعمال‌شده در همان طبقه منتهی می‌شود.



شکل ۱. کوتاه‌شدگی ستون‌ها تحت دو آنالیز مرحله به مرحله و یک مرحله‌یی.



شکل ۲. دسته‌بندی طبقات جهت مدل‌سازی در آنالیز مرحله به مرحله.

اصول روش آنالیز طبقه‌ی فعال بر مبنای سه مفهوم طبقه‌ی فعال[۲]، طبقه‌ی غیرفعال[۳] و طبقات ساخته‌نشده[۴] و روندی با جهت معکوس روند واقعی ساخت یعنی از بالا به پایین استوار است. در این روش، آنالیز طبقه‌ی فعال r گویای آن است که تحلیل طبقه‌ی r تحت اثر وزن همان طبقه و نیز بارهای ثقلی ستون‌های طبقه‌ی $r+1$ (ناشی از تحلیل مرحله‌ی قبل) جهت یافتن تغییرشکل‌های طبقه‌ی r و در پی آن نیروهای داخلی اعضاء و ستون‌های طبقه‌ی r جهت به‌کارگیری در مرحله‌ی بعد انجام و این در حالی است که طبقات غیرفعال بدون وزن در نظرگرفته شده و از تغییرشکل‌های وابسته به زمان رخداده در طبقات غیرفعال در تحلیل طبقه‌ی rاُم صرف‌نظر شده است.

به‌عبارت دیگر، در تحلیل طبقه‌ی rاُم، طبقات غیرفعال فقط حکم تکیه‌گاه‌های کشسان را برای طبقه‌ی فعال r بازی می‌کنند. فرض اساسی روش مذکور، یعنی صرف‌نظرکردن از تغییرشکل‌های رخداده در طبقات غیرفعال (طبقاتی که در عملیات اجرای واقعی طبیعتاً قبل از طبقه‌ی r ساخته شده‌اند) و بدون وزن، به جهت منظورکردن عدم دخالت این طبقات در آنالیز طبقه‌ی فعال باعث فراهم کردن امکان استقرار یک مدل تحلیلی طبقه به طبقه می‌شود، که به‌طور کاملاً مشخص شرایط لازم جهت اعمال آنالیز مرحله به مرحله‌ی واقعی در طراحی را مهیا می‌سازد (شکل ۲).

به‌عنوان مثال، در ابتدا طبقه‌ی فوقانی سازه (طبقه‌ی nاُم) به‌عنوان طبقه‌ی فعال شناخته می‌شود و از آنجا که طبقه‌یی روی آن قرار ندارد، فقط تحت اثر وزن خود تغییرشکل خواهد یافت و مابقی قاب، غیرفعال در نظرگرفته می‌شوند. پس از تحلیل و یافتن تغییرمکان‌ها و تغییرشکل‌های طبقه‌ی فعال n، نیروهای اعضاء و نهایتاً

Archive of SID
www.SID.ir

نیروهای ستون‌های آن طبقه محاسبه و جهت به‌کارگیری در مرحله‌ی بعد به‌عنوان بارهای اعمالی از طبقه‌ی بالا ذخیره می‌شوند. در این مرحله بلافاصله طبقه‌ی زیرین آن (طبقه‌ی $n-1$اُم) فعال می‌شود و تحت اثر وزن خود و نیروهای ذکرشده در مرحله‌ی قبل (نیروهای محوری ستون‌های طبقه‌ی بالا) قرار می‌گیرد و فرایند مذکور تا زمان رسیدن طبقه‌ی فعال به طبقه‌ی همکف تکرار می‌شود. این تذکر لازم است که معادله‌ی اساسی جهت آنالیز طبقه‌ی فعال به صورت رابطه‌ی ۱ تعریف می‌شود:

$$K^r U^r = P^r \qquad (۱)$$

که در آن، $K^r = \sum_{m=1}^{r} K^m$ ماتریس سختی کلی سازه از طبقه‌ی همکف تا طبقه‌ی r است و P^r بردار نیروهای اعمالی شامل: وزن طبقه‌ی r و نیروی محوری ستون‌های طبقه‌ی بالا، و نهایتاً U^r بردار تغییرمکان گره‌یی است. کاملاً مشهود است که جهت انجام آنالیز مرحله به مرحله‌ی یک سازه‌ی n طبقه، نیاز به انجام n آنالیز برای کل سازه است، که مستلزم صرف وقت زیاد است. از این رو به جهت کاهش حجم و زمان محاسبات، استفاده از شیوه‌ی زیرسازه[۵] می‌تواند مؤثر واقع شود. در روش مذکور، فرایند فعال‌ساختن طبقه به طبقه را می‌توان برای گروهی از طبقات با عنوان زیرسازه انجام داد و مفاهیم طبقه‌ی فعال، طبقه‌ی غیرفعال، و طبقات ساخته‌نشده را به گروهی از طبقات تعمیم داد. در اینجا نیز آنالیز گروه طبقات فعال شامل وزن آن طبقات به علاوه‌ی نیروهای ثقلی طبقات بالای آن که از واکنش روی مرزهای بین گروه طبقات فعال و گروه طبقات بالای آن وجود دارد، حاصل می‌شود.[۷]

۲.۱ آنالیز توالی ساخت با روش CFM

اثر اعمال مرحله به مرحله‌ی بار مرده‌ی سازه مطابق با ماهیت مرحله به مرحله‌ی اجرای سازه و تفاوت میزان کوتاه‌شدگی ستون‌ها براساس سهم بارگیری ثقلی آنها دو عامل بسیار مهم در طراحی سازه‌های بلندمرتبه هستند که اثر مستقیم در دقت طراحی دارد و معمولاً مورد غفلت و چشم‌پوشی واقع می‌شوند، که این غفلت سبب بروز مشکلات مشخصی در آنالیز سازه خصوصاً در طبقات فوقانی سازه خواهد بود. از جمله افرادی که طی مطالعاتشان به بررسی مسئله‌ی ذکرشده پرداخته‌اند می‌توان به چوی و کیم (۱۹۸۵) اشاره کرد که مسئله‌ی توالی ساخت را با مفهوم طبقات فعال، وارد آنالیز سازه کرده‌اند.[۷] سافارینی و ویلسون (۱۹۸۳) نیز بدون داشتن اطلاع از کار مشابه و هم‌زمان چوی و کیم، به ایجاد مدل شبیه‌ساز رفتار واقعی سازه تحت بارهای مرحله به مرحله‌ی ثقلی پرداخته‌اند.[۸] در پژوهش‌های ایشان ماتریس سختی سازه در هر لحظه از مراحل ساخت و مطابق با برنامه‌ی ساخت با اضافه‌شدن سختی اعضاء جدید افزوده‌شده، باز تولیدشده و ماتریس منحصر به فرد کلی سازه از جمع آثار تمامی ماتریس‌های سختی سازه در کلیه‌ی مراحل ساخت حاصل می‌شود. دو روش مذکور مسئله‌ی توالی ساخت را با توجه به پیشرفت‌های رخداده در صنعت رایانه وارد آنالیز سازه کرده‌اند، که اگرچه بسیار مفید هستند، لیکن شناخت الگوریتم و شیوه‌های به‌کاررفته در هرکدام نیاز به مهندسان متخصص و الگوریتم‌های پیچیده جهت برنامه‌نویسی دارد. روش CFM که روش اصلاح ضرایب نامیده می‌شود،[۹] با روشی بسیار ساده و ارائه‌ی ضرایب اصلاح جهت طرح اعضاء سازه با لحاظ‌کردن اثرات توالی ساخت در تحلیل سازه، این نقصان را به خوبی جبران کرده است.

در روش مذکور، به جای استفاده از آنالیزهای پیچیده و تکراری، ضرایب اصلاح افزاینده و یا کاهنده که از منحنی‌های ضرایب به دست‌آمده از داده‌های آماری از رفتار سازه‌های موجود، که منطبق بر طیف پاسخ طراحی جهت طرح لرزه‌یی بوده است، حاصل می‌شوند. برای استخراج منحنی اصلاح ضرایب، تعداد زیادی سازه با مشخصات متفاوت در پلان و ارتفاع تحت ۲ آنالیز به این شرح قرار می‌گیرند:

متد A: طراحی و آنالیز کلی سازه به‌صورت سنتی و یک مرحله‌یی؛

متد B: آنالیز مرحله به مرحله‌ی سازه با استفاده از روش چوی و کیم ناشی از مفهوم طبقات فعال.

با روی نمودار بُردن میزان کوتاه‌شدگی ستون‌ها بر حسب ارتفاع سازه تحت دو متد مذکور و کم‌کردن دو نمودار از هم، میزان خطای نرمال‌شده‌ی کوتاه‌شدگی ستون‌ها مطابق شکل ۳ برای هر سازه‌ی مورد بررسی حاصل می‌شود.

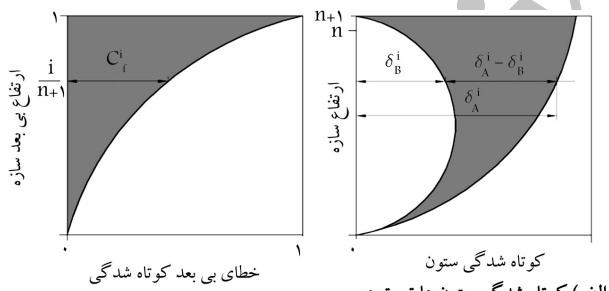
نمودار خطای نرمال کوتاه‌شدگی ستون‌ها برای هر سازه که با روش CFM حاصل شده است، با مقیاس‌کردن مطابق شکل ۴الف روی یک گراف منتقل می‌شوند تا بتوان با استفاده از روش‌های آماری به برازش بهترین ۳ منحنی گذرنده، شامل میانگین ($\overline{h}$)، میانگین به اضافه‌ی انحراف استاندارد ($\overline{h}+\sigma$)، و میانگین منهای انحراف استاندارد ($\overline{h}-\sigma$)، مطابق شکل ۴ب پرداخت.

ضرایب اصلاح برای طبقه‌ی iاُم (C_f^i)، که مبین نسبت میزان اختلاف کوتاه‌شدگی ستون‌های طبقه‌ی i به کوتاه‌شدگی طبقه‌ی آخر سازه است، مطابق رابطه‌ی ۲ به‌دست می‌آید:

$$C_f^i = \frac{(\delta_A^i - \delta_B^i)}{\delta_A^n} \qquad (۲)$$

که در آن، δ میزان کوتاه‌شدگی ستون‌ها، اندیس A و B نشان‌گر متد مورد بررسی، اندیس i و n به ترتیب نشان‌گر طبقه‌ی i و طبقه‌ی n است. بنابراین میزان خطای موجود در کوتاه‌شدگی ستون‌ها، ناشی از عدم درنظرگرفتن توالی ساخت برای طبقه‌ی iاُم مطابق رابطه‌ی ۳ از ضرب ضرایب اصلاح طبقه در کوتاه‌شدگی ستون‌های طبقه‌ی آخر ناشی از متد A حاصل می‌شود:

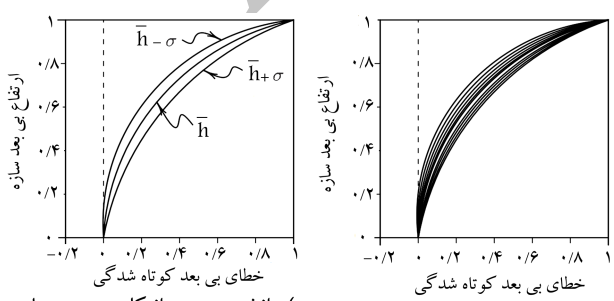
$$\delta_e^i = \delta_A^i - \delta_B^i \approx \delta_A^n \times C_f^i \qquad (۳)$$



الف) کوتاه شدگی ستون ها تحت دو متد مورد بررسی؛

ب) خطای نرمال شده ی کوتاه شدگی.

شکل ۳. محاسبه ضرایب اصلاح منحنی‌های بی‌بعد.



الف) منحنی های بی بعد کلیه ی سازه ها؛

ب) برازش سه منحنی از کلیه ی منحنی های موجود.

شکل ۴. برازش منحنی‌های خطای کوتاه شدگی.

www.SID.ir

بنابراین مقادیر موردنیاز جهت اصلاح لنگر و برش تیرهای طبقه‌ی i، با استفاده از تئوری کشسانی مطابق روابط ۴ و ۵ حاصل می‌شود:

$$M_c^i = \frac{۶EI}{L^۲(۱+۲\beta)} \times \delta_e^i \qquad (۴)$$

$$S_c^i = \frac{۱۲EI}{L^۳(۱+۲\beta)} \times \delta_e^i \qquad (۵)$$

که در آن‌ها، $\beta = \frac{۶EI}{L^۲AG}$، L طول تیر، E مدول یانگ، I ممان اینرسی، A مساحت مؤثر برشی، و G مدول برشی هستند.

مقادیر نهایی لنگر و برش اعضاء جهت اصلاح به منظور اعمال اثرات توالی ساخت، از کم‌کردن مقادیر متناظر حاصل از آنالیز متداول و لنگر و برش اصلاحی به دست‌آمده از روابط ۴ و ۵، مطابق روابط ۶ و ۷ به‌دست می‌آیند:

$$M_f^i = M_o^i - M_c^i \qquad (۶)$$

$$S_f^i = S_o^i - S_c^i \qquad (۷)$$

که در آن‌ها، M_f^i و S_f^i، لنگر و برش نهایی اصلاح‌شده و M_o و S_o، لنگر و برش ناشی از تحلیل متد A هستند.

ضریب اصلاح طبقه‌ی i چه به‌صورت گرافیکی از روی شکل ۴ب و چه با استفاده از معادلات برازشی برای سازه‌ی n طبقه به‌صورت رابطه‌ی ۸ حاصل می‌شود:

$$C_f^i = \left(\frac{i}{n+۱}\right)^{\alpha} \qquad (۸)$$

که در آن، α بسته به ارتفاع سازه متغیر است. برای سازه‌هایی که در دسته‌ی میانگین قرار دارند: $\alpha = ۲/۸$، برای سازه‌هایی که در دسته‌ی میانگین به اضافه‌ی انحراف استاندارد قرار دارند: $\alpha = ۲/۳$ و برای سازه‌های دسته‌ی میانگین منهای انحراف استاندارد: $\alpha = ۳/۳$ است. لازم به ذکر است که در دسته‌بندی مذکور سازه‌ها، دسته‌ی سازه‌های میانگین منهای انحراف استاندارد شامل سازه‌های بلندمرتبه (بالای ۳۱ طبقه)، دسته‌ی سازه‌های میانگین شامل سازه‌های میان‌مرتبه (۱۶ تا ۳۰ طبقه) و دسته‌ی سازه‌های میانگین به اضافه‌ی انحراف استاندارد شامل سازه‌های کوتاه (۱ تا ۱۵ طبقه) است. مزیت این روش در آن است که بدون انجام آنالیزهای پیچیده و زمان‌بر مرحله‌یی، فقط با استفاده از ضرایب اصلاح مشروحه، نیروهای داخلی اعضاء سازه‌یی تحت آنالیز کلی و یک‌باره‌ی سازه، اصلاح و اثر توالی ساخت در آنالیز سازه لحاظ می‌شود.[۹و۱۰]

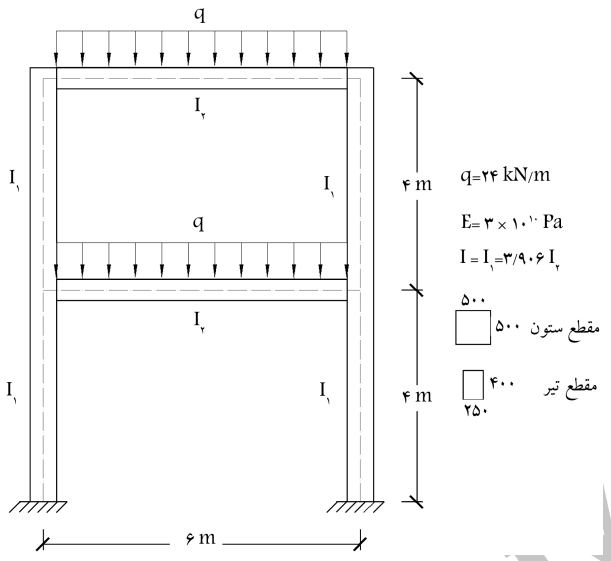
۲. معرفی آنالیز توالی ساخت

همان‌طورکه در بخش مقدمه عنوان شده است، سازه در آنالیز توالی ساخت برخلاف تحلیل متداول و یک باره‌ی کل سازه، طی مراحل ساخت، اجرا و تکمیل شده و به تعداد مراحل ساخت تحلیل می‌شود. سازه در دست احداث در هر مرحله بر روی طبقات زیرین که ناشی از وزن مرده‌ی طبقه و کف‌سازی دچار تغییرشکل‌شده‌اند، قرار می‌گیرد. تغییرشکل‌ها در هر مرحله (طبقه) محاسبه و درنهایت، کلیه‌ی تغییرشکل‌ها در هر مرحله تا زمان تکمیل نهایی سازه، با یکدیگر جمع می‌شوند و با این عمل، اثر توالی ساخت در تحلیل کشسان سازه اعمال می‌شود. در ادامه، به منظور روشن‌شدن مفهوم اثر توالی ساخت، طی دو مثال جداگانه از قاب دوبُعدی تحت بارهای ثقلی و بارهای جانبی، نحوه‌ی اعمال موضوع توالی ساخت و محاسبه‌ی تغییرشکل‌های کشسان فزاینده‌ی مراحل ساخت، معرفی و نتایج حاصل با مقادیر متناظر از نرم‌افزارهای المان محدود مانند ETABS، که امکان اعمال توالی ساخت را برای کاربر مهیا کرده‌اند، مقایسه شده است.

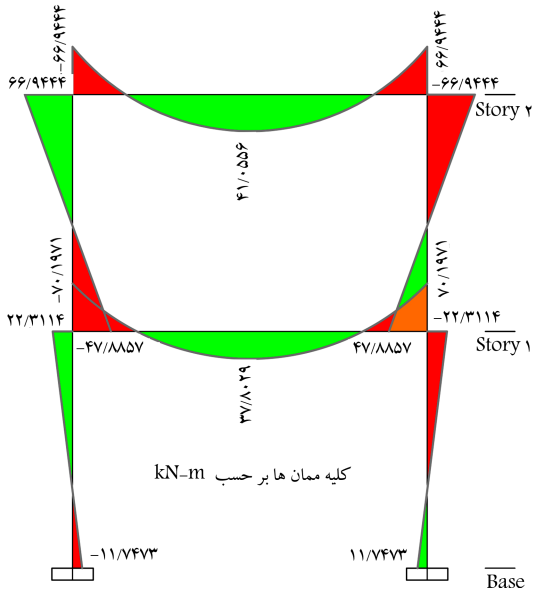
۱.۲. تحلیل کشسان توالی ساخت در قاب‌های تحت بار ثقلی

قاب دوبُعدی ۱ دهانه و دو طبقه‌ی بتنی با مشخصات مندرج در شکل ۵ به منظور تشریح مفهوم توالی ساخت با استفاده از روش شیب ـ افت مد نظر است. لازم به ذکر است که در شکل ۵، E مدول کشسانی بتن و q بارگذاری گسترده‌ی یکنواخت اعمال‌شده بر روی تیرهاست.

ممان‌های انتهایی اعضاء حاصل از نتایج آنالیز کشسان مرتبه‌ی اول سازه، که به منظور مقایسه با ممان‌های نهایی ناشی از آنالیز توالی ساخت مورد استفاده خواهد بود، در شکل ۶ نشان داده شده است. جهت انجام آنالیز توالی ساخت فرض

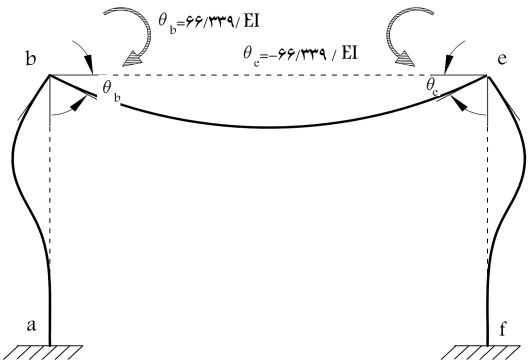


شکل ۵. مشخصات هندسی و مقاطع قاب مورد بررسی.



شکل ۶. ممان‌های انتهایی اعضاء از آنالیز متداول کلی سازه.

www.SID.ir



شکل ۷. تغییرشکل سازه پس از احداث و بارگذاری مرحله‌ی اول ساخت.

می‌شود که در هر مرحله از ساخت، یک طبقه احداث شود. به این ترتیب پس از احداث و بارگذاری طبقه‌ی اول در قدم نخست، مقادیر تغییرشکل‌های سازه شامل چرخش‌های گره‌های b و e (مطابق شکل ۷) به ترتیب برابر با $\theta_b = \frac{۶۶/۳۳۹}{EI}$ و $\theta_e = \frac{-۶۶/۳۳۹}{EI}$ محاسبه و در مرحله‌ی بعد به‌عنوان تغییرشکل‌های اولیه‌ی موجود در سازه‌ی زیرین، فقط در نوشتن معادلات شیب ـ افت ممان‌های اعضاء طبقه‌ی اول (مطابق شکل ۸) وارد می‌شوند.

همان‌طورکه مشاهده می‌شود، مقادیر اولیه‌ی چرخش‌های موجود گره‌های b و e فقط در روابط $m_۱$، $m_۲$، $m_۳$، $m_{۱۰}$، $m_{۱۱}$ و $m_{۱۲}$ مربوط به طبقه‌ی اول اعمال شده است. با نوشتن معادلات تعادل لنگر درگره‌های b، c، d و e و تشکیل ماتریس ضرایب، مجهولات مسئله به راحتی مطابق رابطه‌ی ۹محاسبه می‌شوند.

$$EI\begin{bmatrix} ۲/۱۷۰۶ & ۰/۵ & ۰ & ۰/۰۸۵ \\ ۰/۵ & ۱/۱۷۰۶ & ۰/۰۸۵ & ۰ \\ ۰ & ۰/۰۸۵ & ۱/۱۷۰۶ & ۰/۵ \\ ۰/۰۸۵ & ۰ & ۰/۵ & ۲/۱۷۰۶ \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \theta_b \\ \theta_c \\ \theta_d \\ \theta_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ۰ \\ ۷۲ \\ -۷۲ \\ ۰ \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \theta_b \\ \theta_c \\ \theta_d \\ \theta_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -۱۷/۸۸۱ \\ ۷۴/۵۷۶ \\ -۷۴/۵۷۶ \\ ۱۷/۸۸۱ \end{bmatrix} /EI \qquad (۹)$$

درنهایت با قراردادن مقادیر چرخش‌های محاسبه‌شده در معادلات شیب افت (شکل ۸)، ممان‌های نهایی ناشی از آنالیز توالی ساخت مطابق مجموعه روابط ۱۰ به‌دست می‌آیند. در روابط مذکور، کلیه‌ی ممان‌ها بر حسب کیلونیوتن ـ متر هستند.

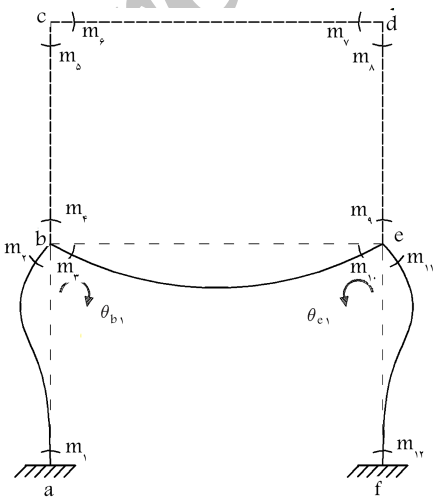
$$m_۱ = ۲۴/۳ \quad m_۵ = -m_۶ = ۶۵/۶۳ \quad m_{۱۱} = -۴۸/۴۶$$
$$m_۲ = ۴۸/۴۶ \quad m_۷ = -m_۸ = +۶۵/۶۳ \quad m_{۱۲} = -۲۴/۳$$
$$m_۳ = -۶۷/۸۶ \quad m_۹ = -۱۹/۴ \quad m_۴ = ۱۹/۴ \quad m_{۱۰} = ۶۷/۸۶ \qquad (۱۰)$$

مقایسه‌ی نتایج حاصل از مدل سازی قاب مذکور در ETABS برای انجام آنالیز توالی ساخت به منظور به دست‌آوردن ممان‌های انتهایی اعضاء، با نتایج محاسباتی دستی مطابق روابط ۱۰، همان‌طورکه در شکل ۹ نشان داده شده است، حاکی از صحت و دقت محاسبات است. اختلاف قابل توجه میان ممان‌های اعضاء ناشی از آنالیز مرحله‌یی (شکل ۹) و آنالیز متداول یک مرحله‌یی (شکل ۶) اهمیت لزوم بررسی توالی ساخت را بیش از پیش آشکار می‌سازد.

۲.۲. تحلیل کشسان توالی ساخت در قاب‌های تحت بار جانبی

قاب دو بُعدی ۱ دهانه، دو طبقه‌ی فولادی با مشخصات مندرج در شکل ۱۰ به منظور تشریح مفهوم توالی ساخت و نحوه‌ی اعمال آن در تحلیل با استفاده از روش شیب ـ اُفت مد نظر است. نتایج حاصل از تحلیل مرحله‌ی اول ساخت با فرض مراحل ساخت طبقه به طبقه در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

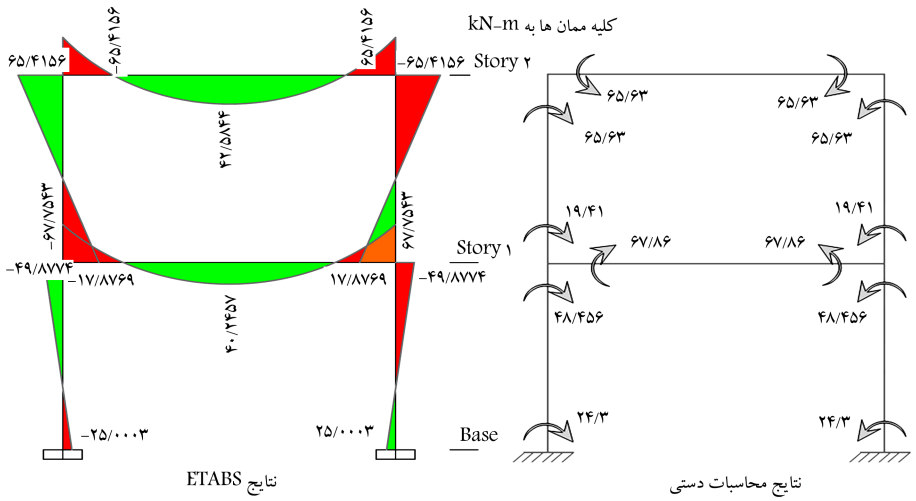
تغییرشکل‌های محاسبه‌شده در مرحله‌ی اول در قالب چرخش‌ها و انتقال گره‌ها، به‌عنوان مقادیر اولیه، فقط در نوشتن معادلات شیب ـ اُفت اعضاء طبقه‌ی اول سازه یعنی فقط در روابط $m_۱$، $m_۲$، $m_۳$، $m_{۱۰}$، $m_{۱۱}$ و $m_{۱۲}$ مطابق شکل ۱۲ وارد می‌شوند. با نوشتن معادلات تعادل لنگر درگره‌های b، c، d و e و معادلات تعادل برش در ترازهای طبقه‌های اول و دوم و تشکیل ماتریس ضرایب مربوط، مجهولات مسئله به راحتی مطابق رابطه‌ی ۱۱ به‌دست می‌آیند.



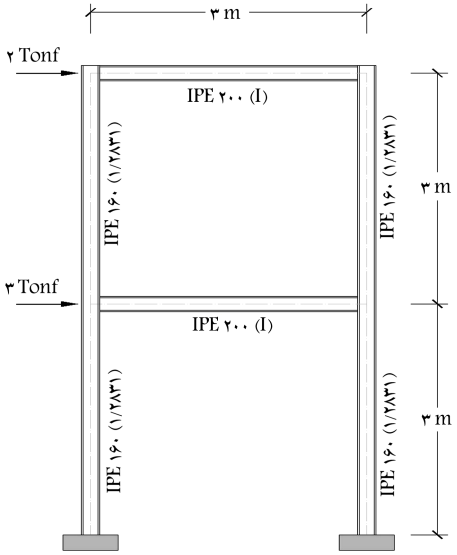
$m_۱$=۰/۵ EI (θ_b+۶۶/۳۳۹)
$m_۲$=۰/۵ EI [۲ (θ_b+۶۶/۳۳۹)]
$m_۳$ = (۳۲/۳۷۵) EI [۲ (θ_b+۶۶/۳۳۹) + (θ_b-۶۶/۳۳۹)] -۷۲
$m_۴$=۰/۵ EI(۲θ_b + θ_c)
$m_۵$=۰/۵ EI(۲θ_c+θ_b)
$m_۶$=(۳۲/۳۷۵) EI(۲θ_c+ θ_d) -۷۲
$m_۷$=(۳۲/۳۷۵) EI(۲θ_d+θ_c) +۷۲
$m_۸$=۰/۵ EI(۲θ_d+θ_e)
$m_۹$=۰/۵ EI(۲θ_e+θ_d)
$m_{۱۰}$ = (۳۲/۳۷۵) EI [۲ (θ_c-۶۶/۳۳۹) + (θ_b+۶۶/۳۳۹)] +۷۲
$m_{۱۱}$=۰/۵ EI [۲(θ_c -۶۶/۳۳۹)]
$m_{۱۲}$=۰/۵ EI (θ_c -۶۶/۳۳۹)

شکل ۸. احداث طبقه‌ی دوم روی طبقه‌ی اول تغییرشکل‌یافته.

Archive of SID
www.SID.ir

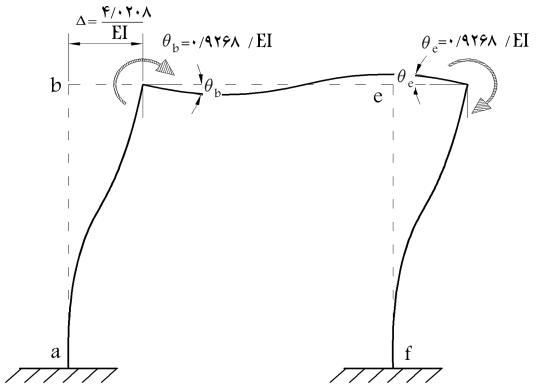


شکل ۹. مقایسه‌ی محاسبات دستی با نتایج **ETABS**.



شکل ۱۰. مشخصات هندسی و مقاطع قاب مورد بررسی.

$$EI\begin{bmatrix} ۴/۷۵۴۷ & ۰/۸۵۵۳ & ۰ & ۰/۶۶۷ & -/۸۵۵۳ & -/۸۵۵۳ \\ /۸۵۵۳ & ۳/۰۴۴ & ۰/۶۶۷ & ۰ & ۰ & -/۸۵۵۳ \\ ۰ & /۶۶۷ & ۳/۰۴۴ & ۰/۸۵۵۳ & ۰ & -/۸۵۵۳ \\ /۶۶۷ & ۰ & /۸۵۵۳ & ۴/۷۵۴۷ & -/۸۵۵۳ & -/۸۵۵۳ \\ -/۸۵۵۳ & ۰ & ۰ & -/۸۵۵۳ & ۱/۱۴۰۴ & ۰ \\ -/۸۵۵۳ & -/۸۵۵۳ & -/۸۵۵۳ & -/۸۵۵۳ & ۰ & ۱/۱۴۰۴ \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \theta_b \\ \theta_c \\ \theta_d \\ \theta_e \\ \Delta_۱ \\ \Delta_۲ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ۰ \\ ۰ \\ ۰ \\ ۰ \\ ۲ \\ ۲ \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \theta_b \\ \theta_c \\ \theta_d \\ \theta_e \\ \Delta_۱ \\ \Delta_۲ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ۱/۱۷۴۲ \\ ۰/۸۲۴۷ \\ ۰/۸۲۴۷ \\ ۱/۱۷۴۲ \\ ۳/۵۱۴۹ \\ ۴/۷۵۲۱ \end{bmatrix} /EI \quad (۱۱)$$



شکل ۱۱. تغییرشکل سازه پس از احداث و بارگذاری مرحله‌ی اول ساخت.

درنهایت با قراردادن مقادیر تغییرشکل‌های محاسبه‌شده در معادلات شیب ـ افت (شکل ۱۲)، ممان‌های نهایی ناشی از آنالیز توالی ساخت، مطابق مجموعه روابط ۱۲ حاصل می‌شوند. در روابط مذکور، کلیه‌ی ممان‌ها بر حسب تن ـ متر هستند.

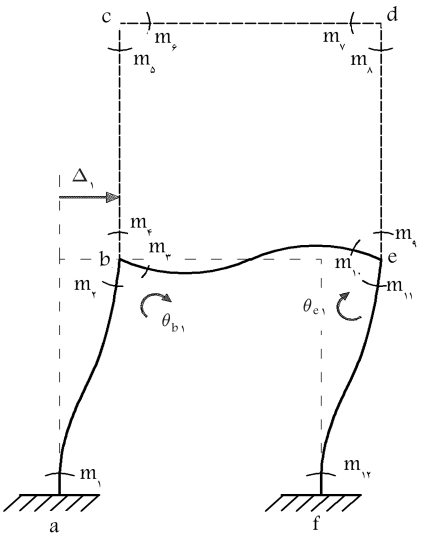
$$m_۱ = -۴/۶۴۸ \quad m_۵ = -m_۶ = -۱/۶۵ \quad m_{۱۱} = -۲/۸۴۹$$
$$m_۲ = -۲/۸۴۹ \quad m_۷ = -m_۸ = ۱/۶۴۹ \quad m_{۱۲} = -۴/۶۴۸$$
$$m_۳ = ۴/۲ \quad m_۹ = -۱/۳۵۱ \quad m_{۴} = -۱/۳۵۱ \quad m_{۱۰} = ۴/۲ \quad (۱۲)$$

مقایسه‌ی نتایج حاصل از مدل‌سازی قاب مذکور در ETABS به جهت انجام آنالیز توالی ساخت به منظور حصول ممان‌های انتهایی اعضاء، با نتایج محاسبات دستی مطابق شکل ۱۳ نشان از صحت محاسبات دارد.

۳. مطالعه‌ی موردی: ساختمان مسکونی ۲۱ طبقه‌ی فولادی در تهران

در این سازه اثر لحاظ‌کردن برنامه‌ی ساخت در طراحی و در پی آن میزان تفاوت در تغییرشکل‌ها و تغییر نیروهای طراحی برای اعضاء مختلف سازه شامل: تیر، ستون، و مهاربند مورد بررسی قرار گرفته است. سازه‌ی موردنظر، ساختمان ۲۱

Archive of SID
www.SID.ir



$m_1 = 2/566\ EI\ 3\ [\ (\theta_b + 0/9268) - (\Delta_1 + 4/0208)\ ]$

$m_2 = 2/566\ EI\ 3\ [\ 2(\theta_b + 0/9268) - (\Delta_1 + 4/0208)\ ]$

$m_3 = 2\ EI/3\ [2\ (\theta_b + 0/9268) + (\theta_e + 0/9268)\ ]$

$m_4 = 2/566\ EI/3\ (2\theta_b + \theta_c - \Delta_2)$

$m_5 = 2/566\ EI/3\ (2\theta_c + \theta_b - \Delta_2)$

$m_6 = 2\ EI/3\ (2\theta_c + \theta_d)$

$m_7 = 2\ EI/3\ (2\theta_d + \theta_c)$

$m_8 = 2/566\ EI/3\ (2\theta_d + \theta_e - \Delta_2)$

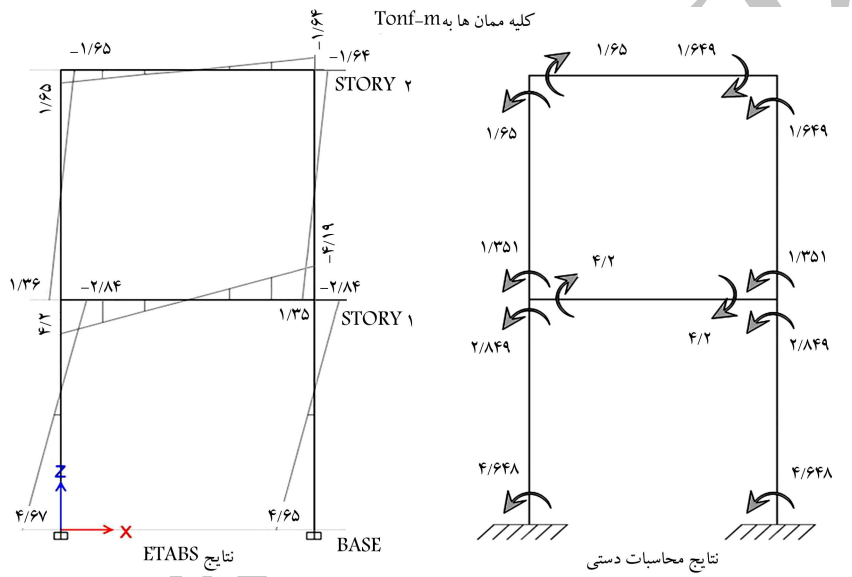
$m_9 = 2/566\ EI/3\ (2\theta_e + \theta_d - \Delta_2)$

$m_{10} = 2\ EI/3\ [2\ (\theta_e + 0/9268) + (\theta_b + 0/9268)\ ]$

$m_{11} = 2/566\ EI\ 3\ [\ 2(\theta_e + 0/9268) - (\Delta_1 + 4/0208)\ ]$

$m_{12} = 2/566\ EI\ 3\ [\ (\theta_e + 0/9268) - (\Delta_1 + 4/0208)\ ]$

شکل ۱۲. احداث طبقه‌ی دوم روی طبقه‌ی اول تغییرشکل‌یافته.



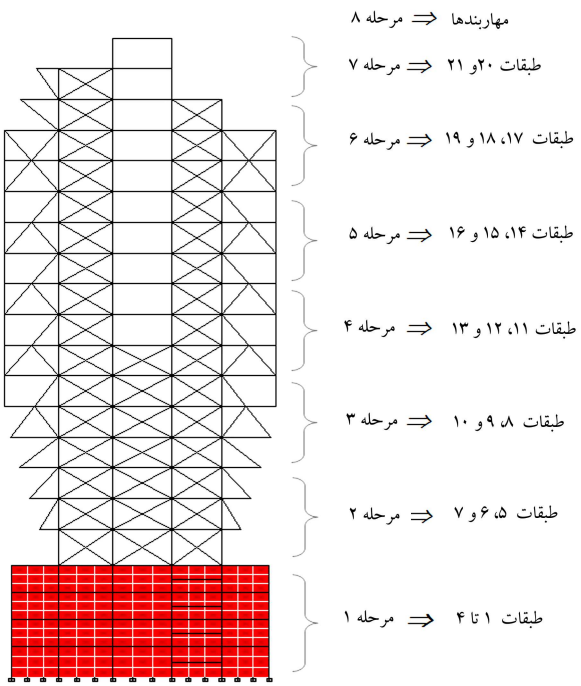
شکل ۱۳. مقایسه‌ی محاسبات دستی با نتایج **ETABS**.

طبقه‌ی فولادی با تعریف مراحل اجرا مطابق شکل ۱۴ و مشخصات هندسی سازه مطابق شکل ۱۵ است. در مرحله‌ی اول ساخت ۴ طبقه‌ی زیرزمین و در مرحله‌ی دوم تا ششم، هر ۳ طبقه به‌صورت یک‌جا و واحد ساخته شده‌اند. در مرحله‌ی هفتم، طبقات ۲۰ و ۲۱ و نهایتاً در مرحله‌ی آخر، مهاربندها نصب شده‌اند. مقایسه‌ی نتایج حاصل از آنالیز متداول و آنالیز مرحله‌یی سازه منطبق با برنامه‌ی ساخت مطابق آنچه در شکل ۱۴ عنوان شده است، درخصوص تغییرمکان قائم نقطه‌یی دلخواه در تراز ۹اُم در شکل ۱۶ نشان داده شده است. این تذکر لازم است که منظور از مهاربندها، فقط بادبندهای قرارگرفته بین محورهای ۱ تا ۴ مطابق پلان شکل ۱۷ است و دستک‌های خارج از محورهای ۱ و ۴ هر طبقه در زمان ساخت طبقه‌ی مربوطه (مراحل ۲ تا ۶) احداث شده‌اند. ترکیب بار مورد استفاده در تحلیل توالی ساخت $D_L + 0/2L_L$ انتخاب شده است. سیستم باربر جانبی سازه‌ی موردنظر قاب فولادی خمشی متوسط و قاب فولادی خمشی متوسط + بادبندی هم‌محور، بارگذاری ثقلی مطابق مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ایران،[۱۱] و بارگذاری بار جانبی براساس آئین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ زلزله،[۱۲] و طراحی سازه براساس آئین‌نامه‌ی AISC-ASD ۸۹،[۱۳] و مبحث دهم مقررات ملی ایران،[۱۴] است. سیستم سقف از نوع کامپوزیتی و ارتفاع طبقات ۳/۴ متر است. مقاطع اعضاء سازه در جدول ۱ نشان داده شده است.

نام مقاطع تخصیص‌یافته به اعضاء سازه‌یی جدول ۱، مشخصات مندرج در جدول ۲ را دارند. این تذکر لازم است که مقاطع مهاربندهای حد فاصل محورهای ۱ تا ۲ و ۳ تا ۴ از نوع ۲UNP۱۴۰ و مهاربندهای حدفاصل محورهای ۲ تا ۳ از ۲UNP۲۰۰ و کلیه‌ی دستک‌های سازه از مقطع ۲UNP۲۲۰ انتخاب شده‌اند.

همان‌طور که در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود، تغییرمکان قائم مشخص‌شده در آنالیز توالی ساخت، به شکل قابل ملاحظه‌یی از مقدار نظیر در تحلیل سنتی بیشتر است. دلیل این امر این است که در تحلیل متداول و یک‌باره‌ی سازه، وجود مهاربندها سبب کاهش چشم‌گیر تغییرمکان نقطه‌ی مذکور می‌شود، حال آنکه به دلیل عدم

www.SID.ir



شکل ۱۴. مراحل ساخت و اجرای لحاظ‌شده در آنالیز مرحله‌یی.

نصب مهاربندها تا مرحله‌ی هشتم از ساخت، تغییرمکان نقطه‌ی مذکور حدود ۴۸٪ افزایش می‌یابد.

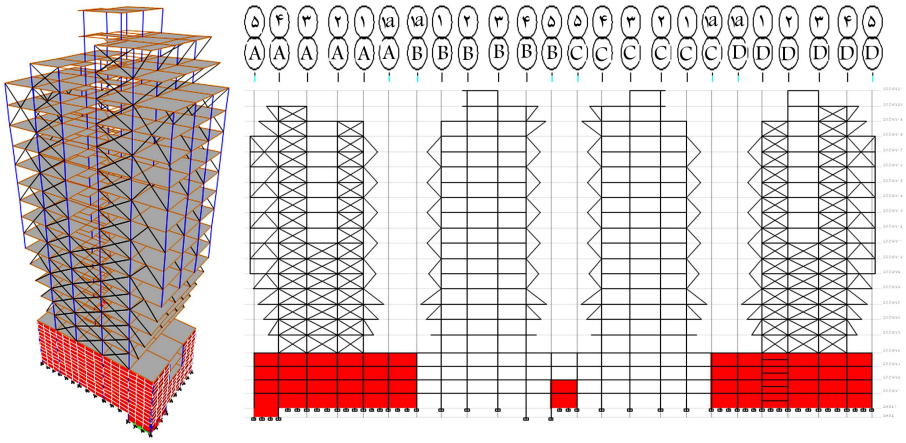
تیر مشخص‌شده در پلان سازه مطابق شکل ۱۷، واقع روی محور ۱ بین محورهای A و B به جهت مقایسه‌ی لنگر و برش تیر تحت سه آنالیز متداول، مرحله‌یی و روش CFM انتخاب شده است. انتخاب تیر مذکور از آن جهت که بین دو سیستم متفاوت باربر ثقلی قرار گرفته و امکان نمود واضح تر اختلاف نتایج بین آنالیزهای مذکور را مهیا می‌سازد، صورت گرفته است. درصد تغییرات لنگر خمشی و نیروی برشی تیر مذکور در کلیه‌ی طبقات نسبت به مقادیر حاصل از آنالیز مرحله‌یی در شکل ۱۸ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که لنگر و برش محاسبه‌شده ناشی از آنالیز متداول سازه، از طبقه‌ی ۷اُم تا طبقه‌ی انتهایی افزایش چشم‌گیری نسبت به مقادیر متناظر ناشی از آنالیز توالی ساخت نشان می‌دهد، به گونه‌یی که متوسط این افزایش برای لنگر و برش به ترتیب ۳۷٪ و ۲۳٪ است. مطلب فوق به این معناست که در صورت عدم لحاظ‌کردن آنالیز مرحله‌یی و انجام تحلیل سنتی،

جدول ۱. اسامی مقاطع اعضاء تخصیص‌یافته‌ی سازه‌ی مورد بررسی.

طبقات	اعضاء		
	تیر		ستون
	جهت x	جهت y	
۱۹ تا ۲۱	B۳	B۴	C۸
۱۷ و ۱۸	B۳	B۴	C۷
۱۵ و ۱۶	B۱	B۴	C۶
۱۳ و ۱۴	B۱	B۴	C۵
۱۱ و ۱۲	B۲	B۴	C۴
۹ و ۱۰	B۲	B۴	C۳
۷ و ۸	B۲	B۴	C۲
۵ و ۶	B۲	B۴	C۱
۱ تا ۴	B۱	B۴	C۱

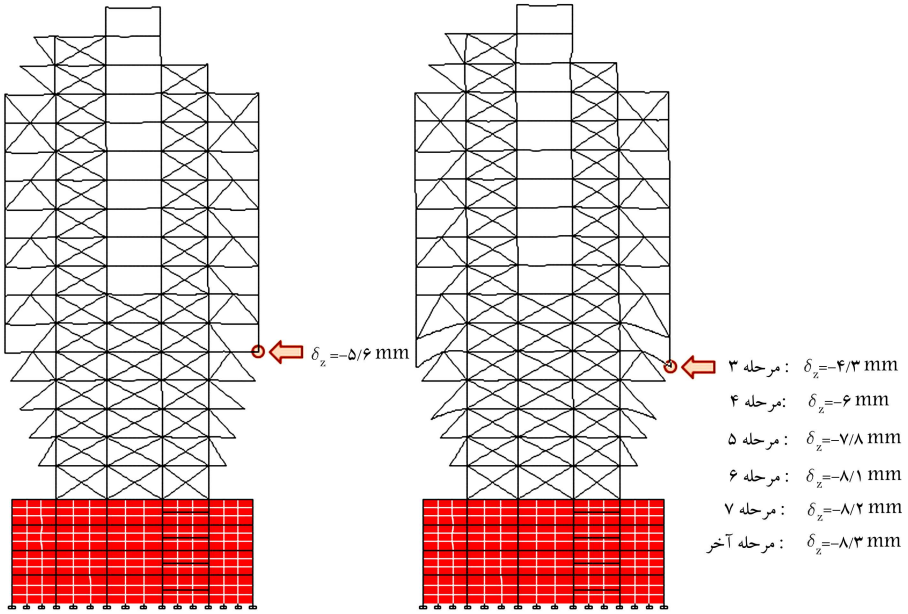
جدول ۲. مقاطع اعضاء سازه‌ی مورد بررسی.

نام مقطع	مشخصات مقاطع (تیرها I شکل و ستون‌ها قوطی‌شکل) ابعاد به میلی‌متر
C۱	BOX ۵۶۰ × ۵۶۰ × ۳۰
C۲	BOX ۵۱۰ × ۵۱۰ × ۳۰
C۳	BOX ۴۶۰ × ۴۶۰ × ۳۰
C۴	BOX ۴۵۰ × ۴۵۰ × ۲۵
C۵	BOX ۴۰۰ × ۴۰۰ × ۲۵
C۶	BOX ۳۹۰ × ۳۹۰ × ۲۰
C۷	BOX ۳۴۰ × ۳۴۰ × ۲۰
C۸	BOX ۲۸۰ × ۲۸۰ × ۲۰
B۱	۲ PL ۲۴۰ × ۲۵+ PL ۴۵۰ × ۸
B۲	۲ PL ۲۷۰ × ۲۵+ PL ۴۵۰ × ۸
B۳	۲ PL ۲۰۰ × ۱۵+ PL ۴۰۰ × ۸
B۴	۲ PL ۲۰۰ × ۱۲+ PL ۴۰۰ × ۸

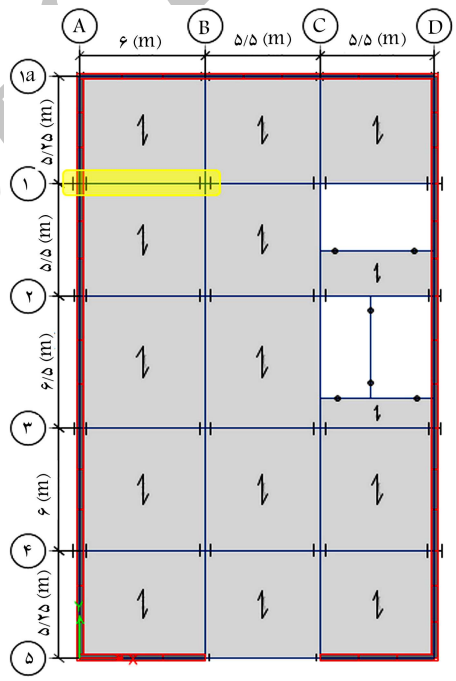


شکل ۱۵. مشخصات هندسی سازه‌ی مورد بررسی.

Archive of SID
www.SID.ir

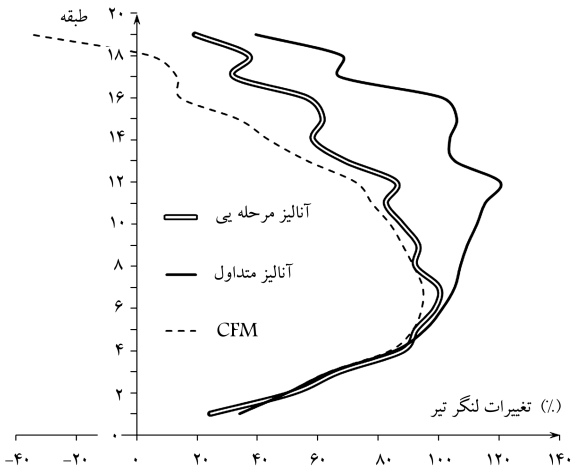


شکل ۱۶. مقایسه‌ی تغییرمکان تحت دو آنالیز متداول و مرحله‌یی.

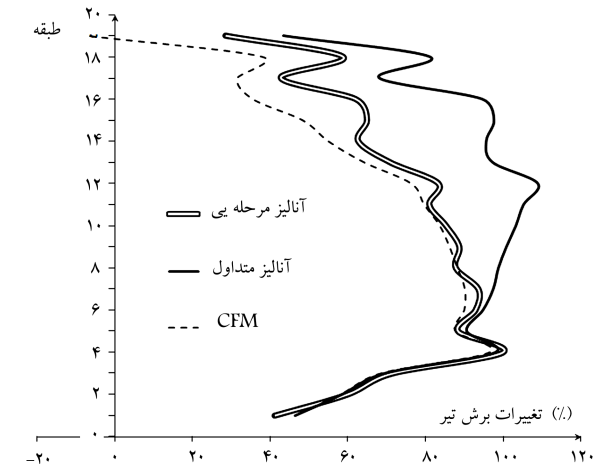


شکل ۱۷. موقعیت تیر مد نظر در پلان سازه.

طرح تیرهای مذکور محافظه‌کارانه و غیراقتصادی بوده است. دلیل این امر را می‌توان در عدم انطباق طراحی با مراحل عملی اجرا دانست. تیر مذکور، که واسط دو سیستم سازه‌یی متفاوت است، در اثر کوتاه‌شدگی متفاوت ستون‌های دو سیستم در دو طرف تیر، تغییرمکان‌های متفاوت خواهد داشت، که منجر به شکل‌گیری لنگر طراحی قابل ملاحظه در آنالیز متداول می‌شود. لیکن عدم نصب مهاربند تا مرحله‌ی هشتم از مراحل عملی ساخت، تغییرمکان‌های دو سر تیر را یکسان کرده است و لذا لنگر القاشده به تیر، کاهش چشم‌گیری در آنالیز مرحله‌یی منطبق بر مراحل واقعی اجرا خواهد داشت.



الف) درصد تغییرات لنگر تیر مورد بررسی؛



ب) درصد تغییرات برش تیر مورد بررسی.

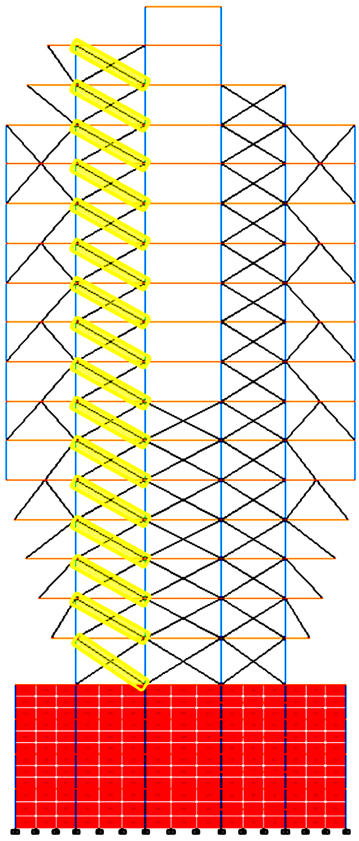
شکل ۱۸. مقایسه نیروهای داخلی تیر مورد بررسی تحت سه روش مدنظر.

www.SID.ir

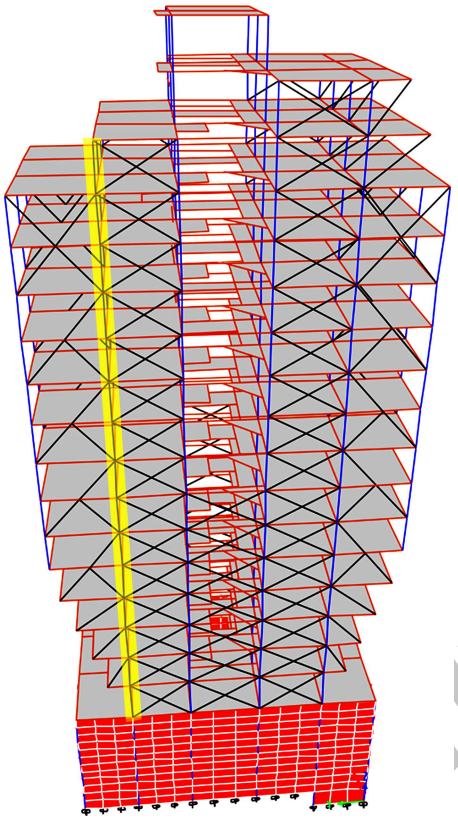
برای مهاربندهای مشخص‌شده در شکل ۱۹، نتایجی مشابه تیرهای مذکور حاصل می‌شود. افزایش تقریبی ۵۰۰ درصدی نیروی محوری مهاربندها در آنالیز متداول نسبت به مقادیر متناظر واقعی از آنالیز مرحله‌یی، همان‌طورکه در شکل ۲۰ که درصد تغییرات مقادیر مذکور نسبت به مقادیر آنالیز مرحله‌یی را نشان می‌دهد، حاکی از طرح غیراقتصادی و فوق‌العاده محافظه‌کارانه‌ی مهاربندها در طراحی براساس نیروهای به دست‌آمده از آنالیز متداول است.

برخلاف مطالب ذکرشده برای تیرها و مهاربندها، مقایسه‌ی نتایج آنالیز متداول و مرحله‌یی برای ستون‌های مشخص‌شده در شکل ۲۱ گویای نتایج متفاوتی است.

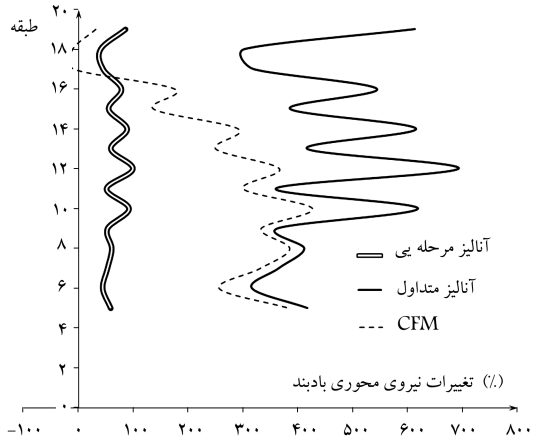
نمودارهای مربوط به درصد تغییرات نیروی محوری ستون مورد بررسی تحت ۳ آنالیز مورد بررسی، که نسبت به مقادیر آنالیز متداول بی‌بُعد شده است، در شکل ۲۲ نشان داده شده است. نتایج مبین آن است که نیروی مؤثر طراحی در تحلیل به روش متداول، تقریباً ۱۴٪ کمتر از مقدار متناظر ناشی از آنالیز توالی ساخت برآورد شده است و این بدان معنی است که طراحی ستون مذکور با نیروهای حاصل از تحلیل متداول مخاطره برانگیز بوده است؛ چرا که نیروهای حاصل از مقادیر واقعی ناشی از تحلیل توالی ساخت که منطبق بر واقعیت است، کمتر بوده و ضریب اطمینان عملکرد ستون‌ها کاهش یافته است. از طرف دیگر، روش CFM به دلیل ماهیت کاهندگی ضرایب اصلاح، پیش‌بینی درستی از نیروی محوری ستون نداشته و نیروی مذکور را



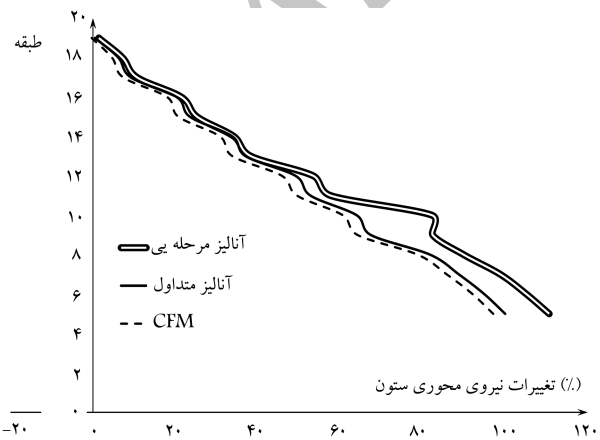
شکل ۱۹. موقعیت بادبندهای مورد بررسی.



شکل ۲۱. موقعیت ستون مورد بررسی.



شکل ۲۰. درصد تغییرات نیروی بادبندها تحت آنالیزهای مورد بررسی.



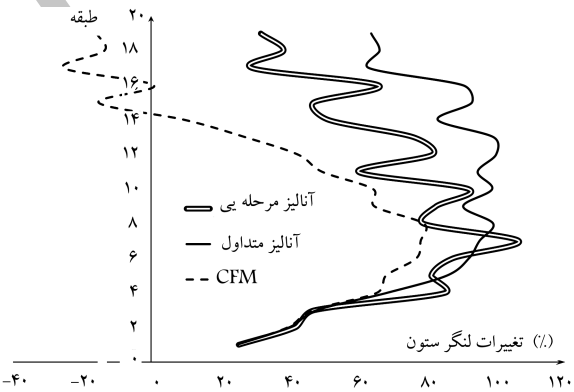
شکل ۲۲. درصد تغییرات نیروی محوری ستون تحت آنالیزهای مورد بررسی.

www.SID.ir

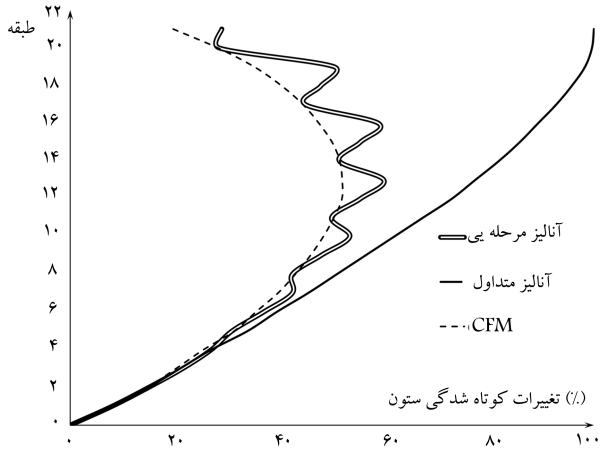
کمتر از مقادیر واقعی ناشی آنالیز مرحله‌یی و حتی آنالیز متداول برآورد کرده است.

نمودارهای مربوط به درصد تغییرات لنگر خمشی پای ستون‌های مورد بررسی در طبقات، تحت ۳ آنالیز مورد بررسی که نسبت به مقادیر آنالیز متداول بی‌بُعد شده است، در شکل ۲۳ نشان داده شده است. این تذکر لازم است که روش CFM لنگرهای اصلاح‌شده‌ی ستون‌ها را فقط با استفاده از برقراری رابطه‌ی تعادل لنگر در گره‌های اتصال تیر و ستون برآورد می‌کند. تخمین لنگرهای اصلاح‌شده‌ی ستون‌ها از تعادل لنگرهای اصلاحی، با تقریب قابل ملاحظه در طبقات فوقانی سازه، بالاخص در صورت وجود عضو مهاربند در گره‌ی اتصال همراه خواهد بود (شکل ۲۳). درصد تغییرات کوتاه‌شدگی ستون واقع بر تقاطع محورهای ۳ و B در سه حالت آنالیز مورد بررسی پژوهش حاضر، که نسبت به مقادیر آنالیز متداول بی بُعد شده است، در شکل ۲۴ نشان داده شده است. مقایسه‌ی نحوه‌ی تغییرشکل ستون مورد بررسی در شکل ۲۴ با رفتار مورد انتظار مطابق نمودار شکل ۱، نشان از صحت عملکرد پژوهش حاضر دارد.

آن چنانکه در شکل ۲۴ مشاهده می‌شود، تا حدود طبقه‌ی هشتم تفاوت قابل ملاحظه‌یی بین مقادیر کوتاه‌شدگی ستون مورد بررسی تحت آنالیزهای متداول و مرحله‌یی به چشم نمی‌خورد، لیکن آنالیز مرحله‌یی سازه، مقدار واقعی کوتاه‌شدگی ستون مذکور در طبقه‌ی آخر را تقریباً ۲۹٪ مقدار متناظر ناشی از آنالیز یک‌باره‌ی سازه نشان می‌دهد. مسئله‌ی ذکرشده منجر به طرح غیراقتصادی تیرها و بادبندهای سازه علی‌الخصوص در طبقات فوقانی سازه و عدم استفاده‌ی مطلوب از ظرفیت اعضاء سازه‌یی فوق می‌شود.



شکل ۲۳. درصد تغییرات لنگر ستون تحت آنالیزهای مورد بررسی.



شکل ۲۴. درصد تغییرات کوتاه‌شدگی ستون تحت آنالیزهای مورد بررسی.

نمودار کوتاه‌شدگی ستون در آنالیز مرحله‌یی (مطابق شکل ۲۴) شکل دندانه‌یی دارد، که مسئله‌ی فوق به دلیل اجرای هر ۳ طبقه در یک مرحله از ساخت مطابق برنامه‌ی اجرای سازه است. فرض اجرای هم‌زمان هر ۳ طبقه در هر واحد ساخت باعث می‌شود که کوتاه‌شدگی ستون‌های طبقات فوقانی هر مرحله از ساخت همانند آنالیز متداول به‌صورت تجمعی افزایش داشته و با نزدیک‌شدن رفتار به حالت متداول، مقدار کوتاه‌شدگی طبقات فوقانی هر واحد ساخت با انحراف از مقدار متناظر طبقه‌ی اول همان واحد، شکل دندانه‌یی داشته باشد. مطلب مذکور از جمله نقاط ضعف روش CFM در عدم توانایی لحاظ‌کردن شرایط ساخت مجموعه‌ی طبقات در یک زمان است. روش CFM با فرض مراحل ساخت طبقه به طبقه فقط کوتاه‌شدگی ستون‌های طبقه‌ی اول از هر واحد ساخت را به‌صورت صحیح مطابق شکل ۲۴ برآورد می‌کند.[۱۵و۱۶]

۴. نتیجه‌گیری

در این نوشتار، آنالیز مرحله‌یی سازه منطبق با مراحل عملی اجرا، با عنوان آنالیز دقیق توالی ساخت با استفاده از نرم افزار ETABS مورد بررسی قرار گرفته است. نحوه‌ی محاسبه‌ی دستی تغییرشکل‌های کشسان سازه تحت بارهای ثقلی و جانبی در هر مرحله از ساخت به جهت منظورکردن اثرات توالی ساخت سازه و آگاهی از نحوه‌ی عملکرد نرم‌افزار عنوان شده است. به منظور مقایسه‌ی رفتار سازه در قالب تغییرشکل‌ها و تغییر نیروهای داخلی اعضا تحت ۳ آنالیز توالی ساخت، آنالیز متداول، و روش‌های ساده‌ی شبیه‌ساز رفتار واقعی (CFM)، مطالعه‌ی موردی سازه‌ی عینی پژوهش حاضر صورت گرفته است.

نتایج حاصل از بررسی مطالعه‌ی موردی پژوهش حاضر نشان داده است که عدم منظورکردن توالی ساخت سازه می‌تواند منجر به بروز مشکلات قابل توجه در طراحی سازه‌های بلندمرتبه، بالاخص در طبقات فوقانی سازه شود. عدم لحاظ اثرات توالی ساخت و غفلت از کوتاه‌شدگی واقعی ستون‌ها در سازه‌ی مورد بررسی، موجب طرح غیراقتصادی و محافظه‌کارانه‌ی تیرها و بادبندها شده و با توجه به اینکه طراحی مقاطع اعضاء سازه براساس آنالیز متداول سازه صورت گرفته است، در عمل به طور متوسط و به ترتیب فقط از ۵۷ و ۲۰ درصد ظرفیت تیرها و بادبندهای مورد بررسی در طبقات یک چهارم فوقانی سازه استفاده شده است. از طرفی ستون‌هایی وجود داشته‌اند که طرح آنها براساس نیروهای داخلی کوچک‌تر آنالیز متداول نسبت به مقادیر متناظر از آنالیز مرحله‌یی، مخاطره‌برانگیز بوده و روش CFM نیز به دلیل ماهیت کاهندگی روش برآورد درستی از نیروهای مذکور ارائه نداده است، که اهمیت لزوم انجام آنالیز مرحله‌یی را بیش از پیش آشکار می‌سازد.

اگرچه روش CFM نسبت به روش دقیق، حجم محاسبات کمتر و سرعت بالاتر دارد، لیکن استفاده از آن در این موارد مشروحه با تقریب قابل ملاحظه همراه خواهد بود:

۱. تخمین لنگرهای اصلاح‌شده‌ی نهایی ستون‌ها با برقراری رابطه‌ی تعادل لنگر در گره اتصال تیر و ستون در طبقات فوقانی سازه بالاخص در صورت وجود عضو مهاربند در گره اتصال.

۲. سازه با برنامه‌ی ساخت مبنی بر احداث مجموعه‌یی از طبقات در یک واحد زمانی.

۳. تقدم و تأخر مراحل ساخت و نصب اعضاء سازه به گونه‌یی که مراحل ساخت طبقه به طبقه رعایت نشود.

Archive of SID
www.SID.ir

پانوشت‌ها

1. correction factor method
2. active floor
3. inactive floors
4. deactivated floors
5. substructuring technique

منابع (References)

1. Esmaili, O. "Considering sequential construction methods of reinforced concrete high-rise buildings with material time-dependency effects", M.Sc. Dissertation, University of Tehran (2008).
2. Esmaili, O., Epackachi, S., Mirghaderi, R., Ghalibafian, M. and Taheri, A.A., "Evaluation of the construction sequence loading effects on seismic performance of high-rise buildings with different structural systems", *Proceedings of 9th Canadian Conference on Earthquake Engineering*, Ottawa, Ontario, Canada (2007).
3. Kwak, H.G. and Kim, J.K. "Time-dependent analysis of RC frame structures considering construction sequences", *Building and Environment,* **41**(10), pp. 1423-1434 (2006).
4. Vafai, A., Ghabdian, M., Estekanchi, H.E. and Desai, C.S. "Calculation of creep and shrinkage in tall concrete buildings using nonlinear staged construction analysis", *Asian Journal of Civil Engineering,* **10**(4), pp. 409-426 (2009).
5. Dinar, Y., Munshi, M.R., Chowdhury. M. and Ashraf, M. "Chronological construction sequence effects on reinforced concrete and steel buildings", *The International Journal of Engineering And Science (IJES),* **3**(1), pp. 52-63 (2014).
6. Lokanath Reddy, M. and Kumar, A. "Construction sequential analysis and design of Rc high rise buildings by etabs", *International Journal of Research (IJR)*, **2**(12), pp. 247-250 (2015).
7. Choi, C.-K. and Kim, E.-D. "Multistory frames under sequential gravityloads", *Journal of Structural Engineering ASCE,* **111**(11), pp. 2373-2384 (1985).
8. Saffarini, H.S. and Wilson, E.L. "New approaches in the structural analysis of building systems", Research Report No. UCB/SEMM-83/08; Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, USA (in Persian) (1983).
9. Choi, C.K., Chung, H.K., Lee, L.G. and Wilson, E.L. "Simplified building analysis with equential dead loads—CFM", *Journal of Structural Engineering ASCE*, **118**(4), pp. 944-954 (1992).
10. Han-Soo, K., Se-Hun, J., Seung-Hak, S. and Jae-Pyo, P. "Simplified column shortening analysis of a multistorey reinforced concrete frame", *Struct. Design Tall Spec. Build.,* **21**(6), pp. 405-415 (2012).
11. *Iranian National Building Code*, Part 6th , Design Loads for Buildings (2013).
12. *Iranian Building Codes And Standards*, Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings, Standard No.2800, 4th Edition (2014).
13. AISC, *Specification for Structural Steel Buildings-Allowable Stress Design and Plastic Design*, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL, USA (1 June 1989).
14. *Iranian National Building Code*, Part 10th, Design and Construction of steel buildings, 4th Edition (2013).
15. Han-Soo, K., Se-Hun, J., and Seung-Hak, S. "Column shortening analysis of tall buildings with lumped construction sequences", *Struct. Design Tall Spec. Build.*, **21**(10), pp. 764-776 (2012).
16. Zhao, X. and Dong, P.W. "Impact of construction sequence on structural seismic performance – A virtual oad method", Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers (HUSCAP) (2013).

Archive of SID

www.SID.ir